

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Optimização do Processo de Secagem e
Transporte de Fibra***

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial

Pedro Reis



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Departamento de Engenharia Química

Orientador na FEUP: Professor Doutor Adélio Mendes

Professora Doutora Luísa Carvalho

Orientador na empresa: Engenheiro António Maravalhas

Março de 2008

Agradecimentos

À Professora Luísa Carvalho por todo o apoio, disponibilidade que sempre me dedicou ao longo deste trabalho. Agradeço também as facilidades que me concedeu para que pudesse realizar o meu trabalho da melhor forma possível.

Ao Engenheiro Maravalhas pela orientação e apoio demonstrados ao longo deste projecto, assim como pelos inestimáveis ensinamentos que me transmitiu.

Ao Professor Adélio, quero manifestar um profundo reconhecimento pela confiança que sempre me dedicou. Agradeço também a oportunidade de trabalhar sobre um tema tão interessante.

Ao Professor Jorge Carvalho por todo o apoio.

A todos os colaboradores da SONAE indústria em Mangualde que me apoiaram e ajudaram a realizar este trabalho da melhor forma possível. Um profundo agradecimento pela forma como me receberam e acolheram, facilitando todo este trabalho.

À SONAE pelo subsídio atribuído.

À Sara Pereira, quero manifestar o meu profundo agradecimento por todo o apoio e incentivo que sempre dedicou.

Um especial agradecimento à minha mãe e ao meu irmão pelo incansável apoio e encorajamento.

Resumo

Este trabalho visa o estudo de um sistema de controlo do processo de secagem e transporte pneumático da fibra numa indústria produtora de painéis de aglomerados de fibra de média densidade (MDF), que é extremamente importante garantindo um teor em humidade da fibra óptima ao processo de prensagem final, 9 - 12%. O transporte pneumático é de extrema importância devendo poder aquecer a fibra antes de esta ser prensada para formar o painel final de MDF, reduzindo o tempo de prensagem do colchão de fibra e consequentemente aumentando o volume de produção. Com base na relação de equilíbrio ar/madeira, estudaram-se estes dois processos com o objectivo de otimizar as variâncias na humidade final da fibra. Estudou-se a possibilidade de controlo do secador e transporte pneumático por humidade relativa. Para isso aferiu-se os perfis de temperatura, humidade relativa, humidade da fibra ao longo do secador e analisou-se o comportamento da fibra face às propriedades do ar de transporte. A partir da análise do diagrama de *Mollier* para o ar humidificado, estudaram-se as condições necessárias ao aquecimento da fibra. Um sistema de controlo do secador por humidade relativa é apenas possível se a mistura ar/fibra estiver em equilíbrio a fim de corresponder a humidade relativa do ar à humidade contida na fibra. Verifica-se que o estado de equilíbrio é atingido no ciclone do secador. Consoante a humidade relativa do ar de transporte, este humidifica ou seca ainda mais a fibra. Assim, o controlo deste é necessário face à necessidade de prensagem de um colchão de fibra homogéneo em humidade. Para que o aquecimento da fibra seja possível sem que a quantidade de água contida seja alterada, é necessário manter a humidade relativa do ar de transporte igual à humidade relativa do ar de secagem. Garantindo humidades relativas equivalentes e a temperatura do ar de transporte superior à do ar de secagem, é possível um aumento na temperatura da fibra.

Palavras-chave:

Fibra de madeira, equilíbrio ar/fibra, humidade relativa do ar, temperatura do bolbo seco, temperatura do bolbo húmido.

Abstract

The aim of this thesis is the study of a control system for the drying and pneumatic transport of the fiber processes in an industry which produces medium density fiberboard (MDF). This control system is of utmost importance, providing optimal fiber humidity for the final pressing process (9 - 12%). The pneumatic transport is extremely important since it can warm the fiber before it is pressed to form the final MDF, reducing the mat pressing time and consequently improving production volume. Based on the air/wood balance ratio, these two processes were studied with the purpose of optimizing the final fiber moisture variances. A study was conducted on the possibility of controlling the dryer and the pneumatic transport through relative humidity. For that matter, the temperature, relative humidity and fiber humidity throughout the dryer profiles were measured and the fiber's behavior when faced to transport air was analyzed. From *Mollier's* diagram for humidified air, the necessary conditions for heating the fiber were studied. A control system for the dryer through relative humidity is only possible if the air/fiber mixture is in balance, as to relate the relative humidity in the air with the humidity contained in the fiber. The balance condition is achieved in the dryer's cyclone. Depending on the transport air relative humidity, it humidifies or dries the fiber. Therefore, its control is necessary when confronted with the need of pressing a fiber bed homogeneous in humidity. For the heating of the fiber to take place without changing its water content, it is necessary to keep the relative humidity of the transport air the same as the relative humidity of the drying air. Ensuring similar relative humidity and keeping the transport air temperatures higher than the drying air's, it is possible to increase fiber temperature.

Keywords:

Wood fiber, air/fiber balance, air relative humidity, dry-bulb temperature, wet-bulb temperature.

Índice

1	Introdução.....	4
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projecto.....	4
1.1.1	Definição	4
1.1.2	Processo de Fabrico	5
	<i>Figura 1 - Diagrama processual de uma fábrica de MDF.</i>	<i>6</i>
1.1.3	Matéria-prima.....	6
1.1.4	Preparação de Estilha	10
1.1.5	Lavagem	11
1.1.6	Preparação da Fibra	12
1.1.7	<i>Blow-line</i>	15
1.1.8	Secagem	15
1.1.9	Transporte.....	18
1.2	Contributos do Trabalho.....	19
1.3	Organização da Tese	19
2	Estado da Arte	21
3	Materiais e Métodos	23
3.1	Método Experimental de Estudo do Secador e Transporte de Fibra	23
3.2	Comportamento do Secador de Fibra	24
3.2.1	Produção.....	24
3.2.2	Secador	25
3.2.3	<i>Dew Point</i>	29
3.2.4	Transporte.....	33
3.3	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM.....	36
3.3.1	MDF 6_B1	36
3.3.2	Velocidade do ar de secagem (MDF 6_B1 vs. MDF 6_B7)	37
3.4	Equilíbrio da Fibra/Ar de Secagem	41
3.4.1	MDF 18_N1.....	41

3.4.2	Equilíbrio (MDF 6_B7, MDF 6_B1* e MDF 18_N1)	42
3.5	CONTROLO	45
3.5.1	Controlo do secador	45
3.5.2	Transporte.....	48
4	Conclusões	51
5	Avaliação do trabalho realizado.....	53
5.1	Objectivos Realizados.....	53
5.2	Outros Trabalhos Realizados.....	53
5.3	Limitações e Trabalho Futuro	53
5.4	Apreciação final	54
Anexo 1	Diagrama de <i>Mollier</i>	59
Anexo 2	Curva característica do ventilador de secagem	61
Anexo 3	Balanço e Controlo Global ao Secador e ao Ar de Transporte.....	62
Anexo 4	Formulário.....	64

Notação e Glossário

T	Temperatura	°C, K
h	Humidade relativa do ar	%
	Humidade absoluta	kg água/kg ar seco
p_0	Pressão de vapor de saturação	cmHg
p_0 DP	Pressão de orvalho	cmHg
T DP	Temperatura de orvalho	°C
dT	Diferença entre a temperatura de exaustão e a temperatura de orvalho	°C
T_{db}	Temperatura do bolbo seco	°C
T_{wb}	Temperatura do bolbo húmido	°C
H, U	Humidade da fibra	%
	Humidade da fibra em equilíbrio	%
	Energia transferida para a fibra	kJ/s
P	Potência	kW
m_1	Massa da fibra húmida	kg
m_2	Massa da fibra seca	kg
EMC	Humidade da fibra em equilíbrio	%
W, K,	Coeficientes de adsorção	°C
K_1, K_2		
Δh_b	Entalpia de vaporização da água ligada às paredes celulares	kJ/kg
Δh_c	Entalpia de vaporização da água	J/kg
T_w	Temperatura da água	°C
T_a	Temperatura do ar	°C
R	Constante dos gases ideais	
p_v	Pressão parcial do vapor de água	cmHg
Q	Caudal volumétrico do ar	m ³ /s
A_s	Área da secção recta da tubagem	m ²
v	Velocidade do ar	m/s
T	Tensão da corrente	Volts
I	Intensidade da corrente	A
T_g	Temperatura do gás	K
A, B, C, D	Parâmetros da equação da capacidade calorífica dos gases ideais	

Lista de Siglas

MDF	Medium Density Fiberboard
ASTR	American Society for Testing and Material
UF	Ureia-Formaldeído
PF	Fenol-Formaldeído
MUF	Melamina-Ureia-Formaldeído
IC	Isocianato
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
COV	Compostos Orgânicos Voláteis

1 Introdução

Nota: Este documento para elaboração da tese serve apenas como guia e como tal não substitui o diálogo entre o aluno e o orientador para definição da estrutura e conteúdo da tese para cada caso concreto.

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

1.1.1 Definição

O MDF (medium density fiberboard), designado em português por placa de aglomerado de fibras de média densidade, é produzido a partir de fibras de madeira que são aglomeradas com resinas sintéticas e outros aditivos e posteriormente prensadas com calor e pressão pelo processo seco, daí resultando painéis com densidade da ordem de 600-800 kg/m³ [31]. O MDF apresenta-se como um produto derivado da madeira com melhores condições, de facto, para substituir a madeira maciça.

É um produto relativamente recente e foi fabricado pela primeira vez pela Allied Chemical, em 1966 em Deposit, Nova Iorque, para fazer concorrência ao Aglomerado de Partículas [6]. Em meados da década de 70, chegou à Europa, sendo produzido na antiga República Democrática Alemã e, posteriormente (1977), foi introduzido na Europa Ocidental, onde Espanha teve um papel crucial [20].

No ano de 1998, existiam, a nível mundial, cerca de 240 indústrias de MDF com capacidade instalada de 24,1 milhões m³/ano, destacando-se como principais regiões produtoras a Europa (38%), a Ásia/Oceânia (38%) e a América do Norte (20%) [30].

Todos os dias são descobertas novas aplicações para o MDF e actualmente a sua produção anual é de aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos [19]. A produção de MDF nos Estados Unidos da América aumentou 14,6% entre 2001 e 2002 [13], representando um dos maiores crescimentos nos mercados de derivados de madeira.

O MDF possui consistência e algumas características mecânicas que se aproximam às da madeira maciça, pelo que é reconhecido internacionalmente como substituto da madeira para diversas aplicações, apresentando algumas vantagens relativamente à madeira maciça e ao aglomerado de partículas, como por exemplo:

- Superfície lisa e homogénea;
- Adequada a acabamentos do tipo envernizado, pinturas em geral ou revestimentos com papéis decorativos, folheado de madeira ou PVC;

- Possibilidade de executar junções com vantagens em relação à madeira natural, já que não possui nós, veios reversos e imperfeições típicas do produto natural;

- A maioria dos parâmetros físicos de resistências é superior aos da madeira aglomerada, caracterizando-se também por possuir boa estabilidade dimensional e grande capacidade de maquinação;

- Melhores propriedades físicas em relação ao aglomerado de partículas, resistência à tracção, inchamento (24h), resistência à flexão, módulo de elasticidade, rugosidade da superfície, teor em humidade.

O MDF pode, no entanto, ser perigoso se não forem tomadas as devidas precauções de segurança, uma vez que contém uma substância tóxica, o formaldeído, que pode ser libertado aquando do corte e lixagem.

1.1.2 Processo de Fabrico

O processo de fabrico do MDF é similar ao do Aglomerado de Partículas. A diferença está na formação de matéria-prima homogénea, fibras, para o processo. Estas fibras são produzidas a partir de estilha de madeira através de um sistema de refinação de vapor pressurizado. Estilha, segundo a designação ASTM (American Society for Testing and Material), são pequenos fragmentos de madeira fatiados por um destroçador da indústria de papel. Seguidamente, é seca e transportada para uma formadora onde é distribuída de forma homogénea a fim de formar um colchão [20]. Este colchão é transportado para a prensa, onde é transformado em MDF, com ajuda de calor e pressão. Na *Figura 1* está representado uma unidade típica de MDF.

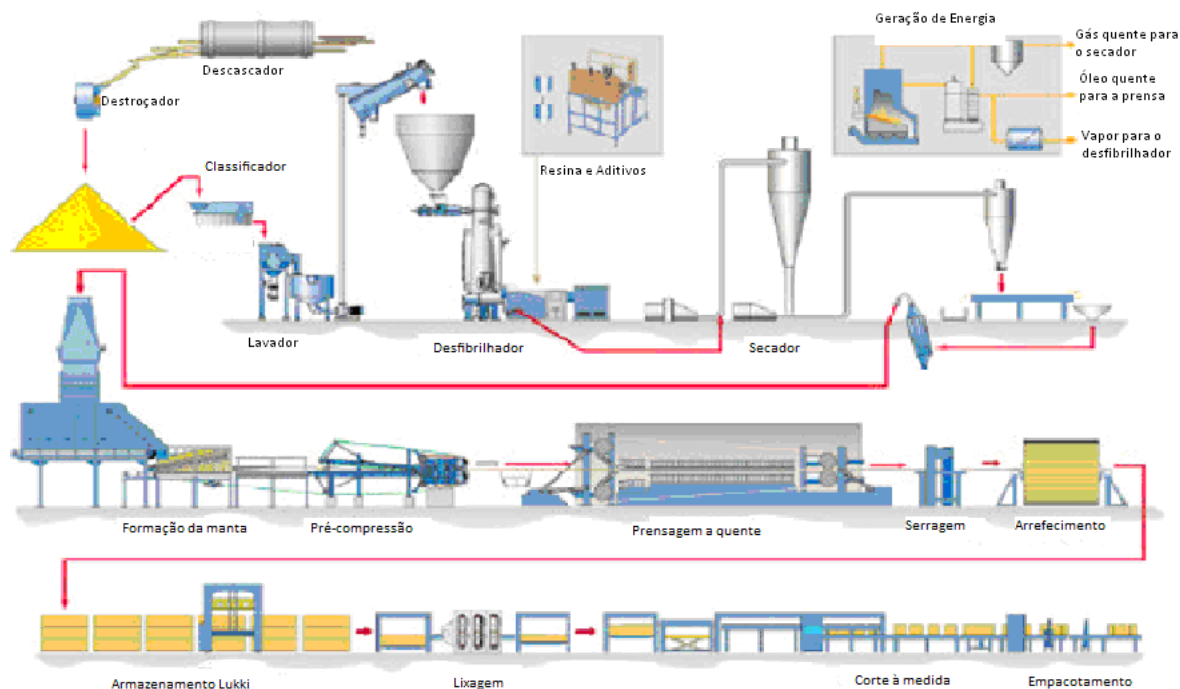


Figura 1 - Diagrama processual de uma fábrica de MDF.

1.1.3 Matéria-prima

1.1.3.1 Madeira

De todas as variáveis a ter em conta no processo de fabrico de MDF, a espécie de madeira é sem dúvida a mais importante. Interage com todas as variáveis presentes no processo. A sua influência é de tal ordem importante que determina:

- Características finais da placa de MDF;
- A escolha do tipo de resina;
- A humidade das fibras, já que existem espécies onde o controlo do processo de secagem da fibra é maior;

Diferentes tipos de madeira são usados nesta indústria, como troncos de madeira de pequena dimensão (rolaria) e desperdícios de serração (costaneiro e estilha). A indústria de MDF pode ainda usar madeira resultante de outras fontes, como resíduos provenientes da exploração florestal, madeiras de qualidade inferior (não industrializáveis de outra forma), reciclagem de madeira sem utilidade (demolições, etc.), entre outras.

O fabrico de MDF na indústria moderna permite usar uma vasta gama de fibras de madeira. No entanto, a melhor matéria-prima encontra-se na madeira macia, devido à robustez e comprimento das suas fibras. A morfologia da fibra é de extrema importância no

desenvolvimento das propriedades do painel de MDF [30]. Xing et al. (2004a) sugere que, para uma mesma espécie, a área superficial específica (m^2/g) é inferior para as fibras longas quando comparadas com as mais curtas devido à sua largura. Assim, para um dado tipo de resina, a resina contida por unidade de área superficial deve ser maior para fibras longas do que para fibras curtas. Uma maior quantidade de resina contida por unidade de área resulta, normalmente, num painel com propriedades mecânicas melhores.

Uma vez que a maioria dos mercados Norte Americano e Europeu se encontra próximo de áreas onde a madeira dura predomina e dado que o custo do transporte é, cada vez mais, um factor significativo nas despesas finais, as empresas começaram a optar por introduzir madeira dura no processo de fabrico. Chegou-se, no entanto, à conclusão que alguma madeira dura, especialmente a madeira mais macia das madeiras duras, daria origem a painéis de MDF de boa qualidade.

A figura seguinte ilustra 14 elementos básicos da madeira, 10 dos quais são resíduos de madeira não adequados à utilização em contraplacados ou como madeira maciça.

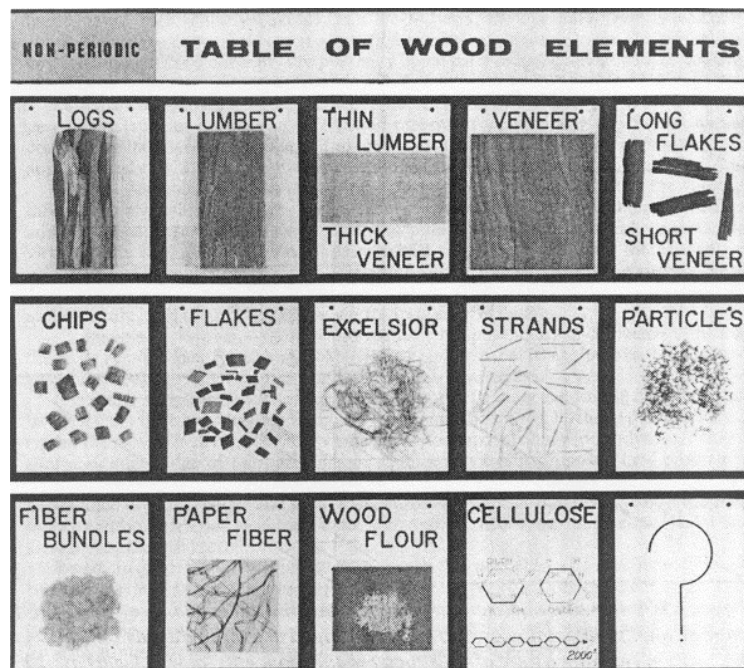


Figura 2 - Os diversos elementos que se podem obter a partir da madeira [20].

1.1.3.2 Resina

As resinas sintéticas são componentes fundamentais no sucesso do desenvolvimento dos aglomerados de fibras. São quatro os tipos de resinas mais utilizadas. A resina composta por ureia-formaldeído (UF) é de longe a mais usada, seguida das resinas de fenol-formaldeído (PF), melamina-ureia-formaldeído (MUF) e isocianato (IC).

Qualquer que seja a resina utilizada, ela precisa de ser “personalizada” à medida dos factores que influenciam a reacção e a distribuição da mesma:

- Espécie de madeira;
- Humidade;
- Blow-line (distribuição);
- Secagem;
- Tempo de prensagem;
- Condições de prensagem;

Resinas UF derivam de formaldeído e de ureia, os quais são sintetizados a partir derivados de gás natural. Estas resinas têm a vantagem de serem as mais baratas, de fácil manuseamento e de cura (reacção de polimerização) rápida na prensa. Para além disso, são resinas incolores e quando reagem na prensa para formar a placa final, não induzem qualquer tipo de cor à placa. No entanto, têm a desvantagem de não oferecerem resistência à imersão em água. A gama de temperaturas utilizada (10 a 100 °C), a velocidade de cura (de alguns segundos a algumas horas) e a facilidade de adaptação das suas formulações têm contribuído para a sua utilização no fabrico de contraplacados, aglomerados de partículas, MDF [20].

As PF são mais caras e têm um tempo de cura maior do que as resinas de ureia. Necessitam de temperaturas mais elevadas para que a cura se dê (121 - 140 °C) [19]. Garantem uma enorme durabilidade e resistência à água. Quando curada, proporciona uma excelente estabilidade dimensional à placa.

Melaminas, tal como as fenólicas, são resinas que resistem melhor às condições atmosféricas do que as resinas compostas por ureia. Quando adicionada melamina às resinas UF a resistência à humidade aumenta, mas não garante a mesma fiabilidade para condições extremas de humidade. A proporção de ureia e melamina nas resinas MUF depende do tipo de aplicações das placas, isto é, depende do índice de humidade presente no local da aplicação.

As resinas IC são aquelas que dão origem a cadeias de uretano, formando ligações fortes com os grupos hidroxilo da madeira. Estas ligações são bastante resistentes à humidade, o que torna estas resinas concorrentes das resinas MUF e PF. Uma enorme vantagem da utilização

destas resinas é o facto de não ser necessária a diluição prévia e de não conterem formaldeído. Para uma mesma placa, os consumos de resinas IC são inferiores em relação aos da resina PF. A parafina, útil para a resistência da placa à humidade, pode ser completamente eliminada na medida em que os uretanos são por si só hidrofóbicos.

A quantidade de resina é um factor muito importante nas propriedades finais que se quer atribuir à placa. No entanto, devido ao preço, tenta-se reduzir ao máximo a quantidade de resina por placa. Nos Estados Unidos a quantidade de resina utilizada nas placas varia entre os 6 e 10%, para resinas de ureia, e 5 a 7% para resinas fenólicas [20].

Por último, é de salientar que o formaldeído em concentrações acima do limite é considerado cancerígeno. Como tal, as normas para as emissões de formaldeído das placas têm sido cada vez mais restritas. Por exemplo, a norma ENV 717-1 não permite que haja concentrações superiores a 0,1 ppm de formaldeído em espaços fechados. Assim, as indústrias de aglomerados e contraplacados têm vindo a usar resinas com fracções molares cada vez mais baixas, devido à presença de formaldeído livre.

Cerca de 90% de painéis em todo o mundo são revestidos com resinas UF [20]. Ao longo dos anos, muitos foram os laboratórios que em parceria com a indústria derivada de madeira, desenvolveram e estudaram este tipo de resina. Em 1960, um painel de 19 mm revestido com resina UF demorava dez minutos a curar na prensa. Hoje em dia, dependendo do sistema usado, este mesmo painel pode ser prensado em metade do tempo e, em muitos casos, até menos [20].

Resinas contendo formaldeído são produtos muito instáveis e as suas propriedades, como a viscosidade e o tempo de vida, vão depender da temperatura e das etapas de condensação. Dependendo da viscosidade e da razão molar, o tempo de vida da resina pode durar entre 1 a 3 meses. Quanto maior for a temperatura, menor será o tempo de vida [9].

1.1.3.3 Aditivos

Variadíssimos aditivos podem ser usados no processo de fabrico de MDF. A parafina é usada para resistir à absorção de água líquida, diminuindo o inchamento das placas, não resistindo, no entanto, à absorção de vapor de água. Proporciona ainda uma estabilidade dimensional à placa final. A quantidade de parafina aplicada varia entre 0,5 e 1%.

Para acelerar a cura da resina é introduzido no sistema um catalisador. A quantidade injectada vai depender da quantidade de resina a aplicar.

A prevenção de ataques biológicos e o apodrecimento das fibras faz-se com agentes preservadores ou preventivos.

O uso de produtos ignífugos tais como fosfatos, confere ao painel propriedades resistentes ao fogo.

1.1.4 Preparação de Estilha

1.1.4.1 Descascador

Como foi referido anteriormente, a madeira é alimentada às unidades de MDF de diferentes formas: rolaria, desperdícios de serração, entre outras. O tipo de madeira de eleição é a rolaria, preferencialmente a verde. Esta garante uma maior flexibilidade e estabilidade ao processo, dado ser um tipo de madeira mais homogénea. É aconselhável um tratamento prévio de descasque antes para que a madeira possa entrar no processo.

A casca da madeira ocupa um volume considerável na madeira. Consoante a espécie e o diâmetro, a casca pode ocupar um volume da ordem de 9-24% do volume total [28]. Em média, a indústria florestal desbasta 1,6 biliões US de metros cúbicos por ano. Se 10% dessa madeira for casca, isto significa que 0,16 biliões US de metros cúbicos são gerados na indústria de madeira [20]. Foram já feitos estudos visando a introdução da casca no sistema de produção de painéis. Na SIAF (SONAE indústria em Mangualde), a casca tem como única finalidade a queima.

O descasque da rolaria pode ser feito através de vários equipamentos:

- Lâminas rotativas, com uma passagem central para os troncos (ex. Valon Kone);
- Sistema de tambor, a casca é esmagada, quebrada e cortada através de fricção e choque entre os diversos troncos existentes no tambor e as lâminas existentes no seu interior (sistema usado na SIAF);
- Jactos de água são projectados a elevada pressão sobre a madeira.

Cinzas e areia (silica) são elementos que desclassificam os painéis finais. Esses elementos existem 10 a 20 vezes mais num tronco com casca do que num sem casca. Para além disto, o desgaste dos equipamentos é tanto maior quanto maior for a quantidade de areias que entram no processo. Introdução de casca no processo faz aumentar o consumo de resina.

Alguns parâmetros essenciais ao descasque são:

- Espécie de madeira;
- Humidade da madeira;
- Condições gerais da madeira, percentagem de ataques biológicos.

1.1.4.2 Destroçador

A rolaria desbastada é, então, encaminhada para um rolo munido de lâminas, o destroçador. Antes de entrar no destroçador, a madeira deve passar por um sistema de detecção de metais para minimizar o desgaste do equipamento. O destroçador, pré-calibrado, converte os toros de pequena dimensão em aparas de madeira, estilha, com um comprimento médio de 22-25 mm. O ângulo da lâmina deve assegurar que as fibras possam permanecer inteiras. O tamanho das partículas vai influenciar o comprimento das fibras, não se obtendo fibras longas quando se utiliza serradura ou "fitas" [1].

Após formação da estilha, esta é encaminhada, juntamente com a estilha já comprada, para os silos de armazenagem para a proteger de elementos climáticos, como ventos fortes.

1.1.5 Lavagem

Destroçada e armazenada, a madeira passa agora por um processo de selecção, a crivagem. A estilha é direccionada para crivos com duas malhas de diferentes dimensões com o intuito de garantir que apenas a estilha com comprimento médio de 22-25 mm e espessura média de 3-6 mm vá para o processo. A fracção de partículas finas é rejeitada pois contém areias e cascas, sendo aproveitada para queima, enquanto que a fracção de "grossos" é reintroduzida num destroçador e devolvida ao processo.

Para que os painéis finais tenham baixo conteúdo em impurezas minerais, a estilha deve passar por um processo de lavagem (*Figura 3*).

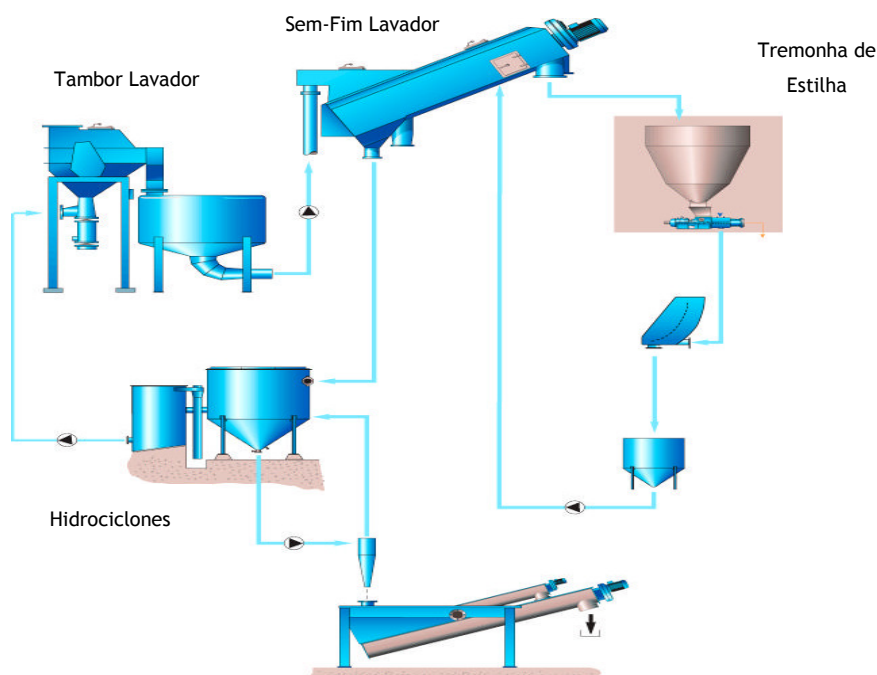


Figura 3 - Sistema de lavagem da estilha [21].

O processo de lavagem consiste em duas unidades principais: o tambor lavador, Scrap Separator, e o sem-fim de estilha, Screw Drainer. No tambor lavador, a água e a estilha são agitadas através de pás com um movimento rotacional, separando as areias, pedras e metais que possam ir com a estilha. A mistura de água com estilha é bombada para o sem-fim de estilha. Este, transporta a estilha até à tremonha de estilha, Surge Bin, e drena o excesso de água (contaminada). Antigamente, a estilha era transportada por meio de uma cinta para o sistema de refinação, mas hoje em dia é bombada através de um parafuso sem-fim, o que vai facilitar a remoção da água em excesso e permitir o pré-aquecimento da estilha [1].

A água contaminada proveniente do tambor lavador e do sem-fim é limpa e reciclada nas unidades Bow Screen e Hydro Cyclone.

Sabe-se que a contaminação mineral da madeira tem um efeito prejudicial no processo, nomeadamente na qualidade dos painéis. A lavagem da estilha apresenta vantagens importantes como a melhoria da qualidade dos painéis, a diminuição do consumo de energia e a redução do desgaste dos equipamentos. Para além disto, a lavagem da estilha facilita ainda o processo de desfibração.

1.1.6 Preparação da Fibra

Para se assegurar o sucesso na produção de MDF, a homogeneidade da fibra tem de ser garantida, sem lascas e com reduzida quantidade de partículas finas. São cinco os equipamentos que fazem parte do processo de refinação da fibra:

- Tremonha (Surge Bin);
- Sem-fim de alimentação ao pré-aquecedor (Plug Screw Feeder);
- Pré-aquecedor (Preheater);
- Desfibrador (Defibrator).

e que se encontram representados na *Figura 4*.

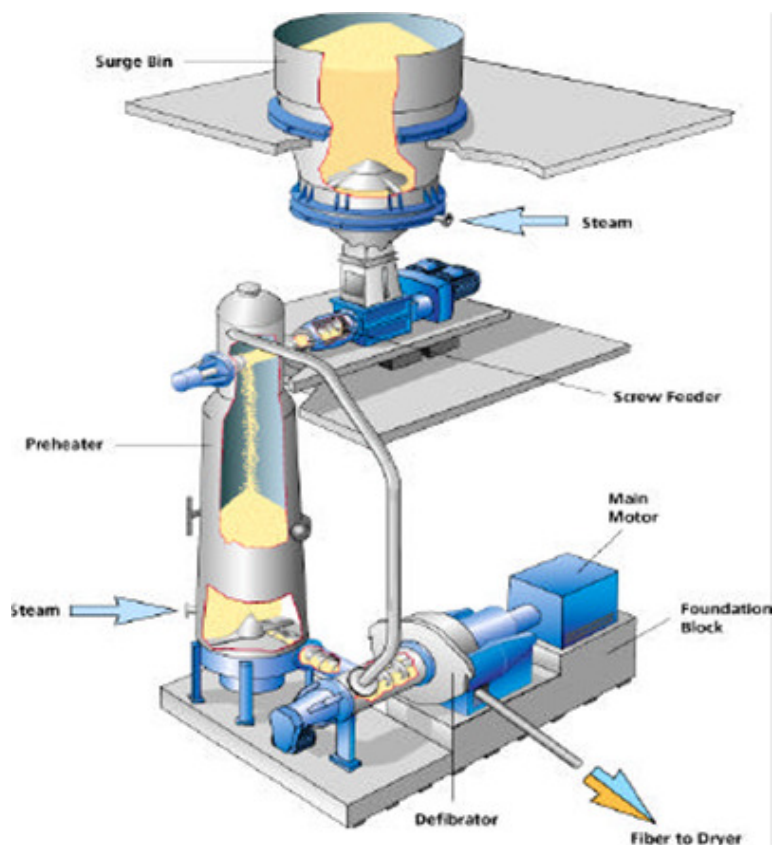


Figura 4 - Sistema de desfibrção [22].

A tremonha funciona como elemento intermediário de armazenagem entre a lavagem e a refinação. No fundo da tremonha, é injectado vapor de baixa pressão, que permite homogeneizar a humidade da madeira e pré-aquecer, a fim de facilitar a remoção das fibras da madeira. A homogeneização da humidade da madeira é crucial pois, para além de garantir a uniformidade do processo, facilita o amolecimento da lenhina. Desta forma, o ponto de amolecimento da lenhina é fortemente influenciado pelo teor em humidade, variando, por exemplo, desde 90 °C para lenhina com um teor em humidade de 27,1 % até 195 °C para lenhina anidra [12]. Na figura seguinte observa-se que quanto maior a temperatura de cozimento da madeira, menor o módulo de relaxação. Isto significa que quanto maior a temperatura atingida pela madeira, maior a facilidade por parte do refinador em desfibrá-la. No entanto, a temperatura atingida pela madeira não deverá ser demasiado elevada, a fim de evitar o escurecimento da madeira. A Figura 5 representa o módulo de relaxação de polímeros termoplásticos (celulose, lenhina, etc...) em função da temperatura de cozimento da madeira. Observa-se que quanto maior for a temperatura atingida pela madeira, mais fracas serão as forças de ligação da lenhina.

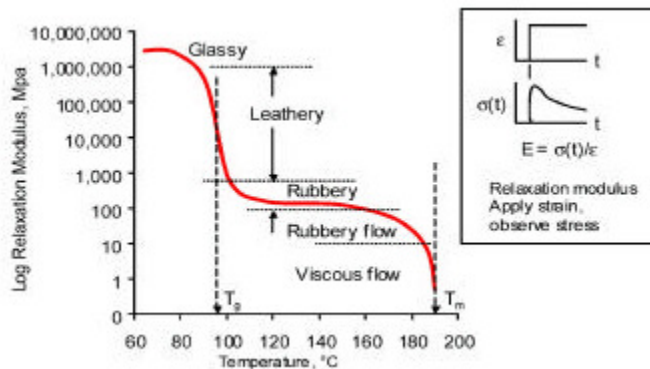


Figura 5 - Logaritmo do módulo de relaxa o vs. Temperatura em polímeros termoplásticos [22].

A alimenta o ao pré-aquecedor   garantida através de um parafuso c nico, o sem-fim de alimenta o. Este último espreme a estilha, removendo o excesso de água e conseqentemente homogeneizando a humidade nela contida, e garante que haja um fluxo contínuo ao pré-aquecedor, que se encontra a elevada pressão.

O pré-aquecedor   um reservatório vertical, onde a estilha fica retida durante 1 - 3 minutos e   aquecida com a ajuda de vapor saturado a 7 - 9 bar   temperatura de 170 - 180  C. Um tempo de reten o ideal minimiza a quantidade de energia necessária para desfibrar a madeira. No entanto, um tempo de reten o demasiado elevado pode provocar escurecimento das fibras. Uma vez cozida a madeira, esta alimenta o refinador através de um sem-fim.

Para garantir que exista um fluxo constante de estilha ao refinador, o sem-fim de extrac o do pré-aquecedor foi desenhado com um ligeiro formato c nico e de alimenta o lateral a um segundo sem-fim que alimenta o refinador. Assim, previne o fluxo de vapor, formado no refinador, contrário   alimenta o. O uso deste tipo de sem-fim elimina vibra es que poderiam ocorrer no fluxo da alimenta o ao refinador, assegurando uma desfibra o firme e a forma o de fibras mais uniformes.

A desfibra o ocorre na "câmara" de refina o, entre um disco rotativo e um disco fixo. As partículas grossas ou finas a  produzidas, dependem do espaçamento entre os discos, o qual   inversamente proporcional   energia consumida pelo desfibrador. Alguns autores defendem que 90-100% desta energia   transferida para a água (tanto a capilar, como a que se encontra ligada às paredes celulares). Neste trabalho, considerou-se que a totalidade da energia consumida pelo desfibrador   transferida para a água, evaporando-a.

1.1.7 *Blow-line*

Depois de a madeira ser desfibrada, a fibra é descarregada a grande velocidade do refinador através duma válvula de expansão (*blow-valve*) e dum tubo de expansão (*blow-line*) de pequeno diâmetro, em direcção ao secador. A adição de resina é feita através dum único orifício para a *blow-line* (à pressão de 2-2,7 bar), logo a seguir a um cotovelo, de forma que o tubo que vai em direcção ao secador é recto. A configuração da *blow-line* é de tal ordem que a mistura de fibra/vapor de água é descarregada a elevada velocidade no secador, para evitar acumulações e para facilitar a arrastamento da fibra por parte do ar de secagem.

1.1.8 Secagem

O secador numa unidade de MDF é um dos elementos mais importantes, a humidade contida na fibra tem influência em quase todas as variáveis. Este trabalho visa a uma melhoria no controlo do secador e transporte, reduzindo as variâncias na humidade da fibra.

1.1.8.1 Humidade

Muitos são os parâmetros que afectam o tempo de prensagem a quente dos aglomerados de fibra, como a temperatura de prensagem, humidade das fibras, espessura do painel, características da resina, etc.

Durante a prensagem, o calor inicial é transferido da prensa para as camadas exteriores do colchão de fibra, migrando para o núcleo do painel por condução. O calor aumenta a temperatura das fibras do colchão, plastificando-as, e activa a cura da resina, resultando no painel final de MDF. A velocidade de penetração do calor no colchão de fibra determina o tempo de prensagem, que é um elemento crítico na produtividade e no desenvolvimento das propriedades do painel, como o módulo de elasticidade, resistência à flexão, resistência à tracção e inchamento [20].

A humidade contida nas fibras que formam o colchão pode ser vantajosa e ao mesmo causar grandes problemas. Com um elevado índice de humidade nas fibras, o ciclo de fecho é rápido e exige menos pressões, sendo a espessura do painel final facilmente atingida. Fibras com teor de humidade elevado, particularmente as que constituem as faces do colchão, fazem aumentar a transferência de calor da prensa para o núcleo do painel. Este fenómeno dá pelo nome de *steam-shock* [20]. No entanto, o tempo de cura da resina, particularmente a que se situa no núcleo do colchão, pode ser impedido pelo excesso de humidade. Isto dá-se devido ao endurecimento das faces dos painéis impedindo o fluxo de calor para o núcleo. Para além disso, o elevado teor de humidade resulta num painel com baixa densidade no núcleo, baixa resistência à tracção, possibilidade de o painel rebentar, e problemas na adesão das fibras.

As vantagens do colchão ter um teor de humidade baixo resulta num painel com:

- Melhor resistência à tracção;
- Tempo de prensagem inferior;
- Perfil de densidades mais uniforme;

As desvantagens são:

- Elevada aptidão para absorção de água, inchamentos elevados;
- Faces rugosas devido à baixa plastificação das fibras;
- Reduzido índice de transferência de calor para o núcleo do colchão;

É difícil definir as condições óptimas de operação quando se considera a humidade das fibras e a sua distribuição no colchão. Teoricamente, a humidade teria que rondar valores como os 9 e os 12%.

A humidade na fibra (madeira) existe em duas formas: água ligada quimicamente às paredes celulares da fibra, e água capilar, nas cavidades celulares e intercelulares. Existe um limite na capacidade de as paredes celulares da madeira em absorver água. A esse fenómeno de saturação é chamado de Ponto de Saturação das Fibras, PSF, e é definido de diferentes maneiras:

“...diz-se que se atingiu o PSF quando a humidade atingiu aquela fase em que toda a água livre foi retirada da estrutura celular e se inicia o processo de dissecação das paredes...” - em “Madeiras Portuguesas”, Albino Carvalho.

“Conceptualmente, o teor de água em que apenas as paredes celulares estão completamente saturadas (somente água de saturação), não existindo água nos lumens, é chamado Ponto de Saturação das Fibras.” - em “Wood Handbook”.

“...é também considerado o ponto abaixo do qual as propriedades físicas e mecânicas começam a alterar em função do teor de humidade.”- em “Wood Handbook”.

1.1.8.2 Secador

Os diferentes tipos de secadores (pneumáticos) usados seguem o princípio de transporte rápido a elevadas temperaturas. A secagem é acompanhada por fenómenos de transferência de calor (convecção e condução) e transporte [20]. Estes secadores são bastante eficientes. No entanto, para elevado volume de produção exige um maior volume por unidade de tempo do ar de secagem debitado pelo secador.

Espécies que contenham elevada quantidade de água tornam-se mais dispendiosas, porque necessitam de maior quantidade de energia na secagem, e em alguns casos provocam superfícies frisadas nas fibras o que dificulta a distribuição da cola nas superfícies, necessitando de maiores quantidades de cola. Pelo contrário, espécies com um elevado índice de humidade geram menor percentagem de partículas finas e de rupturas nas fibras. Todos estes factores têm de ser avaliados na selecção de espécies, na área de construção da fábrica, no projecto da fábrica e finalmente na própria operação da unidade fabril.

Existem dois tipos de classificação para secadores, secadores horizontais de rotação e secadores horizontais fixos. Os secadores de horizontais podem ser de um ou dois estágios. O secador de um estágio consiste numa tubagem com 69 m, ou mais, de comprimento e 1,37 m de diâmetro. O secador de dois estágios promove a secagem em dois passos num comprimento total de tubagem de 122 m. No primeiro estágio são usadas temperaturas mais elevadas (200 a 316°C). No segundo estágio, as temperaturas rondam os 38 - 82°C. Em ambos os casos, é usado um sistema pneumático que permite o transporte e também a secagem da fibra [20].

A secagem da fibra pode ser efectuada por gases resultantes da queima de gás natural ou liquefeito, óleos de diferentes tipos, biomassa. A biomassa tem sido cada vez mais o material combustível da preferência deste tipo de indústrias, devido ao aumento do preço e da reduzida eficácia dos combustíveis fósseis. Por outro lado a biomassa possui um inconveniente, a quantidade de água que se liberta na combustão. Para além da humidade que a biomassa possui, em média 50% kg água/kg madeira seca, existe ainda água que resulta do processo de combustão.

Os gases libertados durante a combustão arrastam cinzas com eles. As cinzas são um produto que desclassifica os painéis de MDF. Sendo assim, os gases quentes de combustão, após a sua formação, são encaminhados para os policlones onde são depositadas as cinzas. Os gases desprovidos de cinzas são então encaminhados para o secador.

A determinação das dimensões do secador baseia-se essencialmente na quantidade de água a evaporar, na quantidade de fibra à entrada, e no tamanho e geometria das partículas. A humidade contida na fibra é um factor preponderante do ponto de vista energético, já que para evaporar 1 lb (0,454kg) são necessários 1,48 - 2,11 MJ [20].

Na produção de MDF, as fibras devem ser homogéneas quanto à quantidade de água. Antes da prensagem final, as fibras passam por um processo de secagem, cujo objectivo é reduzir a quantidade de água até aos 8-12 kg água/kg fibra seca.

A mistura de vapor de água, fibras húmidas e cola, proveniente da *blow-line*, alimenta o secador, onde se promove a secagem. Após atingir a humidade pretendida, esta é encaminhada para os ciclones, onde a mistura gás/sólido (ar húmido de secagem/fibra) é

separada. O ar húmido de secagem sai pelo topo do ciclone e a fibra cai no fundo do ciclone, atingindo as válvulas rotativas que a vão direccionar para um sistema pneumático de separação (*sifter*). O *sifter* apenas promove a separação do material pesado que sai do secador, como “grumos “ de fibra (novelos de fibra com grande quantidade de água), da fibra propriamente dita.

A secagem da fibra é feita pelo princípio “*FLASH-TUBE*”, o qual se traduz na secagem feita através de um secador pneumático de um estágio. A fibra é seca e transportada através de uma mistura de gases quentes provenientes da caldeira e ar fresco, isto é, ar atmosférico. A evaporação da água ocorre quando a fibra húmida entra em contacto directo com o ar quente de secagem, criando uma elevada taxa de evaporação à superfície da fibra. Neste fenómeno de transferência de calor, a temperatura do ar de secagem vai diminuindo à medida que a água vai evaporando. O processo de secagem não só consome enormes quantidades de energia, cerca de 30% da energia utilizada em todo o processo, como também afecta a performance da resina e consequentemente do painel final. Um outro aspecto importante inerente a todo o processo de secagem é o impacto ambiental. Por cada tonelada de fibra seca, o ciclone liberta cerca de vinte toneladas de gases de exaustão (mistura de ar, vapor de água e compostos orgânicos voláteis, COVs) [24].

1.1.9 Transporte

Uma vez no *sifter*, a fibra é separada das partículas pesadas através de um sistema pneumático. O ar que promove a separação é o mesmo que transporta a fibra do *sifter* até ao ciclone do *fiber bin* (silo de fibra), no qual a mistura ar/fibra é separada. A fibra cai para o *fiber bin* e o ar é enviado, pelo topo, para o *sifter*. Ao chegar ao *sifter*, esse ar é misturado com ar atmosférico aquecido de modo a permitir o aquecimento da própria fibra. De um modo geral, as propriedades do ar de transporte vão ser afectadas pela quantidade de ar fresco injectado e pelas suas características (condições atmosféricas).

1.2 Contributos do Trabalho

Como se poderá verificar ao longo do trabalho, a humidade é uma das variáveis do processo mais importantes dado influenciar quase todas as outras variáveis fundamentais ao fabrico de MDF. Por isso existe uma enorme necessidade de um controlo preciso e fiável em todos os equipamentos que tenham influência directa sobre a humidade da fibra. Na SIAF, isso não existe. O controlo que existe no secador tem um tempo de resposta longo e o equipamento de medição de humidade da fibra à saída do secador é pouco fiável. Além disso, não existe qualquer controlo sobre o ar que transporta a fibra. Esse ar pode alterar a humidade da fibra, caso não seja controlado.

Uma mudança no controlo do secador é efectivamente necessária. Alterando o sistema de controlo do secador possibilita uma redução na variância da humidade da fibra à saída do secador. Um controlo sobre o ar de transporte da fibra traz o benefício de aumento da temperatura da fibra, conseqüentemente um aumento na produção, e também um fluxo de fibra sem variações no teor de humidade. Contudo, a quantidade de “rejeitos” associados ao teor de humidade diminui.

1.3 Organização da Tese

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos: Introdução, Estado da Arte, Apresentação e Discussão dos Resultados, Conclusão e Avaliação do trabalho realizado.

A Introdução visa em enquadrar o leitor no processo de MDF. Foram apresentados todos os equipamentos que a indústria de MDF necessita, até ao processo de armazenamento de fibra. Descreve, de uma forma sucinta, a história e evolução do MDF ao longo dos anos.

No Estado da Arte está em foco a variável de estudo, humidade da fibra. Apresenta-se alguns estudos importantes feitos quanto à influência da humidade da fibra sobre o processo de prensagem final. Apesar de o secador e o transporte da fibra não serem tão analisados, foram ainda apresentados dois estudos que permitem ter uma visão global sobre o processo de secagem e sobre a influência do transporte pneumático da fibra sobre a humidade contida na fibra.

No capítulo Apresentação e Análise de Resultados é descrito o procedimento experimental deste trabalho. Além disso, foram apresentados os resultados obtidos pelo método experimental, tal como a análise e discussão destes.

As conclusões finais são apresentadas no capítulo das Conclusões, bem como um resumo de todos os objectivos e assuntos discutidos ao longo do trabalho.

Finalmente, e apresentada a Avaliação do trabalho realizado, onde se analisa os objectivos cumpridos. Por outro lado são analisadas as dificuldades encontradas para realizar os objectivos do projecto e o trabalho futuro a ser desenvolvido com vista a otimizar o processo de fabrico de MDF.

2 Estado da Arte

Muitos autores têm vindo a estudar as variáveis que afectam a prensagem das fibras e alguns modelos teóricos foram desenvolvidos para simular esta etapa da indústria de aglomerados de fibra (Humphrey e Bolton (1989), Kamke e Wolcott (1991), Length e Kamke (1996), Dai e Wang (2004), Frazier (2004), Carvalho e Costa (2003)).

Chow e Zhao (1992) investigaram a influência de três variáveis (temperatura de prensagem, humidade no colchão de fibra e resina) na produção de painéis de MDF com uma densidade de 830 kg/m^3 usando resina PF. Concluíram que a humidade influencia todas as propriedades do painel. No entanto, um painel MDF prensado com uma humidade de 12% nas fibras tem, em média, melhores propriedades do que usando fibras com uma humidade de 6 ou 9%.

Park *et al.* (1999) procedeu a um estudo muito similar, cujo objectivo foi testar variáveis como a humidade do colchão, velocidade de fecho da prensa e posição da prensa, para um painel com uma densidade final de 750 kg/m^3 revestido com resina PF. De acordo com o seu estudo, estando a fibra a uma humidade de 8, 11 e 14 %, verificou que para cada propriedade existe uma humidade ideal das fibras do colchão.

Lee e Maloney (1995) focaram-se apenas no efeito da humidade das fibras (utilizando humidades na gama de 5-15%) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis de MDF, usando resina UF. Estes autores concluíram que uma humidade de 13% no colchão era a ideal para garantir boas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tracção e resistência à flexão) para um painel com 750 kg/m^3 de densidade.

Hague *et al.* (1999) investigaram a influência de variáveis como a quantidade de resina, quantidade de parafina, humidade do colchão de fibras e temperatura de entrada no secador de fibra, a resistência à tracção e inchamento. Concluíram que a humidade das fibras desempenha um papel fulcral nestas propriedades.

Ao contrário da influência da humidade no processo de fabrico de MDF, escassos são os estudos sobre secagem e transporte de fibra.

Pang (2000) desenvolveu um modelo teórico que determina o comportamento da humidade relativa e humidade absoluta do ar de secagem, e também a humidade da fibra ao longo do secador. No entanto, este autor não demonstrou qualquer tipo de relação de equilíbrio entre o ar e a fibra durante o processo de secagem.

Pang (2001) estudou o comportamento da humidade da fibra ao longo do transporte pneumático, tendo verificado que alterando as condições que envolvem a fibra, humidade

relativa, durante o transporte desta, a humidade se altera. Chegou, então, à conclusão que o transporte pneumático pode funcionar como um segundo secador de fibra. O objectivo seria baixar a temperatura de secagem, o que acarretaria grandes benefícios energéticos, ambientais e benefícios até no produto final de MDF.

3 Materiais e Métodos

3.1 Método Experimental de Estudo do Secador e Transporte de Fibra

Foram determinadas experimentalmente, com a ajuda de uma sonda Testo 400 e de um pano húmido, as temperaturas ao longo do secador (bolbo seco) e as temperaturas do bolbo húmido. Com estes dados experimentais e através do diagrama de *Mollier*, Anexo 1, determinam-se as humidades relativas e humidades absolutas em cada ponto do secador a fim de traçar o perfil do secador para cada uma destas variáveis. A humidade da fibra à saída do secador foi determinada por balanços de massa e balanços energéticos, assim como a humidade da fibra durante o transporte desta. A única base de referência aos cálculos era a humidade do colchão de fibra que estava constantemente a ser aferida.

O secador é constituído por uma tubagem horizontal e duas tubagens verticais que alimentam dois ciclones. Um dos ciclones encontra-se mais perto da linha de produção, o outro ciclone encontra-se mais perto da caldeira da SIAF. Assim, dividiu-se o secador em duas partes. Toda a tubagem horizontal mais a tubagem vertical que garante o acesso da fibra ao ciclone que se encontra mais próximo da produção dá pelo nome de ciclone (lado da produção). A tubagem horizontal mais a tubagem vertical que dá acesso ao ciclone mais perto da caldeira dá pelo nome de ciclone (lado da caldeira).

O método utilizado não é o mais preciso para traçar o perfil de humidades relativas e absolutas, já que acrescido ao erro associado à medição da temperatura do bolbo húmido com um pano húmido envolvendo a sonda, temos também um método gráfico que não permite aferir com precisão tanto as humidades relativas com as humidades absolutas do ar ao longo do secador. Este erro afecta essencialmente a determinação da humidade da fibra. Isto porque, existe uma desproporcionalidade bastante grande, em massa, entre a fibra e o ar de secagem. A fibra corresponde a sensivelmente 5% da massa total que passa no secador e na tubagem que transporta a fibra até ao *fiber bin*. Assim, uma variação de 0,1% na humidade absoluta do ar é bastante significativa na determinação da humidade da fibra.

É de salientar que todos os cálculos efectuados contêm um erro associado. Neste método usado, esse erro é bastante elevado. A incerteza das características do ar de secagem (humidade absoluta) e da fibra à entrada do secador (humidade), e o método utilizado para determinar os perfis de humidade absoluta e humidade relativa, dão a este trabalho um rigor e precisão muito baixos.

3.2 Comportamento do Secador de Fibra

3.2.1 Produção

Com intuito de estudar o comportamento do secador de um estágio, foram analisadas várias produções com diferentes características. Na tabela seguinte encontra-se a descrição pormenorizada das várias produções em análise.

Erro! A origem da referência não foi encontrada. - Produções analisadas

MDF	Tipo	6B1	6B7	18N1
Refinador	Consumo (kW.h/ton)	170	155	175
	Sem-Fim (rpm)	42,8	42,8	24,2
Encolagem	Fx Resina (%)	8,2	8,2	18,5
	Fx Ureia (%)	1	1	1
	Fx Parafina (%)	0,64	0,65	0,8
	Fx Pigmento (%)	-	0,25	-
	Fx Nitrato (/resina anidra)	6	6	6
Placas	Produção (m ³ /h)	22,8	22,8	16,6
	Comprimento (mm)	7384	7438	7349
	Largura (mm)	2508	2547	2469
Ar Secagem	Ventilador Secagem (Amps)	80	75	75
	Caudal (m ³ /s)	80	73	73
	Velocidade (m/s)	26,8	24,4	24,4

O secador em causa é constituído por duas partes: 53,6 metros de tubagens horizontal e, aproximadamente, 36,4 metros de tubagens vertical. Com um comprimento total de 100 metros, existindo ainda uma tubagem suplementar horizontal de aproximadamente 10 metros, no seguimento da tubagem vertical, que garante o acesso da fibra aos ciclones. O início do secador, 0 metros, corresponde à injeção de fibra no secador, fim da *blow-line*.

Na figura seguinte encontra-se as zonas de medições de temperaturas e humidades relativas efectuadas no secador.

O estudo do comportamento de secagem das fibras foi feito através da análise à produção de MDF 6_B7. Foi alimentado ao secador cerca de 18 toneladas de fibra [anidra] com uma humidade (kg água/kg fibra [anidra]) de 66,2% e uma mistura de gases quentes com ar fresco com a uma humidade absoluta de 4,3 kg água/kg ar seco, a uma velocidade de 24,4 m/s e a uma temperatura de 189°C. A velocidade do ar de secagem foi determinada através da ajuda da curva característica do ventilador, Anexo3, e das equações (7) e (8).

Observou-se, ao longo deste estudo, que a temperatura à saída do ciclone (lado da produção) era, na maioria dos ensaios, diferente da temperatura à saída do ciclone (lado da caldeira). Pelo que a análise pormenorizada dos respectivos fluxos é importante para futuras conclusões deste trabalho. Assim, decidiu-se separar os perfis em “produção”, correspondente ao ciclone (lado da produção), e “caldeira”, ao ciclone (lado da caldeira).

O perfil de temperaturas e humidades relativas está representado na *Figura 7*.

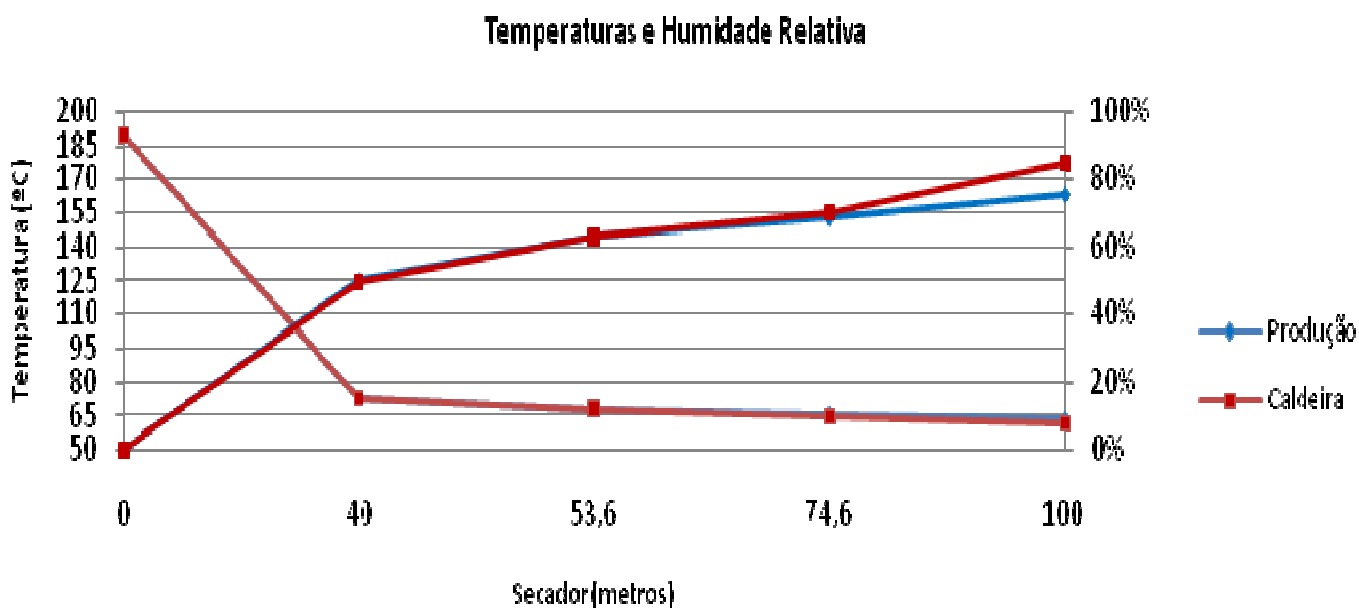


Figura 7 - Perfil de temperaturas e humidades relativas ao longo do secador para a produção de MDF 6_B7.

A *Figura 7* representa um perfil já esperado, segundo o modelo de Pang (2001). A taxa de secagem nos instantes iniciais do secador é muito elevada, comparada com a que existe logo após os 40 metros. Como resultado, a temperatura cai dos 189°C para os 72,7°C fazendo aumentar, consequentemente, a humidade relativa do ar. Depois da maior parte da água contida na fibra ser evaporada (40 metros do secador), estando a fibra com uma humidade abaixo dos 20% (*Figura 9 e 10*), a taxa de evaporação cai abruptamente. Uma humidade na

fibra a 20% significa que apenas existe água ligada às paredes celulares da fibra, ou seja, está abaixo do ponto de saturação das fibras, PSF. Nesta altura, existe uma dificuldade acrescida de secagem, já que é necessária mais energia para evaporar a água ligada nas paredes celulares, equação (3), do que para evaporar a água capilar da fibra, equação (4).

Nos últimos 60 metros apenas 10%, ou menos, de humidade contida na fibra é evaporada. Tanto no ciclone (lado da produção) como no ciclone (lado da caldeira) o abaixamento da temperatura nos últimos 60 metros é inferior a 10°C.

A humidade absoluta do ar de secagem é afectada por três factores: a humidade do ar fresco, a humidade dos gases da caldeira e pelo vapor originado no processo de refinação e na *blow-line*. Considerou-se que os gases, oriundos da caldeira, possuem uma humidade absoluta de 7,1% e que o ar fresco, temperatura ambiente a 7°C, tem uma humidade relativa de 80%. Na mistura, o gás resultante contém uma humidade absoluta de 4,3% com uma humidade relativa de 0,29%.

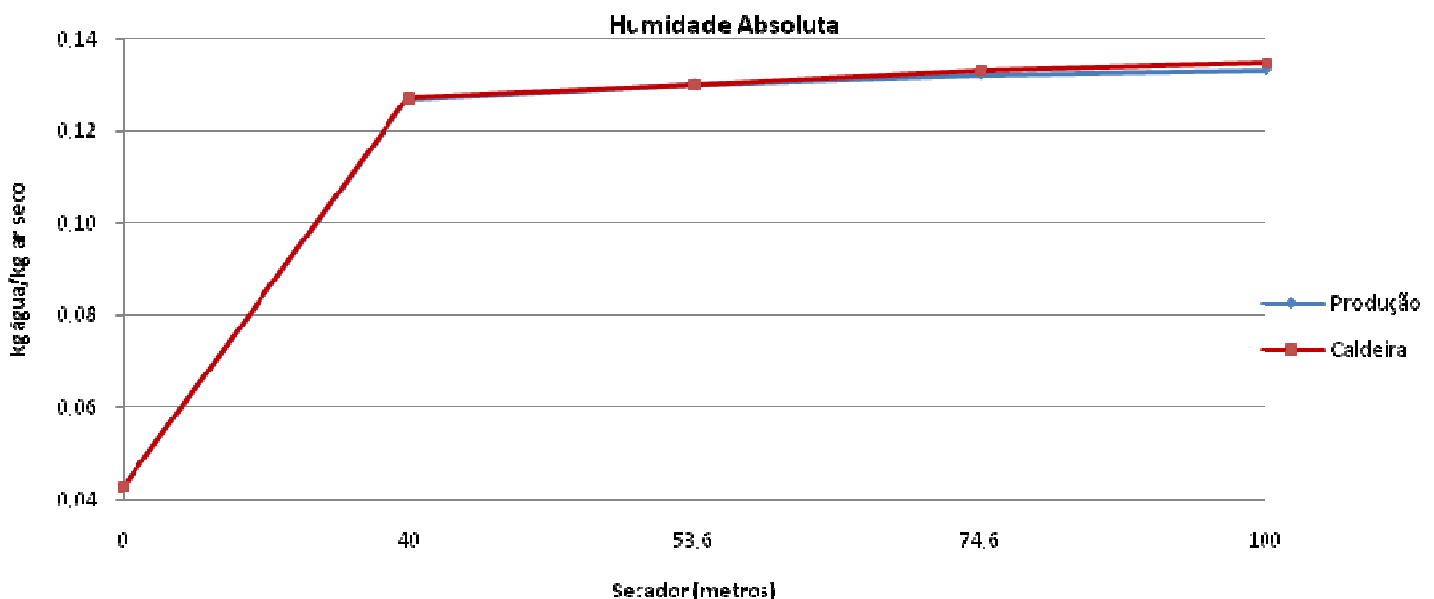


Figura 8 - Perfil de humidades absolutas ao longo do secador para a produção de MDF 6_B7.

A taxa de evaporação de água na fibra, ao longo do secador, é bem visível na *Figura 8*. Nos 40 metros iniciais o declive do gráfico é significativamente superior em relação aos 60 metros finais do secador. Assim sendo, a humidade absoluta do ar tem um aumento abrupto nos instantes iniciais, decaindo continuamente até ao troço final do secador.

A humidade relativa do ar de secagem aumenta, nos 40 metros iniciais, até aos 50%, aumentando 25% à saída do ciclone (lado da produção) e de 35% à do ciclone (lado da caldeira) nos restantes 60 metros do secador. Esta diferença de humidades relativas deve-se

ao facto de o ar que chega ao ciclone (lado da caldeira) ter mais 0,2% em humidade absoluta, 13,5 kg água/kg ar seco, e menos 2°C, 61,3°C, que o ar que acede ao ciclone (lado de produção). Através de ensaios de medições de velocidades nas tubagens referentes aos ciclones de “produção” e “caldeira”, que serão feitos futuramente, poder-se-á concluir se esta diferença deve-se a um excedente de caudal de ar ou de fibra num ou noutro ciclone.

Na *Figura 7* observa-se que ao longo do secador a temperatura baixa por transferência de calor para a água contida na fibra. No entanto, nos últimos metros esse decréscimo tende a ser cada vez menos acentuado ao que se supõe que a fibra está perto de atingir o equilíbrio. A grande dúvida é se realmente nos metros finais ela o atinge. Ao que se traçou dois tipos de perfis de humidade da fibra ao longo do secador. A diferença desses perfis está na determinação da humidade da fibra à saída do secador. Na *Figura 9 e 10*, a humidade da fibra foi determinada a partir de um balanço de massa. No entanto, a humidade da fibra à saída do secador foi determinada por dois métodos: por balanço material e energético, e por balanço energético e a partir da equação (2), admitindo que a fibra se encontra em equilíbrio.

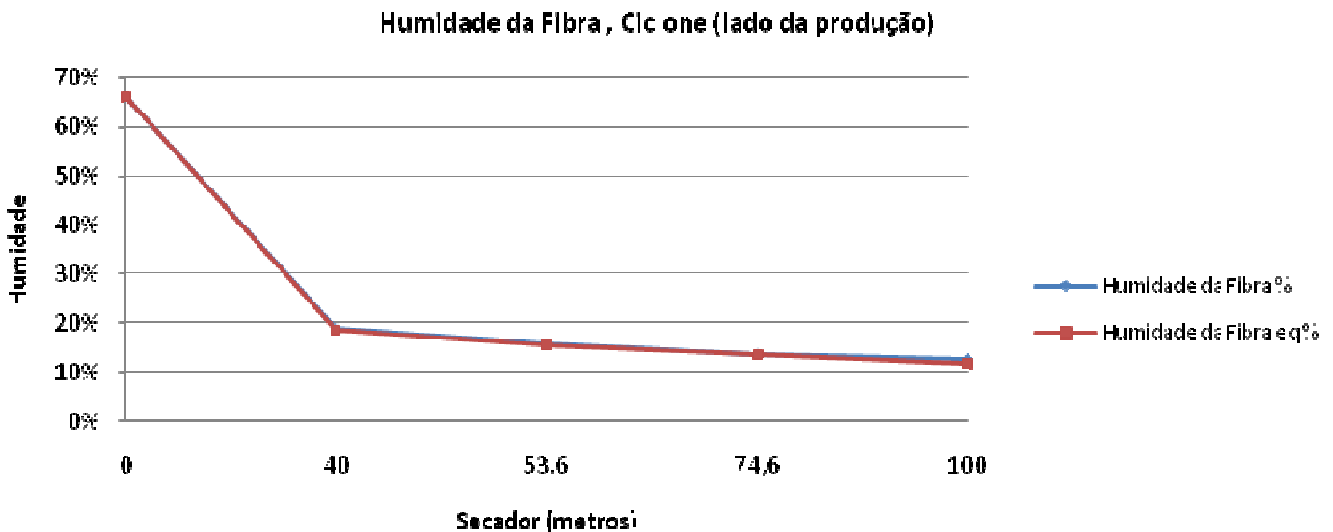


Figura 9 - Humidade da fibra e humidade da fibra em equilíbrio à saída do ciclone (lado da produção).

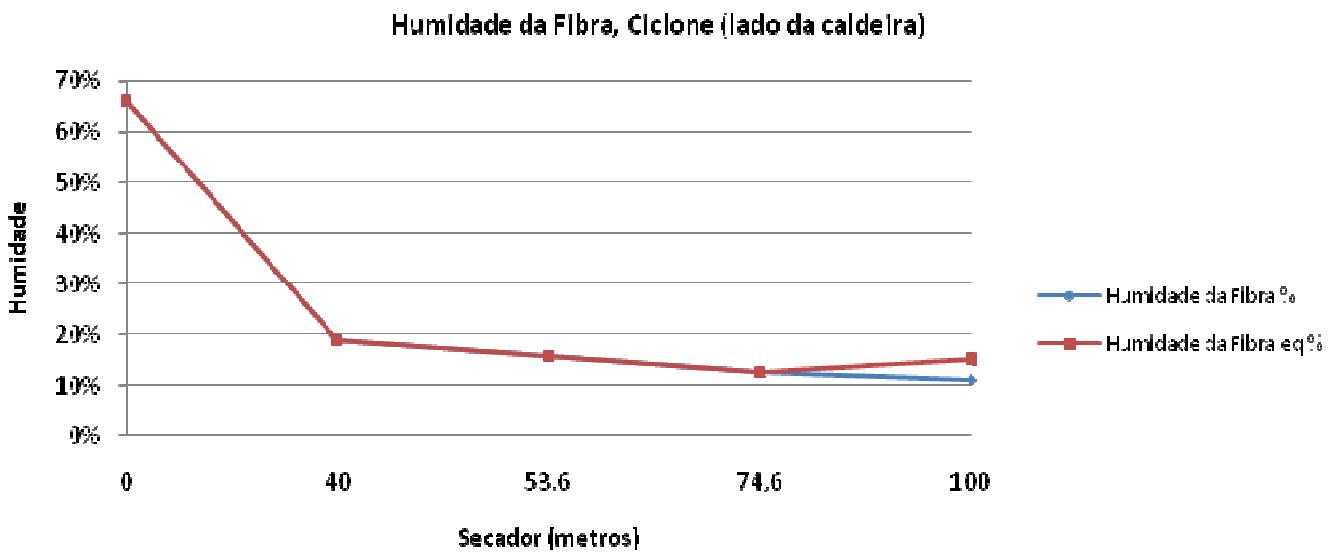


Figura 10 - Humidade da fibra e humidade da fibra em equilíbrio à saída do ciclone (lado da caldeira).

No caso da fibra que sai do ciclone (lado da produção), a humidade calculada e a humidade em equilíbrio são bastante semelhantes ao contrário do que acontece no caso da fibra que sai do ciclone (lado da caldeira). Observando o perfil de temperaturas do secador, verifica-se que a fibra que saí para do ciclone (lado da produção) mais facilmente atinge o equilíbrio do que a fibra que se encontra na tubagem que dá acesso ao ciclone (lado da caldeira). Isto porque a diferença de temperaturas medidas a 74,6 metros e a 100 metros é inferior, declive da recta mais próximo de zero, para a fibra que se encontra mais próxima da “produção” do que a que se encontra mais próxima da “caldeira”. O que traduz numa maior aproximação do ponto de equilíbrio por parte da fibra mais próxima da “produção”.

3.2.3 Dew Point

O aparecimento de “grumos” (pequenos novelos de fibra encharcados de água) no fundo dos ciclones é bastante frequente neste processo. Isto significa que o ar atingiu o ponto de orvalho, condensando água nele existente. O *dew-point* ou ponto de orvalho, neste processo de secagem, não é mais do que o ponto de saturação do ar. Quando o ar chega ao seu limite de capacidade para reter o vapor de água, humidade relativa de 100%, a água condensa em pequenas gotículas.

Ao longo deste estudo, dá-se conta que a humidade relativa de trabalho à saída do secador é bastante elevada. Principalmente no que diz respeito ao ar que entra no ciclone (lado da caldeira). Este ar, na maioria das vezes, possui maior quantidade de água do que o ar que

entra no ciclone (lado de produção). Acrescido a isso, a sua temperatura é sempre inferior à do ar que entra no ciclone (lado da produção). Assim, na maioria das vezes a humidade relativa final do ar que entra no ciclone (lado da caldeira) é superior.

No caso concreto da produção de placas de MDF 6_B7, as características do ar de saída do secador são apresentadas na tabela seguinte.

Erro! A origem da referência não foi encontrada.2 - Características do ar à saída do secador.

	Ciclone (lado da produção)	Ciclone (lado da caldeira)
Temperatura (°C)	63,8	61,3
Humidade Relativa (%)	75%	85%
Humidade Absoluta (kg água/kg ar seco)	13,3	13,5

Observando a *Tabela 2*, verifica-se que o ar que sai do ciclone (lado da caldeira) possui uma humidade relativa com dez pontos percentuais superiores. Isto significa que este ar atinge mais facilmente a saturação, por arrefecimento do ar, do que o ar de exaustão do ciclone (lado da produção).

Erro! A origem da referência não foi encontrada.3 - Pressão de vapor de saturação do ar de exaustão, pressão de vapor de saturação e temperatura caso o ar atinja o dew-point.

	Ciclone (lado da produção)	Ciclone (lado da caldeira)
p₀ (cmHg)	17,4	15,5
p₀ DP (cmHg)	13,0	13,2
Temperatura Dew Point (°C)	57,6	57,8

Os dados referentes à *Tabela 3* traduzem as temperaturas de *dew-point* para cada um dos gases de exaustão dos ciclones. A diferença entre as temperaturas de exaustão dos gases (*Tabela 2*) e as respectivas temperaturas de dew-point é bastante reduzida. Um arrefecimento de 6,2°C para os gases que saem do ciclone (lado da produção) e um arrefecimento de 3,5°C para os gases que saem do ciclone (lado da caldeira) faz com que estes atinjam humidades relativas de 100%, *dew-point*.

Quanto mais próxima estiver a humidade relativa, de um gás, dos 100% a uma determinada temperatura, mais próxima estará essa temperatura da temperatura de orvalho. Como a humidade relativa dos gases de exaustão do ciclone (lado da caldeira) é maior, logo mais próxima dos 100%, do que a humidade relativa dos gases que saem do ciclone (lado da

produção), a sua temperatura estará mais próxima da temperatura de orvalho, 3,5°C de proximidade.

Na figura seguinte está representada a diferença entre a temperatura de exaustão e a respectiva temperatura de *dew-point*, para temperaturas de exaustão de 50, 60 e 70°C e humidades relativas numa gama de 60 a 95%.

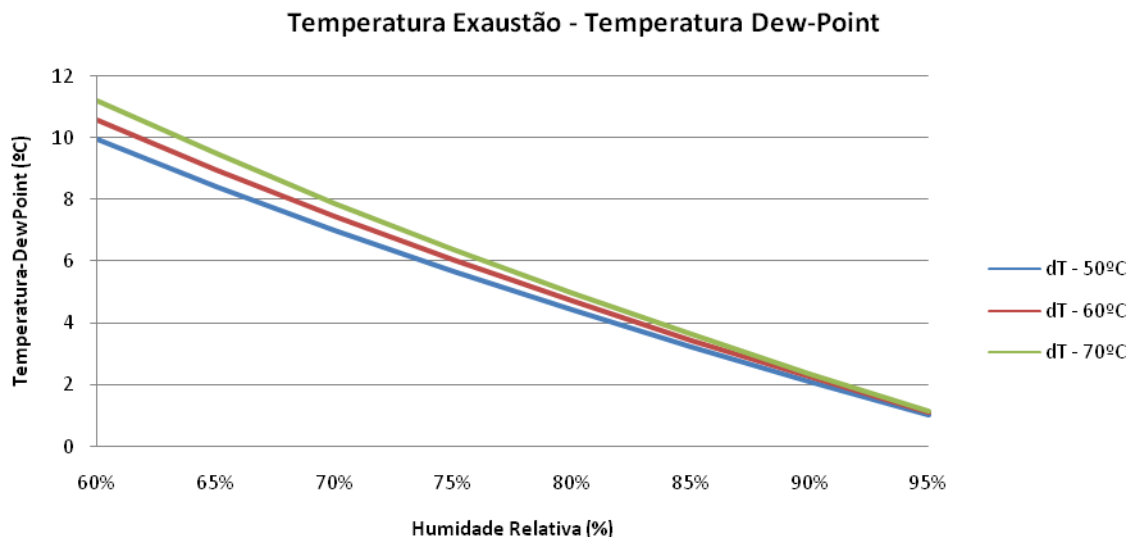


Figura 11 - Diferença entre temperatura de exaustão e temperatura *dew-point* para algumas temperaturas e humidade relativas dos gases de exaustão.

Verifica-se, segundo a Figura 6, que quanto maior for a humidade relativa e quanto menor for a temperatura de um gás mais fácil será para esse gás atingir a temperatura de orvalho. Chegando ao limite de 95% em humidade relativa, a proximidade da temperatura de exaustão à temperatura de orvalho é praticamente a mesma, independentemente da temperatura de exaustão do gás.

Para evitar que haja condensações do ar de secagem, é absolutamente necessário controlar a humidade relativa do ar de exaustão. Neste momento não existe qualquer controlo da humidade relativa do ar que sai dos secadores. Em muitos ensaios feitos, chegou-se a detectar humidades relativas a rondar os 90 %. O que significa que, em alguns casos, um arrefecimento de 2°C era o suficiente para que houvesse saturação desse ar. O ar atmosférico, no Inverno, chega a atingir temperaturas negativas. Se o isolamento dos ciclones não for o mais eficaz é possível que haja um certo arrefecimento do ar de exaustão quando este entra em contacto com as paredes do ciclone.

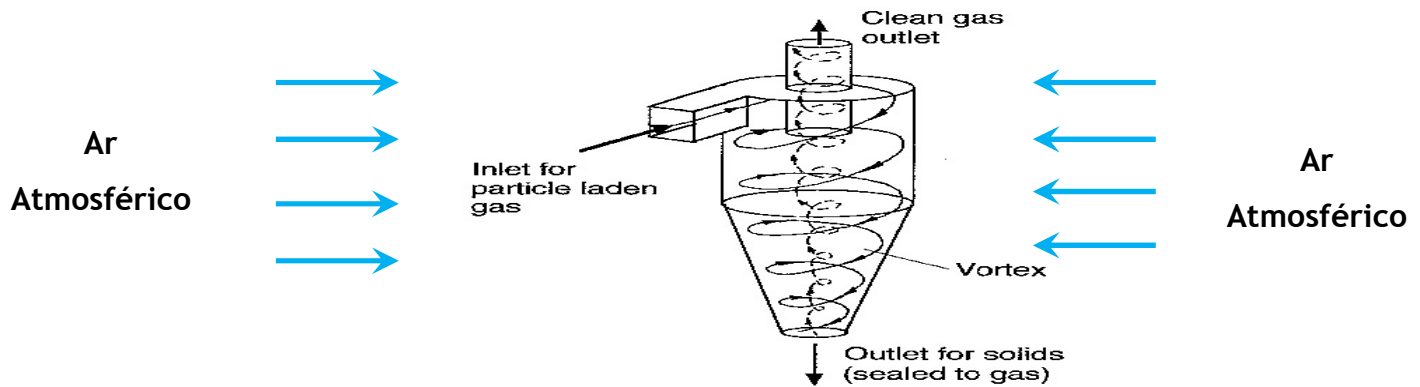


Figura 12 - Ciclone

Um outro caso possível de acontece, para o aparecimento de condensados no *sifter*, é a falta de capacidade dos ciclones em separar totalmente a fibra do ar de secagem. Se o ciclone não tem capacidade suficiente, a eficiência de separar sólidos de gases diminuí drasticamente. O que acontece é que parte dos gases é arrastada com as partículas sólidas. Acrescido ao mau dimensionamento dos ciclones, se as válvulas rotativas, existentes no fundo dos ciclones, não estiverem perfeitamente isoladas e se realmente se está a trabalhar com um défice de eficiência de separação gás/sólido, pode estar a acontecer que parte do ar de secagem seja arrastada pela fibra até ao *sifter*. Na prática é o que realmente acontece.

Segundo a especificação do fornecedor, o secador apenas tem capacidade para 17 ton/h de fibra anidra. No entanto, existem produções realizadas na SIAF em que o caudal de fibra chega às 22 ton/h de fibra anidra. Ou seja, muitas vezes trabalha-se acima do caudal recomendado.

Esse ar de secagem tem uma temperatura superior à do ar de transporte da fibra. Estes em contacto, promovem um abaixamento da temperatura do ar oriundo da secagem. Baixando a temperatura pode acontecer que o ar de secagem atinja a temperatura de orvalho.

Na *Figura 13* estão os dados do fornecedor para o secador de estudo.

4460002.DOC

MDF-Trockner
Siaf



15.03.1995

00.02 TECHNICAL DATA

Wood fibre:	17.000 kg/h
Glue	2.210 kg/h
Steam (8 bar excess pressure):	0,32 kg/kg
Water (extinguish nozzles):	16,5 m ³ /h
Inlet moisture:	50-95%
Exit moisture:	12-16%
Fibre bulk weight:	15-25 kg/m ³
Drying air temperature (t2):	170° C
Exit air temperature (t3):	72° C.
Air quantity stream:	127.000 kg/h
Exit air quantity:	239.000 Nm ³ /h
Suction temperature:	0 ° C
Drying duct diameter:	1.950 mm
Cyclone diameter:	2 x 5.100 mm
Drying length (blow line up to cyclone):	100 m
Heating power hot gas:	12.720 kW
Dust emission in the exit air after cyclone max.:	< 50 mg/Nm ³

Figura 13 - Folha de especificação do secador segundo a empresa fornecedora, ABB.

3.2.4 Transporte

A fibra que cai no fundo dos ciclones é transportada por um sistema pneumático. O controlo do ar que transporta a fibra é de uma extrema importância no processo de fabricação de MDF. Além de poder secar ou humidificar ainda mais a fibra que vem dos ciclones, pode baixar ou aumentar a temperatura dessa fibra. Uma diferença de características, humidade relativa e temperatura, do ar de transporte e do ar de secagem pode promover estes fenómenos. Por exemplo, a fibra, em equilíbrio, que de sai de um ambiente de 70% de humidade relativa (ar de secagem) e passa para um ambiente de 40% de humidade relativa (ar de transporte) vai certamente perder humidade, segundo a equação de equilíbrio.

Para além de perder humidade, a fibra perde temperatura. Isto pode-se aferir se as temperaturas do ar de secagem e do ar de transporte forem iguais. A explicação a este fenómeno está nos diagramas de *Mollier*. Quanto menor for a humidade relativa do ar, maior vai ser a diferença de temperaturas entre o bolbo seco e o bolbo húmido. No caso específico, a fibra será o bolbo húmido e o ar de transporte o bolbo seco. A fibra sai dos ciclones em equilíbrio com 70% de humidade relativa do ar de secagem e entra em contacto com um ambiente de 40%, restabelecendo novo ponto de equilíbrio.

O ar de transporte é constituído por ar fresco (ar atmosférico) e por ar de reciclo oriundo do ciclone do *fiber bin*. Essencialmente, as propriedades do ar de transporte vão ser afectadas pela quantidade de ar fresco injectado e pelas suas características (condições atmosféricas).

Uma secagem feita a temperaturas baixas traz benefícios, segundo um estudo feito. Reduz as emissões de VOCs, reduz o consumo de resina, evitando a pré-cura desta, e melhora a qualidade do painel final de MDF [1]. Quando a temperatura do ar de secagem à entrada do secador é baixa, a sua temperatura de exaustão pode também ser baixa. Reduzindo, assim, a temperatura de secagem reduz-se também a quantidade de calor perdido.

Para baixar a temperatura de secagem é necessário um maior débito de caudal de ar no secador para garantir o *set-point* de humidade pretendido, como se pode constatar mais à frente. No entanto, se o ventilador de secagem não garantir o caudal pretendido de ar então pode-se utilizar o ar que transporta a fibra como um segundo secador, sobre condições perfeitamente controladas.

Fibra transportada com ar humidificado melhora a qualidade do painel de MDF reduzindo variações de humidade entre a fibra e o gradiente de humidade através das paredes da fibra. O ambiente humidificado que envolve a fibra pode também reduzir as tensões residuais desenvolvido durante a secagem.

Sobre um controlo preciso e constante na secagem, é muito importante controlar as propriedades do ar de transporte da fibra. O transporte da fibra pode secá-la ainda mais ou então humidificá-la novamente, pode aquecê-la ou arrefecê-la. Um controlo preciso tanto de transporte como de secagem pode garantir uma homogeneização da humidade do colchão de fibra e ainda garantir um aquecimento deste antes de entrar na prensa. Esse aquecimento prévio da fibra pode diminuir o tempo de prensagem e aumenta a velocidade da prensa, poupando energia e aumentando a produtividade.

Neste exemplo, quando o ar de secagem é injectado a 189°C a fibra sai do secador a uma humidade média de 11,9%. A fibra cai sobre as válvulas rotativas existentes no fundo de cada ciclone e encaminha-se para o *sifter* onde material mais pesado, como “grumos”, é separado da fibra propriamente dita. Segue-se a injeção de ar (reciclo + ar fresco) que transporta a fibra ao longo de 82,5 metros de tubagem, a uma velocidade de 27m/s, até ao *fiber bin*. Esse ar de transporte possui uma humidade relativa média de 66%, no início do transporte, e uma humidade relativa de 67% a uma temperatura de 46,3°C à entrada do *fiber bin*.

Tabela 4 - Características do ar/fibra no fim da secagem, no transporte e na linha.

MDF	Tipo	6_B7
SECADOR	Fibra [anidra] (ton/h)	18
	Diâmetro (m)	1,95
	Comprimento (m)	110
	Velocidade do ar (m/s)	24
	Temperatura do ar exaustão (°C)	63
	Humidade da fibra no ciclone	11,9%
TRANSPORTE	Diâmetro (m)	1
	Comprimento (m)	82,5
	Velocidade do ar (m/s)	27
	Temperatura do ar entrada (°C)	44,6
	Humidade relativa do ar entrada	66%
	Humidade da fibra à entrada do F.B.	10,4%
LINHA	Humidade média fibra	10,6%

Nestas condições, a fibra perde em média 1,5% de humidade chegando ao *fiber bin* com 10,4%. Isto vai de encontro à humidade do colchão de fibra que se encontra na linha, 10,6%. Era de prever esta perda de humidade, já que a humidade relativa do ar de transporte é mais baixa do que a humidade relativa do ar de secagem. Estes valores vão de encontro ao estado de equilíbrio da fibra, como se pode observar na tabela seguinte. Apenas se faz referência ao ciclone (lado da produção) porque é apenas neste que a fibra atinge o equilíbrio com o ar circundante.

 Tabela 5 - Características do ar e da fibra no ciclone do *fiber bin* e no ciclone (lado da produção)

	Ciclone (lado da produção)	Transporte
T_{db} (°C)	63,8	46,3
T_{wb} (°C)	57,7	38,7
Humidade Relativa do Ar	75%	67%
Humidade da Fibra	12,6%	11,1%
Humidade da Fibra em Equilíbrio	11,9%	11,2%

Para além de a fibra perder humidade, também perde temperatura (T_{wb}). Como foi referido anteriormente, a temperatura da fibra pode ser controlada pelo ar de transporte. Com ares a diferentes humidades relativas e à mesma temperatura, a fibra encontra-se a uma temperatura mais elevada quando está em equilíbrio com o ar que tem uma humidade relativa mais alta.

3.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM

3.3.1 MDF 6_B1

Com o intuito de estudar a influência da velocidade do ar no processo de secagem, analisou-se uma produção com 18 toneladas de fibra e uma velocidade do ar de secagem de 26,8 m/s. A fibra entra no secador com uma humidade de 63,8%. A diferença de humidades entre a produção MDF 6_B7 e a produção MDF 6_B1 deve-se ao consumo energético por parte do refinador. Observa-se na *Tabela 1* que existe uma diferença de 15 kW.h/ton. Assim sendo, essa diferença no consumo traduz num aumento de quantidade de vapor, gerado no refinador, na produção MDF 6_B1. Muitos são aqueles que consideram que a energia gasta pelo refinador é transferida para a água líquida contida na estilha da madeira. Com um bom cozimento da madeira, esta é facilmente transformada em fibra. Daí assumir-se que a energia necessária para desfibrar a madeira é pouco significativa.

Os gases quentes e o ar atmosférico que formam o ar de secagem têm as mesmas características, humidade absoluta e humidade relativa, daqueles que entram no secador na produção MDF 6_B7. A diferença que existe nesta produção é que o ar atmosférico é aquecido a uma temperatura de 55°C. Assim, a contribuição de cada um deles difere na mistura final em relação à produção anterior. O ar de secagem entra no secador a uma temperatura de 166 °C e a uma humidade absoluta de 3,8 kg água/kg ar seco, no caso da produção MDF 6_B1.

O comportamento da secagem da fibra observado na *Figura 14* é muito semelhante ao observado na *Figura 7*.

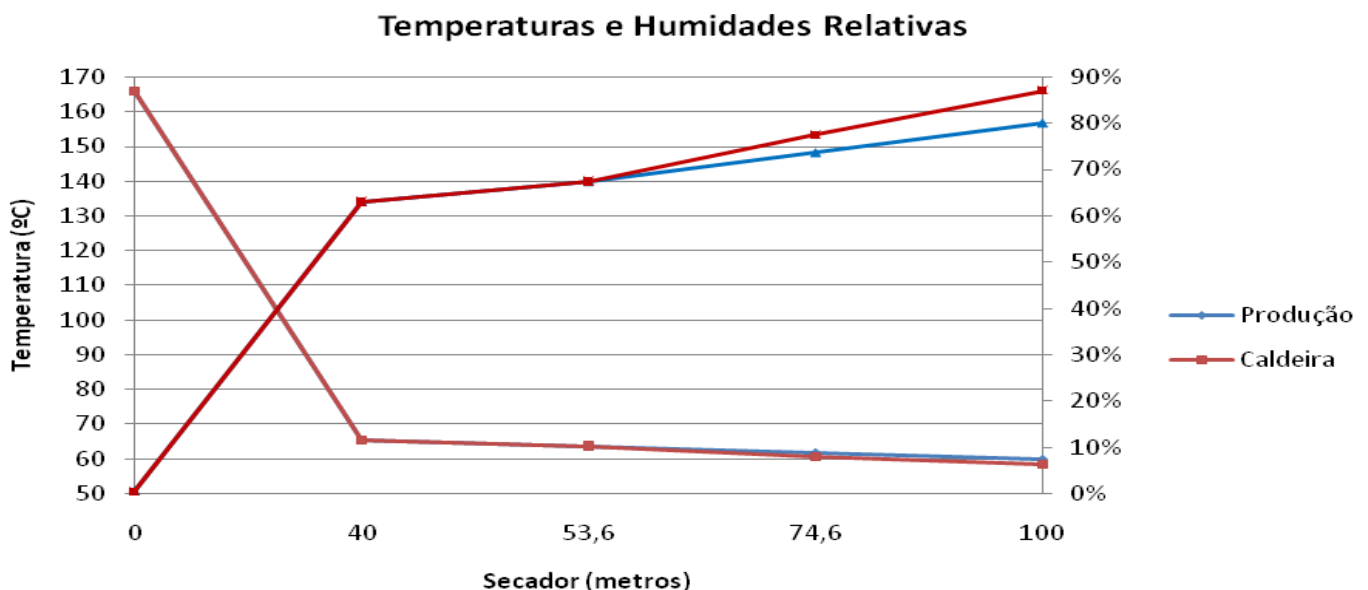


Figura 14 - Perfil de temperaturas e humidades relativas ao longo do secador para a produção de MDF 6_B1*.

Tal como na produção MDF 6_B7, a maior parte da evaporação da água contida na fibra dá-se nos instantes iniciais do secador. A temperatura inicial do ar de secagem é de 166°C, caindo para os 65,4°C a 40 metros da *Blow-line*. Verifica-se, depois, uma diminuição inferior a 10°C nos 60 metros finais. O ar de secagem à saída do ciclone (lado da produção) é de 80% e no ciclone (lado da caldeira) o ar escapa-se com uma humidade relativa de 87%.

Tabela 6 - Características da fibra à saída dos ciclones.

FIBRA	Ciclone (lado da produção)	Ciclone (lado da caldeira)
Temperatura (°C)	54,7	54,7
Humidade	13,3%	12,6%
Humidade Equilíbrio	13,6%	16,3%

Uma vez mais chega-se à conclusão que a fibra que entra no ciclone (lado da produção) atinge o equilíbrio (*Tabela 6*), devido à proximidade que existe entre a humidade calculada por balanços e a calculada pela equação (2). Para além disso, o declive do perfil de temperaturas que caracteriza o ciclone (lado da produção) está mais próximo do zero do que o perfil que caracteriza o ciclone (lado da caldeira). Existe uma diferença de 3,7% entre a humidade que se determina por balanço material e energético e a humidade que se determina através da equação (2), no que diz respeito à fibra que sai pelo secador (lado da caldeira). Uma diferente proporção ar/fibra pode estar na base da explicação para a diferença de humidades que existe entre a fibra que se encontra no ciclone (lado da produção) e da fibra que se encontra no ciclone (lado da caldeira).

3.3.2 Velocidade do ar de secagem (MDF 6_B1 vs. MDF 6_B7)

A partir deste momento, para uma melhor compreensão dir-se-á secador (lado da produção) como sendo a fracção horizontal do secador mais a tubagem que irá dar ao ciclone (lado da produção) e secador (lado da caldeira) para a fracção horizontal do secador mais a tubagem que dá acesso ao ciclone (lado da caldeira).

A secagem da fibra é feita através de dois fenómenos de transferência de calor (convecção e condução). Assim, a velocidade do ar de secagem tem um contributo muito importante na evaporação da água contida na fibra. Este capítulo dá especial atenção à secagem a velocidades diferentes com igual fluxo de fibra.

As *Figuras 15 e 16* comparam o processo secagem da produção MDF 6_B7 e 6_B1. A diferença entre estas duas operações está no aumento de 2,4 m/s na velocidade do ar de secagem. Este aumento da velocidade faz aumentar a capacidade de secagem. Para o mesmo caudal de fibra

a tratar há uma redução da temperatura à entrada do secador a fim de garantir a humidade na fibra pretendida, cerca de 11% de humidade no colchão de fibra. Para o MDF 6_B1 a temperatura do ar à entrada do secador é de 166 °C e para o MDF 6_B7 é de 189 °C, como já foi dito.

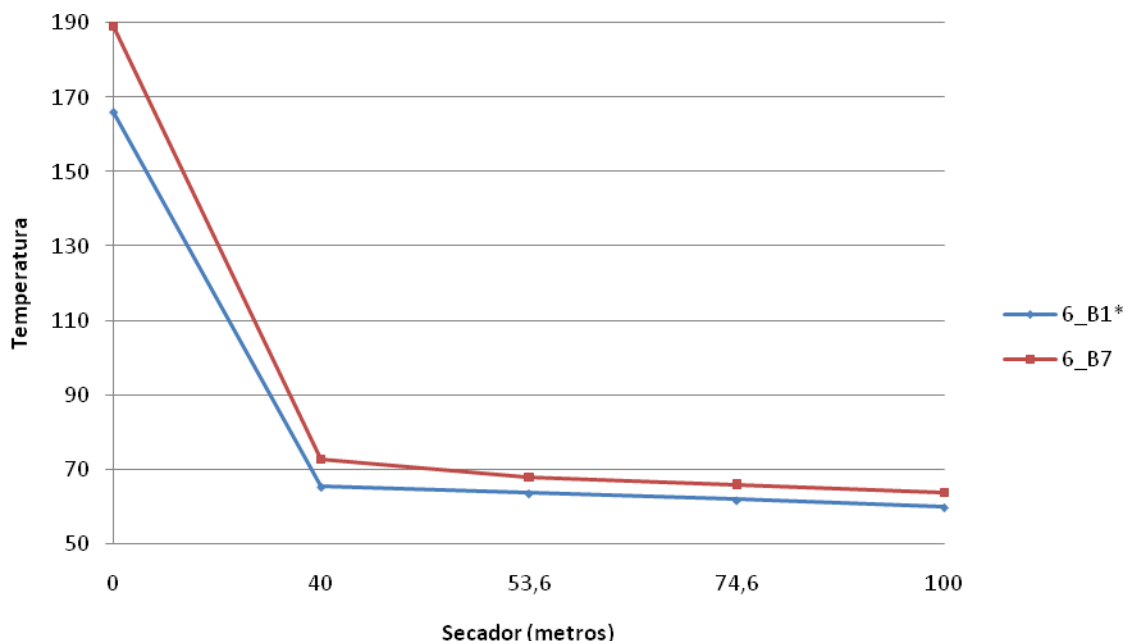


Figura 15 - Perfil de temperaturas do secador (lado produção) para MDF 6_B1 e 6_B7.

No que diz respeito ao secador (lado produção), a temperatura de saída do ar no caso do MDF 6_B1 foi de 59,9°C e no caso do MDF 6_B7 foi de 63,8°C. Observando a Figura 15, verifica-se que a diferença de temperaturas entre as duas produções é mais ou menos constante e roda os 4°C, a partir dos 53,6 metros iniciais do secador. Significa que no final da secagem a fibra encontra-se em diferentes estados de equilíbrio com o ar de secagem. Para MDF 6_B1 o ar sai a uma humidade relativa de 80% e a fibra a uma humidade de 13,3%. O ar de saída do secador, na produção de MDF 6_B7, a humidade relativa é de 75% com uma humidade da fibra de 12,6%.

Uma diminuição na temperatura dos gases de exaustão faz aumentar a humidade relativa do ar, aumentando consequentemente a humidade da fibra em equilíbrio com este. No entanto uma diminuição da humidade absoluta do ar de secagem, à mesma temperatura, diminui consequentemente a humidade relativa do ar.

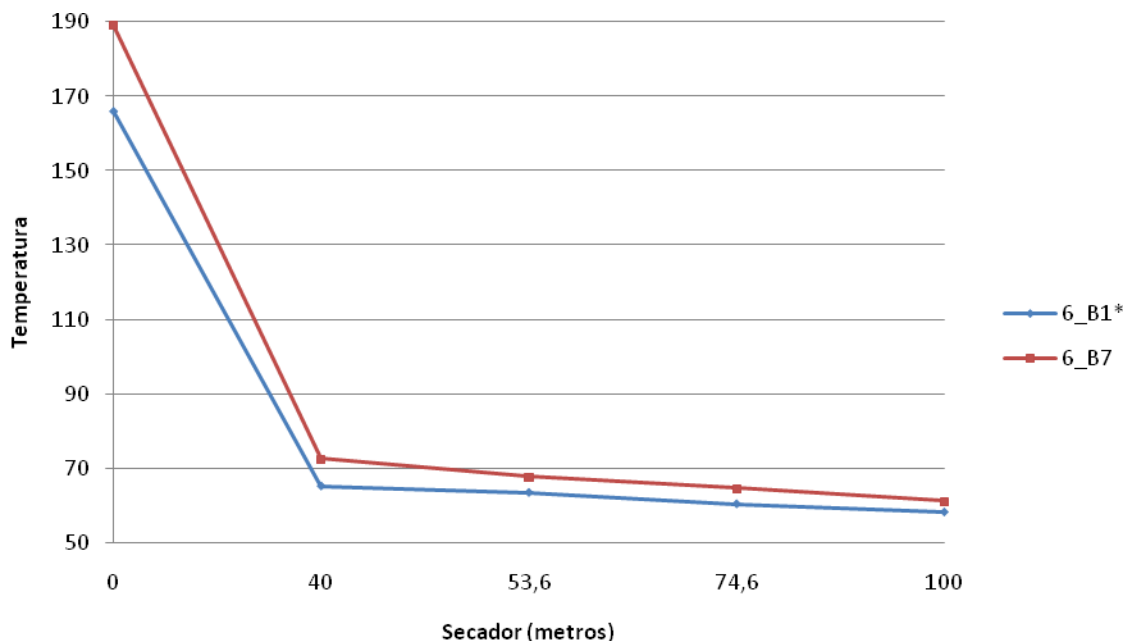


Figura 16 - Perfil de temperaturas do secador (lado caldeira) para MDF 6_B1 e 6_B7.

No caso do secador (lado da caldeira) o comportamento é ligeiramente diferente. Da Figura 11 nada se pode concluir quanto aos pontos de equilíbrio existentes. Tal como inicialmente dito, a mistura ar/fibra na tubagem que dá acesso ao ciclone (lado da caldeira) fica longe de atingir o equilíbrio. Esta constatação é verificada através dos balanços feitos e através dos declives dos perfis de temperatura. Eles são frequentemente inferiores (declives negativos) aos declives dos perfis do secador (lado da produção).

Tabela 7 - Características do ar e da fibra no final do secador para as produções MDF 6_B7 e 6_B1.

MDF		Tipo	6_B7	6_B1
PRODUÇÃO	Ar	T _{db} (°C)	63,8	59,9
		Humidade Relativa	75%	80%
		Humidade Absoluta (kg água/kg ar seco)	0,133	0,116
	Fibra	Humidade da Fibra (%)	12,6%	13,3%
		T _{wb} (°C)	57,7	54,7
CALDEIRA	Ar	T _{db} (°C)	61,3	58,4
		Humidade Relativa (%)	85%	87%
		Humidade Absoluta (kg água/kg ar seco)	0,135	0,117
	Fibra	Humidade da Fibra (%)	11,1%	12,6%
		T _{wb} (°C)	57,7	54,7

A massa de ar debitada pelo ventilador na secagem do MDF 6_B7 é de 196 toneladas ar seco/hora e para o MDF 6_B1 é de 226 toneladas ar seco/hora. Para além de uma humidade absoluta mais elevada à entrada, a fibra que constitui o MDF 6_B7 possui um maior índice de humidade à entrada do secador. Consequentemente o ar de secagem da fibra do MDF 6_B7 terá uma humidade absoluta superior no final do processo de secagem do que o ar de secagem que entra no processo do MDF 6_B1, para um mesmo caudal de fibra.

A humidade relativa do ar é influenciada por dois factores: humidade absoluta e temperatura do ar. No entanto, neste caso específico, segundo o diagrama de *Mollier*, a redução da temperatura tem uma maior contribuição para o aumento da humidade relativa do que a diminuição da humidade absoluta.

Um aumento em 9,8% na velocidade do ar faz diminuir em 23 °C a temperatura do ar à entrada do secador. A secagem a temperaturas menos elevada traz benefícios processuais, como já foi referido. Para além de todas as vantagens a nível de emissões, consumos de cola, qualidade final da placa, existe também vantagens energéticas. Neste caso de estudo, existe uma diferença de 174 kJ/s entre a secagem da fibra origina o MDF 6_B7 e o MDF 6_B1, como se pode verificar na *Tabela 8*.

Tabela 8 - Energia útil necessária à secagem da fibra do MDF 6_B7 e 6_B1.

MDF	Tipo	6_B7	6_B1*
Ar	Energia Transf. Fibra (kJ/s)	-7069	-6852
Ventilador	Potência (kW)	639	682

A única desvantagem observada é, efectivamente, a temperatura a que a fibra sai do secador. O ar de secagem, em ambos os casos, sai com uma humidade relativa bastante elevada, acima dos 75 %. O que à partida seria suficiente para aferir que a temperatura do bolbo húmido se encontra bastante próxima da temperatura do bolbo seco, segundo o diagrama de *Mollier*. Olhando a *Tabela 7*, verifica-se que a temperatura da fibra que forma MDF 6_B7 sai a uma temperatura 3 °C acima da fibra que constitui o MDF 6_B1. Assim, com uma temperatura mais elevada a fibra terá um menor tempo de prensagem, assegurando um maior volume de produção.

3.4 Equilíbrio da Fibra/Ar de Secagem

3.4.1 MDF 18_N1

O estudo do equilíbrio da fibra com o ar de secagem é de extrema importância neste trabalho. Ao longo deste trabalho, muitas têm sido as referências feitas a este assunto. O objectivo deste estudo é determinar se a fibra sai do secador num estado de equilíbrio com o ar. Só assim será possível uma abordagem inicial ao controlo do secador por humidades relativas dos gases de exaustão dos ciclones.

A fim de tentar provar o estado de equilíbrio da fibra dentro do secador, analisou-se uma produção de fibra anidra com 12 toneladas/hora. Já se demonstrou que um aumento da velocidade do ar de secagem não promove uma antecipação do estado de equilíbrio da fibra. Tentou-se demonstrar se, para um caudal menor de fibra, se a fibra atingiria mais rapidamente o equilíbrio.

A fibra entra no secador com uma humidade de 61% e o ar de secagem entra no secador com 1,3 kg água/kg ar seco a uma temperatura de aproximadamente 100 °C.

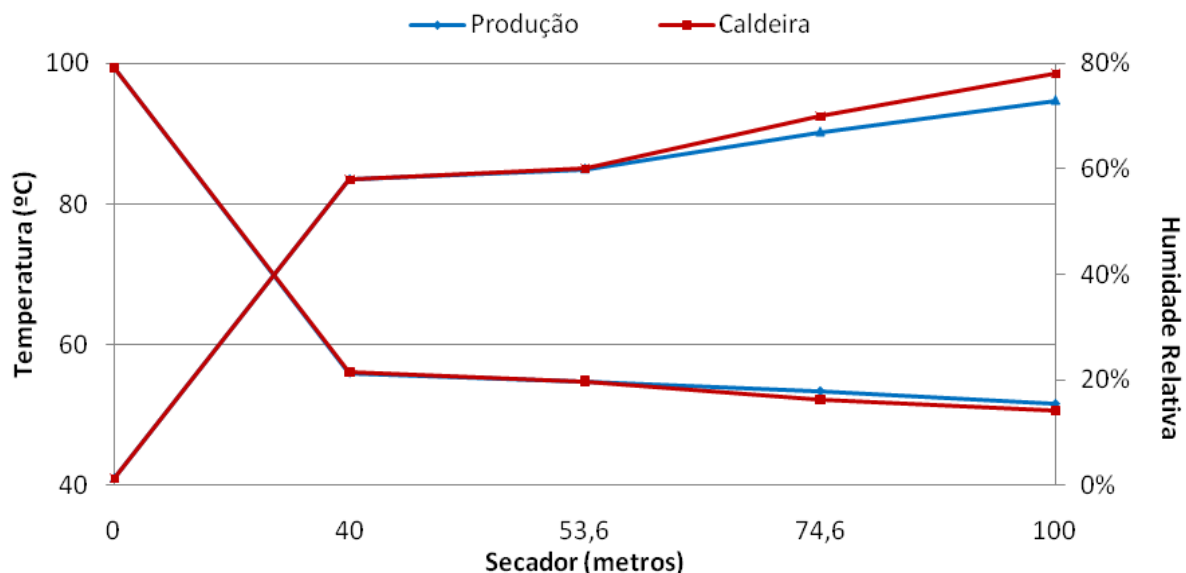


Figura 17 - Perfil de temperaturas e humidades relativas ao longo do secador para a produção de MDF 18_N1.

Uma vez mais o declive do perfil que corresponde ao secador (lado da produção) está mais próximo de zero do que o declive do secador (lado da caldeira). Logo, a fibra que passa na tubagem do secador (lado da produção) encontra-se mais próxima de atingir o equilíbrio.

No final da secagem a fibra sai a uma humidade média de 10,8% e o ar com uma humidade relativa média de 76%. Verifica-se, através de balanços materiais e energéticos, que a fibra que sai do secador (lado da produção) tem uma humidade muito semelhante à humidade que esta atingia se tivesse em equilíbrio com o ar, tal como acontece com as outras produções.

Da *Figura 17* não existe qualquer igualdade entre a temperatura final e a temperatura obtida em qualquer um dos pontos de medição de temperaturas. Logo, a fibra não se encontra em equilíbrio antes da saída do secador. Pelo que se conclui que a fibra atinge o equilíbrio apenas quando entra no ciclone do secador.

3.4.2 Equilíbrio (MDF 6_B7, MDF 6_B1* e MDF 18_N1)

Uma análise simultânea aos perfis de temperaturas das fibras que constituem os painéis de MDF 6_B7, do MDF 6_B1 e do MDF 18_N1 dará uma abordagem geral sobre o comportamento da secagem da fibra, submetida a diferentes condições de entrada.

Inicialmente, pensou-se que diminuindo o caudal de fibra à entrada do secador, a um fluxo de ar de secagem mais ou menos semelhante, esta atingiria o equilíbrio antes de sair do secador. Observando a *Figura 18* não é isso que acontece.

Uma abordagem simultânea a todas as produções analisadas poderá dar mais algumas conclusões sobre o comportamento da fibra. Apenas se analisou o comportamento de secagem da fibra referente ao secador (lado da produção).

O ar de escapa-se pelo secador (lado da produção) com humidades relativas:

- MDF 18_N1 - 73%;
- MDF 6_B7 - 75%;
- MDF 6_B1 - 80%;

Quer isto dizer que a fibra à saída do secador (lado da produção), para as diferentes produções em análise, se encontrada em estados de equilíbrio diferentes.

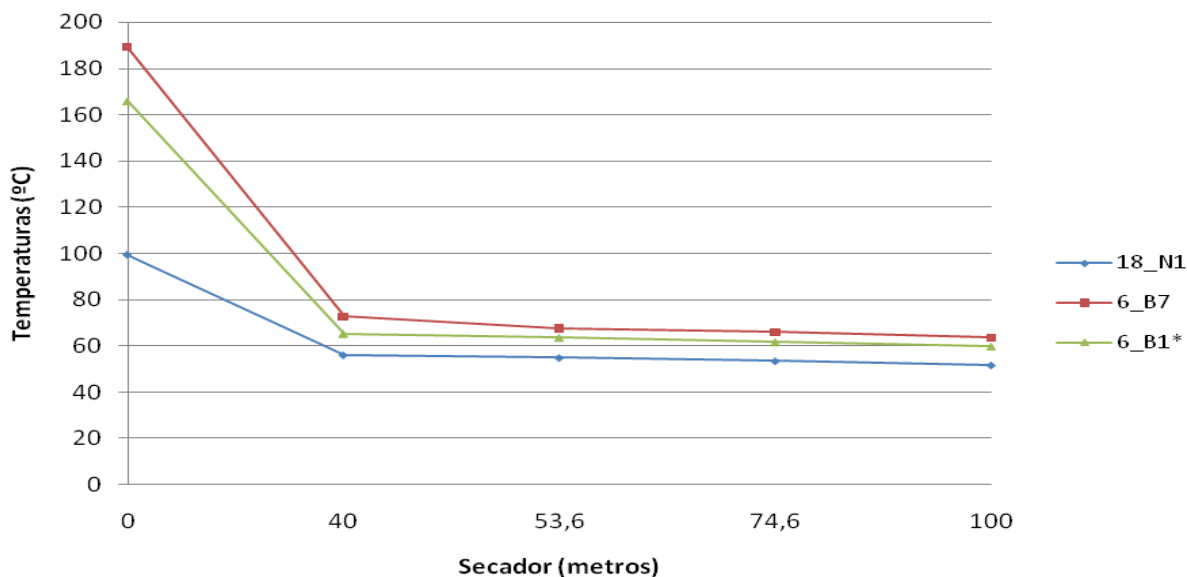


Figura 18 - Perfil de temperaturas do secador (lado da produção) para MDF 6_B1, 6_B7 e 18_N1.

Apesar de os declives dos perfis, a partir dos 53,6 metros da *Blow-line*, serem muito próximos de zero, existe sempre uma diferença de 2 - 3 °C entre cada ponto de medição do secador. Essa diferença é preponderante na humidade relativa do ar. Estes dois factores, temperatura e humidade relativa do ar de secagem, vão ser fundamentais na humidade final da fibra, equação (2). Assim sendo, o único factor que leva a concluir que a fibra se encontra em equilíbrio com o ar é a semelhança que existe entre a humidade da fibra, calculada através de balanços, e a humidade da fibra em equilíbrio, determinada pela equação (2). A Tabela 9 mostra como estão próximas as humidades calculadas por balanço e as humidades calculadas pela equação (2)

Tabela 9 - Humidade da fibra (determinada por balanço ao secador) e Humidade da fibra em equilíbrio (determinada pela equação (3)) à saída do secador.

MDF	Secador (lado produção)			Secador (lado caldeira)		
	18_N1	6_B7	6_B1	18_N1	6_B7	6_B1
Humidade da Fibra	11,6%	12,6%	13,3%	10,0%	11,1%	12,6%
Humidade da Fibra eq.	12,2%	11,9%	13,6%	13,6%	15,2%	16,3%

O mesmo não se pode dizer do secador (lado da caldeira) em que a humidade e a humidade da fibra em equilíbrio são muito diferentes. Seguindo a mesma linha de raciocínio, a fibra que sai do secador (lado da caldeira) não se encontra em equilíbrio com o ar circundante. Diferenças de dois ou três pontos percentuais não são significativos neste estudo, mas dado a proximidade de valores de humidade que se encontra na Tabela 9 para o secador (lado da

produção) pode-se pelo menos dizer que neste caso a fibra se encontra mais distante do estado de equilíbrio.

Um estudo realizado por Kevin Chapman mostra que a fibra atinge o equilíbrio antes de sair do secador. A grande diferença reside no comprimento do secador que ele estudou.

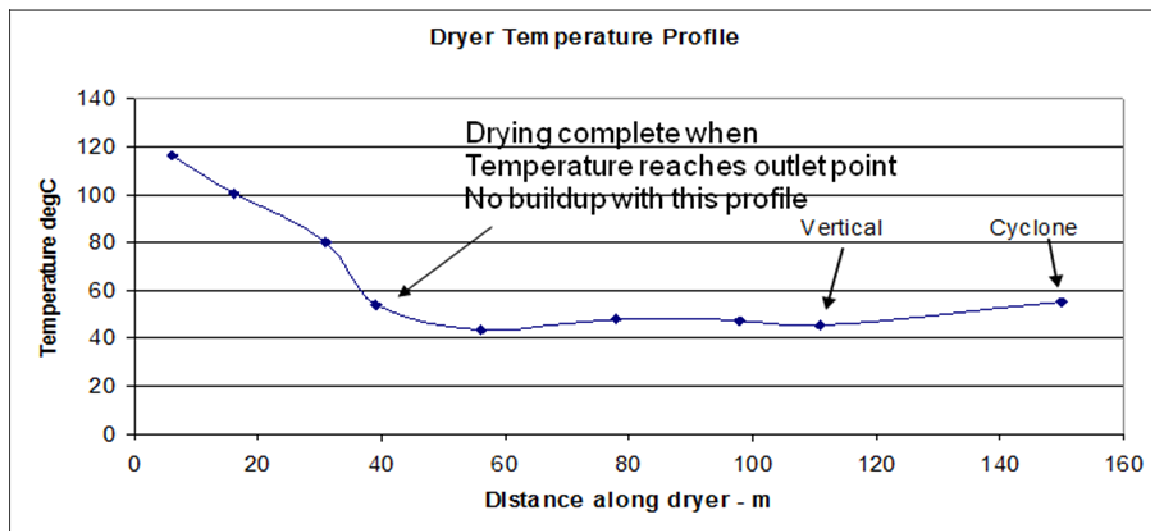


Figura 19 - Perfil de temperatura aferido por Kevin Chapman a um secador pneumático de um estágio com 160 metros de comprimento.

Kevin Chapman estudou um secador de fibra pneumático de um estágio, com um comprimento de aproximadamente 150 metros. O que acontece na Figura 19 é que a fibra atinge o equilíbrio a sensivelmente 40 metros da *blow-line*, mas apenas detectou que atingiu a 150 metros. Até aos 40 metros, no que diz respeito ao secador estudado neste trabalho, a taxa de evaporação de água é maior. O mesmo acontece com o secador estudado por Kevin Chapman. No entanto, ele diz que a 40 metros do secador a fibra e o ar de secagem já atingiram as características de saída. Com este secador é difícil tirar conclusões sobre o equilíbrio da fibra com o ar circundante. A conclusão que se tira, desta breve comparação de secadores, é que o secador pneumático de um estágio da SIAF é demasiado curto para que se possa detectar o ponto onde a fibra atinge o equilíbrio.

3.5 CONTROLO

3.5.1 Controlo do secador

No processo de secagem, a fibra, oriunda do refinador, entra no secador através da *blow-line*. O ventilador debita uma mistura de ar atmosférico com ar quente proveniente da combustão de biomassa. A fibra é então aquecida, evaporando parte da água até que esta atinja uma humidade que ronda os 9 - 12%. A mistura fibra/ar de secagem é encaminhada para os ciclones onde a cai nas válvulas rotativas, que se encontram no fundo dos ciclones, e o ar de secagem escapa-se pelo topo.

No Anexo 3, *Figura 25*, é possível observar o balanço e controlo global feito ao secador de fibra.

O secador de fibra está equipado com um sistema de controlo, que não é mais do que um medidor de humidade, situado depois das válvulas rotativas, que faz leituras frequentes da humidade da fibra com o objectivo de a manter constante. Para manter a quantidade de água contida na fibra, humidade, constante o medidor de humidade da fibra envia um sinal à válvula que controla a injeção de gases quentes regulando-a consoante a subida ou descida do valor *Set-Point* inserido no medidor. A válvula de controlo dos gases quente regula a temperatura do ar de secagem na medida em que este saia dos ciclones a uma temperatura de 50 - 70 °C. As desvantagens deste sistema de controlo são:

- Resposta lenta a uma perturbação do sistema;
- Medidor de humidade da fibra pouco fiável;

A perturbação, neste caso, significa uma mudança no fluxo de entrada de fibra no secador ou uma mudança na quantidade de água líquida que entra no secador. O segundo caso é bastante frequente já que a humidade da madeira à entrada do sistema de refinação não é constante, perturbando todo o sistema de secagem.

O objectivo deste trabalho é precisamente tentar contrariar todas as desvantagens existentes no sistema de controlo que existe. Pensa-se que um sistema controlado por humidade relativa seria muito mais fiável, já que existe um estado de equilíbrio entre a humidade da fibra e a humidade relativa e temperatura do ar circundante.

O funcionamento do novo sistema de controlo do secador, Anexo 1, segue mesmo princípio. Ou seja, a base de controlo está na válvula de controlo dos gases quentes. A temperatura de saída do ar de secagem está directamente relacionada com a temperatura de entrada do ar e com a quantidade de energia transferida para a fibra. Assim, a humidade relativa do ar é

controlada pela sua temperatura de saída, conseqüentemente controlada pela válvula de controlo dos gases quentes que regula a temperatura de entrada.

A fibra, segundo a equação (2), tem vários estados de equilíbrio com o ar envolvente. Estes estados de equilíbrio vão depender da temperatura e da humidade relativa do ar.

Tabela 10 - Humidade da fibra em equilíbrio com o ar a diferentes temperaturas e humidades relativas, segundo a equação (2).

HR	Temperatura °C	50	55	60	65	70
	60%	9,7%	9,4%	9,1%	8,9%	8,6%
	65%	10,6%	10,3%	10,0%	9,7%	9,4%
	70%	11,6%	11,3%	11,0%	10,7%	10,3%
	75%	12,8%	12,5%	12,1%	11,8%	11,4%
	80%	14,3%	13,9%	13,6%	13,2%	12,8%

A *Tabela 10* ilustra alguns dos estados de equilíbrio da humidade da fibra com o ar. A gama de temperaturas que a tabela apresenta a gama de temperaturas do ar de exaustão dos ciclones. Verifica-se que quanto maior a temperatura menor é o valor da humidade contida na fibra, para uma dada humidade relativa. Passa-se precisamente o contrário quando se aumenta a humidade relativa do ar a humidade da fibra também aumenta, a uma dada temperatura.

A diferença na humidade da fibra entre os 50 - 70°C vai de 1,1 a 1,5 pontos percentuais. Isto significa que controlando o secador de fibra apenas por humidade relativa, a humidade da fibra vai sofrer variâncias na ordem de 1,1 a 1,5 pontos percentuais. Mesmo assim, torna-se vantajoso já que reduz para metade a variância verificada no presente sistema de controlo. A humidade da fibra possui, neste momento, variâncias na ordem dos 2 a 3 pontos percentuais à saída dos ciclones. Contudo, assume-se a média de humidade na fibra como o valor em equilíbrio para uma dada humidade relativa, independentemente da temperatura a que se encontra o ar para a gama de 50 - 70°C. Assumir uma média como um valor de referência de equilíbrio é aceitável já que a madeira que entra no sistema não é toda igual. As propriedades desta dependem do clima em que se desenvolveram, do tipo de solo, da idade, etc. Acrescido a isso, a madeira que entra no refinador não é toda da mesma espécie. Trata-se de uma mistura de madeira resinosa com madeira folhosa (*softwood* e *hardwood*). A equação (2) não diferencia os estados de equilíbrio de cada espécie.

É de referir, uma vez mais, que o controlo do secador por humidade relativa só é possível caso a fibra atinja o equilíbrio no interior deste ou nos ciclones. Isto porque sabendo a humidade relativa do ar sabe-se a humidade contida na fibra, mas só em caso de equilíbrio.

No secador de um estágio da SIAF, apenas no ciclone (lado da produção) a fibra atinge o equilíbrio. Daí que o medidor de humidade relativa deve-se situar apenas no ciclone (lado da produção), até que o problema de diferenças de comportamento em ambos os ciclones seja resolvido.

Assume-se, então que para 60%, 70%, 80% de humidade relativa a humidade da fibra anda à volta dos 9%, 11% e 13%. A figura seguinte faz referência à humidade absoluta do ar com a sua temperatura, a uma dada temperatura (diagrama de Mollier).

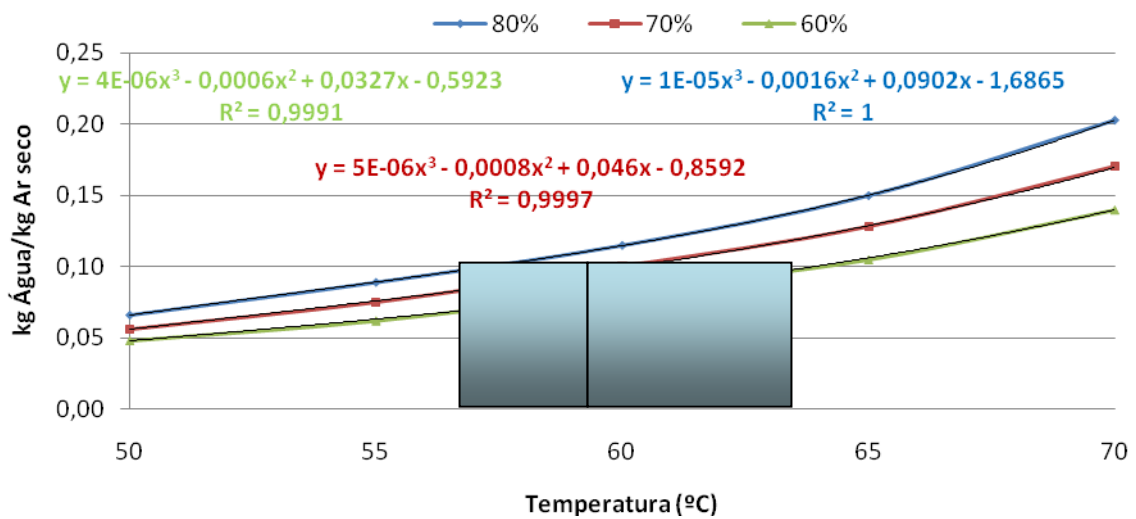


Figura 20 - Humidade Absoluta vs Temperatura para uma dada humidade relativa (diagrama de Mollier).

Através da Figura 20 verifica-se que a uma humidade absoluta do ar de 0,10 kg água/kg ar seco, um aumento de 4,4 °C à temperatura do ar faz diminuir a humidade relativa de 80% para 70%. Isto significa que a humidade da fibra diminui em dois pontos percentuais, passando de 13% para 11% de humidade. Um aumento na temperatura de 10,2 °C diminui a humidade da fibra em quatro pontos percentuais, passando a fibra de uma humidade de 13% para 9%.

3.5.2 Transporte

O transporte da fibra desde o Sifter até ao ciclone do *fiber bin* não tem qualquer tipo de controlo sobre a humidade relativa. O que acontece neste momento é que a fibra que chega à linha vai perdendo humidade. O ensaio feito com o MDF 6_B7 diz que a fibra perde 1,5 pontos percentuais no transporte, com o ar de transporte a uma temperatura de 44,6 com uma humidade relativa de 66% e a uma velocidade de 27 m/s.

As características do ar de transporte nem sempre são as mesmas. Depende da quantidade de ar fresco injectado, da quantidade de água que este possui e das características do ar de reciclo. O controlo das características do ar, como a humidade relativa e a temperatura do ar de transporte, permite não perturbar o estado de equilíbrio da fibra que sai do ciclone. Para além de garantir um fluxo de fibra homogéneo (mesma quantidade de água), pode também aquece-la antes de esta entrar no processo de prensagem.

O controlo da humidade relativa do ar de transporte (*Figura 21*) é feito por duas maneiras, ou controlando o fluxo de ar fresco (atmosférico) ou injectando vapor de água ao ar. Um controlo ao fluxo de ar fresco é necessário para diminuir, se for o caso, a humidade relativa do ar de transporte, já que este é aquecido antes de ser misturado com o ar de reciclo. O aquecimento do ar promove uma diminuição da sua humidade relativa. Assim, quanto mais ar fresco se adicionar ao ar de reciclo, mais baixa será a humidade relativa do ar de transporte. É a única maneira de fazer diminuir a humidade relativa do ar, já que não é possível retirar água ao ar transporte. Quando a humidade relativa do ar é inferior ao *Set Point* introduzido é injectado vapor de água para aumentar a humidade absoluta do ar.

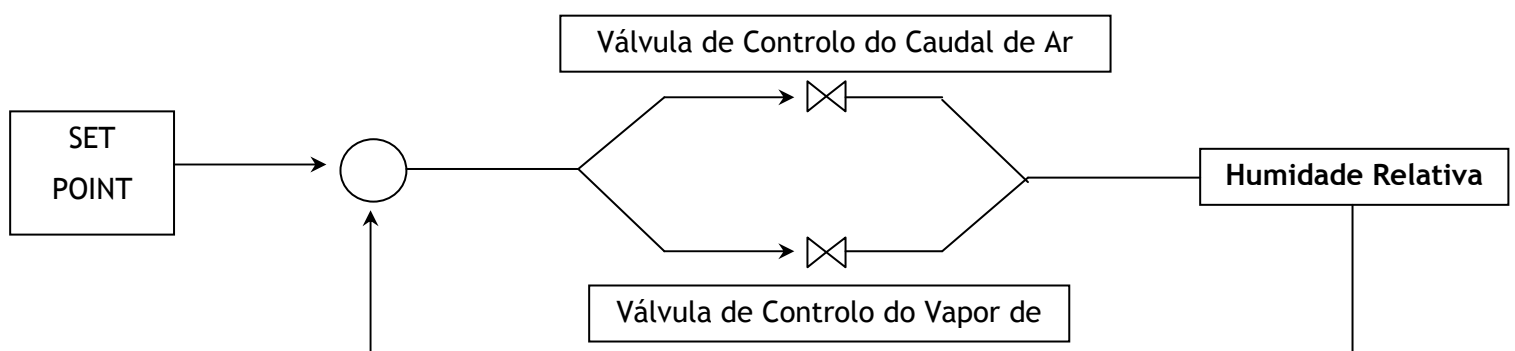


Figura 21 - Esquema de controlo da humidade relativa do ar de transporte.

A temperatura, como já foi discutida anteriormente, é também da máxima importância controlar. Um aumento da temperatura do ar de transporte pode aumentar a temperatura da fibra ou diminuir, dependendo da humidade relativa que o ar possui. Vimos anteriormente

que transportando fibra a uma humidade de 11,9% com a ajuda de um ar com uma humidade relativa de 66% a uma temperatura de 44,6 °C, a fibra perde 1,5% de humidade. Perde porque a humidade relativa do ar é mais baixa do que a humidade do ar secagem a que a fibra atinge o equilíbrio. Assim, para um controlo da temperatura do ar de transporte (*Figura 22*) a única variável possível de manipular é a temperatura do ar fresco. Antes do ar fresco entrar para o sistema ele é aquecido num permutador. Esse aquecimento pode perfeitamente ser controlado, controlando assim a temperatura do ar de transporte.

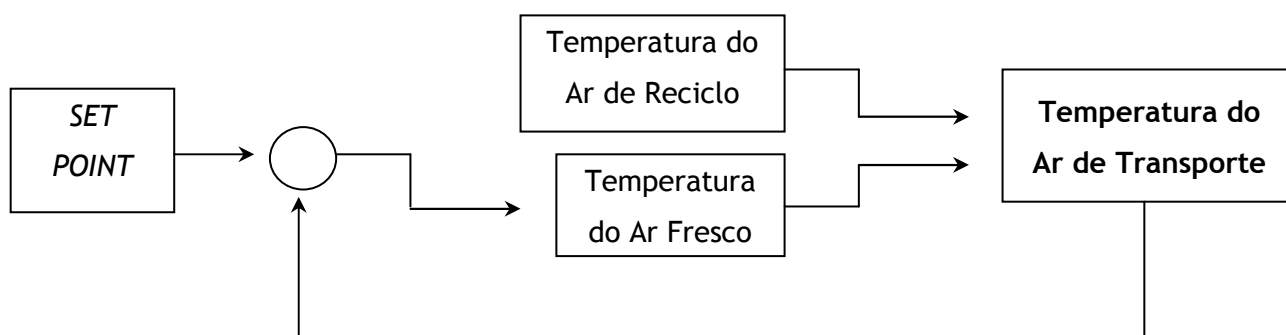


Figura 22 - Esquema de controlo da temperatura do ar de transporte.

No Anexo 1 pode-se ver o balanço e controlo global ao ar de transporte.

Na *Figura 23* encontram-se as temperaturas a que o bolbo seco (ar de transporte) e o bolbo húmido (fibra) em equilíbrio, segundo o diagrama de *Mollier*. A temperatura máxima a usar no transporte é de 70 °C, tal como à saída do secador. Isto diminui a probabilidade de activação da reacção da resina (pré-cura), já que a grande maioria das resinas usadas pela SIAF têm começam a reagir, aproximadamente, aos 80 °C.

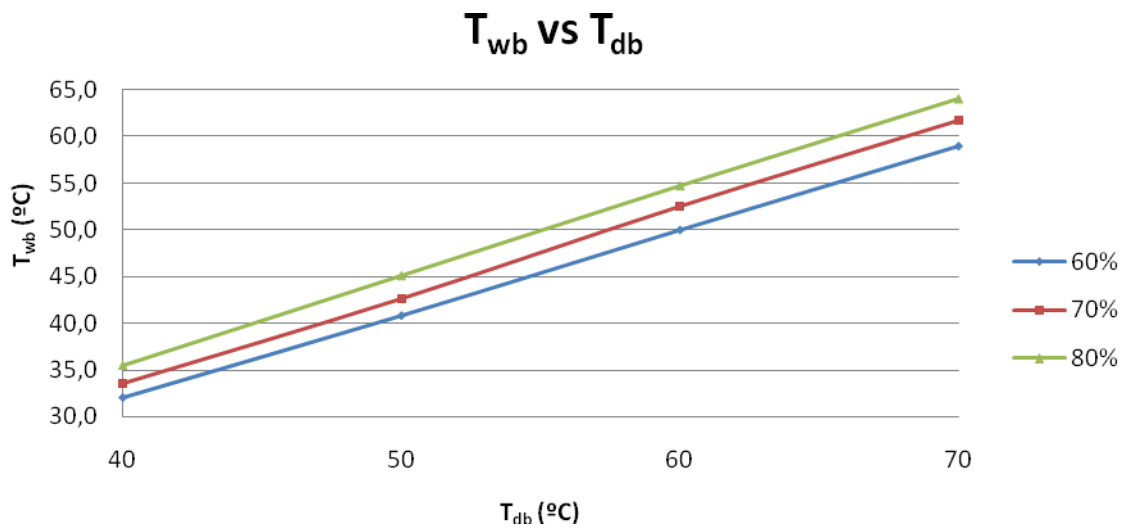


Figura 23 - Temperatura do bolbo húmido (T_{wb}) vs Temperatura do bolbo seco (T_{db}), para humidades relativas de 60%, 70% e 80% (diagrama de *Mollier*).

Verifica-se que, por exemplo, o ar a 60 °C está em equilíbrio com a fibra a 50 °C, a 52,5°C e a 54,7 °C, quando este tem uma humidade relativa de 60%, 70% e 80%, respectivamente. Ou seja, para a mesma temperatura do ar, a temperatura da fibra aumenta com o aumento da humidade relativa do ar. No estudo do transporte da fibra que constitui o MDF 6_B7, verificou-se que a fibra saía do secador (lado da produção), em equilíbrio com o ar de secagem com 75% de humidade relativa e 63,8 °C de temperatura, a uma temperatura de 57,7 °C. Quando passa para um ambiente de 44,6 °C a uma humidade relativa de 66%, a temperatura da fibra baixa para os 38,7 °C. A fibra perde, então, 19 °C. Como a fibra é prensada a quente, quanto maior for a temperatura à qual a fibra chega à prensa, menor será o tempo de prensagem. Isto porque, mais facilmente a resina atinge a temperatura necessária à reacção.

Assim sendo, a fibra pode ser aquecida no sistema de transporte até ao *fiber bin* mantendo a quantidade de água, retida na fibra, constante. A humidade da fibra é constante se a humidade relativa do ar de transporte for também constante, como já foi referido.

4 Conclusões

O comportamento da secagem de fibra foi o esperado. No entanto, há que salientar um pormenor muito importante. O comportamento do secador quando este se divide em duas tubagens é diferente. Existem duas hipóteses, ou existem diferenças nos fluxos de ar ou então fluxos diferentes de fibra nas tubagens que dão acesso aos ciclones. Futuramente determinar-se-á se as tubagens são percorridas com diferentes fluxos de ar. A grande diferença verifica-se quando se compara a humidade determinada por balanços e a humidade em equilíbrio, às mesmas condições envolventes da fibra. Na tubagem que dá acesso ao ciclone (lado da produção) a humidade da fibra é muito semelhante à humidade da fibra determinada pela equação (2). Acrescido a isso, o perfil de temperaturas em ambos os lados é diferente. O perfil do secador (lado da produção) tem um declive final muito menos acentuado do que no perfil do secador (lado da caldeira). Quanto mais próximo está o declive do perfil de temperaturas estiver do zero, mais próxima estará a mistura fibra/ar do equilíbrio. Conclui-se então que a mistura fibra/ar atinge o equilíbrio apenas no ciclone (lado da produção). É extremamente importante que a fibra atinja o equilíbrio para que o controlo do secador com um medidor de humidade relativa seja viável, a fim de equivaler a humidade relativa do ar à humidade que a fibra contém.

O estado de equilíbrio da fibra é dependente da temperatura e da humidade relativa do ar circundante. Como não é possível o controlo dessas duas variáveis em simultânea à que admitir que, dentro da gama de temperaturas de exaustão do ar, a uma humidade relativa a fibra encontra-se com uma determinada humidade. Concretamente, a fibra em equilíbrio com um ar de secagem a 60%, 65%, 70%, 75% e 80% tem uma humidade de 9%, 10%, 11%, 12% e 13%, respectivamente. Segundo a equação de equilíbrio, existe uma variância na humidade da fibra de 1,5% (máximo), se se admitir que a humidade da fibra apenas depende da humidade relativa. Mesmo com esta variância na humidade da fibra torna-se vantajoso usar este sistema de controlo. Isto porque, o sistema de controlo actual possui uma variância de 3% (máximo) na humidade à saída dos ciclones.

A velocidade a que o ar transporta a fibra é muito importante. Foi referido que é mais vantajosa no processo se se trabalhar a temperaturas mais baixas na secagem. A velocidade do ar de secagem, aqui, tem um papel fundamental. Para se poder baixar a temperatura ao ar de secagem à que usar velocidade no ar mais elevadas. Além de diminuir a temperatura do ar à entrada e conseqüentemente à saída do secador, o aumento na velocidade do ar pode garantir uma maior capacidade na secagem, sem que para isso o ar tenha de passar os 240°C à entrada do secador (temperatura máxima recomendada). Os balanços energéticos dizem

mesmo que se gasta menos energia se se secar a fibra a temperaturas inferiores, mas com maior carga no ventilador, do que para temperaturas superiores, mas com menor carga no ventilador.

O aparecimento de “grumos” de fibra tem criado alguma discussão. Neste trabalho concluiu-se que o “grumos” apareciam devia a condensações do vapor de água. Esse fenómeno aparece devido ao factor do ar atingir o ponto de saturação (*dew-point*). Há duas hipóteses para o fenómeno:

- Devido à temperatura ambiente ser baixa (Inverno) e os ciclones não apresentarem nenhuma camisa de aquecimento (apenas lã de vidro) para isolar termicamente as suas paredes, poderá haver arrefecimento do ar de secagem que toca nas paredes dos ciclones, arrefecendo. Como se trabalha a humidade relativa elevada, um ligeiro arrefecimento pode promover a saturação do ar de secagem.

- Falta de capacidade dos ciclones em algumas produções. O que acontece, neste caso, é que eles não separam eficazmente a fase sólida (fibra) da fase gasosa (ar de secagem). Assim sendo, a fibra quando cai arrasta consigo ar de secagem. Esse ar, em contacto com um ar a uma temperatura inferior (ar de transporte) pode arrefece-lo e consequentemente saturando-o. Esta situação pode não acontecer se o ar fresco possuir uma humidade relativa muito baixa, baixando assim a humidade relativa ao ar proveniente da secagem. Ou então a quantidade de ar fresco (tem sempre uma humidade relativa mais baixa do que o ar de secagem porque é aquecido) que entra em contacto com o ar de secagem é suficientemente grande para baixar a humidade absoluta da mistura (ar de secagem/ar de transporte).

Com uma velocidade de transporte do ar de 27 m/s, a uma temperatura de 44,6 e a uma humidade relativa de 66% a fibra perde em média 1,5 pontos percentuais de humidade. É necessário um controlo das características do ar de transporte. Isto permite manter a humidade da fibra constante ao longo de todo o processo de transporte. Além de poder manter a humidade da fibra constante, o ar de transporte pode aquece-la. Para isso a humidade relativa do ar de transporte deve ser igual à humidade relativa do ar de secagem, a fim de manter a quantidade de água contida na fibra constante, e a temperatura do ar de transporte deve ser maior do que a temperatura do ar de secagem. No entanto, existe um limite de temperatura. Esta não deve superar os 70 °C porque pode causar pré-cura à resina.

5 Avaliação do trabalho realizado

5.1 Objectivos Realizados

Após a realização deste trabalho, os seguintes objectivos foram cumpridos:

- ✓ Estudo do comportamento de secagem;
- ✓ Análise à possibilidade de um sistema de controlo do secador por humidade relativa;
- ✓ Análise dos condensados que surgem no *sifter*;
- ✓ Estudo da influência do ar de transporte sobre a fibra;
- ✓ Análise à possibilidade de controlo das características do ar de transporte.

5.2 Outros Trabalhos Realizados

O aparecimento de “grumos” de fibra no *sifter* foi uma constante durante este trabalho. Este tema não fazia parte dos objectivos principais do trabalho em questão. No entanto, houve sempre uma ligeira curiosidade em tentar descobrir o aparecimento desses condensados. Como se encontra interligado ao secador e ao transporte da fibra, decidiu-se pôr o estudo no seguimento da análise e resultados destes processos. Pode-se encontrar a explicação a este fenómeno de condensação no subcapítulo 3.2.3, *Dew Point*.

5.3 Limitações e Trabalho Futuro

Foi referido anteriormente que existe uma diferença de comportamento de secagem nas duas tubagens que dão acesso aos ciclones. Através de uma análise ao caudal do ar pode-se chegar a uma conclusão mais concreta.

O medidor de humidade relativa, como já foi referido, possui um sensor extremamente sensível e coberto por uma rede metálica. No entanto, não se qual a fiabilidade de um medidor de humidade relativa num ambiente tão turbulento, como o ciclone do secador, e poluído, como o secador de fibra. O facto de o ar de secagem conter resina faz com que esta se agarre à rede metálica que protege o sensor de humidade relativa, bloqueando-o. Além disso, o medidor só pode ser colocado onde a fibra já atingiu o equilíbrio. Ou seja, ou no interior do ciclone ou no final da tubagem do secador. Assim, é necessária uma avaliação prévia do local onde o medidor será colocado.

5.4 Apreciação final

Ao longo deste trabalho verificou-se o quanto era importante determinar com precisão a humidade absoluta do ar de secagem a fim de determinar a humidade da fibra. O método utilizado não é o mais preciso. Como foi referido, não se consegue aferir a temperatura do bolbo húmido com precisão, através do pano húmido envolvendo a sonda. Para além da dificuldade em manter constante a temperatura da sonda, com o pano húmido envolvendo-a, a fim de determinar a temperatura do bolbo húmido, as condições à entrada do secador não são sempre constantes. Basta uma ligeira variação na temperatura de entrada do ar ou mesmo uma variação na quantidade de água que entra no secador para alterar a temperatura do bolbo húmido. Como não se consegue aferir instantaneamente as temperaturas, então muitas vezes torna-se difícil corresponder correctamente a temperatura do bolbo seco à temperatura do bolbo húmido a fim de se poder determinar a humidade absoluta e relativa do ar de secagem. Acrescido a isso, existe ainda uma leitura no diagrama de *Mollier* que pode acrescentar ainda mais erros à medição, dado ter uma precisão baixa. Vimos que uma diferença de 0,1 pontos percentuais na humidade absoluta do ar altera significativamente a humidade da fibra, já que existe uma enorme diferença entre a massa de cada um que passa no secador. A única forma de garantir um erro mais ou menos aceitável é através da humidade da fibra na linha, que é constantemente determinada pelo medidor de humidade que se encontra na linha de produção, que se usa como referência. Contudo, seria bastante interessante utilizar um outro método com mais precisão

O controlo por humidade relativa pode ser possível, no entanto tem algumas limitações. O grande problema do medidor de humidade relativa é que o sensor é extremamente sensível. O sensor é envolvido por uma rede metálica que o protege. No entanto, se se inserir o medidor na tubagem do secador, essa rede ao fim de algum tempo acaba por ficar completamente envolvida em resina (não aderiu às fibras), necessitando de manutenção permanente. Inserindo o medidor de humidade relativa no ciclone, poder-se-á ter problemas quanto à precisão da medição dado que dentro do ciclone existe um ambiente extremamente turbulento.

Referências

- [1] Allen, D.G., C. Saefstroem, P. Wiecke, (1988), "Design aspects of modern MDF plants", Appita J.
- [2] Cai Z., Muehl J. H., Winandy J. E. (2006), Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard. FOREST PRODUCTS JOURNAL
- [3] Carvalho, A. (1996). Madeiras Portuguesas. Escola Superior Tecnologia Viseu.
- [4] Carvalho, L. e Costa, C. (2003). A global model for the hot-pressing of MDF. Springer-Verlag
- [5] Chow, P. and L. Zhao. 1992. Medium-density fiberboard made from phenolic resin and wood residues of mixed species. Forest Prod. J.
- [6] Clark, P.A. (1991) Panel products - past, present and future - developments. J. Inst.Wood Sci. 12:233-241.
- [7] Dai, C. and S. Wang. (2004). Press control for optimized wood composite processing and properties. In: Proc. Fundamentals of Composite Processing. J. Winandy and F.A. Kamke, eds. Gen. Tech. Rept. FPL-GTR-149. USDA Forest Serv., Forest Products Lab. Madison.
- [8] Di Blasi, Colomba (1997), Multi-phase moisture transfer in the high temperature drying of wood particles. P.le V.Tecchio, I-80125 Naples, Italy.
- [9] Dynea, M.D. (2001). Wood Adhesion and Glued Products. COST Action E13.
- [10] Frazier, C.E. (2004). Monitoring resin cure in the mat for hot-compression modeling. In: Proc. Fundamentals of Composite Processing. J. Winandy and F.A. Kamke, eds. Gen. Tech. Rept. FPL-GTR-149. USDA Forest Serv., Forest Products Lab. Madison, WI.
- [11] Goring, D.A.I. (1971). "Polymer properties of lignin derivatives", in: Sarkanen, K.V., and C.H. Ludwig eds., *Lignins, occurrence, formation, structure and reactions*, Wiley, New York, 695-761.
- [12] Hague, J., D. Robson, and M. Riepen. 1999. MDF process variables-An overview of their relative importance. In: Proc. of the 33th Inter. Particleboard/Composite Material Symp. T.M. Maloney, ed. Washington State Univ., Pullman, WA.
- [13] Howard, J.L. (2004). U.S. forest products annual market review and prospects, 2001-2004. Res. Note FPL-RN-0292. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

- [14] Humphrey, P.E. and A.J. Bolton. (1989). The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Part II. A simulation model for heat and moisture transfer, and typical results. *Holzforschung*.
- [15] Kamke, F.A. (2004). Physics of hot pressing. In: Proc. Fundamentals of composite processing. J. Winandy and F.A. Kamke, eds. Gen. Tech. Rept. FPL-GTR-149. USDA Forest Serv., Forest Products Lab. Madison, WI.
- [16] Lee, H.H. and T.M. Maloney. (1995). The effect of final moisture content of mat on the physical and mechanical properties of UF-bonded MDF. *J. of Korean Wood Sci. and Tech.*
- [17] Length, C.A. and F.A. Kamke. (1996). Investigations of flakeboard mat consolidation. Part II. Modeling mat consolidation using theories of cellular materials. *Wood and Fiber Sci.*
- [18] M.P. Wolcott. (1991). Fundamentals of flakeboard manufacture: Wood-moisture relationship. *Wood Sci. and Tech.*
- [19] Maclaren, P., (2005). *The Leading Edge - The Originating History of MDF in New Zealand*. New Zealand Institute of Forestry Secretariat. New Zealand.
- [20] Maloney, T.M., (1989). *Modern Particleboard & Dry-Process Fiberboard Manufacturing*. Miller Freeman Publications, California, USA.
- [21] MALONEY, T. M. (1996). The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*.
- [22] Sverker, Ö.(2004), *Process Training, Metso Panelboard*
- [23] Pang, S. (200). *Mathematica Modelling of MDF Fibre Drying: Drying Optimisation*. New Zealand Forest Research Institute.
- [24] Pang, S. (2001). Improving MDF Fiber Drying Operation by Application of a Mathematical Model. *Drying Tech.*- 19(8), 1789-1805.
- [25] Park, B.D., B. Riedl, E.W. Hsu, and J. Shields. (1999). Hot-pressing process optimization by response surface methodology. *Forest Prod. J.*
- [26] Siau, J. F. (1984) *Transport Processes in Wood*. Springer, Berlin.
- [27] Simpson W., (1998) *Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide*. Research Forest Products Technologist Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.
- [28] Smith JHG, Kozak A (1967). Thickness and percentage of bark of the commercial trees of British Columbia. Faculty of forestry, University of British Columbia, Vancouver.

- [29] Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M. (2000). Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- [30] Suchsland O, Woodson GE (1991) Fiberboard manufacturing practices in United States. Forest Products Research Society.
- [31] Valença, A. et al (2007). MDF - Medium Density Fiberboard. BNDES.
- [32] Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Forest Products Laboratory. 1999.
- [33] Xing C, Riedl B, Cloutier A (2004a) Measurement of urea-formaldehyde resin distribution as a function of MDF fiber size by laser scanning microscopy. Wood Sci Technol 37(6)
- [34] Xing C, Zhang S.Y., Deng J., Wang S. (2007) Investigation of the effects of bark fiber as core material and its resin content on three-layer MDF performance by response surface methodology. Springer-Verlag

Anexo 1 Diagrama de Mollier

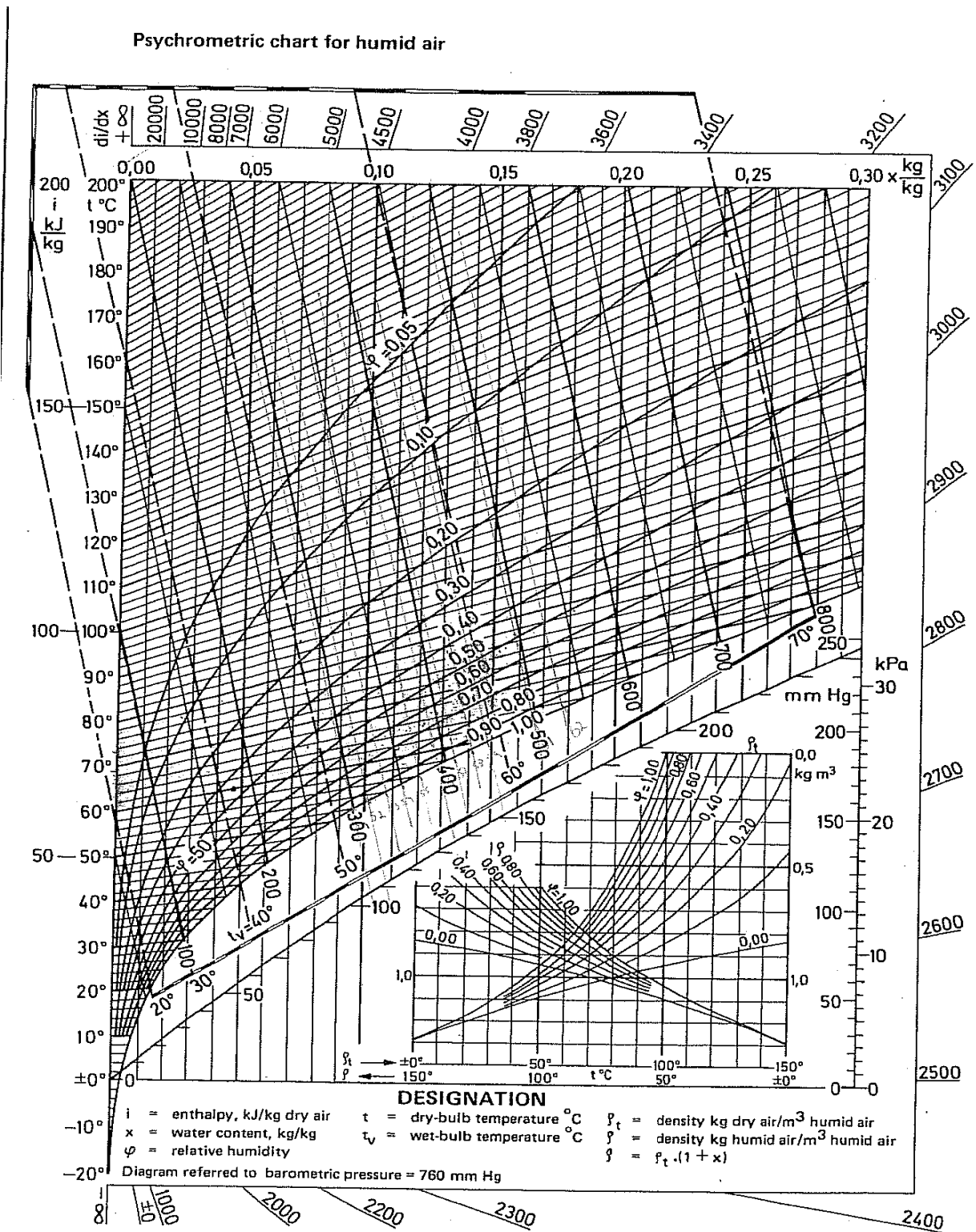


Figura... - Diagrama de Mollier.

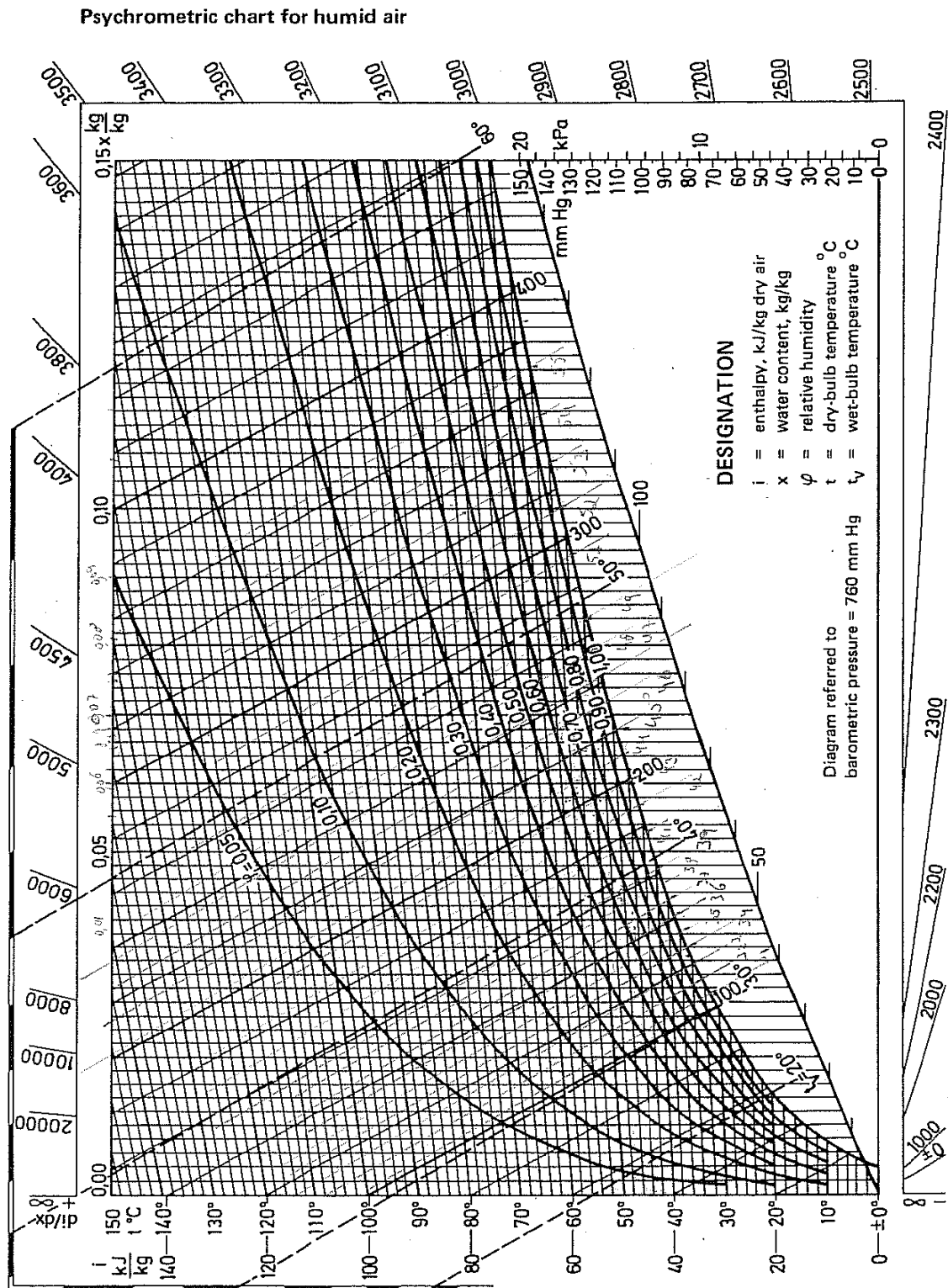


Figura... - Diagrama de Mollier.

Anexo 2 Curva característica do ventilador de secagem

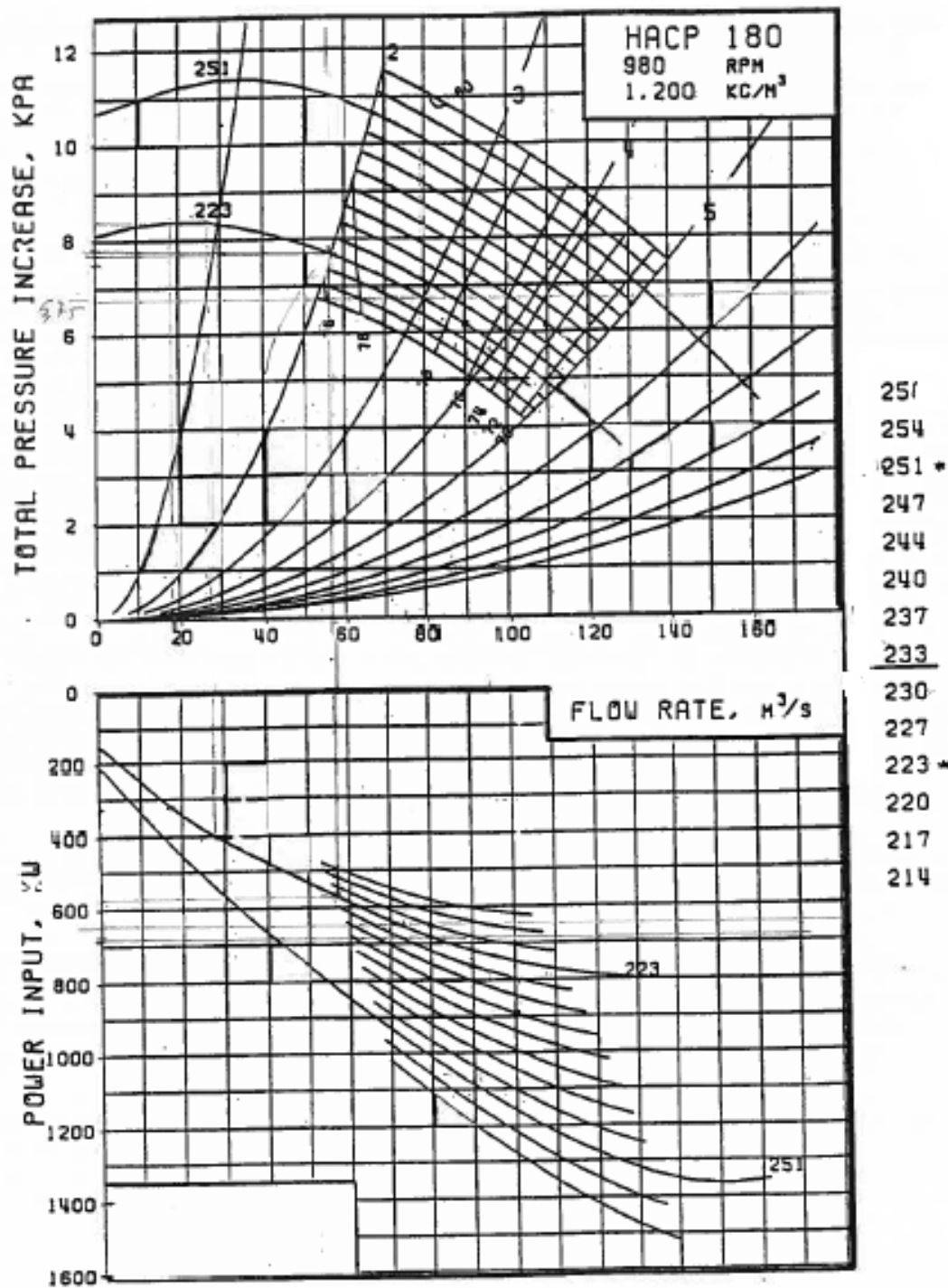


Figura 24 - Curva característica do ventilador de secagem

Anexo 4 Formulário

Humidade da fibra é a fracção entre a quantidade de água e quantidade de fibra seca (madeira seca) [31]:

$$H = \frac{m1 - m2}{m2} \quad (1)$$

em que $m1$ é a massa da fibra húmida e $m2$ é a massa da fibra seca.

Abaixo do PSF, a humidade da madeira estabelece um equilíbrio com a humidade relativa e temperatura do ar circundante. A humidade contida na madeira em equilíbrio aumenta gradualmente com o aumento da humidade relativa do ar, até as paredes celulares das fibras ficarem completamente saturadas quando a humidade relativa do ar se aproxima dos 100%.

Os diferentes pontos de equilíbrio podem ser calculados através da equação (Simpson 1973, Forest Products Laboratory 1987) [26]:

$$EMC = \frac{1800}{W} \left[\frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right] \quad (2)$$

em que T é a temperatura do ar, °C, h é a humidade relativa do ar.

$$W = 349 + 1,29T + 0,0135T^2$$

$$K = 0,805 + 0,000736T - 0,00000273T^2$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2$$

em que W , K , K_1 e K_2 são os coeficientes do modelo de adsorção desenvolvidos por Hailwood e Horrobin (1946).

Neste estudo usou-se esta equação como a equação que descrevia o equilíbrio entre a humidade da fibra e a temperatura e humidade relativa do ar que envolve a fibra.

A energia necessária para evaporar água ligada é maior já que o calor latente deste tipo de água só depende da humidade existente na fibra, como se pode verificar a seguir. Esse calor latente é usado para quando a quantidade de água está abaixo do PSF.

Entalpia de vaporização da água ligada (adsorvida nas paredes celulares) [8]:

$$\Delta h_b = 3348 - 13085U + 60262U^2 - 95778U^3 \quad (3)$$

em que U é a humidade da fibra.

A entalpia de vaporização da água (equação de Clausius Clapeyron) [28]:

$$\Delta h_c = 2511000 - 2480 * T_w \quad (4)$$

em que T_w é a temperatura da água.

A pressão de vapor de saturação pode ser determinada com boa precisão através da equação [25]:

$$p_0 = 8,75 \times 10^7 \exp\left(\frac{-10400}{RT_a}\right) \quad (5)$$

em que p_0 é a pressão de vapor de saturação, $R=1,986$ cal/gmol.K é a constante dos gases ideais e T_a a temperatura do ar.

A pressão parcial do vapor de água no ar pode ser calculada através [25]:

$$p_v = h * p_0 \quad (6)$$

em que p_v é a pressão parcial do vapor de água, h é a humidade relativa do ar.

Com isto, possibilita o cálculo da temperatura à qual o ar atinge o *dew-point* (temperatura de orvalho).

A potência e o caudal debitado pelo do ventilador foi determinada através da curva característica do ventilador.

Para o cálculo da velocidade do ar na tubagem foi usada a seguinte equação:

$$Q = A_s v \quad (7)$$

em que Q é o caudal volumétrico do ar, A_s é a área da secção recta da tubagem e v a velocidade do ar.

A potência do ventilador   determinada pela equa o:

$$P = I * T * \cos \phi * \sqrt{3} \quad (8)$$

em que P   a potência do ventilador, $T=6000$ Volts (tensão da corrente), I   a intensidade da corrente, $\cos \phi$   o factor de potência.

A capacidade calorífica do ar atmosférico, ar de secagem e ar de transporte, necessária ao balanço energético dos sistemas de secagem e de transporte, foi determinada pela equa o (considerando que têm um comportamento de gases ideais) da capacidade calorífica de gases no estado de gás ideal.

A capacidade calorífica de gases no estado de gás ideal   definida por [28],

$$\frac{C_P^{gi}}{R} = A + BT_g + CT_g^2 + DT_g^{-2} \quad (9)$$

em que C_P^{gi}   a capacidade calorífica dos gases ideais, $R=8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$   a constante dos gases ideais, T_g   a temperatura do gás. A , B , C e D são os parâmetros da equa o referentes a cada elemento constituinte do gás.

Os valores dos parâmetros de cada elemento constituintes dos gases estudados estão na tabela seguinte.

Tabela 11 - Parâmetros da equa o da capacidade calorífica dos gases em estado ideal.

Elemento	A	B	C	D
CO ₂	5,457	1,05E-03	-	1,16E+05
O ₂	3,639	5,06E-04	-	2,27E+04
N ₂	3,28	5,93E-04	-	4,00E+03
H ₂ O	3,47	1,45E-03	-	1,21E+04