

Marcio Chertman

**SECAGEM DE PAPEL PRODUZIDO A PARTIR DO PSEUDOCAULE
DE BANANEIRA**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.**

**São Paulo
2007**

Marcio Chertman

**SECAGEM DE PAPEL PRODUZIDO A PARTIR DO PSEUDOCAULE
DE BANANEIRA**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. José Roberto Simões Moreira**

**São Paulo
2007**

Aos meus pais e aos meus irmãos

Agradecimentos

À Fábrica Fibra Mais do município de Itariri, que desde o início esteve apoiando e continuará participando de implantação do projeto.

À Suzano Papel e Celulose, que disponibilizou o grande acervo bibliotecário permitindo uma pesquisa mais apurada relacionada às propriedades das fibras celulósicas e dos processos de produção de papel.

Ao Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira, pela sua orientação durante todo o decorrer do mestrado.

Ao colega Carlos Eduardo Lopes, pelos esclarecimentos sobre o comportamento das fibras celulósicas na fabricação de papel.

Aos colegas do SISEA, pelas sugestões no desenvolvimento do trabalho realizado.

Índice

Lista de Símbolos	8
Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Resumo	14
Abstract	15
1 Introdução.....	16
1.1 Apresentação e Motivação	16
1.2 Definição do Problema.....	18
1.3 Objetivos.....	20
2 Revisão Bibliográfica e Processos de Produção de Papel	22
2.1 Histórico da Fabricação de Papel.....	22
2.2 Fibras Vegetais.....	24
2.2.1 <i>Musa Cavendishii</i> – Bananeira.....	26
2.3 Processo Industrial de Produção de Papel.....	27
2.3.1 Fragmentação de Madeira (Produção de Cavacos).....	29
2.3.2 Cozimento (Polpação).....	31
2.3.3 Pré-Branqueamento e Branqueamento.....	32
2.3.4 Fabricação do Papel	34
2.3.5 Formação	35
2.3.6 Recuperação de Químicos.....	37
2.3.6.1 Evaporação.....	38
2.3.6.2 Caldeira de Recuperação	38
2.3.6.3 Caustificação	39

2.4 Processo Artesanal.....	41
2.4.1 Descascar e Picar a Madeira	42
2.4.2 Cozimento	42
2.4.3 Branqueamento.....	43
2.4.4 Preparação da Massa	45
2.4.5 Formação da Folha	46
2.4.6 Secagem	47
2.4.7 Fonte Energética Utilizada na Produção da Fibra Mais	48
3 Teoria de Secagem de Fibras e Papel	50
3.1 Estágios de Secagem.....	50
3.2 Movimento dos Fluidos no Interior dos Materiais Fibrosos	53
3.2.1 Mecanismo de Difusão.....	53
3.2.2 Mecanismo de Capilaridade	53
3.2.3 Adsorção e Dessorção	54
3.3 Transferência de Calor e Massa durante a Secagem.....	56
3.3.1 Influência da Camada Limite	58
3.3.2 Características do Escoamento.....	59
3.3.3 Adimensionalização na Convecção Livre	63
3.4 Relação entre os Adimensionais	65
3.5 Secagem de Folhas Úmidas.....	67
4 Análise do Processo de Secagem Artesanal e Propostas de Melhorias	70
4.1 Alteração no Processo de Cozimento.....	70
4.2 Remoção Mecânica de Água.....	71
4.3 Proposta de Mudança da Estufa.....	71
4.4 Cálculos da Taxa de Secagem	75
4.4.1 Condições Ambientais.....	76
4.4.2 Seqüência de Cálculo	76
4.4.3 Limites de cada Etapa do Processo de Secagem	91
4.5 Consumo de Madeira.....	94

4.6 Resultados.....	96
4.6.1 Estimativa dos custos de implantação	96
4.6.2 Retorno do Investimento	97
5 Considerações Finais e Discussão sobre os Resultados	98
6 Referências Bibliográficas	104

Lista de Símbolos

A	área superficial [m ²]
c_p	Calor específico à pressão constante [J/kg.K]
c_{pu}	Calor específico do ar úmido à pressão constante [J/kg.K]
$C_{v,sup}$	Concentração de vapor na superfície [kmol/m ³]
$C_{v,\infty}$	Concentração de vapor no ambiente [kmol/m ³]
D	Coeficiente de difusão [m ² /s]
$F_{i,j}$	Fator de forma de radiação térmica
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Coeficiente de transferência de calor [W/m ² .K]
h_m	Coeficiente de transferência de massa [m/s]
h_s	Entalpia específica do ar saturado na superfície [kJ/kg de ar seco]
h_{ar}	Entalpia específica do ar [kJ/kg de ar seco]
$h_{l,v}$	Entalpia de vaporização [J/kg]
k	Condutividade térmica [W/m.K]
K_l	Coeficiente de perda de carga localizada
K_d	Coeficiente de perda de carga distribuída
L	Comprimento do corpo [m]
m	Massa [kg]
\dot{m}_v	Taxa de massa de água evaporada [kg/s]
\dot{m}_{ar}	Taxa de massa de ar seco [kg/s]
M	Massa molar [kg/kmol]
\dot{M}_{mad}	Taxa de queima de madeira [kg/s]

N''	Fluxo de massa [kmol/s.m ²]
P	Pressão [N/m ²]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
q_{rad}	Calor transferido por radiação [W]
q_{conv}	Calor transferido por convecção [W]
\dot{Q}	Calor trocado [W]
r	Raio de curvatura [m]
R	Constante universal dos gases [J/kmol.K]
T_{sup}	Temperatura da superfície do material fibroso [K]
T_{∞}	Temperatura no ambiente [K]
u	velocidade no eixo paralelo à folha [m/s]
v	velocidade no eixo perpendicular à folha [m/s]
V_{∞}	Velocidade “ao longe” [m/s]
x	Coordenada de posição [m]
\bar{X}'	Teor de umidade do material fibroso [kg de água / kg de sólido seco]
y	Coordenada de posição [m]
Re	Número de Reynolds – Razão entre as forças de inércia e as forças viscosas.
Nu	Número de Nusselt – Gradiente de temperatura adimensional na superfície
Sc	Número de Schmidt – Razão entre as difusividades de momento e mássica
Pr	Número de Prandtl – Razão entre as difusividades de momento e térmica
Sh	Número de Sherwood – Gradiente de concentração adimensional na superfície

- Le Número de Lewis – Razão entre as difusividades térmica e mássica
- Bi_m Número de Biot para transferência de massa – Razão entre a resistência interna à transferência de massa de uma espécie e a resistência à transferência de massa desta mesma espécie na camada limite.
- Ra_L Número de Rayleigh – Produto dos números de Grashof e de Prandtl.
- Gr Número de Grashof – Razão entre o empuxo e as forças viscosas.

Símbolos gregos

- α Difusividade térmica [m^2/s]
- β Compressibilidade do fluido [K^{-1}]
- ε Emissividade
- θ Temperatura adimensional
- γ Tensão superficial [N/m]
- μ Viscosidade dinâmica [$N.s/m^2$]
- ν Viscosidade cinética [m^2/s]
- ρ Densidade do fluido [kg/m^3]
- ν Difusividade mássica [m^2/s]
- ω Umidade absoluta [kg de água / kg de ar seco]
- σ Coeficiente de Stephan-Boltzmann [$W/m^2.K^4$]

Símbolos com * se referem às formas adimensionais das variáveis.

Lista de Figuras

Figura.....	página
1.1 Processo de cozimento utilizado atualmente na fábrica de Itariri	19
1.2 Processo de secagem utilizado atualmente na fábrica de Itariri	20
2.1 Rota do Papel	23
2.2 Desenho esquemático com as principais substâncias da composição orgânica da madeira	26
2.3 Partes da Bananeira, <i>Musa Cavendishii</i>	27
2.4 Descascador de toras de madeira	29
2.5 Fluxograma do pátio de madeira de um processo industrial	30
2.6 Peneira de seleção de cavacos	30
2.7 Digestor industrial	32
2.8 Fluxograma do pré-branqueamento e branqueamento	33
2.9 (a) Fibra de celulose não refinada	34
2.9 (b) Fibra de celulose refinada	34
2.10 Região de formação e prensas	36
2.11 Região de secagem, banho de amido e finalização do processo	37
2.12 Fluxo esquematizado da caldeira de recuperação	38
2.13 Ciclo de recuperação de químicos	40
2.14 Árvore de bananeira ao lado do pseudocaule de outra árvore já cortada	41
2.15 (a)Foto do método artesanal para picar a madeira	42
2.15 (b)Gravura representando o método antigo com o qual se picava a madeira	42
2.16 (a)Gravura representando o método antigo com o qual se cozia a madeira	43
2.16 (b)Foto do método artesanal para o cozimento de madeira em tambores	43
2.17 Figura esquemática da quebra da molécula de lignina pela ação dos compostos de cloro	44
2.18 “Liquidificador” de mistura da massa com os agentes de branqueamento	

(a) Vista superior	45
(b) Vista frontal	45
2.19 Tanque de massa / polpa	45
2.20 (a) Gravura representando o método antigo de formação da folha de papel	46
2.20 (b) Foto do método artesanal de formação da folha de papel	46
2.21 Foto da prensa disponível na Fábrica de Itariri.....	47
2.22 (a) Gravura sobre o método histórico de secagem.....	47
2.22 (b) Foto do processo de secagem artesanal de secagem em Itariri	47
3.1 (a) Teor de umidade do material fibroso em função do tempo durante a secagem	51
3.1 (b) Taxa de secagem em função do teor de umidade do material fibroso	51
3.2 Efeito da histerese relativa à adsorção e dessorção dos materiais fibrosos....	55
3.3 Relação entre a umidade e a estrutura fibrosa	56
3.4 Volume de controle com transferência de calor sensível e latente simultaneamente	68
4.1 Vista em perspectiva do secador.....	72
4.2 Configuração do funcionamento da câmara de secagem.....	73
4.3 Vista superior da câmara de secagem	74
4.4 Vista lateral da câmara de secagem.....	75
4.5 Superfície de controle entre as folhas de papel.....	75
4.6 Fluxograma com a seqüência de cálculos para o processo de secagem.....	77
4.7 Entrada de ar na câmara de secagem.....	79
4.8 Curva de perda de carga para a saída de ar	80
4.9 Fluxograma com a seqüência de cálculos para o processo de secagem.....	82
4.10 Diagrama de fator de forma para duas paredes perpendiculares.....	88
4.11 Diagrama de fator de forma para duas superfícies paralelas	88
4.12 Curvas de umidade de equilíbrio para vários materiais	92

Lista de Tabelas

Tabela	página
3.1 Constantes das equações adimensionais	67
4.1 Resultados do processo iterativo dos cálculos de fluxo e transferência de calor..	83
4.2 Resultados corrigidos para os cálculos de fluxo e transferência	90
5.1 Tempo de secagem em função da umidade relativa	100

Resumo

O descarte do pseudocaule da bananeira após a retirada do fruto é uma prática constante que tem como objetivo evitar a propagação da *Cosmopolites Sordidus* (popularmente conhecido como broca), que é um inseto que se prolifera em regiões com abundância deste tipo de cultivo. O Brasil, terceiro maior produtor mundial de bananas, é responsável pelo descarte de milhões de toneladas por ano de pseudocaules.

Dentre as várias possibilidades de utilização deste material de descarte, algumas comunidades como a da Região de Itariri, litoral sul de São Paulo, estão aproveitando o pseudocaule para a fabricação artesanal de papeis especiais. No entanto as limitações inerentes às comunidades carentes, a escassez de recursos energéticos e as restrições ambientais são obstáculos às possibilidades de crescimento de suas produções.

O conhecimento dos processos utilizados pelas grandes indústrias de papel e celulose, associado ao estudo das condições específicas da fábrica artesanal de Itariri pode fornecer subsídios e alternativas aplicáveis aos processos artesanais.

Um estudo dos processos de transferência de calor e massa para os casos aqui propostos fornece uma estimativa para o desempenho da produtividade da fábrica artesanal estudada, mais precisamente o desempenho da secagem, que é o ponto crítico (gargalo) do processo de fabricação artesanal. No processo atual, os fabricantes locais dependem das condições climáticas, principalmente da irradiação solar, para a secagem.

Ao final do trabalho é proposto um processo alternativo de secagem do papel empregando os cálculos aqui desenvolvidos, que visa minimizar o consumo energético e a diminuição da dependência das condições climáticas.

Abstract

The discharging of the banana tree's pseudostalk after the withdrawal of the fruit is one practical measure that has as the main objective of preventing the propagation of the *Cosmopolites Sordidus* (popularly known as broca, which means drill), which is an insect that proliferates in regions with abundance of this type of plantation. Brazil, third world-wide producer of bananas, is responsible for the discharging of millions of metric tons per year of pseudostalk.

Among several possibilities for using the discharging material, some communities, as the one from Itariri's area, São Paulo's southern coast, are using the pseudostalk for special paper sheets. However the inherent limitations of the needy communities, as the local shortage of energy resources and restrictive environment rules are the main hurdles to the possibilities of local paper productions growth.

The knowledge of processes used by the pulp and paper industries, associated with the study of specific conditions of the small artisan production of Itariri, can provide subsidies and results in alternatives to the artisan processes.

A fundamental study of heat and mass transport for the cases considered here can provide an estimative of the performance of the productivity of the studied case. The work is focused on the papersheets drying process performance, which is the critical stage in the process of artisan manufacture. In the current process, the local manufacturers depend on the climatic conditions for the drying, mainly the solar irradiation.

In the end of this work, an alternative process for the paper drying is proposed using the calculation procedure here developed, having the aim at reducing the energy consumption and eliminating the climatic conditions dependence.

1 Introdução

1.1 Apresentação e Motivação

A atual escala produtiva da banana faz desta fruta uma das mais importantes do mundo, tanto do ponto de vista nutricional como do ponto de vista econômico. Superando a cifra dos 4,2 bilhões de dólares nas exportações mundiais sem considerar seus produtos derivados, a banana apresenta grande relevância social e econômica, servindo como fonte de renda a muitas famílias de agricultores, gerando postos de trabalho nas comunidades onde é cultivada e servindo muitas vezes como principal alternativa ao desenvolvimento destas regiões.

Com uma produção atual aproximada de 6,4 milhões de toneladas ao ano, o Brasil é o terceiro maior produtor de banana sendo responsável por 8,9% da produção mundial e o décimo sexto maior exportador com 0,7% do total exportado no mundo. Do total produzido no Brasil, 98% destina-se ao mercado interno para comercialização da fruta *in natura* e para fins industriais (FAO - Food and Agriculture Organization, 2001).

São Paulo é o maior produtor de bananas do país, onde a grande concentração da produção se encontra na Divisão Regional Agrícola do município de Registro, que compreende as áreas abrangidas pelo Vale do Ribeira e pelo litoral sul do estado. A espécie mais difundida em São Paulo é a "*Musa Cavendishii*", cultivares nanica e nanicão.

As espécies de bananas cultivadas no Brasil levam cerca de 18 meses para atingir o ponto de corte. Por não gerar frutos mais que uma vez, após a retirada dos cachos, grande parte da bananeira deve ser cortada e cerca de 50 cm do pseudocaule é deixado para servir de nutrientes para os brotos em desenvolvimento. No entanto, todo material descartado e o pseudocaule remanescente devem ser retirados do local de cultivo antes de apodrecerem, pois sua permanência propicia a proliferação da *Cosmopolites sordidus* (popularmente

conhecido como broca), que é um inseto que se alimenta dos restos das bananeiras, podendo devorar o plantio, caso se prolifere.

Por ser um dos maiores produtores mundiais de banana, o Brasil também possui uma quantidade de material descartado que vem sendo objeto de estudos em um grande número de pesquisas dirigidas ao aproveitamento destes restos. Além da queima para geração de calor e artesanatos, o pseudocaule da bananeira hoje é apresentado como uma matéria prima tecnicamente viável para a produção de polpa celulósica e fabricação de papel. Esta alternativa vem sendo aproveitada por uma fábrica artesanal do município de Itariri, FIBRA MAIS ITARIRI, que em função do desconhecimento teórico em relação aos processos envolvidos na fabricação de papel e das limitações dos mais variados recursos, encontra algumas dificuldades em sua produção, sendo o mais crítico na parte de secagem.

Itariri é o município de menor renda *per capita* do Vale do Ribeira, litoral Sul de São Paulo, o que se deve inicialmente a fatores histórico. A não vocação de seu solo para cafeicultura fez com que durante o ciclo do café ocorresse uma grande evasão dos principais investimentos e incentivos a esta região. No entanto, as condições do clima e do solo fornecem condições muito favoráveis ao plantio de bananeira, que juntamente com os derivados desta cultura, é a principal fonte de geração renda desta região, cujo valor *per capita* é de R\$ 239,88 de acordo com os estudos feitos pelo IBGE/PNUD/IPEA (2003).

Após a colheita, grande parte do tronco deve ser retirada do solo, pois sua permanência no local propicia o aparecimento de pragas que devoram o plantio. Este descarte gerou uma abundância de material orgânico fibroso que pode ser aproveitado de várias maneiras, como fonte para a geração de energia térmica, artesanatos e polpa para a fabricação de papel.

Por ser um vegetal de fibra longa, com comprimento médio de 4 mm e largura média de 40 μm (Rojas, 1996), o tronco da bananeira permite a fabricação de um

papel bem resistente ao rasgo, se comparado aos papéis de imprimir e escrever produzidos em escalas industriais. Nesta região, existe uma pequena fábrica de papel que utiliza métodos absolutamente artesanais e desprovidos de qualquer recurso tecnológico moderno. O conhecimento empregado nesta atividade tem sido passado de geração a geração, e são ocasionalmente aprimorados pelas visitas de acadêmicos e profissionais das áreas de Engenharia florestal e ambiental, Agronomia e Biologia, estimulados pelo interesse que o produto fabricado e as peculiaridades do processo produtivo nesta região despertam.

O produto acabado não possui a mesma homogeneidade característica das produções em escalas industriais, mas a rusticidade deste tipo de papel e o apelo ecológico do método produtivo se mostram bem atraentes a públicos específicos, formados por “designers”, artistas plásticos e produtores de abajures e papel de parede. Esta atratividade vem propiciando o crescimento da demanda por este produto, que encontra na região de Itariri, um dos únicos fornecedores no Brasil. Com o aumento da procura por este papel, o método simples e artesanal vem encontrando sérias limitações ao aumento de produtividade.

1.2 Definição do Problema

Atualmente a produtividade média da fábrica de Itariri é de aproximadamente 5000 folhas de 40x60 cm ao mês, com gramaturas variadas, apresentando um valor médio de 101,16 g/m² e desvio padrão de 40,27 g/m² (Os dados relacionados à gramatura foram obtidos através de análises realizadas no laboratório de controle de qualidade da Suzano Papel e Celulose. Para esta análise, foi utilizada uma amostragem contendo dez folhas cortadas nas dimensões de 10 cm x 10 cm, submetidas ao processo de secagem em estufas laboratoriais e finalmente pesadas em balanças de precisão). Esta quantidade, no entanto, está aquém da demanda atual pelos produtos desta fábrica. Os gargalos atuais e potenciais do processo que limitam esta produtividade são as etapas de secagem e cozimento das fibras respectivamente.

Cozimento

O cozimento é realizado em tambores abertos de 200 litros com grande perda de calor, como representado na figura 1.1. Este processo tem a duração em torno de 5 horas, com a obtenção de uma polpa suficiente para a fabricação média de 150 folhas no formato padrão desta fábrica. A frequência de cozimento é de um ciclo ao dia. Em períodos de maior demanda, podem ser realizados até dois ciclos de cozimento (aproximadamente 9 horas), ou seja, em determinados períodos esta etapa chega ao limite da capacidade produtiva, se estabelecendo como um “gargalo em potencial”. A configuração atual do cozimento não representa um fator limitante estabelecido para o processo produtivo da fábrica, no entanto, a forma na qual esta etapa se desenvolve é responsável por um grande desperdício de energia térmica.

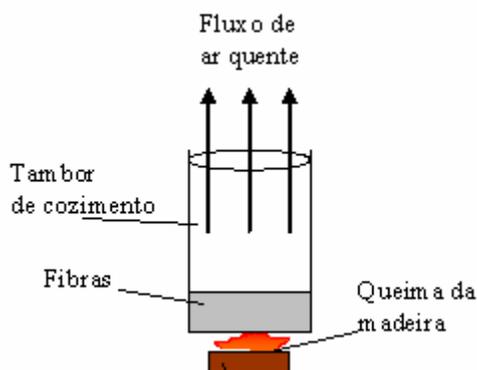


Figura 1.1-Processo de cozimento utilizado atualmente na fábrica de Itariri.

Secagem

A etapa de secagem é suscetível às condições ambientais. Apesar da alta umidade ambiente representar um fator desfavorável ao processo, as correntes de vento da região associadas à irradiação solar são determinantes no processo de secagem. Ainda assim, as demais etapas do processo trabalham apenas em

determinados períodos, aguardando a disponibilidade de espaço para as telas com a polpa a ser seca. Em dias ensolarados, a secagem tem uma duração média de quatro a seis horas. Na figura 1.2 é representado o processo de secagem utilizado atualmente na fábrica de Itariri.

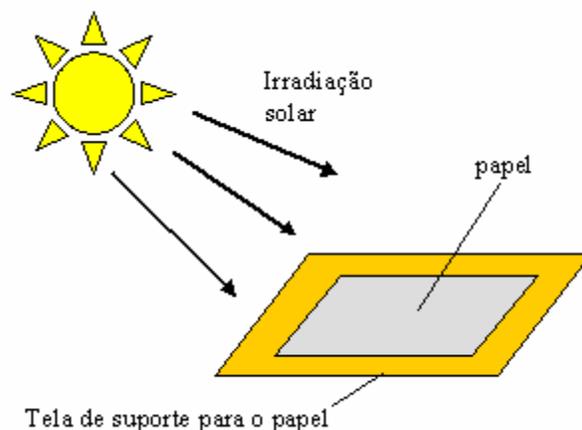


Figura 1.2 – Processo de secagem utilizado atualmente pela fábrica de Itariri

Nos dias em que as condições climáticas são menos favoráveis, uma estufa é utilizada, na qual os períodos de secagem chegam a ultrapassar o intervalo de nove horas. Entre os diversos problemas encontrados nesta estufa, há o da não renovação do ar, de modo que este processo de secagem ocorre muito próximo do ponto de saturação do ar.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o estudo do processo de secagem de materiais fibrosos com vistas a propor um novo sistema de secagem de papel produzido a partir da fibra do tronco de bananeira para a fábrica *Fibra Mais Itariri*, localizada no município de Itariri, adaptando o conhecimento obtido na indústria de papel aos procedimentos artesanais aplicados nesta fábrica, aumentando assim sua produtividade. Para atingir esses objetivos foram realizados os seguintes estudos:

- Revisão bibliográfica referente às operações de secagem de materiais fibrosos.
- Revisão dos processos industriais e artesanais de fabricação de papel
- Levantamento das propriedades físicas e químicas da madeira proveniente do pseudocaulo de bananeira para o melhor ajuste das curvas de secagem e obter uma estimativa do número de Biot para a transferência de massa a fim de se estabelecer os limites de secagem.
- Levantamento dos materiais e equipamentos que auxiliem a construção de um secador artesanal eficiente.

Como resultado deste estudo, propõe-se um novo sistema de secagem a partir da combustão de material orgânico, por convecção natural em estufas artesanais. O dimensionamento térmico da estufa foi realizado considerando o processo de secagem envolvido. Cálculos de transferência de calor e massa indicaram as condições de mínimo consumo energético, respeitando as limitações das condições do local. Ao final, é apresentado o arranjo da estufa proposta.

2 Revisão Bibliográfica e Processos de Produção de Papel

2.1 Histórico da Fabricação de Papel

Desde os tempos mais remotos, o homem vem utilizando os desenhos como a forma mais simples de representar objetos e acontecimentos que faziam parte do seu dia a dia. Esta atividade que teve seus primeiros registros nas paredes das cavernas e nas pedras e foi evoluindo para representações mais complexas que permitiam a comunicação, transmissão de idéias e o retrato dos hábitos e culturas da época. Com o uso de símbolos, ficou evidente a evolução da inteligência humana, e o crescente domínio na confecção de instrumentos fez com que o homem passasse a utilizar novas formas de suportes para suas representações, que permitissem trabalhos mais refinados e pudessem ser conservados e transportados.

O desenvolvimento do suporte para as representações gráficas e posteriormente para a escrita passou por vários estágios. O uso de tabletes de barro cozido na antiga região da Babilônia foi uma das primeiras tentativas na procura de um suporte diferente das paredes das cavernas e pedras.

Um suporte mais avançado que estes tabletes foi encontrado no Egito. Feito a partir de fibras extraídas dos caules das plantas da família das Ciperáceas, localizadas às margens do Nilo, o Papiro tem sua origem por volta de 3000 a.C. Este material era produzido a partir da superposição de películas destes caules com os sentidos de fibra cruzados, para assim se tornar resistente.

Já de origem animal, datam de 2000 a.C. as primeiras formas de pergaminhos, que evoluíram para películas mais delgadas e bem acabadas. Mas é por volta de 105 a.C., que tem início a produção de papel a partir da polpação de fibras vegetais, semelhante ao processo que temos hoje.

Atribuída ao chinês Ts'ai Lun, um alto funcionário da corte do imperador Chien-Ch'u, da dinastia Han (206 A.C. a 202 D.C.), esta nova fórmula de fabricação de suporte para a o desenho de signos caligráficos utilizava como fonte de matéria prima o cânhamo e o bambu. Como os chineses já dispunham da técnica secular de “bater” o cânhamo para a produzir o haxixe, o emprego da técnica da maceração no preparo da polpa foi imediato, o que somado aos processos de tratamento e amaciamento de fibras, deu origem ao papel.

O papel teve suas primeiras aplicações na forma de suporte dos mantras pelos monges budistas, e pelos militares, que através de envio de mensagens poderiam obter vantagens estratégicas em guerras. Esta invenção, que logo passou a ser considerada uma especiaria, só ultrapassou as fronteiras do império chinês com a captura, pelos árabes, de artesãos chineses, e desta forma o conhecimento sobre a manufatura do papel acompanhou a expansão muçulmana pela costa norte da África e Península Ibérica e a partir daí se disseminando por toda a Europa.

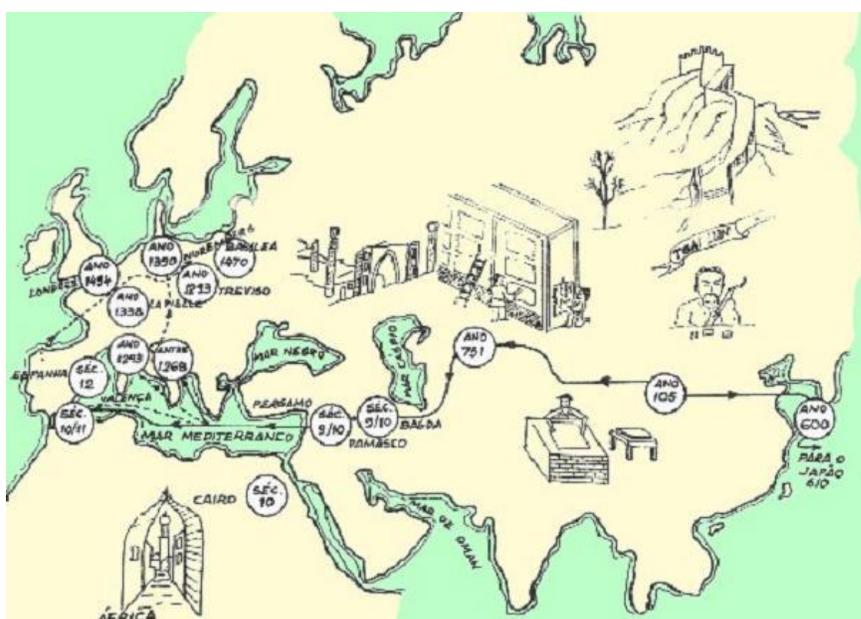


Figura 2.1 – Rota do papel. (Cedran, 1997).

A fragilidade do papel quando comparado ao pergaminho e a proscrição de seu uso como sendo específico para documentos oficiais de soberanos e autoridades

religiosas tornaram um pouco lenta a expansão do papel nos países do ocidente até o século XIII. Porém, com a introdução de rodas d'água para o acionamento dos martelos batedores responsáveis pela maceração das fibras, algumas fábricas da região de Toledo, na Espanha, passaram a produzir e exportar um papel mais resistente, o que ocasionou a disseminação do processo produtivo por toda a Europa, até que em 1797 surgiu a primeira máquina de fabricação de papel. A figura 2.1 apresenta de forma esquemática as rotas de expansão do papel ao longo do tempo e espaço.

Até os dias de hoje, a polpação de fibras vegetais é o método mais comum e difundido na confecção de papel e a principal diferença entre os processos artesanais e industriais de hoje está na tecnologia e aditivos aplicados nesta polpação.

Atualmente no Brasil existem milhares de fábricas de papel que trabalham de forma artesanal, atendem a mercados bem específicos e na maioria das vezes tem um papel social e econômico importante nas comunidades onde atuam.

2.2 Fibras Vegetais

A madeira é um material lignocelulósico. Essa classificação se deve ao fato das paredes celulares de suas fibras serem compostas por celulose, hemicelulose, lignina e constituintes menores.

A celulose, que corresponde a aproximadamente 50% da composição química *média* do material orgânico da madeira, é o principal componente da parede celular das fibras. Ela é um polissacarídeo linear composto por um único tipo de monômero, ou unidade de açúcar, que é a D-Glucose (O prefixo D se refere à característica dextrógira da molécula).

As hemiceluloses são polissacarídeos ramificados de cadeias curtas e baixa massa molecular, compostas por vários tipos de unidades de açúcar. Ela

corresponde a aproximadamente 20% da matéria orgânica da madeira e diferentemente da celulose, que é caracterizada por um único tipo de monossacarídeo, o termo hemicelulose refere-se não a um composto químico e sim a uma classe de polímeros com composições distintas, sendo que em cada qual temos no mínimo dois tipos de unidades de açúcar.

A lignina (que pode variar de 10 a 35%) é um polímero com composição química complexa. É a substância que confere rigidez às paredes das células dos vegetais agindo como agente de ligação entre elas, gerando uma estrutura resistente a impactos, compressões e dobras. As ligninas estão sempre associadas às hemiceluloses, não apenas através de interação física, como também de ligações covalentes. Suas características ópticas e mecânicas são prejudiciais à fabricação de um papel mais branco e flexível.

Os constituintes menores, que podem chegar a 10% da composição química da madeira, englobam substâncias orgânicas e inorgânicas responsáveis por algumas características das plantas, como cor, cheiro, sabor e que dependem da idade da planta e localização geográfica.

O processo de preparação da matéria-prima para a fabricação de papel consiste na quebra das forças inter moleculares da madeira, possibilitando a formação de uma pasta fibrosa que, se separado a lignina, teremos a pasta celulósica, o que dará origem ao papel.

A figura 2.2 apresenta de forma esquemática a estrutura da madeira com os principais compostos orgânicos que dela fazem parte: A Celulose, Lignina e Hemicelulose.

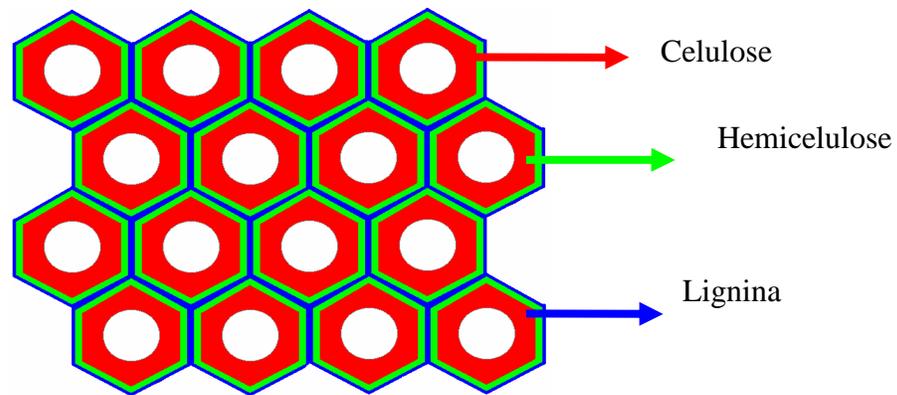


Figura 2.2 – Desenho esquemático com as principais substâncias da composição orgânica da madeira. (SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

2.2.1 *Musa Cavendishii* - Bananeira

A matéria prima utilizada na fábrica artesanal de Itariri é proveniente da *Musa Cavendishii*, cultivares nanica e nanicão, que é a espécie de bananeira cultivada na região. A utilização desta espécie para a produção de papel se deve única e exclusivamente pela abundância de material disponibilizado como subproduto do plantio de banana. O grande teor de umidade presente na *Musa Cavendishii*, faz desta espécie uma matéria prima com baixa produtividade de polpa em relação à massa de produto *In Natura*. As fibras provenientes das diversas partes da bananeira foram estudadas em diversas ocasiões. Cada parte apresenta suas características distintas. Rojas (1996) encontrou nas fibras da ráquis de bananeira, um material com boa flexibilidade, superfície de contato excelente para a união fibra-fibra e comprimento médio de 3,6 mm. Para as fibras obtidas do pseudocaule de bananeira, o valor médio encontrado foi de 4,0 mm, enquanto na bainha foliar foram encontrados valores de até 5 mm de comprimento.

Para o teor de umidade, Coelho (2001) encontrou no pseudocaule valores que chegaram a 92,60%. Em relação à composição química, Rojas encontrou teor de celulose de 53,5% em base seca no Ráquis e 62,7% em base seca no

pseudocaule, além do baixo teor de lignina (12,7%-base seca) neste último, concluindo assim que dentre outras variedades, esta é a mais recomendável para a produção de polpa celulósica. A figura 2.3 apresenta de forma esquemática as principais estruturas que formam a *Musa Cavendishii*.

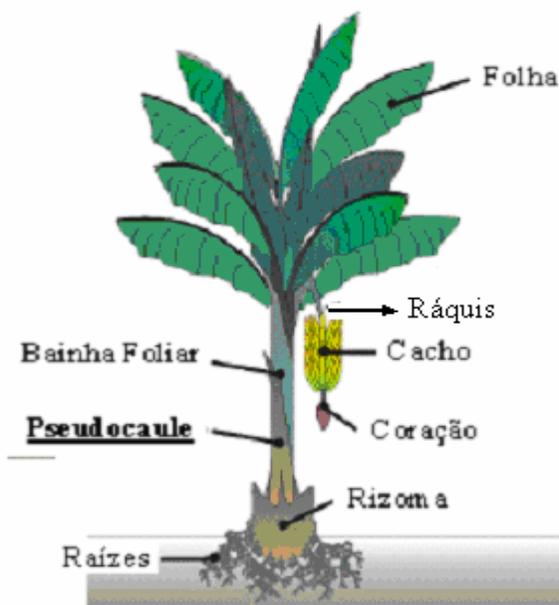


Figura 2.3 – Partes da bananeira, *Musa Cavendishii*.
(SOFFNER, 2001).

2.3 Processo industrial de produção de papel

O método de obtenção de celulose e fabricação de papel segue o mesmo processo desde os primórdios da produção até os dias de hoje, sendo que cada tipo de produção se destaca apenas pelos equipamentos e aditivos empregados. No Brasil, o grande desenvolvimento no processo produtivo em escala industrial teve como foco os papéis de imprimir e escrever, revestidos, papelcartão, papel *Kraft* e papelão ondulado utilizando como matéria-prima as fibras celulósicas de Pinus e Eucalipto.

Nestes processos em escala industrial, as sementes são rigidamente selecionadas, de modo que se obtenha cada vez mais a evolução na qualidade

das fibras e a redução do tempo necessário para o primeiro corte. As espécies que apresentam melhor adaptação às condições climáticas e índices de produtividade mais elevados têm seu material genético clonado. As grandes empresas do setor de celulose trabalham com um percentual de mudas clonadas superior a 70% da base florestal, além de cruzarem constantemente os materiais genéticos dos diversos gêneros de mesma espécie. Atualmente no Brasil, o primeiro corte do Eucalipto ocorre com 7 anos após o plantio, enquanto do Pinus ocorre com aproximadamente 12 anos. Estes números representam uma vantagem competitiva muito grande quando comparados aos dos países europeus e da América do Norte, motivo pelo qual, diversas empresas provenientes destes países têm interesse em adquirir terras no Brasil.

Por possuir uma grande quantidade de água, resinas e extrativos, após o corte, a madeira deve ficar exposta ao ambiente por um tempo para que fique mais seca e livre das substâncias naturais que podem influenciar o processo produtivo. Os processos de extração de celulose e fabricação de papel seguem basicamente os seguintes passos:

- Descascar e picar a madeira,
- Cozimento,
- Lavagem e branqueamento,
- Preparação da massa,
- Formação,
- Prensagem,
- Secagem,

As sub-seções seguintes descrevem cada um desses processos.

2.3.1 Fragmentação da Madeira (produção de Cavacos):

O início do manuseio da matéria-prima para a extração da celulose consiste no descascamento da madeira. Quando este processo é realizado no próprio local da colheita, as cascas são deixadas no próprio local para adubar naturalmente o solo. Quando o descascamento é feito na planta industrial, as cascas são dirigidas a uma caldeira de biomassa. O descascamento ocorre dentro de tambores rotatórios. O movimento de rotação destes tambores provoca o contato entre as toras e o contato destas com a parede do cilindro. O atrito existente nestes contatos é responsável pelo descascamento da madeira. A figura 2.4 apresenta a ilustração de um cilindro descascador:

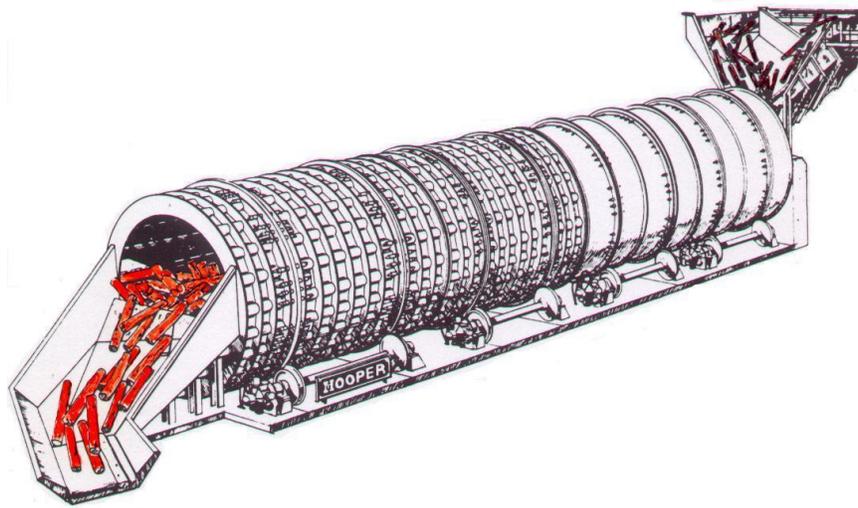


Figura 2.4- Descascador de toras de madeira.

(SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

A toras descascadas são picadas para que sejam reduzidas a fragmentos (cavacos) aumentando a área superficial que entrará em contato com os licores de cozimento na etapa seguinte. A regularidade no tamanho dos cavacos é essencial para que o cozimento seja feito da forma mais uniforme possível.

Na figura 2.5 é possível observar o fluxograma padrão do pátio de madeira das plantas de extração de celulose, no qual deve ser observado que depois de

descascadas, as toras devem ser umedecidas para que se evite a possibilidade de incêndios devido aos intensos atritos no picador e se retire qualquer corpo estranho que tenha ficado na madeira.

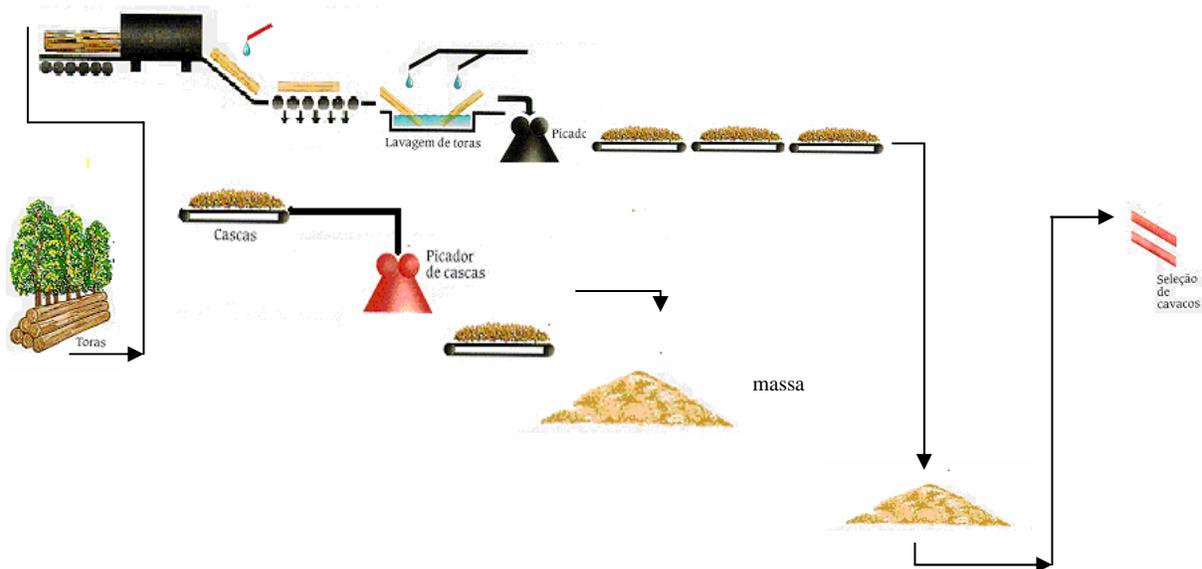


Figura 2.5- Fluxograma do pátio de madeira de um processo industrial.
(SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

No final deste processo os cavacos são classificados em peneiras de seleção como o apresentado esquematicamente na figura 2.6. Os cavacos que possuem dimensões inferiores aos valores especificados são dirigidos às caldeiras de biomassa, enquanto os que apresentam dimensões superiores voltam ao picador.

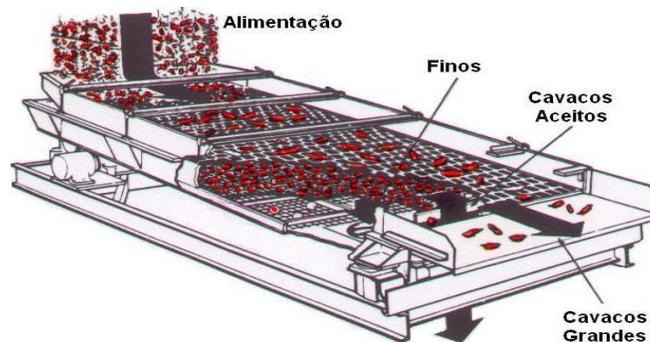


Figura 2.6- Peneira de seleção de cavacos.
(SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

2.3.2 Cozimento (Polpação)

A madeira é uma matéria-prima formada por fibras em múltiplas camadas, ligadas entre si por forças de contato interfibrilares e pela lignina. O processo de polpação consiste na separação das fibras através da remoção da lignina pelo ataque da soda cáustica (NaOH) que é a principal substância do licor de cozimento (licor branco). No entanto, o efeito destrutivo do hidróxido pode prejudicar também a própria fibra de celulose. Para evitar os possíveis danos às fibras, é adicionado na composição do licor de cozimento o sulfeto de sódio (Na₂S) que evita a quebra das moléculas de celulose. Outro importante componente do licor de cozimento é a antraquinona, que é uma substância orgânica de cadeia cíclica que além de catalisadora das reações de polpação, reage com os compostos de enxofre resultantes deste processo evitando o lançamento de poluentes na atmosfera.

A figura 2.7 apresenta o sistema de digestão / polpação, no qual os cavacos entram em um vaso com vapor a alta pressão (vaso de impregnação) para serem pré-aquecidos e em seguida dirigidos ao digestor, onde o cozimento ocorre. O produto resultante do cozimento é a polpa de celulose escura, pois a lignina remanescente adquire esta coloração quando exposta a altas temperaturas. O rejeito do cozimento é o licor negro, que por possuir grande quantidade de material orgânico e substâncias prejudiciais ao ambiente, deve ser submetido a um processo químico, que além de recuperar a soda cáustica, o sulfeto de sódio e outros compostos, permite a utilização de seu potencial energético.

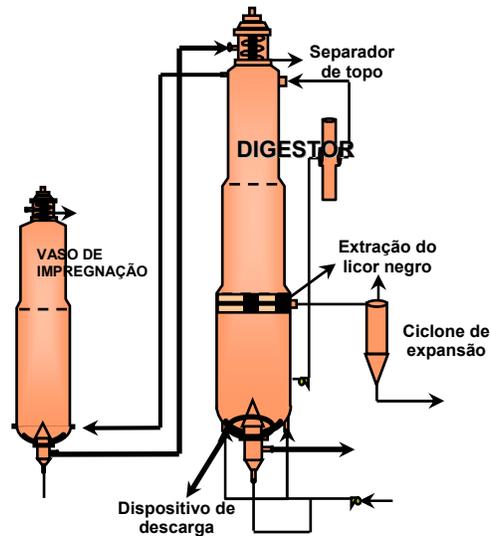


Figura 2.7 – Digestor industrial. (SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

2.3.3 Pré-branqueamento e Branqueamento

A etapa do processo de pré-branqueamento consiste na depuração, lavagem e oxidação. A depuração é a retirada de pedaços de madeira não cozidos, como nós e palitos através do peneiramento. A lavagem é feita com água limpa em contra corrente, processo no qual é removida grande parte do licor negro. O final do pré-branqueamento é feito com a oxidação da polpa celulósica, que após esta etapa apresenta uma coloração parda. Esta celulose semi branqueada também encontra diversas aplicações no mercado como papel *Kraft* e verso de papelcartão.

A etapa de branqueamento tem início com uma segunda lavagem que tem como objetivo eliminar toda a impureza ainda presente na polpa. Em seguida, a esta massa é adicionado dióxido de cloro diluído (ClO_2), que oxida a lignina residual retirando elétrons de sua molécula quebrando assim suas ligações, e outros agentes branqueadores, como peróxidos de hidrogênio (H_2O_2) que atua diretamente sobre as substâncias coloridas (cromóforos) modificando ou

eliminando-as. O peróxido ainda pode diluir a lignina residual, facilitando sua eliminação. Para auxiliar o processo de branqueamento, algumas indústrias ainda utilizam o Ozônio (O_3), Oxigênio (O_2) e Hidróxido de Sódio ($NaOH$), que solubiliza, descolore e hidrolisa a lignina respectivamente.

Tem-se na figura 2.8 o esquema do processo de pré-branqueamento e branqueamento, que são precedidos pela depuração e lavagem da polpa celulósica:

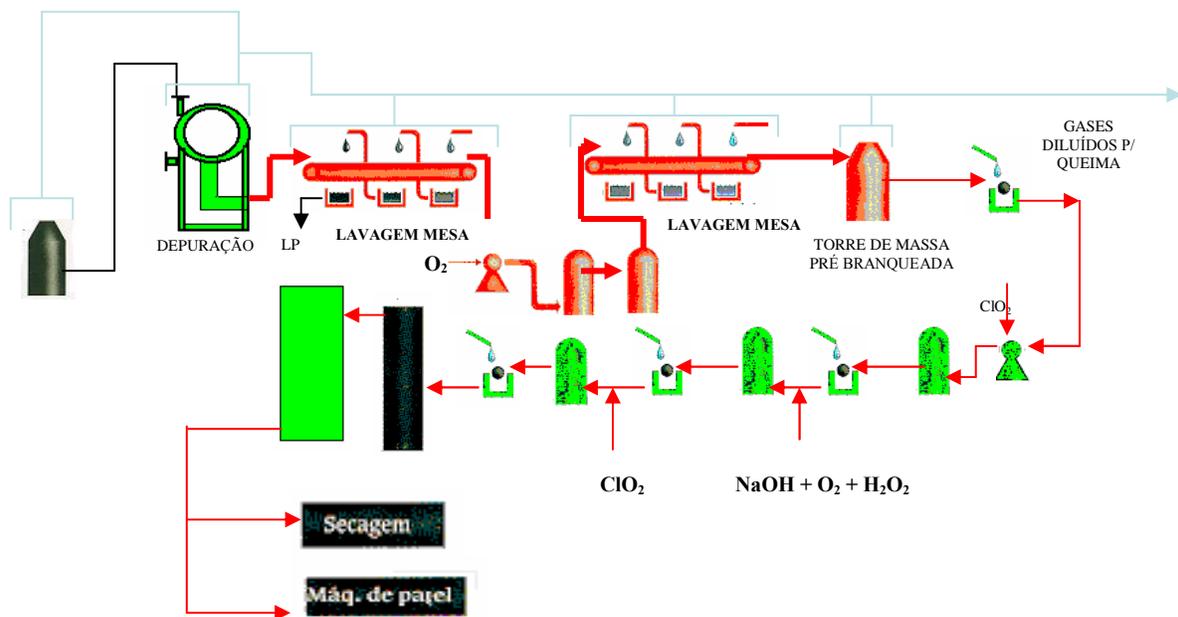


Figura 2.8- Fluxograma do pré-branqueamento e branqueamento.
(SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

Ao final deste processo temos uma polpa celulósica com a consistência de apenas 0,5% de sólidos, ou seja, 99,5% do produto neste ponto é composto por água.

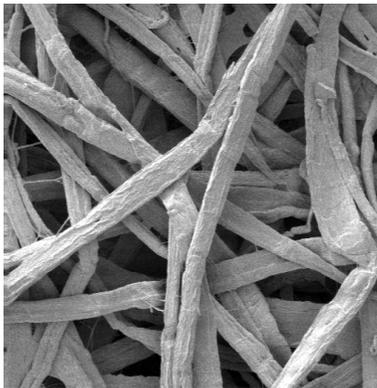
A partir deste estágio, as indústrias podem secar esta polpa e prensá-la em fardos para ser vendida ao mercado, ou dirigida para os processos de produção de papel.

2.3.4 Fabricação do Papel

A fabricação do papel consiste em três etapas principais: Preparação da massa, formação da folha e secagem.

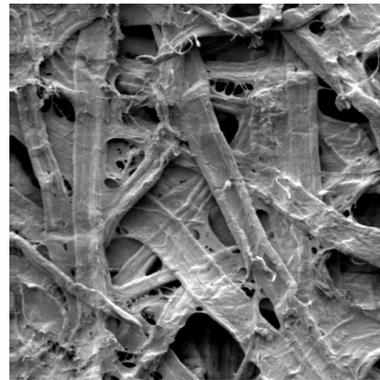
Na etapa de preparação da massa, a polpa celulósica recebe uma série de aditivos, cujas dosagens influenciam diretamente as características do papel. Estes aditivos podem ser corantes, cargas minerais, alvejantes, agentes de colagem interna, dispersantes entre outros. Ainda nesta fase de preparação, a polpa recebe um tratamento mecânico de fibrilação interna e externa da celulose, de modo que as fibras passem a apresentar pequenas ramificações, aumentando o contato e as pontes de hidrogênio entre elas. As figuras 2.9 (a) e (b) apresentam as diferenças entre as fibras refinadas e não refinadas.

Fibra não refinada (x1000).



(a)

Fibra refinada (x1000)



(b)

Figura 2.9- (a) Fibra de celulose não refinada; (b) Fibra de celulose refinada.
(SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2005).

2.3.5 Formação

A massa preparada é levada à caixa de entrada para ser depositada na tela formadora, que é o início da etapa de formação da folha e onde a polpa de fibra celulósica em suspensão (consistência próxima a 99,5%), começa a adquirir o formato plano. A perda de água ocorre inicialmente por gravidade, uma vez que a tela formadora funciona como uma “peneira em movimento”. A velocidade desta tela é ligeiramente superior à velocidade de deposição da massa ($V_{\text{tela}}/V_{\text{deposição}} \approx 1,03$), e o sentido de seu movimento determina a tendência de alinhamento das fibras, que é uma característica muito importante para o mercado gráfico.

A retirada de água da polpa na região de formação pode ser auxiliada por caixas de vácuo nas regiões superiores e inferiores da tela formadora, que além de ajudar na secagem minimiza a diferença entre os dois lados da folha devido à maior concentração de cargas minerais e aditivos no lado inferior.

Ao término da etapa que envolve simples drenagem, a polpa apresenta um teor de sólidos da ordem de 3%, podendo variar um pouco para mais ou para menos de acordo com as características específicas de cada tipo de fibra e com o tamanho dos orifícios da tela formadora. A remoção de água por sucção em máquinas industriais pode elevar a consistência de sólidos para aproximadamente 23%, que é considerado o limite de retirada de água por vácuo.

Finalizando esta parte de formação e remoção mecânica de água, a tela passa por uma região de prensas, onde o percentual de água é bastante reduzido. Nesta etapa o teor de sólidos chega a valores que variam entre 40% e 48%, variando de acordo com a gramatura do papel produzido, velocidade da máquina, entre outros fatores.

Na figura 2.10 pode-se observar a região de formação e prensas de uma máquina de papel:

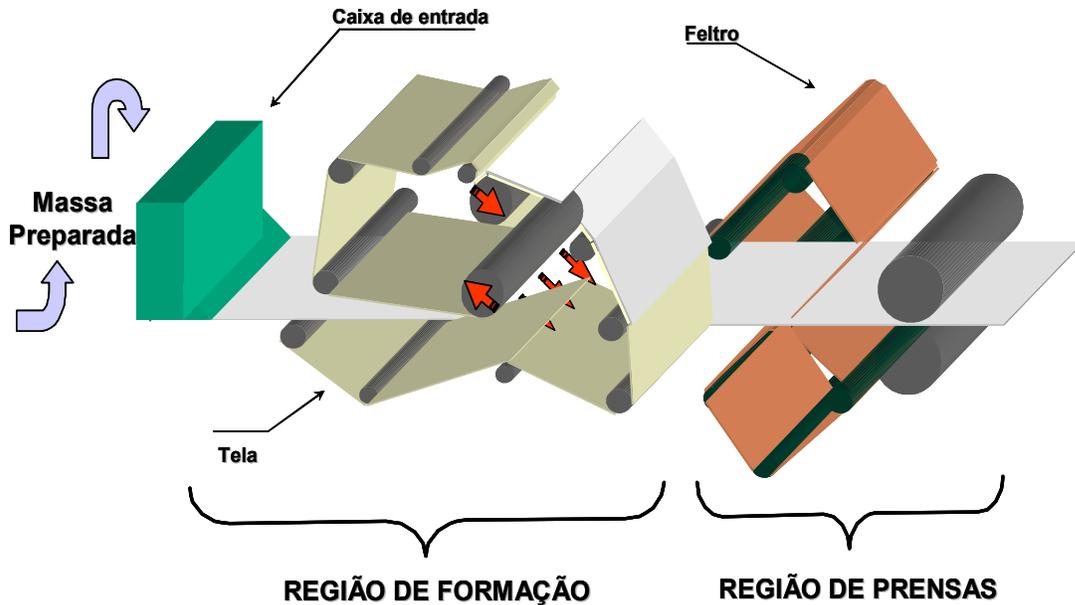


Figura 2.10- Região de formação e prensas.

Após a parte de formação e prensas, inicia-se a secagem propriamente dita. Apenas a gravidade, o vácuo e as prensas não são suficientes para remover toda a água necessária das fibras, devido à sua característica higroscópica. Desta forma, torna-se necessário o fornecimento de energia na forma de calor para que a água remanescente na massa fibrosa seja retirada. Nas grandes indústrias deste setor, o papel circula entre cilindros aquecidos. Um fluxo de vapor de água saturado atravessa o interior destes cilindros fornecendo o calor necessário à evaporação da umidade remanescente da camada fibrosa. Alguns estudos indicam que estando o vapor inicialmente saturado, uma película de condensado se forma com a rotação dos cilindros aumentando o coeficiente de troca de calor entre este fluido e a superfície fibrosa. Este coeficiente é superior ao que seria obtido caso o vapor estivesse super saturado.

Segue na figura 2.11 o esquema de secagem com cilindros secadores:

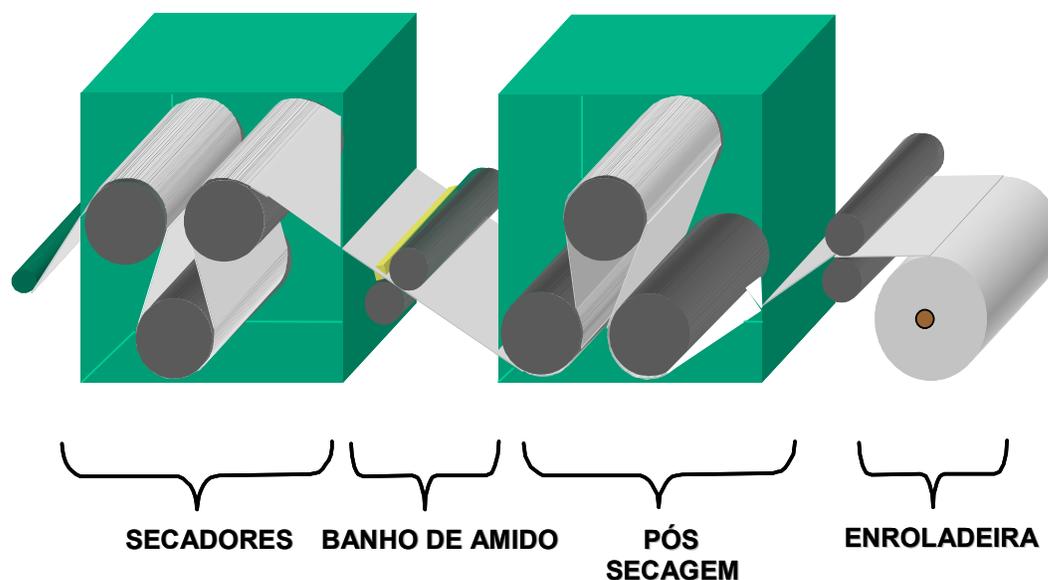


Figura 2.11- Região de secagem, banho de amido e finalização do processo.

Deve-se ressaltar que a disposição do papel na secagem tem como objetivo a secagem uniforme entre os dois lados da folha.

Dependendo da aplicação, a folha pode ainda receber a aplicação de um filme de amido, que aumenta sua resistência superficial e diminui o potencial de absorção de umidade, ficando assim mais protegido em relação ao ambiente. O processo é finalizado com a pós-secagem e acabamento, onde o papel enrolado pode ser cortado.

2.3.6 Recuperação de químicos

Para uma planta de celulose de grande porte em qualquer lugar do mundo ser economicamente e ecologicamente viável, ela deve possuir um ciclo paralelo de recuperação. O rejeito da etapa de cozimento (licor negro) é extremamente rico

em materiais orgânicos como a lignina, polissacarídeos e compostos resinosos, além de uma grande quantidade de sais, ou seja, possui um potencial energético elevado que se desperdiçado, além de inviabilizar economicamente o processo produtivo, coloca em risco o ecossistema ao redor dos efluentes que estão ligados à planta.

2.3.6.1 Evaporação

O licor negro retirado dos digestores possui uma concentração que varia entre 13 e 17%. Desta forma, para que se tenha maior eficiência no aproveitamento deste material como fonte energética, ele passa por um processo de evaporação, no qual sua concentração pode atingir até 80% de sólidos. Com esta concentração, o Licor negro é utilizado como combustível para a geração de vapor em uma caldeira de recuperação.

2.3.6.2 Caldeira de Recuperação:



Figura 2.12 - Fluxo esquematizado da caldeira de recuperação.

Associado ao aproveitamento energético direto, a queima ainda reduz os compostos de enxofre a sulfeto de sódio e os outros sais de sódio em carbonato de sódio, conforme as reações a seguir:

- $\text{Na}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{S}$
- $\text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$
- $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
- $\text{C} + 1/2\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + 1/2 \text{Na}_2\text{S}$
- $\text{C} + 1/4\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CO} + 1/4 \text{Na}_2\text{S}$
- $\text{C} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{CO}$
- $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$

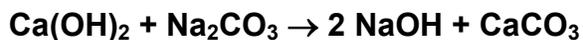
Ainda ocorre em menores proporções uma série de reações de oxidação de outros compostos inorgânicos presentes no licor negro.

O Sulfeto de Sódio (Na_2S) e o Carbonato de Sódio (Na_2CO_3) são os principais subprodutos inorgânicos das reações na caldeira de recuperação. Este material que é fundido recebe o nome de **Licor verde**, e sua presença permite a recuperação da Soda Caustica (NaOH) que será utilizada novamente no cozimento. O fluxo de material e energia é esquematizado na figura 2.12.

2.3.6.3 Caustificação

Para que se consiga recuperar o licor branco a partir do licor verde, é necessário que ocorra o processo de caustificação, onde o carbonato de sódio reage como o hidróxido de cálcio (cal virgem + água) resultando em soda caustica e carbonato de cálcio precipitado, conforme as reações químicas:





Ou seja, nesta etapa é produzida a soda caustica, que juntamente com o sulfeto de sódio resultante da queima na caldeira de recuperação, forma o licor branco que será utilizado no cozimento.

Para que o ciclo de recuperação de químicos atinja o máximo índice de reaproveitamento, o carbonato de cálcio precipitado resultante da reação de caustificação é convertido em cal virgem no forno de cal:



A cal virgem resultante será hidratada no início do processo de caustificação fechando assim o ciclo de recuperação de químicos utilizados no cozimento. A figura 2.13 ilustra todo o ciclo descrito de recuperação dos químicos.

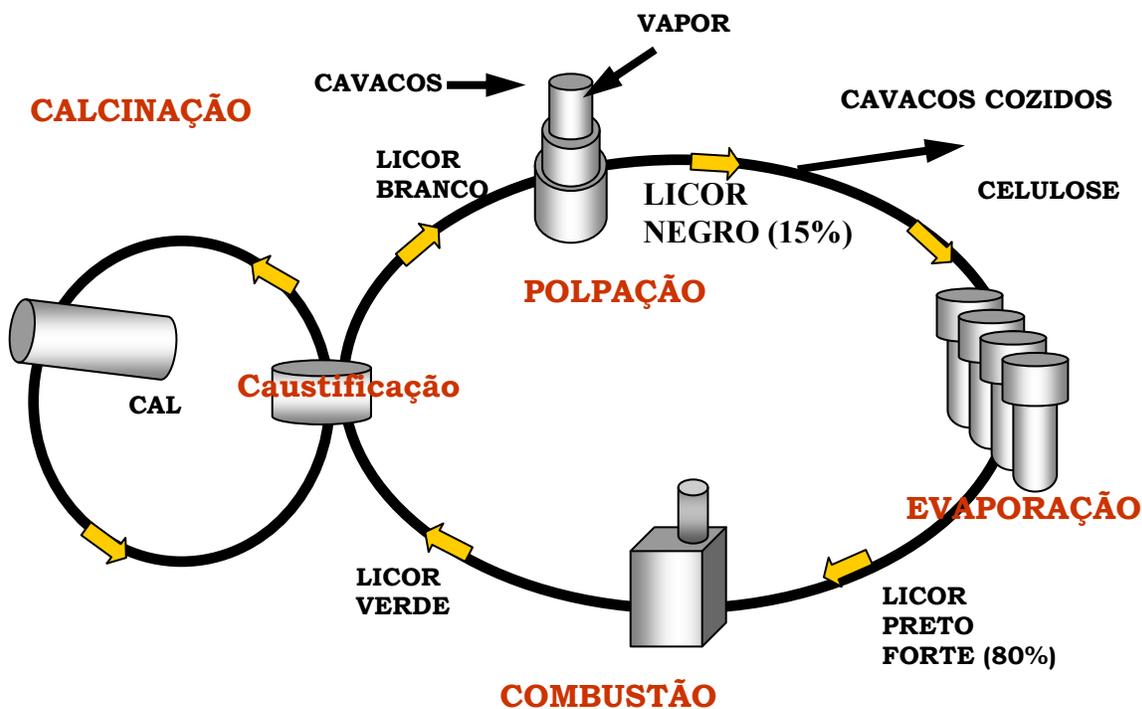


Figura 2.13- Ciclo de recuperação de químicos.

2.4 Processo artesanal:

O processo artesanal de produção de papel muitas vezes serviu de diretriz para os processos industriais, pois a seqüência de etapas é muito semelhante. Devido às limitações naturais impostas pela indisponibilidade de recursos, como máquinas e aditivos empregados, o processo artesanal e a qualidade do material produzido evoluem com velocidades menores quando comparados ao industrial.

A matéria prima para o processo artesanal da fábrica de Itariri é o pseudocaule da bananeira, que pode ser observado na figura 2.14. Após o período de maturação do vegetal e retirada dos frutos, apenas o pseudocaule é mantido para fornecer nutrientes à árvore filha, e depois de quatro meses é retirado para que não passe a servir de fonte de nutrientes às espécies que devoram o plantio.

Pseudocaule



Figura 2.14- Árvore de bananeira ao lado do pseudocaule de outra árvore já cortada.

2.4.1 Descascar e picar a madeira

O primeiro estágio do processo artesanal, assim como no industrial, consiste na fragmentação das toras. O processo rústico de corte acarreta na não regularidade dimensional dos cavacos, além da dificuldade em se atingir fragmentos menores. A principal consequência do corte irregular é a não uniformidade na etapa seguinte, que é o cozimento.

A figura 2.15(a) apresenta o processo artesanal de corte e fragmentação da madeira. De forma ilustrativa, a figura 2.15(b) mostra o processo chinês artesanal:



(a)



(b)

Figura 2.15- (a) Fotografia do método artesanal para picar a madeira;
(b) Gravura representando o método antigo com o qual se picava a madeira. (Cedran, 1997).

2.4.2 Cozimento

A etapa seguinte é o cozimento, que é feito em tambores, apenas com carvão e cinzas, para que através da transferência de calor se obtenha o amolecimento da madeira e a dissolução de parte da lignina. Este processo é realizado a 100°C durante um período de 5 horas, conforme o processo ilustrado na figura 2.16 . A utilização de outros químicos como a Soda Cáustica é proibido na região de Itariri

devido aos problemas ambientais que poderiam ser causados pelo descarte destes produtos não dirigidos a uma planta de recuperação. Desta forma, a eficiência da extração de celulose propriamente dita é inferior à dos processos industriais, ou seja, o papel artesanalmente produzido apresenta um teor de lignina que não é encontrado nos papeis produzidos pelas grandes indústrias.



(a)



(b)

Figura 2.16- (a) Gravura representando o método antigo com o qual se cozia a madeira. (Cedran, 1997); (b) Fotografia do método artesanal para o cozimento da madeira em tambores.

2.4.3 Branqueamento

No processo de branqueamento, os fabricantes utilizam água sanitária comercial diluída que, por ser um composto de cloro (hipoclorito), consegue o efeito de branqueamento devido ao ataque deste composto às moléculas de lignina, “quebrando” sua estrutura, conforme ilustrado na figura 2.17. Esta diluição é feita na proporção de um litro de água sanitária para três litros de água.

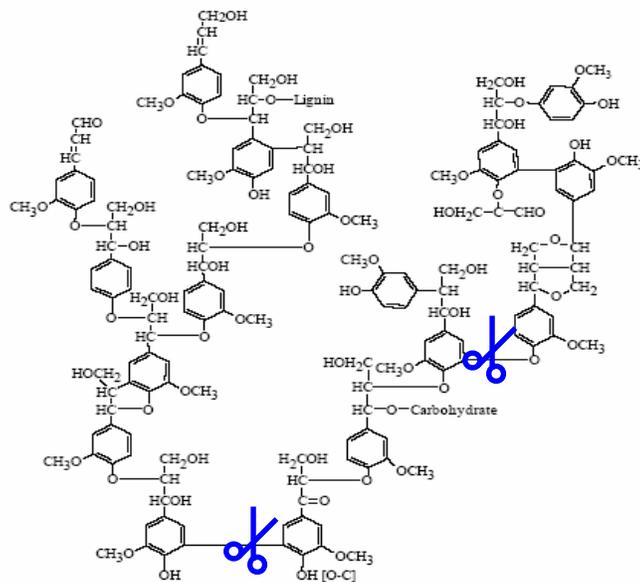


Figura 2.17- Figura esquemática da quebra da molécula de lignina pela ação dos compostos de Cloro. (IPT/SENAI-MODIFICADO, 1998)

Diferentemente dos processos industriais, a massa que pode ser branqueada ou não branqueada (o branqueamento não é necessário na fabricação), precisa apenas ser seca, pois dependendo do tipo de fibra e da aplicação, não há a necessidade da adição de um agente de colagem.

O processo de branqueamento em Itariri é feito com a utilização de misturadores, que por possuírem hélices para o processo de mistura acabam atuando também como refinadores de massa. É esperado que a eficiência desta refinação nos processos artesanais seja menor, mas no caso da fábrica de Itariri, a utilização de uma matéria prima de fibra longa confere uma boa resistência ao rasgo por parte das folhas produzidas. A figura 2.18 apresenta as vistas lateral e frontal deste liquidificador.



(a)



(b)

Figura 2.18 – “liquidificador” de mistura da massa com os agentes de branqueamento. (a) Vista superior; (b) Vista frontal.

2.4.4 Preparação de massa

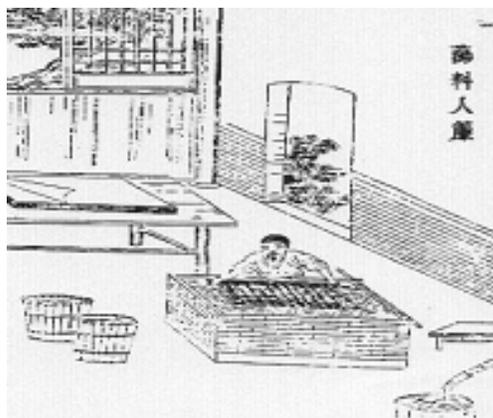
A preparação da massa ocorre simultaneamente ao branqueamento, onde além da refinação, a massa pode receber a aplicação de corantes. Diferentemente do processo industrial, no qual a preparação da massa determina grande parte das propriedades físico-químicas, no processo artesanal, esta preparação é limitada aos aspectos visuais que o papel pode adquirir. Depois de preparada, a massa é despejada em tanques como o da figura 2.19, que possui um grande volume de água. A massa então é diluída, facilitando as etapas seguintes.



Figura 2.19 - Tanque de massa / polpa.

2.4.5 Formação da folha

Atualmente, a massa despejada nos tanques e diluída é depositada na tela formadora, que nada mais é do que uma peneira através da qual a água escoar por ação da gravidade, conforme apresentado na figura 2.20.



(a)



(b)

Figura 2.20- (a) Gravura representando o método antigo de formação da folha de papel. (Cedran, 1997);

(b) Fotografia do método artesanal de formação da folha de papel.

A prensa existente na fábrica, que é apresentada na figura 2.21, não é utilizada devido à incompatibilidade entre o formato desta ferramenta e das telas formadoras, além da preocupação em relação à proteção de toda a parte metálica contra os efeitos corrosivos do grande volume de água retirado da folha que entrariam em contato com a máquina.



Figura 2.21 - Foto da prensa disponível na fábrica de Itariri.

2.4.6 Secagem

A etapa de evaporação é feita ao sol, conforme a figura 2.22, o que compromete a produtividade devido à dependência dos fatores climáticos.



(a)



(b)

Figura 2.22- (a) Gravura sobre o método histórico de secagem. (Cedran, 1997); (b) Foto do processo artesanal de secagem em Itariri – Feita ao sol.

Esta fase é a mais complicada devido aos custos relacionados ao fornecimento de energia térmica. Por seus recursos limitados, conhecimento estritamente empírico e restrições ambientais, a fábrica de Itariri apresenta grandes problemas no processo de secagem.

A produtividade desta fábrica é de aproximadamente 5000 folhas por mês de 60 cm x 40 cm, e a demanda por uma escala maior exige soluções de engenharia que eliminem as deficiências na secagem, que hoje é o gargalo do processo.

2.4.7 Fonte energética utilizada na produção da Fibra Mais

O fornecimento de energia térmica para as etapas de cozimento e secagem é feito através da utilização de madeira utilizada em paletes, que são constantemente descartados por feirantes devido a quebras estruturais e doados a esta fábrica, que tem seu papel social reconhecido pela comunidade.

Estes paletes são feitos com Pinus (*Pinus Caribea var. Hondurensis*). As espécies do gênero Pinus é base de grande parte da indústria madeireira nas regiões sul e sudeste do Brasil. A grande quantidade de resíduos gerados em seu corte e manuseio faz desta espécie um material com grande potencial para o uso energético.

No entanto, com exceção da indústria de papel e celulose, que já utiliza os resíduos produzidos em seus processos, uso do Pinus como biomassa para a geração de energia térmica é muito questionado e objeto de pesquisas devido à contra posição entre grande abundância de resíduos deste material e densidade que varia de média a baixa nesta espécie. Esta baixa densidade acarreta em um poder calorífico volumétrico significativamente pequeno quando comparado a outros tipos de madeira utilizados como fonte geradora de energia térmica. Além disso, o Pinus é pouco resistente a agentes bio-degradadores que consomem os componentes lignocelulósicos reduzindo assim seu poder calorífico quando submetido a períodos de armazenamento elevados (superior a seis meses).

No caso específico dos paletes doados para a Fábrica Fibra Mais, a umidade especificada pelos diversos fabricantes é de no máximo 22% em relação à massa

seca, porém estes materiais geralmente são submetidos a condições de umidade elevada. A massa dos paletes varia entre 30 e 35kg.

O poder calorífico superior do Pinus apresenta valores que variam entre 16400 e 19680 KJ/Kg, e o poder calorífico inferior é em média 10032 kJ/kg (Arora, 1984).

3 Teoria de Secagem de Fibras e Papel

O termo secagem refere-se à transferência de um líquido presente em um sólido para uma fase gasosa não saturada. Os modelos de secagem de materiais provenientes da madeira são bem complicados e seus detalhamentos físico-químicos bem complexos. As fibras, devido à sua característica higroscópica, podem reter grandes quantidades de líquidos em seu interior, mesmo que sua superfície esteja seca.

O transporte de líquidos nesses materiais é controlado pela difusão, mas também é influenciado pela gravidade e capilaridade. A somatória destes fenômenos pode resultar em uma secagem desigual no interior do material provocando alguns possíveis danos à estrutura. A grande dificuldade ao se propor modelos otimizados de secagem está na compreensão do movimento do líquido no interior deste tipo de material.

3.1 Estágios de secagem:

As curvas típicas de secagem podem esboçar quaisquer formatos, seguindo geralmente um padrão passando por três estágios. As variações nos formatos das curvas estão intimamente ligadas aos mecanismos de realização de secagem e movimentação dos fluidos no interior das fibras. Os três estágios de secagem podem ser representados pelos gráficos da figura 3.1, nos quais tem-se mostrados simultaneamente o teor de umidade em função do tempo (h) e a taxa de secagem (kg/h.m^2) em função do teor de umidade. A descrição mais detalhada dos fenômenos observados nos gráficos será feita a seguir.

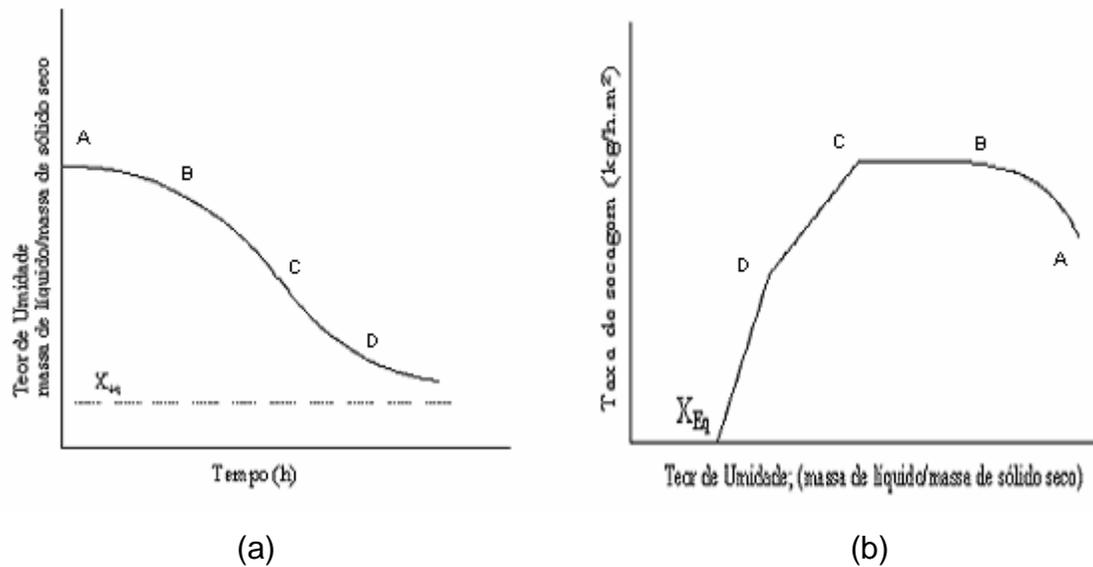


Figura 3.1- (a) Teor de umidade do material fibroso em função do tempo durante a secagem; (b) Taxa de secagem em função do teor de umidade do material fibroso. (FOUST, 1982).

No contato inicial entre o material fibroso úmido e o meio secante, a temperatura do sólido sofre ajustes até que sejam atingidas as condições de regime permanente. A taxa de secagem neste estágio pode ser crescente ou decrescente, ocorrendo o fluxo de massa e de calor, até que a superfície atinja a temperatura de bulbo-úmido do meio secante. Esta etapa é representada nos gráficos pelo trecho AB da figura 3.1.

Atingida a etapa de regime permanente (temperatura de bulbo-úmido do gás secante), é de se esperar que a taxa de secagem passe a ser constante, mas devido à defasagem entre o movimento da massa e o fluxo de calor, não há uniformidade entre as temperaturas da superfície e do interior do material. Durante este regime de secagem, representada nos gráficos pelo trecho BC, toda a superfície exposta do sólido está saturada de água, de forma que toda a massa subtraída da superfície é substituída pelo líquido que vem das camadas internas. A secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido, sem haver influência, direta do sólido na taxa de secagem. No entanto, a aspereza da

superfície sólida, sobre a qual a película líquida se estende, provoca o aumento dos coeficientes de troca de calor e massa. Mais adiante será feita uma referência a esta não uniformidade de temperatura e concentração no perfil do material fibroso, que impacta diretamente nos limites do processo de secagem.

A partir do momento em que a velocidade do movimento do líquido para a superfície passa a ser menor que a velocidade de transferência de umidade da superfície para o meio, inicia-se o período de taxa de secagem decrescente, representado nos gráficos pelo trecho CD, reduzindo-se assim as áreas saturadas de líquido. A temperatura do sólido nesta fase sofre acréscimo e o vapor proveniente das camadas interiores do sólido, ao difundir-se para a superfície que não está saturada, continua a difundir-se para a corrente gasosa. Este mecanismo é bem mais lento que a transferência convectiva que ocorre na superfície saturada.

A secagem chegará ao estágio em que toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido, e a distância a ser percorrida pelo fluxo de calor e massa aumenta até que a pressão de vapor sobre o sólido passe a ser igual à pressão parcial de vapor do gás secante cessando assim o processo.

Os materiais fibrosos retêm umidade como parte integral da estrutura devido às suas características higroscópicas. Esta retenção ocorre tanto nas fibras como em poros muito delgados, de forma que a pressão interna de vapor fique significativamente reduzida. Quando a taxa de secagem for muito elevada, podem ocorrer gradientes de umidade tão grandes no perfil da estrutura que o material fique rachado ou empenado. É possível ainda que esta secagem desigual resulte na formação de uma camada impermeável na superfície que iniba o prosseguimento da secagem das camadas internas, acentuando as diferenças no perfil e a tendência de deterioração do material.

O final da fase de regime permanente da secagem e o teor de umidade de equilíbrio são pontos que dependem muito da estrutura interna dos sólidos fibrosos, e a irregularidade inerente à formação desses materiais tornam difícil a predição exata do processo de secagem. Desta forma, qualquer projeto deve-se valer de medições experimentais das quais é possível obter curvas de secagem em função da espessura da amostra e velocidade do fluxo dos gases secantes.

3.2 Movimento dos fluidos no interior dos materiais fibrosos.

3.2.1 Mecanismo de difusão:

Os materiais fibrosos, apesar de serem muito porosos e irregulares, podem ser tratados como superfícies homogêneas, e a partir desta consideração fazer as análises e elaborar os modelos que servirão como base para os cálculos do tempo e da determinação do perfil de secagem.

A determinação da velocidade do fluido e do movimento de difusão no interior do material pode ser expressa pela lei de Fick, alterada para aplicar-se a este caso particular:

$$\frac{\partial \bar{X}'}{\partial \theta} = D \cdot \frac{\partial^2 \bar{X}'}{\partial x^2}, \quad (3.1)$$

onde \bar{X}' é o teor de umidade do material fibroso, θ é a temperatura adimensional, D é o coeficiente de difusão e x é a coordenada de posição.

3.2.2 Mecanismo da capilaridade

Apesar de possuir uma menor importância no movimento do fluido quando comparado à difusão, o mecanismo da capilaridade pode influenciar o processo de secagem e influenciar diretamente os modelos baseados na Lei de Fick. Os poros

das fibras absorvem a umidade. A tensão superficial do líquido nestes poros se contrapõe ao movimento livre do fluido, exercendo uma pressão localizada sobre o este, dificultando a secagem.

$$-\Delta P = \frac{2 \cdot \gamma}{r} \quad , \quad (3.2)$$

onde, P é a pressão, γ é a tensão superficial e r é o raio de curvatura.

À medida que o teor de umidade vai decrescendo durante a secagem, a interface do líquido vai se afastando da superfície, cuja parcela saturada fica cada vez mais reduzida, e a tensão superficial é responsável pela retração não uniforme dos meniscos líquidos. Desta forma, o número de poros aumenta e a taxa global de secagem vai diminuindo, pois o calor e a massa devem ambos difundir-se através da camada superior do sólido. Nos períodos mais avançados da secagem, a temperatura da superfície do sólido é bem próxima da temperatura do meio secante, mas nos locais onde ainda temos partes líquidas devido à porosidade das fibras, permanece a temperatura de bulbo úmido.

3.2.3 Adsorção e Dessorção

Durante todo o processo de produção de papel, a fibra ganha e perde muita umidade, pois nas fases de polpação (cozimento) e branqueamento, que utiliza compostos de organo-clorados, as quantidades de água envolvidas são grandes. Os teores de umidade de equilíbrio estão sempre relacionados à umidade relativa do ar de secagem, mas cada tipo de material fibroso apresenta sua curva específica.

A tensão superficial provocada pela capilaridade nos poros pode provocar o efeito de Histerese, ou seja, a saturação na adsorção é diferente da saturação na dessorção. Este fenômeno está ilustrado na figura 3.2. Durante a fase de

adsorção, a curva de saturação das fibras varia de acordo com o teor de umidade, conforme ilustrado. Porém, na fase de dessorção, o retorno pode se dar por uma outra curva, conforme indicado na mesma figura.

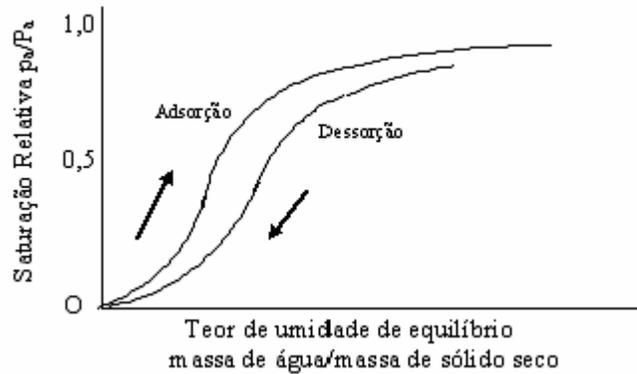


Figura 3.2 – Efeito da Histerese relativa à adsorção e dessorção dos materiais fibrosos. (FOUST, 1982).

Com o aumento da umidade nos materiais fibrosos, a pressão de vapor que a água exerce também aumenta, podendo chegar à umidade relativa de 100%. A partir daí, qualquer massa de água adicional exerceria a mesma pressão de vapor continuando o equilíbrio com o ar saturado sem qualquer alteração. Esta umidade extra é denominada “umidade não ligada”, enquanto a umidade retida no sólido que está em equilíbrio com o ar parcialmente saturado é denominada “umidade ligada”. A pressão de vapor no sólido pode sofrer decréscimos não só pela retenção em poros capilares finos como também por reações e combinações que gerem estruturas orgânicas naturais utilizando a água. Qualquer defasagem da umidade relativa do gás secante em relação à umidade do sólido proporciona um potencial de secagem devido ao desequilíbrio do sistema. Esta umidade além do valor de equilíbrio é denominada “umidade livre”. A relação descrita entre a umidade e a estrutura fibrosa (higroscópica) é representada pelo gráfico da figura 3.3.

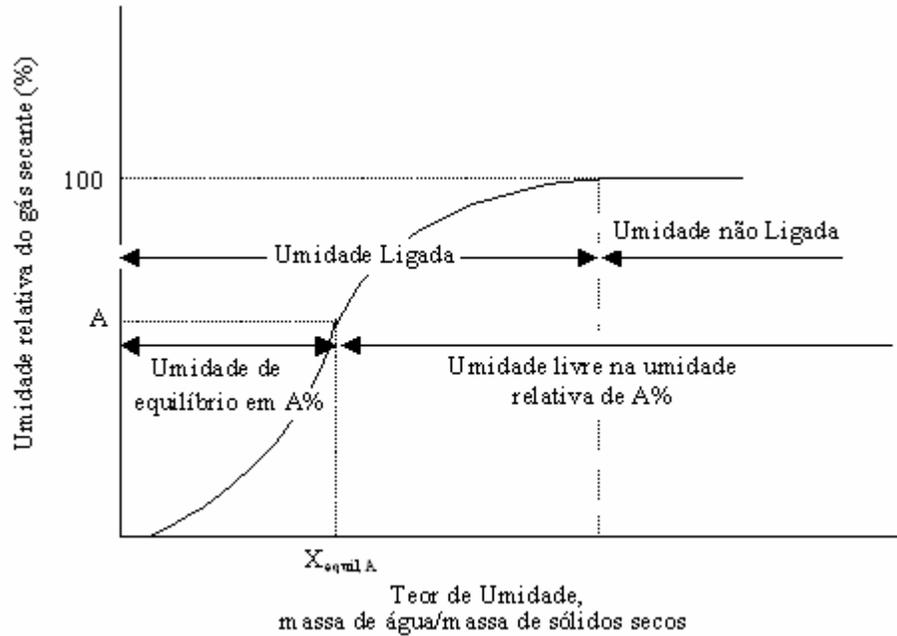


Figura 3.3 – Relação entre a umidade e a estrutura fibrosa. (FOUST, 1982).

3.3 Transferência de Calor e Massa durante a Secagem

Todo o fluxo de massa que ocorre da superfície fibrosa para o meio secante está associado ao gradiente de concentração de vapor de água, da mesma forma que o fluxo de calor está associado ao gradiente de temperatura. As taxas de transferência são dadas pelas relações:

$$N'' = h_m \cdot (C_{v, \text{sup}} - C_{v, \infty}), \quad (3.3)$$

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty}), \quad (3.4)$$

onde N'' é o Fluxo de massa, h_m é o coeficiente de transferência de massa, $C_{v, \text{sup}}$ é a concentração de Vapor na superfície, $C_{v, \infty}$ é a concentração de vapor no ambiente, \dot{Q} é o fluxo de calor trocado, h é o coeficiente de transferência de calor, A é a área superficial, T_{sup} é a temperatura da superfície do material fibroso e T_{∞} é a temperatura no ambiente.

Para as condições envolvidas na secagem da fábrica de Itariri e das maiorias das fábricas de papel o vapor d'água pode ser considerado um gás ideal, por simplificação. Desta forma é possível determinar os fluxos em função do gradiente da pressão ou da densidade do vapor, através da equação do gás perfeito:

$$P(Vol.) = \frac{mRT}{M}, \quad (3.5)$$

$$P = \frac{CRT}{M}, \quad (3.6)$$

$$C = \frac{PM}{RT}, \quad (3.7)$$

$$\rho = M.C, \quad (3.8)$$

$$\omega = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{ar}} = \frac{\rho_v}{\rho_{ar}}, \quad (3.9)$$

onde *Vol.* é o volume, *m* é a massa do gás, *M* é a massa molar, *R* é a constante dos gases perfeitos, *T* é a temperatura, *C* é a concentração, *ρ* é a densidade do fluido, *ω* é a umidade absoluta, *ṁ_v* é a taxa de massa de água evaporada e *ṁ_{ar}* é o fluxo mássico de ar seco.

Combinando as equações temos:

$$N = \frac{h_m AM}{RT} (P_{v,sup} - P_{v,\infty}), \quad (3.10)$$

ou

$$\dot{m} = h \cdot A \cdot \rho_{ar} (\omega_s - \omega_\infty). \quad (3.11)$$

3.3.1 Influência da Camada Limite:

A pressão parcial de vapor do meio secante, a temperatura e o coeficiente de transferência de massa estão intimamente ligados às condições de escoamento sobre a superfície e às características da camada limite formada sobre a mesma. As equações de conservação de massa, momento e energia, as condições de contorno e as características do escoamento nos fornecem parâmetros que permitem a modelagem adequada a cada problema específico.

Da teoria da camada limite, sabe-se que as regiões do fluido secante que entram em contato com a superfície passam a ter velocidade nula e, pelas tensões de cisalhamento, essas partículas tendem a retardar as partículas das camadas adjacentes e assim sucessivamente, até uma distância onde essas tensões passam a ser desprezíveis e os efeitos de retardamento praticamente não existem mais. À medida que o escoamento avança pela superfície do papel, a espessura da camada limite aumenta. O atrito na superfície determina as características da camada limite fluido dinâmica, cuja espessura corresponde à distância na qual o valor da velocidade paralela ao escoamento equivale a 99% da velocidade do escoamento livre. Analogamente, as diferenças de temperatura e concentração de vapor entre a superfície e escoamento livre determinam as características das camadas limites térmica e de concentração.

$$\frac{(T_{\text{sup}} - T)}{(T_{\text{sup}} - T_\infty)} = \frac{(C_{v,\text{sup}} - C_v)}{(C_{v,\text{sup}} - C_{v,\infty})} = 0,99. \quad (3.12)$$

Da mesma forma que os quocientes acima determinam as espessuras das três camadas limite, eles são muito utilizados como forma de adimensionalizar as equações diferenciais para que se obtenham soluções aplicadas a uma gama de problemas similares, definindo temperatura e concentração adimensionais.

$$T^* = \frac{(T_{\text{sup}} - T)}{(T_{\text{sup}} - T_{\infty})}, \quad (3.13)$$

e

$$C^* = \frac{(C_{v,\text{sup}} - C_v)}{(C_{v,\text{sup}} - C_{v,\infty})}. \quad (3.14)$$

Desta forma as distribuições transientes de temperatura e concentração passam a ser função apenas de T^* e C^* .

Para que as equações possam ser adimensionalizadas, são definidos parâmetros de posição e velocidade adimensionais:

Posição:

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad (3.15)$$

e

$$y^* = \frac{y}{L}. \quad (3.16)$$

Onde L é o comprimento característico do corpo, x é a coordenada na direção do escoamento e y a coordenada transversal ao escoamento.

Velocidade:

$$u^* = \frac{u}{V}, \quad (3.17)$$

e

$$v^* = \frac{v}{V}. \quad (3.18)$$

Sendo que u é a velocidade no eixo paralelo à folha e V é a velocidade no eixo perpendicular à folha.

3.3.2 Características do escoamento:

As condições impostas pelas camadas limite são a base para todo o equacionamento da transferência de calor e massa por convecção. O atrito entre o

fluido e a superfície, não só altera a espessura da camada, como modifica todo o campo de velocidades do escoamento. Este campo de velocidades determinará se o escoamento é laminar ou turbulento, característica esta que está associada à relação entre as “forças de inércia” e forças viscosas, que é o número de Reynolds (Re).

$$\text{Re} = \frac{\rho.V.L}{\mu} = \frac{V.L}{\nu} . \quad (3.19)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica e ν é a viscosidade cinemática.

Para cada tipo de situação, um determinado valor para o número de Reynolds determina a transição entre os escoamentos laminares e turbulentos, o que tem impacto direto nas taxas de transferência de calor e massa.

Condições de contorno:

Lembrando que o fluido secante em contato com a superfície possui velocidade nula, toda a transferência de calor e massa nesta seção ocorre por difusão, que é proporcional aos gradientes de temperatura e concentração respectivamente:

$$\dot{Q}'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} , \quad (3.20)$$

e

$$\dot{N}'' = -D_{\text{vapor,ar}} \left. \frac{\partial C_v}{\partial y} \right|_{y=0} , \quad (3.21)$$

onde k é condutividade térmica.

Combinando com as equações de transferência de temos:

Para a transferência de calor:

$$\dot{Q}'' = h.(T_{\text{sup}} - T_{\infty}) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} . \quad (3.22)$$

Para a transferência de Massa:

$$\dot{N}'' = h_m.(C_{v,\text{sup}} - C_{v,\infty}) = -D_{v,ar} \frac{\partial C_v}{\partial y} \Big|_{y=0} , \quad (3.23)$$

ou seja,

$$h = \frac{-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(T_{\text{sup}} - T_{\infty})} , \quad (3.24)$$

e

$$h_m = \frac{-D_{v,ar} \frac{\partial C_v}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(C_{v,\text{sup}} - C_{v,\infty})} . \quad (3.25)$$

Portanto, os gradientes de temperatura e concentração na superfície influenciam diretamente os coeficiente de transferência de calor e massa. A normalização das equações acima fornece os gradientes adimensionais, que são as definições dos números de Nusselt (Nu) e Sherwood (Sh):

$$Nu = \frac{h.L}{k} = + \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} , \quad (3.26)$$

$$Sh = \frac{h_m.L}{D_{v,ar}} = + \frac{\partial C_v^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} . \quad (3.27)$$

Difusividade térmica e mássica:

Pode ser demonstrado (Incropera) que desprezando a variação de concentração na direção paralela ao escoamento e admitindo que não ocorra qualquer geração interna de espécies químicas, as equações da conservação de energia e da continuidade podem ser reduzidas respectivamente a:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\nu}{c_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3.28)$$

$$u \frac{\partial C_a}{\partial x} + v \frac{\partial C_a}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C_a}{\partial y^2} \quad (3.29)$$

onde α é a difusividade térmica e c_p é o calor específico a pressão constante.

E que na forma normalizada, resultam em:

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{\alpha}{V.L} \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \quad (3.30)$$

$$u^* \frac{\partial C^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial C^*}{\partial y^*} = \frac{D}{V.L} \frac{\partial^2 C^*}{\partial y^{*2}} \quad (3.31)$$

De onde se define o número de Schmidt (Sc), que é a razão entre as difusividades de quantidade de movimento e mássica, e o número de Prandtl (Pr), que é a razão entre as difusividades de momento e térmica:

$$\frac{\alpha}{V.L} = \frac{\alpha}{Re.v} = \frac{1}{Re.Pr} \Rightarrow Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad , \quad (3.32)$$

$$\frac{D}{V.L} = \frac{D}{Re.v} = \frac{1}{Re.Sc} \Rightarrow Sc = \frac{\nu}{D} \quad . \quad (3.33)$$

Os processos de transferência de calor e massa podem ser relacionados através do número de Lewis (Le), que é a razão entre as difusividades térmica e mássica.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha}{D} . \quad (3.34)$$

3.3.3 Adimensionalização na convecção livre:

Através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, foram determinados os principais parâmetros e grupos adimensionais que regem os fluxos de calor e massa entre dois meios. O mesmo processo é utilizado para determinar a transferência, na qual o fluxo é influenciado pelo gradiente de temperatura e pela difusividade térmica do meio.

A equação de quantidade de movimento para o escoamento livre sobre as telas suspensas na vertical fica:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} , \quad (3.35)$$

onde g é a aceleração da gravidade.

Uma vez que não há qualquer força na direção perpendicular à superfície (direção y) o gradiente de pressão no interior da camada limite é igual ao gradiente de pressão fora da camada limite, onde:

$$u = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_{\infty} \cdot g . \quad (3.36)$$

Portanto,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{g}{\rho} (\rho_{\infty} - \rho) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} . \quad (3.37)$$

Adimensionalizando a equação, tem-se:

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{L}{u_0^2} \frac{g}{\rho} (\rho_{\text{sup}} - \rho_{\infty}) \cdot \rho^* + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad . \quad (3.38)$$

O termo da primeira parcela do lado direito da equação que acompanha a densidade adimensional representa a razão entre a força de empuxo e as forças viscosas. Este termo é geralmente encontrado em grande parte da literatura técnica em outra forma, utilizando uma aproximação a partir da definição da compressibilidade do fluido:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = -\frac{1}{\rho} \frac{(\rho_{\text{sup}} - \rho_{\infty})}{(T_{\text{sup}} - T_{\infty})} \quad , \quad (3.39)$$

onde β é a compressibilidade do fluido.

ou seja,

$$(\rho_{\text{sup}} - \rho_{\infty}) = -\beta \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \quad . \quad (3.40)$$

Lembrando ainda que as análises de densidade e temperatura do fluido são efetuadas para o mesmo problema:

$$\rho^* = \frac{\rho - \rho_{\text{sup}}}{\rho_{\infty} - \rho_{\text{sup}}} = \frac{T - T_{\text{sup}}}{T_{\infty} - T_{\text{sup}}} = T^* \quad (3.41)$$

a equação adimensional da quantidade de movimento fica:

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{L}{u_0^2} \cdot g \cdot \beta (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \cdot \rho^* + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad . \quad (3.42)$$

O termo que representa a razão entre as forças de empuxo e forças viscosas pode ser multiplicado por $(Re)^2$ para que este não seja expresso em função da velocidade de referência, que muitas vezes é desconhecido:

$$\frac{L}{u_0^2} \cdot g \cdot \beta (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \left(\frac{u_0 \cdot L}{\nu} \right)^2 = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty})}{\nu^2} \cdot L^3 = Gr \quad . \quad (3.43)$$

Este termo, que é definido como o Número de Grashof (Gr), desempenha na convecção livre o mesmo papel que o número de Reynolds na convecção forçada. A ocorrência da transição entre os tipos de escoamento na camada limite é geralmente correlacionada em termos do número de Rayleigh (Ra_l), que é o produto dos números de Grashof e Prandtl.

$$Ra_l = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta \cdot (T_{\text{superfície}} - T_{\text{filme}}) \cdot L^3}{\nu \alpha} \quad . \quad (3.44)$$

3.4 Relação entre os adimensionais

Raramente é possível determinar a solução analítica exata dos escoamentos reais devido ao grande número de variáveis envolvidas, das quais muitas delas não se têm controle. Desta forma a iteração entre modelos matemáticos e testes empíricos são de extrema importância e eficiência na elaboração de equações cada vez mais condizentes com a realidade.

Além das dificuldades na solução analítica, o grande número de variáveis acarretaria em grandes dificuldades e custos no lado experimental, pois em qualquer problema físico no qual a variável dependente é uma função de $(n-1)$ parâmetros independentes, seríamos obrigados a plotar $(n-1)$ gráficos com apenas um fator variando e os demais parâmetros fixos apenas para determinarmos o comportamento desta variável dependente.

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n).$$

Para se determinar o comportamento de uma grandeza de forma mais rápida, as variáveis do problema são agrupadas nos parâmetros adimensionais independentes de acordo com teorema dos Π de Buckingham, através do qual a função acima pode ser escrita como:

$$\Pi_1 = F_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}),$$

Onde m é geralmente o número de variáveis independentes necessárias para especificar as dimensões de todos os parâmetros envolvidos.

Deve-se ressaltar que o processo de “Adimensionalização” não prevê a forma funcional de F_1 , que deve ser determinado experimentalmente, ou seja, para cada situação, F_1 assume uma forma funcional específica.

As relações entre os adimensionais na situação de escoamento com convecção forçada sobre uma placa plana encontrados na literatura se aplicam diretamente para o caso estudado na secagem das folhas de papel. Estas funções podem ser representadas na forma geral:

$$\text{Transferência de calor: } Nu = a(\text{Re}^b - A) \cdot \text{Pr}^c, \quad (3.45)$$

Onde a, b, c e A são constantes a serem ajustadas a cada situação.

Tanto a equação de transferência de calor, como a de transferência de massa por convecção são compostas por termos de advecção e difusão. Ambas as equações são relacionadas pelo campo de velocidades do escoamento através do número de Reynolds, e os números de Prandtl e Schmidt representam papéis análogos. A implicação imediata desta analogia é que as relações funcionais entre os adimensionais que governam a camada limite térmica sejam as mesmas que governam a camada limite mássica. Desta forma, a relação entre os

adimensionais envolvidos na transferência de massa sobre uma placa plana pode ser representado por:

$$\text{Transferência de massa: } Sh = a(\text{Re}^b - A) \cdot \text{Sc}^c \quad (3.46)$$

Em outras palavras, as relações entre os adimensionais de transferência de calor e massa em um determinado campo de velocidades sobre uma dada geometria são análogas.

Os valores das constantes utilizadas nas equações acima dependem da geometria e regime do escoamento. A determinação dos valores é empírica e estes podem ser encontrados na literatura.

Tabela 3.1 – Constantes das equações adimensionais 3.45 e 3.46.

Fonte: SIMÕES-MOREIRA (1999).

a	b	C	A	Regime	Geometria	Observações
0,664	0,5	1/3	0	Laminar	Superfície Plana	$0,6 \leq \text{Pr} \leq 50$
1,128	0,5	0,5	0	Laminar	Superfície Plana	$\text{Pr} \leq 0,5$
0,037	0,8	0,33	23550	Turbulento (início laminar)	Superfície Plana	$\text{Pr} \geq 0,5$ $5 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 10^8$

Para a transferência de calor por convecção livre em placas horizontais, da forma como será abordada em nosso caso de interesse, a relação entre os adimensionais mais difundida na literatura é:

$$\overline{Nu} = 0,15 \cdot (\text{Ra}_l)^{1/3} \quad (3.47)$$

3.5 Secagem de folhas úmidas

O processo de secagem de folhas planas resulta em uma manipulação de variáveis que envolvem a remoção de vapor de água. O problema do trabalho com

o ar úmido apresenta a agravante do fornecimento de calor correspondente à entalpia de vaporização da massa que mudou de fase na pressão de operação. Desta forma todo problema da secagem deve ser abordado considerando os dois fenômenos de transferência simultaneamente, o que pode ser representado pela figura 3.4.

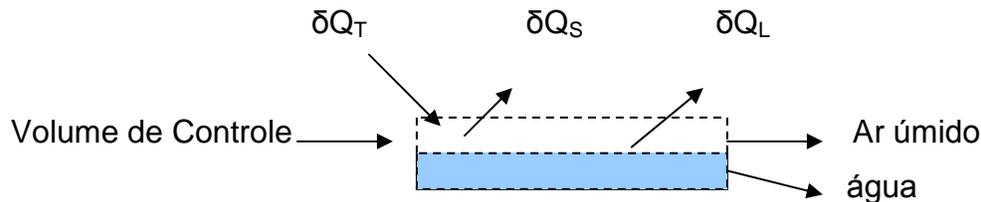


Figura 3.4 - Volume de controle com transferência de calor sensível e latente simultaneamente, (SIMÕES-MOREIRA, 1999).

Calor Latente:
$$\delta\dot{Q}_L = h_{LV} \cdot d\dot{m}_v . \quad (3.48)$$

Calor Sensível:
$$\delta\dot{Q}_S = [h_c (T_s - T_\infty)] dA . \quad (3.49)$$

Calor Total:
$$\delta\dot{Q}_T = [h_c (T_s - T_\infty) + \rho_a h_{LVs} \cdot h_m (\omega_s - \omega_\infty)] dA . \quad (3.50)$$

A transferência total de calor entre a folha úmida e a corrente de ar do ambiente é o resultado da combinação de duas parcelas, uma proveniente da diferença de temperatura e outra proveniente da diferença de umidades absolutas. Estas diferenças podem ser combinadas em um único potencial, que é definido pela diferença entre as entalpias do fluido na parede úmida e do ambiente. A combinação destes dois processos de transferência é feita através do número de Lewis, conforme visto anteriormente.

Para o caso específico da secagem de folhas planas, o quociente entre as equações adimensionais na transferência de calor e massa fornece:

$$\frac{Sh}{Nu} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^c . \quad (3.51)$$

Manipulando algebricamente a equação chega-se a:

$$\frac{h_c}{h_m C_p \rho} = \left(\frac{\alpha}{D} \right)^{1-c} = Le^{1-c} . \quad (3.52)$$

Onde a relação de Lewis é definida: $R_{Le} = Le^{1-c}$, sendo c uma constante.

Tanto a superfície da parede molhada, quanto a corrente de ar no volume de controle são misturas de ar e água. O uso da simplificação de que a entalpia específica da mistura é dada pela soma das entalpias individuais resulta em:

$$h_s - h_\infty = (h_{sa} - h_a) + (\omega_s h_{Vs} - \omega h_V) . \quad (3.53)$$

A manipulação matemática da equação acima associada à hipótese rotineira de que o ar e o vapor são gases perfeitos resulta em

$$h_s - h_\infty = C_{p_u} (T_{sa} - T_\infty) + (\omega_s h_{Vs} - \omega_\infty h_V) . \quad (3.54)$$

Isolando-se a diferença de temperatura e substituindo na equação do calor total:

$$\delta \dot{Q}_T = \frac{h_c dA}{C_{p_u}} \left[(h_s - h_\infty) + \frac{(\omega_s - \omega_\infty)}{R_{Le}} (h_{LVs} - R_{Le} h_V) \right] . \quad (3.55)$$

Como para o ar úmido $R_{Le} \cong 1$ e $(\omega_s - \omega_\infty) h_L$ é desprezível quando comparado a $(h_s - h_\infty)$, chega-se à equação que rege a transferência de calor entre um fluxo de ar e uma parede molhada:

$$\delta\dot{Q}_T = \frac{h_c \cdot dA}{Cp_u} \cdot (h_s - h_a) . \quad (3.56)$$

Portanto, o fluxo total de calor é causado pela diferença entre as entalpias específicas entre o ar e o ar saturado junto à superfície molhada.

4. Análise do Processo de Secagem Artesanal e Propostas de Melhorias

Neste capítulo são analisadas as propostas de melhoria do processo de secagem usando os conceitos fundamentais de transferência de calor e massa.

Independentemente dos recursos energéticos e financeiros, é pertinente a qualquer fábrica, seja ela artesanal ou de grande porte, uma análise baseada no aproveitamento máximo do potencial energético disponibilizado em todas as etapas do processo associado aos custos que este aproveitamento representa.

4.1 Alteração no Processo de Cozimento

O processo artesanal de cozimento nesta fábrica é feito sem o devido isolamento do meio ambiente, acarretando desta forma em um grande desperdício de energia térmica. Já foi constatado experimentalmente na própria fábrica de Itariri que, o cozimento em panelas fechadas utilizadas em cozinhas domésticas, reduz o tempo de cozimento do material das cinco horas atuais para duas horas, no entanto, o processo realizado desta forma não permite o cozimento da quantidade necessária para a atual produtividade.

Os tambores de 200 litros utilizados, não são preenchidos em sua totalidade. Tambores de 50 litros comportam com folga as quantidades de fibra cozidas em cada ciclo e, se cobertos, evitam grande parte da perda de energia térmica

observada atualmente. Empiricamente, chegou-se com essa nova condição proposta ao tempo de cozimento de 3,5 horas aproximadamente.

4.2 Remoção Mecânica de Água

Atualmente a fábrica de Itariri tem na irradiação solar sua principal fonte de energia térmica para o processo de secagem. Em dias chuvosos, todas as telas com o papel ainda em baixa consistência de sólidos ficam em uma estufa totalmente fechada, onde uma resistência elétrica transforma energia elétrica em térmica e, um ventilador dirigido a esta resistência, provoca a circulação de ar no intuito de acelerar a secagem. No entanto, este ar de secagem chega rapidamente à saturação.

A utilização da prensa existente no local representa uma grande economia de energia. SMOOK (1994) estimou que prensagem de uma massa celulósica, mesmo feita com ferramentas simples, pode elevar o percentual de sólidos para até 45%, reduzindo a quantidade de água a ser removida na secagem por calor.

4.3 Proposta de Mudança da Estufa

Para a etapa de secagem, na qual é necessário o fornecimento de calor para a evaporação da umidade presente no papel, foi projetada uma estufa sobre um forno que utilizará como combustível o Pinus recebido, devido à facilidade e abundância com a qual é obtido.

Configuração da câmara:

Na figura 4.1, é representada em perspectiva a estufa proposta. Para o melhor aproveitamento da energia térmica, a câmara onde ocorre a secagem propriamente dita é compacta e suas dimensões não permitem a entrada das pessoas em seu interior. Com um comprimento de 10 m, largura de 1 m e altura

de 80 cm, toda a retirada e colocação das telas com os papéis é feita pela parte superior da câmara, cuja cobertura é feita com tábuas de madeira apoiadas e não fixas para que sejam facilmente removidas. A 40 cm da parte superior da câmara é colocada uma outra cobertura para proteção contra a chuva. Esta parte não está representada na figura 4.1, pois seu desenho dificultaria uma melhor visualização, mas está representada na figura 4.4.

As paredes do secador são feitas de material refratário, minimizando-se assim as perdas de calor para o ambiente através de sua estrutura.

Abaixo da câmara de secagem encontra-se a fornalha que possui duas saídas para os gases de combustão através de chaminés. A opção por duas saídas foi feita com o objetivo de se conseguir uma melhor distribuição de temperatura ao longo da base da câmara de secagem. A fornalha possui 40 cm de altura, e sua alimentação é feita manualmente pela lateral do secador.

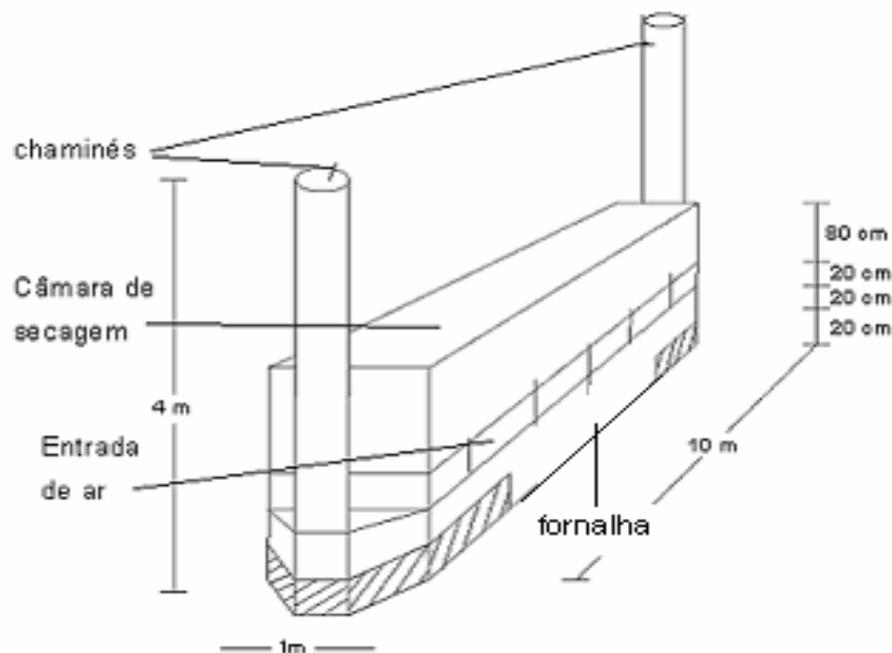


Figura 4.1 – Vista em perspectiva do secador

Funcionamento da câmara:

A queima da madeira na fornalha aquece as chapas metálicas colocadas na base da estufa, que pelo processo de convecção natural transferem calor para o ar no interior da câmara. Devido a este gradiente de temperatura, inicia-se a circulação de ar. O ar interno aquecido e ascendente é naturalmente dirigido para o meio externo através da parte superior da estufa, que possui saídas para este ar, e o ar externo, que possui uma densidade maior e temperatura menor que o ar interno, se move para dentro da câmara pela parte inferior da estufa, que possui entradas de ar nesta região. Desta forma, tem-se a renovação constante do ar no processo. Na figura 4.2 é representada a seção transversal do secador, através da qual é possível detalhar seu funcionamento.

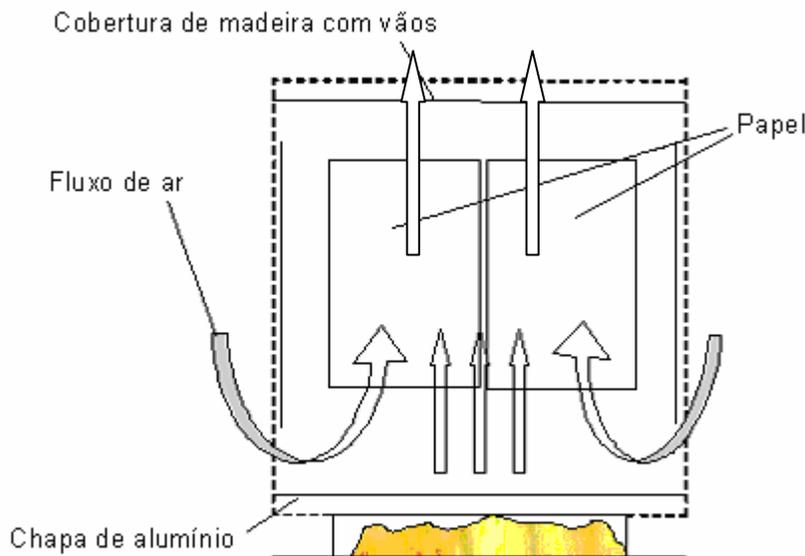


Figura 4.2 – Configuração do funcionamento da câmara de secagem

A figura 4.2 apenas demonstra o funcionamento da câmara de secagem. Ela não apresenta as escalas reais. No projeto propriamente dito, as chapas metálicas compreendem uma área de 10 m², sendo dez metros de comprimento por um metro de largura, conforme citado anteriormente. As telas com as folhas estarão dispostas em duas fileiras lado a lado. A distância entre as faces de duas folhas

consecutivas será de 30 cm, de forma que tenhamos simultaneamente a secagem de 60 folhas.

Para proteger a chapa de alumínio contra a queda de água, que pode prejudicar o metal e o desempenho térmico do processo, serão utilizadas pequenas calhas plásticas para que esta água escoe para fora da área de secagem, representadas na figura 4.5.

Vistas superior e lateral do secador

As figuras 4.3 e 4.4 representam respectivamente as vistas superior e lateral da parte interna do secador. Através destas figuras, pode-se ter com precisão (mesmo não estando em escala) a disposição das telas com o papel no interior da câmara de secagem.

Vista superior:

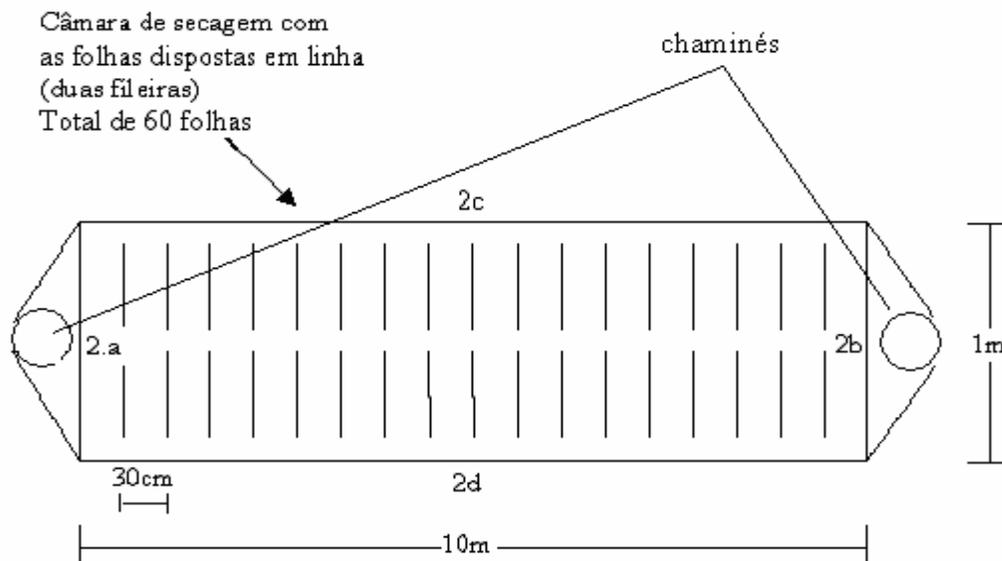


Figura 4.3- Vista superior da câmara de secagem (fora de escala)

As paredes 2.a, 2.b, 2.c e 2.d são feitas com material refratário (tijolo).

Vista lateral:

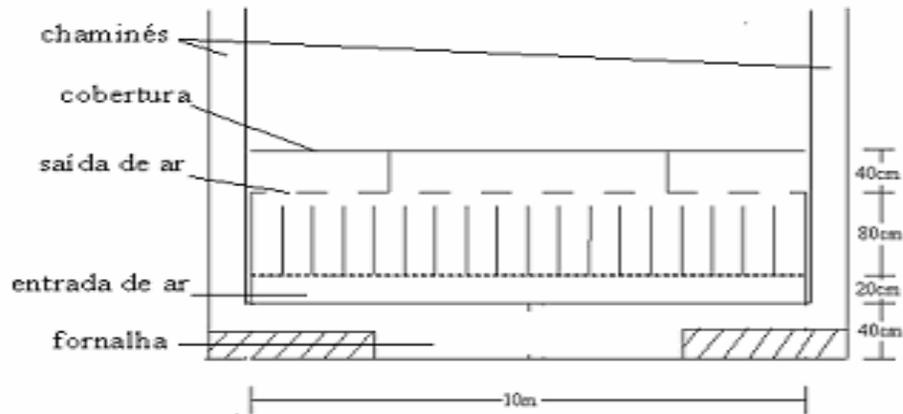


Figura 4.4- Vista lateral da câmara de secagem (fora de escala)

4.4 Cálculos da taxa de secagem

Toda a parte de cálculo foi realizada para um volume de controle onde os limites laterais do escoamento são compostos por duas superfícies de papel entre as quais temos o escoamento de ar.

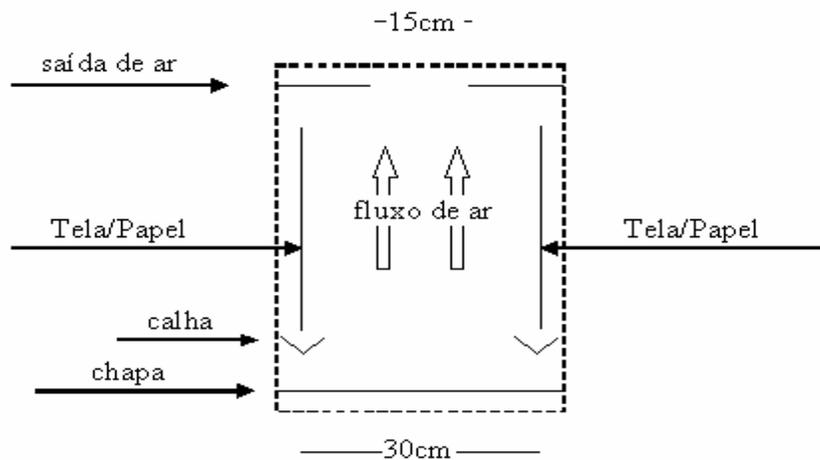


Figura 4.5 – Superfície de controle entre as folhas de papel

De acordo com esta configuração representada na figura 4.5, os cálculos de transferência por convecção foram realizados considerando duas etapas analisadas separadamente:

- A primeira envolvendo a troca de calor entre a chapa e o ar, na qual temos um sistema em que se faz presente a convecção natural.
- A segunda envolvendo as trocas de calor e massa entre as folhas de papel e o ar. Nesta segunda etapa, o meio para o qual temos as transferências de calor e massa é o fluxo de ar ascendente provocado pela circulação do ar em decorrência do aquecimento da base do secador, ou seja, as folhas de papel estão submetidas ao fluxo de ar externo e forçado, ainda que de velocidade baixa quando comparados aos fluxos provocados por ventiladores comuns.

4.4.1 Condições ambientais

As condições ambientes influenciam diretamente as características de funcionamento do secador. Para as condições do processo de secagem da fábrica de Itariri serão considerados os valores médios padrão para o local, que é de temperatura igual a 25°C (temperatura de bulbo seco - TBS), umidade relativa do ar igual a 85% e pressão atmosférica de 101 KPa. Com os dados de temperatura e umidade relativa, temos determinado os potenciais térmicos e mássicos que permitiram os cálculos para a determinação das taxas de transferência e tempo de secagem. Foi usada para os cálculos a carta psicrométrica para o nível do mar (SIMÕES MOREIRA-1999). Ao final do trabalho, é discutida a variação da umidade relativa do ar e seus impactos nas taxas de secagem, de modo que possamos conhecer a sensibilidade dos valores calculados em relação às variáveis climáticas.

4.4.2 Seqüência de cálculo

Hipóteses: Serão desconsiderados os efeitos da compressibilidade do ar no interior da câmara de secagem. Admitiremos inicialmente que todo o escoamento no interior da câmara é laminar.

Os cálculos para a transferência de calor entre a chapa e o ar, vazão mássica de ar e taxa de secagem serão realizados de forma iterativa de acordo com o fluxograma na figura 4.6

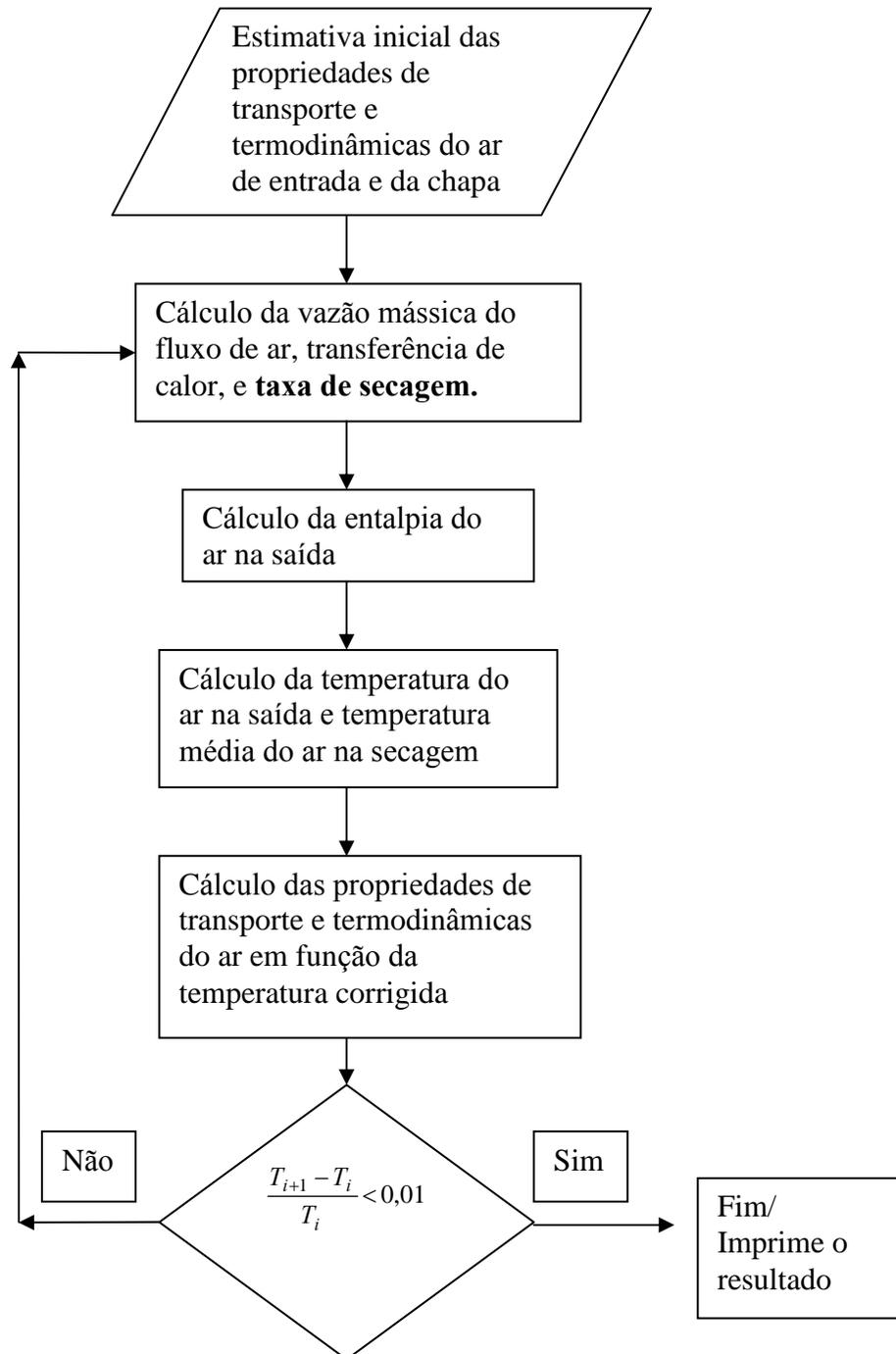


Figura 4.6 – Fluxograma com a seqüência de cálculos para o processo de secagem.

Como ainda não há dados suficientes para estimar o calor latente transferido pelo papel ao fluxo de ar, apenas no primeiro momento este não será considerado. Assim que obtivermos um valor para a taxa de secagem, serão feitas as correções e este será incluído nos novos cálculos.

Para a estimativa inicial, foi admitida:

$$T_{chapa} = 600 \text{ K};$$

$$T_{ar} = 298 \text{ K};$$

$$T_{filme} = \frac{(T_{chapa} + T_{ar})}{2} = 449 \text{ K}.$$

Propriedades de transporte e termodinâmicas do ar

Todas as equações foram colocadas em uma planilha de Excel. Com os valores obtidos em INCROPERA (1998), foram calculadas as curvas de interpolação para a determinação dos valores referentes às propriedades de transporte e termodinâmicas em função da temperatura (K) do filme de ar sobre a superfície.

$$\text{Viscosidade cinemática. } 10^6 \text{ [m}^2\text{/s]: } \quad \nu \cdot 10^6 = 8.10^{-5} \cdot T_{filme}^2 + 0,0529 \cdot T_{filme} - 7,0887 \quad (4.1)$$

$$\text{Difusividade térmica. } 10^6 \text{ [m}^2\text{/s]: } \quad \alpha \cdot 10^6 = 7.10^{-5} \cdot T_{filme}^2 + 0,1159 \cdot T_{filme} - 19,464 \quad (4.2)$$

$$\text{Densidade do ar. } 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]: } \quad \rho \cdot 10^3 = -3,328 \cdot T_{ar} + 2159,8 \quad (4.3)$$

Cálculo da velocidade do fluxo de ar:

O aquecimento do interior do secador provoca um fluxo de ar ascendente. Analogamente aos cálculos de tiragem de chaminés, tem-se que a diferença entre

as densidades do ar no interior e no exterior do secador é responsável pela diferença de peso de coluna (e pressão) entre essas duas regiões.

$$\Delta P = (\rho_0 - \rho_i) \cdot g \cdot L \quad . \quad (4.4)$$

Essa diferença de pressão por sua vez, tem o mesmo valor que as perdas de carga do fluxo de ar ascendente que representam as restrições ao seu movimento.

$$\Delta P = K_{l1} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} + K_d \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} + K_{l2} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} \quad , \quad (4.5)$$

onde K_{l1} é o coeficiente de perda de carga localizada na seção de entrada, K_d é o coeficiente de perda de carga distribuída e K_{l2} é o coeficiente de perda de carga localizada na seção de saída.

Igualando as duas equações, temos:

$$(\rho_0 - \rho_i) \cdot g \cdot L = K_{l1} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} + K_d \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} + K_{l2} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2} \quad , \quad (4.6)$$

onde ρ_0 é a densidade do ar externo ao secador e ρ_i é a densidade do ar interno ao secador.

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2;$$

$$L = 0,6 \text{ m};$$

$$K_{l1} = 0,5 \text{ (FOX-1998)}.$$

A seção de entrada é representada pela figura 4.7.

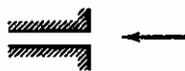


Figura 4.7 – Entrada de ar na câmara de secagem, (FOX, 1998).

$$K_d \text{ (coeficiente de perda de carga distribuída)} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{L}{D} = 2;$$

$$K_{l2} \text{ (coeficiente de perda de carga localizada na seção de saída)} = 0,22;$$

O valor para a perda de carga localizada na seção de saída foi extraído do diagrama da figura 4.8. ($A_2/A_1=30/15=0,5$).

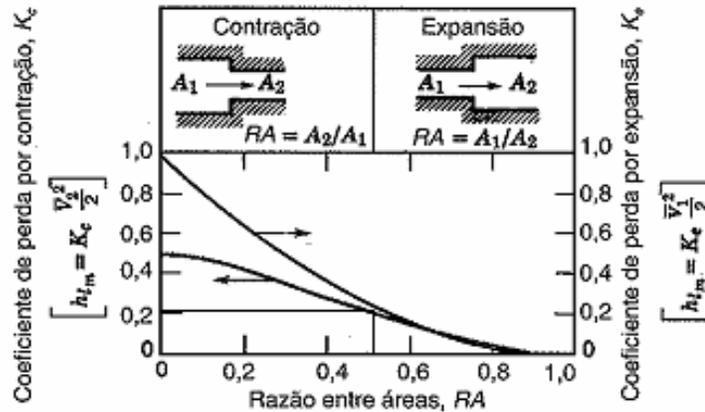


Figura 4.8 – Curva do coeficiente de perda de carga para a saída de ar, (FOX, 1998).

Cálculo da transferência de calor da chapa para o ar:

A transferência de calor da chapa para o ar na câmara de secagem ocorre devido à convecção natural, portanto:

Inicialmente é calculado o número de Rayleigh

$$Ra_l = \frac{g\beta \cdot (T_{chapa} - T_{filme}) \cdot L^3}{\nu\alpha}, \quad (3.44)$$

L = comprimento característico = $A_{sup}/\text{Perímetro} = 0,15$ m.

Com o número de Rayleigh calcula-se o número de Nusselt, o que permite o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção,

$$\overline{Nu} = 0,15(Ra_f)^{1/3}, \quad (3.47)$$

$$\overline{h} = \frac{k}{L} \overline{Nu}. \quad (3.26)$$

Com este coeficiente, calcula-se finalmente a troca de calor entre a chapa e o ar no secador.

$$\dot{Q} = \overline{h} \cdot A \cdot (T_{chapa} - T_{filme}). \quad (4.7)$$

Balço energético:

A entalpia do ar na entrada fica:

$$h_{ent} = h_{ar1} + \omega \cdot h_{vapor1}, \quad (4.8)$$

$\omega = 0,0175$ g água/kg ar seco

$h_{vapor1} = 2547,2$ kJ/kg

$h_{ar1} = 25,152$ kJ/kg

Com a entalpia na entrada e a energia térmica fornecida pela chapa, pode-se calcular a entalpia do ar na saída,

$$(\rho_{ar} \cdot V \cdot A) \cdot h_{saida} = (\rho_{ar} \cdot V \cdot A) \cdot h_{ar1} + \dot{Q}. \quad (4.9)$$

$A = 0,3$ m²;

Com os dados contidos na carta psicrométrica é possível interpolar a curva de temperatura do ar na saída em função da entalpia específica.

$$T_{saida} = 1,5 \cdot h_{saida} + 189 \quad (4.10)$$

A temperatura média do ar na câmara de secagem fica:

$$T_{m,ar} = \frac{T_{ar,ent} + T_{ar,said}}{2} \quad (4.11)$$

Com a temperatura média do ar, pode-se recalculer a temperatura do filme:

$$T_{filme} = \frac{(T_{chapa} + T_{m,ar})}{2} . \quad (4.12)$$

Com a nova temperatura do filme, calcula-se novamente as propriedades de transporte e termodinâmicas do ar, realizando-se nova iteração até que se obtenha a convergência nos cálculos. Colocando as equações no fluxograma, como na figura 4.9, temos:

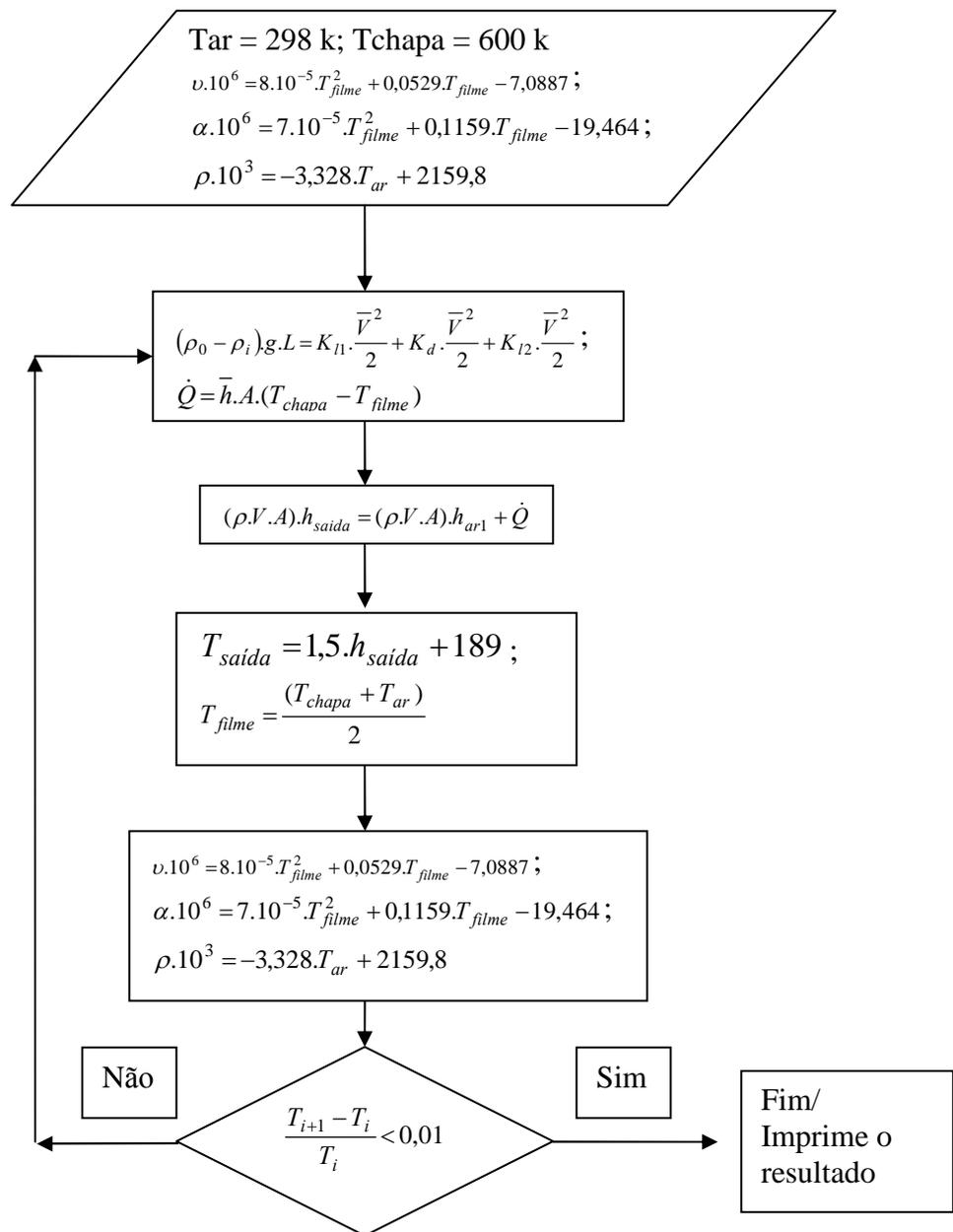


Figura 4.9 – Fluxograma com a seqüência de cálculos para o processo de secagem.

Através do processo iterativo com base nas equações presentes no fluxograma, chegou-se aos resultados da tabela 4.1 :

Tabela 4.1- Resultados do processo iterativo dos cálculos de fluxo e transferência de calor

Iteração	$T_{ar\ 1}$ (K)	$\rho \cdot 10^3$ (kg/m ³)	V (m/s)	$u \cdot 10^6$ m ² /s	$\alpha \cdot 10^6$ m ² /s	Q(W)	Novo T_{ar} (K)
1	298	1168	0,19	32,79	46,68	737	319
2	319	1098	0,49	34,11	48,57	664	309
3	309	1131	0,38	33,48	47,67	699	312
4	312	1121	0,42	33,66	47,94	688	310
5	310	1128	0,39	33,54	47,76	695	311
6	311	1124	0,41	33,60	47,85	692	311

Devemos lembrar que as propriedades de transporte e termodinâmicas presentes na tabela estão em função da temperatura do filme e não em função direta da temperatura do ar no secador.

Para a temperatura da chapa igual a 600 K, a temperatura média do fluxo de ar no secador é igual a 311K.

Cálculo da transferência de massa do papel para o ar:

Conforme citado anteriormente, o fluxo de ar sobre as folhas de papel é decorrente da circulação provocada pelo aquecimento deste ar na base do secador. Este fluxo ascendente intensifica a troca de calor e massa entre o papel e o ar.

Inicialmente se assume a temperatura do filme sobre o papel como sendo igual à temperatura do ar.

Da mesma forma, as propriedades termodinâmicas do ar seco foram calculadas através de curvas de interpolação.

$$\text{Número de Prandtl. } 10^3: \quad \text{Pr} \cdot 10^3 = -0,14 \cdot T_{\text{filme, papel}} + 749 \quad (4.13)$$

$$\text{Condutividade térmica. } 10^3 \text{ [W/m}^2\text{.K]}: \quad k \cdot 10^3 = 0,074 \cdot T_{\text{filme, papel}} + 4,1 \quad (4.14)$$

$$\text{Calor específico [kJ/kg.K]}: \quad c_p = 0,04 \cdot T_{\text{filme, papel}} + 995 \quad (4.15)$$

$$\text{Viscosidade dinâmica. } 10^7 \text{ [N.s/m}^2\text{]}: \quad \mu = 0,472 \cdot T_{\text{filme, papel}} + 43 \quad (4.16)$$

Com os valores das propriedades termodinâmicas, calculamos a taxa de secagem:

$$\text{Número de Reynolds:} \quad \text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = 14562 \text{ (escoamento laminar),}$$

$$\text{Número de Nusselt:} \quad \text{Nu} = 0,664 \cdot (\text{Re})^{0,5} \cdot (\text{Pr})^{1/3} = 71,33$$

$$\text{Coeficiente de convecção:} \quad h_c = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L} = 3,22 \text{ W/m}^2\text{.K}$$

Para o ar úmido,

$$\text{Relação de Lewis:} \quad \frac{h_c}{h_m C_p \rho} = \left(\frac{\alpha}{D} \right)^{1-c} = \text{Le}^{1-c} \approx 1$$

$$\text{Coeficiente de transferência de massa:} \quad h_m = \frac{h_c}{c_p \cdot \rho} = 0,0028 \text{ m/s.}$$

Primeira aproximação para a taxa de secagem:

$$\dot{m} = h_m \cdot A \cdot \rho_i \cdot (\omega_{papel} - \omega_{ar}) = 0,00199\text{g/s} = 7,199\text{g/h.}$$

$$A = 0,24 \text{ m}^2;$$

$$\omega_{papel} = 0,020 \text{ g.água / kg.ar seco.}$$

$$\omega_{ar} = 0,0175 \text{ g.água / kg.ar seco.}$$

Com esses dados podemos calcular a temperatura de equilíbrio do papel, incluindo a parcela de transferência de calor latente e sua influência na operação, corrigindo as temperaturas e obtendo um valor mais acurado para a taxa de secagem.

Temperaturas de operação durante a secagem

Durante o processo de secagem é importante que o papel fique a altas temperaturas, mas sem atingir os 100°C, que provocariam a evaporação e saída forçada de parte da umidade ligada à estrutura fibrosa do papel, podendo provocar danos estruturais à folha. Seguindo os valores encontrados na literatura e mantendo uma margem de segurança, será fixada para o papel, durante o equilíbrio térmico, a temperatura máxima de 70°C, podendo estar um pouco abaixo.

A transferência de calor por radiação a partir da superfície metálica é muito significativa para a elevação da temperatura do papel, mas não é significativa para a elevação da temperatura do ar, que possui absorvidade desprezível. Conseqüentemente as propriedades de transporte e termodinâmicas do ar de secagem, e desta forma os coeficientes de película, não se alteram devido à radiação. Em outras palavras, o calor transferido através da radiação tem grande

influência na temperatura do papel, mas pouca influência no desempenho da secagem. Por esta razão, optou-se por uma chapa metálica com emissividade baixa, no caso o alumínio, para que se buscasse o máximo de transferência de calor por convecção através do aumento da temperatura da chapa e o mínimo de transferência de calor através da radiação.

Uma consequência da utilização do alumínio, é que existe a necessidade de retirada diária das chapas de aquecimento para a limpeza e remoção de incrustações que ocorrerão inevitavelmente enegrecendo sua superfície e aumentando o valor de sua emissividade.

Fluxo de calor no papel

Na operação do secador, o papel recebe calor por radiação da chapa de aquecimento do ar entrante e perde calor principalmente por convecção para o ar que circula no interior da câmara de secagem.

Devido à constante renovação de ar no interior da câmara de secagem, é esperada uma pequena oscilação em torno do ponto de equilíbrio nas condições de operação do secador. No entanto, os cálculos de transferência de calor por radiação e convecção envolvendo o papel, foram realizados para o sistema em equilíbrio.

$$\dot{q}_{rad} = \dot{q}_{conv} \quad . \quad (4.17)$$

O calor perdido pelo processo de convecção é composto pelas parcelas de calor sensível e latente, devido à evaporação da umidade presente no papel,

$$\dot{q}_{rad} = \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{lat} \quad . \quad (4.18)$$

Desenvolvendo a equação acima se tem:

$$\frac{\sigma \cdot (T_{chapa}^4 - T_{papel}^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_{Al}}{\varepsilon_{Al} \cdot A_{chapa}} \right) + \frac{1}{A_{chapa} \cdot F_{(chapa, Papel)}} + \left(\frac{1 - \varepsilon_{papel}}{\varepsilon_{papel} \cdot A_{papel}} \right)} = h_c \cdot A_{papel} \cdot (T_{papel} - T_{ar}) + \dot{m}_v \cdot h_{Lv} \quad (4.19)$$

Emissividade do Alumínio: $\varepsilon_{Al}=0,06$;

Área da chapa = $0,3m^2$;

Massa de água evaporada = $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$;

Emissividade do papel = Emissividade média (vegetação, tecido) $\varepsilon_{papel}=0,9$;

Área do papel = $0,6m^2$;

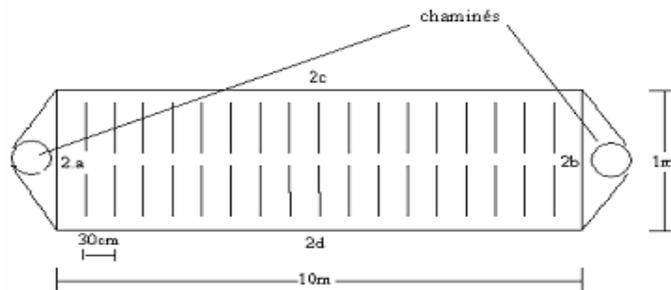
Calor de vaporização específico: 2442 kJ/kg ;

É necessário determinar o fator de forma para a transferência de calor por radiação entre a chapa e as superfícies do papel.

Determinação do Fator de forma:

$$\sum_{j=1}^N F_{i,j} = 1 \quad (4.20)$$

$$F_{1,2a} + F_{1,2b} + F_{1,2c} + F_{1,2d} + F_{1,3} + F_{1,4} = 1.$$



Superfície 1: Chapa de alumínio;

Superfícies 2.a, 2b, 2c e 2d: Paredes laterais conforme figura 4.3

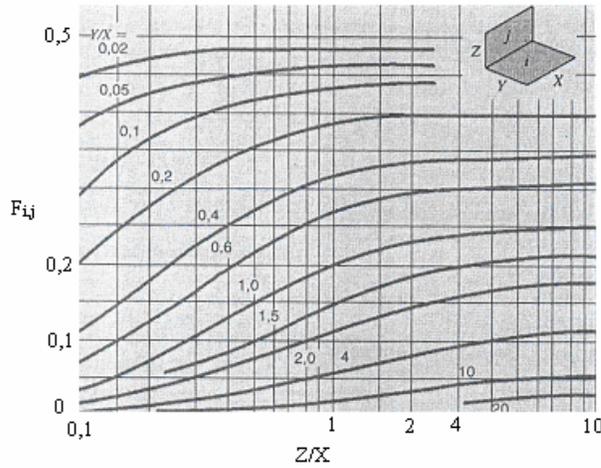
Superfície 3: Parte superior da câmara;

Superfície 4: Papel;

Do desenho com a vista superior da câmara de secagem, podemos admitir que a chapa de alumínio do nosso volume de controle não “enxerga” as paredes 2.a e 2b, portanto:

$$F_{1,2c} + F_{1,2d} + F_{1,3} + F_{1,4} = 1.$$

Podemos determinar os fatores de forma $F_{1,2c}$ e $F_{1,2d}$ através dos diagrama das figuras 4.10 e 4.11,



No nosso vol. de controle:

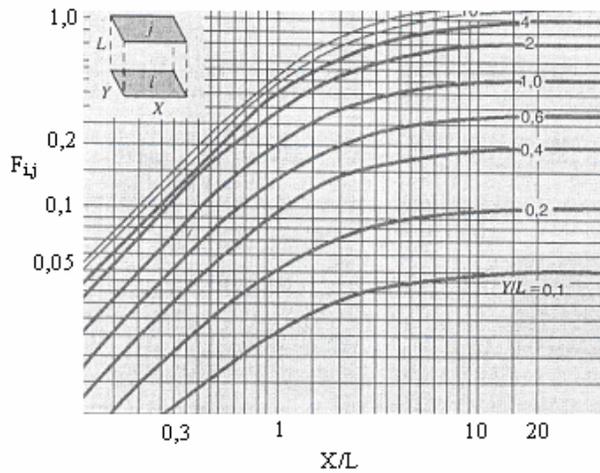
$$Z/X \approx 3;$$

$$Y/X \approx 3;$$

$$\text{Assim, } F_{1,2c} = F_{1,2d} = 0,12.$$

Figura 4.10 – Diagrama de fator de forma para duas paredes Perpendiculares. (INCROPERA , 1998).

Para a determinação do fator de forma $F_{1,3}$, temos:



No nosso vol. de controle:

$$X/L = 0,3 ;$$

$$Y/X = 3;$$

$$\text{Portanto, } F_{1,3} = 0,06;$$

Figura 4.11 – Diagrama de fator de forma para duas superfícies paralelas. (INCROPERA , 1998).

$$F_{1,4} = F_{chapa,papel} = 0,7 .$$

Resolvendo a equação de equilíbrio térmico do papel, admitindo a temperatura da chapa igual a 600 K, obtivemos uma temperatura para o papel igual a 98°C, o que é um valor muito acima do que o pré-determinado.

Reduzindo a temperatura da chapa para 525 K, obtivemos a temperatura de 68°C (341K), que é próximo ao valor estimado como a temperatura de trabalho. O valor do calor latente específico para esta temperatura foi corrigido para 2358 kJ/kg durante o cálculo.

Com este novo valor de temperatura das superfícies do papel, podemos corrigir a temperaturas dos filmes nas superfícies da chapa e papel e os fluxos de calor que entram no volume de controle.

O incremento de calor no volume de controle é igual a:

$$\frac{\sigma \cdot (T_{chapa}^4 - T_{papel}^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_{Al}}{\varepsilon_{Al} \cdot A_{chapa}} \right) + \frac{1}{A_{chapa} \cdot F_{(chapa,Papel)}} + \left(\frac{1 - \varepsilon_{papel}}{\varepsilon_{papel} \cdot A_{papel}} \right)} = 61,7W;$$

sendo:

$$h_c \cdot A_{papel} \cdot (T_{papel} - T_{ar}) = 51,07 \text{ W (calor sensível).}$$

$$\dot{m}_v \cdot h_{Lv} = 10,10 \text{ W (calor latente).}$$

Correção do cálculo da transferência de calor da chapa para o ar utilizando os novos dados de entrada

Este incremento de calor de 12% e as mudanças de temperatura associadas à redução da temperatura da chapa para 525 K acarretaram em uma pequena redução na temperatura média do ar no interior do secador, que passa a ser de 310 K. Na tabela 4.2 são apresentados os valores das propriedades de transporte e termodinâmicas do ar para as novas iterações (utilizando-se o mesmo processo do fluxograma da figura 4.9).

Tabela 4.2- Resultados corrigidos para os cálculos de fluxo e transferência.

Iteração	T_{ar1} (K)	$P10^3$ (kg/m ³)	V (m/s)	$\nu10^6$ (m ² /s)	$\alpha 10^6$ (m ² /s)	Q (W)	Novo T_{ar} (K)
1	311	1124	0,40	29	41,21	563	309
2	309	1128	0,39	28,94	41,12	570	310
3	310	1128	0,397	28,94	41,12	567	310

Correção dos cálculos de transferência de calor e massa do papel para o ar:

O impacto maior desta nova temperatura do papel está na mudança da temperatura do filme sobre sua superfície e conseqüentemente, das propriedades termodinâmicas do ar nesta região. Os novos valores ficam:

$$Re = 13047$$

$$Nu = 67,45$$

$$h_c = 3,19 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$\frac{h_c}{h_m C_p \rho} = \left(\frac{\alpha}{D} \right)^{1-c} = Le^{1-c} \approx 1$$

$$h_m = 0,0029 \text{ m/s.}$$

Taxa de secagem real:

$$\dot{m} = h_m \cdot A \cdot \rho_i \cdot (\omega_{pap} - \omega_{ar}) = 0,00205 \text{ g/s} = 7,412 \text{ g/h.}$$

4.4.3 Limites de cada etapa do processo de secagem:

As estimativas das proporções de umidade presentes em cada etapa são baseados em dados disponíveis em literatura.

A gramatura média do papel produzido em Itariri é igual a 100 g/m². As telas de suporte para a secagem da massa possuem dimensões de 40cm x 60cm. Ou seja, as folhas têm uma massa média de 24 gramas (massa seca em estufa).

A primeira etapa da secagem consiste na remoção de água pela simples ação da gravidade. Os efeitos da drenagem são mínimos, de forma que a consistência da massa sólida ainda é inferior a 10%.

Após esta etapa temos:

$$\text{Massa de água} = \text{Massa total} - \text{Massa seca} = (24/0,1) - 24 = 216 \text{ g.}$$

Na etapa seguinte, a prensagem remove mecanicamente a água, elevando o teor de sólidos a 45%. Neste caso, a falta de um aparato tecnológico mais desenvolvido pode ser compensada pela aplicação de pressão de maior duração em cada folha individualmente, através da qual podemos obter:

$$\text{Massa de água} = \text{Massa total} - \text{Massa seca} = (24/0,45) - 24 = 29,33 \text{ g.}$$

A última etapa de secagem, que ocorre pela evaporação da água presente no papel, é limitada pelo teor de umidade de equilíbrio. Este valor depende da estrutura do sólido e da umidade relativa do gás utilizado para o processo de secagem, que no caso presente é o ar. Para grande parte dos materiais celulósicos, na umidade relativa média do município de Itariri (85%), o teor de umidade de equilíbrio é de 20%, conforme o diagrama da figura 4.12. Devemos ressaltar que este valor é uma estimativa, e caso ele seja inferior, 20% é uma consistência que permite que o papel seja retirado do secador sem qualquer dano à sua estrutura:

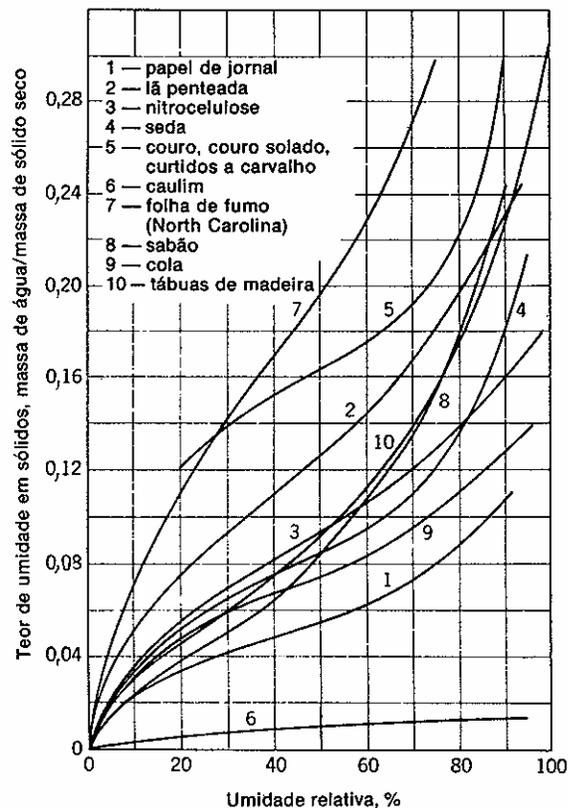


Figura 4.12 – Curvas de umidade de equilíbrio para vários materiais. (FOUST, 1982)

A partir deste ponto, a continuidade de retirada de água é muito dificultada pela estrutura fibrosa que retém a umidade em sua estrutura. Essa dificuldade pode ser expressa pela relação entre a resistência interna à transferência de massa de uma

espécie e a resistência à transferência de massa desta mesma espécie na camada limite. Essa relação é conhecida como o número de Biot para transferência de massa:

Movimento de difusão interno da umidade na estrutura interna do papel:

$$N_{dif_int} = -D.A.\frac{\partial C}{\partial x} . \quad (3.21)$$

Transferência da umidade na camada limite:

$$N_{cam_lim} = h_m . A . (C_{sup} - C_{\infty}) . \quad (3.3)$$

Igualando as equações temos:
$$\frac{C_{interno} - C_{superficie}}{C_{superficie} - C_{\infty}} = \frac{h_m \cdot (e/2)}{D} = Bi_m . \quad (4.21)$$

$e/2$ = semi-espessura do papel

Para algumas superfícies celulósicas pesquisadas foram encontrados valores de coeficientes de difusão da ordem de 10^{-10} m²/s. A espessura média do papel produzido em Itariri é da ordem de 10^{-5} m (dados obtidos através das amostras obtidas na fábrica de Itariri e submetidas a análise no laboratório de qualidade da Suzano Papel e Celulose). O coeficiente de transferência de massa é 0,0029 m/s. Portanto o Bi_m é da ordem de 10^2 , ou seja, o gradiente de concentração entre interior do papel e a superfície é muito maior que o gradiente entre a superfície e o filme de ar. Desta forma podemos concluir que a continuidade do processo de secagem a partir deste teor é absolutamente ineficaz.

Ao final da etapa de secagem, finalizando o processo com o teor de 20% de umidade, temos:

Massa de água = Massa total – Massa seca = (24/0,8)-24 = 6 g (por folha).

Portanto, a massa total a ser retirada nesta etapa é de 23,33 g.

Tempo de secagem

Lembrando que a taxa de secagem obtida nos cálculos é de 0,00205 g/s, o tempo de secagem é de:

Tempo de secagem = $23,33/0,00205 = 11332 \text{ s} = 3,14 \text{ hs} = 3 \text{ horas e } 10 \text{ minutos}$ para cada bateria de 60 folhas.

4.5 Consumo de madeira

A transferência de calor total transferido da chapa para o ar do secador e para as folhas de papel no processo de secagem é de 567 W, conforme a tabela 4.2.

Tanto a parede da fornalha, quanto a parede do secador serão projetados com material refratário para que as perdas de calor sejam mínimas. Para os materiais refratários utilizados, a emissividade é de 0,94. A emissividade da madeira utilizada na cobertura é de 0,93. Assim podemos estimar a transferência de calor por radiação para as paredes e cobertura do secador utilizando os fatores de forma calculados anteriormente.

$$\frac{1 - \varepsilon_{\text{parede}}}{\varepsilon_{\text{parede}} \cdot A_{\text{parede}}} \cong 0 .$$

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \frac{\sigma \cdot (T_{\text{chapa}}^4 - T_{\text{parede}}^4)}{\left(\frac{1}{A_{\text{chapa}} \cdot F_{(\text{chapa}, \text{Parede})}} \right)} = 16,81W .$$

Admitindo a temperatura da parede em equilíbrio com o ar.

Portanto, o fluxo de calor total cedido pela chapa ao volume de controle é de 583,8 W. O fluxo de calor total fornecido para o secador (composto por trinta unidades do volume de controle) é de 17,51 kW. Admitindo que a chapa esteja em equilíbrio e trabalhando em regime permanente, este é o valor energético a ser recebido pela queima da madeira.

Nos processos de queima de combustíveis sólidos, existe uma série de dificuldades no controle de temperatura, pois a velocidade da queima depende do excesso de ar, umidade do combustível, granulometria, estado de pulverização, processo de mistura com o comburente e outros fatores ligados à característica do próprio combustível. A oscilação acentuada no rendimento operacional se deve principalmente a alimentação manual que exige uma ampla boca de entrada de material combustível, o que provoca uma significativa perda de calor e a entrada de grande excesso de ar.

Através dessas variáveis se faz uma série de estimativas relacionadas às perdas de calor em fornalhas. As mais modernas possuem uma perda inferior a 10%. Nas fornalhas de pequeno porte com queima de toras de madeira, segundo PERA (Segunda edição), as perdas chegam a 35%.

Taxa de queima da madeira.

O poder calorífico inferior do pinus é de 2400kcal/kg, ou seja, 10.032 kJ/kg. Portanto,

$$(\dot{M}_{mad} \cdot PCI) \cdot 0,65 = \dot{Q}_{Total} \quad . \quad (4.22)$$

$$(\dot{M}_{mad} \cdot 10.032) \cdot 0,65 = 17,51 \times 3600 ,$$

$$\dot{M}_{mad} = 9,67 \text{ kg/h.}$$

Para a secagem de uma bateria de 60 folhas em 3 horas e 10 minutos, é necessária a queima de 9,67 kg de pinus por hora.

4.6 Resultados

O trabalho em três ciclos de secagem por dia resulta em uma produtividade de 180 folhas ao dia, ou seja, 5400 folhas ao mês sem riscos de grande oscilação. Esta nova produtividade equivale a 208% da produtividade atual que é muito dependente dos fatores climáticos.

Os custos operacionais são mínimos, pois conforme citado anteriormente, o fornecimento de madeira é constante, sem custos e ocorre sempre que solicitado.

Esta produtividade é calculada em função da geometria do secador, projetado em função da disposição atual da fábrica.

4.6.1 Estimativa dos custos de implantação.

Os custos de tijolos vermelhos, cimento, areia, chapas de alumínio e chaminés foram pesquisados em estabelecimentos comerciais do setor. Os valores foram fornecidos pelos comerciantes com base na construção das paredes do secador, sendo 2 paredes de 10m² e 2 paredes de 1m², além das chapas de alumínio de 0,5 mm de espessura, que devem cobrir a área de 10m².

- 75 tijolos/m ² x 22m ² = 1650 tijolos	Custo = R\$ 757,00
- 09 sacos de cimento	Custo = R\$ 108,00
- 01m ³ de areia	Custo = R\$ 68,00
- chapas de alumínio (10m ²)	Custo = R\$ 200,00
- 02 chaminés de aço-carbono com chapéu e base adaptada (4m de altura x 30 cm de diâmetro)	<u>Custo = R\$ 1400,00</u>
	Total = R\$ 2.533,00

4.6.2 Retorno do investimento:

O papel da fábrica de Itariri, diferentemente das indústrias estruturadas, é comercializado por unidade, a um preço de R\$ 2,00 a unidade. Com a produção de 5400 folhas por mês, o custo referente à construção do secador é recuperado em menos de um mês, já considerando a mão de obra utilizada, que é realizada pelos próprios funcionários da fábrica e desconsiderando os demais custos fixos da fábrica, que atualmente estão computados e cobertos pelo rendimento proveniente das 5000 folhas mensais.

5 Considerações Finais e Discussão sobre os Resultados

Utilização do Pinus como fonte de energia térmica

O panorama atual da fábrica artesanal de Itariri, seguindo as condições econômicas e de infra-estrutura do município em que se encontra, inviabiliza um projeto dependente de maquinário cuja demanda de energia elétrica seja superior ao consumo doméstico padrão da região. O caráter rústico da produção caracteriza o aspecto artesanal e os objetivos desta fábrica estão mais voltados para o lado de desenvolvimento comunitário e inclusão social do que para o crescimento profissional de uma empresa inserida em um contexto de economia de mercado. Partindo deste princípio, buscou-se no presente trabalho o desenvolvimento de um projeto que apresentasse uma independência em relação ao fornecimento de energia elétrica priorizando fontes alternativas de energia.

A abundância de Pinus utilizados para a queima direcionou o projeto para a utilização de energia térmica, para que através do aquecimento do ar dentro de uma câmara, pudesse ser gerado um fluxo que permitisse a renovação constante do ar de secagem e forçasse um fluxo de ar sobre o papel intensificando as trocas de calor e massa.

Limites do processo de secagem

A taxa de secagem através da utilização de convecção natural é limitada a fatores climáticos da região, mais especificamente aos valores elevados de umidade. Apesar da não utilização de equipamentos como ventiladores, no projeto proposto os cálculos indicaram uma velocidade de ascensão do fluxo de ar de aproximadamente 0,4 metros por segundo e uma taxa de secagem de 7,412 gramas por hora, o que permite a secagem de 60 folhas a cada três horas aproximadamente. Para o volume de controle utilizado para os cálculos (figura 4.5), que possui um comprimento de 30 cm e largura de 1 m, tem-se a vazão mássica

aproximada de 120 g/s, ou seja, a umidade retirada do papel não provocará uma elevação significativa na umidade do ar de secagem, não havendo risco de saturação deste.

Todo material fibroso possui um teor de umidade de equilíbrio que depende de sua estrutura interna e da umidade relativa do ambiente ao qual é exposto. A partir dos valores de teor de equilíbrio de vários tipos de materiais celulósicos estima-se o teor de equilíbrio para a fibra do pseudocaulo da "*Musa Cavendishii*" em 20%. Caso o valor real seja superior aos 20%, o papel apenas permanecerá na câmara de secagem durante um período um pouco maior do que o calculado, o que não traz nenhuma consequência significativa para o produto ou para o processo. Caso o valor seja inferior, com 20% de teor de umidade o papel já estará com uma consistência que permite a sua retirada do secador e manuseio sem sofrer qualquer dano. Durante o período de armazenagem, o papel perderá essa umidade remanescente para o meio ambiente, ainda que de forma bem mais lenta que no secador, até que seja atingido o equilíbrio.

Através do gráfico de secagem de materiais fibrosos (figura 3.1) conclui-se que atingido o teor de equilíbrio, todo esforço na continuação da secagem torna-se extremamente dispendioso e sem a obtenção de sucesso, pois a superfície do papel já estará seca e para que a remoção de água tenha continuidade, a umidade deve migrar das regiões internas da estrutura fibrosa. A baixa difusividade mássica da água através dos meios celulósicos, que é da ordem de 10^{-10} m²/s, associado aos coeficientes de película do filme de ar sobre o papel e à espessura da folha determinam a relação na qual a resistência ao movimento da água no interior do papel é muito superior à resistência a transferência de massa de água da superfície para o filme de ar (Número de Biot para transferência de massa). Desta forma, é imposto um limite natural para o processo de secagem, que foi utilizado como parâmetro para o cálculo de tempo de permanência do papel na estufa.

Sensibilidade do processo

Os cálculos realizados na proposta do secador foram feitos em função dos valores médios de temperatura e umidade para a região da fábrica em questão. Apesar de serem estes valores bem representativos para o processo, deve-se considerar a sensibilidade no desempenho da secagem em relação às variações das condições climáticas (principalmente a umidade relativa do ar), de forma que se tornem mais precisos os cálculos, permitindo assim um planejamento mais acurado da produção. A variação da umidade relativa impacta diretamente nas propriedades do ar que circula na câmara e altera significativamente o potencial de transferência de massa, alterando como consequência o tempo de secagem. Utilizando a mesma rotina de cálculo, modificando as condições de umidade relativa, obtêm-se os tempos de secagem, conforme a tabela 5.1:

Tabela 5.1- Tempo de secagem em função da umidade relativa.

Umidade Relativa (%)	60	70	85	90	99
Tempo de secagem.	55min	1h e 15min	3h e 10min	3h e 45min	15h

Discussão sobre o método de cálculo utilizado

Os cálculos do processo de secagem foram divididos em três etapas que interagem entre si, tendo sido necessário criar um fluxograma que se repete até que fosse atingida a convergência dos valores. A primeira etapa consiste na modelagem do fluxo de ar do meio externo para o interior da câmara, movimento este que depende da diferença de pressão entre os dois meios e das perdas de carga localizadas distribuídas inerente ao movimento do fluido (ar) na estrutura. A segunda etapa consiste no cálculo da transferência de calor da chapa de alumínio aquecida para o ar interno do secador através da convecção natural. Este ar aquecido e ascendente atua como um fluxo forçado que incide sobre as telas com o papel úmido e a

transferência de calor e massa do papel para o ar corresponde à terceira etapa de cálculo.

Discussão sobre a utilização das chapas de Alumínio

Os principais fatores que interferem na velocidade da secagem são a temperatura e a umidade do ar. Desta forma, o aumento na temperatura da chapa da base do secador pode intensificar o processo de secagem, no entanto, deve-se trabalhar respeitando-se os limites de temperatura a que são submetidas as folhas de papel. Para que a temperatura do ar seja a máxima possível sem ultrapassar os limites de temperatura do papel, é necessário que a superfície metálica da base do secador tenha um baixo poder emissivo, uma vez que o calor transferido através da radiação é absorvido em grande quantidade pelo papel, e o ar praticamente não o absorve. Como material de baixo poder emissivo para a base do secador, foi selecionado o Alumínio. É natural que esse material perca a polidez e fique enegrecido, tendo assim seu poder emissivo aumentado. Para retardar esse processo, faz-se necessário a retirada e limpeza diária destas chapas, para que o processo de secagem tenha o bom desempenho constante. Outra alternativa, que poderá minimizar os custos, é a utilização de chapas de ferro fundido, que possui um valor de mercado inferior ao do alumínio. No entanto, para que seja mantida a baixa emissividade, deverão ser utilizadas lâminas de alumínio sobre o ferro fundido.

Discussão sobre os custos financeiros e aumento da produtividade

Os custos financeiros associados à implantação do projeto são restritos a compra do material para a construção do secador. Os custos operacionais são idênticos aos presentes na planta atual. Os valores financeiros foram estimados a partir de pesquisas e orçamentos realizados em estabelecimentos comerciais e páginas eletrônicas do setor de materiais de construção. Estes valores provavelmente não são muito precisos, mas servem como uma boa referência para os custos relativos a implantação deste projeto.

A execução do projeto acarretará em um aumento de 108% em relação à produtividade atual (o método até então utilizado pode ser continuado em paralelo). Com a secagem de 60 folhas a cada 3 horas e 10 minutos, a produtividade obtida apenas no novo secador passará a ser de 5400 folhas mensais no formato padrão da fábrica de Itariri (60 cm x 40 cm). Além do aumento da produtividade, a secagem em uma câmara fechada reduz significativamente a dependência dos fatores climáticos, reduzindo-se assim as oscilações desta produção.

Queima da madeira e aproveitamento energético

Toda a madeira de Pinus utilizada como fonte de energia é cedida em grande quantidade sempre que solicitado. Essa madeira é fornecida por organizações ligada aos feirantes da região que descartam grande quantidade de paletes velhos ou quebrados. O risco de interrupção deste fornecimento é inexistente.

Para a secagem de 60 folhas a cada 3 horas e 10 minutos, é necessária a queima de 9,67 kg por hora, ou aproximadamente 30 kg, que corresponde ao peso aproximado de um palete, a cada ciclo. Para chegar-se a este resultado, foram estimadas as perdas totais de calor, incluídas as perdas para o meio ambiente durante a alimentação manual de madeira e as perdas pelos gases de combustão, entre outras. Peragallo (1995) analisou diversas fornalhas e estimou uma perda total de 35% para aquelas que utilizavam lenha como combustível e eram alimentadas manualmente. A fornalha do secador proposto possui duas saídas para os gases de combustão. O objetivo de se ter duas saídas é uniformizar ao máximo a temperatura dos gases de combustão ao longo da chapa. As chaminés para a saída dos gases possuem quatro metros de altura e 30 cm de diâmetro. Sua presença tem como principal objetivo, a manutenção da salubridade do ambiente local. As dimensões determinadas para elas são baseadas em observações de fornos à lenha de médio porte.

Valor econômico e social do produto

Um ponto que deve ser destacado em relação à utilização de convecção natural é que a grande demanda de produtos desta fábrica por parte dos clientes, está inserida em um conceito de produção artesanal, com gasto energético mínimo e de forma absolutamente sustentável. Em outras palavras, a forma com a qual o produto é fabricado, utilizando como fonte de energia térmica um recurso renovável, agrega valor e possui um apelo comercial significativo para o público que o adquire, e atrai a atenção para uma comunidade que atua de forma sócio-ambientalmente responsável.

6.Referências Bibliográficas

ARORA, H.L.. **Biomassa – Fundamentos e aplicações Tecnológicas** – Departamento de Química Analítica e Físico-química e Núcleo de Fontes não convencionais de Energia da Universidade Federal do Ceará, 1984. 644p.

ASHRAE 2003; **ASHRAE Applications Handbook** – Chapter 28. ASHRAE Atlanta

CARVALHO, E.R. **Investigação sobre incandescência em madeira** – Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2003. 82p.

CEDRAN,L. - **Cartilha do Papel Artesanal**; Páginas & Letras Editora e Gráfica, 1997.

COELHO,R.R.P.;MATA, M.E.R.M.;BRAGA,M.E.D. **Alterações dos componentes nutricionais do pseudocaule da bananeira visando sua transformação em palmito** - Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.3, n.1, p.21-30. 2001.

COSTA, V.J. - **Modelo matemático para a combustão de carvão pulverizado e sua interação com a água** – Dissertação de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina. 2002. 190p.

DAVID, A.C. - **Secagem Térmica de lodos de esgoto e determinação da umidade de equilíbrio** – Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, 2002. 151p.

DOS SANTOS, G. R. V. **Otimização da Secagem da Madeira de Eucalyptus grandis**. Piracicaba, 2002. 65p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

FIORAVANÇO, J.C.; **Mercado mundial da Banana: Produção, comércio e participação brasileira.** Informações Econômicas, SP. V.33, n. 10, out.2003.

FOUST,A.S.; WENZEL,L.A.; CLUMP,C.W.; MAUS,L.; ANDERSEN,L.B. **Princípios das operações unitárias.** Editora Guanabara Dois S.A., Segunda Edição (1982). Parte 2, cap.18.

FOX, R. W.; McDONALD, A.T, **Introdução à Mecânica dos Fluidos** – LTC Editora, Quarta edição (1998). 662p

GUTIÉRRES,L.,ZULUAGA,R.,CRUZ,J.,GAÑÁN,P. – **Influencia Del Tratamiento con Vapor Sobre la Estructura y Comportamiento Físico-Mecânico de Fibras de Plátano** – Información tecnológica – Vol.16 N° 2 – 2005, págs: 15-21. Grupo de Investigación sobre nuevos materiales, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin – Colombia.

IDELCIK,I.E., **Memento des pertes de charge** – Enrolles Editour Paris; Tradução da publicação original feita em Moscou 1960.

INCROPERA, F. P. ; DE WITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor e de massa.** LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Quarta edição, (1998).494p.

IPT-INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; ESCOLA SENAI “THEOBALDO DE NIGRIS” – **Celulose e Papel – Tecnologia de fabricação da pasta celulósica – Volume 1.** Editoração: Departamento de Divulgação do IPT-1988. Segunda edição. 559p.

IPT-INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; ESCOLA SENAI “THEOBALDO DE NIGRIS” – **Celulose e Papel –**

Tecnologia de fabricação da pasta celulósica – Volume 2. Capítulo 3.
Editoração: Departamento de Divulgação do IPT-1988. Segunda edição.

LIMA, O.C. ; PEREIRA,N.C.;MENDES,E.S.-**Análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada.** Maringá, v.24 p.1665-1671, 2002.

MANENTE, J.C.P.P; **Efeito do dióxido de enxofre e do ácido láctico na hidratação, rendimento e qualidade do germe de milho.** São José do Rio Preto, 2003. 117p. Dissertação (Mestrado) –Instituto de Biociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista.

MIKI, M.K.; **Utilização de polímeros para condicionamento de lodos de ETE para desidratação em filtro de prensa de placas.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, 400p. 1998.

PERA, H.; **Geradores de vapor** – Editora Fama, Segunda Edição.

ROJAS, M.L.B., **Caracterização de fibras de bananeira “Nanicão”, (Musa Grupo AAA, “Giant Cavendish”) como possível matéria-prima para produção de pasta celulósica para fabricação de papel.** Brasil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT, DPF - Agrupamento de Celulose e Papel.1996.

SIMÕES-MOREIRA, J.R.;**Fundamentos e aplicações da Psicrometria** – RPA Editorial, 194p. 1999

SMOOK, G. A., **Handbook for Pulp and Paper Technologists** – Vancouver: Angus Wilde Publications, 1994. 419 p.

SOFFNER, M. L. A. P., **Produção de Polpa celulósica a partir de engaço de bananeira** – Piracicaba, 2001. 49p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SUZANO PAPEL E CELULOSE, Material interno de treinamento técnico (2005).

ALESP - Indicadores do Estado de São Paulo. Acesso em www.al.sp.gov.br

Prefeitura de Itariri. Acesso em www.itariri.sp.gov.br

Informações sobre as características econômicas, sociais e climáticas / geográficas do município de Itariri - Acesso em:

<http://www.valedoribeira.com.br/itariri/informacoes/index.asp>