



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA SECAGEM DE PLACAS DE GESSO:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO EM ESCALA LABORATORIAL**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JACEK STANISLAW MICHALEWICZ

Recife, Julho de 2003

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA SECAGEM DE PLACAS DE GESSO:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO EM ESCALA LABORATORIAL**

JACEK STANISLAW MICHALEWICZ

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE.**

**Profa. Dra. RITA DE CÁSSIA FERNANDES DE LIMA
COORDENADORA DO CURSO**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (ORIENTADOR-UFPE)

Prof. Dr. JORGE R. HENRIQUEZ GUERRERO (CO-ORIENTADOR-UFPE)

Prof. Dr. FABIO SANTANA MAGNANI (EXAMINADOR INTERNO-UFPE)

Prof. Dr. KAMAL A. R. ISMAIL (EXAMINADOR EXTERNO-FEM-UNICAMP)

DEDICATÓRIA

À minha esposa Glauce, pelo apoio, paciência e compreensão demonstrado durante a realização deste trabalho, a meu filho Lucas, que mesmo sem entender, soube compreender e aceitar o tempo que deixei de dedicar a ele, para a conclusão desta tarefa, e a Pujanci pelo apoio diário.

Aos meus pais, Kazimierz e Gabriela, pela educação, apoio e exemplo de força e perseverança imprescindíveis na conquista desta realização, sem os quais este caminho não teria sido percorrido.

Aos meus irmãos, Malgorzata e seu esposo Tauil, Michal e sua esposa Sylvinha, que me deram apoio. E em especialmente a Katarzyna, que com seus conhecimentos tornou essencial o andamento deste trabalho. Também quero dedicar a Gilka, Jailton e Jayro com suas famílias, que sempre estiveram torcendo pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

A Deus que tem me dado o cobertor conforme o frio, que ilumina a estrada que devo percorrer, e que me conforta nos momentos difíceis.

Ao Professor José Carlos Charamba Dutra pelos valiosos ensinamentos imprescindíveis para a elaboração desta dissertação, também pelo apoio moral e profissional nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Ao Professor Jorge Henríquez pela colaboração através de seus conhecimentos, que contribuiu para o enriquecimento deste trabalho.

Aos professores Fabio Magnani, Ana Rosa e Rita Lima, e todo pessoal que compõem o GET, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Mecânica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica desta universidade.

A CAPES pelo suporte financeiro durante o período de realização deste trabalho.

Às empresas POLIFRIO Ltda, TIGRE tubos e conexões e JSM Engenharia, que com suas doações de bens e serviços, puderam alavancar este trabalho de dissertação.

RESUMO

O estado de Pernambuco detém a quase totalidade das reservas de gipsita do Brasil. A exploração comercial destas reservas numa escala nacional não tem mais de três décadas. No início toda atividade comercial era basicamente exportar a matéria prima para ser beneficiada no sul do país, a um preço muito barato. A consciência de que era necessário agregar valor ao gesso, e a seus produtos derivados, fez com que as empresas do pólo gesseiro de Pernambuco, buscassem desenvolvimento tecnológico para processo e produtos. Numa tentativa de participar desse processo de desenvolvimento, a Universidade Federal de Pernambuco vem desenvolvendo vários trabalhos de pesquisa. Dentro deste contexto, e detectada a carência de tecnologia de secagem na elaboração dos produtos moldados de gesso, foi iniciado um processo de negociações e captação de recursos, que propiciaram o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo foi de desenvolver um secador de laboratório que permita fazer secagem de placas planas de gesso. O secador é composto de um túnel de seção quadrada, de 40 cm de lado com 6m de comprimento, composto por seis módulos, dentre eles um módulo de entrada do ar, um para o tratamento do ar tendo um ventilador e um banco de resistência com a potência total de 8 KW, um módulo de laminação do fluxo de ar, e uma secção de testes para até cinco placas. Para levantar os dados sobre a secagem, foram colocados no corpo do secador, sensores de umidade, de temperatura e de pressão, e uma balança digital com 0,01g de precisão, cuja aquisição dos dados foram feitas por um sistema DataLogger, com um módulo de condicionamento de sinal de vinte canais. De modo a avaliar a secagem da placa, foram medidas a vazão de ar, o conteúdo de umidade, e a temperatura. Esta última foi medida em diversos níveis de profundidade no interior da placa, através de termopares, de modo a levantar um perfil de temperatura desta. Com exceção das medições supracitadas o peso da placa, a temperatura e umidade relativa do ar do ambiente externo, foram registrados ao longo do processo de secagem através de imagens do painel da balança e do higrotermógrafo digital, conforme será detalhado no capítulo 5. Os dados experimentais obtidos permitiram avaliar o comportamento de parâmetros importantes num processo de secagem, como a curva do conteúdo de umidade, a curva da taxa de secagem e, com o auxílio dos modelos matemáticos, comparar os tempos de secagem teóricos com os experimentais. O experimento possibilitou ainda, o cálculo da difusividade média do gesso, o conteúdo de umidade crítica, e a de equilíbrio. Os dados experimentais possibilitaram também a avaliação da influência do espaçamento entre as placas no tempo de secagem. Esses resultados certamente permitirão, a posteriori, uma comparação, ainda que qualitativa, com os resultados obtidos no processo de fabricação industrial.

ABSTRACT

The Pernambuco State in North-eastern Brazil has most of chalk reserves in the country. The commercial exploitation of these reserves has been taking place for thirty years. In the beginning, all the chalk produced was bought at low prices by manufacturing companies established in the South-eastern Brazil. The necessity of processing the produced chalk, leded local companies to invest in technology for enhance their products and productivity. Trying to collaborate with these companies, the Federal University of Pernambuco has developing many research projects in this field of knowledge. Was detected that one major aspect that lessens the profits of the chalk sector in Pernambuco is outdated technology employed for drying the chalk moulded products. In this light, this research project aims to introduce new techniques for drying chalk moulded products. The main target for the first phase was to devise a test rig with a dryer in laboratorial scale. The dryer has capacity for drying square section moulded frames with 0.16 m². The dryer has more than 6 m of length and capacity for testing up to 5 commercial frames. The air flow passes through a screen for stabilisation purposes, according ISO standards for fan testing, and the air is heated in an electric resistance with 8 kW capacity. Data are collected by moisture sensors, thermocouples and pressure probes spread in the whole length of the dryer. The measurement equipments are monitored by the use of a Labview system with a 20 signal channel unit. The assessment of the frame drying phenomena will take place by the analysis of the data collected in function of the chamber pressure variation, change of the volumetric air flow rate, humidity, temperature and frame weight. The temperature is measured in the core of the frame, through thermocouples. Proceeding in this way, it is possible to create a temperature profile for the frame. The digital balance used has a precision of 0,01 g. The data acquisition is performed by a Data Logger system, with a 20 channel conditioning module. For evaluating the frame drying phenomena, the air mass flow rate, the humidity and its temperature is assessed. The temperature was measured in many layers of bulk of the frame, for the establishment of its temperature profile. The following variables are registered through the drying process from the balance display and the digital hygrothermographer (as described in the chapter 5). The experimental data allows evaluating the frame behaviour and the core parameters during the drying process, i.e. the moisture content curve, and the drying rate curve. The experimental data is compared with mathematical models, providing important information for drying improvement, i.e. the comparison with theoretical time requirements and the obtained experimental results. The experiment also makes possible the calculation of the chalk mean diffusivity, critical moisture content, and equilibrium moisture content. These data also provide conditions to study the optimum space between the frames and its effect on the heat and mass transfer. A comparison of the experimental data and the actual figures from the industrial processes will give conditions for future qualitative analysis.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	6
3. SECAGEM: ASPECTOS FUNDAMENTAIS	8
4. ASPECTOS CONSTRUTIVOS E NORMATIVOS DAS PLACAS DE GESSO	15
5. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SECADOR	20
5.1. COMPONENTES DO SECADOR.....	20
5.1.1. <i>Descrição dos módulos constitutivos do túnel</i>	21
5.2. DIMENSIONAMENTO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SECADOR.....	24
5.2.1. <i>Dimensionamento e Construção do corpo do túnel</i>	25
5.2.2. <i>Confeção do dumper</i>	27
5.2.3. <i>Dimensionamento do ventilador</i>	28
5.2.4. <i>Dimensionamento e confeção das resistências</i>	29
5.2.5. <i>Confeção do laminador do fluxo de ar</i>	30
5.2.6. <i>Isolamento do túnel</i>	31
5.2.7. <i>Sistema elétrico</i>	31
5.2.8. <i>Fixação das amostras</i>	33
5.3. INSTRUMENTAÇÃO	34
5.3.1. <i>Medições de temperatura</i>	34
5.3.2. <i>Medições de Umidade</i>	36
5.3.3. <i>Medições do Peso</i>	37
5.3.4. <i>Medições de Velocidade</i>	39
5.3.5. <i>Medições de Pressão</i>	39
5.3.6. <i>Banco de aquisição de dados</i>	40
5.3.7. <i>Aferição da instrumentação</i>	41
6. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	43
6.1. MÉTODO DA MODELAGEM ANALÍTICO-EXPERIMENTAL	43
6.2. MODELOS DE SECAGEM PARA O PERÍODO DA TAXA DE SECAGEM CONSTANTE	44
6.3. MODELOS DE SECAGEM PARA O PERÍODO DA TAXA DE SECAGEM VARIÁVEL	44
6.3.1. <i>Modelo da difusão</i>	44
6.3.2. <i>Modelo da Capilaridade</i>	45
6.3.3. <i>Escolha do modelo para o período da taxa de secagem variável</i>	46
6.4. PARÂMETROS DE ESCOAMENTO, TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA	47
6.4.1. <i>Número de Reynolds</i>	47
6.4.2. <i>Fluxo de calor transferido do ar para a placa por convecção</i>	49
6.4.3. <i>Taxa de transferência de massa por convecção</i>	49
6.5. CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE	50
6.6. CÁLCULO DO TEMPO DE SECAGEM	50
6.6.1. <i>Taxa constante</i>	51
6.6.2. <i>Taxa variável</i>	51
7. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	52
7.1. PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE SECAGEM	52
7.2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	54
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	82
9. CONCLUSÕES.....	92
10. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE I.....	97
APÊNDICE II.....	102

1. INTRODUÇÃO

De acordo com alguns arqueólogos, o gesso começou a ser empregado há quase 8.000 anos a.C. Uma argamassa com gesso e cal serviam de suporte em afrescos decorativos, descoberta em ruínas na Síria e Turquia. O gesso é obtido a partir da gipsita, um mineral abundante no Brasil, distribuída da seguinte maneira: 94% da produção brasileira está localizada no estado de Pernambuco, e em menores proporções nos estados do Piauí e Ceará, em uma sedimentação Cretácia, conhecida como Chapada do Araripe (Peres et al.,2001).

Segundo Peres et al (2001), a gipsita é um sulfato de cálcio Bi-hidratado ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), extraído da jazida através de britagem, depois é moído, peneirado e calcinado. Este último por ser a fase mais importante do processo de obtenção do gesso retém a maior atenção, pois logo após a moagem da gipsita é introduzida em fornos ou autoclaves com temperaturas variando entre 110 a 900 °C para se obter produtos diferenciados, do gesso até a anidra. O principal produto deste processo é o sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4\cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), comumente conhecido como gesso e obtido da seguinte reação química:



Após a calcinação da gipsita o gesso é moído até uma granulometria bem fina, conforme normas, em alguns casos, o gesso é ensilado por um determinado período, para se obter uma estabilização do produto, isto é, uma maior homogeneidade na composição do produto. O gesso, obtido após a calcinação da gipsita, é largamente empregado em pré-moldados como placas, blocos, elementos decorativos como sancas, estatuetas etc. O processo de preparação da pasta consiste em adicionar o gesso em pó na água até se obter uma mistura com consistência pastosa, conformá-la em fôrmas e réguas e finalmente a secagem. Este processo, no Brasil, na sua maioria ainda é semi-artesanal, pois para o preparo da pasta e a sua conformação é necessário uma grande quantidade de mão-de-obra, e a sua secagem é feita a céu aberto em suportes. No estado pastoso o gesso volta a apresentar a sua forma bi-hidratada, gerando uma reação química que aumenta a sua temperatura e um leve aumento do seu volume, transformando o estado pastoso em sólido, este fenômeno é chamado de “pega”.

O tipo de gesso empregado na fabricação de pré-moldados é uma mistura de hemidrato de cálcio Beta com Anidrina solúvel, que torna uma mistura final, instável, com um “tempo de pega” bastante curto, comercialmente chamada de gesso de fundição. De acordo com Peres et al (2001) a quantidade de água utilizada na preparação do gesso é de aproximadamente 18% em relação ao peso do pó, o que deve dar uma consistência à pasta regulada pela norma NBR 12128 (1991). Depois que a pasta for pré-moldada a água utilizada em sua preparação deverá ser eliminada através de um processo de secagem. Dentre as suas propriedades físicas vale destacar: a densidade de 950 a 1100 kg/m^3 ; o poder de absorção de água em 45 %; a elevada solubilidade; e a cor que, a depender das impurezas contidas nos cristais, varia entre branca, verde e azul (Peres et al.,2001).

O processo de secagem é um complexo processo térmico na qual a transferência de calor e massa ocorre simultaneamente. Neste processo, o calor é transferido por convecção do ar quente para o produto, aumentando a temperatura tanto deste quanto da água nele contido na forma de umidade. A transferência de massa ocorre quando a umidade presente emigra na forma de líquido ou vapor do interior do produto para a superfície em contato com o ar quente e então se evapora, sendo transferido para o ar na forma de vapor de água. Este processo é fortemente influenciado pela temperatura e velocidade da corrente de ar que circula ao redor do produto (Strumillo & Kudra, 1989).

Quando um sólido está secando, ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: (1) calor é transferido para evaporar líquido; (2) massa é transferida como um líquido ou vapor de dentro do sólido e como um vapor na superfície. Os fatores que governam as taxas destes processos determinam a taxa de secagem (Perry, 1973).

Segundo Perry(1973), o mecanismo particular de controle, durante a secagem de um sólido, pode ser determinado por um estudo de gradientes de umidades internas. Também este autor classifica os sólidos em base de fluxo capilar e difusivo, onde no fluxo capilar o conteúdo de umidade que se move nos interstícios dos sólidos como líquido na superfície, ou como conteúdo de umidade livre em cavidades da célula, move-se por gravidade; e a capilaridade, contanto que as passagens por fluxo contínuo estejam presentes. Em secagem, o fluxo líquido que é o resultado da capilaridade aplicada aos líquidos não contidos na solução e para conteúdos de umidades acima do ponto de saturação da fibra, como em tecidos, papel e couro, e para toda a umidade acima do conteúdo de umidade de equilíbrio para a saturação atmosférica, como em pós e sólidos granulares, como pigmentos de pintura, minerais, barro e areia.

Usualmente se estima em que condições operacionais de temperatura e umidade relativa do ar, e qual o tempo necessário para finalizar a secagem. Parâmetros como velocidade, temperatura e umidade relativa do ar claramente influenciam a taxa de secagem, assim, um controle adequado das condições higrotérmicas é crucial ao sucesso do processo de secagem (Keey, 1978).

A secagem é de vital importância para diferentes processos de produção. No setor agroindustrial a secagem de produtos tais como grão, sementes e alimentos em geral, reduz a atividade microbiológica e outras reações que possam causar decomposição dos produtos, permitindo uma redução das perdas, um maior tempo de estocagem e menores custos com transporte (Silva, 2000, Leon et al., 2002). Os grãos são considerados produtos capilarporosos higroscópicos no qual os poros estão parcialmente cheios de líquido d'água e parcialmente cheio com mistura de ar e vapor de água. Durante o processo de secagem, o conteúdo de umidade evapora para a superfície que deixa o núcleo devido à diferença de pressão de vapor parcial entre o núcleo e o ar circunvizinho. A taxa a qual um núcleo de grão ou um berço de núcleos de grão perde umidade sob diferentes condições de secagem, e em diferentes tipos de secadores, é de grande importância no design de um secador (Moreira, 2002);

De forma similar aos grãos e sementes, na indústria madeireira, a secagem é a operação intermediária que mais contribui para agregar valor aos produtos manufaturados da madeira, eliminando os efeitos visuais como rachaduras, empenamentos, colapsos e manchas (Jankowsky & Dugatti, 2001). Durante a secagem, desenvolvem-se tensões devido ao gradiente do conteúdo de umidade e as propriedades não uniformes de encolhimento da madeira. A madeira encolhe ou incha com as mudanças no conteúdo de umidade, quando estiver abaixo do ponto de saturação da fibra da madeira (Pan et al., 2002)

A secagem também é importante na construção civil, como no caso da produção de tijolos, argamassa, telhas, concreto, arenito e o gesso (Mendes et al., 1996).

Operações comerciais de secagem podem utilizar transferência de calor por convecção, condução, radiação, ou uma combinação destes. Secadores industriais diferem fundamentalmente pelos métodos de transferência de calor. Porém, independente do modo de transferência de calor, o calor tem que fluir da superfície exterior até o interior do sólido. A única exceção é a secagem dielétrica e microondas, na qual a alta frequência elétrica gera calor internamente e produz uma temperatura alta dentro do material e na superfície.

Segundo Strumillo & Kudra(1989), Perry(1973), Moreira(2002), dois grandes grupos são formados para classificar os métodos de secagem; o método de secagem descontínua, na qual o material é secado por batelada como mostra a figura 1.1;

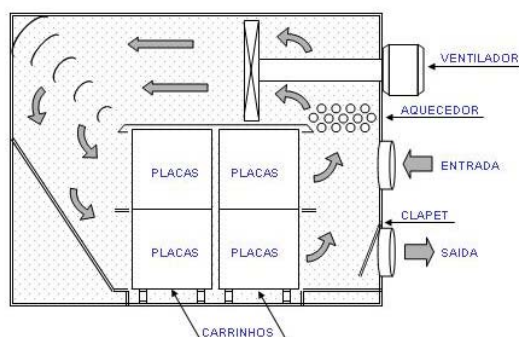


Figura 1.1 – Método de secagem por batelada.

E o método de secagem contínua, em que o material vai sendo secado a partir da entrada no secador e ao fim do trajeto é colocado para fora já seco, como mostrado na figura 1.2.

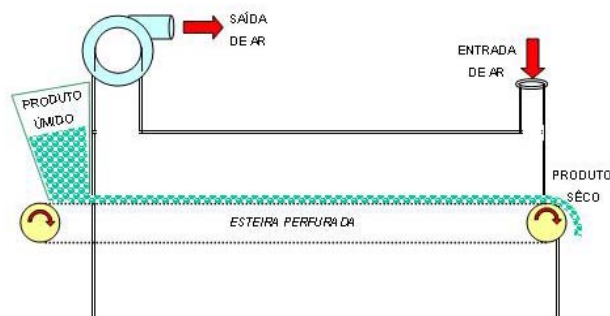


Figura 1.2 – Método de secagem contínua.

Existem diversos dispositivos industriais de secagem que utilizam o método recém descrito. Entre outros, podemos citar o secador tipo bandeja, no qual o material a ser secado é colocado sobre bandejas dispostas dentro de um gabinete de secagem em camadas relativamente finas (1 a 6 cm). Na figura 1.3 observa-se uma bandeja típica.

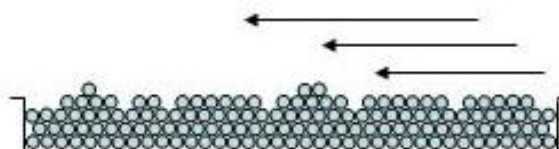


Figura 1.3 – Bandeja típica contendo o material a ser secado por batelada.

O secador de esteira representa uma aplicação do método de secagem contínua. Neste secador o material a ser secado é transportado através de uma esteira feita de telas em aço inox ou pratos perfurados que se movem lentamente. Em secadores rotativos o material a ser secado entra em um tambor perfurado que gira constantemente para revirar o material, conforme figura 1.4; enquanto que em secadores pneumáticos o material é pulverizado em contracorrente com o ar e é depositado ao fundo do secador.

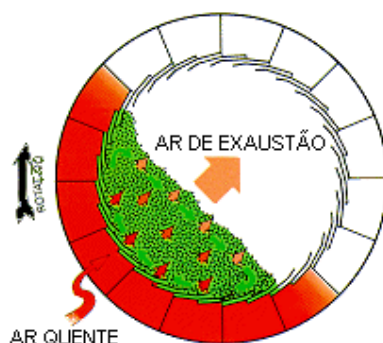


Figura 1.4 – Secador rotativo.

Devido à extensa aplicação das técnicas de secagem e a sua importância em diferentes processos de fabricação, muitos estudos teóricos e experimentais sobre técnicas de secagem, efeito dos parâmetros envolvidos e sobre modelos matemáticos e numéricos para simulação do processo de secagem têm sido realizados e publicados na literatura.

Leon et al.(2002) apresentaram um estudo onde revisam os diferentes parâmetros usados para testar e avaliar os diferentes tipos de secadores solares para secagem de produtos alimentícios. Baseados nesse estudo os autores propõem uma metodologia de análise, as condições de ensaios e uma planilha de avaliação simples contendo os parâmetros mais significativos. Por sua vez, El-Sebaei et al.(2002-a) realizaram um estudo experimental sobre um tipo de secador solar formado por uma câmara de secagem acoplada a um coletor tipo placa plana onde o ar é aquecido. O coletor é projetado para receber, abaixo da placa absorvedora, algum material que possa armazenar calor aumentado assim a capacidade de aquecimento do ar. Os ensaios experimentais foram conduzidos com e sem material de armazenamento de calor e para diferentes condições ambientais, registrando-se a radiação solar incidente, a temperatura e umidade relativa do ar ambiente, a temperatura na entrada e saída do aquecedor e a distribuição de temperatura em diferentes partes do sistema. Os mesmos autores, El-Sebaei et al.(2002-b), propõem algumas correlações para a cinética da secagem baseados nesse mesmo estudo experimental.

Glouannec et al.(2002) também desenvolveram um estudo experimental onde usam tecnologia de energia radiante para o processo de secagem. Foi utilizado um protótipo de forno onde a secagem é regulada por mecanismos de convecção, radiação térmica e radiação de microondas. São estudadas as cinéticas de secagem e ao efeito na distribuição de temperatura na amostra. Braun et. al.(2002) estudaram a utilização de bombas de calor para aquecer o ar num secador de roupas. O sistema funciona conforme um ciclo Brayton invertido e consistem de um compressor, recuperadores de calor, expansor e uma câmara de secagem. É levantada a eficiência térmica do sistema e compara-se com o sistema convencional que utiliza aquecimento elétrico.

Sahin and Dincer (2002) apresentaram um método gráfico simples para determinar a difusividade mássica e o coeficiente de transferência de massa para produtos sólidos a partir de dados experimentais. O trabalho mostra a validação do método e como essa metodologia pode ser utilizada para aplicações práticas.

Ratti e Mujumdar (1997) desenvolveram um código numérico baseado no método de diferenças finitas para simular e prever o desempenho de um secador solar tipo leito fixo sob condições de temperatura do ar na entrada variando com o tempo. Todos os parâmetros envolvidos no modelo foram obtidos de dados experimentais sobre secadores solares. Resultados de ensaios numéricos realizados com o modelo apresentam uma boa concordância

com resultados experimentais sobre secagem de pedaços de cenouras com formatos cilíndricos.

Algumas correlações baseadas no número de Dincer/número de Biot, e no número de Biot/número de Reynolds, foram desenvolvidas recentemente por Dincer e Hussain (2002) e Dincer et al.(2002) respectivamente para aplicações de secagem de sólidos nos formatos cilíndricos, esféricos e planos. Estas correlações podem ser usadas posteriormente para a determinação da difusividade mássica e o coeficiente de transferência de massa. Valores obtidos sob esta metodologia concordam bem com resultados experimentais.

2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Motivação do trabalho

Na região produtora de gesso do estado de Pernambuco, existem um número de 600 empresas, grandes, médias e pequenas, trabalhando na produção de diversos tipos gesso, e produtos derivados dele, como as placas pré-moldadas de gesso. Desse total, a maioria delas é composta por pequenas empresas. Esse tipo de produto, durante a sua fabricação, requer um processo de secagem, no final do processo de produção. De uma maneira geral, o processo de secagem das placas de gesso comumente utilizado é a secagem ao ar livre, que pode levar até 72 horas, dependendo das condições climáticas da região e do período.

A secagem que normalmente é utilizada pelos gesseiros é feita em secadores do tipo gaveta, ao ar livre, como mostra a figura 2.1, as placas são arrumadas com um distanciamento médio de 7,0 cm entre uma placa e outra.



Figura 2.1 – Secagem de placas de gesso ao ar livre utilizada no pólo gesseiro do Araripe em Pernambuco.

Este tipo de processo de secagem além de lento, não possui nenhum monitoramento para o controle de qualidade final que permita, em última análise, obter produtos com características de fabricação homogêneas que aumentem o seu valor agregado.

A consciência de que a universidade pode se tornar parceira para ajudar a melhorar no desenvolvimento de novas tecnologias, contribuindo para que as condições de secagem dos pequenos e médios produtores sejam mais produtivas, além de mostrar para os grandes empresários do setor, que se pode desenvolver tecnologia de secagem na região, foi o grande elemento de motivação deste trabalho e das ações que se seguirão.

Então a partir disto, resolveu-se estudar a secagem de placas de gesso, adotando uma metodologia de pesquisa científica, para investigar possíveis soluções que ajudem a melhorar o desempenho das empresas gesseiras do vale do Araripe.

Para se fazer esse estudo, construiu-se um secador de escala laboratorial, que será descrito no Capítulo 5. Decidiu-se investigar o comportamento da secagem para placas com três espaçamentos diferentes, através do número de placas diferentes, e três temperaturas diferentes, como será descrito no Capítulo 7. Com isto pretende-se estudar soluções de

diminuição do tempo de secagem, e investigar a existência de uma distância ótima entre as placas de secagem dentro do secador.

Objetivos

Diante do contexto de motivação descrito no item anterior, foi traçada uma estratégia de ação, da qual este trabalho é uma parte, com o objetivo de desenvolver métodos de simulação teóricos e experimentais de secagem de produtos moldados de gesso.

Este trabalho teve como objetivo, construir um secador em escala laboratorial, que permitisse o monitoramento de parâmetros importantes num processo de secagem de placas de gesso, como o comportamento da secagem a diferentes temperaturas, do ar de secagem, umidades relativas e temperatura do ar antes e depois das placas, e a distâncias entre as placas, para gerar um banco de dados, capaz de fornecer informações conclusivas, que apontem melhores caminhos a seguir na busca de melhores condições de operação para as empresas do pólo gesseiro.

3. SECAGEM: ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Definição

O processo de secagem é um complexo processo de retirada de umidade do interior de um sólido através dos mecanismos de transferência de calor e massa. Neste processo, o calor é transferido por convecção do ar quente para o produto, aumentando a temperatura tanto deste quanto da água nele contida na forma de umidade. A transferência de massa ocorre quando o conteúdo de umidade presente emigra na forma de líquido ou vapor do interior do produto para a superfície em contato com o ar quente e então se evapora, sendo transferido para o ar na forma de vapor de água. Esta depende da estrutura porosa do material e é também fortemente influenciado pela temperatura e velocidade da corrente de ar que circula ao redor do produto (Strumillo & Kudra, 1989). A figura 3.1 mostra um desenho esquemático do processo de secagem numa placa.

Para melhor se compreender esse processo é importante ter o conhecimento das formas de armazenamento do fluido no interior do sólido, do efeito das tensões viscosas que existem num fluido armazenado num meio poroso, e dos mecanismos de movimentação do fluido no interior de um sólido que está sendo submetido um processo de secagem.

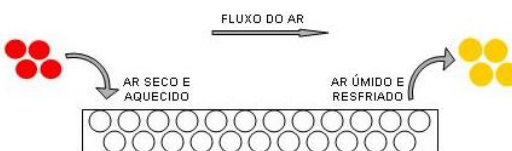


Figura 3.1 – Processo de secagem

De acordo com Keeey(1972) a umidade contida num sólido que vai ser submetido a um processo de secagem pode ser entendida pela observação da figura 3.2, que representa uma curva da isoterma de sorção, de um certo material que relaciona os estados do conteúdo de umidade relativa de equilíbrio, para uma dada temperatura, em função da umidade relativa.

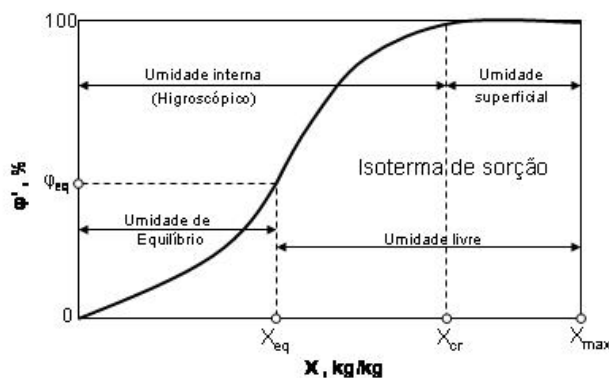


Figura 3.2 – Isoterma de sorção e conteúdos de umidade de um material.

Dentre os diversos valores de umidade que foram ensaiados para a obtenção dessa curva, estão o X_{eq} , X_{cr} e o X_{max} . O primeiro representa o conteúdo de umidade de equilíbrio, que corresponde à umidade que o material a ser secado atingirá, em função das condições ambientais a que ele está submetido. O segundo representa o conteúdo de umidade não superficial que o sólido pode absorver. E o terceiro é o conteúdo de umidade superficial.

Olhando a figura 3.2, observa-se que esses valores delimitam faixas de conteúdo umidade com características importantes no processo de secagem. A faixa correspondente à umidade X_{max} , contém a umidade que se chama de superficial, de fácil extração, e cuja pressão de vapor é idêntica à da água pura na mesma temperatura. O grau de dificuldade na remoção da umidade aumenta com valores menores do que X_{cr} , tornando-se muito mais difícil para valores menores do que X_{eq} . Isto porque para valores compreendidos entre X_{eq} e X_{cr} , a umidade está contida nos poros, onde é mais difícil remover devido a pressões de vapor maiores que a da água pura, à mesma temperatura, como se verá adiante. A umidade abaixo dos valores de X_{eq} , por estar abaixo da umidade de equilíbrio, já apresenta mais dificuldade na sua extração e, além disso, pode estar na forma líquida nos espaços intramoleculares e contida na composição da própria molécula do material, como é o caso da gipsita, o que torna o processo de extração bem mais difícil, porque requer temperaturas acima daquelas durante a umidade livre.

Importância da Pressão de vapor

Um balanço das forças envolvidas no sistema mostrado na Figura 3.3 permite obter uma expressão entre a diferença de pressão atmosférica e devido ao peso da coluna d'água deslocada, tensão superficial, e raio de curvatura r formado na interface líquido-ar, dada pela Equação 3.7:

$$(P_a - P_w) = \frac{2\sigma}{r} \quad (3.1)$$

Onde P_a é a pressão atmosférica, e P_w é o peso da coluna d'água, e σ é a tensão superficial.

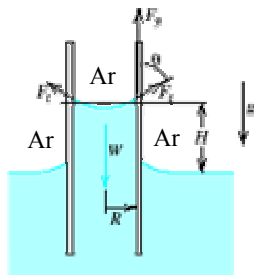


Figura 3.3 – Mostra um tubo capilar a força tangencial, resultante da tensão superficial.

O estudo da dependência da pressão de vapor com a pressão total, com a tensão superficial e com o raio de curvatura do menisco formado num capilar, começam com a aplicação da lei de Gibbs, aplicada para estados de equilíbrio líquido vapor.

$$dg_l = -sdT_l + vdP_l \quad (3.2-a)$$

$$dg_v = -sdT_v + vdP_v \quad (3.2-b)$$

Onde g representa a energia livre de Gibbs

Como a Temperatura é uniforme e constante em um estado de equilíbrio num processo entre fases, a equação (3.2), pode ser escrita como:

$$dg_l = v dP_l \quad (3.3-a)$$

$$dg_v = v dP_v \quad (3.3-b)$$

No equilíbrio de fase,

$$dg_l = dg_v \quad (3.4-a)$$

$$T_l = T_v \quad (3.4-b)$$

Substituindo-se a equação (3.3(a e b)) na equação (3.4-a) tem-se:

$$v_l dP_l = v_v dP_v^0 \quad (3.4)$$

Onde o zero indica pressão de vapor.

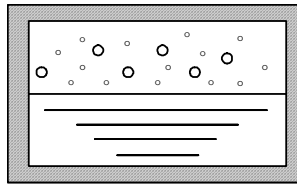


Figura. 3.4 - Recipiente fechado com água, vapor com pressão P_l^0 e um gás com pressão P .

Inserindo-se gás no interior do sistema que está com uma pressão de vapor P_v^0 , considerando-se o vapor como gás ideal, conforme figura 3.4, e tirando-se o valor do volume específico de sua equação de estado, transforma-se na equação (3.6):

$$v_v = \frac{RT}{P^0} \quad (3.5)$$

$$\frac{dP^0}{P^0} = \frac{v_f dP}{RT} \quad (3.6)$$

Que integrada resulta em:

$$\ln\left(\frac{P_2^0}{P_1^0}\right) = \frac{v_f}{RT}(P_2 - P_1) \quad (3.7)$$

Uma observação da equação (3.7) permite perceber como a variação da pressão externa influencia a pressão de vapor.

Considerando-se a variação de pressão da Equação 3.7 a mesma da Equação 3.1, e igualando-se as duas equações ter-se-á,

$$\ln\left(\frac{P_c^0}{P^0}\right) = \frac{2\sigma v_f}{rRT} \quad (3.8)$$

Onde P_c^0 é a pressão de vapor na superfície curva devido ao efeito capilar, e P^0 é a pressão de vapor da água pura, na mesma temperatura.

A equação 3.8 mostra como a relação da pressão de vapor de um líquido submetido à tensão viscosa, sobre a pressão de vapor um líquido numa superfície livre, varia com o raio de curvatura, com a tensão superficial, e a temperatura.

Mecanismo do Fluxo interno de Líquido

De modo a se colocar essa questão num contexto mais abrangente, e com a visão de diferentes autores sobre o assunto, optou-se por citar as explicações dadas por diversos autores sobre os tipos de movimento de um fluido, e as causas dos mesmos, num processo de secagem.

A abordagem sobre as formas do conteúdo de umidade num sólido, e da pressão de vapor no interior de uma estrutura porosa feita anteriormente, tornará mais clara a compreensão dos mecanismos de movimento do fluido que está sendo extraído num processo de secagem, descritos pelos autores, a seguir.

Na visão de Keey(1973), o fluxo interno de líquido pode ocorrer através de vários mecanismos dependendo da estrutura do sólido. Alguns possíveis mecanismos são: (1) difusão em sólidos homogêneos contínuos, (2) fluxo capilar em sólidos granulares e porosos, (3) fluxo causado por encolhimento e gradientes de pressão, (4) fluxo causado por gravidade, e (5) fluxo causado por uma vaporização–condensação sucessiva.

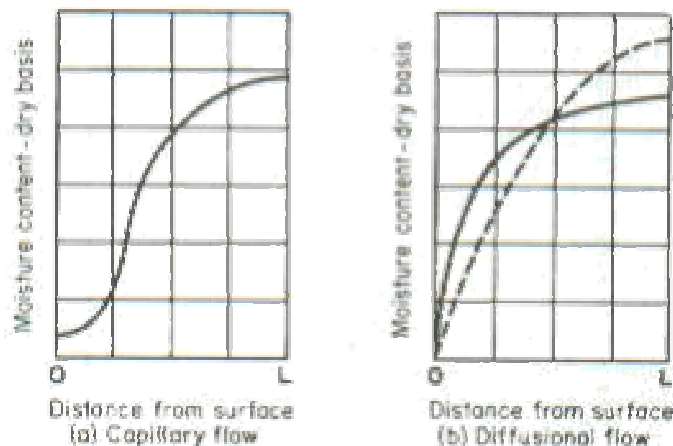


Figura 3.5 - Gráficos do conteúdo de umidade vs. Fluxo capilar e difusivo.

Em geral, um mecanismo predomina, em um determinado momento num sólido durante a secagem, mas não é incomum achar diferentes mecanismos que predominam em momentos diferentes durante o ciclo de secagem.

Hougen, McCauley, & Marshall (1940) classificam os sólidos quanto à secagem, como sólido de fluxo capilar e difusivo:

Sólidos de Fluxo capilar.

No sólido de fluxo capilar, a umidade que se move nos interstícios dos sólidos, como líquido numa superfície ou como a umidade livre em cavidades porosas, move-se por gravidade e pelo efeito capilaridade, admitindo que haja passagens que possibilitem o escoamento.

Na secagem, o escoamento líquido resultante do efeito da capilaridade para líquido não contidos na solução, e para toda umidade acima do ponto de saturação de fibra, como em tecidos, papéis e couro, e para toda a umidade acima da umidade de equilíbrio para a saturação à pressão atmosférica, como em pós e sólidos granulares, como pigmentos de pintura, minerais, barro e areia.

Para entender melhor esse fenômeno existe varias hipóteses para a movimentação da água durante a secagem. Perry(1973) cita a teoria capilar, que modela o escoamento baseado num leito composto pro esferas não porosas, onde os espaços entre elas, forma os interstícios e os poros. Esta teoria tenta explicar todas as fases de um processo de secagem, segundo a ótica do modelo capilar. Entretanto, segundo Silva(2000), a teoria do modelo capilar mais aceita é a do movimento capilar (ou teoria do gargalo). Segundo esta, o processo de secagem que ocorre no interior do produto pode ser dividido em dois períodos, Keey(1978) e Strumillo & Kudra(1989), um período da taxa de secagem constante e outro de período de taxa decrescente, o qual, por sua vez, podem ser caracterizados por mais períodos, como apresentado a seguir:

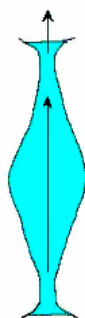


Figura 3.7 – A figura representa o movimento do líquido no interior de um capilar no Período de taxa de secagem constante

a) Período de taxa de secagem constante: quando o produto se encontra completamente úmido, no início da secagem a água escoo, na fase líquida, sob um gradiente hidráulico (figura 3.7) e, em condições naturais, a temperatura do produto se iguala à temperatura de bulbo úmido. Com a retirada da umidade, pode ocorrer um decréscimo no diâmetro dos poros e capilares e, conseqüentemente, decréscimo de volume do produto aproximadamente igual ao volume da água evaporada. Além disso, a umidade retirada é substituída por bolsas de ar no interior dos poros, como se vê na figura 3.8. A energia utilizada para a secagem nesse período e praticamente igual à necessária para evaporação da água em uma superfície livre.



Figura 3.8 – A figura representa o movimento do líquido no interior de um capilar no Primeiro período de taxa de secagem decrescente.

b) Primeiro período de taxa de secagem decrescente: à medida que a secagem prossegue e tenha passado pelo ponto do conteúdo de umidade crítica, conteúdo de umidade em que a água deixa de comportar-se como água livre, o conteúdo de umidade decresce e a água na fase líquida faz a ligação entre as partículas sólidas (produto), formando as pontes líquidas. Apesar de poder ocorrer escoamento de água na fase de vapor, o escoamento é predominantemente capilar (figura 3.9). A temperatura do produto atinge valores superiores à temperatura de bulbo úmido.

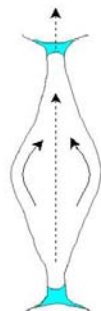


Figura 3.9 – A figura representa o movimento do líquido no interior de um capilar no Segundo períodos de taxa de secagem decrescente.

c) Segundo período de taxa de secagem decrescente: a água existente nos gargalos dos poros pode migrar, arrastando-se ao longo das paredes capilares ou evaporando e condensando, sucessivamente, entre as pontes líquidas. A pressão parcial de vapor decresce e, dependendo do tipo de produto, a contração de volume do produto continua, porém em menor intensidade (figura 3.9).

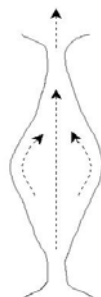


Figura 3.10 – A figura representa o movimento do líquido no interior de um capilar no Terceiro períodos de taxa de secagem decrescente.

d) Terceiro período de taxa de secagem decrescente: a secagem ocorre no interior do produto. O conteúdo de umidade de equilíbrio é atingido quando a quantidade de água evaporada se iguala a quantidade condensada (figura 3.10).

Sólidos de fluxo difusivo

Difusão de vapor.

Quando há difusão de vapor, o conteúdo de umidade pode mover-se por difusão do vapor no sólido, contanto que um gradiente de temperatura seja estabelecido por aquecimento, criando assim um gradiente de pressão de vapor. A vaporização e difusão de vapor podem

acontecer em qualquer sólido aonde o aquecimento vem por uma superfície e o conteúdo de umidade sai por outra, onde está armazenado entre células do sólido.

Difusão líquida.

O movimento dos líquidos por difusão em sólidos é restrito à situação onde o conteúdo de umidade de equilíbrio está abaixo do ponto de saturação atmosférica, e para sistemas nos quais umidade e sólido são mutuamente solúveis. A primeira classe aplica às últimas fases da secagem do barro, amido, farinha, tecidos, papeis e madeira; a segunda classe inclui a secagem de sabões, colas, gelatinas, e pastas.

Na visão de Keey(1973), Strumillo & Kudra(1989) e Silva(2000), os mecanismos de movimentação do fluido no interior do sólido, tem pontos em comum com o Perry(1973), e num aspecto geral pode-se se dizer que existe uma complementaridade entre elas, como se poderá inferir do texto a seguir.



Figura 3.6 –Desenho de corpo poroso, onde se vê a estrutura dos poros e capilares.

Procedimentos para identificar o tipo de secagem predominante

O mecanismo particular de controle, durante a secagem de um sólido, pode ser determinado por um estudo do gradiente de umidade interna.

A determinação experimental fidedigna do gradiente de umidade é extremamente difícil. A técnica usual envolve o estudo da perda do conteúdo de umidade para corpos de prova com diversas espessuras, especialmente preparados que foram secados para durações diferentes de tempo, e determinando o conteúdo de umidade de cada um deles.

Segundo Perry(1973), os autores Hougen, McCauley & Marshall(1940) discutiram as condições sobre o fluxo capilar e difusivo esperado na secagem de um sólido, e analisaram os dados experimentais publicados na literatura, do gradiente de umidade para os dois casos. As curvas indicadas do fluxo capilar são simbolizadas por um gradiente de umidade envolvendo duas curvaturas e um ponto de inflexão (figura 3.5(a)) enquanto que o fluxo difusivo é uma curva lisa, côncava descendente (figura 3.5(b)), como é descrito nas equações de difusão.

Eles também mostraram que o coeficiente de difusão do líquido normalmente é uma função do conteúdo de umidade que diminui com a umidade decrescente. O efeito da variação da difusividade está demonstrado na figura 3.5(b), onde a linha tracejada é calculada para difusividade constante e a linha sólida é experimental para o caso onde o coeficiente de difusão é dependente do conteúdo de umidade. Assim, a integração da equação de difusão, assumindo difusividade constante, só aproxima o comportamento real.

4. ASPECTOS CONSTRUTIVOS E NORMATIVOS DAS PLACAS DE GESSO

Os fabricantes situados no pólo gesso de Pernambuco, em sua grande maioria, utilizam processos manuais para a fabricação das placas de gesso pré-moldadas, como se observa na figura 4.1.



Figura 4.1 – Placa comercialmente utilizada.

A placa comercial não é de espessura uniforme, conforme mostra a figura 4.2. Numa breve inspeção na figura observa-se que ela tem uma moldura, que é a parte mais espessa, a parte central é mais fina, e contém nervuras, colocadas por questões estruturais e diminuição de peso.



Figura 4.2 – Detalhe das Placas comercialmente utilizadas.

Por questões de custo do experimento em si, como será visto mais adiante, e espaço disponível para realizar o experimento, não se pôde fazer uma placa igual a comercial, tanto no tamanho dos lados (60 cm), quanto pela espessura variável, que tem 3 cm nas extremidades, e 1cm no centro. Por questões construtivas, o modelo experimental necessita de formas constantes, de menores dimensões, e lisa em todas as faces, para se reduzir ao máximo as perdas de carga pelo atrito. Portanto, optou-se por confeccionar as placas com lados de 40cm, e para poder instalar termopares no interior da placa de teste, resolveu-se que a placa seria cheia, e teria a espessura da parte mais espessa que uma placa comercial padrão, e que por esta razão deverá ter um tempo de secagem maior do que a placa comercial se fosse secada nas mesmas condições.

Na construção da placa de testes buscou-se inicialmente determinar o teor de água necessária para proporcionar a consistência adequada para a utilização da pasta de gesso na confecção de placas de gesso. E para tal, o tipo de gesso utilizado foi classificado, de acordo com a NBR 12775 da ABNT, como sendo próprio para placas lisas de gesso para forro, escolhido em função de sua corrente utilização, e fácil aquisição no mercado nacional, comercialmente chamado de “Gesso de fundição”.

O modo de preparo é simples, consiste na adição de uma certa quantidade de gesso em pó em um recipiente contendo certa quantidade previamente definida de água, misturando-se tudo se obtém um composto uniforme chamada de “pasta”.

Segundo Antunes(1999), as propriedades mecânicas das pastas decrescem com o crescimento da relação água/ gesso que aumenta a porosidade das pastas. Assim, a relação água/gesso influencia as propriedades mecânicas, principalmente pela sua relação com a porosidade das pastas. O processo ocorre da seguinte forma: a reação de hidratação se inicia no instante em que a água entra em contato com o pó, a consistência da pasta começa a ser alterada no final do período de indução pela presença maciça dos núcleos de cristalização e vai aumentando progressivamente com a formação da microestrutura adquirindo cada vez mais resistência mecânica até o seu completo endurecimento.

No Brasil, o método utilizado atualmente para medir a consistência das pastas de gesso é o proposto pela NBR-12128(1991) da ABNT, onde esta norma estabelece que a relação de água e gesso para se obtém uma fluidez da pasta adequada à manipulação, deve obtido através de um aparelho chamado “Vicat modificado” conforme figura 4.3, que consiste de um suporte que sustenta uma haste, e esta haste tem em sua extremidade inferior uma sonda cônica. Na base do aparelho está situado um molde em forma de tronco de pirâmide de base circular que receberá a pasta para a execução do ensaio.



Figura 4.3 – Detalhe do aparelho Vicat modificado.

O resultado obtido para a proporção de água e gesso para se ter uma “consistência normal” foi a relação de **1,5:2,75**. Esta relação foi utilizada na confecção de todas as placas utilizadas no experimento.

A figura 4.4 abaixo exhibe a nomenclatura e a forma utilizada, para a confecção de uma placa de gesso.

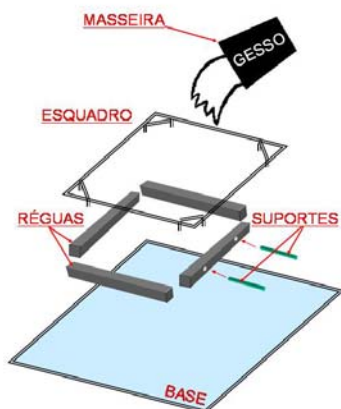


Figura 4.4 – Detalhes dos utensílios usados na preparação das placas de gesso

Para o processo de preparação da pasta e obtenção das placas de gesso necessita-se de alguns utensílios, tais como: uma recipiente para a pesagem do gesso em pó e da água chamado de masseira, conforme figuras 4.5(a e b); quatro tarugos maciços em alumínio de secção quadra, chamados de régua e dispostos de tal forma que formassem as laterais de um quadrado de 40,0 x 40,0 cm, onde uma das régua contém dois furo a fim de se introduzir os elementos de fixação das placas no túnel de vento, conforme figura 4.8(b).



Figura 4.5(a e b) – Detalhe da masseira para o preparo da pasta de gesso.

A pasta, para a confecção das placas foi preparada segundo as normas NBR-13207 (1994) da ABNT e teve o seguinte procedimento: Com a proporção obtida no aparelho de Vicat modificado foi pesado na masseira, 5.500 g de gesso, e em outro recipiente foi pesado 3.000 g de água;



Figuras 4.6(a e b) – Detalhe da preparação da mistura gesso-água

O pó foi polvilhado na água de forma a preencher toda masseira por igual. A quantidade de pó utilizada é a necessária para que toda, ou quase toda, água da superfície seja absorvida pelo pó de gesso, segundo figuras 4.6(a e b).

Seguiu-se um período de repouso que corresponde ao período de dissolução do hemidrato, e após 1 minuto houve a mistura; a pasta foi derramada em um molde, chamado de “régua”, conforme figuras 4.7 e 4.8(a e b);



Figuras 4.7 (a e b) – Momento da moldagem das placas



Figuras 4.8 (a e b) – Detalhe das régua para a confecção de placas de gesso e dos elementos de fixação das placas.

Foi usado um esquadro confeccionado em aço SAE 1020 para manter as régua perfeitamente perpendiculares, um alisador em alumínio para se tirar os excessos de pasta derramados nas régua, conforme figura 4.9(a); também foi necessário o uso de desmoldante, a fim de facilitar a desmoldagem das placas; duas mesas planas em fórmica para utilização como base, de tal forma a obter uma das faces das placas uma superfície plana e lisa, conforme figura 4.8(a e b).

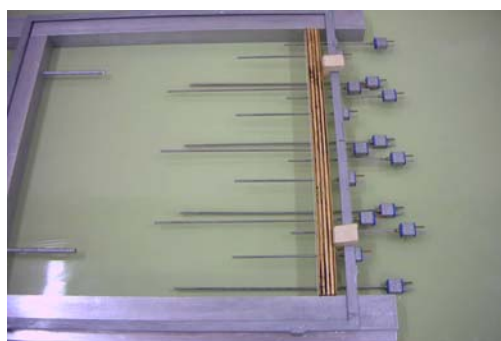


Figura 4.9 – Detalhe do esquadro

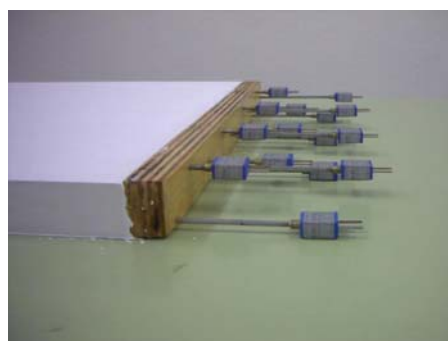
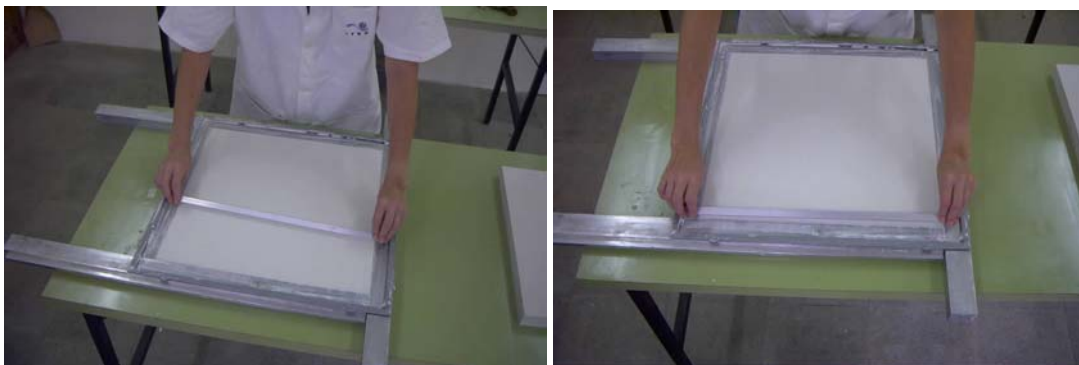


Figura 4.10 – Detalhe das mesas de apoio para confecção das placas de gesso

No processo de endurecimento da pasta de gesso foi necessário um período de repouso até o início do ponto de pega, para que se pudesse retirar o excesso de pasta do molde; Seguiu-se um novo período de repouso até o fim do ponto de pega onde foi desmoldado, dando assim, espaço para a confecção de outras placas. Conforme figura 4.11(a e b) abaixo,



Figuras 4.11(a e b) – Detalhes da fase final da confecção das placas de gesso.

A figura 4.10 mostra o detalhe de um apoio para os termopares, confeccionado em madeira do tipo compensado naval e impermeabilizada, na qual fez parte da amostra a fim de dar acabamento e isolamento quando instalado no túnel de vento.

5. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SECADOR

No processo de escolha e definição de um secador mais apropriado para a secagem de um determinado produto deve-se ter em mente alguns critérios básicos. Segundo o Perry(1973), para se selecionar um equipamento de secagem, são necessários que: se selecione aqueles secadores que melhore se adequarem ao carregamento e transporte do material úmido e seco, e que são capazes de produzir um produto com propriedades físicas desejadas, dentro de uma certa faixa de desempenho. Satisfeito os critérios técnicos e como mais uma ferramenta de decisão, deve ser feita uma análise de viabilidade econômica dentre os tipos e modelos que foram positivamente avaliados por critérios técnicos, para verificar a melhor opção de escolha.

O secador escolhido se assemelha com o secador por batelada de bandeja ou gabinete, a figura 5.1, que do ponto de vista comercial seria o mais apropriado para estas condições. Neste secador o material a ser secado é colocado em bandejas com camadas relativamente finas (1 a 6 cm de espessura) que estão dentro do gabinete de secagem ou afixados paralelamente um ao outro, no caso de placas, numa posição transversal, que permita que o ar de secagem escoe por entre as placas.

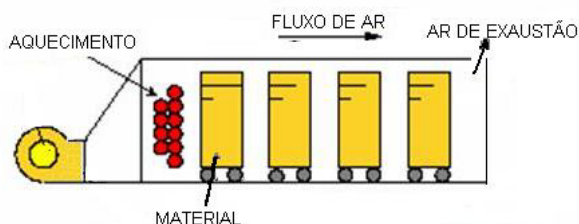


Figura 5.1 – Secador por batelada, do tipo gabinete.

5.1. Componentes do Secador

O secador em escala laboratorial desenvolvido neste trabalho, consiste num túnel de vento de seção quadrada, de 40 cm de lado e 6 m de comprimento, construída em madeira e chapa de aço, suspenso por quatro pés em forma de cavaletes e feitos em madeira, a fim de deixar o túnel a uma distância de 1,50 m do chão.

O corpo do túnel é composto por seis módulos como visto na figura 5.2, que são isolados com poliestireno expansível, conforme figuras 5.3. Os módulos têm funções distintas, admissão de ar, aquecimento do ar, laminação do ar, equalização do ar, local das amostras e controle de velocidade do ar; ligadas entre si por flanges aparafusados.



Figura 5.2 - Vista do túnel e a representação da divisão dos módulos.

No módulo de admissão do ar, logo na entrada encontra-se uma grade de segurança, em seguida um dumper para o controle de vazão de ar que é aspirado por um ventilador de 1/20 cv. e que joga para o módulo de aquecimento onde estão instaladas três resistências dando um total de 8 kW de potencia, ambos construídos em chapa de aço.



Figura 5.3 - Vista frontal e posterior do túnel de vento, e detalhe do Módulo de admissão de ar.

No terceiro módulo encontra-se um laminador de ar em chapa de aço e logo em seguida o quarto módulo, que é o de equalização do fluxo. Ambos módulos são confeccionados em madeira e revestidos internamente por fórmica branca.

O quinto módulo é aquele que vai comportar as amostras, determinadas em forma de placas em gesso e dispostas no sentido longitudinal ao túnel. A fixação das placas é feita com hastes filetadas embutidas em seu interior, e a furos localizados na base do módulo e com auxílio de porcas colocadas pelo lado externo.

O sexto e último módulo compreendem apenas na saída do ar após a passagem pelas amostras, e que controla a velocidade do fluxo através de duas portinhas que se movem na horizontal abrindo ou fechando.

Também é descrito neste capítulo como é montados toda a instrumentação, com sensores de temperatura, peso, umidade relativa e vazão; a captação dos dados para as futuras análises, o sistema elétrico, e dispositivos de controle que permitiram variar os diversos parâmetros envolvidos na secagem.

5.1.1. Descrição dos módulos constitutivos do túnel

O primeiro módulo chamado de “admissão de ar” foi confeccionado em chapa de aço galvanizado, com bitola USG 26, tem uma secção quadrada 40 cm e comprimento 40 cm. Na entrada contém uma grade de proteção, como se pode ver na figura 5.3, confeccionada em aço inox do tipo “belinox”, que é fixa por intermédio de quatro parafusos M4 com porcas e arruelas lisas, deixando-a de fácil remoção.

Tal procedimento se fez necessário para evitar que o ventilador possa succionar objetos indesejados e conseqüentemente danificar as hélices, e para evitar que alguma pessoa possa se machucar ao colocar a mão perto das hélices. Este módulo também contém um dumper que será descrito com mais detalhes adiante no tópico 5.2.2 deste mesmo capítulo.

O segundo módulo chamado de “aquecimento do ar”, por conter o motor-ventilador e três resistências elétricas, foi confeccionado em chapa aço galvanizado com bitola USG 26,

com dimensões da secção quadrada de 40,0 cm e de comprimento 70,0 cm, conforme figura 5.4. Esta medida foi tomada por medidas de segurança em caso de superaquecimento, mesmo existindo dois termostatos controlando a temperatura. Os detalhes, tanto do ventilador quanto das resistências serão descritos com mais detalhes adiante, nos tópicos 5.2.3 e 5.2.4, respectivamente, neste mesmo capítulo.



Figura 5.4 – Detalhes do Módulo de aquecimento do ar

O terceiro módulo, chamado de laminador de fluxo de ar, foi construído em madeira do tipo compensado naval de 2,0 cm de espessura, nas dimensões da secção quadrada de 40,0 cm e de comprimento 110,0 cm. Este módulo é revestido internamente por uma fórmica branca lisa e possui no final de sua secção, tomando como referência a direção do fluxo, um laminador, conforme figura 5.5, e que será descrito com mais detalhes adiante no tópico 5.2.5 deste mesmo capítulo. Do lado externo deste módulo está localizado todo o circuito elétrico que comanda os acionamentos do túnel de vento; na parte frontal está localizado o Pannel Elétrico. Na parte posterior está localizado o sistema de segurança, e logo abaixo, em uma bancada, se encontra um variador de tensão, ambos serão descritos com mais detalhes adiante, no tópico 5.2.7 – Sistema elétrico, neste mesmo capítulo.



Figura 5.5 – Detalhes do Módulo laminador do fluxo de ar

O quarto módulo, chamado equalizador de ar, também foi construído em madeira do tipo compensado naval de 2,0 cm de espessura, nas dimensões da secção quadrada de 40,0 cm e de comprimento 250,0 cm. Este módulo é revestido internamente por uma fórmica branca lisa, e por ser o mais comprido em relação aos outros módulos, tem como única finalidade uniformizar as condições do fluxo de ar até a chegada nas amostras.

Abaixo deste módulo e em cima de uma mesa se encontram todos os equipamentos necessários para a captura dos dados gerados nos ensaios, como: o computador com nobreak, um DataLogger, e fontes, conforme mostrado na figura 5.6(a e b).



Figura 5.6(a e b) – Localização dos aparatos de captura de dados.

O quinto módulo, onde foi construída a câmara de testes é aquele que recebe as amostras, de comprimento 50,0 cm. Este módulo é revestido internamente por uma fórmica branca lisa, na parte frontal do túnel de vento se encontra uma porta em madeira com um visor de vidro, com o intuito de se observar o comportamento das amostras durante o processo de secagem, figura 5.7(a e b).



Figura 5.7(a e b) – Detalhes do Módulo das amostras e do visor frontal.

Na parte superior deste módulo se encontra uma tampa para a colocação das amostras na área de testes, esta tampa é bi-partida e separadas por uma terceira parte que está fixa em uma das amostras, e na parte inferior estão localizados os furos que fixarão as placas no túnel de vento, figura 5.7(b).

O sexto módulo chamado de controle de velocidade do ar, de comprimento 100,0 cm. É revestido internamente por uma fórmica branca lisa, e possui no final de sua seção, tomando referência a direção do fluxo, duas comportas, conforme figura 5.8. Elas irão controlar a velocidade do ar na saída do túnel e, por conseguinte, controlar a velocidade do ar através das amostras. Esta duas comportas foram confeccionadas também em madeira do tipo compensado naval de 2 cm de espessura, e revestidas em fórmica em ambos os lados. Como mostra a figura 5.8, existe uma escala graduada, com o ponto zero no centro e graduações simétricas para a direita e para a esquerda, elas são utilizadas para se ter noção da área a que se está trabalhando, para se definir posteriormente a vazão de ar que está saindo do túnel.



Figura 5.8 – Detalhes das comportas de controle de vazão, com a da escala de medição da velocidade de ar.

Para a sustentação do túnel de vento, foram utilizados quatro pés em forma de “A”, como mostra a figura 5.9, confeccionados em madeira maciça de 2,5 cm estão localizadas; entre o módulo 1 e 2, no centro do módulo 3, 2/3 à jusante do módulo 4 e 2/3 à montante do módulo 6, ficando livre o módulo das amostras. Com isto o túnel de vento dista do chão ao eixo de simetria em 120,0 cm, como demonstrado nos desenhos do Apêndice 01.



Figura 5.9 – Detalhes dos pés de sustentação do túnel de vento.

Após toda a montagem uma parte do túnel foi revestida por placas de 4,0 cm de isopropileno expansível, a fim de se reduzir às perdas de calor para o meio, os detalhes serão descritos mais adiante, no tópico 5.2.6 – Isolamento do túnel, neste mesmo capítulo.

5.2. Dimensionamento e Aspectos construtivos do secador

A partir da decisão de se ter uma área de teste com uma secção quadrada de 40,0 cm e ter como variáveis; a temperatura, a umidade relativa do ar e a distância entre placas, não caberia introduzir mais variáveis, pois o sistema ficaria bastante complexo para o estudo. Então foi decidido em utilizar um túnel de vento, pois existe normalização para a construção do mesmo, e com isto deixando de lado variáveis desconhecidas.

5.2.1. Dimensionamento e Construção do corpo do túnel

Seguindo, então a norma ISO 5801 para a construção de túneis de vento, o protótipo do experimento foi dimensionado conforme o que especificou a norma, como demonstra a figura 5.10.

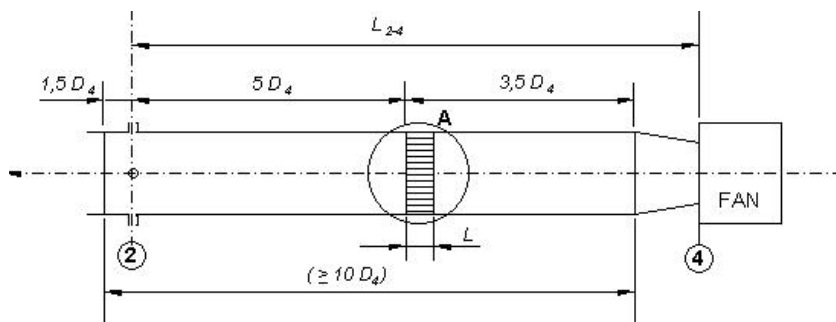


Figura 5.10 – Especificação conforme a norma ISO 5801

Houve duas opções para a confecção, uma era a construção por inteiro em chapa metálica galvanizada e reforçada com uma estrutura metálica em cantoneiras “L” e revestida por um isolamento térmico em “lã de rocha” ou “lã de vidro”; e a outra era construir em madeira com revestimento interno em fórmica, e poderia ser isolada termicamente utilizando parede dupla com espaçamento entre as madeiras, ou ainda utilizando uma parede simples com o uso de um revestimento externo servindo como isolamento térmico que poderia ser “isopor”, “lã de rocha” ou “lã de vidro”. Após alguns levantamentos de viabilidade técnica e econômica, e a necessidade de facilitar modificações futuras de qualquer parte do túnel sem grandes dificuldades, adotou-se pela última opção que foi a de confeccionar em madeira tipo “compensado naval” com revestimento para isolamento térmico utilizando poliestireno expandido comercialmente conhecido por “isopor”.



Figura 5.11 – Detalhe da construção do corpo do túnel, módulo das amostras.

O compensado naval foi a madeira escolhida devido a sua baixa higroscopicidade, isto é, a baixa capacidade de absorver umidades devido ao tratamento recebido com hidrofugantes, figura 5.11. Uma outra preocupação foi o acabamento interno do túnel, pois a rugosidade elevada da madeira poderia aumentar a turbulência do fluxo, dentro do túnel. Para isto, foi revestidos o interior do túnel com uma fórmica lisa na cor branca, pois além de dar um bom acabamento, acrescentou mais um elemento de isolamento, e diminuiu as perdas de calor, e ainda um clareamento das partes internas para visualizações durante os ensaios, conforme figura 5.12(a e b).



Figura 5.12(a e b) – Detalhes do revestimento interno do túnel de vento, da janela da seção de testes, e do laminador do fluxo de ar, ao fundo.

Neste trabalho foi utilizado o diâmetro hidráulico, Eq.5.1, para os cálculos do número de Reynolds e o dimensionamento do laminador do fluxo de ar, e tomaram-se as dimensões da seção transversal com o comprimento e largura de 0.40m, em função de critérios anteriormente citados. Então para estas dimensões o valor do diâmetro hidráulico foi de 0.40m.

$$D_h = \frac{4.A}{p} \quad (5.1)$$

Onde; D_h é o diâmetro hidráulico, A é a área do escoamento, p é o perímetro molhado.

Como se viu na figura 5.1, o túnel de vento apesar de estar dividido em seis partes distintas apresenta-se como um corpo único e rígido, que estão unidos por intermédio de flanges existentes em suas extremidades e que estão unidos um ao outro por intermédio de 12 parafusos M10 com porcas e arruelas de pressão. Entre um flange e outro foi colocada uma junta de silicone, a fim de se evitar vazamentos de ar para fora do túnel, conforme mostra a figura 5.13.



Figura 5.13 – Detalhe da fixação dos flanges

No Apêndice 01, encontra-se o desenho esquemático do túnel de vento confeccionado para este trabalho, dispostos em três vistas: frontal, lateral e de topo em escala de 1:40, e com suas devidas cotas. Também se encontra neste mesmo apêndice uma vista em corte frontal, em escala de 1:40, ilustrando detalhes internos, e da disposição de alguns elementos do túnel de vento.

5.2.2. Confeção do dumper

O motor que foi utilizado para o ventilador possuía velocidade fixa, resultado uma vazão de ar constante. Para complementar o controle da vazão de ar através da variação da área da secção transversal na saída do túnel, foi construído e disposto um dumper na entrada do túnel.

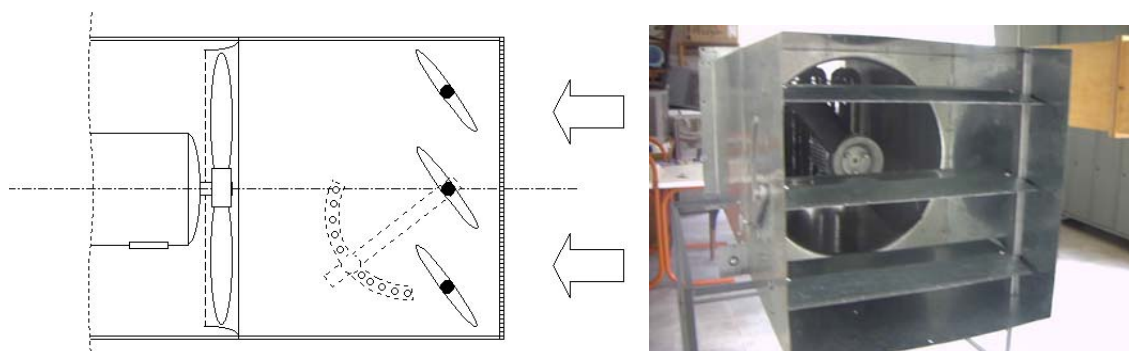


Figura 5.14(a e b) – Detalhes do dumper na entrada do túnel de vento

Como mostra a figura 5.14(a e b), o dumper é constituído por 3 paletas em forma de “asa de avião”, afim de reduzir perdas de carga, obter maior rigidez e evitar vibrações nas mesmas. Foram confeccionadas em chapa de aço galvanizado com bitola USG 26. As três paletas estão ligadas por um braço sincronizador do lado posterior do túnel, conforme figura 5.15(a).



Figura 5.15(a e b) – Detalhe do braço de acionamento, e da indicação de posicionamento.

Pela parte frontal se encontra um braço de acionamento para fixação e indicação do posicionamento em que o conjunto de paletas se encontra, como mostra a figura 5.15(b). A marcação é dada pelo percentual de fechamento do dumper, onde é marcado de 0 a 100%. Acionado por um braço, e que na outra extremidade existe um pontuador para fixar o dumper em uma determinada posição.

5.2.3. Dimensionamento do ventilador

O ventilador utilizado é composto por um Motor da marca Eberli com 1/20 CV e rotação de 1730 rpm conforme figura 5.16(b), e uma ventoinha da marca Wind com 6 pás e 35,0 cm diâmetro conforme figura 5.16(a). Como o diâmetro do túnel é de 40,0 cm, resta uma folga radial de 2,5 cm de cada lado, o suficiente para se encaixar um bocal de entrada. O motor do ventilador foi fixado por intermédio de duas barras transversais, que por sua vez estão fixados nas paredes laterais do módulo de aquecimento do ar.

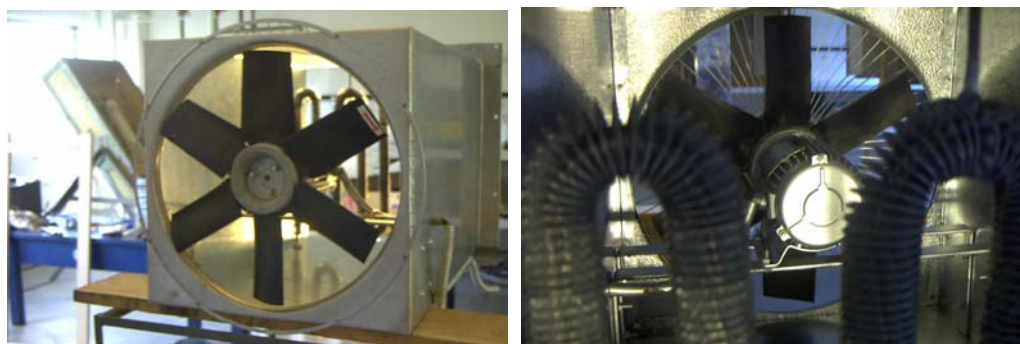


Figura 5.16(a e b) – Detalhes do bocal, do motor e da hélice do ventilador.

A norma da ISO 5801, utilizada na confecção do túnel de vento, também referencia as normas para a confecção de bocais, porém é necessário ferramentas especiais para a confecção do bocal.

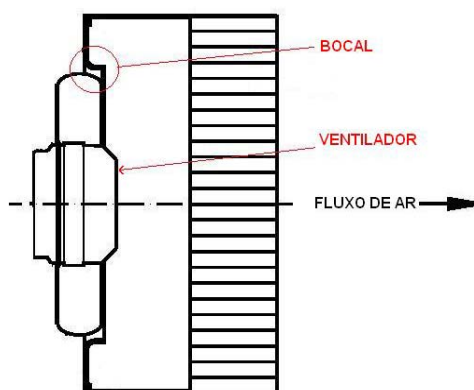


Figura 5.17 – Detalhes do bocal do ventilador.

Foi solicitado então a uma empresa especializada no ramo, citada nos agradecimentos, para que confeccionasse o bocal de entrada do ventilador, pois ela possui ferramentas apropriadas para preparação desse tipo de bocal curto destinado a ventiladores axiais. Este bocal foi confeccionado em chapa de alumínio com 1,0 mm de espessura, com dimensões externas de 40,0 x 40,0 cm e um furo central com diâmetro de 35,0 cm e bordas encurvadas para dentro para receber a ventoinha, como mostra a figura 5.17, e ficou situado entre o módulo de admissão de ar e o módulo de aquecimento do ar. E o posicionamento do ventilador em relação ao bocal ficou em conformidade com as normas.

5.2.4. Dimensionamento e confecção das resistências

Como o estudo de secagem foi conduzido com temperatura do ar acima da temperatura ambiente, um dispositivo de aquecimento se fez necessário. Para isto foram utilizadas resistências elétricas dimensionadas para provocar um aumento de temperatura do ar até 80°C, sendo esta a condição superior dos experimentos. Foi obtido como resultado um valor mínimo necessário de 8,0 kW distribuídos em 3 resistências da seguinte forma; a primeira resistência ficou com 3 kW, a segunda com 2 kW e a terceira com 3kW.

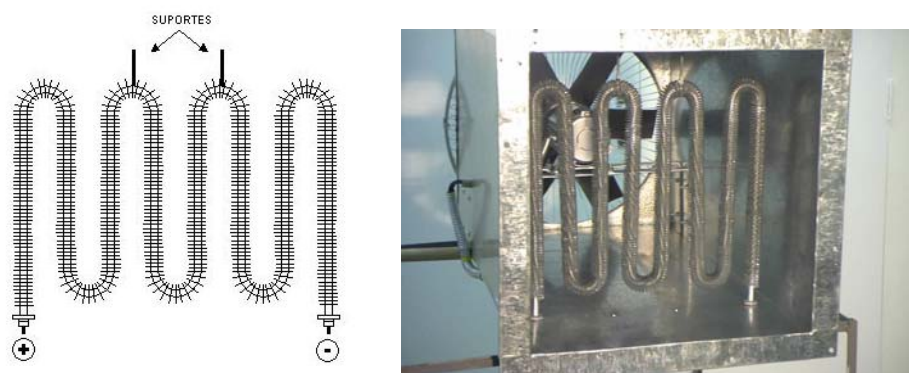


Figura 5.18(a e b) – Detalhe de uma única resistência.

Suas dimensões foram projetadas para que pudessem ocupar a maior área possível da secção transversal do túnel, ficando da seguinte forma, 350 mm de largura por 380 mm de altura, conforme figura 5.18(a e b). As resistências foram confeccionadas em aço inox e aletadas com chapa frisada a fim de se ter um maior rendimento na troca térmica com o ar. Foram fixadas na parte superior do módulo de aquecimento, por intermédio de parafusos existentes no seu próprio corpo.

A ligação elétrica ficou situada na parte de baixo do túnel de vento, a fim de se obter a condição mais segura da montagem.

O posicionamento das três resistências ficou defasado como uma espécie de chicane, para que a velocidade do ar aumente na região das resistências, e obtenha um aumento da troca térmica, melhorando assim a eficiência do sistema, como se pode observar nas figura 5.19.



Figura 5.19 – Detalhe do conjunto de resistências.

5.2.5. Confeção do laminador do fluxo de ar

O laminador de ar foi confeccionado de acordo com as normas da ISO 5801, conforme especificado na figura 5.20(a, b e c), e pela Tabela 5.1, que dimensiona o laminador de ar obtido usando Normas ISO-5801, em função de D_h , abaixo utilizadas:

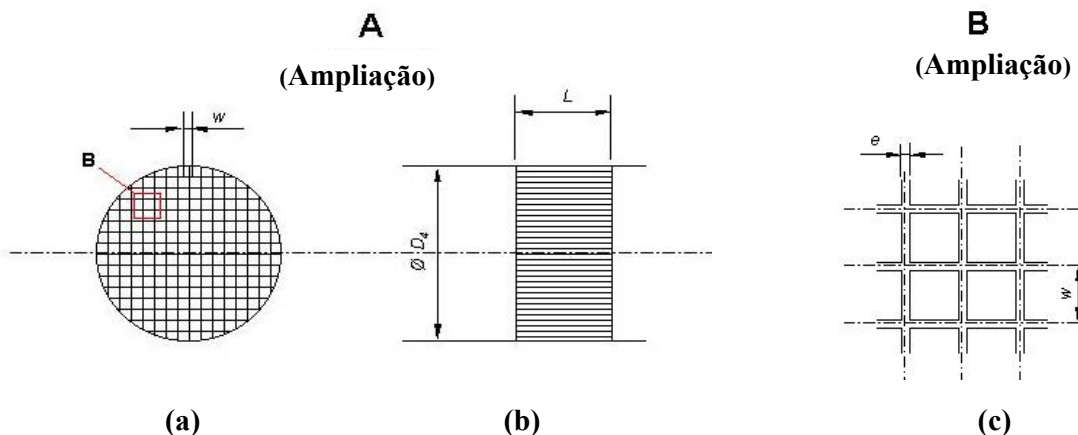


Figura 5.20 – Nomenclatura do laminador de ar.

Tabela 5.1- Dimensões do laminador obtidas usando Normas ISO-5801, em função de D_h

$L = 0,25 D_h$	$w = 0,075 D_h \pm 0,005 D_h$	$e < 0,005 D_h$
$L = 10,0 \text{ cm}$	$w = 30 \pm 2 \text{ mm}$	$e < 2 \text{ mm}$

Onde; L é o comprimento do laminador; w é a distância de uma parede a outra do laminador; e é a espessura máxima que a chapa do laminador deve possuir.

O laminador foi confeccionado em chapa de aço galvanizado de bitola USG 20, e fixada por intermédio de pregos nas paredes laterais do módulo do laminador de ar, conforme as figura 5.21(a e b).



Figura 5.21(a e b) – Detalhe do laminador do fluxo de ar

5.2.6. Isolamento do túnel

O isolamento do túnel de vento foi feito para se evitar as perdas térmicas através das paredes do secador, apesar da condutividade térmica da madeira ser baixa, segundo Incropera (1998), $K = 0,150 \text{ W/m.K}$, verificou-se que nas condições de operação havia uma perda grande de calor através das paredes do túnel. Para diminuir essas perdas decidiu-se pela colocação de uma camada de isolante nas paredes externas do secador. Utilizou-se um núcleo isolante em EPS (poliestireno expandido, $K=0,027 \text{ W/m.K}$), livre de CFC, caracterizado com retardante a chama pela NBR 11948 da ABNT de 4,0 cm de espessura, com cobertura em aço zincado de 0,5 mm.

O isolamento ficou compreendido nos módulos de aquecimento do ar, laminação do ar e equalização do ar, conforme figura 5.22 e 5.23.



Figura 5.22 - Posicionamento do isolamento do túnel.



Figura 5.23 – Detalhe o isolamento e acabamento do túnel.

5.2.7. Sistema elétrico

O sistema elétrico foi montado com a necessidade de se alimentar o motor do ventilador com tensão trifásica de 380 Volts e alimentar o restante dos equipamentos com tensão monofásica de 220 Volts. Através da figura 5.24, observa-se que o sistema é alimentado pela rede trifásica de 380 Volts e mais um fio neutro.

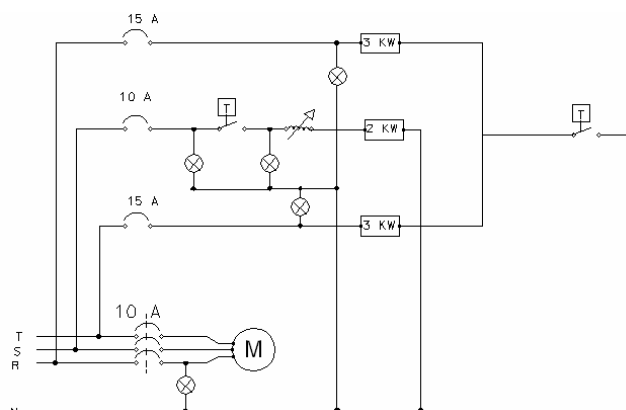


Figura 5.24 – Esquema elétrico do túnel de vento.

Todo o sistema elétrico está localizado no módulo de aquecimento e no módulo de equalização do ar, e instalado no painel elétrico localizado na parte frontal do túnel, conforme figura 5.25, é composto por um disjuntor trifásico de entrada que aciona o motor do ventilador; 3 disjuntores (um para cada resistência); 5 lâmpadas piloto (1 para o motor, 1 para cada resistência e outra para verificar se o termostato está modulando); 2 termostato (um controla a resistência 1 e 3 e a outra controla a resistência 2), e um variador de tensão.



Figura 5.25-Painel elétrico para acionamento



Figura 5.26-Termostato e variador de tensão

A princípio, foi colocado um variador de tensão no sistema, figura 5.26, a fim de se evitar a histerese do termostato que controla a resistência 2, mas foi observado que as faixas de temperaturas de utilização praticamente não necessitaria da variação da tensão. Em fim este equipamento não foi necessário, pois o sistema apresentou confiabilidade nas flutuações entre liga e desliga do termostato.

O sistema de segurança consiste de dois termostatos, onde um controla a resistência 2, e esta localizado dentro do painel elétrico; o outro controla as resistências 1 e 3 e está localizado na parte posterior do túnel de vento, conforme figura 5.26.

Ambos termostatos estão localizados logo após as resistências elétricas e tem suas sondas voltadas para dentro do túnel, como mostra a figura 5.27, elas estão encapsuladas em tubos de cobre, por motivo de segurança.

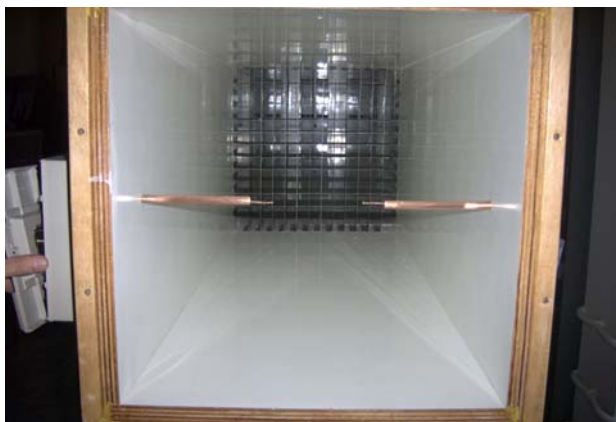


Figura 5.27 – Detalhe do posicionamento das sondas dos termostatos.

5.2.8. Fixação das amostras

Um dos aspectos do experimento é que apenas uma, das cinco placas existentes foi monitorada, e as demais ficaram fixadas ao lado da placa monitorada.



Figura 5.28 – Sistema de fixação das placas.

A fixação das amostras na seção de testes do túnel de vento foi realizada por meio de hastes filetadas embutidas no corpo das amostras durante a fabricação destas, como mostra a figura 5.29(a e b).

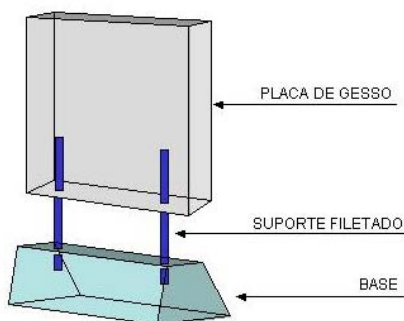


Figura 5.29(a e b) – Sistema de fixação da placa monitorada.

Do conjunto de placas, apenas uma delas é monitorada e, portanto a sua fixação na seção de testes é um pouco diferente por conta da acomodação da instrumentação. A placa monitorada teve duas hastes filetadas presa a uma base em madeira na forma de tronco de pirâmide, que ficará em cima da balança de pesagem, conforme a figura 5.29(a e b).

Para se colocar as amostras na seção de testes do secador; o acesso é feito através uma tampa que se encontra na parte superior. Esta tampa é bi-partida e separadas por uma terceira parte que está fixa em uma das amostras, e na parte inferior estão localizados os furos que fixarão as placas no túnel de vento, figura 5.30.



Figura 5.30 – Detalhes da tampa superior, para a colocação das amostras.

5.3. INSTRUMENTAÇÃO

Para se validar toda a parte construtiva do túnel de vento, acima descrito, foi necessária a instalação de um aparato para captação de dados, onde incluem; medidores de temperatura, umidade relativa, peso, velocidade do ar, pressão e um sistema para aquisição de dados.

5.3.1. Medições de temperatura

Para as medições de temperatura foram utilizados termopares revestidos tipo “T” (cobre-constantan) com diâmetro de 3 mm e comprimentos de 125 e 200 mm, e com elemento de ligação fios de compensação, também tipo “T” (cobre-constantan).

Foram utilizados 16 termopares, dos quais um ficou instalado logo após a saída das resistências, conforme figura 5.31, visando o registro da temperatura do ar após ter passado pelas resistências e como alerta de segurança caso um dos termostatos viesse a queimar.



Figura 5.31 – Termopar para registro da temperatura do ar logo após as resistências.

Os demais termopares foram utilizados para as medições de temperatura interna da placa ensaiada. Para a distribuição dos termopares dentro da placa, foi considerado que haveria simetria na altura média da placa e, portanto poderia ser registrado o campo de temperatura apenas da região acima da linha de simetria como mostra a figura 5.32.



Figura 5.32 – Detalhes da fixação dos termopares na placa



Figura 5.33–Esquema proposto para a distribuição dos termopares no interior da placa.

Conforme a figura 5.33, a metade superior da placa foi dividida em 12 partes iguais, com o objetivo de se colocar um termopar em cada quadrante, mas como os termopares não podem estar alinhados, pois foram colocados na vertical, foi necessário deslocá-los. Daí cada quadrante foi dividido verticalmente em mais três áreas, ficando da seguinte forma: os quadrantes superiores ficaram com os termopares alojados na primeira área (vermelho); os quadrantes do meio ficaram com os termopares alojados na segunda área (azul); e os quadrantes inferiores ficaram com os termopares alojados na terceira área (amarela). Surgiu também a necessidade de avaliar o comportamento da variação da temperatura em cima da linha de simetria, então foram instalados equidistantes três termopares (verde). No Apêndice 1, podem-se observar maiores detalhes na distribuição dos termopares dentro das placas de gesso, onde mostra-se que os termopares identificados pela cor amarela e azul medem as temperaturas mais próximas à superfície da placa, e os termopares identificados pela cor vermelha e verde, medem as temperaturas no centro das placas.

A figura 5.34(a e b) mostra a disposição dos termopares e da placa em relação ao túnel de vento, observam-se também as ligações dos termopares aos cabos de compensação.

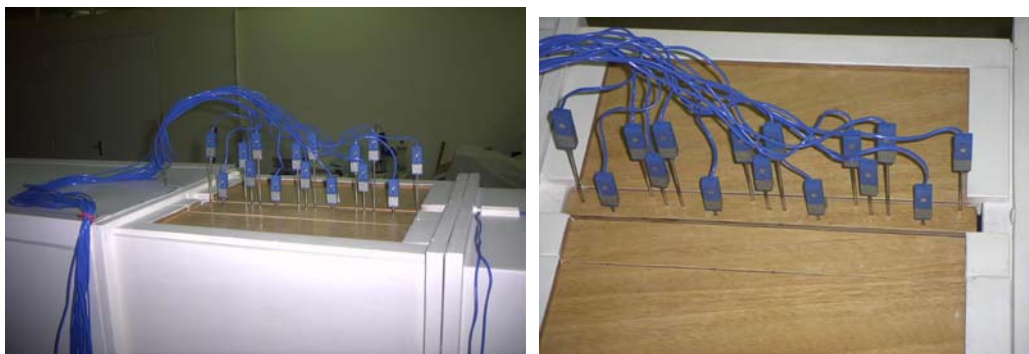


Figura 5.34(a e b) – Detalhe dos termopares e dos cabos de compensação.

A figura 5.35, mostra as ligações dos cabos de compensação ao sistema de aquisição de dados chamados de DataLogger, onde os detalhes das ligações serão vistas mais adiante no tópico 5.3.6 – Banco de aquisição de dados.



Figura 5.35 – Detalhe da ligação dos termopares ao Logger.

A figura 5.36, mostra um gráfico com o resultado encontrado obtido nos experimentos do perfil de temperatura no interior da placa de gesso, cujos dados foram adquirido conforme as ligações dos termopares e o DataLogger.

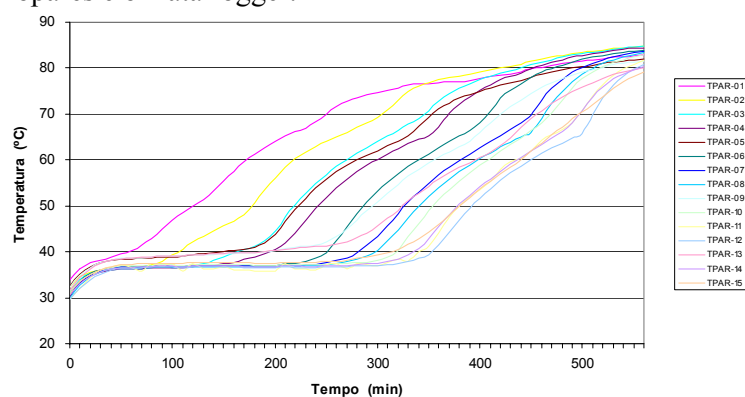


Figura 5.36 – Dados de temperatura captados pelo DataLogger.

5.3.2. Medições de Umidade Relativa

Para as medições de umidade relativa e temperatura do ar dentro do túnel de vento foram utilizados dois transdutores RHT-WM da NOVUS com saída de 4-20 mA, com sonda de comprimento de 22,0 cm e de diâmetro de 1,25 cm, conforme figura 5.37(a).

Os medidores estão instalados antes e após as placas de gesso, de forma que o primeiro está fixo no módulo de equalização do ar e o segundo no módulo de saída do ar. Desta forma, durante o ensaio haverá um controle das umidades e das temperaturas antes que o ar passe pelas amostras e logo após a sua passagem, conforme figura 5.37(b).



Figura 5.37(a e b) – Medidor de umidade e temperatura de ar interno do túnel.

A figura 5.38, mostra um gráfico com o resultado encontrado obtido nos experimentos das umidades relativas e temperaturas do ar, cujos dados foram adquirido conforme as ligações dos termopares e o DataLogger.

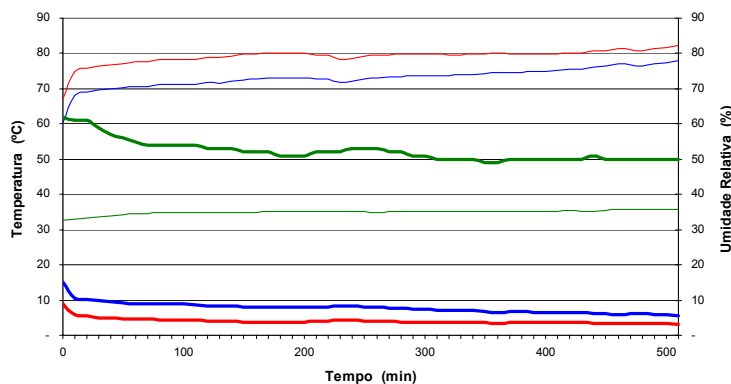


Figura 5.38 – Dados das umidades rel. e temperatura e captados pelo DataLogger.

A colocação das sondas se faz por intermédio de um orifício situado na parte superior do túnel de vento e de tal forma que o ponto de leitura se localize no centro do túnel.

Para as medições de umidade relativa e temperatura do ar do ambiente externo ao túnel de vento, foi utilizado um higrotermógrafo digital portátil da TSA, com assessoramento ótico da Webcam, posicionado na parte frontal do túnel em frente da balança conforme figura 5.39.



Figura 5.39 – Posicionamento do higrotermógrafo e a webcam.

5.3.3. Medições do Peso

Para as medições de peso foi utilizada uma balança MARTE A-10K, e com assessoramento ótico Webcam, conforme figura 5.40(a e b). A balança Eletrônica de Precisão Marte possui tara subtrativa, mostrador digital de cristal, temperatura de operação de 10°C a 30°C, precisão de 0,01g com tolerância de 10%, aferido inicialmente pelo IPEM (Instituto de Pesos e Medidas). A balança esta posicionada abaixo do módulo das amostras, em cima de uma mesa de apoio, e é utilizada para pesar apenas uma única placa de gesso, conforme figura 5.40(a).



Figura 5.40 (a e b) – Balança para pesar as amostras

Devido à baixa temperatura de trabalho permitida para a balança, cujo valor limite máximo é 30°C , foi necessário que se fizesse um isolamento da balança com arrefecimento, conforme esquema demonstrado na figura 5.41, pois a temperatura do ambiente de trabalho, se encontrava numa média de 33°C , isto é, 3°C acima do permitido.



Figura 5.41 – Esquema do isolamento da balança

O isolamento consistiu de uma caixa de papelão bi-partida, fechada na parte superior e aberta em baixo onde ficava em contato direto com a mesa de apoio. O lado de dentro foi totalmente revestido com chapas de “isopor” com 2,0 cm de espessura, e do lado de fora foi revestidos com papel alumínio com espessura de 0,32 mm. Pela frente foi feito um furo de secção retangular de 160 x 70 mm, permitindo a visualização do display para a leitura do peso, conforme a figura 5.42.



Figura 5.42 – Detalhe do Isolamento da balança

A figura 5.42 mostram o interior do isolamento da balança com suas duas câmaras, onde a primeira câmara equaliza o ar aspirado e lança para a outra câmara onde está localizada a balança, através de dois cooler de 4", ambos soprando nas laterais da balança.

A figura 5.43(a) mostra um captador de ar encaixado na parte traseira do isolamento da balança confeccionado em PVC do tipo tubo de esgoto SN, NBR 5688/99-DN 100 mm, e na sua outra extremidade, como mostra a figura 5.43(b), voltada para fora da sala durante o ensaio, o captador transpassa a janela do laboratório em direção ao exterior da sala, visando a captura de ar mais frio do que o da sala.



Figura 5.43(a e b) – Detalhes do captador de ar para a balança.

5.3.4. Medições de Velocidade

Para as medições de velocidades foi utilizado um anemômetro digital portátil modelo HHF23 da OMEGA com diâmetro das hélices de 25 mm. Foi medida a velocidade do ar na saída do túnel de vento, na altura das comportas do último módulo descrita anteriormente, conforme figura 5.44. Para posterior aquisição das velocidades entre placas.



Figura 5.44 – Detalhe do anemômetro e medição de velocidade do ar.

5.3.5. Medições de Pressão

Para as medições de pressão interna ao túnel de vento, foi utilizado um tubo pitot com 41,0 cm de comprimento, ligado a um leitor digital GULpress 201, como mostra a figura 5.45, abaixo.



Figura 5.45– Detalhe da localização do instrumento.

O tubo pitot foi instalado na linha de simetria da lateral posterior do módulo de equalização do ar, antes das amostras, fixo por um “mandril” ajustável, de forma a posicionar o tubo pitot em qualquer ponto do eixo horizontal, como mostra a figura 5.46(a e b).



Figura 5.46 (a e b) – Detalhe do posicionamento do tubo pitot.

Com isto foi possível medir a pressão dinâmica local de modo a inferir a velocidade em qualquer ponto ao longo da linha de simetria da seção do túnel de vento na direção horizontal e vertical.

5.3.6. Banco de aquisição de dados

O registro das informações obtidas pelos sensores de umidade relativa, de temperatura e de pressão, foram feitas por um DataLogger Data-taker 605, com 10 canais, ligado a um computador, que armazenou os dados em formato de planilha eletrônica, de tal forma que facilitou o posterior manuseio dos dados. O DataLogger foi alocado abaixo do módulo de equalização do ar, em cima de uma mesa de apoio, como mostra as figuras 5.6(a e b). Apesar de possuir 10 canais básicos, ele permite um arranjo que amplia sua capacidade para 32 canais. Neste trabalho foram necessários apenas 20 canais.

O DataLogger utiliza um software bem simples de se programar, e que permite a visualização das informações no monitor do computador em um período pré-determinado, cuja frequência utilizada para este trabalho foi de 10 minutos.

As informações geradas no decorrer dos experimentos eram armazenadas automaticamente pelo mesmo programa em um banco de dados no formato de planilha eletrônica, como mostram a figura 5.47(a e b).

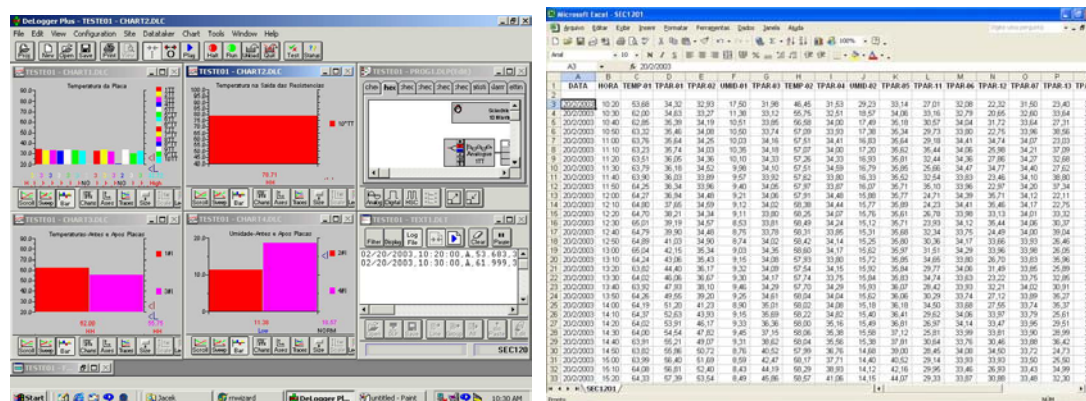


Figura 5.47 (a e b) – Detalhe do programa do DataLogger e da apresentação dos dados na planilha.

Outros dados como o peso da placa, a temperatura e a umidade relativa do ar do ambiente externo, foram registrados ao longo do processo de secagem através de imagens do painel da balança e do higrotermôgrafo digital por intermédio de uma Webcam, conforme figura 5.48. As informações foram registradas em fotos (figura 5.40(b)), também com uma frequência de 10 minutos, e salvos automaticamente em arquivos distintos que posteriormente foram digitadas em uma planilha eletrônica. Fez-se necessário o uso da webcam, pois os dados precisavam ser captados a cada 10 minutos e como um experimento teve quase 20 horas de duração, inviabilizaria uma pessoa acompanhar manualmente tal captura.



Figura 5.48 – Detalhe da Webcam e a captação de dados.

5.3.7. Aferição da instrumentação

Para todo instrumento de medição é necessário que sejam feitas aferições de tal forma que dêem confiabilidade nas informações apresentadas. Para isto foi necessário que se exigisse dos fornecedores dos instrumentos os certificados de aferição. No caso dos termopares, foi realizada uma calibração comparando os valores indicados por este com os valores de um termômetro padrão a fim de identificar possíveis desvios de medição.

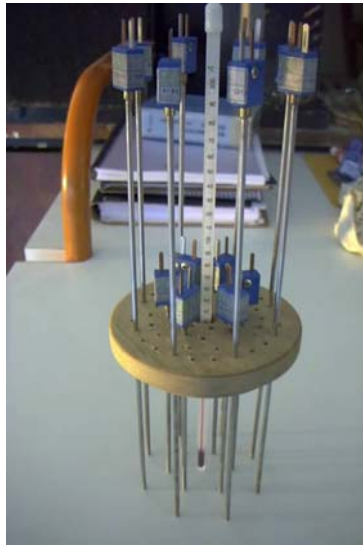


Figura 5.48 – Detalhe da disposição dos termopares no banho térmico.

A aferição dos termopares foi feita da seguinte forma: Pegaram-se os termopares com seus respectivos cabos de compensação, com os comprimentos definitivos, ligou-os nas saídas definitivas do DataLogger e introduziu-os num banho térmico, e no centro foi colocado um termômetro de bulbo padrão, apropriado para aferições, conforme figuras 5.48 e 5.49(a e b).

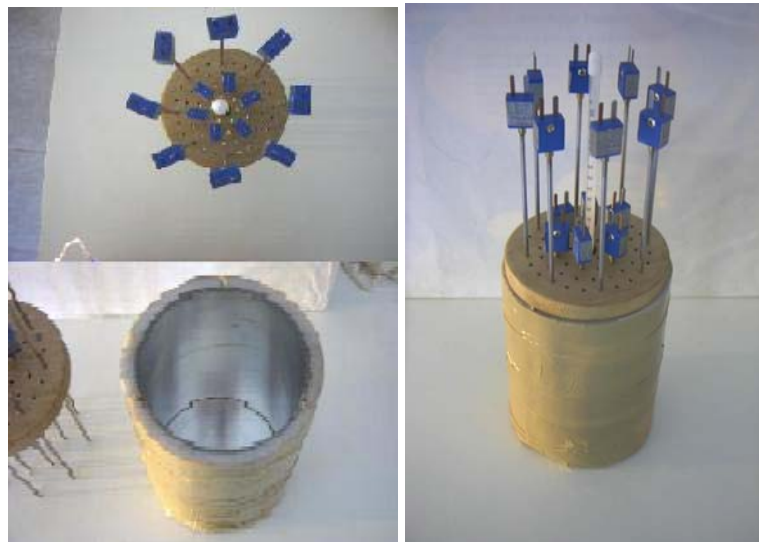


Figura 5.49 (a e b) – Detalhe do recipiente de banho térmico para aferição de termopares.

Os resultados foram obtidos através de três pontos, aproximadamente 0° , 35° e 80° C. Na qual foram obtidos desvios abaixo de 1%, na qual em engenharia são satisfatórios, para este tipo de medição.

6. MODELAGEM MATEMÁTICA

O princípio de uma modelagem matemática de um fenômeno físico é baseado na obtenção de um sistema de equações que possibilite prever o comportamento do fenômeno estudado.

Os métodos de modelagem usados para tal finalidade são divididos em analítico e analítico-experimental.

O primeiro consiste de um sistema de equações de balanço, de massa, de energia, equações constitutivas, como as curvas isotermas de sorção, descrição do processo, e um algoritmo computacional.

O segundo modelo parte de dados experimentais obtidos em laboratório, através dos qual se obtém valores para X , W , e Z , que representam o conteúdo de umidade na base seca, taxa de variação do fluxo de massa, e o vetor de posicionamento de coordenadas (x, y, z) .

O modelo analítico-experimental é aplicado quando se dispõem de um experimento de onde se podem obter dados de temperatura, umidade relativa, pressão e tempo. Com os valores obtidos dessas propriedades se podem obter as curvas $(X(t), t)$ e $(dX/dt, t)$, mostradas nas figura 6.1(a), e figura 6.1(b), que são básicas para representar o comportamento da secagem durante o processo. Os dados a serem usados para a obtenção dessas curvas virão de um experimento laboratorial descrito no Capítulo 5.

Neste método, o modelo é composto de funções obtidas através da aplicação de método de ajuste de curvas.

6.1. Método da modelagem analítico-experimental

Numa simulação de um processo de secagem, é desejados estimar as condições operacionais de temperatura e umidade relativa do ar adequada, e o tempo necessário para alcançar a secagem requerida. Na maioria das vezes estas condições são determinadas de forma experimental, submetendo a amostra a um processo de secagem controlado, onde cada um dos parâmetros envolvidos são monitorados e mantidos em condições similares àquelas que deverão ser encontrados num processo de grande escala.

As curvas do conteúdo de umidade versus tempo e taxa de secagem versus conteúdo de umidades obtidas através do processo experimental, são básicas para representar o processo de secagem. Como definiu o Perry(1973), a figura 6.1(a) representa uma curva característica típica da variação do conteúdo de umidade com o tempo, enquanto que a figura 6.1(b) representa a variação da taxa de secagem com o conteúdo de umidade. Nelas podem-se observar quatro períodos diferentes. O primeiro, no intervalo AB, mostra uma taxa crescente durante o início do processo. O segundo, representado pelo trecho BC, mostra um período onde a taxa atinge seu valor máximo e é constante. O terceiro e quarto período, CE, e ED, respectivamente, mostram uma taxa que varia linearmente, e uma taxa que varia exponencialmente com o conteúdo de umidade.

Cada um destes períodos é dominado por mecanismos físicos diferentes cuja compreensão é essencial para uma adequada interpretação dos resultados experimentais e também para a implementação de modelos matemáticos que permitam simular numericamente o processo de secagem.

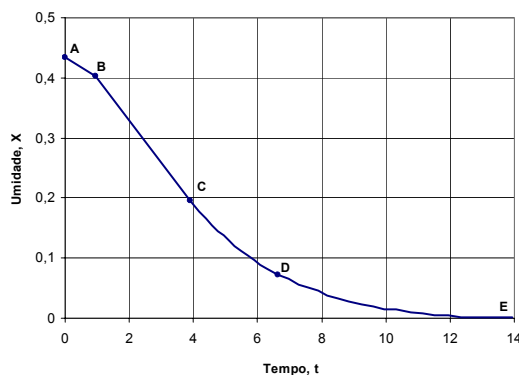


Figura 6.1(a) – Curva umidade x tempo

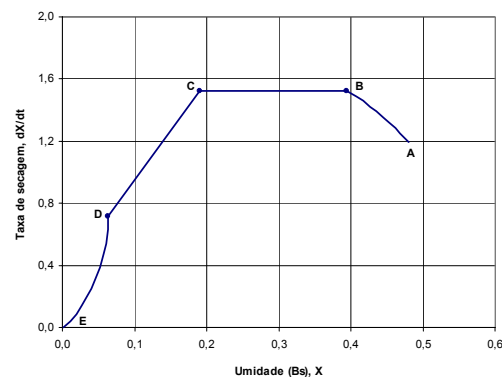


Figura 6.1(b) – Curva taxa de secagem x umidade

6.2. Modelos de Secagem para o período da taxa de secagem constante

Quando o calor para a evaporação no período de taxa constante, é fornecido por um gás aquecido, um equilíbrio dinâmico é estabelecido entre a taxa de transferência de calor para o material por convecção e a entalpia de vaporização. Esse balanço de energia dá a equação diferencial abaixo, que permite calcular o valor da taxa do conteúdo de umidade durante esse período:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h_t A \Delta T}{L_V} \quad (6.1)$$

Onde, $\frac{dX}{dt}$ é a taxa de secagem, h_t é o coeficiente total de transferência de calor, L_V é o calor latente de vaporização, ΔT representa a diferença de temperatura entre o gás e a superfície, e A é a área transferência de calor e de evaporação.

6.3. Modelos de Secagem para o período da taxa de secagem variável

Segundo Keey(1972) não existe uma teoria simples que abranja todos esses modos de movimentação e transferência de massa. Na prática o procedimento para a determinação de alguns parâmetros como condutividade, difusividade, e tempo de secagem, tem sido a escolha de um desses modelos para prever esses parâmetros. Segundo Perry(1973), do ponto de vista de projetos de secadores, pode-se considerar dois modelos principais, o modelo da difusão e o modelo da capilaridade.

6.3.1. Modelo da difusão

Quando a difusão líquida controla a secagem no período de taxa variável, a equação diferencial para transferência de massa unidimensional para regime transitório, equação (6.2), usada para descrever o movimento do conteúdo de umidade.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (6.2)$$

Onde X é o conteúdo de umidade num dado tempo, x é a coordenada espacial onde ocorre à transferência de massa, D_1 é a difusividade do líquido no início do período da taxa variável, e t é o tempo.

A solução da equação diferencial acima é obtida a través de uma série de Fourier (Perry, 1973), e representada já para valores médios de umidade no espaço, pela equação (6.3). De acordo com Perry (1973), esta solução é devida a Sherwood (1929), que a resolveu para o referido período, assumindo que a superfície está seca superficialmente, ou que o conteúdo de umidade de equilíbrio e a distribuição inicial de umidade é uniforme. Para essas condições foi obtida a seguinte solução:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_{Cr} - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D_1 t (\pi/2d)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_1 t (\pi/2d)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_1 t (\pi/2d)^2} + \dots \right] \quad (6.3)$$

Onde, X_{eq} é o conteúdo de umidade de equilíbrio com o ambiente, e X_{Cr} é o conteúdo de umidade crítico, d representa o valor da metade da espessura da placa quando a secagem for pelas duas faces, ou a espessura total da placa quando a secagem ocorrer apenas por uma das faces.

Para períodos longos de secagem, a equação da difusão pode ser simplificada através do truncamento da série no primeiro termo, conforme a equação (6.4):

$$\frac{X - X_{eq}}{X_{Cr} - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_1 t (\pi/2d)^2} \quad (6.4)$$

Partindo-se desta equação, e diferenciando-se esta em relação ao tempo, obtém-se a equação da taxa de secagem,

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-\pi^2 D_1}{4d^2} (X - X_{eq}) \quad (6.5)$$

6.3.2. Modelo da Capilaridade

Em alguns materiais, devido ao tipo de sua estrutura porosa, o movimento do conteúdo de umidade é devido ao efeito de capilaridade. Uma das maneiras de se calcular a taxa de variação do conteúdo de umidade é a través de uma equação, onde a variação do conteúdo de umidade é uma função linear como a equação (6.6).

Segundo Perry(1973), a teoria capilar assume que um berço de esferas não porosas é composto de partículas que cercam um espaço chamado de poro. Estes poros são conectados por passagens de vários tamanhos, a menor porção é chamada de cintura. Como a remoção da água do berço é contínua, a curvatura da superfície da água nos interstícios da capa superior das esferas aumenta e uma pressão de sucção, resulta da curvatura e é fixo para cima. Como a remoção da água é contínua, a pressão de sucção atinge um valor no qual o ar é tirado dos espaços dos poros entre as sucessivas capas das esferas.

$$\frac{dX}{dt} = -K_1 (X - X_{eq}) \quad (6.6)$$

Onde K_1 é função da taxa de umidade, que é usada no período da taxa umidade constante, da umidade crítica e da umidade de equilíbrio, conforme a equação (6.7).

$$K_1 = - \frac{\left(\frac{dX}{dt} \right)_{cte}}{X_{Cr} - X_{eq}} \quad (6.7)$$

Que substituindo-se o valor da taxa quando constante, dado pela equação (6.1), obtém-se uma equação modificada para K_1 , a equação (6.8).

$$K_1 = - \frac{h(T - T_s)}{\rho_s L_v d (X_{Cr} - X_{eq})} \quad (6.8)$$

Substituindo-se o valor de K_1 da equação (6.8), na equação (6.6), obtém-se a equação(6.9), que é a equação da taxa de secagem para o modelo de simulação capilar.

$$\frac{dX}{dt} = - \frac{h(T - T_s)(X - X_{eq})}{\rho_s L_v d (X_{Cr} - X_{eq})} \quad (6.9)$$

Onde, X_{Cr} é o conteúdo de umidade crítico, X_{eq} é o conteúdo de umidade de equilíbrio, ambos obtidos experimentalmente.

6.3.3. Escolha do modelo para o período da taxa de secagem variável

De posse dos dados experimentais é necessário saber qual o modelo que melhor se aplica na descrição da taxa de variação do conteúdo de umidade.

Comportamentos difusivo ou capilar apresentam uma curva linear quando os dados da variação do conteúdo de umidade pelo Tempo e pela Difusividade, são plotados no gráfico semi-logaritmico Perry(1973) , da figura 6.2. Embora não seja utiliza por completo neste trabalho.

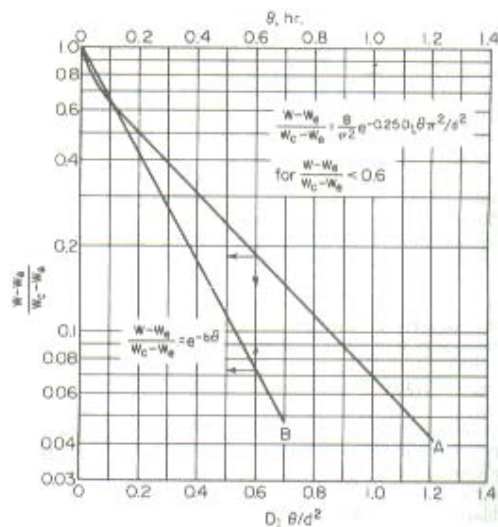


Figura 6.2 – Gráfico da variação da umidade vs. tempo vs. difusividade.Perry(1973).

Na figura 6.2 são mostradas duas curvas. A curva “A”, corresponde ao gráfico da equação (6.3), plotado contra um adimensional que é dado pela relação do produto da difusividade pelo tempo, que é dividido pela espessura da placa. Segundo Perry(1973), a equação (6.3) é válida para valores da relação do conteúdo de umidade $\leq 0,6$, que corresponde a intervalo de tempo maior que 0.10 hr.

A curva “B” corresponde a plotagem de dados experimentais, apresentados por Perry(1973), do conteúdo de umidade na forma adimensional, contra o tempo num gráfico semi-logarítmico.

De uma forma geral, para um gráfico como o da curva “B” que é uma reta no gráfico semi-logarítmico, a equação é uma exponencial como a da equação (6.10), onde b é a inclinação da reta.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_{Cr} - X_{eq}} = e^{-bt} \quad (6.10)$$

A curva “B” pode ajudar na definição se é possível definir se o período de taxa de secagem variável pode ser simulado pelo modelo difusivo ou capilar. Para tal, é necessário que se trace um gráfico deste tipo com os dados obtidos nos experimentos. Se o gráfico obtido for uma reta, a simulação da secagem desse período pode ser feita usando um desses modelos (difusivo ou capilar).

A escolha entre um ou o outro modelo de simulação, vai ser feita através da inclinação da reta B. Ou seja, se fosse traçada uma curva da equação (6.6), o coeficiente K_1 , obtido através da equação (6.8), seria a inclinação dessa curva. E, se K_1 tiver a mesma inclinação da curva obtida com os dados experimentais, a secagem, no período de taxa de secagem variável, pode ser simulada com o modelo capilar, caso contrário poderá ser simulada com o modelo difusivo. Perry(1973).

6.4. Parâmetros de escoamento, transferência de calor e de massa.

Neste parágrafo serão apresentados uns conjuntos de relações a fim de caracterizar alguns parâmetros essenciais envolvidos no processo de secagem. Estes parâmetros dizem respeito ao regime de escoamento no túnel de vento antes da seção de teste e na própria seção de teste onde se tem um arranjo de placas paralelas. Os outros parâmetros de interesse são o coeficiente de transferência de calor convectivo e o coeficiente de transferência de massa.

6.4.1. Número de Reynolds

O regime de escoamento é caracterizado através do número de Reynolds. Este representa uma relação entre as forças de inércia e as forças viscosas.

Para o escoamento num duto, o numero de Reynolds, baseado no diâmetro hidráulico (D_H), é dada pela equação (6.11). Para valores do número de Reynolds menores do que 2300, o escoamento é considerado como sendo laminar. Acima deste valor segundo Incropera(1998), poderá ser considerado como turbulento.

$$Re_{D_H} = \frac{VD_H}{\nu} \quad (6.11)$$

A caracterização do escoamento entre as placas na região de teste requer uma análise mais detalhada de modo, a saber, se este pode ser tratado como um escoamento num canal formado por duas placas adjacentes ou apenas como um escoamento sobre uma placa plana. Isto dependerá essencialmente da espessura da placa e da camada limite que se desenvolve nas superfícies das placas e da distância entre as placas. A figura 6.3 mostra algumas situações possíveis para uma placa plana fina.

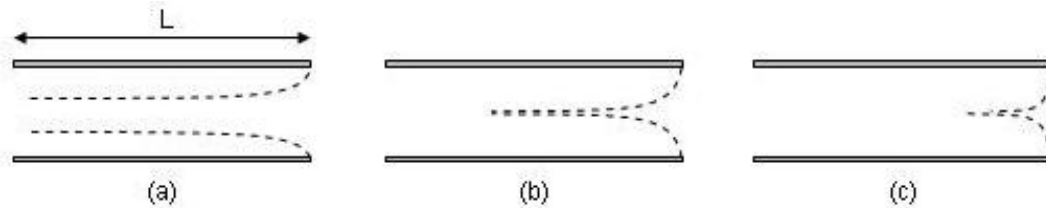


Fig. 6.3 – Camada limite Hidrodinâmica

No esquema da figura 6.3(a) temos uma das condições extremas em que as camadas limites desenvolvidas nas placas não se afetam mutuamente ao longo de todo o escoamento entre as placas e, portanto o problema pode ser equacionado como sendo um escoamento sobre uma placa plana. No outro extremo temos a configuração mostrada na figura 6.3(c) onde as camadas limites se interceptam logo na região de entrada das placas e neste caso o problema deve ser tratado como um escoamento num canal ou num duto de seção retangular. Uma terceira possibilidade é representada na figura 6.3(b) onde o escoamento pode ser tratado parcialmente como um escoamento num canal e parcialmente como um escoamento sobre uma placa plana, dependendo da extensão da região de desenvolvimento do escoamento entre as placas.

Na placa do experimento, com uma espessura que não pode ser considerada a de uma placa fina, aparecerá uma pequena região de recirculação na extremidade da placa em contato com o fluido que está vindo a montante, devido ao efeito de borda, mas que não provocará descolamento da camada limite, deixando-a apenas mais delgada, comparativamente com as da figura 6.3, como mostra a figura 6.4.

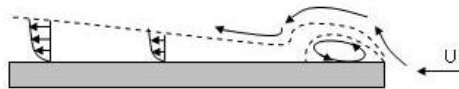


Figura 6.4 – Camada limite numa placa de espessura não fina

Como não foi planejada no experimento nenhuma medição que detectasse esse fenômeno na cabeça da placa, e como o efeito do mesmo causa uma diminuição na espessura da camada limite. Admitiu-se que o escoamento se dá como no esquema mostrado na figura 6.3a e para este caso, o número de Reynolds baseado no comprimento (L) da placa será dado pela equação (6.12), com V sendo neste caso a velocidade média entre as placas.

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} \quad (6.12)$$

Sabe-se que se o número de Reynolds for menor que 5×10^5 o escoamento será considerado laminar, caso contrario diremos que será turbulento.

A espessura da camada limite pode ser calculada pela equação (6.13) que representa a solução exata de Blasius para a camada limite quando ($x = L$), com x sendo a coordenada na direção do escoamento.

$$\delta = \frac{5L}{\sqrt{Re_L}} \quad (6.13)$$

Da mesma forma que se desenvolve uma camada limite hidrodinâmica ao longo do escoamento sobre a placa, também e simultaneamente serão desenvolvidas uma camada limite térmica (δ_t) e uma camada limite de concentração (δ_c). Pode ser demonstrado (Sisson e Pitts, 1988) que relações entre as camadas limites hidrodinâmica e térmica e hidrodinâmica e de concentração são dadas respectivamente pelas equações (6.14) e (6.15).

$$\frac{\delta}{\delta_t} \approx Pr^{\frac{1}{3}} \quad (6.14)$$

Da relação entre as camadas limite hidrodinâmica e Camada limite de concentração, surge o número de Schmidt, equação (6.14), definido como a relação entre a difusividade térmica e a hidráulica, pela equação (6.15).

$$\frac{\delta}{\delta_c} \approx Sc^{\frac{1}{3}} \quad (6.15)$$

Onde, Pr é o número de Prandtl e Sc é o número de Schmidt dado pela equação (6.16),

$$Sc = \frac{\alpha}{D_{ab}} \quad (6.16)$$

6.4.2. Fluxo de calor transferido do ar para a placa por convecção

O número de Reynolds para o experimento foi calculado pela velocidade entre as placas, calculados em função da vazão e da equação da continuidade. Como este valor foi menor do que 500.000, valor crítico para o número de Reynolds de uma placa plana, escolheu-se a correlação dada pela equação (6.17), obtida em Incropera(1998).

$$Nu = 0,332 Re^{0.5} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{para } Pr \geq 0.6 \quad (6.17)$$

Onde, Nu é o número de Nusselt, que dado pela relação entre h , o coeficiente de convecção, L , o comprimento da placa, e k , a condutividade térmica.

6.4.3. Taxa de transferência de massa por convecção

O cálculo da taxa de secagem durante o período constante, poderia ser efetuado em função do coeficiente de transferência de massa. Como este capítulo está se propondo a fazer uma breve revisão nos fundamentos da secagem, de modo a contribuir como um ponto de

partida para uma leitura mais aprofundada no tema, decidiu-se falar sobre a obtenção do coeficiente de transferência de massa.

A analogia colocada pela equação abaixo mostra que as duas funções equação (6.18) e equação (6.19) pela natureza da relação entre os números adimensionais admitem o mesmo tipo de relação.

$$\frac{Nu}{Pr^n} = f'1(x^*, Re_L) \quad (6.18)$$

$$\frac{Sh}{Sc^n} = f'2(x^*, Re_L) \quad (6.19)$$

Desta forma, pode-se tomar a equação (6.20) para cálculo do h_m para uma placa plana.

$$Sh = \left(\frac{h_m L}{D_{ab}} \right) = 0,332 Re^{0.5} Sc^{1/3}, \text{ para } Sc \geq 0.6 \quad (6.20)$$

6.5. Cálculo da difusividade

Para o cálculo da difusividade do gesso, usou-se a equação (6.4), e os dados experimentais. A substituição dos valores da umidade obtidos experimentalmente na equação (6.5) permitiu calcular a difusividade, como função da umidade. Keey(1978), apresenta um gráfico que mostra o comportamento da difusividade de um material higroscópico parecido com o gesso, que será usada para a comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

Numa rápida inspeção na figura 6.3, verifica-se que em função do estágio da secagem, os valores da função difusividade passam por máximo e mínimo, tendo um ponto de inflexão na região de adsorção multimolecular.

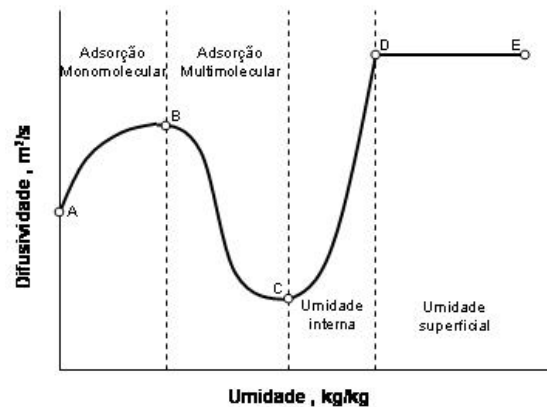


Figura 6.3 – Gráfico da difusividade vs. Umidade.

6.6. Cálculo do Tempo de Secagem

Um dos principais objetivos na modelagem do processo de secagem é a determinação do tempo de secagem.

De modo a se obter uma expressão para o tempo de secagem, define-se a taxa secagem, conforme se vê na equação (6.21), abaixo:

$$N = -\frac{dX}{dt} \quad (6.21)$$

A integração da equação (6.21) permitirá o cálculo do tempo de secagem,

$$\int_0^t dt = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N} \quad (6.22)$$

Como a taxa de secagem é constante num período e variável em outro, o cálculo do tempo será, pois dividido é dividido em duas partes: o tempo gasto no período de tempo da taxa constante, e o no período da taxa variável, dado pelas equações abaixo:

6.6.1. Taxa constante

A obtenção do tempo de secagem no período da taxa de secagem constante é obtida pela integração da equação (6.22), com o valor de N , tirado da equação (6.1), que resulta na equação (6.23) abaixo.

$$t_I = \frac{m_s}{Aw_{d_1}} (X_1 - X_{Cr}) \quad (6.23)$$

Onde : $w_{d_1} = -\frac{m_s}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right)$

6.6.2. Taxa variável

O tempo de secagem para um determinado conteúdo de umidade, quando se admite que o mecanismo de movimentação do fluido predominante é o difusivo, é obtido pela integração da equação (6.5), obtendo-se a equação (6.24).

$$t_{II} = \frac{4d^2}{D_1\pi^2} \ln \left(\frac{X_{Cr} - X_{eq}}{X - X_{eq}} \right) \quad (6.24)$$

Quando se admite que o mecanismo de movimentação do fluido predominante é o capilar, ou em parte dele, obtém-se o tempo de secagem pela integração da equação (6.9), que dá a equação (6.25).

$$t_{II} = \frac{\rho_s L_v d (X_{Cr} - X_{eq})}{h(T - T_s)} \ln \left[\frac{(X_{Cr} - X_{eq})}{(X - X_{eq})} \right] \quad (6.25)$$

7. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1. Procedimentos para os ensaios de secagem

Quando são expressos os dados de secagem em termos globais de desempenho, devem ser tomados cuidados e critérios na extrapolação dos resultados para o conteúdo de umidade do produto. Segundo Perry(1973), o conteúdo da umidade de equilíbrio pode ser medido dinamicamente colocando a amostra em um tubo em "U" na qual é colocado um fluxo contínuo de ar com umidade relativa controlada. A amostra é pesada periodicamente até chegar a um peso constante. O Ar úmido é obtido através da passagem do ar seco por um volume de solução salgada saturada que produz um grau definido de saturação do ar. Deve ser tomado cuidado para assegurar que o ar e a solução salgada alcance o equilíbrio.

Nas análises preliminares viu-se que existiam quatro parâmetros que poderiam ser significativos para as análises de secagem. Estes foram; a temperatura do ar que passa entre as placas de gesso, umidade relativa do ar que circula entre as placas, velocidade do ar com a variação da distância entre as placas. Como o sistema confeccionado não comportou um desumidificador, como o citado acima pelo Perry(1973), a fim de se controlar a umidade relativa interna do ar, adotou-se o seguinte procedimento: controlar a temperatura em níveis altos para que, por conseguinte, a umidade relativa permanecesse a níveis baixos, então foi desprezada a umidade relativa como parâmetro de controle e considerada como parâmetro de referência.

Nos experimentos as umidades relativas do ar tiveram uma variação muito pequena, como demonstram alguns gráficos a seguir. O valor do peso da placa seca foi obtido estequiometricamente, a partir de informações encontradas em Peres et al.(2001), que afirmam que a quantidade de água necessária à rehidratação do gesso é de cerca de 18% do peso do pó. Então, de acordo com as proporções de gesso em pó e água utilizada na confecção das placas, a placa seca terá um peso final de 6.490g, valor este considerado como base seca para os experimentos.

O índice do conteúdo de umidade típico da placa de gesso é razoavelmente baixo (próximo a 5 %). Neste nível baixo, o estado normal da placa de gesso é para o índice de umidade circunvizinho ao núcleo para ficar em equilíbrio com o ar. Esta capacidade de absorver a umidade do ambiente circunvizinho significa que o índice de umidade da placa de gesso pode flutuar junto à mudança da umidade relativa do ar. Esta característica da placa de gesso torna difícil a medição exata e confiável de seu conteúdo de umidade. Por causa da dificuldade inerente ao conteúdo de umidade de medição em níveis baixos, o método mais seguro e o mais consistente deve aderir a um procedimento de laboratório que use escalas sensíveis. Então o conteúdo de umidade médio de equilíbrio para as condições ambientais médios de 32,5° C e 56,5 %, ficou em 5,5%, dentro do esperado.

Tabela 7.1 – Condições experimentais para secagem de placas de gesso.

Distância entre Placas	Temperatura do ar	Velocidade do ar
10,3 cm	50° C	1,30 m/s
10,3 cm	65° C	1,30 m/s
10,3 cm	80° C	1,30 m/s
7 cm	50° C	1,43 m/s
7 cm	65° C	1,43 m/s
7 cm	80° C	1,43 m/s
5 cm	50° C	1,60 m/s
5 cm	65° C	1,60 m/s
5 cm	80° C	1,60 m/s

Com os três parâmetros definidos; distância entre placas, temperatura do ar, e velocidade do ar, foi traçada o plano experimental para este trabalho, como demonstrado na Tabela 7.1.

Nas condições acima citadas, foi confeccionado um único conjunto de placas, as quais eram hidratadas no início de cada experimento, evitando assim possíveis efeitos de não uniformidade das placas, pois a porosidade pode variar internamente, e inserir novas variáveis ao experimento.

Segundo Festa(1992), as placas de gesso devem ser hidratadas em uma solução de água a 2% de gesso para que não haja dissociação de material a cada hidratação, e de acordo com o Projeto de norma da ABNT 02:002.40.009, o tempo necessário para se hidratar um bloco de gesso é de no mínimo 2 horas, aqui considerado como parâmetro de hidratação para este trabalho, já que não existem normas específicas para hidratação em placas de gesso. Observando as figuras 7.1(a) e 7.1(b), vemos as placas de gesso que serão utilizadas no experimento sendo hidratadas em um tanque.



Figura 7.1 (a e b) – Placas de gesso sendo hidratadas antes do ensaio.

Durante as duas horas de hidratação das placas, em paralelo o secador permaneceu ligado visando o regime de trabalho. Em seguida o procedimento era colocar as amostras no lugar apropriado, e preencher um formulário de andamento de ensaios, conforme Tabela 7.2, e iniciar os ensaios seguindo as condições descritas na Tabela 7.1 acima descrita.

Tabela 7.2 – Planilha para acompanhamento de ensaios.

SECAGEM DE PLACAS EM GESSO - CONDIÇÃO 01 - 01					
INICIO:	18 / 02 / 2003	10 : 00 horas	FIM:	18 / 02 / 2003	20 : 30 horas
Nº PLACAS:	3	TEMPERATURA:	80 °C	VELOCIDADE:	1 m/s
% FECHAMENTO DAMPER:	90 %	AREA DE SAIDA DO FLUXO:	0,16 m ²		
RESISTENCIAS LIGADAS:	1	2	3	% DO POTENCIOMETRO:	100 %
PESO INICIAL:	8.280 g	PESO FINAL:	6.200 g		
TEMP. AMBIENTE:	35 °C	UMID. AMBIENTE:	55 %	PRESSÃO:	1 Pa
OBSERVAÇÕES					

Cabe aqui ressaltar que o regime de escoamento para as condições experimentais acima citadas é turbulento na região anterior a seção de testes, onde se tem uma velocidade média de 1m/s. Na seção de teste onde se tem um arranjo de placas paralelas o número de Reynolds calculado para o escoamento entre as placas, baseado no diâmetro hidráulico, e mostrado na Tabela 7.3. De acordo com este valor do número de Reynolds conclui-se que o escoamento também foi turbulento.

Tabela 7.3 – Regime de escoamento entre as placas.

Nº de placas	Velocidade	$Re_{D_H} = \frac{VD_H}{\nu}$
3	1,30	13.402
4	1,43	10.723
5	1,60	8.650

No entanto, o número de Reynolds calculado com base no comprimento das placas, no sentido do escoamento, deu $3,27 \times 10^4$ para uma velocidade igual a 1,30 m/s, da mesma forma $3,60 \times 10^4$ e $4,03 \times 10^4$ para velocidades de 1,43 e 1,60 m/s, respectivamente. Então, tomando como critério que para valores acima de 5×10^4 o regime é turbulento, o regime foi laminar.

Baseado nestes valores do número de Reynolds, foi calculado a altura da camada limite cujo valor máximo foi de 1,11 cm. Considerando que a menor distância entre placas foi de 5,0 cm, podemos concluir que a camada limite de uma placa não influencia a camada limite da placa vizinha. Situações semelhantes acontecem com as camadas limites térmica e de concentração.

7.2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

No Apêndice II, se encontram as incertezas geradas pelos resultados abaixo descritos.

7.2.1 - Ensaios utilizando 10,3 cm de distância entre placas

Nestes ensaios foram acondicionadas na seção de testes do túnel de vento, três placas de gesso, distantes uma das outras por 10,3 cm. Abaixo são apresentados os resultados experimentais, nas três condições de temperatura (50, 65 e 80° C) propostos para os experimentos e na velocidade do ar a 1,30 m/s.

7.2.1.1 – Temperatura do ar de secagem a 50° C.

Curva da umidade versus tempo de secagem

Os valores do conteúdo de umidade na base seca são obtidos através da relação entre o conteúdo de umidade da amostra em um determinado tempo e o peso da placa seca, através da equação 7.1:

$$X(t) = \frac{P(t) - P_{bs}}{P_{bs}} \quad \text{Equação 7.1}$$

Onde $P(t)$ é o peso da placa úmida em um dado tempo t , e P_{bs} é o peso da placa seca.

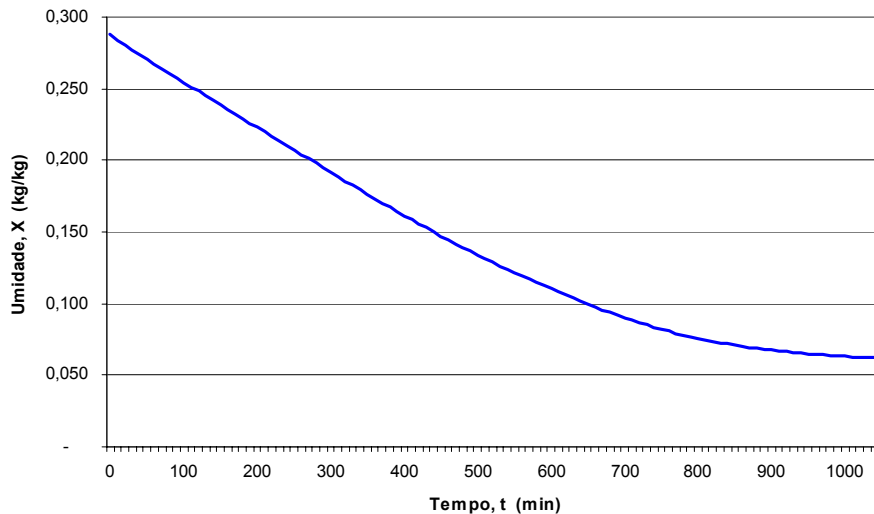


Figura 7.2 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Curva da taxa de secagem versus tempo

Observa-se no gráfico da figura 7.3 abaixo, o comportamento da taxa de secagem em função do tempo de secagem.

Os valores da taxa de secagem são obtidos através de diferenciação numérica da curva do conteúdo de umidade versus tempo, mostrada na figura 7.2, conforme a Equação 7.2.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{X_{i+1} - X_i}{t_{i+1} - t_i} \quad \text{Equação 7.2}$$

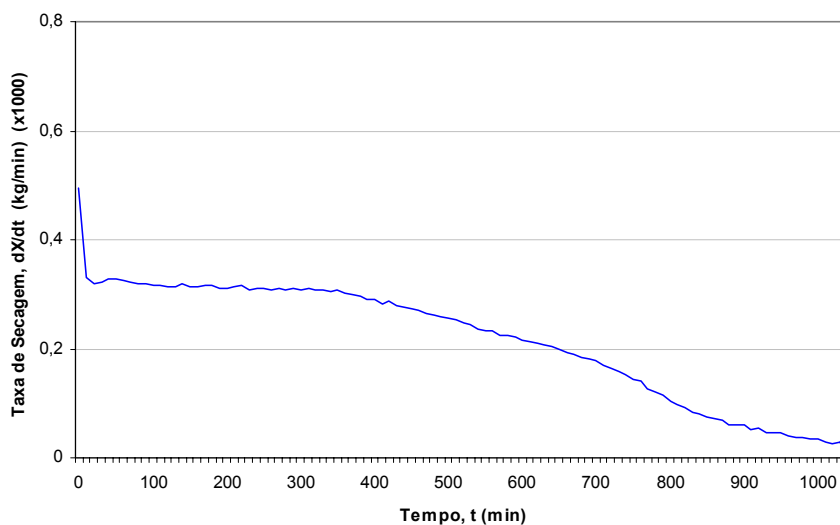


Figura 7.3 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

As curvas da figura 7.4, mostram a variação da temperatura com o tempo no interior da placa de gesso ensaiada. TPAR01 até TPAR15 são os termopares dispostos em seqüência ao longo da placa seguindo o fluxo de ar do túnel. A distribuição destes termopares está descrita nas figuras 5.32 e 5.33 do capítulo 5.

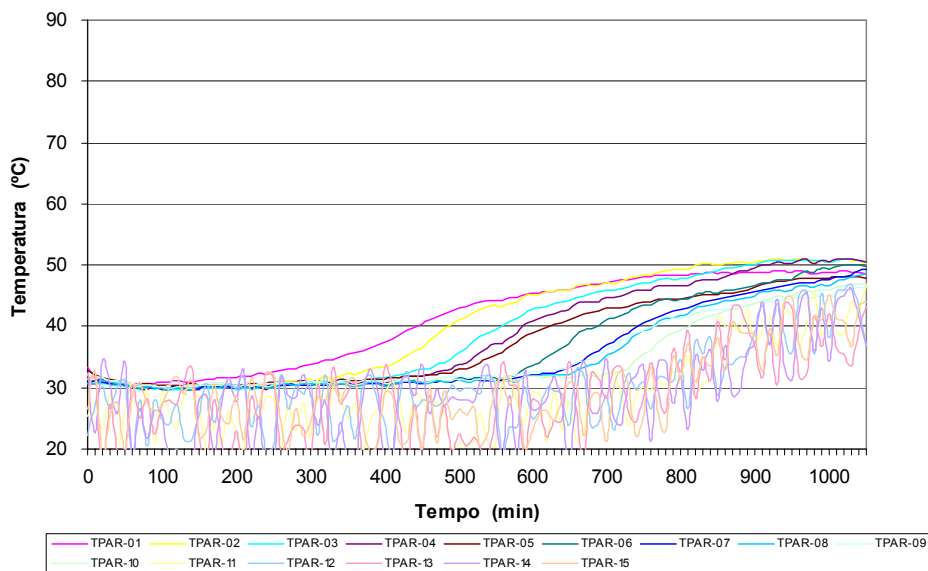


Figura 7.4 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

Observando no gráfico da figura 7.5, as linhas mais espessas indicam as umidades relativas do ar e as mais delgadas as temperaturas. As linhas na cor vermelha indicam as condições dentro do túnel, antes das amostras e na cor azul após as amostras. As linhas na cor verde indicam as condições do ar do ambiente externo ao túnel.

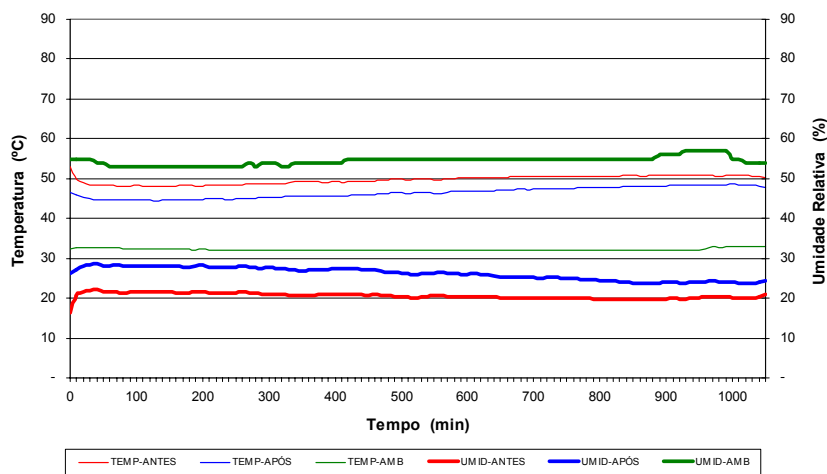


Figura 7.5 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,30 m/s.

7.2.1.2 – Temperatura do ar de secagem a 65° C.

Curva da umidade x tempo de secagem

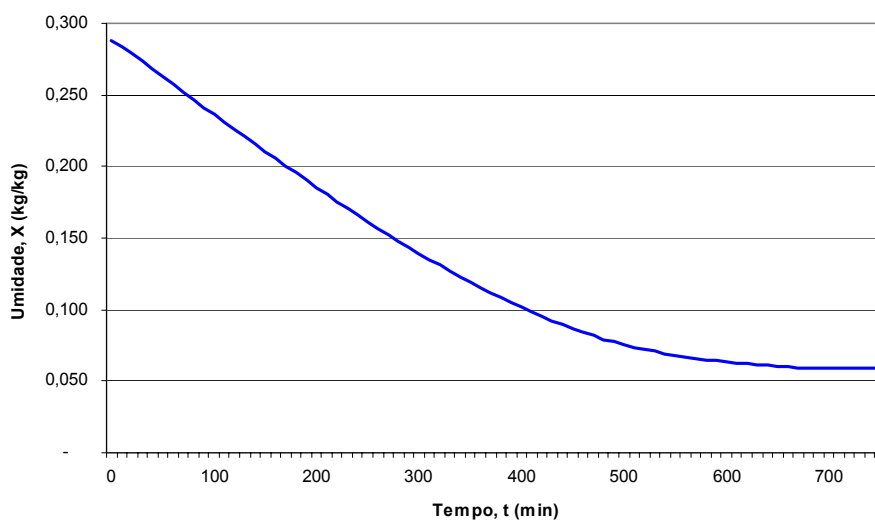


Figura 7.6 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Curva da taxa de secagem x tempo

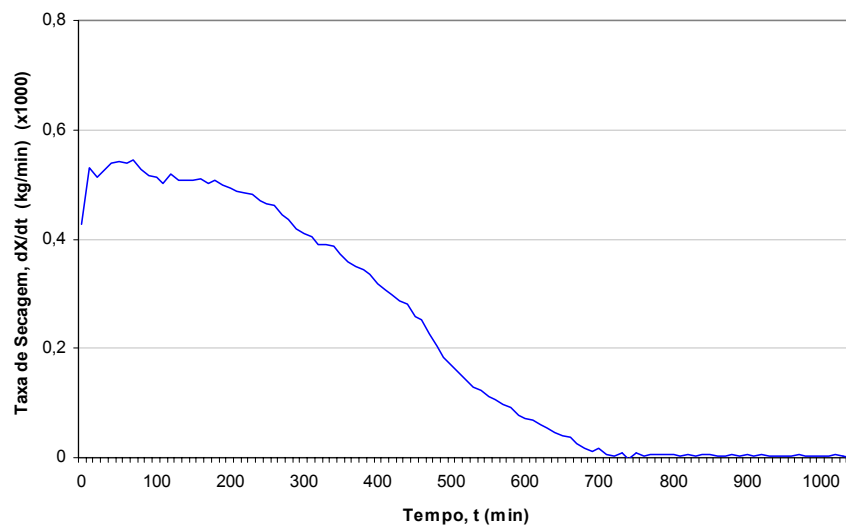


Figura 7.7 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

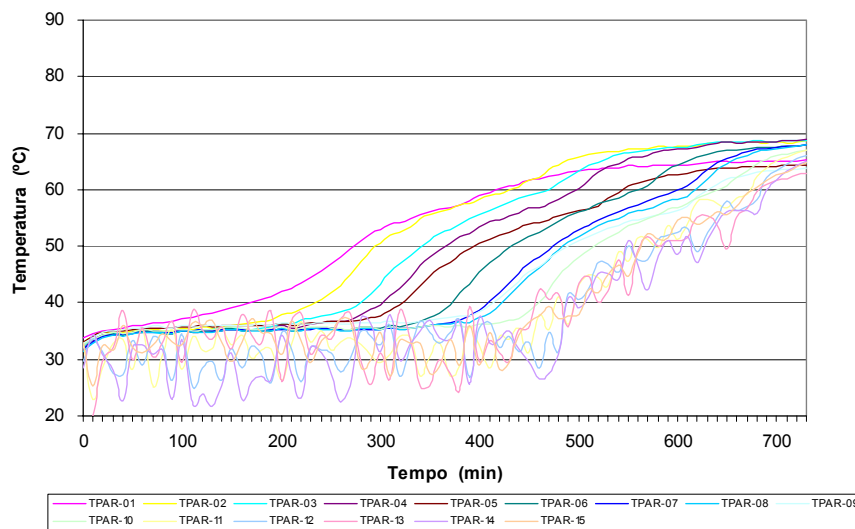


Figura 7.8 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

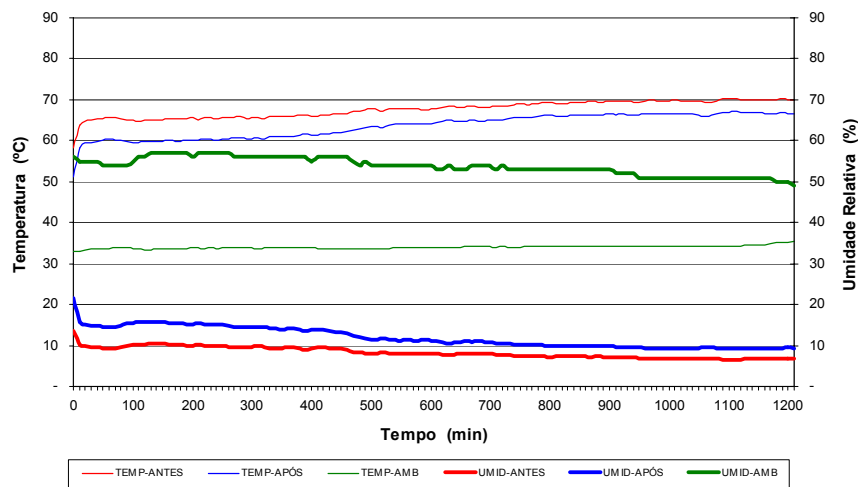


Figura 7.9 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,30 m/s.

7.2.1.3 – Temperatura do ar de secagem a 80° C.

Curva da umidade vs. tempo de secagem

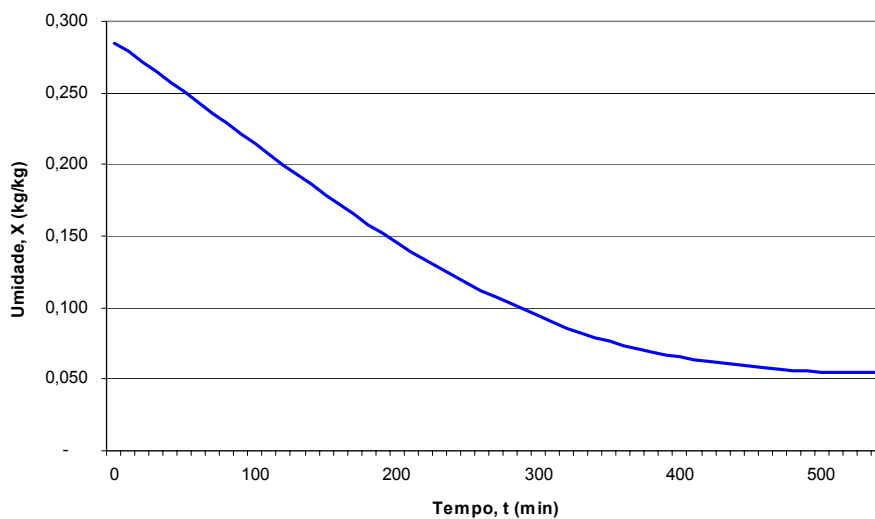


Figura 7.10 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Curva da taxa de secagem vs. tempo

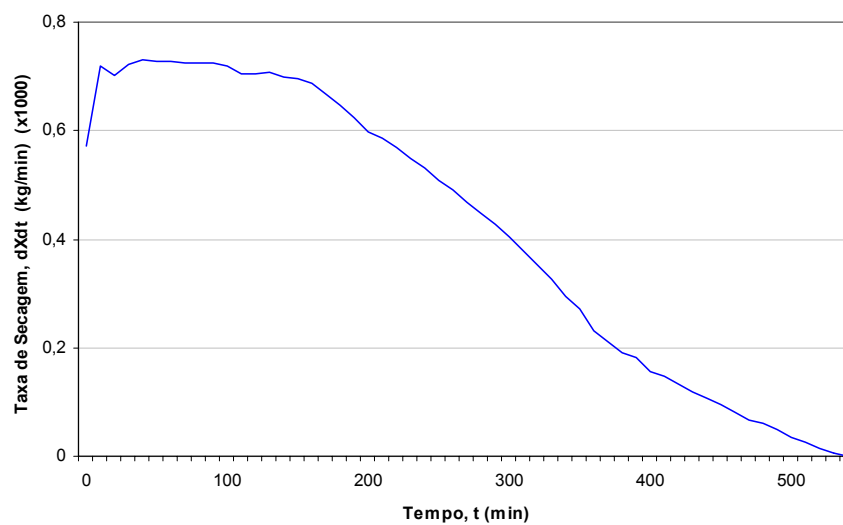


Figura 7.11 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

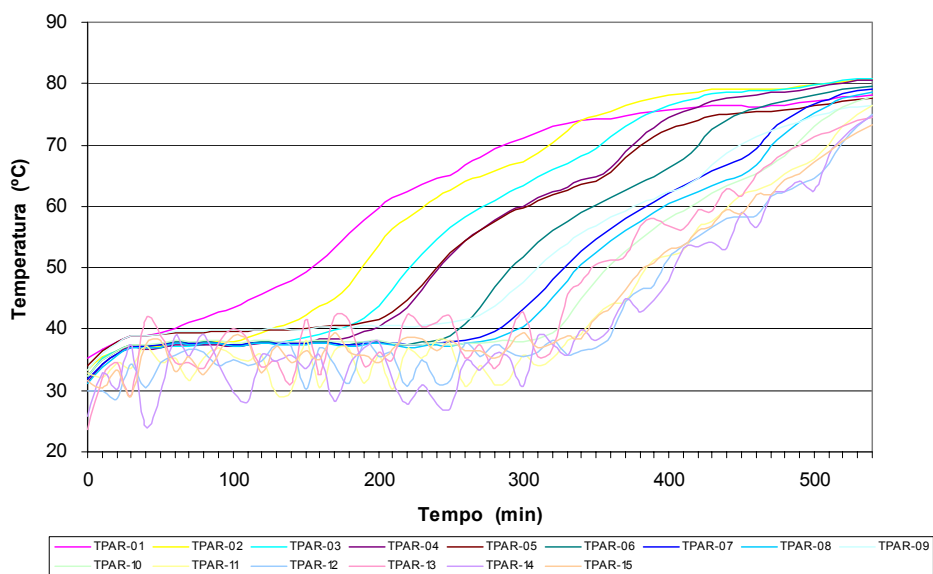


Figura 7.12 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,30 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

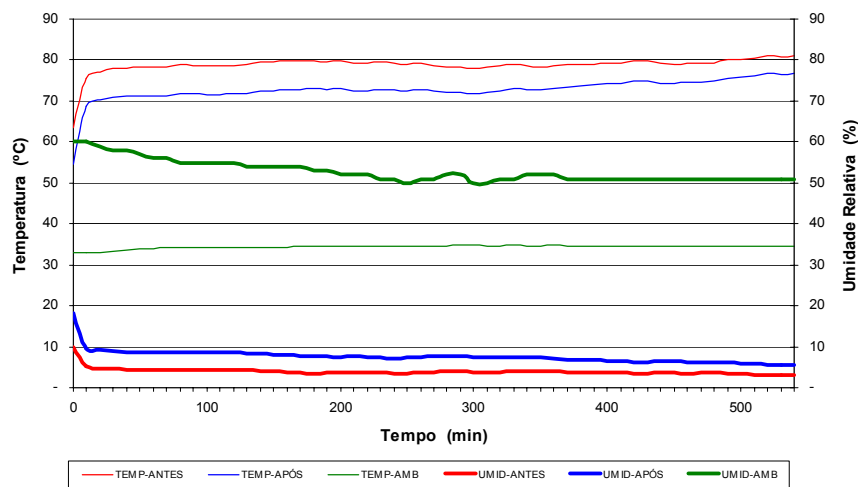


Figura 7.13 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,30 m/s.

7.2.2 - Ensaios utilizando 7 cm com distância entre placas

Nestes ensaios foram acondicionadas na seção de testes do túnel de vento, quatro placas de gesso, distantes uma das outras por 7,0 cm. Abaixo estão apresentados os resultados experimentais, nas três condições de temperatura (50, 65 e 80° C) propostas para os experimentos e na velocidade do ar a 1,43 m/s.

7.2.2.1 – Temperatura do ar de secagem a 50° C.

Curva da umidade x tempo de secagem

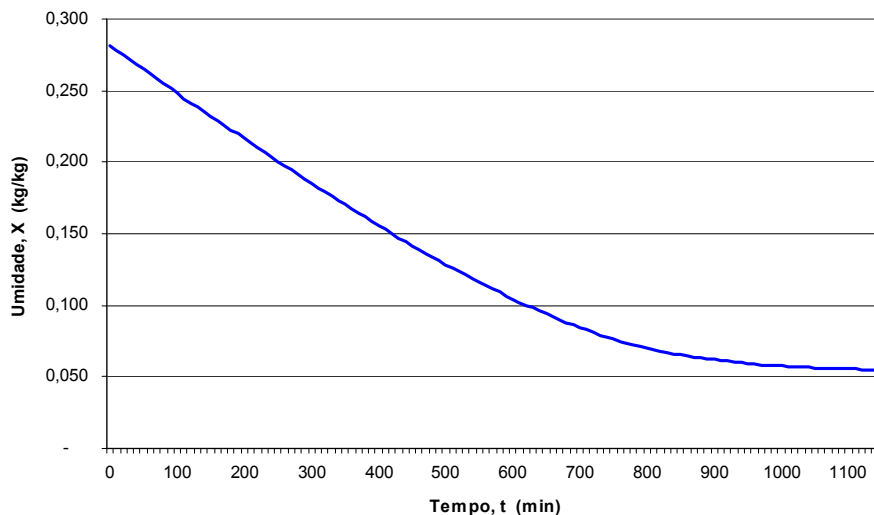


Figura 7.14 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Curva da taxa de secagem vs. Tempo

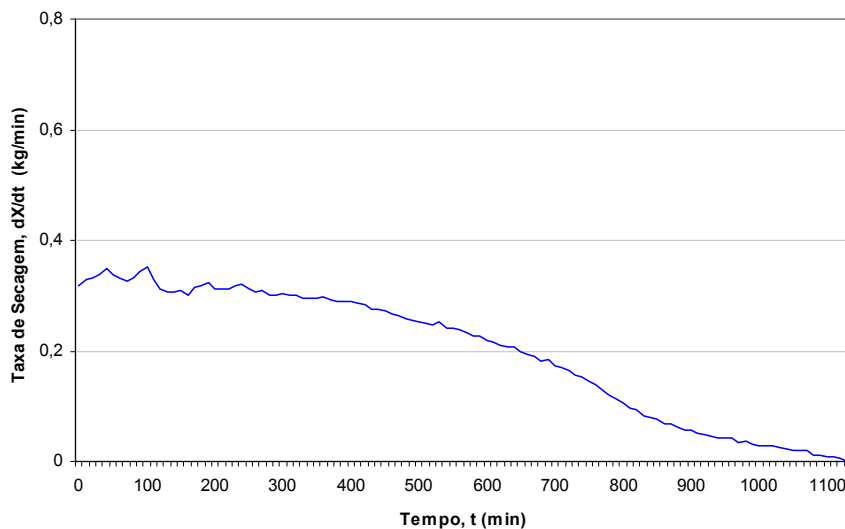


Figura 7.15 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

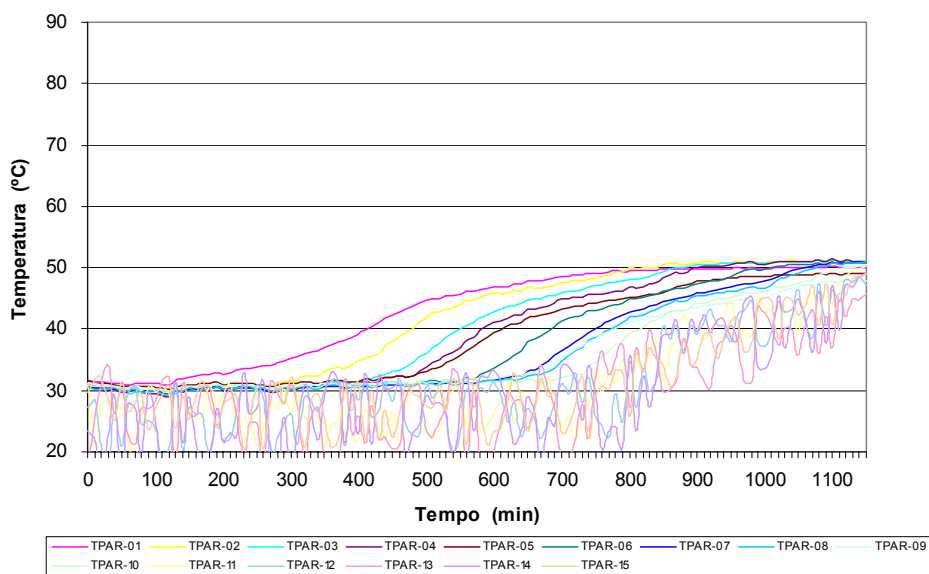


Figura 7.16 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

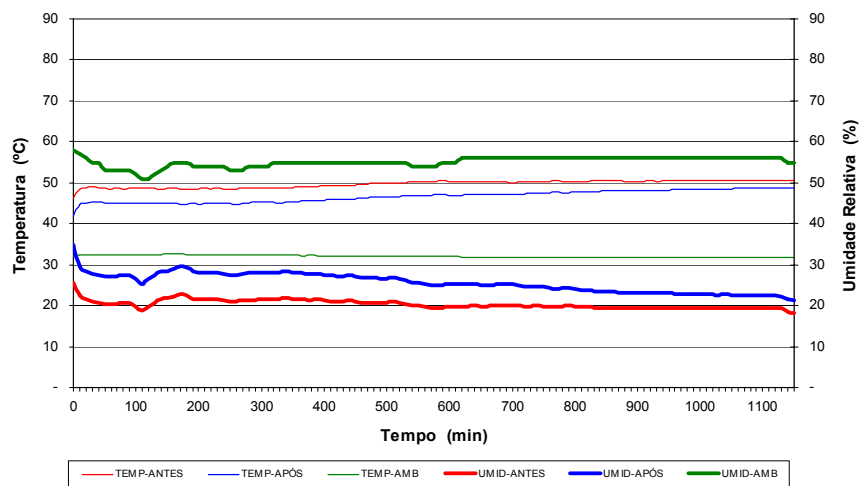


Figura 7.17 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,43 m/s.

7.2.2.2 – Temperatura do ar de secagem a 65° C.

Curva da umidade vs tempo de secagem

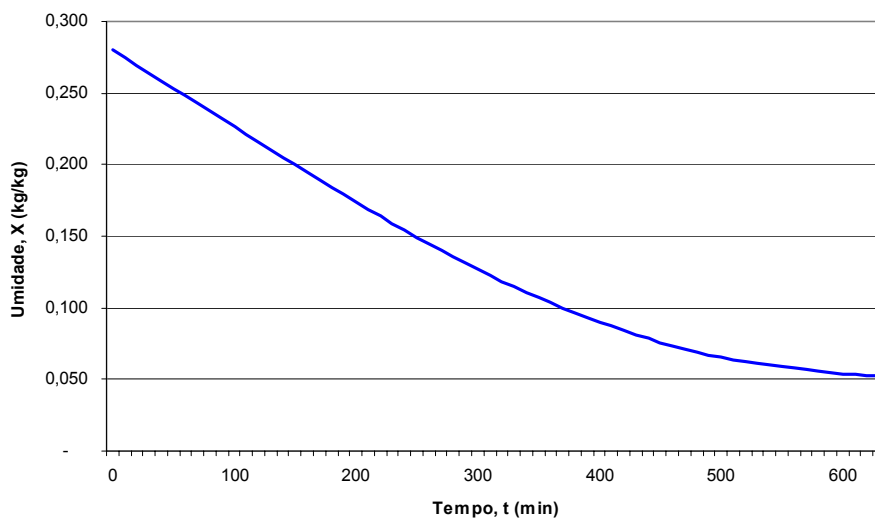


Figura 7.18 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Curva da taxa de secagem vs. tempo

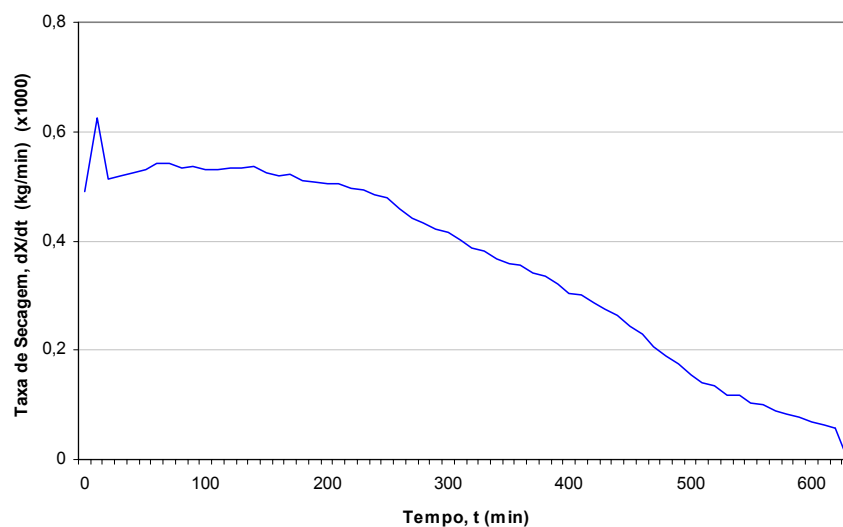


Figura 7.19 – Curva da taxa de secagem vs tempo, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

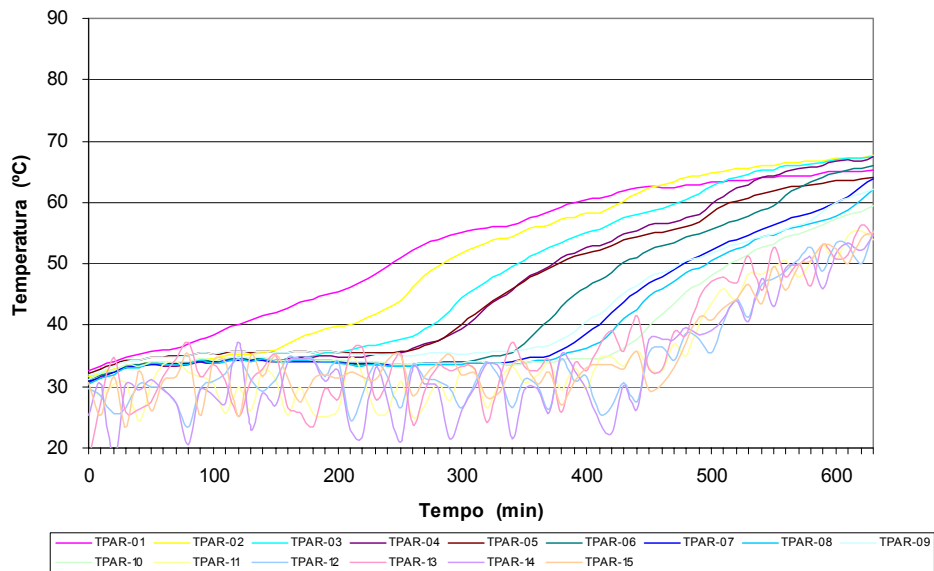


Figura 7.20 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

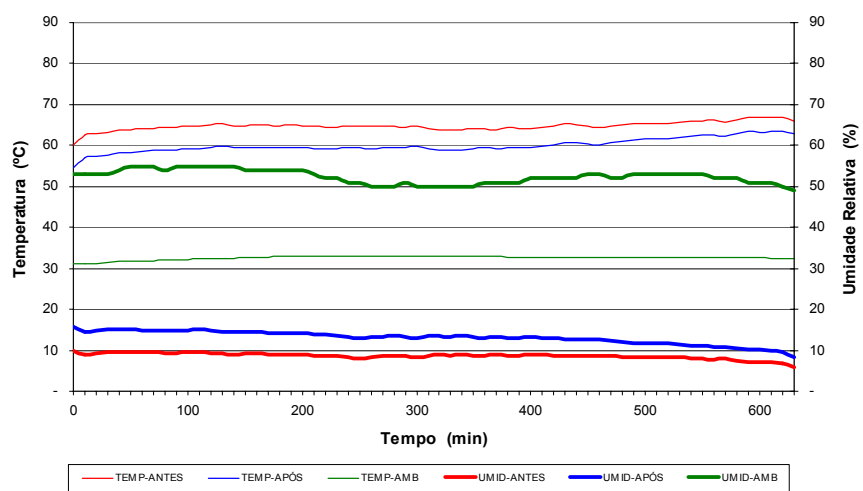


Figura 7.21 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,43 m/s.

7.2.2.3 – Temperatura do ar de secagem a 80° C.

Curva da umidade vs. tempo de secagem

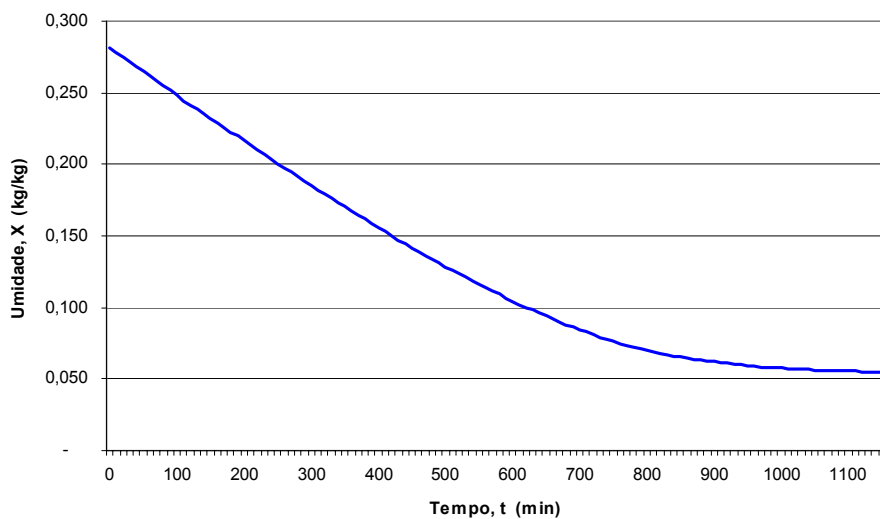


Figura 7.22 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Curva da taxa de secagem vs. tempo

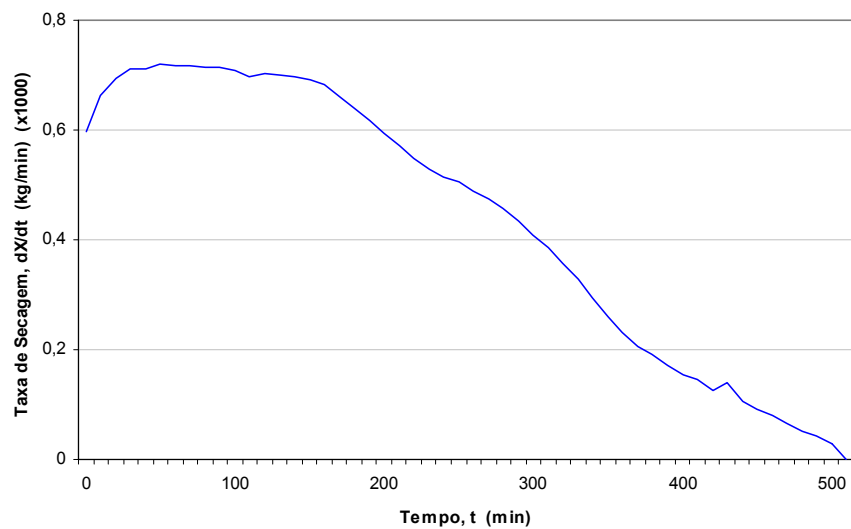


Figura 7.23 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

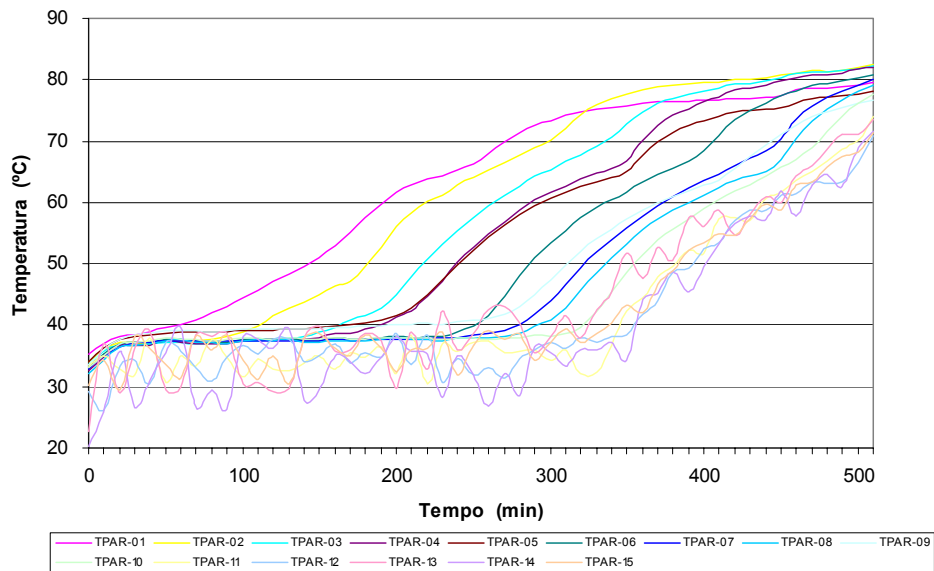


Figura 7.24 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,43 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

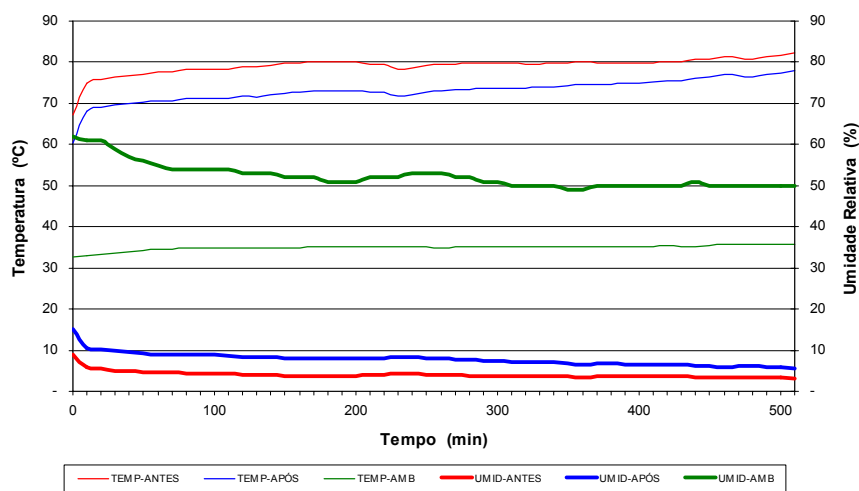


Figura 7.25 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,43 m/s.

7.2.3 - Ensaio utilizando 5,0 cm com distância entre placas

Nestes ensaios foram acondicionadas na seção de testes do túnel de vento, cinco placas de gesso, distantes uma das outras por 5,0 cm. Abaixo estão apresentados os resultados experimentais, nas três condições de temperatura (50, 65 e 80° C) propostas para os experimentos, e na velocidade do ar a 1,60 m/s.

7.2.3.1 – Temperatura do ar de secagem a 50° C.

Curva da umidade vs. tempo de secagem

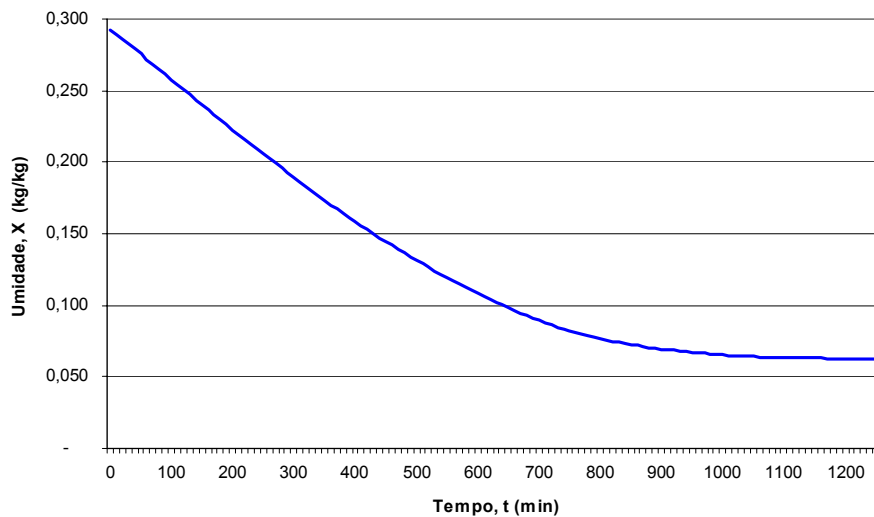


Figura 7.26 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Curva da taxa de secagem vs. tempo

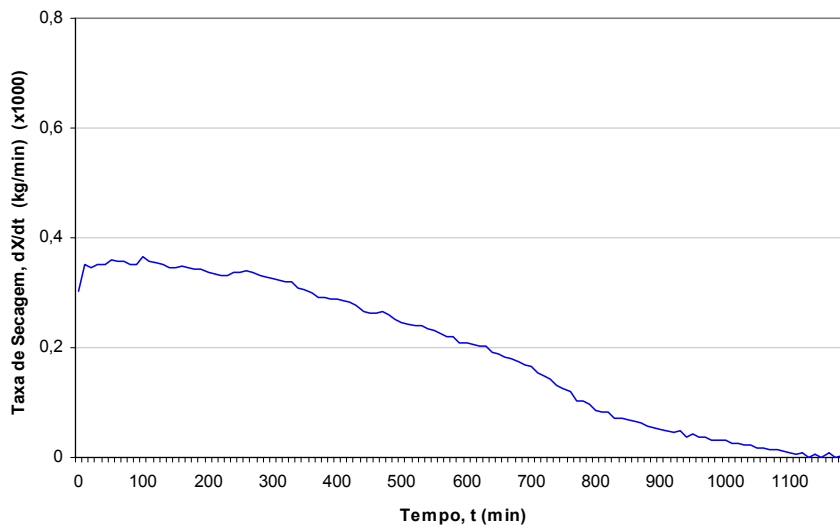


Figura 7.27 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

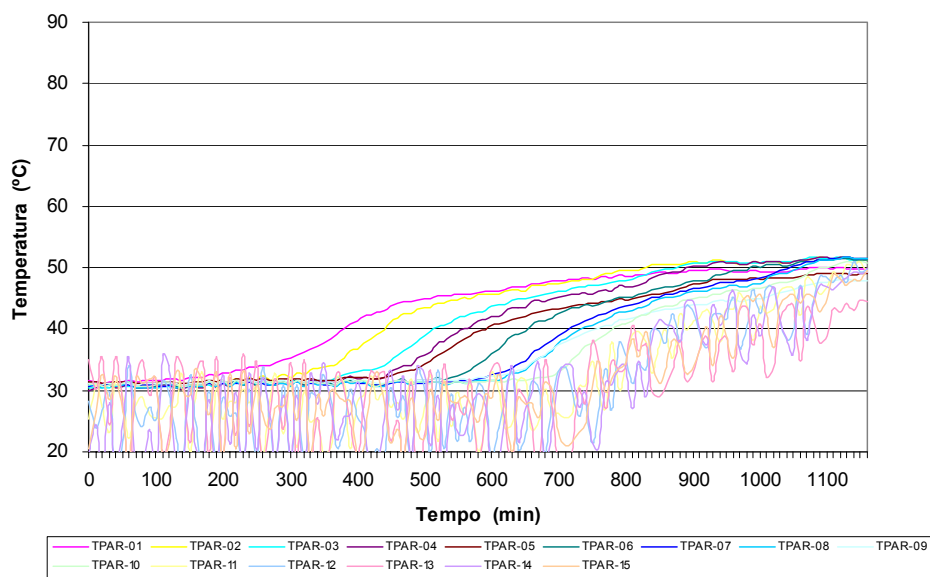


Figura 7.28 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

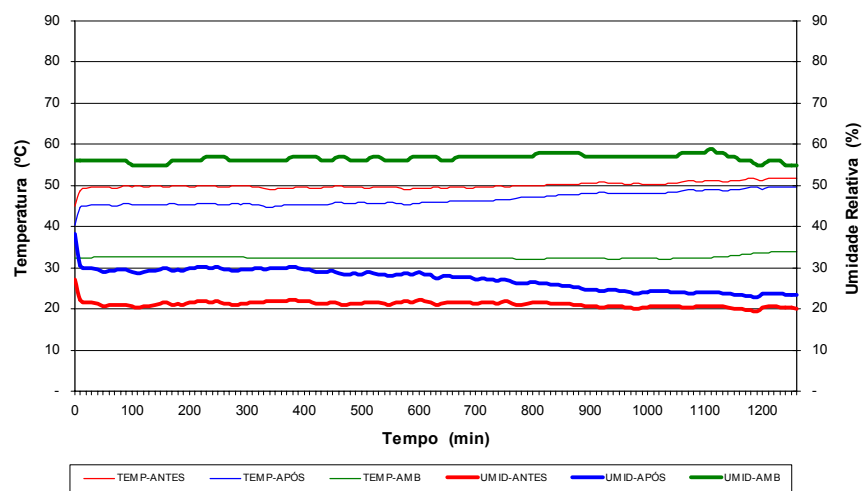


Figura 7.29 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,60 m/s.

7.2.3.2 – Temperatura do ar de secagem a 65° C.

Curva da umidade vs. tempo de secagem

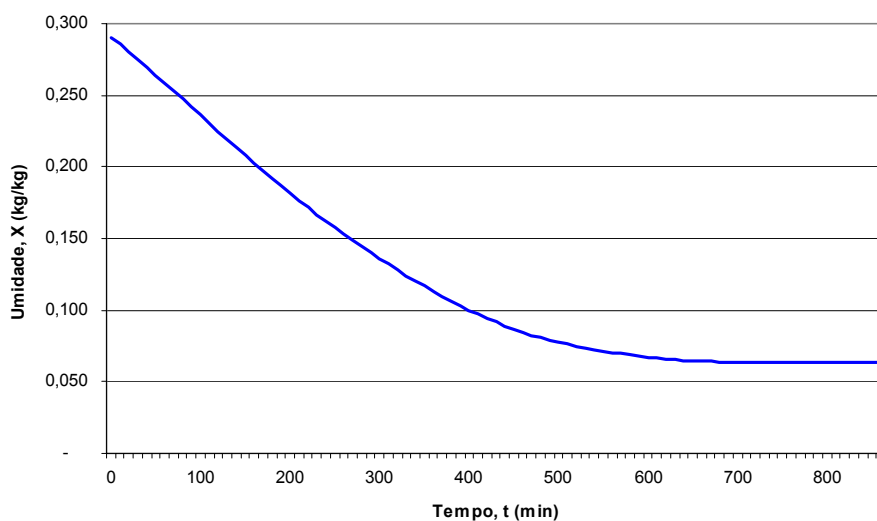


Figura 7.30 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Curva da taxa de secagem vs. tempo

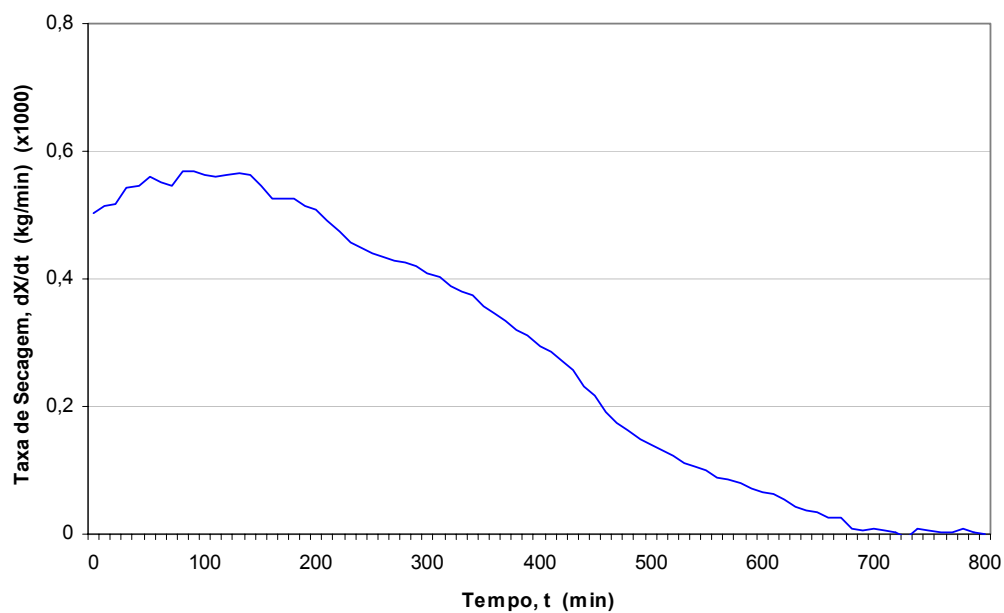


Figura 7.31 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

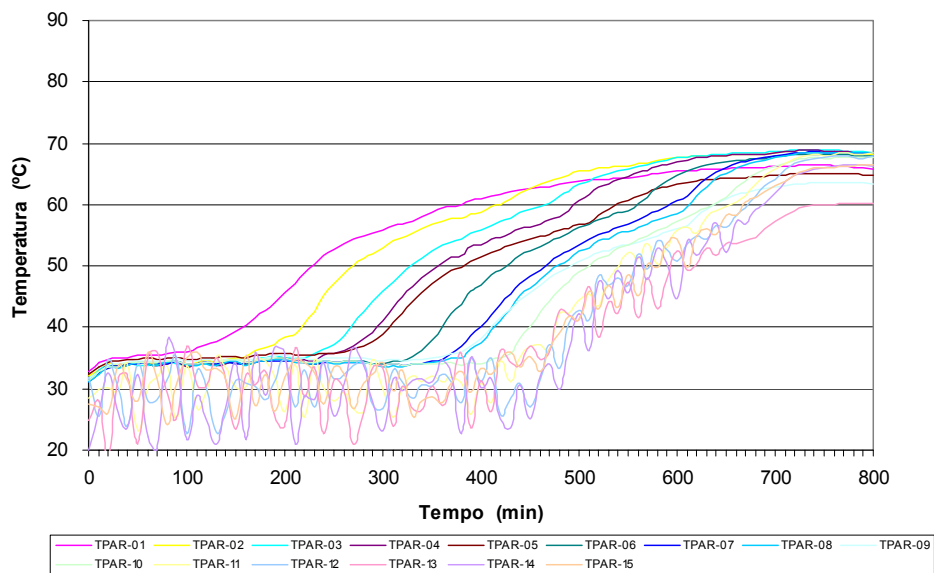


Figura 7.32 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

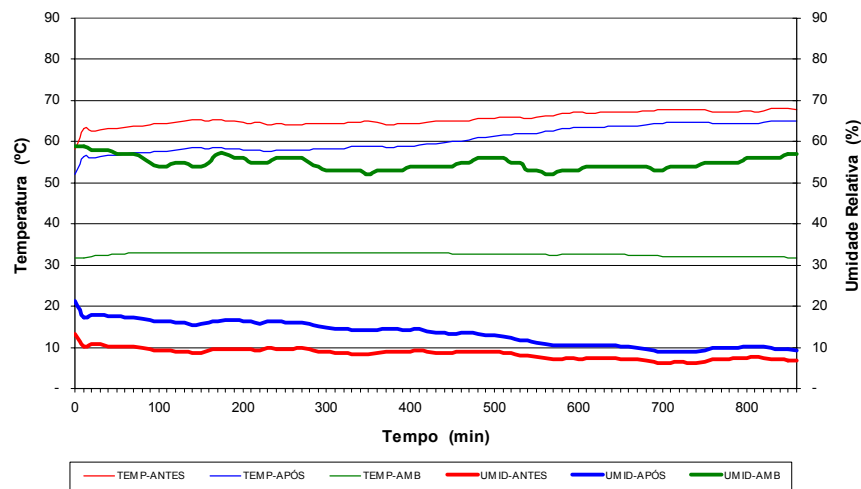


Figura 7.33 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,60 m/s.

7.2.3.3 – Temperatura do ar de secagem a 80° C.

Curva da umidade vs. tempo de secagem

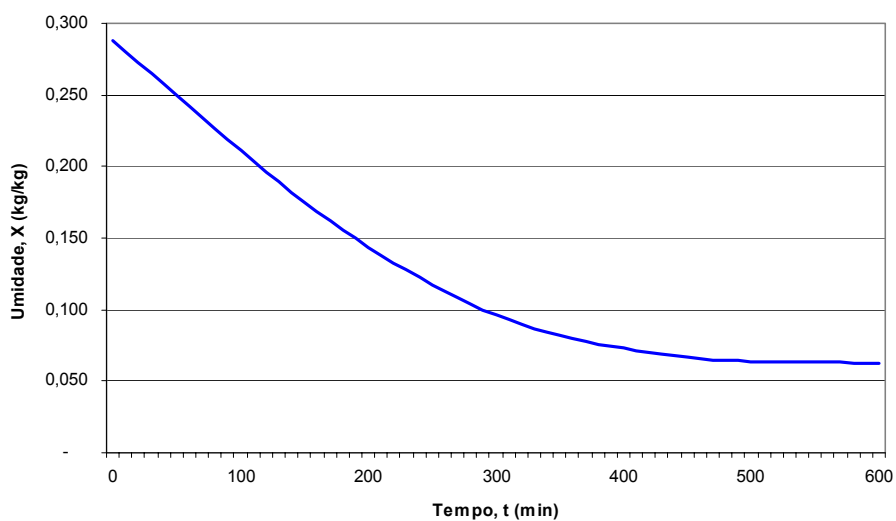


Figura 7.34 – Curva da umidade vs. tempo, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Curva da taxa de secagem vs tempo

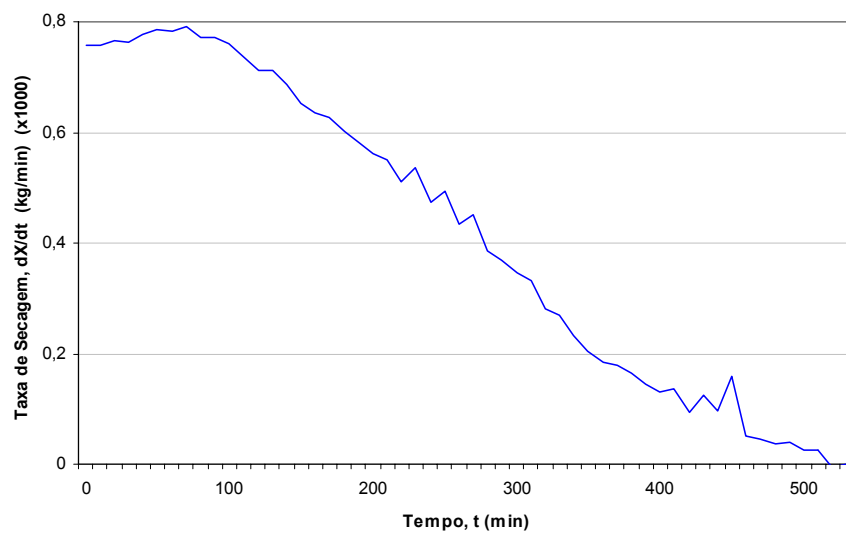


Figura 7.35 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Perfil da temperatura no interior da placa

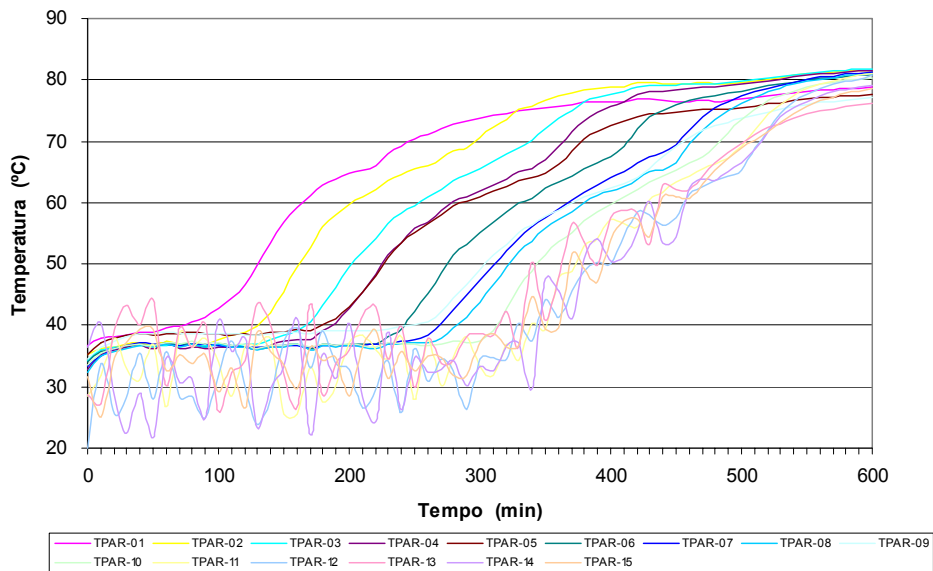


Figura 7.36 – Perfil da temperatura, com velocidade do ar a 1,60 m/s.

Perfil de temperatura e umidade do ar dentro e fora do túnel

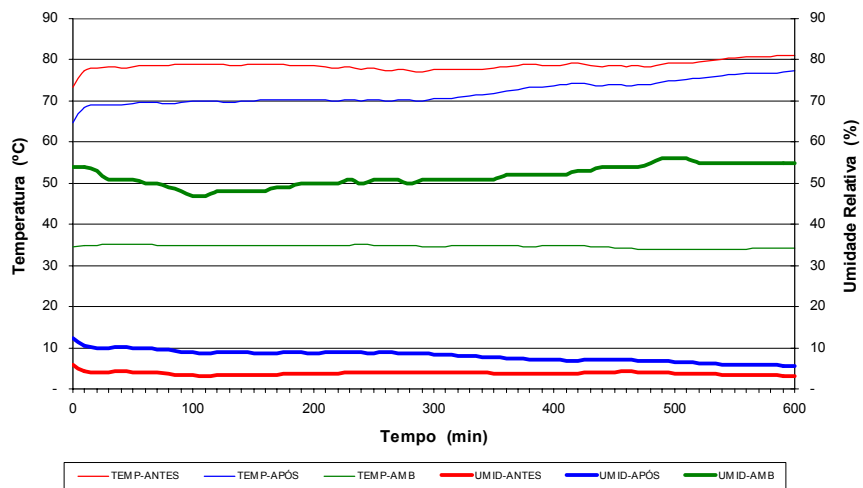


Figura 7.37 – Perfil de temperatura e umidade do ar com velocidade de 1,60 m/s.

7.2.4 – Repetibilidade dos dados experimentais

Foram realizados 3 experimentos consecutivos utilizando as mesmas condições de 7,0 cm de distância entre placas, temperatura do ar em 80° C e a velocidade do ar em 1,43 m/s, afim de se avaliar a confiabilidade dos dados gerados.

Curva da umidade vs. tempo de secagem

Observando no gráfico da figura 7.38, mostra a curva de umidade em função do tempo, bem próximas, com um erro médio de 2,5 %.

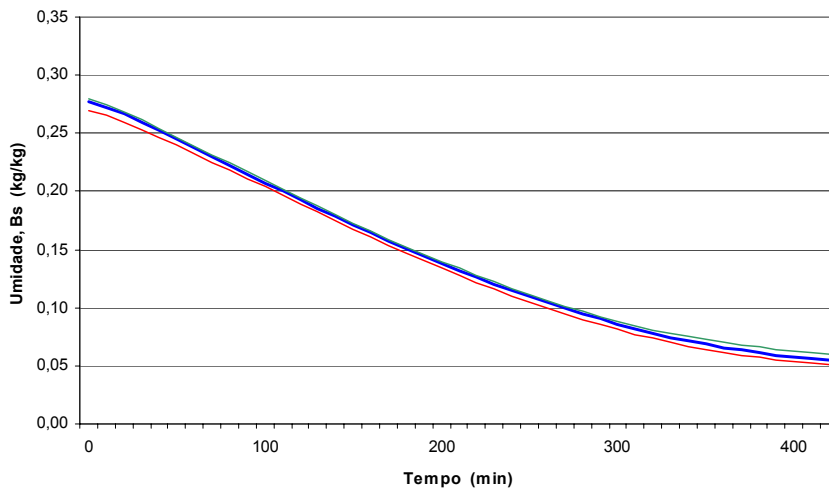


Figura 7.38 – Curva da umidade vs. tempo, nas três repetições.

Curva da taxa de secagem vs. Tempo

Observando no gráfico da figura 7,39, mostra a curva da taxa de secagem em função do tempo, bem próximas, com um erro médio de 7,6 %..

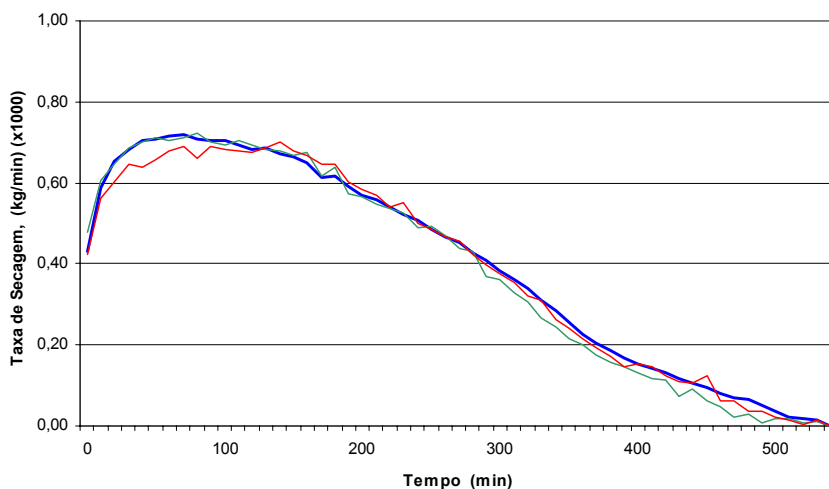


Figura 7.39 – Curva da taxa de secagem vs. tempo, nas três repetições.

Perfil da temperatura no interior da placa

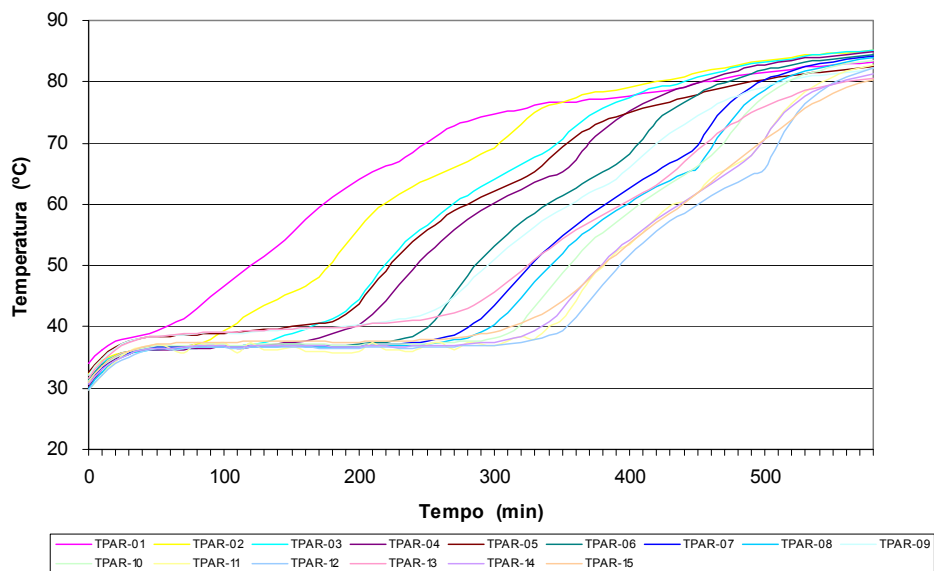


Figura 7.40 – Perfil da temperatura, no primeiro experimento.

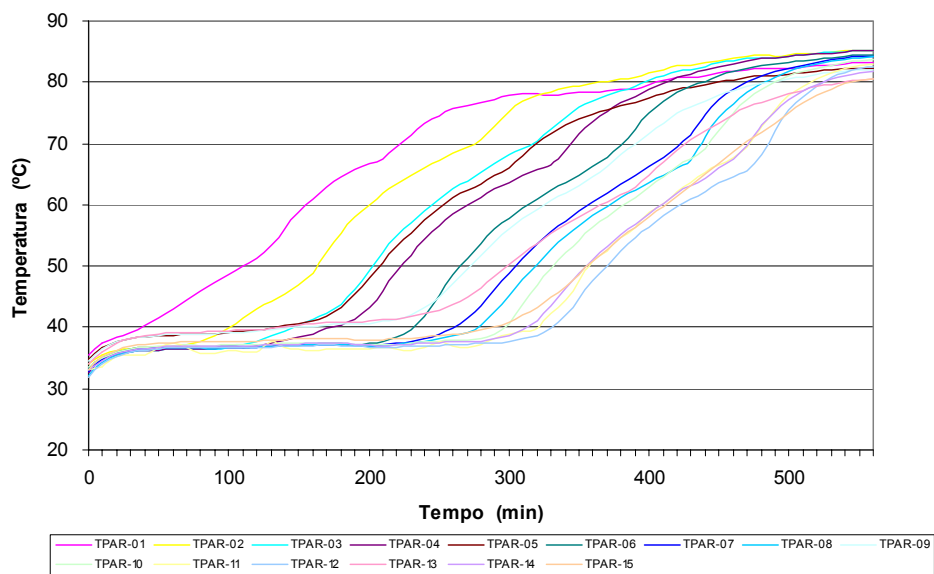


Figura 7.41 – Perfil da temperatura, no segundo experimento.

As curvas das figuras 7.38 a 7.42, do conteúdo de umidade e taxa de secagem versus tempo, e as curvas do perfil de temperatura das placas de gesso, graficados para três ensaios sob as mesmas condições geométricas e operacionais, indicam que a montagem experimental oferece uma boa confiabilidade nos dados gerados.

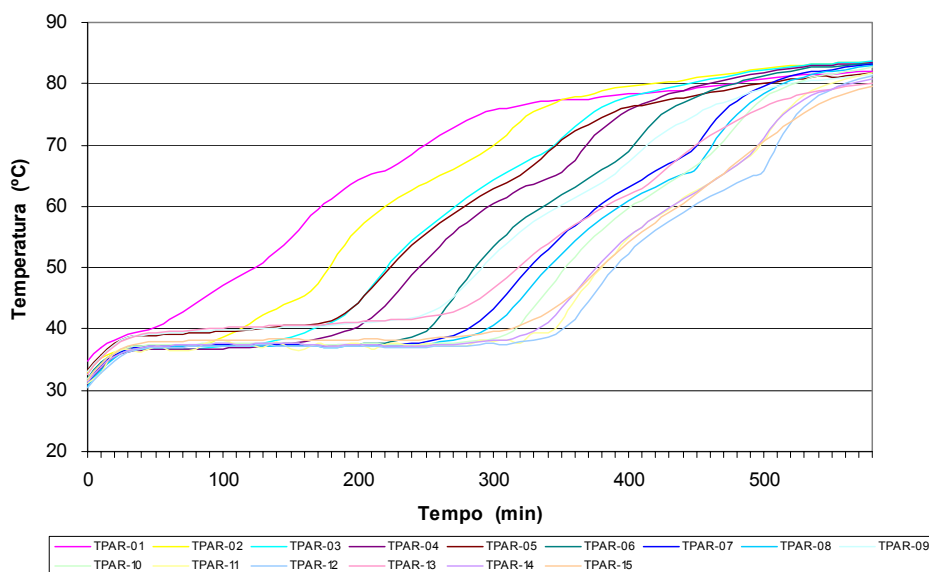


Figura 7.42– Perfil da temperatura, no terceiro experimento.

7.2.5 – Eliminação de Problemas

Para a análise conclusiva dos resultados em relação às temperaturas internas da placa foram realizados 3 experimentos consecutivos, modificando-se o esquema de ligação dos termopares interno à placa; 11, 12, 13, 14, e 15, pois tais apresentaram ruídos impossibilitando a análise comparativa com os demais termopares, como mostrado em figuras anteriores. Foram selecionadas três condições; todas utilizando 7,0 cm de distância entre placas e velocidade do ar de 1,43 m/s, e nas diversas temperaturas do ar (50, 65 e 80° C). Comparando-se as figuras 7.43 e 7.16; 7.44 e 7.20; 7.45 e 7.24, verifica-se que a mudança efetuada no esquema de ligação dos termopares do 11 ao 15, eliminou o ruído nas leituras da temperatura.

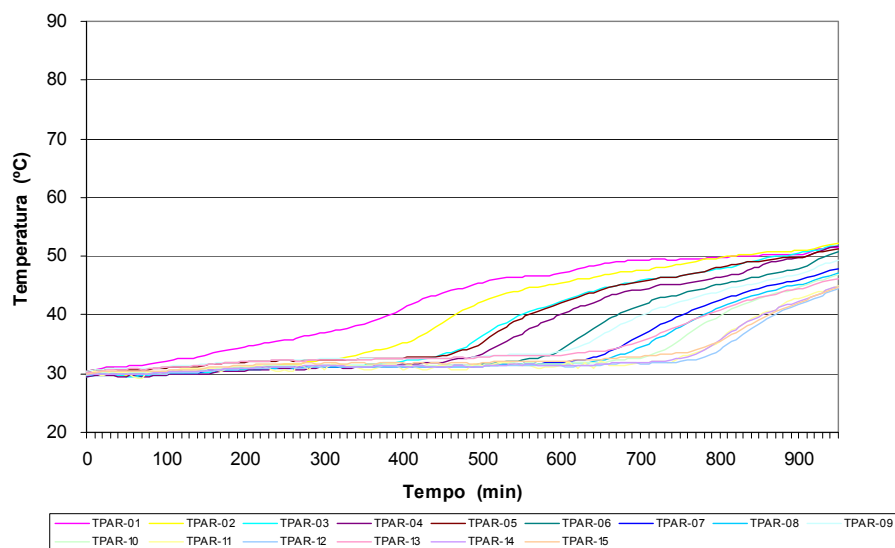


Figura 7.43– Perfil da temperatura, utilizando 50° C.

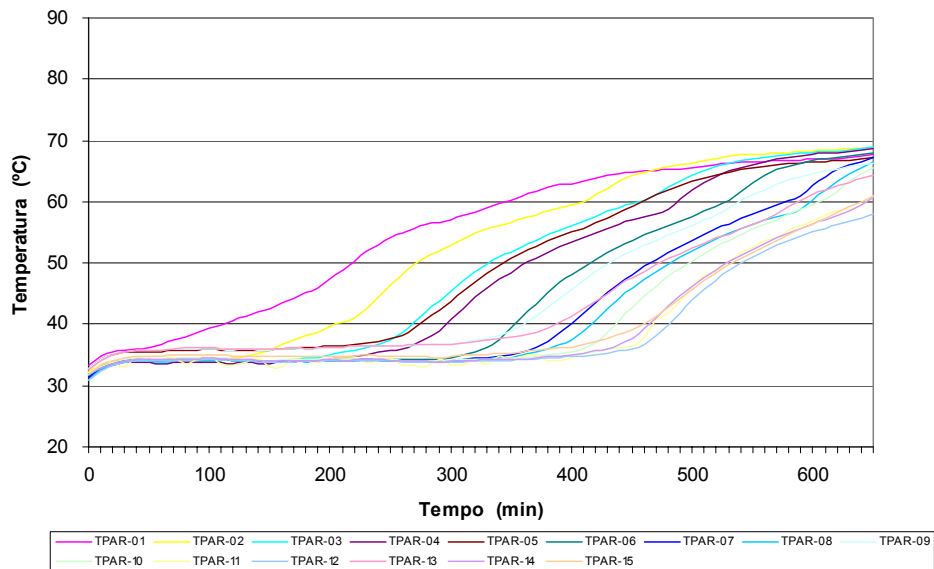


Figura 7.44 – Perfil da temperatura, utilizando 65° C.

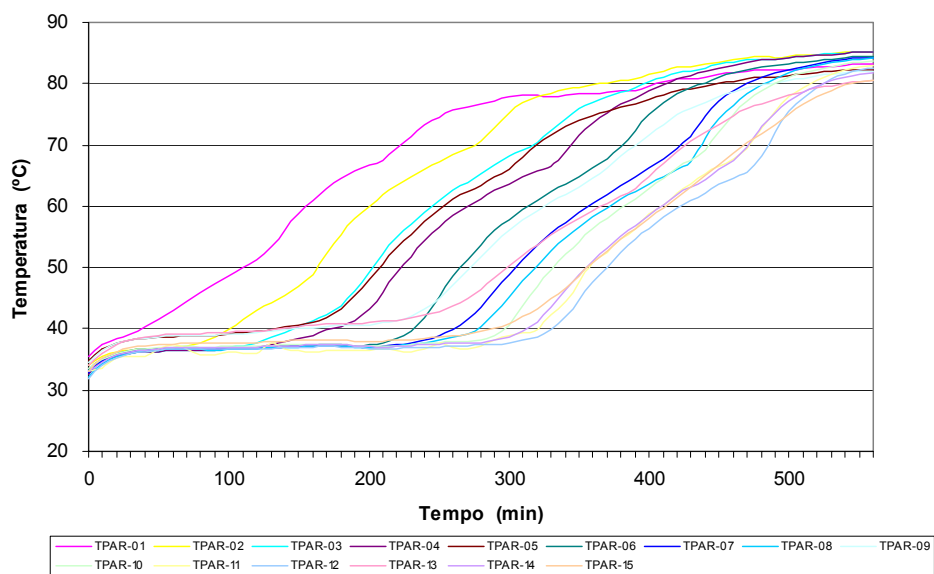


Figura 7.45 – Perfil da temperatura, utilizando 80° C.

Comparando duas leituras de temperatura realizadas com o termopar 15, antes e depois da solução do problema do ruído, como mostrado na figura 7.46, podemos observar, qualitativamente, que a curva sem o ruído apresenta uma concordância aceitável com a curva ajustada sobre o perfil de temperatura com ruído. Este mesmo comportamento verifica-se nos termopares 11 ao 14. De acordo com isto, o ruído observado em alguns dos termopares durante os ensaios não invalida os resultados apresentados por estes.

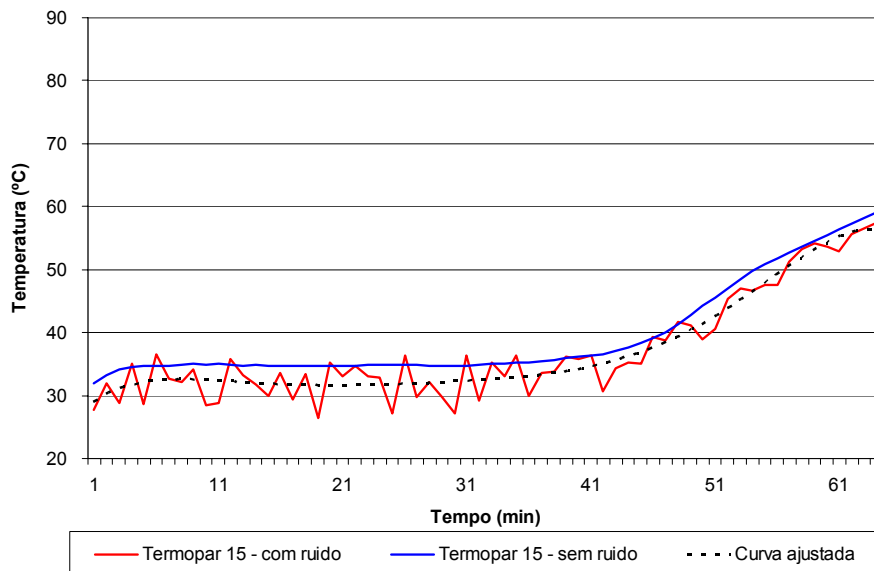


Figura 7.46 – Comparativo da leitura de temperatura com e sem ruído.

7.2.6 – Curvas da Difusividade do material

As figuras 7.47 a 7.49, mostram curvas para exemplificar o comportamento da difusividade em função do conteúdo de umidade, utilizando 7,0 cm de distância entre placas e velocidade do ar com 1,43 m/s, nas temperaturas de 50, 65 e 80 ° C:

Conforme foi visto no Capítulo 6, para se obter as curvas de difusividade do gesso, substituiu-se os valores do conteúdo de umidade e os respectivos tempos obtidos no experimento, na Equação 6.4, do respectivo capítulo, e com isto, calculou-se os valores locais da difusividade.

Esse procedimento foi automatizado através da elaboração de um programa em FORTRAN, que lia os valores do conteúdo de umidade do banco de dados de todos os experimentos, e assim calculava os respectivos valores das difusividades.

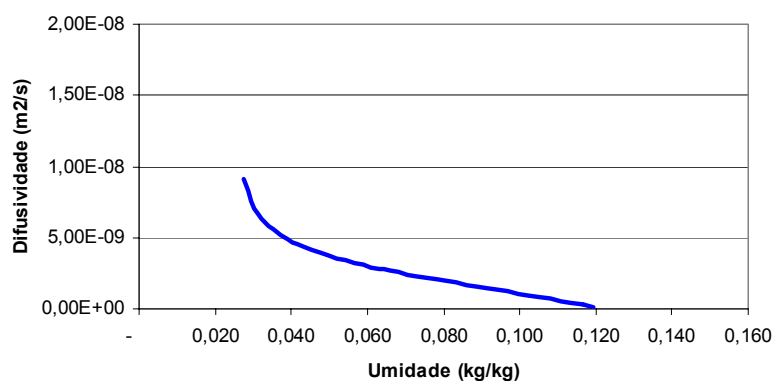


Figura 7.47 – Perfil da difusividade da secagem, utilizando 50° C.

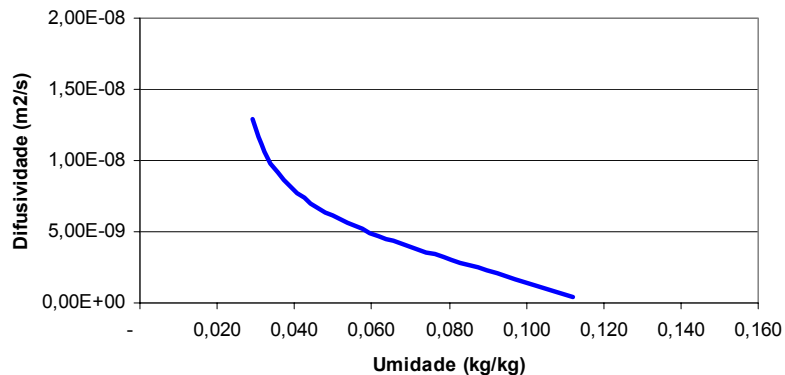


Figura 7.48 – Perfil da difusividade da secagem, utilizando 65° C.

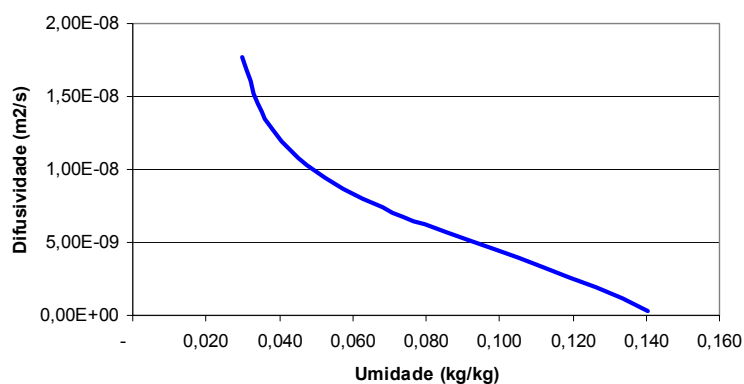


Figura 7.49 – Perfil da difusividade da secagem, utilizando 80° C.

7.2.6.1 Difusividades Médias

Para representar todas as difusividades obtidas, e verificar a influencia na difusividade, do conteúdo de umidade, da temperatura e da distância entre placas, colocou-se uma tabela com valores médios e a figura 7.49. A tabela 7.4 mostra as difusividades médias obtidas para três distâncias e temperaturas.

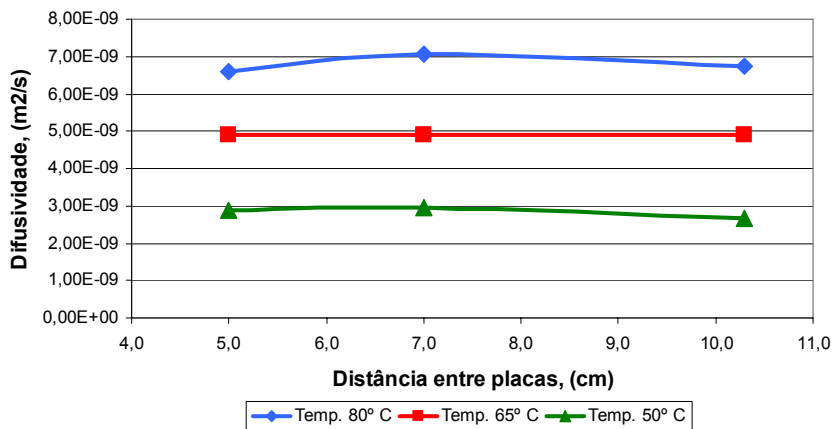


Figura 7.49 – Difusividade vs. distância entre placas.

Tabela 7.4 – Valores numéricos das médias das difusividades,

Distancia	Temp. 80° C	Temp. 65° C	Temp. 50° C
5,0	6,60E-09	4,89E-09	2,89E-09
7,0	7,07E-09	4,92E-09	2,94E-09
10,3	6,75E-09	4,91E-09	2,67E-09

7.2.7 – Análise do Tempo vs. Distância entre placas

Para a análise conclusiva dos resultados, foi necessário o comparativo do tempo em função da temperatura variando de as velocidades do ar, e o número de placas, como mostram as figuras abaixo:

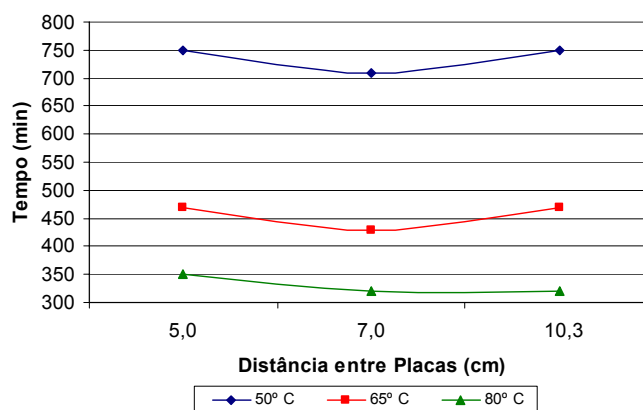


Figura 7.50 – Tempo vs. distância entre placas.

7.2.8 – Tempo de secagem

As tabelas 7.5 a 7.7, mostram um comparativo dos tempos, do período de taxa decrescente, obtidos experimentalmente e calculados através dos modelos, capilar e difusivo citados no capítulo 6 utilizando as equações 6.25 e 6.24, respectivamente. Tomou-se como exemplo os experimentos com três placas e velocidade do ar com 1,30 m/s, nas temperaturas de 50, 65 e 80° C, para um conteúdo de umidade de equilíbrio médio de 0,05 kg/kg.

A tabela 7.5 e a figura 7.51 mostram o comparativo dos tempos, quando a temperatura do ar de secagem foi de 50°C, seu conteúdo de umidade crítico foi de 0,144 e a difusividade média foi $2,90 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 7.5 – Comparativo dos tempos para temperatura de 50° C.

Umidade (kg/kg)	Tempo Experimental (hr)	Tempo Modelo Difusivo (hr)	Tempo Modelo Capilar (hr)
0,128	0,83	1,27	2,94
0,114	1,67	2,56	5,92
0,101	2,50	4,08	9,41
0,086	3,33	5,91	13,64

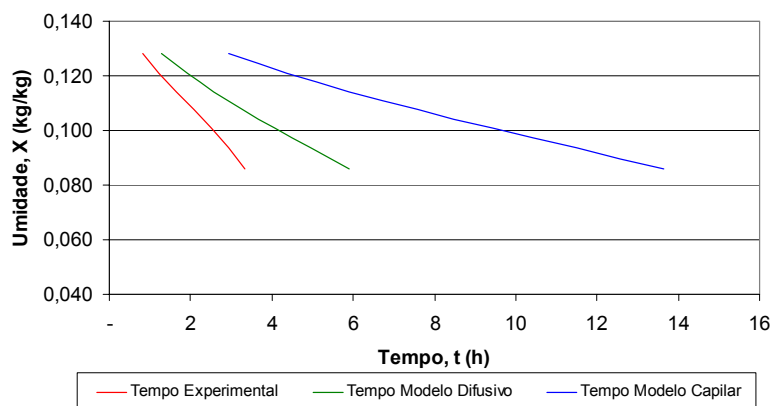


Figura 7.51 – Comparativo dos tempos para temperatura de 50° C

A tabela 7.6 e a figura 7.52 mostram o comparativo dos tempos, quando a temperatura do ar de secagem foi de 65°C, seu conteúdo de umidade crítica foi de 0,138 e a difusividade média foi $4,90 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 7.6 – Comparativo dos tempos para temperatura de 65° C.

Umidade (kg/kg)	Tempo Experimental (hr)	Tempo Modelo Difusivo (hr)	Tempo Modelo Capilar (hr)
0,128	0,83	0,80	1,70
0,114	1,67	3,06	6,52
0,101	2,50	5,32	11,35
0,086	3,33	8,91	18,98

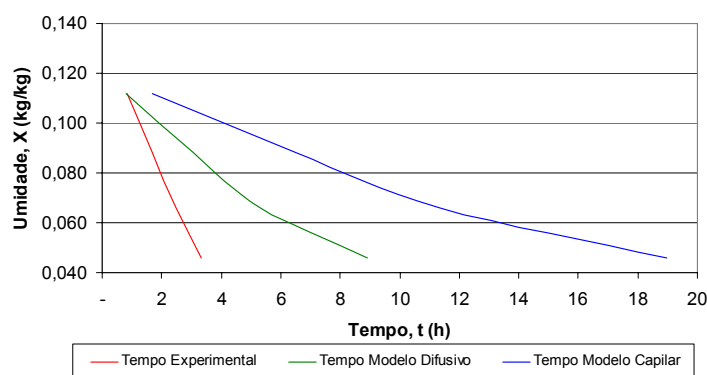


Figura 7.52 – Comparativo dos tempos para temperatura de 65° C

A tabela 7.7 e a figura 7.53 mostram o comparativo dos tempos, quando a temperatura do ar de secagem foi de 80°C, seu conteúdo de umidade crítica foi de 0,170 e a difusividade média foi $7,09 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 7.7 – Comparativo dos tempos para temperatura de 80° C.

Umidade (kg/kg)	Tempo Experimental (hr)	Tempo Modelo Difusivo (hr)	Tempo Modelo Capilar (hr)
0,128	0,83	1,06	2,89
0,114	1,67	2,43	6,62
0,101	2,50	4,40	12,00
0,086	3,33	7,63	20,81

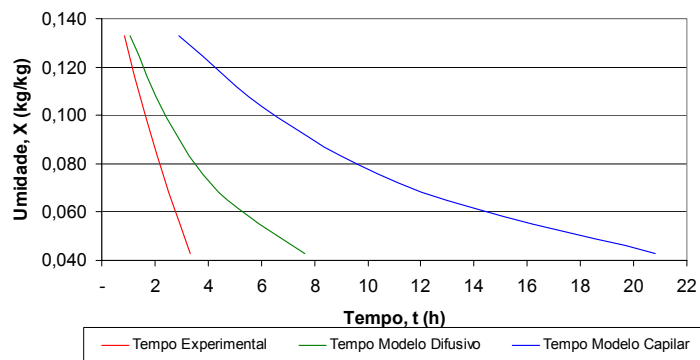


Figura 7.53 – Comparativo dos tempos para temperatura de 80° C

8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para se obter as temperaturas do ar de secagem conforme cronograma de condições, observou-se que ficaram inalterados alguns ajustes do secador tais como: a posição do dumper, fechado em 90%; e nas condições onde foram utilizadas a resistência 2, o variador de tensão da resistência permaneceu em 100%, mostrando com isto que para as condições definidas neste trabalho, não se fez necessário o uso deste equipamento. Portanto na temperatura de 50 °C, apenas a resistência 1 permaneceu ligada, com 65 °C permaneceram ligadas as resistências 1 e 3, e para 80 °C foram necessárias a ligação de todas as resistências, 1, 2 e 3.

As figuras 8.1 a 8.3, mostram o comportamento das temperaturas e umidades relativas do ar dentro do túnel de vento, antes e depois da seção de teste do mesmo. Também nos mesmos gráficos, são mostradas curvas da temperatura e umidade relativas do ar do ambiente externo ao túnel. Observa-se que a temperatura do ar ambiente em todos os experimentos foi praticamente constante, tendo uma variação mínima entre 30 e 35° C , o que corresponde a um aumento insignificante na pressão de vapor. Por sua vez, a umidade relativa do ar ambiente durante todos os experimentos teve uma variação máxima de 10%, levando-se em consideração que os mesmos foram feitos em dias diferentes, e em horários dispares, numa atmosfera não controlada.

Na figura 8.1, observa-se que a umidade relativa do ambiente foi de 55%, constante durante todo o experimento. Vale salientar que este experimento foi mais longo. Já na figura 8.2 e 8.3, a umidade relativa iniciou a 55% e terminou com 50%, e. 60%, e terminou com 50%, para as temperaturas de 65 e 80° C, respectivamente. Quando o ar encontrava-se a uma temperatura de 50° C a umidade relativa média do ar durante o ensaio permaneceu em torno de 20,6%, enquanto que, para as temperaturas de 65 e 80° C, estas permaneceram em 8,7% e 3,8% respectivamente.

Numa análise da figura 8.1 pode-se observar que a temperatura do ar na seção de teste, antes das amostras, para a condição de temperatura de 50°C, se manteve em torno de 50°C, e que a diferença com a temperatura na saída das placas se manteve constante durante por quase todo o tempo de secagem, vindo a diminuir no final, devido ao decréscimo da umidade relativa. Já na figura 8.2, para a condição de temperatura de 65°C, a temperatura mais alta, atingiu rapidamente 65°C e terminou o processo em 70, e a temperatura a jusante das placas iniciou em 60° C e terminou o processo em 68° C. No experimento realizado a 80°C , os sensores antes da placa registraram um crescimento rápido até 78°C, e na em metade do tempo a temperatura atingiu 80°C, ao passo que a temperatura da região de pois da placa, atingiu rapidamente 70, e foi crescendo lentamente até 75°C.

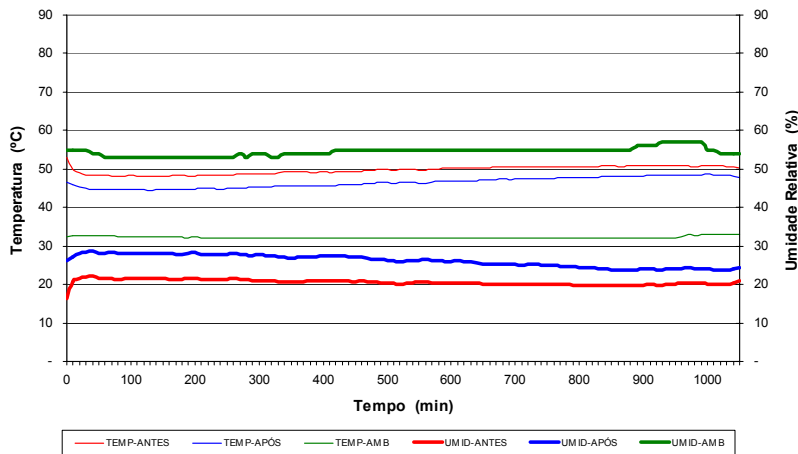


Figura 8.1 – Umidades e temperaturas do ar para a condição de 50 °C e 3 placas.

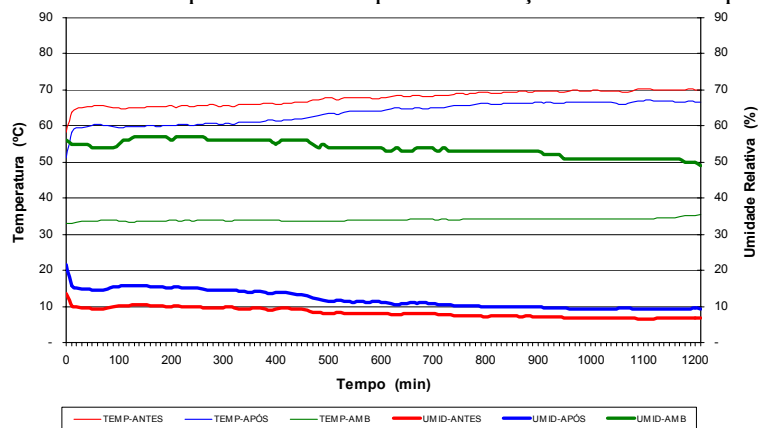


Figura 8.2 – Umidades e temperaturas do ar para a condição de 65 °C e 3 placas

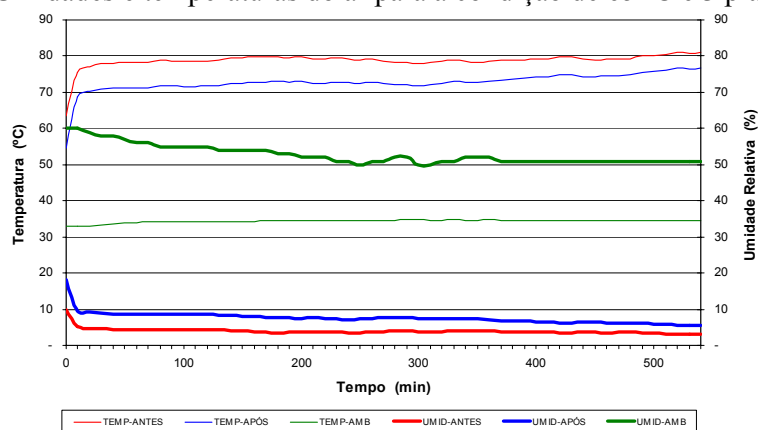


Figura 8.3 – Umidades e temperaturas do ar para a condição de 80 °C e 3 placas

Antes das placas a umidade relativa foi de 20% para a secagem a 50°C, terminando o processo em 25%. Já na secagem realizada a 65°C, a umidade relativa antes das placas esteve a 10% no início, e caiu para 8% no final, ao passo que após as placas, iniciou com 20%, caiu para 15%, e terminou com 10%. Na secagem a 80°C, a umidade relativa apresentou um padrão parecido com o anterior. Começou com um valor de 10% antes das placas e caiu para 8 e terminou com 5% de umidade relativa, enquanto que depois das placas, começou com 20%, caiu para 10%, e terminou com 8%.

As figuras 8.5 a 8.7, mostram os gráficos da variação do conteúdo de umidade da amostra em função do tempo, para três condições diferentes de temperatura (50, 65 e 80° C). Observando as figuras, verifica-se que os conteúdos de umidades de equilíbrio se apresentam em torno de 5,5%, como dito anteriormente no capítulo 7. Também se observa, que a placa aquecida a uma temperatura de 50° C atinge o conteúdo de umidade de equilíbrio com um tempo mais longo após 1150 minutos, enquanto que para as condições de 65 e 80 a condição de equilíbrio foi atingida após 630 e 510 minutos, respectivamente.

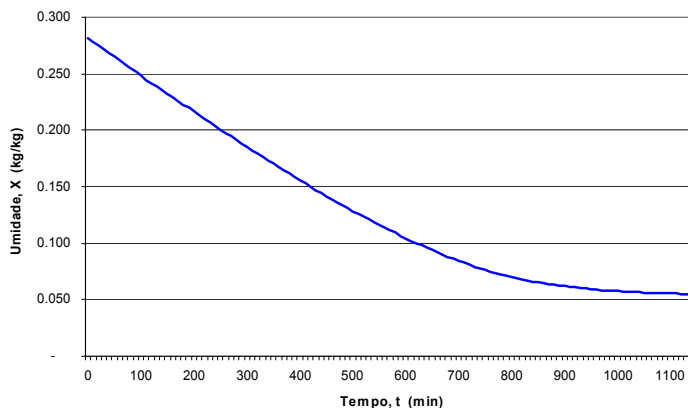


Figura 8.5 – Umidade vs. Tempo para a temperatura de 50° C.

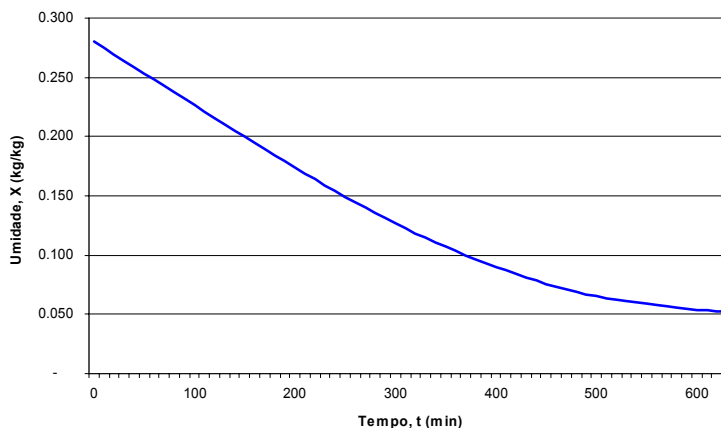


Figura 8.6 – Umidade vs. Tempo para a temperatura de 65° C.

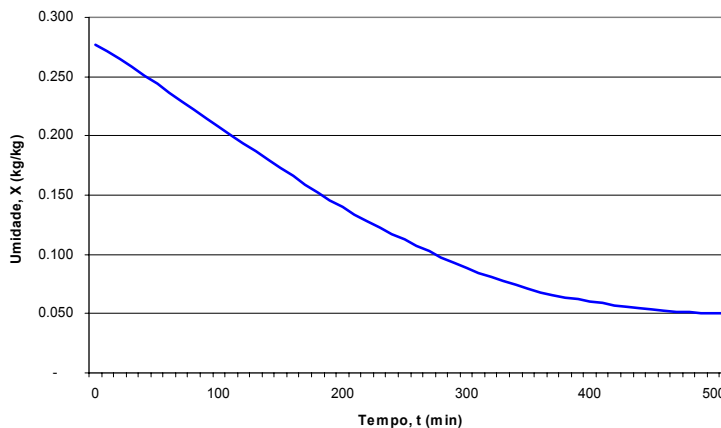


Figura 8.7 – Umidade vs. Tempo para a temperatura de 80° C.

Pode-se observar na figura 8.8, três conjuntos de curvas do conteúdo de umidade em função do tempo de secagem, as quais se diferenciam pelas condições de temperaturas de secagem (50, 65 e 80° C). Verifica-se que quando as placas são secadas em uma temperatura de 50° C a redução da umidade é mais lenta que no caso da secagem a 80° C. Admitindo que a condição de equilíbrio de umidade seja em torno de 5,5%, pode-se afirmar que o tempo médio de secagem para a condição de 80° C é de aproximadamente de 525 minutos, enquanto que para a condição de 65 e 50° C, o tempo de secagem foi de 650 e 1050 minutos,

respectivamente. Portanto pode-se concluir, que a temperatura de secagem provoca um efeito considerável sobre o tempo de secagem. Isto pode ser observado de forma mais clara na figura 8.9.

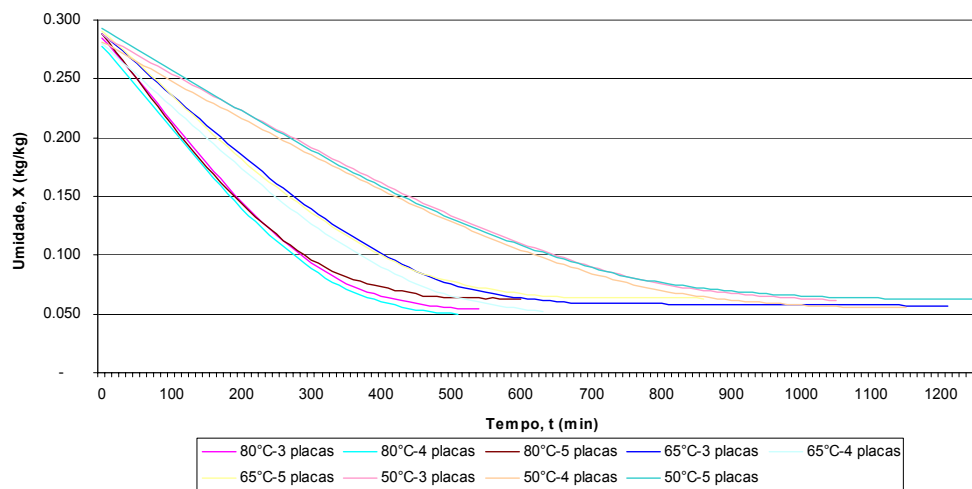


Figura 8.8 – Umidade vs. Tempo para todas as condições

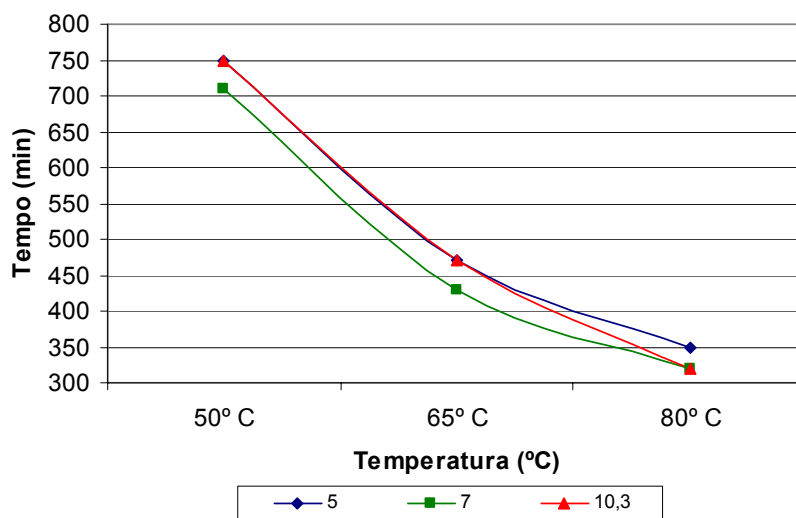


Figura 8.9 – Gráfico do Tempo vs. Temperatura

Observando na mesma figura 8.9, que a distância entre placas (3, 4 e 5), não influencia significativamente o tempo de secagem. Acredita-se que a razão disto seja a pequena variação da velocidade de escoamento quando se altera a distância entre placas (10,3, 7,0 e 5,0 cm). Para uma distância entre placas de 10,3 cm a velocidade do ar é de 1,3 m/s, enquanto que para a distância de 5,0 e 7,0 cm as velocidades são de 1,60 e 1,43 m/s respectivamente. A curva da figura 8.10, mostra este efeito. Um outro dado importante foi observado nesta mesma figura, que há uma tendência de existir um espaçamento ótimo, uma vez que para a menor e maior distância os tempos são os mesmos, e para a distância intermediária, o tempo é menor. Mas observa-se que para a temperatura de 80° C existe uma pequena queda para a distância de 10,3 cm. Devido ao reduzido número de pontos

experimentais em cada curva serão necessários estudos futuros para se fazer afirmações mais conclusivas.

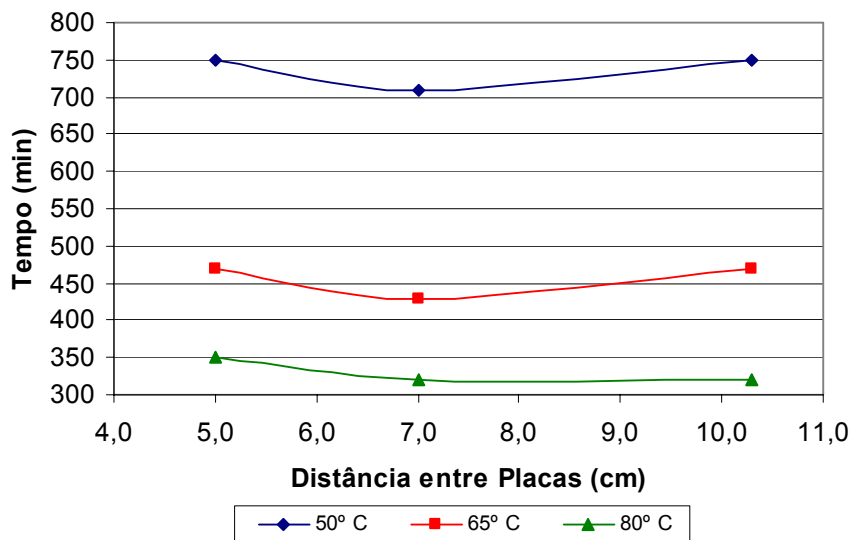


Figura 8.10 – Tempo vs. distância entre placas

As figuras 8.11 a 8.13, mostram os gráficos da variação da taxa de secagem em função do tempo, para três condições diferentes de temperatura (50, 65 e 80° C). Observando a figura 8.11, para uma temperatura de 50° C, verifica-se que a taxa de secagem para o gesso permanece aproximadamente constante até os primeiros 400 minutos e no tempo restante até 1150 minutos, que foi o tempo total de secagem, ele apresentou uma taxa de secagem decrescente. Da mesma forma, nas figuras 8.12 e 8.13 o tempo da taxa constante para temperaturas de 65 e 80° C foi de 250 e 160 minutos respectivamente e para tempos totais de secagem de 630 e 510 minutos, respectivamente.

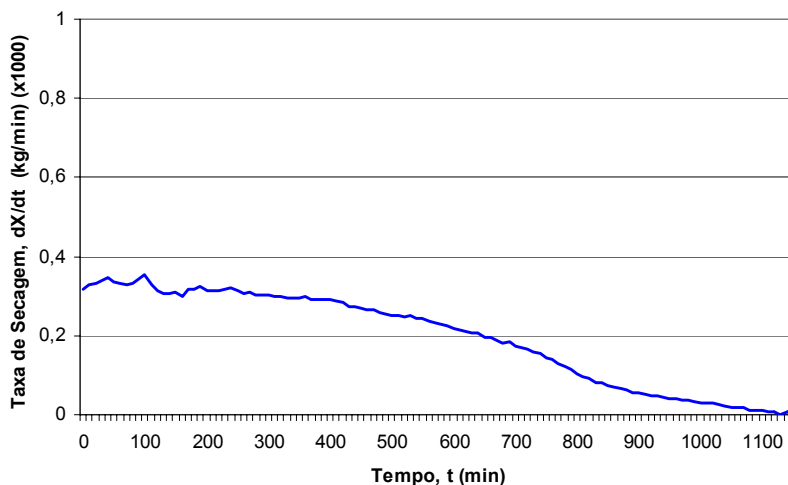


Figura 8.11 – Taxa de secagem pelo tempo, para a temperatura de 50° C.

Da mesma forma como já verificado no gráfico da figura 8.8 a respeito do efeito da temperatura sobre o processo de secagem, uma análise utilizando-se as informações fornecidas pelos gráficos das figuras 8.11 a 8.13 nos leva a mesma conclusão. Destes gráficos podemos observar que quando se aumenta a temperatura do ar de secagem, também aumenta a taxa de secagem. Assim para uma temperatura de 50° C a máxima taxa de secagem, obtida

no período de taxa constante, é de aproximadamente de $3,0 \times 10^{-4}$ kg/min, enquanto que para 65 e 80° C a taxa de secagem é de aproximadamente de $5,5 \times 10^{-4}$ e $7,0 \times 10^{-4}$ kg/min, respectivamente.

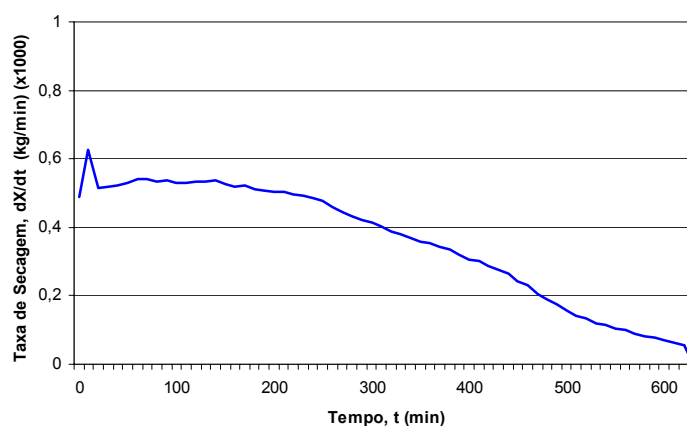


Figura 8.12 – Taxa de secagem pelo tempo, para a temperatura de 65° C.

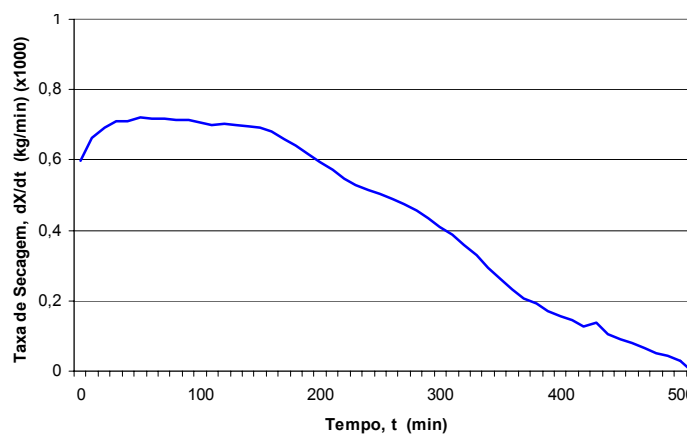


Figura 8.13– Taxa de secagem pelo tempo, para a temperatura de 80° C.

As figuras 8.14 a 8.16, mostram os gráficos da variação das temperaturas internas das placas em função do tempo, para três condições diferentes de temperatura (50, 65 e 80° C). Observando as figuras, verifica-se que como era de se esperar que a placa aquecida a uma temperatura de 80° C alcança a condição de equilíbrio térmico com o ar interno mais rapidamente que nos casos que foram utilizadas temperaturas de 65 e 50° C.

Para as temperaturas de 50 a condição de equilíbrio foi atingida após 1000 minutos, enquanto que para as condições de 65 e 80 foram atingidas após 850 e 580 min respectivamente. Isto pode ser observado também na figura 8.17

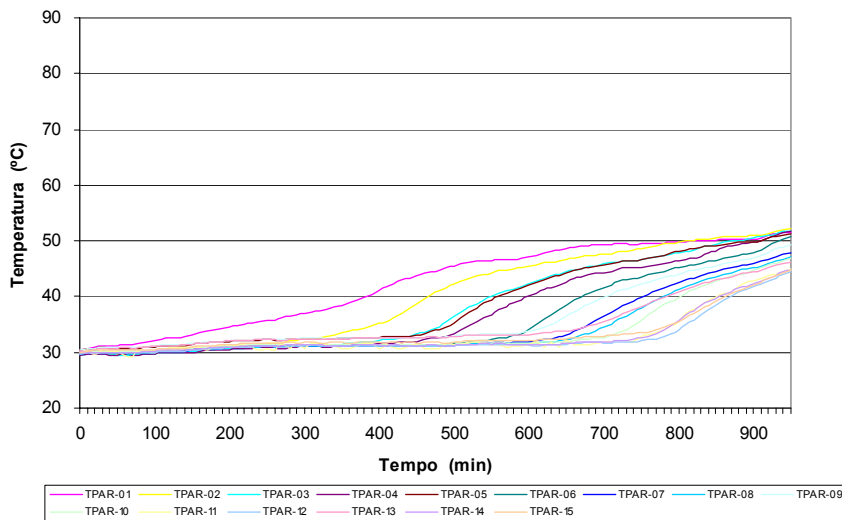


Figura 8.14 – Temperaturas internas da placa para a condição de 50 °C e 4 placas

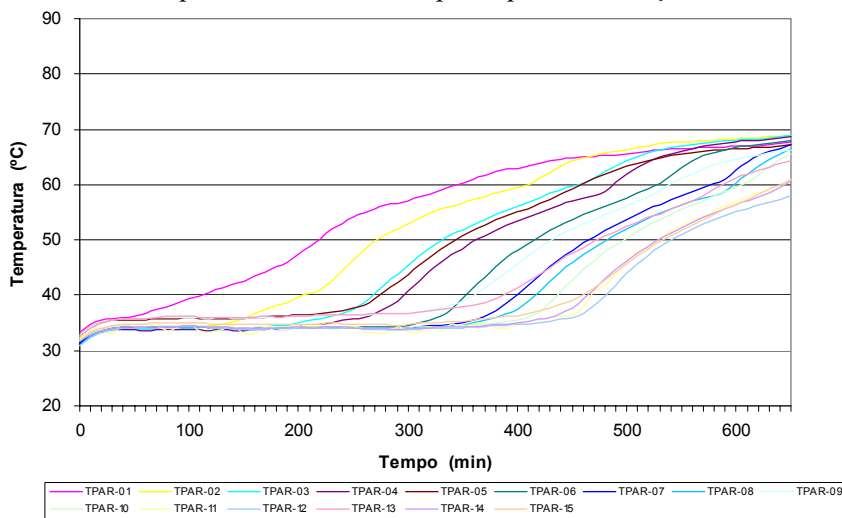


Figura 8.15 – Temperaturas internas da placa para a condição de 65 °C e 4 placas

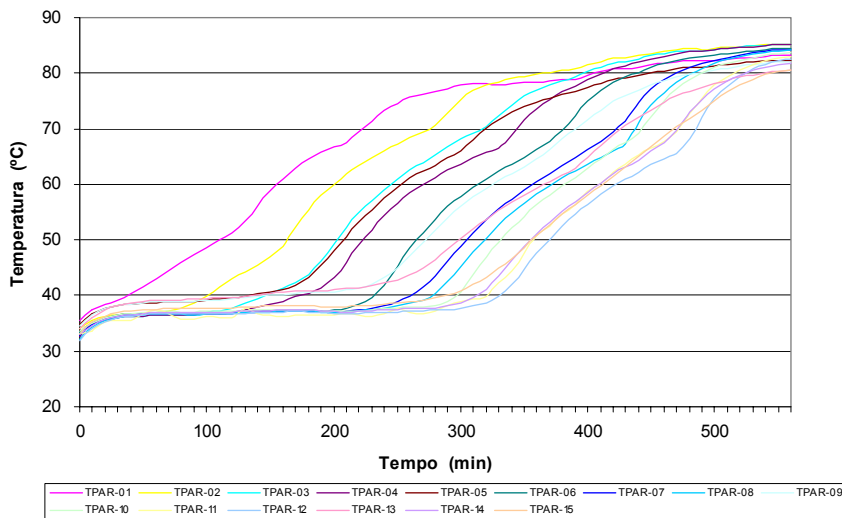


Figura 8.16 – Temperaturas internas da placa para a condição de 80 °C e 4 placas

A figura 8.17 apresenta o comportamento das temperaturas em um único termopar, como, por exemplo, o termopar nº 8, situado no centro da placa, nas proximidades da linha de simetria, nela observa-se 3 conjuntos de linhas, nas quais se diferenciam pelas temperaturas, as mais baixas apresentaram-se nas condições de 50° C e as mais altas nas condições de 80° C.

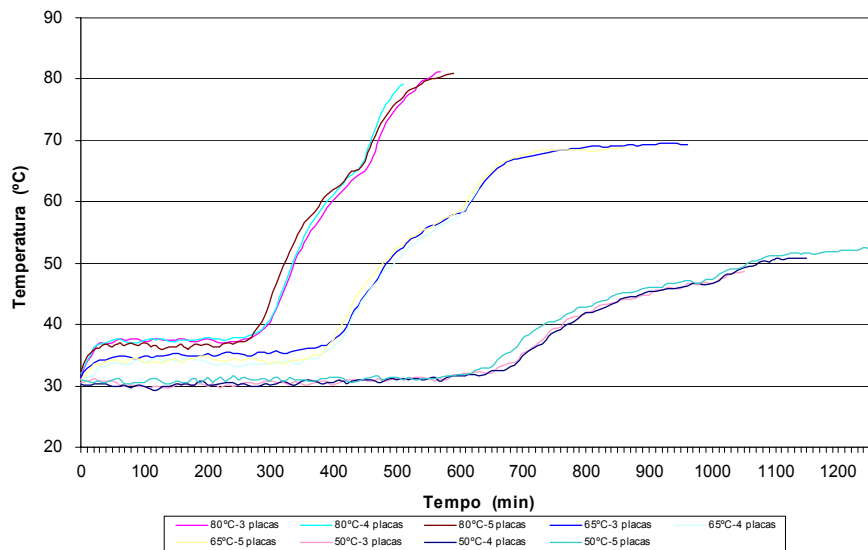


Figura 8.17 – Temperaturas internas da placa lida pelo termopar nº 8

Numa análise das figuras 8.18 a 8.20, verifica-se, como já era esperado, que a difusividade tem uma variação com o conteúdo de umidade, mas que estas não reproduziam os mesmos valores para todas as condições de secagem a 50, 65 e 80° C. Isto fica evidente quando se observa a figura 8.21, onde se vê que temperaturas maiores têm as difusividades médias maiores. Observa-se ainda que para uma mesma temperatura, a difusividade praticamente não varia com a distância entre as placas.

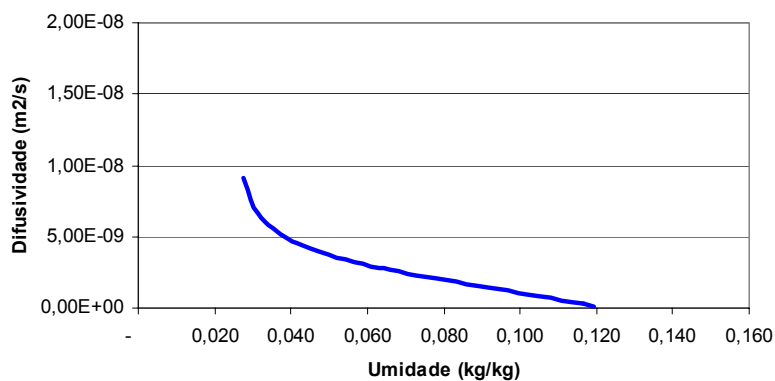


Figura 8.18 – Perfil da difusividade da secagem, utilizando 50° C.

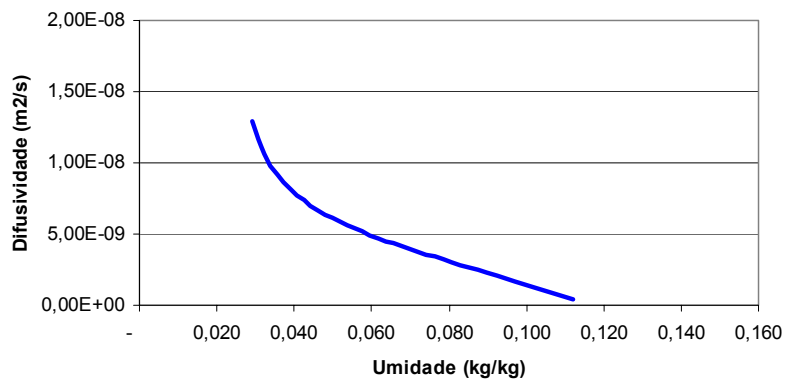


Figura 8.19 – Perfil da difusividade da secagem, utilizando 65° C.

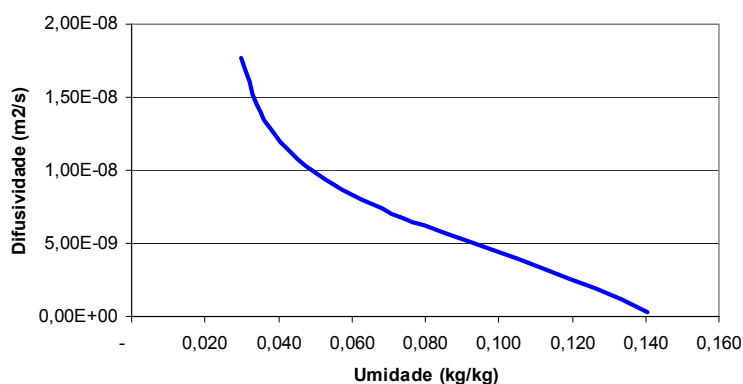


Figura 8.20 – Perfil da difusividade da secagem, utilizando 80° C.

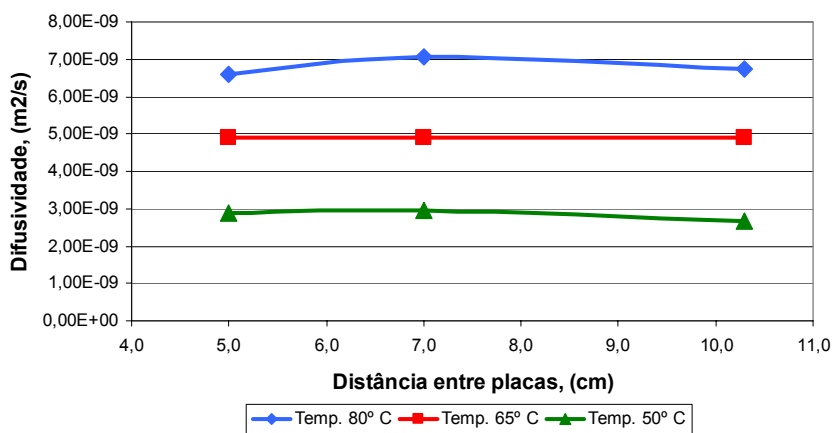


Figura 8.21 – Difusividade vs. distância entre placas.

Na tabela 8.1 e na figura 8.22, é feita uma comparação dos tempos obtidos para alguns valores do conteúdo de umidade medidos, com os tempos obtidos pelo modelo difusivo, e capilar. Numa análise entre os valores dos tempos, observa-se que o modelo difusivo representa melhor o tempo experimental do que o capilar. O primeiro tem uma dependência muito grande da difusividade, o que explica as aproximações e afastamentos entre o modelo e o experimental. No caso capilar, ouve uma divergência muito grande que merece uma

investigação mais acurada. Numa avaliação superficial, pode-se entender que um material de comportamento capilar, como é o caso de substâncias granulares ou pastosas, por exemplo, teriam mesmo um tempo de secagem maior.

Tabela 8.1 – Comparativo dos tempos para temperatura de 80° C.

Umidade (kg/kg)	Tempo Experimental (hr)	Tempo Modelo Difusivo (hr)	Tempo Modelo Capilar (hr)
0,128	0,83	1,06	2,89
0,114	1,67	2,43	6,62
0,101	2,50	4,40	12,00
0,086	3,33	7,63	20,81

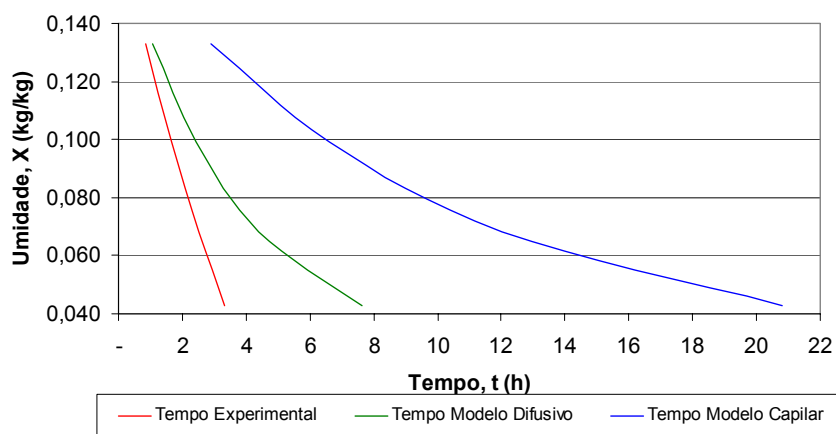


Figura 8.22 – Comparativo dos tempos para temperatura de 80° C

9. CONCLUSÕES

Diante de todo o material apresentado nos capítulos anteriores, pode-se concluir que o secador desenvolvido neste trabalho demonstrou um ótimo funcionamento e também ter sido apropriado para a secagem das placas de gesso. Além disso, o equipamento se mostrou robusto, apresentando uma grande confiabilidade quanto ao seu funcionamento, e uma boa repetibilidade nos dados gerados.

Apenas para reforçar a afirmativa supra citada, vale lembrar que durante os experimentos de secagem, foram possíveis obter diversas informações e parâmetro importantes em qualquer processo de secagem, e na caracterização do material.

Nas secagens realizadas foi possível observar que as curvas de secagem e da taxa de secagem, apresentam características similares com as obtidas na literatura, muito embora essa seja uma comparação qualitativa, uma vez que não se encontrou bibliografia sobre secagem de placas de gesso.

Foi possível também se obter curvas de difusividade, do conteúdo de umidade de equilíbrio, e do conteúdo de umidade crítica. Com tratamento gráfico aplicado aos dados gerados, pôde-se inferir que a difusividade do gesso é uma função do conteúdo de umidade e da temperatura, que o tempo de secagem varia com a temperatura e com o espaçamento entre as placas; que apareceu uma tendência de que exista uma função temperatura versus distância com um ponto de espaçamento ótimo, que precisa ser mais bem investigado.

Complementando tudo o que já foi dito, deve-se levar em consideração que em relação aos objetivos principais do trabalho, foi obtida a geração de um banco de dados de diversos experimentos de secagem que permitirá ainda a extração de outras informações relevantes, como o cálculo da condutividade térmica.

Feita uma tentativa de formular modelos matemáticos que complementem o modelo experimental. Usaram-se esses modelos para comparar os tempos obtidos no experimento para algumas umidades escolhidas na fase de taxa de secagem variável, com os tempos gerados para essas umidades, usando os modelos difusivo e capilar, para mostrar que com um estudo mais acurado sobre o tipo de escoamento que é predominante na secagem das placas de gesso, e uma investigação na difusividade, coeficiente de convecção e outros, poderão ter um modelo teórico complementar ao modelo experimental.

E por fim o trabalho aqui apresentado, já pode contribuir com conhecimentos adicionais ao setor gesseiro para o aumento da produção e abertura ao mercado exterior, com o domínio de alguns parâmetros de secagem.

10. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a continuação deste trabalho nas seguintes linhas:

- Aprofundar o trabalho de caracterização do gesso, Fazendo uma análise mais aprofundada da difusividade; obter a condutividade térmica, e levantar a curva da Isoterma de sorção para as placas de gesso;
- Fazer um estudo mais aprofundado do modelo matemático de simulação, dos períodos e dos tempos de secagem e comparar valores teóricos e experimentais;
- Estudar o efeito da variação da velocidade do ar do túnel em função da variação da distância entre as placas de gesso, no tempo de secagem.
- Condensar a umidade contida no ar após a secagem e reaproveitar no processo de hidratação do gesso.
- Fazer experimentos no protótipo construído com modificações em sua estrutura a fim de aproveitar parte do ar após a secagem, e recircular a fim de obter valores ótimos desta razão de ar.
- Fazer experimentos no protótipo construído com outros materiais, com a adaptação do secador.
- Tentar transformar o secador atual em outros tipos de secadores, tal como o secador de leito fluidizado, através da construção de mais módulos, para fazer experimentos com outros tipos de materiais;
- Fazer experimentos no protótipo construído, utilizando fontes alternativas de energia, tal como: energia solar;

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, R.P.N., “Estudo da influencia da cal hidratada nas pastas de gesso”, 1999, 145p, dissertação mestrado, EP-USP-SP.
- BRAUNA, J.E., P.K. BANSALB, E.A. GROLLA, “Energy e.ciency analysis of air cycle heat pump dryers, International Journal of Refrigeration “, 2002,25, 954–965.
- DEVAHASTIN, SAKAMON, “Mujumdar’s Practical Guide to Industrial Drying”, Thananuch Business Ltd. Part, Canadá, 2000.
- DINCER, I., M.M. HUSSAIN, “Development of a new Bi–Di correlation for solids drying, International Journal of Heat and Mass Transfer” , 2002, 45, 3065–3069.
- DINCER, I., M.M. HUSSAIN, A.Z. SAHIN, B.S. YILBAS, “Development of a new moisture transfer (Bi–Re) correlation for food drying applications, International Journal of Heat and Mass Transfer” , 2002, 45, 1749–1755.
- EL-SEBAIL, A.A., S. ABOUL-ENEIN, M.R.I. RAMADAN, H.G. EL-GOHARY, “Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer, Energy Conversion and Management “, 2002a, 43, 2251–2266.
- EL-SEBAIL, A.A., S. ABOUL-ENEIN, M.R.I. RAMADAN, H.G. EL-GOHARY, “Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables, Energy” , 2002b, 27, 845–859.
- FESTA, JEAN, “Le Plâtre-Et ses applications traditionnelles et modernes”, Eyrolles, 1992.
- GLOUANNEC, P., D. LECHARPENTIER, H. NOEL, “Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material, Applied Thermal Engineering” , 2002, 22, 1689–1703.
- HOLMAN, J. P.,” Experimantal Methods for Engineers”, 7th ed., McGraw-Hill, 2001.
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., “Fundamentos Da Transferência de Calor e de Massa”, 1998, 4^a. Ed., Ltc Editora.
- ISMAIL,KAMAL, A.R., “Técnicas de Medidas e Instrumentação”, Ed. do Autor, Campinas, SP,2000.
- ISMAIL,KAMAL, A.R., “Técnicas Experimentais em Fenômenos de Transferência”, Ed. do Autor, Campinas, SP,2000.
- ISO 5801, “Industrial fans-performance testing using standardized airways” , 1997, first edition.
- JANKOWSKY, I.P.,DUGATTI, M. A., “Operational conditions of convencional kiln drying at wooden industries in tietê-SP”, Scientia Florestalis, 2001, nº 59, p. 101-103.

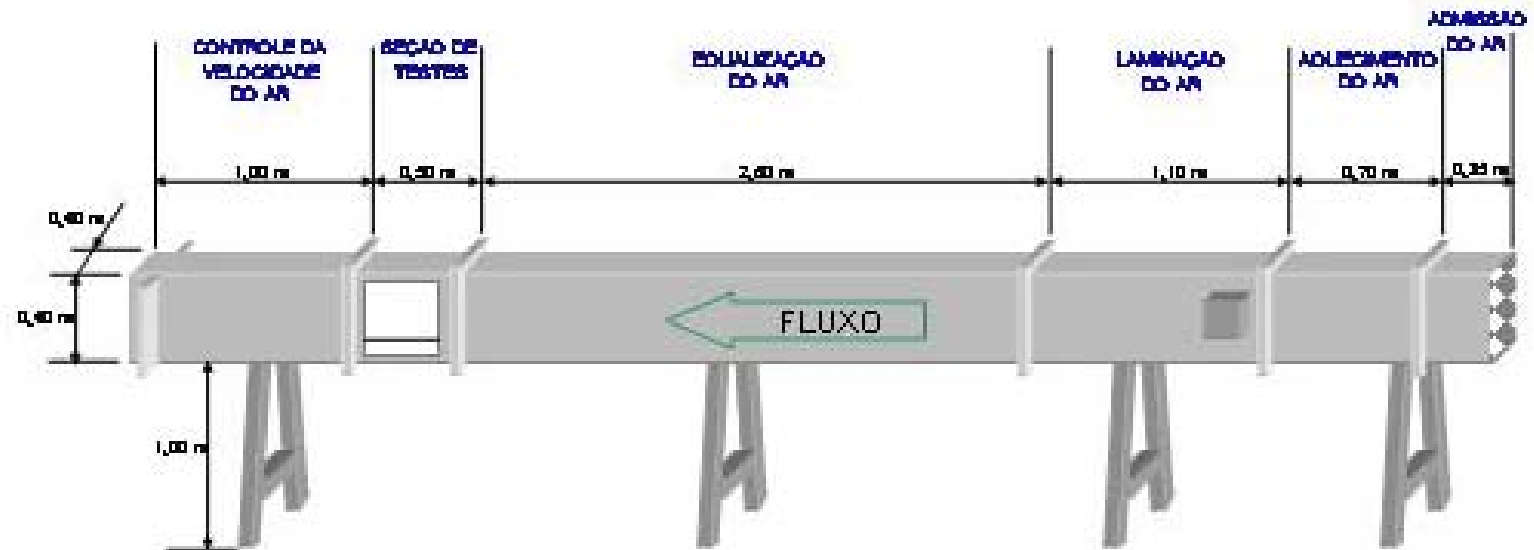
- KEEY, R.B., "Drying of Loose and Particulate Materials", Hemisphere Publishing Corporations, 1992.
- KEEY, R.B., "Drying: Principles and Practice", Pergamon Press, Oxford, 1972.
- KEEY, R.B., "Introduction to Industrial Drying Operations", Pergamon Press, 1978.
- LEON, M. AUGUSTUS, S. KUMAR ., S.C. BHATTACHARYA, "A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers, Renewable and Sustainable Energy Reviews" , 2002, 6, 367–393.
- MENDES, L.M.; SILVA J.R.M.; LIMA, J.T.; TRUGILHO P.F.; REZENDE, E.C., " Secagem da madeira ao ar livre e alguns pontos básicos para compra de madeira serrada", Cien. E Prat., UFL, boletim técnico nº 21, 1996, 30p.
- MOREIRA, R.G., "Unit operation in food processing", chapter 7, 2002, available in baen.tamu.edu/users/moreira/bsen474.html.
- MURAT, M.; PUSZTASZERI, L.; GREMION, M., "A preliminary survey of the correlation between the crystalline structure and hardened gypsum plasters", 1979, vol. 1, p. 264-271,.
- NBR 02:002.40.009, ABNT, "Bloco de gesso utilizado na vedação vertical interna de edificações-Metodo de ensaios", 1999, Projeto de norma.
- NBR 12128, ABNT, "Gesso para construção-determinação das propriedades físicas da pasta", 1991, first edition.
- NBR 13207, ABNT, "Gesso para construção civil", 1994, first edition.
- ODLER, I; RÖSSLER, M., "Relationships between pore structure and strength of set gypsum pastes Part II: Influence of chemical admixtures", 1989, p. 96-100,.
- PANG, G; SIMPSON, I; HASLETT, T., " Wood Science and Technology", 2001, p. 487-502.
- PERES, L., BENACHOUR, M., "O gesso: produção e utilização na construção civil", editora bargação, 2001.
- PERRY, R. H., "Chemical Engineers' Handbook", Fifth Edition, Mcgraw-Hill, 1973, Section 20, Pp 44-45.
- RATTI, C. AND MUJUNDAR, A.S., "Solar drying of foods: modeling and numerical simulation, Solar Energy" , 1997, v. 60, n. 3-4, 151-157.
- SAHIN, A.Z., I. DINCER, "Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying, International Journal of Heat and Mass Transfer" , 2002, 45, 3267–3273.
- SISSOM, L.E., PITTS, D.R., "Fenômenos de Transporte", editora Guanabara, Rio de Janeiro-RJ, 1988.

SILVA, JUAREZ S., “Secagem e armazenamento de produtos agrícolas”, editora aprenda fácil, Viçosa-MG, 2000.

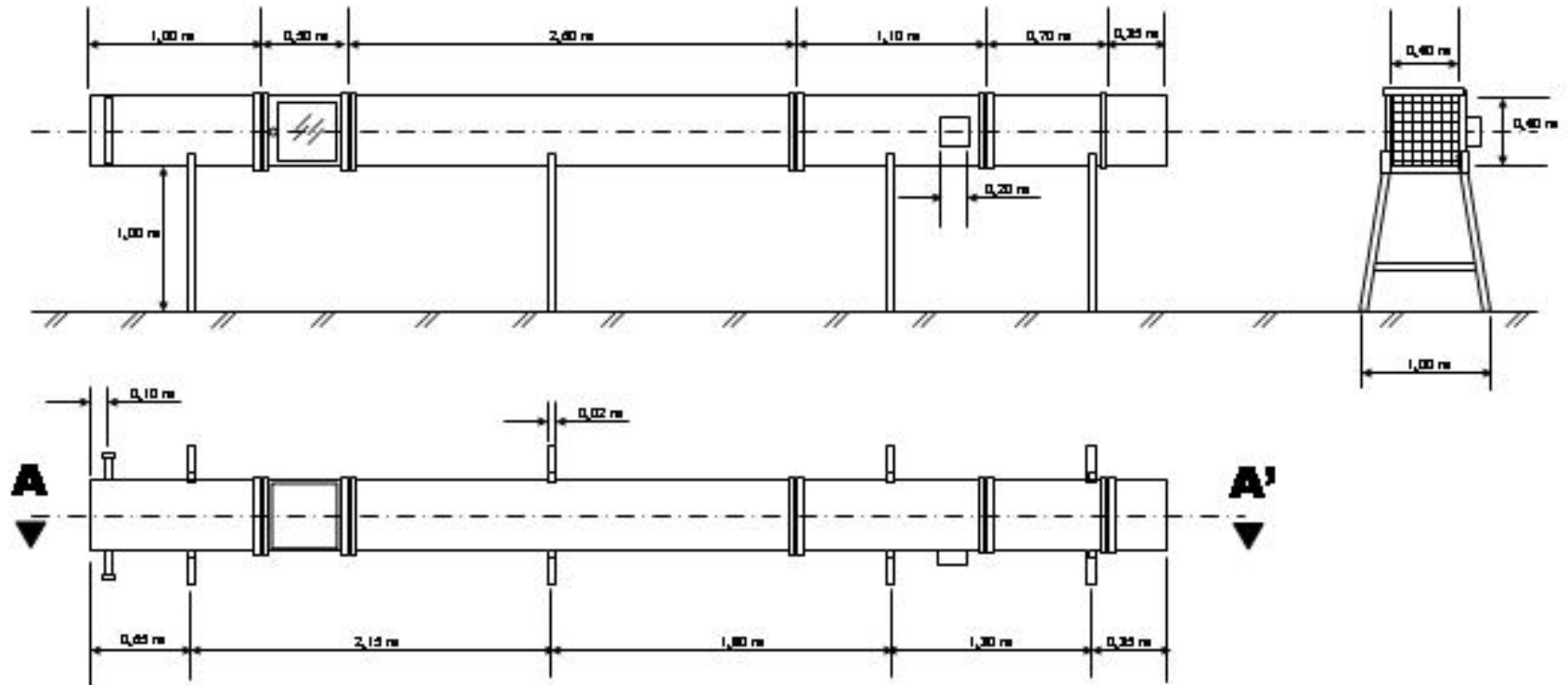
SLATTERY, J.C., “Momentum, Energy, And Mass Transfer In Continua”, Mcgraw-Hill Kogakusha, Ltda, 1972.

STRUMILLO,C., KUDRA, T.,” Drying: Principles, Applications and Design”, Gordon and Breach Sciences Publishers, 1989.

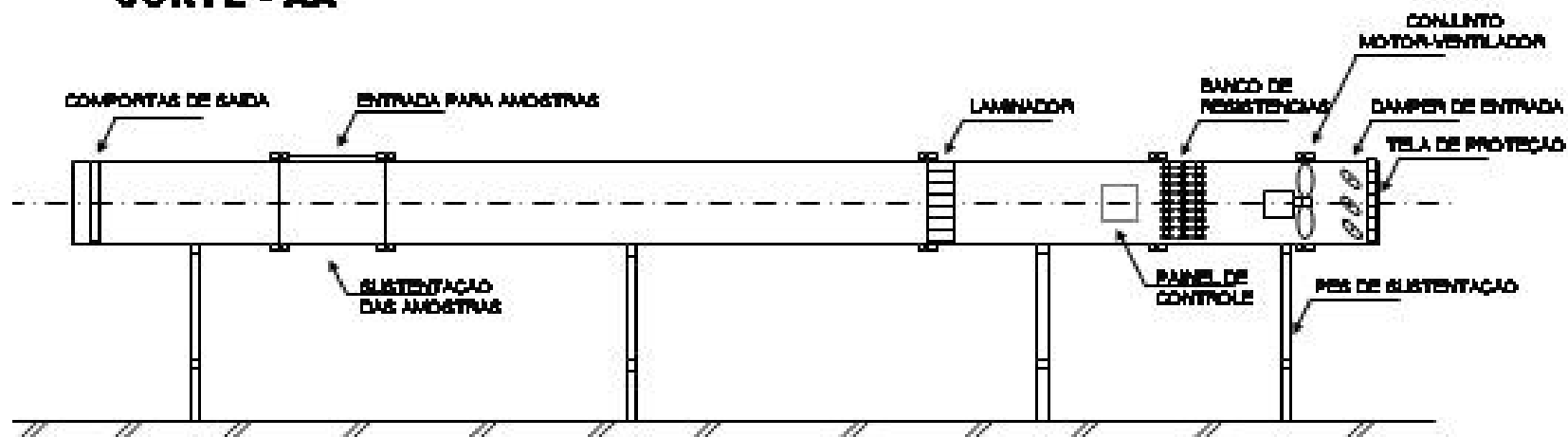
APÊNDICE I



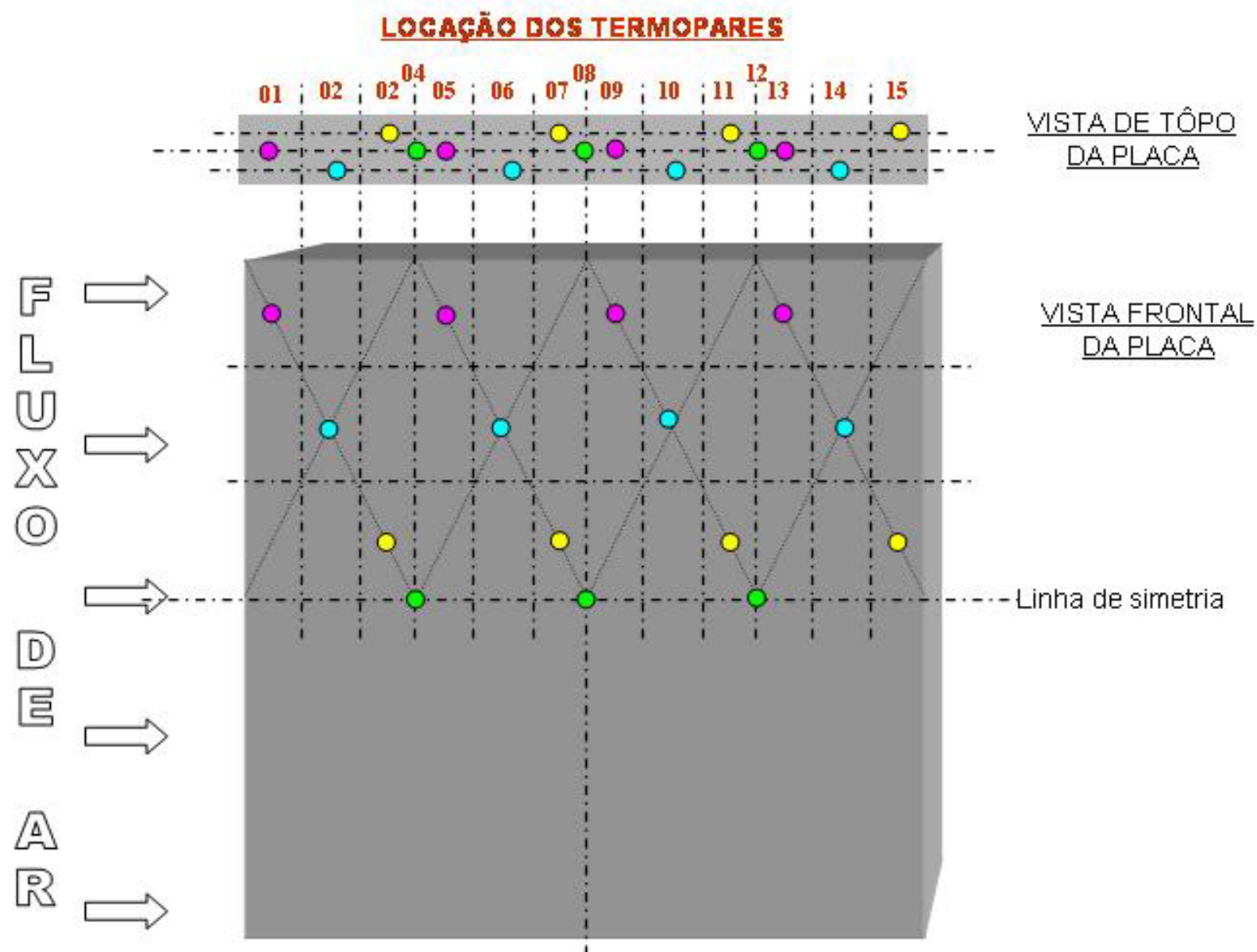
ESC. 1:40



ESC. 1:40

CORTE - AA'

ESC. 1:40



APÊNDICE II

ANÁLISE DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

A análise de incertezas é o procedimento usado para quantificar a validade dos dados experimentais e a sua precisão [Holman(2001)]. Segundo o mesmo Autor, os erros estão sempre presentes, quando são feitas medições experimentais. Além dos enganos grosseiros cometidos pelo experimentador, os erros podem ser de dois tipos. Os fixos (ou sistemáticos) causam medições repetitivas erradas da mesma quantidade para cada tentativa. O erro fixo é o mesmo para cada leitura, e pode ser removido pela calibragem adequada ou pela correção. O erro aleatório (não repetitividade) é diferente para cada leitura e, portanto, não pode ser removido. Os fatores que introduzem o erro aleatório são incertos por sua própria natureza. O objetivo da análise de incerteza é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

Admitimos que o equipamento foi construído corretamente, e que foi calibrado de forma adequada, eliminando os erros fixos. Admitimos que os instrumentos têm resolução apropriada e que as flutuações de leitura não são excessivas. Admitimos também que se toma cuidado ao fazer e registrar observações, de modo que só os erros aleatórios permanecem.

Existem procedimentos para se estabelecer a incerteza de medições experimentais como estas se propagam nos resultados calculados.

Admitindo que R represente um resultado obtido a partir de valores medidos experimentalmente (x_1, x_2, \dots, x_n) tal que $R=R(x_1, x_2, \dots, x_n)$, então a incerteza no resultado devido à propagação das incertezas dos valores medidos poderá ser escrita de acordo com Holman(2001), da seguinte forma;

$$\varepsilon_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \varepsilon_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \varepsilon_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \varepsilon_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, representam as incertezas dos valores medidos, e ε_R a incerteza no valor calculado.

A seguir aplicaremos esta metodologia para determinar a incerteza nos cálculos do Conteúdo de Umidade, Taxa de Secagem e Difusividade.

1. Incerteza no cálculo do conteúdo de Umidade.

$$X(t) = \frac{P(t) - P_{bs}}{P_{bs}} \quad (II.1)$$

Aqui apenas será considerada a incerteza na medida do peso da amostra, $P(t)$,

$$\varepsilon_{X(t)} = \frac{\varepsilon_{P(t)}}{P_{bs}}$$

Como resultado, temos;

$$\varepsilon_{X(t)} = 1,54 \times 10^{-5} \text{ kg/kg}$$

O uso da incerteza na medida do conteúdo de umidade calculado aqui, vale para todos os resultados apresentados neste trabalho.

2. Incerteza no cálculo da Taxa de Secagem.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{X_{i+1} - X_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (\text{II.2})$$

Será considerada a incerteza na medida das umidades, $X_{(i)}$ e $X_{(i+1)}$,

$$\varepsilon_{\frac{\partial X}{\partial t}} = \frac{2\varepsilon_X}{\Delta t}$$

Como resultado, temos;

$$\varepsilon_{\frac{\partial X}{\partial t}} = 3,08 \times 10^{-6} \text{ kg/kg/min}$$

Similar ao caso da incerteza na medida do conteúdo de umidade, o valor da incerteza obtido aqui para a taxa de secagem, vale para todos os resultados da taxa de secagem apresentados neste trabalho.

3. Incerteza no cálculo da Difusividade.

$$D_1 = \frac{4d^2}{t\pi^2} \ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}\right) \quad (\text{II.3})$$

Serão consideradas a incerteza na medida do conteúdo de umidade (X), conteúdo de umidade crítico (X_{cr}) e conteúdo de umidade de equilíbrio (X_{eq}),

$$\varepsilon_{D_1} = \left[\left(-\frac{4d^2}{t\pi^2(X - X_{eq})} \varepsilon_X \right)^2 + \left(\frac{4d^2}{t\pi^2(X_{cr} - X_{eq})} \varepsilon_{X_{cr}} \right)^2 + \left(-\frac{4d^2 \left[-\frac{1}{(X - X_{eq})} + \frac{(X_{cr} - X_{eq})}{(X - X_{eq})^2} \right]}{t\pi^2(X_{cr} - X_{eq})} (X - X_{eq}) \varepsilon_{X_{eq}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

A seguir são mostrados na Tabela II.1, a difusividade e suas respectivas incertezas, para um dos casos estudados neste trabalho de dissertação. Com isto pretende-se apenas mostrar a ordem de grandeza dessas medidas. No gráfico da Figura II.1, pode-se observar a curva da difusividade em função do conteúdo de umidade e os limites, inferior e superior, da sua incerteza.

Tabela II.1 – Difusividade e suas respectivas incertezas.

Tempo (min)	Difusividade (m^2/s^2)	Incerteza (m^2/s^2)	Incerteza (%)
210	7,488E-10	9,488E-11	12,67%
220	1,467E-09	9,569E-11	6,52%
230	2,122E-09	9,725E-11	4,58%
240	2,722E-09	9,959E-11	3,66%
250	3,306E-09	1,027E-10	3,11%
260	3,851E-09	1,067E-10	2,77%
270	4,368E-09	1,116E-10	2,56%
280	4,867E-09	1,175E-10	2,42%
290	5,367E-09	1,246E-10	2,32%
300	5,837E-09	1,330E-10	2,28%
310	6,337E-09	1,428E-10	2,25%
320	6,851E-09	1,540E-10	2,25%
330	7,386E-09	1,669E-10	2,26%
340	7,954E-09	1,816E-10	2,28%
350	8,570E-09	1,978E-10	2,31%
360	9,278E-09	2,163E-10	2,33%
370	1,006E-08	2,351E-10	2,34%
380	1,103E-08	2,557E-10	2,32%
390	1,222E-08	2,787E-10	2,28%
400	1,391E-08	3,058E-10	2,20%
410	1,661E-08	3,339E-10	2,01%

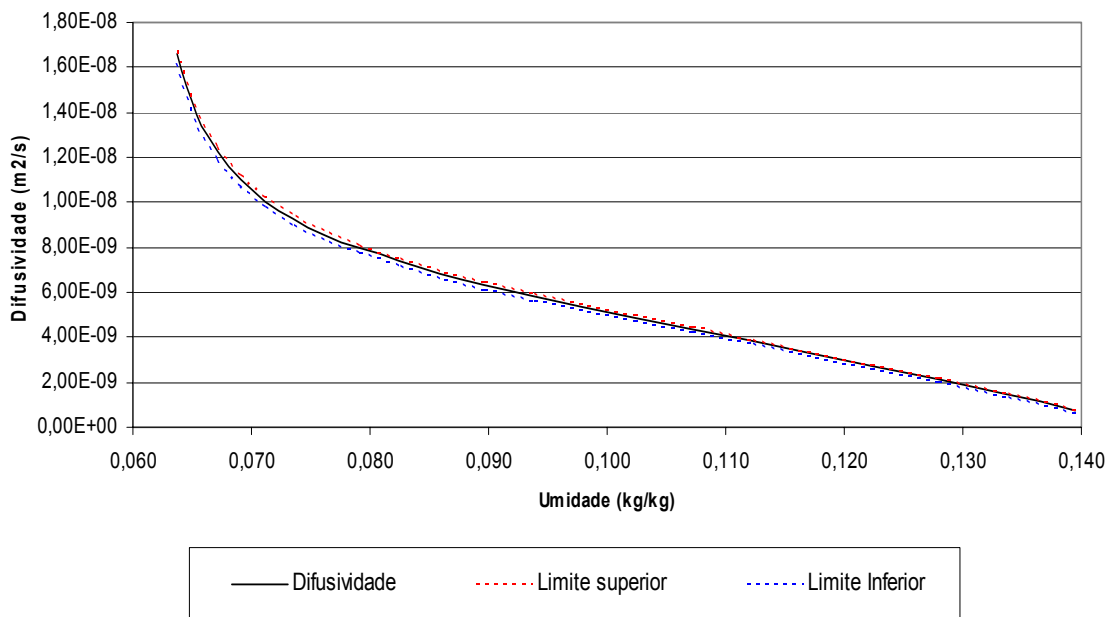


Figura II.1 – Curva padrão da difusividade em função do conteúdo de umidade, incluindo os limites inferior e superior da incerteza.

Analisando os resultados obtidos podemos observar que a máxima incerteza é aproximadamente 12 % para este caso. Cálculos para os outros casos mostram que a ordem de grandeza nas incertezas são similares aqueles mostrados aqui.