



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

CAMPUS DE BAURU - FACULDADE DE CIÊNCIAS

**JOSÉ EDUARDO ESTEVAM DA SILVA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS RESINAS TERMOFIXAS URÉIA  
FORMALDEÍDO (UF) E MELAMINA FORMALDEÍDO (MF) NAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS MDF.**

**BAURU**

**2013**

**JOSÉ EDUARDO ESTEVAM DA SILVA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS RESINAS TERMOFIXAS URÉIA  
FORMALDEÍDO (UF) E MELAMINA FORMALDEÍDO (MF) NAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS MDF.**

Trabalho de conclusão de curso para obtenção do  
título de Licenciado em Química pela Universidade  
Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” –  
Campus de Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Gilbert Bannach

**Bauru**

**2013**

Silva, José Eduardo E.

**Estudo da influência das resinas termofixas uréia formaldeído (UF) e melamina formaldeído (MF) nas características físicas e mecânicas de painéis MDF.**

/ José Eduardo Estevam da Silva, 2013. p.

Orientador: Prof. Dr. Gilbert Bannach.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Estadual Paulista, Licenciatura em Química. Faculdade de Ciências, Bauru, 2013.

1. Resina termofixa 2. Testes tecnológicos 3. Painéis de MDF

**JOSÉ EDUARDO ESTEVAM DA SILVA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS RESINAS TERMOFIXAS URÉIA  
FORMALDEÍDO (UF) E MELAMINA FORMALDEÍDO (MF) NAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS MDF.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Licenciatura em Química da  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de  
Mesquita Filho” – UNESP – Campus de Bauru,  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Licenciado em Química.

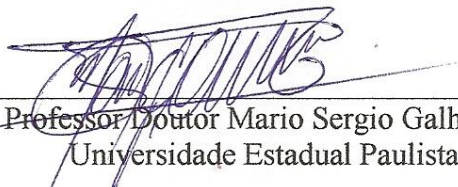
**Aprovado em 29 de novembro de 2012.**

**Banca Examinadora**



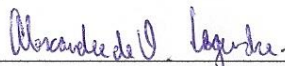
---

Professor Doutor Gilbert Bannach.  
Universidade Estadual Paulista



---

Professor Doutor Mario Sergio Galhiane.  
Universidade Estadual Paulista



---

Professor Doutor Alexandre de Oliveira Legendre.  
Universidade Estadual Paulista

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Viviana, mulher que me apoiou e me impulsionou a chegar até aqui. Muito obrigado por tudo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho de conclusão de curso é o desfecho de uma longa e árdua jornada onde batalhas foram vencidas para que um sonho fosse realizado: ser professor de Química.

Em tudo precisamos ser gratos. Nesse espaço, quero demonstrar minha gratidão a várias pessoas.

Começo agradecendo a uma Pessoa Especial: agradeço a Deus por me amparar em todos os instantes dessa graduação, principalmente quando tudo parecia escuro... Mas nunca estive sozinho.

“Até aqui nos ajudou o SENHOR.” 1 Samuel 7,12

Agradeço a minha esposa Viviana. Se não fosse ela, nada disso teria acontecido. Obrigado por abrir mão de alguns instantes comigo para que eu pudesse voltar a estudar. Obrigado por tudo.

Também agradeço muito ao Professor Doutor Gilbert Bannach. Sua paciência permite que sonhos sejam realizados. Obrigado por acreditar em mim.

Agradeço ao Diogo Gálico e ao Renan Guerra (mestrandos do POSMAT) que me ajudaram muito na fase final de meu trabalho.

Por fim, agradeço a Duratex SA na pessoa do Engenheiro de Processo José Antônio Lanzoni Júnior pela disponibilidade da estrutura fabril e obtenção do material analisado.

## RESUMO

As resinas termofixas são muito importantes no processo de produção de painéis MDF. Elas agem como um adesivo no processo de compactação e consolidação do painel de fibras de madeira. As resinas termofixas mais usadas nesse processo são as resinas a base de uréia formaldeído (UF) e melamina formaldeído (MF). A primeira possui maior demanda devido ao seu baixo custo e bom desempenho no atendimento a especificações e normas. A segunda possui alto custo em relação a resina MF, mas agrega maior valor ao painel MDF, pois lhe atribui maior resistência à umidade. O processo de fabricação de chapas de MDF foi resumidamente apresentado neste estudo visando facilitar a compreensão do trabalho. Amostras de resinas termofixas (UF e MF) foram submetidas a análises físico-químicas buscando relacionar tais resultados ao desempenho tecnológico apresentado por suas respectivas amostras de chapas de MDF. Outras duas amostras de chapas MDF foram submetidas a testes físico-mecânicos. Seus resultados foram analisados e relacionados com o laudo de sua respectiva resina termofixa. Instrumentos como o Dahmos Trend Manager<sup>®</sup> e o Grecon Dax 5000 e a análise de TG-DSC foram usados nesse estudo para auxiliar na análise dos resultados. Observou-se que os resultados das análises das resinas termofixas estavam dentro do especificado. Tais resinas não influenciaram diretamente nos testes tecnológicos apresentados pelas chapas MDF, mas verificou-se que variáveis do processo como umidade da fibra e velocidade de produção interferiram no desempenho da resina, acelerando a sua reação e por consequência influenciando nas características físico-mecânicas dos painéis MDF. As amostras de chapas MDF com resinas UF e MF atenderam a todas as especificações exigidas pela norma brasileira no que se refere à qualidade tecnológica. A maior demanda de resina UF no mercado se justificou pelo atendimento as especificações, pelo menor custo industrial e pelos bons resultados operacionais durante o processo de produção.

Palavras chaves: resinas termofixas, testes tecnológicos, chapas de MDF.

## **ABSTRACT**

Thermosetting resins are very important in the production of MDF panels. They act as an adhesive in the process of compacting and consolidating the fiberboard. Thermoset resins commonly used in this process are based resin urea formaldehyde (UF) and melamine formaldehyde (MF). The first has a higher demand due to its low cost and good performance in meeting the specifications and standards. The second has a high cost compared to MF resin, but adds greater value to the MDF panel, because it gives greater moisture resistance. The process of manufacture of MDF boards was briefly presented in this study to facilitate the understanding of the work. Samples of thermosetting resins (UF and MF) were subjected to physical-chemical seeking to relate these results to the technological performance presented by their respective samples of MDF boards. Two other samples of MDF panels were subjected to physical and mechanical tests. Results were analyzed and related to the award of their respective thermoset resin. Instruments like Dahmos Trend Manager ® and Grecon Dax 5000 and TG - DSC analysis were used in this study to assist in the analysis of the results. It was observed that the results of the analysis of thermosetting resins were within the specified. Such resins do not directly influence the technological tests provided by the MDF panels, but it has been found that the process variables such as humidity and fiber production rate interfere with the performance of the resin accelerating the reaction and therefore their influence on the physical-mechanical properties of the panels MDF. Samples of MDF panels with UF and MF met all the specifications required by the Brazilian standard with regard to the technological quality. The increased demand for UF resin market is justified by the service specifications, the lower manufacturing cost and the good operating results during the production process.

**Keywords:** thermosetting resins, technological tests, MDF boards.



## **ABREVIATURAS**

MDF – Medium Density Fiberboard

UF – Uréia-formaldeído

MF – Melamina formaldeído

FF – Fenol formaldeído

MUF – Melamina uréia-formaldeído

GPC – Grupo Peixoto de Castro

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

cP - centi-poise

NBR - Norma brasileira

EN – Norma europeia

ABIPA - Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira

TG – Termogravimetria

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

IMAL – Empresa italiana fabricante de equipamentos industriais

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Polimerização resina uréia-formaldeído .....	15
Figura 2 – Móvel fabricado com painéis MDF .....	17
Figura 3 – Máquina transportadora de toras .....	18
Figura 4 – Picador de toras .....	18
Figura 5 – Silo de cavaco de madeira .....	19
Figura 6 – Cozimento e desfibração do cavaco .....	19
Figura 7 – Encolagem das fibras de madeira .....	20
Figura 8 – Tubulação do secador de fibras .....	20
Figura 9 – Formação do colchão de fibras .....	21
Figura 10 – Desaeração e compactação do colchão .....	21
Figura 11 – Prensa contínua .....	22
Figura 12 – Rodas de resfriamento de chapas.....	22
Figura 13 – Processo de fabricação de chapas de MDF (Metso, 2012.).....	23
Figura 14 – Chapas de MDF em várias espessuras .....	26
Figura 15 – Produção/ consumo de painéis MDF no Brasil entre 1995 e 2005	27
Figura 16 – Copo Ford .....	31
Figura 17 – Aparelho Brookfield .....	32
Figura 18 – Equipamento para determinação da densidade da chapa .....	35
Figura 19 – Equipamento para determinação de trações perpendiculares .....	36
Figura 20 – Corpos de prova.....	37
Figura 21 – Corpo de prova para tração superficial .....	38
Figura 22 - Equipamento para determinação de perfil de densidade .....	41
Figura 23 – Perfil de densidade.....	41
Figura 24 – Perfil de densidade.....	42
Figura 25 – Rastreamento da Chapa UF .....	49

Figura 26 – Rastreamento da Chapa MF .....	49
Figura 27 – Perfis de Referência.....	51
Figura 28 – Perfil de densidade da Chapa UF .....	53
Figura 29 – Perfil de densidade da Chapa MF .....	54
Figura 30 – Rastreamento da Chapa D.....	57
Figura 31 – Perfil de densidade da Chapa D.....	58
Figura 32 – Curva TG-DSC amostra A.....	60
Figura 33 – Curva TG-DSC amostra B.....	61
Figura 34 – Curva TG-DSC amostra C .....	61
Figura 35 – Curva TG-DSC amostra D .....	62

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo de algumas especificações das resinas sintéticas.....	34
Tabela 2 – Dimensões das amostras .....	39
Tabela 3 - Especificações de chapas MDF .....	43
Tabela 4 – Resultados das análises das resinas termofixas .....	45
Tabela 5 – Resultados dos testes físico-mecânicos da chapa com resina UF .	47
Tabela 6 – Resultados dos testes físico-mecânicos da chapa com resina MF	47
Tabela 7 - Resultados da análise da resinas termofixa UF – ChapaD .....	55
Tabela 8 – Resultados dos testes físico-mecânicos da chapa D .....	56
Tabela 9 – Eventos térmicos das amostras de chapas MDF .....	59
Tabela 10 – Composição das amostras de MDF .....	60

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	15
1.1 - Processo de produção de chapas MDF .....	17
1.1.1 - Descascamento .....	18
1.1.2 - Fragmentação.....	18
1.1.3- Classificação dos cavacos.....	18
1.1.4 - Armazenamento de cavacos .....	18
1.1.5 - Tratamento de cavacos .....	19
1.1.6 - Desfibramento .....	19
1.1.7 - Mistura de resina .....	20
1.1.8 - Secagem das fibras .....	20
1.1.9 - Armazenamento das fibras .....	20
1.1.10 - Formação do colchão .....	21
1.1.11 - Pré-prensagem .....	21
1.1.12 - Prensagem .....	22
1.1.13 - Corte e Resfriamento.....	22
1.1.14 - Lixamento, recorte e revestimento.....	23
1.2- Análise Térmica .....	24
1.2.1- Termogravimetria (TG) .....	24
1.2.2. - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	25
2- OBJETIVOS .....	25
2.1- Objetivo geral.....	25
2.2- Objetivos específicos .....	25
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1 - Histórico .....	25
3.2 – Desenvolvimentos tecnológicos do MDF no período de 2000-2013 ....	26
4- MATERIAIS, MÁQUINAS E MÉTODOS.....	30
4.1 – Análise de resinas – Principais parâmetros de controle.....	30
4.1.1 - Gel Time .....	30
4.1.2 - Viscosidade .....	31
4.1.3 - Densidade .....	33
4.1.4 - pH.....	33
4.2 – Análise de chapas MDF - Principais propriedades físico-mecânicas ...	34

4.2.1	- Densidade .....	34
4.2.2	- Tração perpendicular .....	36
4.2.3	- Tração superficial ou Resistência superficial.....	37
4.2.4	- Resistência à flexão .....	39
4.2.5	- Determinação do perfil de densidade MDF .....	40
5	- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1	- Análise das resinas e das propriedades físico-mecânicas das chapas	44
5.1.1	- Resina termofixas UF e MF .....	44
5.1.2	- Testes físico-mecânicos .....	45
5.1.3	- O software Dahmos Trend Manager <sup>®</sup> .....	47
5.1.4	- Umidade da fibra (%).....	48
5.1.5	- Espessura da chapa (mm).....	50
5.1.6	- Velocidade (mm/s).....	50
5.1.7	- Fluxos de fibra e resina (Kg/min) .....	50
5.1.8	- Perfil de densidade das chapas UF e MF .....	51
5.1.9	- Chapa UF fora de especificação.....	54
5.2	- Chapas UF e MF analisadas por TG-DSC .....	58
6	- CONCLUSÃO.....	62
7	- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## 1- INTRODUÇÃO

As resinas termofixas desempenham um papel muito importante na manufatura de painéis de madeira reconstituída. Elas agem como aglutinantes ou adesivos no processo de compactação e consolidação do painel de madeira (BELINI, 2005, p.90).

O termo “resinas termofixas” é o nome genérico dado a classe de produtos que após a cura apresentam composição química complexa e alto peso molecular. Pode ser usada em trabalhos com ou sem pressão, apresentando cura total somente no processo de transformação da resina em produto final.

Conforme Lessmann (2008), as resinas usadas na confecção de painéis de madeira são classificadas como resinas amínicas, ou seja, resultam da condensação de aminas com aldeídos (exemplo formaldeído). Possuem em sua composição alguns grupos reativos entre si, geralmente grupos carbonílicos (por exemplo formol) que reagem com grupos amino, imino ou amida (por exemplo uréia e melamina) formando estruturas tridimensionais complexas. Assim, as resinas amínicas pertencem ao grupo dos polímeros termofixos.

### Urea formaldehyde polymerization

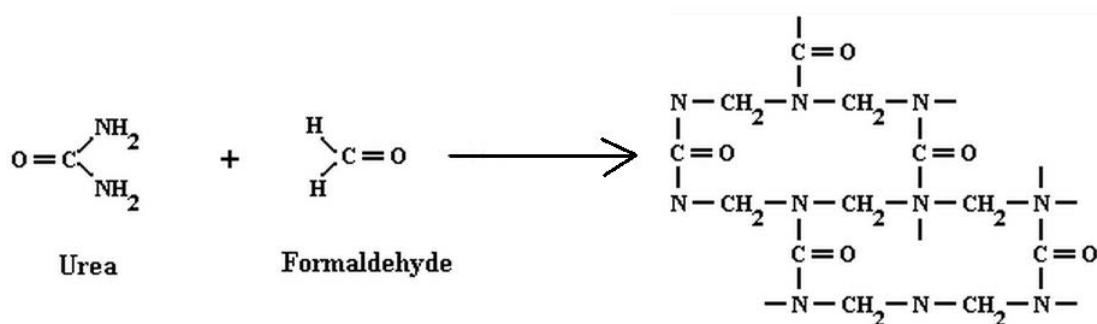
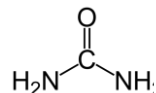
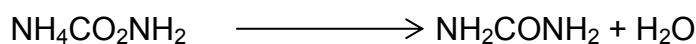


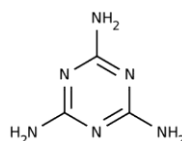
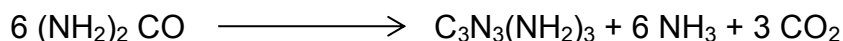
Figura 1 – Polimerização resina uréia-formaldeído (*University of Queensland, 2012.*)

De uma forma resumida, na fabricação das resinas amínicas são observados os seguintes compostos:

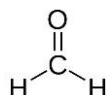
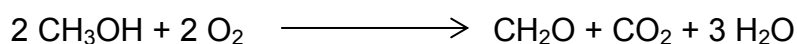
- Uréia: é obtido da reação em alta pressão/temperatura da amônia com o dióxido de carbono:



- Melamina: é obtida a partir da uréia.



- Formol: é obtido através da oxidação do metanol em altas temperaturas, normalmente em soluções aquosas de 35% a 55%.



De acordo com Belini (2003), os principais tipos de resina termofixas utilizadas pelas indústrias de painéis à base de madeira são: uréia formaldeído (UF), melamina formaldeído (MF) e fenol formaldeído (FF). Além de conferir características mecânicas aos painéis de madeira, a resina desempenha também papel importante no custo do produto representando até 50% no custo total.

Durante o processo de encolagem das fibras de madeira são adicionados a resina outros compostos químicos. O mais importante é o sulfato de amônio, pois este é usado como catalisador da reação, ou seja, acelera a polimerização da resina. Costa et al. (2012) destaca que os catalisadores convencionais (também chamados catalisadores latentes) consomem o formaldeído para criar um ambiente ácido, essencial para a reação de cura. Catalisadores latentes, como sulfato de amônio reagem com o formaldeído formando ácido sulfúrico, água e hexamina.





Para cada aplicação do painel de MDF, usa-se um tipo diferente de resina. Os painéis MDF são usados na indústria moveleira para confecção de móveis em geral e na construção civil como pisos laminados, rodapés, almofadas de portas, divisórias, portas usinadas, etc. A exposição à umidade é um dos fatores mais importantes que interferem na escolha da resina termofixa para garantir que o painel MDF possa atender às especificações de caráter físico-mecânico.



Figura 2 – Móvel fabricado com painéis MDF (Duratex, 2012.)

Neste trabalho de conclusão de curso será estudado o processo de fabricação de painéis MDF (Medium Density Fiberboard) bem como a influência de cada tipo de resina termofixa nas principais características físicas e mecânicas desses painéis.

### **1.1 - Processo de produção de chapas MDF**

O processo de produção de MDF inclui principalmente: desfibração mecânica da madeira (transformação dos cavacos em fibras), mistura das fibras com resina, secagem, formação de colchão e prensagem a quente. A seguir são apresentadas as etapas principais da produção dos painéis de MDF:

**1.1.1 - Descascamento** – as toras de madeira (pinus ou eucalipto) são descarregadas do caminhão por meio de uma máquina com garras e são transportadas para outra máquina onde serão descascadas. Essas cascas são usadas como biomassa nas caldeiras;



Figura 3 – Máquina transportadora de toras (adaptado de Siempelkamp, 2009.)

**1.1.2 - Fragmentação** - após o descascamento, as toras são picadas sofrendo fragmentação, onde são gerados cavacos ou pequenas partículas de madeira medindo aproximadamente 0,5 x 3,0 x 4,0 cm (espessura x largura x comprimento);

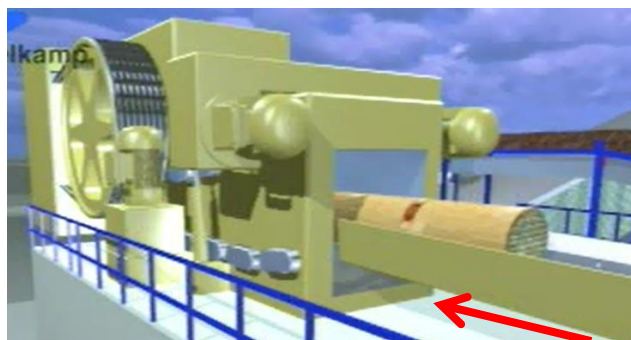


Figura 4 – Picador de toras (adaptado de Siempelkamp, 2009.)

**1.1.3-Classificação dos cavacos** – por meio de várias peneiras, os cavacos de madeira sofrem separação quanto ao tamanho. Eles devem apresentar um volume aproximado de 6,0 cm<sup>3</sup>. Cavacos muito grandes retornam ao repicador para sofrerem outra fragmentação. O objetivo é manter um mesmo padrão dimensional dos cavacos;

**1.1.4 - Armazenamento de cavacos** - são armazenados em silos com volume equivalente a 24 horas de operação. O ideal é que os silos sejam cobertos para proteger os cavacos do contato direto com a chuva, sol, etc;



Figura 5 – Silo de cavaco de madeira (adaptado de Siempelkamp, 2009.)

**1.1.5 - Tratamento de cavacos** - nesta etapa os cavacos são lavados com água quente para retirar o máximo de impurezas como areia, insetos, etc. Depois, os cavacos são inseridos no pré-aquecedor e posteriormente precipitam em direção ao digestor. Neste local, os cavacos são literalmente cozidos em vapor em torno de 100 °C e pressão interna de 9,0 bar. A madeira é amolecida para facilitar a operação do desfibrador;

**1.1.6 - Desfibramento** – por meio de dois grandes discos rotativos (um fixo e outro móvel) pressurizados com vapor, os cavacos de madeira são desfibrados e assumem dimensões (largura e espessura) próximas a 0,2 mm e comprimento aproximado de 1 cm;

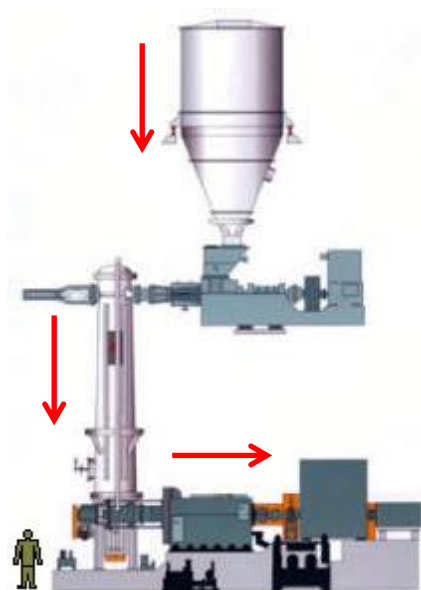


Figura 6 – Cozimento e desfibrção do cavaco (Siempelkamp,2009)

**1.1.7 - Mistura de resina** – as fibras de madeira recebem a resina termofixa uréia formaldeído ou melamina formaldeído, o catalisador (sulfato de amônio), água, emulsão de parafina e, em alguns casos, outros aditivos;



Figura 7 – Encolagem das fibras de madeira (adap. Siempelkamp, 2009.).

**1.1.8 - Secagem das fibras** – as fibras encoladas adentram o secador horizontal que possui temperaturas internas de 160 e 105 °C na entrada e saída respectivamente. O secador possui um comprimento aproximado de 95 metros e diâmetro de 2,3 metros. A sua principal função é controlar a umidade da fibra. A umidade ideal da fibra deve ser próxima de 9,0%;

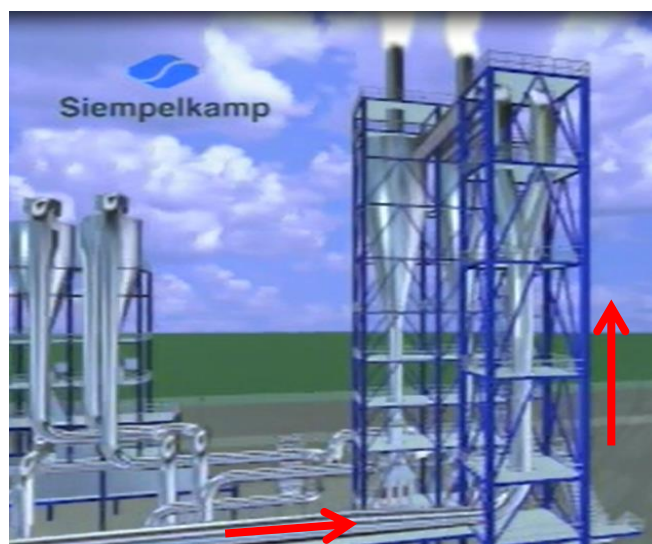


Figura 8 – Tubulação do secador de fibras (adaptado de Siempelkamp, 2009.)

**1.1.9 - Armazenamento das fibras** – as fibras “secas” e encoladas são armazenadas em um silo de fibras, também chamado de tanque "pulmão". Ele possui capacidade para armazenar aproximadamente 100 m<sup>3</sup> de fibra e tem a

função de acumular um volume adequado de fibras para abastecer a linha de formação;

**1.1.10 - Formação do colchão** – as fibras são dispostas sobre uma esteira e assumem a forma de um “colchão” com largura que pode variar entre 2450 a 2790 mm conforme ordem de produção. Essa largura é delimitada por serras longitudinais. A altura do colchão de fibras é controlada por um rolo removedor chamado scalper;

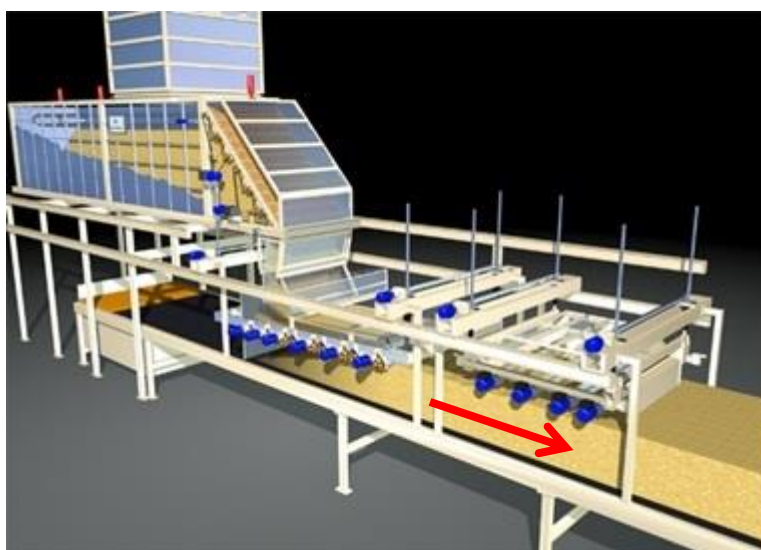


Figura 9 – Formação do colchão de fibras (Texpan, 2009.)

**1.1.11 - Pré-prensagem** – o colchão de fibras recebe uma pré-compactação na pré-prensa. O objetivo é retirar o excesso de ar do interior do colchão. O ar age como isolante térmico e prejudica a consolidação da chapa no interior da prensa aquecida;



Figura 10 – Desaeração e compactação do colchão (Siempelkamp, 2009.)

**1.1.12 - Prensagem** – o colchão de fibras compactado adentra a prensa aquecida a 240 °C aproximadamente. A combinação do calor com a pressão promove a reação química e consequente consolidação da chapa de MDF. As pressões variam de 150 a 450 N/cm<sup>2</sup> (dependendo da espessura da chapa) e são aplicadas por cilindros hidráulicos;



Figura 11 – Prensa contínua (Siempelkamp, 2009.)

**1.1.13 - Corte e Resfriamento** – ao sair da prensa, a chapa recebe cortes longitudinais e transversais assumindo dimensões finais estipuladas em ordens de produção. A largura pode variar entre 2456 e 2764 mm e o comprimento varia entre 3764 e 5572 mm. As chapas saem com temperatura aproximada de 100°C são resfriadas à temperatura ambiente para climatização;

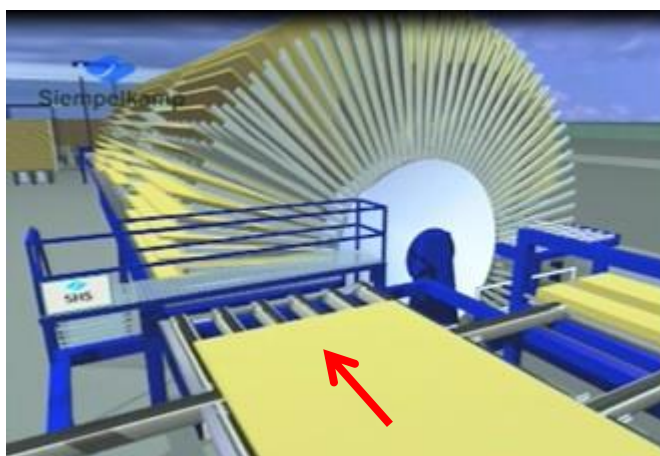


Figura 12 – Rodas de resfriamento de chapas (Siempelkamp, 2009.)

**1.1.14 - Lixamento, recorte e revestimento** – após climatização, as chapas sofrem lixamento em ambas as faces, recebem dimensionamento final por serras (conforme ordem de produção) e são empilhadas em pequenos pacotes onde recebem embalagem e etiquetas de identificação do produto.

Segue abaixo um fluxograma do processo de produção de chapas MDF:

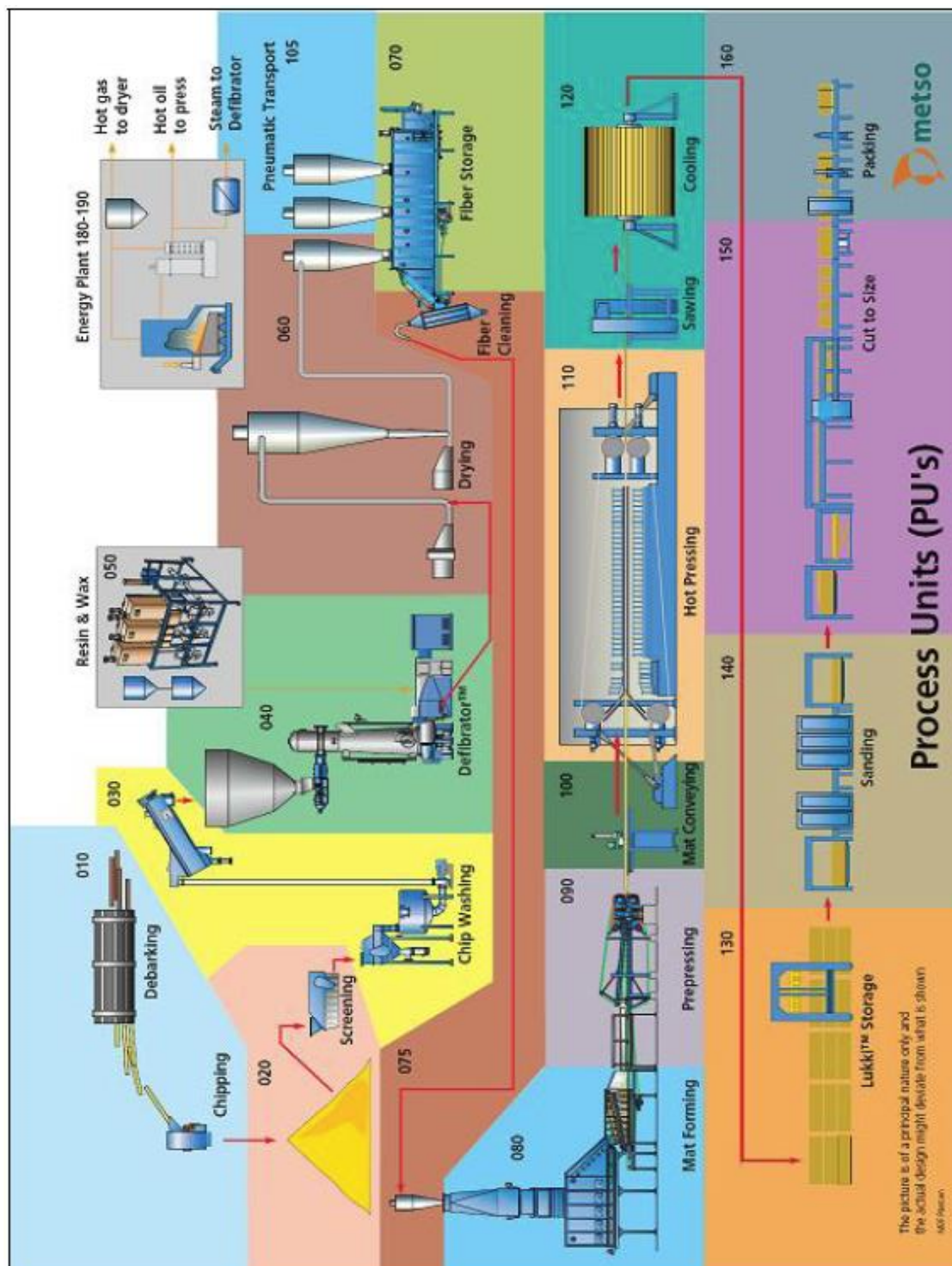


Figura 13 – Processo de fabricação de chapas de MDF (Metso, 2012.)

## **1.2-Análise Térmica**

A análise térmica é definida como um conjunto de técnicas, que acompanham a variação em uma determinada propriedade física da amostra, enquanto a mesma é submetida a uma programação controlada de temperatura. Tais técnicas são utilizadas para caracterizar diferentes materiais quanto às suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e de degradação (IONASHIRO, 2005, p98).

Embora versáteis e aplicáveis a quase todos os materiais, as técnicas termoanalíticas são, especialmente, apropriadas para o estudo de polímeros devido à alta relação das propriedades desses compostos com a temperatura.

Além de caracterizar a amostra, os eventos térmicos fornecem informações importantes em relação ao efeito da temperatura nas propriedades físicas de um material, podendo ser utilizados para caracterizar um material antes, durante e depois do entrecruzamento, no caso de uma reação de formação da estrutura polimérica.

Neste trabalho as seguintes técnicas foram utilizadas: Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) as quais serão descritas sucintamente a seguir:

### **1.2.1- Termogravimetria (TG)**

Nesta técnica, a variação de massa que ocorre na amostra é acompanhada em função do tempo (a uma temperatura constante), ou em função da temperatura.

Os resultados deste tipo de experimento são apresentados como curvas, nas quais se observam variações de massa, ou seja, deve haver modificações na amostra de modo que se originam produtos voláteis ou que incorporam átomos da atmosfera gasosa, formando um produto, respectivamente, mais leve ou mais pesado que o inicial.

Os trabalhos mais comuns utilizam o modo conhecido como Termogravimetria Dinâmica, em que um programador submete a amostra a uma variação crescente de temperatura, a uma razão constante, enquanto se monitora a variação em sua massa.



### **1.2.2. - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC - do inglês Differential Scanning Calorimetry) é uma técnica na qual se mede a variação de calor, ( $\Delta H$ ), que ocorre entre uma amostra e uma referência inerte, durante o processo de aquecimento ou resfriamento. A vantagem desta técnica é que pequena quantidade de amostra é necessária com uma alta reprodutibilidade dos resultados. Portanto, propriedades como cristalização, temperatura de transição vítrea, capacidade calorífica, grau de cura e o grau ou densidade de entrecruzamento podem ser determinadas (IONASHIRO, 2005, p98).

## **2- OBJETIVOS**

### **2.1- Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo estudar o processo de fabricação de painéis MDF (Medium Density Fiberboard) bem como a influência de cada tipo de resina termofixa nas principais características físicas e mecânicas desses painéis.

### **2.2- Objetivos específicos**

- Observar os aspectos tecnológicos de amostras de chapas MDF por meio de testes de densidade, tração perpendicular, tração superficial e resistência à flexão;
- Estabelecer relações entre os resultados físico-químicos das resinas termofixas e as respectivas chapas produzidas;

## **3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 - Histórico**

Segundo Belini (2003), a resina uréia formaldeído foi desenvolvida na década de 30 na Europa, mas no Brasil, as resinas termofixas começaram a ser produzidas apenas na década de 60. Logo, entre a década de 30 e fim da década de 50, a indústria moveleira e outros ramos industriais como cerâmicas, abrasivos, plásticos, tintas e vernizes, papel e celulose importavam grandes quantidades de países da Europa como a Suécia. Na década de 60, iniciou-se

a produção em massa de chapas de aglomerado no Brasil. O principal adesivo utilizado era do tipo UF, isto é, resina a base de uréia formaldeído.

No fim da década de 90, mais precisamente em 1997, deu-se início no Brasil a produção de painéis de MDF. A Duratex SA foi a pioneira na produção desse tipo de painel no Brasil. Era algo diferente no mercado, pois o painel de madeira não era formado por pequenas partículas, mas composta por fibras de madeira também aglutinadas por um adesivo.



Figura 14 – Chapas de MDF em várias espessuras

No início dessa produção, os adesivos empregados eram do tipo uréia formaldeído e melamina formaldeído, mas devido ao tipo de utilização de cada painel, demandaram-se maiores quantidades de resina ureia formaldeído. Nesse período, empresas brasileiras como a Synteko e o Grupo Peixoto de Castro destacaram-se na produção de resinas UF, FF, MUF e MF. Em janeiro de 2008, ocorreu a fusão dessas empresas dando origem a GPC Química.

Hoje, a GPC Química é a maior produtora nacional de resinas tipo UF, MF, FF e MUF, tendo uma capacidade de produção anual de aproximadamente 350 mil toneladas de resina. Assim, essa empresa tornou-se a principal fornecedora de resina termofixas para as grandes produtoras de chapas de madeira reconstituídas instaladas no Brasil.

### **3.2 – Desenvolvimentos tecnológicos do MDF no período de 2000-2013**

A produção de painéis de MDF iniciou-se no final da década de 60 na Europa e nos Estados Unidos. Era uma produção muito tímida, pois não havia muita divulgação e procura pelo produto. A partir da segunda metade da década de 90, a produção de painéis MDF ganhou proporções mundiais. A

produção mundial de MDF praticamente duplicou gerando um crescimento médio anual de aproximadamente 18%. Estados Unidos, Alemanha e China, juntos, representavam 39% do volume produzido. Em 1995, o MDF ainda era importado de países como o Chile, pois não havia produção nacional. Nesse período, o consumo anual aproximado era de 21 mil m<sup>3</sup>.

A produção nacional deste produto iniciou-se no segundo semestre de 1997. Conforme Belini (2007), a primeira linha produtiva de painéis MDF usava como matéria-prima madeira de espécie *Pinus spp*, mas a partir de 2003 iniciou-se o uso de madeira da *Eucalyptus*. Uma diferença básica entre as duas espécies é a densidade da madeira. A espécie eucalipto apresenta densidade maior gerando melhor rendimento na relação m<sup>3</sup> de madeira / m<sup>3</sup> de MDF.

Conforme dados do BNDES, em 2005 o consumo evoluiu para 1,45 milhões de m<sup>3</sup>. Assim, o crescimento médio anual foi de 52%, bem acima da média mundial no mesmo período. O setor de painéis de madeira MDF tem apresentado forte dinamismo no mundo e, em especial, no Brasil. A produção mundial superou 18 milhões de m<sup>3</sup> de painéis em 2000. Seu consumo, em 2005, atingiu 40 milhões de m<sup>3</sup>, representando uma participação de 19% no volume global consumido de todos os tipos de painéis de madeira. No período 1995–2005, o consumo mundial de MDF cresceu a uma taxa média anual de 18,5%. Os grandes centros de consumo mundial são China (40%), Estados Unidos (12%), Coréia do Sul (5%) e Brasil (4%).

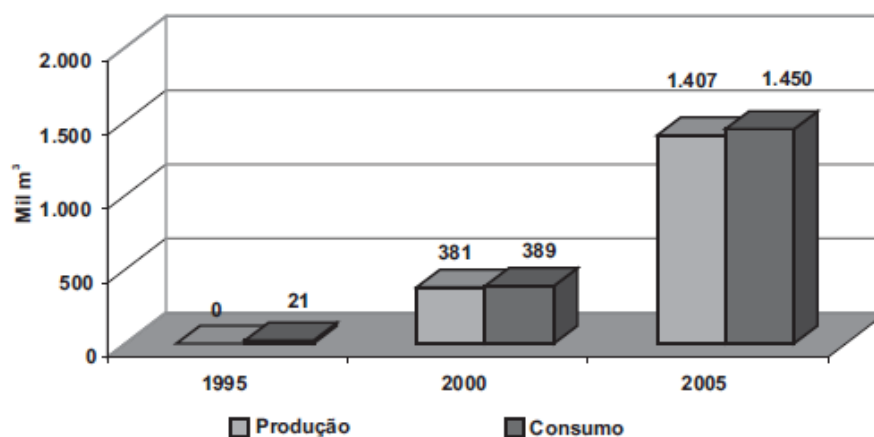


Figura 15 – Produção/ consumo de painéis MDF no Brasil entre 1995 e 2005 (Abipa).

De acordo com Mattos (2005), os painéis MDF possuem consistência, estabilidade dimensional e grande capacidade de usinagem. Tais características mecânicas tornam os painéis MDF semelhantes a uma madeira maciça e propiciaram em grande parte, o forte crescimento do seu consumo. A indústria moveleira demanda a maior parte da produção de painel MDF produzida no Brasil com 54%.

Segundo Cyr, Wang e Haler (2006), o tamanho ideal da fibra aliada a boa distribuição da resina na mesma favorece a confecção de um painel com propriedades tecnológicas otimizadas. Em outras palavras, cada fibra de madeira produzida precisa ter o máximo possível de sua área coberta por resina (adesivo). Isso pode ser obtido minimizando ainda mais as partículas líquidas de resina pulverizadas pelo bico injetor. Assim, quanto maior a área da fibra envolvida (impregnada) pela resina pulverizada, melhor será a consolidação do painel MDF.

Os painéis MDF possuem uma infinidade de aplicações na indústria moveleira e na construção civil. A boa usinabilidade da chapa permite a confecção de vários acessórios de moveis em geral. Portas, componentes frontais, internos e laterais de móveis, fundos de gavetas, estantes, tampos de mesas, racks e até acabamentos em interiores de ônibus. Essa variedade de aplicações impulsiona a pesquisa no desenvolvimento de novas demandas para os painéis MDF.

Outros testes interessantes foram desenvolvidos a partir do uso de palha de trigo como uma matéria-prima para a fabricação de fibras de média densidade (MDF) em uma planta-piloto totalmente equipada e a resina uréia-melamina formaldeído (MUF) foi usada como adesivo na fabricação de um tipo de chapa MDF de alta performance (HALVARSSON, EDLUND E NORGRÉN, 2007). Eles fizeram testes com diversas espessuras (de 9 a 16 mm), densidades (750 a 1000 kg/m<sup>3</sup>) e variações na dosagem de resina de 14 a 17%. Os produtos resultantes foram analisados quanto à absorção de água (anti-inchaço), tração perpendicular (ligação interna) e flexão (elasticidade). Todos os testes feitos em chapas cujas concentrações de resinas excediam 14% preencheram os requisitos da norma EN 622-5:1997.

Nos últimos anos, muitos painéis MDF estão sendo amplamente utilizados também como elementos estruturais para a construção de edifícios, muitos aplicativos móveis e nas indústrias de transporte. De acordo com Ustaomer (2012), alguns compostos químicos podem ser adicionados visando diminuir a inflamabilidade de um painel MDF, funcionando como retardadores de fogo. Por ser confeccionado em madeira reconstituída, um painel MDF é um material combustível em potencial. Por isso, uma das classes importantes de produtos químicos para proteção ou diminuição do risco de incêndio em painéis MDF são os compostos de boro, em particular, os boratos tais como o ácido bórico, bórax, ou octaborato dissódico tetra-hidratado. Esses compostos têm bom desempenho como conservantes da madeira. Além disso, têm sido utilizados durante muitos anos para proteger a madeira contra organismos destruidores, tais como insetos e fungos.

Ainda Ustaomer (2012) cita outro problema muito comum em painéis MDF: a influência da umidade nas propriedades dimensionais da chapa. Em contato com a água, os painéis tendem a “inchar” e ganhar volume e por consequência ocorre perda de densidade efetiva de madeira. O uso de compostos de boro na produção de chapas MDF é uma inovação importante que apresentou bons resultados tecnológicos e minimizou alguns inconvenientes dos painéis.

Outra inovação tecnológica na proteção de chapas de MDF contra insetos como cupins e brocas é o uso de biocidas na produção dos painéis. Um exemplo é a dosagem de um produto chamado Preventol HS 12 CE 50. Desenvolvido pela Bayer, este produto possui ciflutrina a 50 mg/L dissolvido em glicol. O produto é indicado para a indústria moveleira, podendo ser aplicado por imersão ou por pressão em aglomerados, compensados e MDF. Outros agentes cupinidas também são usados misturados à própria resina utilizada no processo de prensagem dos painéis.

## 4- MATERIAIS, MÁQUINAS E MÉTODOS

### 4.1 – Análise de resinas – Principais parâmetros de controle

Antes de utilizadas no processo de encolagem de fibras, as resinas termofixas (adesivos) passam por várias análises laboratoriais visando mensurar suas características físico-químicas. Conforme Belini (2007), alguns parâmetros ou variáveis devem ser analisados buscando atestar a qualidade da resina.

Segue abaixo uma breve descrição de cada variável observada em uma resina termofixa:

**4.1.1 - Gel Time:** ou tempo de cura, é o intervalo de tempo em que há polimerização de resina previamente catalisada, quando esta é exposta a uma fonte de calor.

#### **Modelo de procedimento para determinação do gel time:**

- a) Completar um béquer de 1000 mL com água destilada. Ligar a chapa aquecedora para o aquecimento até ebulição;
- b) Análise da Resina: pesar 100,00 g  $\pm$  0,1 de resina e adicionar 5,0 mL de sulfato de amônio a 20%;
- c) Análise da Cola: adicionar os pesos líquidos de todos os componentes da cola que se deseja analisar (Resina, água, catalisador, emulsão de parafina e aditivo, este se houver);
- d) Agitar a mistura por 1 minuto em um tubo de ensaio seco e pesar 7,5  $\pm$  0,1 g de resina usando o suporte para o tubo;
- e) Introduzir o arame circular espiralado no tubo de ensaio. Conectar o suporte metálico na haste de forma que seu primeiro anel, onde se apoiará o fundo do tubo fique a 20 mm do fundo do béquer;
- f) Colocar o tubo de ensaio contendo a cola no suporte e acionar, simultaneamente, o cronômetro. Agitar constantemente com auxílio do arame, a uma frequência de aproximadamente 150 a 180 movimentos verticais por minutos;
- g) Logo que se constatar a cura da resina (endurecimento), travar o cronômetro e anotar o tempo obtido.

## Cálculos / Expressão dos Resultados

Medida indireta da reatividade das resinas uréicas e traduz o tempo transcorrido desde a imersão do tubo de ensaio no banho térmico até a cura completa (endurecimento) da resina. O resultado é expresso em segundos e deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 1 visando aprovação ou retenção da resina sintética.

**4.1.2 - Viscosidade:** é a relação entre a viscosidade de um líquido a uma dada temperatura. Pode ser determinada por:

- **Copo Ford** – indica o tempo de escoamento de uma determinada quantidade de material líquido através de uma abertura na parte inferior do suporte metálico. Leitura em segundos (s);



Figura 16 – Copo Ford

### Modelo de procedimento:

- a) Coletar a amostra a ser analisada em um béquer de 1000 mL;
- b) Ajustar a temperatura para  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  e fechar com o dedo a parte inferior do orifício calibrado;
- c) Adicionar a amostra no depósito de líquido;
- d) Passar horizontalmente a placa de vidro sobre a abertura do copo (retirar o excesso de resina), padronizando o volume a ser medido;
- e) Posicionar o béquer embaixo do orifício para coleta do líquido escoado;

- f) Retirar o dedo do orifício e acionar simultaneamente o cronômetro;
- g) Parar o cronômetro quando se romper o fio de líquido que sai do orifício;

### **Cálculos / Expressão dos Resultados**

O resultado é dado pelo tempo entre o início do escoamento da solução até o rompimento do fio de resina.

$$\text{Viscosidade } CF = C \times fc$$

#### **Sendo:**

**C** = Tempo medido no cronômetro

**fc** = fator de correção do aparelho

O resultado é expresso em segundos e deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 1. Essa variável não é critério de aprovação ou reprovação, mas apenas serve como uma referência.

- **Brookfield** – a determinação é realizada através da medição do torque de uma haste colocada no líquido acondicionado em uma recipiente. Leitura em centi-poise (cP) e direta: quanto maior o valor, maior a viscosidade do líquido;



Figura 17 – Aparelho Brookfield



O resultado é expresso em números inteiros na unidade centipoise (cP) e deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 1. Essa variável não é critério de aprovação ou reprovação, mas apenas serve como uma referência.

**4.1.3 - Densidade:** está diretamente relacionada com o teor de sólidos (ou teor de não voláteis) da resina em questão. Pode-se usar o ensaio com densímetro e expressá-lo em  $\text{g/cm}^3$ ;

**Modelo de procedimento para determinação da densidade:**

- a) Coletar 500 mL de resina e estabilizar a  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ;
- b) Transferir a amostra para uma proveta de 500 mL;
- c) Colocar o densímetro no líquido deixando-o no centro da proveta;
- d) Após a estabilização do densímetro, medir a densidade através da leitura direta na escala do densímetro que coincide com a superfície da resina.

**Cálculos / Expressão dos Resultados**

O resultado é dado pela leitura na escala existente na haste sendo expresso em  $\text{g/cm}^3$ . O resultado deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 1. Essa variável não é critério de aprovação ou reprovação, mas apenas serve como uma referência.

**4.1.4 - pH:** expressão matemática que representa o teor de hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) ionizado indicando acidez ou alcalinidade de uma solução. Leitura direta através de pHmetro ou papel indicador universal.

**Modelo de procedimento para análise do pH:**

- a) Colocar 40 mL da amostra em um béquer de 50 mL limpo e seco;
- b) Lavar o eletrodo com água destilada e enxugá-lo ;
- c) Ligar o pHmetro e aguardar estabilização de leitura;
- d) Medir a temperatura da mesma;
- e) Ajustar a temperatura no botão específico;
- f) Fazer leitura dos valores de pH e desligar o aparelho;

- g) Lavar o eletrodo com água destilada e enxugar com papel absorvente,
- h) Manter o eletrodo mergulhado em água destilada.

### **Cálculos / Expressão dos Resultados**

O resultado é obtido por leitura direta (de 0 a 14) e deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 1. Essa variável não é critério de aprovação ou reprovação, mas apenas serve como uma referência.

A tabela abaixo mostra um modelo de especificações para cada variável analisada nas resinas sintéticas UF e MF. Algumas especificações são critérios de aprovação ou retenção das resinas termofixas. Caso a variável Gel Time apresente desvios fora da tolerância, a resina termofixa será considerada reprovada e não poderá ser inserida no processo de produção de chapas MDF.

Tabela 1 – Modelo de algumas especificações das resinas sintéticas

Variáveis	Unidade	Resinas	
		UF	MF
Viscosidade Brookfield (25°C)	cP	40 – 65	
Viscosidade CF4 (25°C)	s	13,0 – 25,0	
pH (25°C)	-	7,0 – 8,5	
Densidade (25°C)	g/cm <sup>3</sup>	>1,24	
Gel time	s	45 – 65	

## **4.2 – Análises de chapas MDF - Principais propriedades físico-mecânicas**

Após a consolidação do colchão de fibras em um painel MDF, o mesmo necessita passar por análises visando mensurar suas propriedades físico-mecânicas. Tais testes são necessários para verificar se a chapa atende as normas nacionais NBR 15316/1, NBR 15316/2 e NBR 15316/3 que estabelecem a Terminologia, Requisito e Métodos de ensaio respectivamente.

O objetivo é evitar que chapas sem qualidade tecnológica sejam liberadas ao consumidor final. Segue abaixo uma breve descrição de cada variável observada em uma chapa MDF:

**4.2.1 - Densidade:** é definida como o quociente entre massa (m) da amostra e o volume (v) da mesma. O volume é definido como o produto resultante do

comprimento, largura e espessura do mesmo corpo de prova. O corpo de prova mede 50 x 50mm.

**Materiais Necessários:** balança semianalítica, equipamento IMAL (figura 16), paquímetro, serra circular com guia e trena.



Figura 18 – Equipamento para determinação da densidade da chapa

#### **Modelo de procedimento para determinação da densidade:**

##### **a) Manual:**

- Identificar os corpos de prova e espessurá-los;
- Medir o comprimento e a largura do corpo de prova e pesá-lo;
- Anotar todas as medidas efetuadas.

##### **b) Máquina de Ensaio Automática:**

- Preparar a tela do aparelho de teste Imal, onde serão registrados os resultados de medição dos corpos de prova, digitando os dados referentes ao tipo de material;
- Determinar o comprimento, a largura, espessura e o peso para cada corpo de prova.

#### **Cálculo / Expressão dos resultados**

$$d = m/v$$

Sendo:

D = densidade do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

m = peso do corpo de prova em g.

v = volume do corpo de prova ( $\text{cm}^3$ )

O resultado é a média aritmética das determinações em  $\text{g/cm}^3$  com aproximação de  $0,01 \text{ g/cm}^3$ . Para expressar o resultado em  $\text{kg/m}^3$ , deve-se multiplicar o resultado das determinações por 1000, neste caso a aproximação é de  $1\text{kg/m}^3$ . Esse resultado obtido deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 3 visando aprovação ou retenção do lote de chapas fabricado. Esse procedimento é baseado na norma NBR 15316-3.

**4.2.2 - Tração perpendicular:** é a resistência que um corpo de prova oferece quando é submetido a uma força de tração aplicada perpendicularmente à sua superfície. O corpo de prova mede  $50 \times 50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , identificado no topo com numeração sequencial;

**Materiais Necessários:** aparelho de tração (Figura 17), blocos metálicos (superior e inferior), chapa de aquecimento para fusão do adesivo, Cola “Hot-Melt” (3M), lixa grana 80, serra circular e trena em milímetros.

**Modelo de procedimento para determinação da tração perpendicular:**

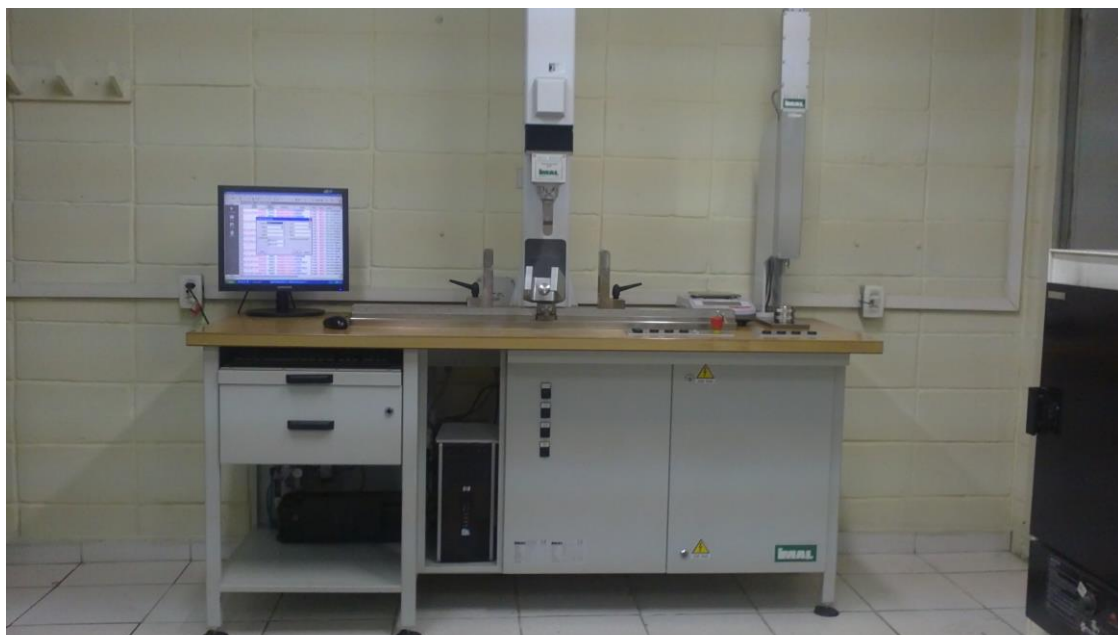


Figura 19 – Equipamento para determinação de trações perpendiculares

- a) Determinar a densidade de cada corpo de prova antes do lixamento;
- b) Lixar homogeneamente ambas as faces do corpo de prova, para que não ocorram irregularidades nas superfícies;
- c) Colar o corpo de prova entre os dois blocos metálicos usando adesivo “Hot-Melt” (Figura 18) e remover o excesso de cola;

- d) Após a colagem, o conjunto deve ser resfriado até atingir temperatura ambiente, permitindo assim a aderência completa nas linhas de colagem;
- e) Acoplar o conjunto no dispositivo para prender os blocos nas garras do equipamento IMAL e iniciar o ensaio;

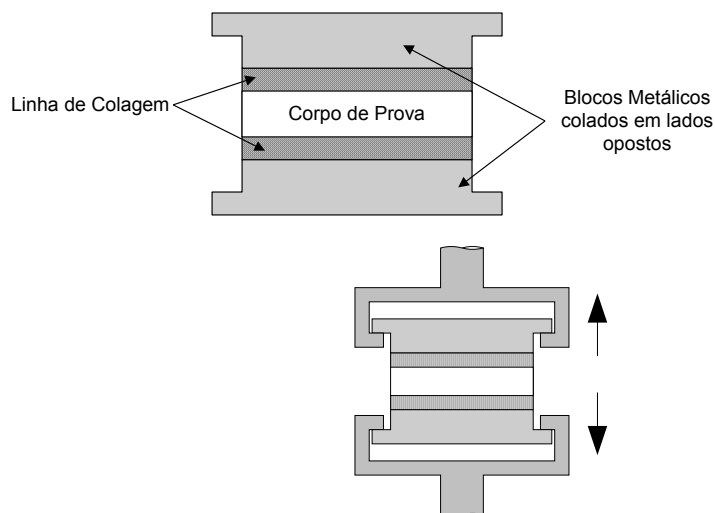


Figura 20 – Corpos de prova

#### Cálculo/Expressão dos resultados:

Tração perpendicular:

$$Tp = \frac{Pi}{Si}$$

Sendo:

Tp = resistência à tração perpendicular em Kgf/cm<sup>2</sup>.

Pi = carga de ruptura em Kgf.

Si = área da superfície do corpo de prova em cm<sup>2</sup>.

O resultado deve ser expresso em kgf/cm<sup>2</sup>. Esse resultado obtido deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 3 visando aprovação ou retenção do lote de chapas fabricado.

No rompimento do corpo de prova o valor de resistência é calculado pelo software e o resultado é indicado na tela do computador. Esse procedimento é baseado na norma NBR 15316-3.

**4.2.3 - Tração superficial ou Resistência superficial:** é a resistência que um corpo de prova oferece, quando submetido a uma força de tração

aplicada perpendicularmente ao plano da face, para promover o arranque de determinada área da camada superficial.

**Materiais necessários:** apoio metálico, corpo auxiliar metálico, equipamento IMAL, chapa aquecedora, freza, serra circular com guia, compasso metálico, lixadeira manual (lixa grana 80), cola “Hot-Melt”, serraco e furadeira vertical. Os corpos de prova medem 50 x 50 mm ± 1 mm, identificados no topo com numeração sequencial;

**Modelo de procedimento para análise da tração superficial:**

- Os corpos de prova na espessura bruta devem ser lixados homogeneamente na face onde se realizará o ensaio até eliminar metade da sobreespessura. A outra face deve ser levemente lixada para promover uma superfície ideal para contato na colagem;
- Após colagem das partes conforme Figura 18, colocar o conjunto no suporte do equipamento IMAL e executar o teste;
- Acionar o equipamento com velocidade de 5mm/min tal que o rompimento do corpo de prova ocorra num intervalo de 60 ± 30 s.

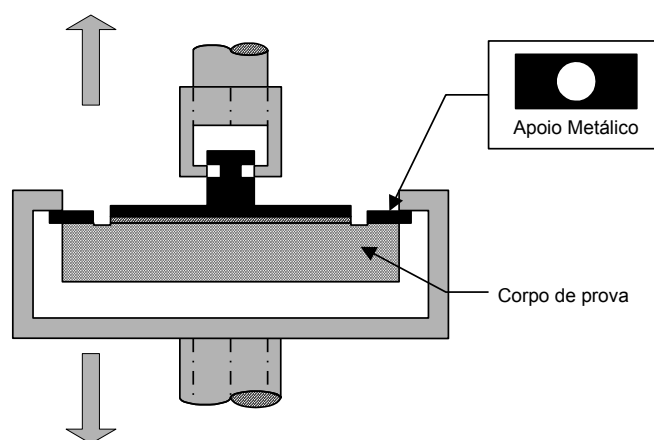


Figura 21 – Corpo de prova para tração superficial

**Cálculos / Expressão dos Resultados**

**a) MDF (Aparelho de Tração):**

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

**Sendo :**

**RS** = resistência superficial em kgf/cm<sup>2</sup>;

**P** = força de ruptura em kgf;

**S** = área em cm<sup>2</sup>.

Como a área de rompimento é constante e igual a  $10\text{cm}^2$ , podemos simplificar a fórmula em:

$$RS = 0,1 \times P$$

O resultado deve ser expresso em  $\text{kgf/cm}^2$  e comparado com o valor especificado na Tabela 3 visando aprovação ou retenção do lote de chapas fabricado.

**4.2.4 - Resistência à flexão:** é a resistência que um corpo de prova apoiado em seus extremos, oferece quando sujeito a uma força aplicada em seu centro até a ruptura.

Os corpos de prova devem serrados e identificados com numeração sequencial. A largura do corpo de prova para todas as espessuras deve ser de 50 mm. O comprimento do corpo de prova deve ser 20 vezes a espessura nominal acrescido de 50 mm. Para espessuras acima de 25 mm, o comprimento deve seguir a tabela abaixo, que traz alguns exemplos:

Tabela 2 – Dimensões das amostras

Flexão Estática Longitudinal			
Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Abertura Apoio (mm)
2,5 a 5,0	150	50	100
6,0	170		120
8,0	210		160
10,0	250		200
12,0	290		240
15,0	290		300
18,0	410		360
20,0	450		400
22,0	490		440
25,0	550		500
30,0			
35,0			
38,0			

**Modelo de procedimento para determinar a resistência à flexão:**

- a) Medir a largura e espessura de cada corpo de prova.
- b) Colocar os extremos do corpo de prova sobre os apoios do aparelho, de modo que o dispositivo ao aplicar a carga coincida como centro do corpo de prova;
- c) A carga aplicada deve ser ajustada de modo que seu máximo seja atingido em  $60 \pm 30$  segundos;
- d) O valor de ruptura será registrado pelo próprio equipamento.

**Cálculo/Expressão dos resultados**

$$Fl = \frac{3 \times F_{m\acute{a}x.} \times \ell}{2 \times b \times t^2}$$

**Sendo:**

**Fl**= resistência à flexão, em kgf/cm<sup>2</sup>;

**F<sub>máx.</sub>** = carga de resistência (máxima), em kgf;

**l** = distância entre o centro dos suportes, em cm;

**b** = largura do corpo de prova, em cm;

**t** = espessura do corpo de prova, em cm.

Fazer a média aritmética dos resultados de flexão dos corpos de prova, os quais foram retirados da mesma chapa.

O cálculo descrito é efetuado pelo software do equipamento IMAL. O resultado obtido deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 3 visando aprovação ou retenção do lote de chapas fabricado.

Esse procedimento foi baseado na norma NBR 15316-3.

Todas as variáveis citadas neste tópico são critérios de aprovação ou reprovação de uma chapa MDF, ou seja, a chapa será considerada de 1º qualidade se for aprovada em todos os testes tecnológicos.

**4.2.5- Determinação do perfil de densidade MDF:** é a determinação da densidade de um corpo de prova de MDF ao longo de sua espessura. O aparelho utilizado para fazer a medição do perfil de densidade é o Grecon Dax 5000:





Figura 22 - Equipamento para determinação de perfil de densidade

A figura abaixo mostra como é feita a leitura do perfil de densidade da chapa. A área escura mostra o local de onde é extraído o perfil. O equipamento faz a leitura da amostra e exibem as densidades pontuais ( $\text{Kg/m}^3$ ) em ambas as faces (superior e inferior) e em vários pontos do centro da chapa.

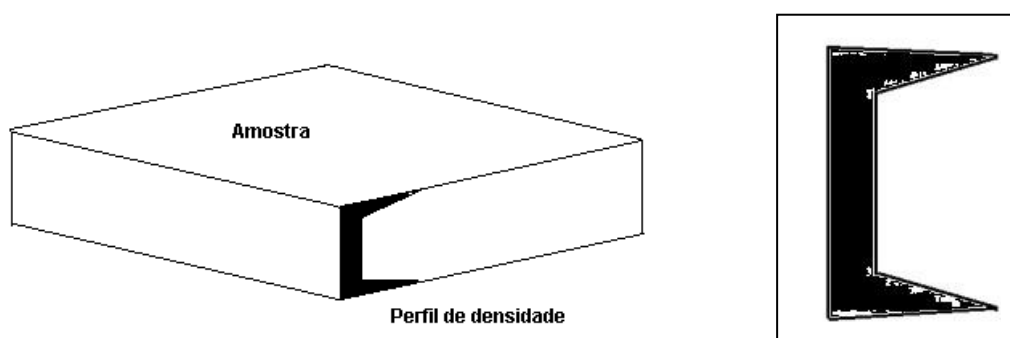


Figura 23 – Perfil de densidade

Os perfis de densidade gerados apresentam algumas informações como densidade média (%), densidade máxima na esquerda (face superior), densidade máxima na direita (face inferior), densidade mínima (centro) e densidade média ( $\text{Kg/m}^3$ ). No eixo Y é expressa a densidade em  $\text{Kg/m}^3$  e no eixo X está disposta a espessura da chapa em mm.

#### **Modelo de procedimento para medição do perfil de densidade:**

- a) Para as amostras preparadas, determinar o peso, a espessura, a largura e o comprimento, anotando os valores no próprio corpo de prova. Identificar também o nº de cada corpo de prova referente às amostras. No medidor do perfil de densidade, executar o ícone DAX 5000;

b) Na tela específica do teste selecionar o ícone Leitura da amostra, abrindo a janela com:

- Amostras – para inserir os dados de largura, espessura, altura (comprimento) e peso;
- Informações das amostras – Para serem preenchidos os campos com as variáveis de processo e insumos relativos ao teste, velocidade, umidade, resina, emulsão e observações a serem feitas;
- Medição de perfil de densidade – Após todos os testes serem preenchidos corretamente, clicar no botão START DAX;

c) Após a digitar os valores das amostras, as mesmas devem ser colocadas no box adequado, ou seja:

- Box 1 – Capacidade 3 amostras de qualquer espessura;
- Box 2 – Capacidade 6 amostras com espessura até 22mm.

### Expressão dos Resultados

Os resultados serão expressos na forma de gráficos conforme figura abaixo:

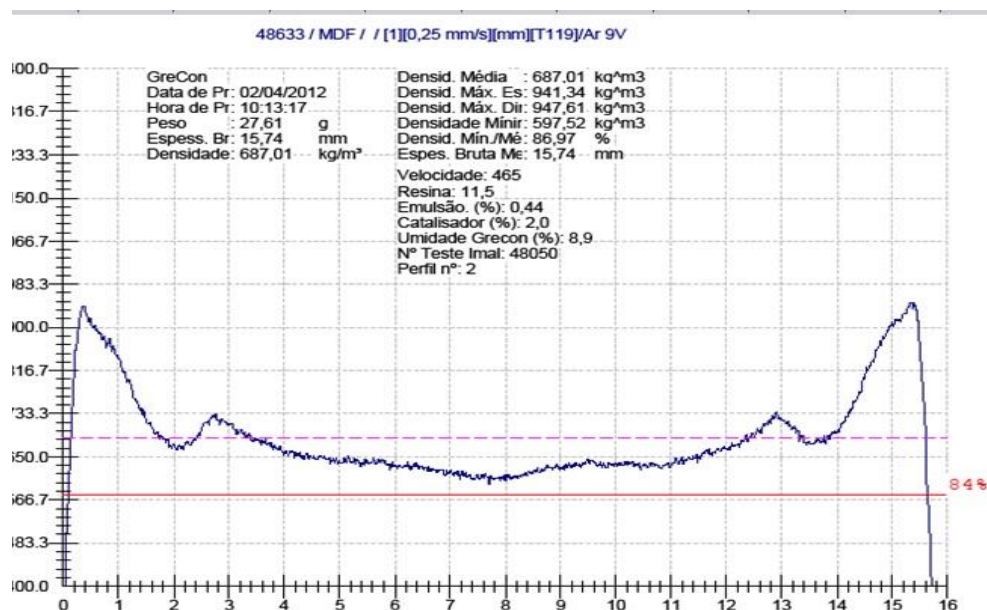


Figura 24 – Perfil de densidade (Grecon DAX 5000, 2013.)

Os perfis de densidades gerados pelo equipamento apresentam um valor de densidade média em porcentagem (%). Esse resultado deve ser comparado com o valor especificado na Tabela 3 visando aprovação ou retenção do lote de chapas fabricado.

As principais variáveis observadas em uma chapa MDF estão especificadas abaixo conforme cada espessura em mm:

Tabela 3 - Especificações de chapas MDF (adaptada NBR 15316/2, 2012.)

Espessura bruta (mm)	Densidade média (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à tração perpendicular (kgf/cm <sup>2</sup> )	PERFIL DE DENSIDADE			Resistência a flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )
			1	2	3	
			%	%	%	
3,5	850 ± 50	6,6	80	80	80	240
6,6	830 ± 30	6,6	80	80	80	240
12,8	700 ± 20	6,1	80	80	80	230
15,8	700 ± 20	5,6	80	80	80	210
18,9	680 ± 20	5,6	80	80	80	210
20,9	670 ± 20	5,6	80	80	80	185
22,9	670 ± 20	5,6	80	80	80	185
26,4	680 ± 20	5,6	80	80	80	185
31,7	670 ± 20	5,6	80	80	80	185
36,7	650 ± 20	5,1	80	80	80	175

## 5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas amostras de chapas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Foram analisados também os dois tipos de resinas termofixas mais usadas na fabricação de painéis: uréia-formaldeído (UF) e melamina formaldeído (MF). Por fim, fez-se uma relação entre as resinas empregadas e os respectivos resultados apresentados nos testes físicos e mecânicos de cada chapa MDF observada.

No mercado nacional existe uma demanda muito grande de chapas de MDF em várias espessuras. Normalmente as espessuras variam de 3,0 a 35,0 mm. Portanto, para facilitar a compreensão dos resultados neste trabalho foram analisadas duas amostras de produções de chapas MDF com espessuras de 15,0 mm, pois tal espessura corresponde a uma das maiores demandas no mercado. Uma amostra foi produzida usando resina termofixa UF e outra com MF. Essas amostras passaram por testes físico-mecânicos e suas respectivas resinas passaram por testes em laboratório.

## **5.1 – Análise das resinas e das propriedades físico-mecânicas das chapas**

As resinas termofixas citadas foram submetidas às determinações de pH, viscosidade Copo Ford e Brookfield, densidade e gel time. Essas determinações foram realizadas no laboratório de uma grande produtora de chapas de MDF seguindo os procedimentos citados anteriormente no item 4.2.

Foram analisadas também duas chapas de 15,0 mm de espessura sendo uma produzida com resina termofixa UF e outra com resina termofixa MF. Os parâmetros físico-mecânicos observados foram: densidade, tração perpendicular, tração superficial, resistência à flexão, perfil de densidade e teste de inchamento. Tais análises foram realizadas seguindo os procedimentos também citados anteriormente no item 4.3.

Para facilitar a expressão dos resultados chamaremos a chapa MDF com resina termofixa uréia-formaldeído de “Chapa UF” e a chapa MDF com resina termofixa melamina formaldeído de “Chapa MF”.

### **5.1.1 – Resina termofixas UF e MF**

Conforme a Tabela 4 nota-se que ambas as resinas apresentaram algumas diferenças em seus parâmetros. Uma das variáveis que apresentou certa diferença foi a viscosidade Brookfield, porém a Copo Ford não apresentou tanta disparidade. O pH também apresentou certa diferença, sendo a resina termofixa MF um pouco mais ácida que a resina UF.

A variável densidade também não apresentou diferença notável entre ambas as resinas termofixas. Por outro lado, a variável Gel Time exibiu uma diferença de 6 segundos, isto é, a resina termofixa UF polimerizou num menor espaço de tempo. Isto se deve a presença da uréia na fórmula química.

Esse menor tempo de reação justifica seu uso em grande escala na indústria (produção MDF), onde a grande maioria do mix de produção se dá a partir de chapas a base de resina termofixa UF, pois se a cura da resina é mais rápida, conseqüentemente a velocidade de produção também é mais rápida e o custo industrial diminui. Outra vantagem da resina termofixa UF é o seu baixo custo frente às demais classes de resinas.

Entretanto, a produção de chapas MDF a base de resina termofixa MF se dá com velocidades menores e possui outras aplicações na indústria moveleira e seu valor agregado é maior, pois normalmente essas chapas passam por processo de revestimento com papel impregnado sendo direcionadas para vários outros segmentos. O grande diferencial da resina MF é a sua maior resistência à umidade.

A Tabela 4 mostra o laudo com os resultados das análises das resinas termofixas UF e MF para a produção de chapas com espessura de 15,0mm:

Tabela 4 – Resultados das análises das resinas termofixas

Variáveis	Observação	Unidade	Especificação	Resultados	
				UF	MF
Viscosidade Brookfield	25°C	cP	45-65	48,6	49,9
Viscosidade Copo Ford	25°C	s	15-25	18,6	18,4
pH	25°C	-	7,0-8,5	8	7,7
Gel Time	-	s	45-65	58	64
Densidade	25°C	g/mL	1,24-1,26	1,25	1,24

### 5.1.2 – Testes físico-mecânicos

De acordo com as Tabela 5 e 6, pode-se observar que as amostras das Chapas UF e MF apresentaram resultados satisfatórios e acima do especificado na Tabela 3, porém os resultados dos testes da amostra de Chapa MF apresentaram valores maiores que os valores da amostra de Chapa UF, ou seja, a resina MF contribui mais para o atendimento das especificações tanto ponto a ponto da amostra quanto pela média dos valores.

A densidade das chapas ( $\text{Kg/m}^3$ ) não é influenciada pelo tipo de resina termofixa, mas pela gramatura, isto é, quantidade de fibra por uma determinada área da chapa em  $\text{m}^2$ . Ela tem relação direta com o peso por superfície ( $\text{Kg/m}^2$ )

da chapa. Logo, quanto maior a quantidade de fibra em uma área específica na linha de formação do colchão maior será a densidade final da chapa MDF.

A média das trações perpendiculares das Chapas UF e MF foram 8,4 e 9,4 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. A Chapa MF superou a resina UF em 11,9% na tração perpendicular.

A tração superficial também apresentou valores maiores na Chapa MF, sendo 16,9% mais forte que a Chapa UF.

Analisando os resultados obtidos na resistência à flexão, nota-se também maior resistência da Chapa MF em relação a Chapa UF. O ganho foi de 4,4%.

Observando apenas esses dados, nota-se maior vantagem na utilização da resina termofixa MF, porém é necessário analisar outro fator muito importante: o custo do processo. Como já dito antes, a resina MF possui alto custo para o processo sendo aproximadamente 125% mais caro que a resina UF. Por consequência, a resina MF transferirá esse custo para o preço de venda do produto.

Desta forma, a resina termofixa UF é o adesivo mais utilizado na fabricação de painéis MDF. Seu amplo emprego se deve a: baixo custo (devido ao baixo custo das suas matérias-primas uréia e formol), alta velocidade de cura quando comparadas a outras resinas e pouco desenvolvimento de cor em relação a outras resinas (LESSMANN, 2008, p.22).

Portanto, o baixo custo industrial da resina UF e seu bom desempenho no atendimento das especificações justificam o seu emprego em larga escala na produção nacional. As linhas produtivas alcançam boa performance nos resultados operacionais e as chapas produzidas atendem e muitas vezes superam requisitos mínimos exigidos pelas normas já citadas no item 4.3.

Segue abaixo as duas Tabelas (5 e 6) com os resultados dos testes físico-mecânicos aplicados às Chapas UF e MF respectivamente:

Tabela 5 – Resultados dos testes físico-mecânicos da chapa com resina UF

Nº	C	L	E	P	D	PS	TP	TS	RF
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
1,00	49,79	49,62	15,43	26,56	696,73	10,75	7,97	17,73	452,25
2,00	49,77	50,07	15,47	27,28	707,63	10,95	8,52	17,34	426,32
3,00	49,82	50,08	15,47	27,02	700,05	10,83	8,86	17,92	389,11
4,00	49,16	50,15	15,46	26,75	701,83	10,85	8,58	16,87	435,87
5,00	49,18	50,12	15,45	26,28	690,08	10,66	8,22	16,35	421,23
6,00	49,20	50,10	15,49	26,99	706,88	10,95	8,50	17,23	487,11
Média	49,49	50,02	15,46	26,81	700,53	10,83	8,44	17,24	435,31

C= comprimento; L= largura; E= espessura; P= peso; D= densidade; PS= peso por superfície; TP= tração perpendicular; TS= tração superficial; RF= resistência à flexão.

Tabela 6 – Resultados dos testes físico-mecânicos da chapa com resina MF

Nº	C	L	E	P	D	PS	TP	TS	RF
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
1,00	50,53	50,59	15,65	28,90	722,39	11,31	9,05	20,37	468,86
2,00	50,38	50,66	15,61	28,57	717,11	11,19	9,54	19,91	450,93
3,00	50,37	50,74	15,62	27,98	700,88	10,95	9,27	20,04	469,64
4,00	49,97	50,76	15,64	28,13	709,09	11,09	9,45	19,17	445,26
5,00	49,76	50,80	15,62	27,87	705,85	11,03	9,77	20,40	397,06
6,00	49,74	50,82	15,66	28,39	717,19	11,23	9,31	21,12	488,17
Média	50,13	50,73	15,63	28,31	712,08	11,13	9,40	20,17	453,32

C= comprimento; L= largura; E= espessura; P= peso; D= densidade; PS= peso por superfície; TP= tração perpendicular; TS= tração superficial; RF= resistência a flexão.

### 5.1.3 – O software Dahmos Trend Manager<sup>®</sup>

A partir de um software chamado de Dahmos Trend Manager<sup>®</sup> ou simplesmente Trend, muitos processos industriais podem ser monitorados, ou seja, todas as variáveis de um processo de fabricação são monitoradas e

gravadas numa base de dados para posteriormente servir de consulta para rastrear desvios ou falhas no processo produtivo.

As variáveis controladas estão dispostas no eixo Y com seus respectivos limites de tolerância superior e inferior e o tempo de monitoramento (hh:mm:ss) está disposto ao longo do eixo X. Em cada gráfico existe uma linha de cor preta na vertical. Essa linha é móvel ao longo do eixo X. Para cada posição que se desloca é apresentado o respectivo valor da variável num dado tempo da produção. Esses valores são apresentados na parte superior do gráfico. O Trend é uma importante ferramenta no rastreamento de desvios no processo num dado tempo da produção.

#### **5.1.4 – Umidade da fibra (%)**

As Figuras 25 e 26 mostram que a umidade da fibra com resina UF e MF estavam com 9,1 e 9,6% respectivamente. O valor ideal para a umidade da fibra está entre 9,0 a 9,5%. Assim, os valores mostrados no Trend são muito bons para o processo. A resina termofixa reage (polimeriza) a partir do calor e pressão dentro da prensa. A umidade facilita a transferência de calor. Por isso, valores acima de 10,5% podem acelerar a cura da resina dentro da prensa aquecida favorecendo a geração excessiva de vapores de formaldeído e excesso de pressão interna no interior da chapa causando seu rompimento e perda do produto.

Por outro lado, umidade da fibra muito baixa (menor que 7,5%) pode dificultar a reação da resina dentro da prensa. A resina termofixa não polimeriza e não consegue consolidar as fibras num painel MDF. As chapas saem da prensa abertas devido a falta de cura da resina e devem ser descartadas. Portanto, o bom resultado dos testes físico-mecânicos das chapas UF e MF podem ser justificados pela umidade ideal da fibra durante a retirada da amostra.



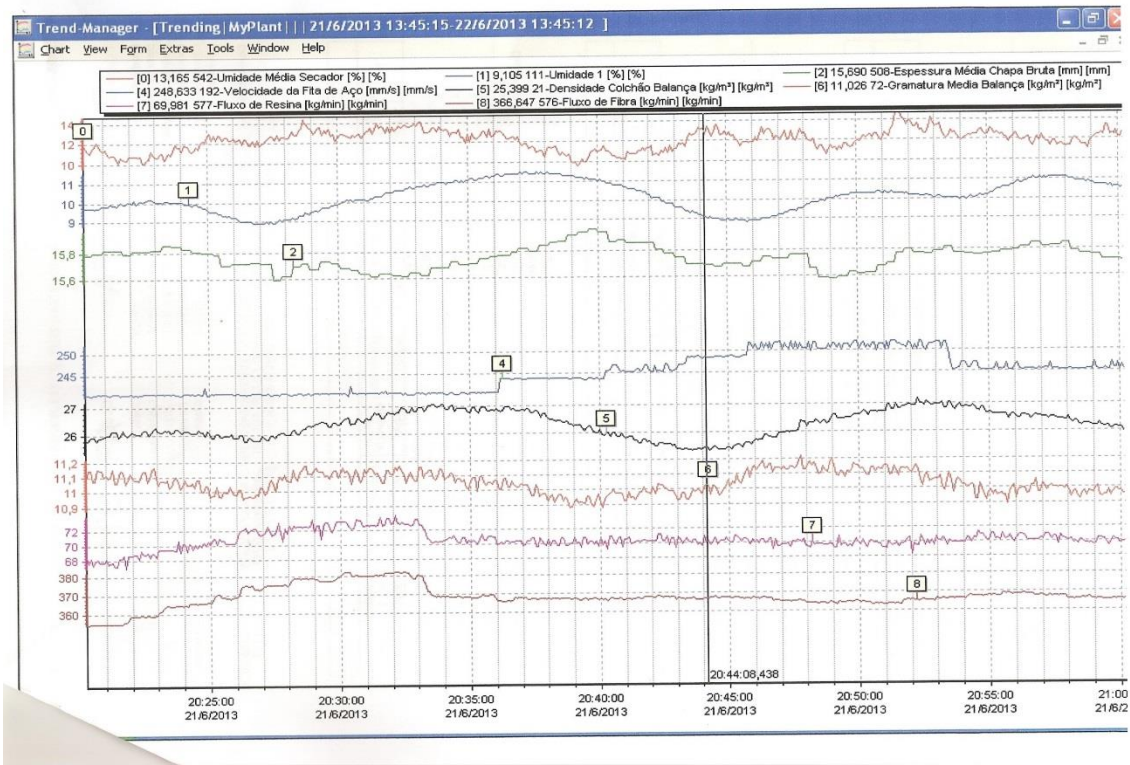


Figura 25 – Rastreamento da Chapa UF (Dahmos Trend Manager<sup>®</sup>, 2013.)

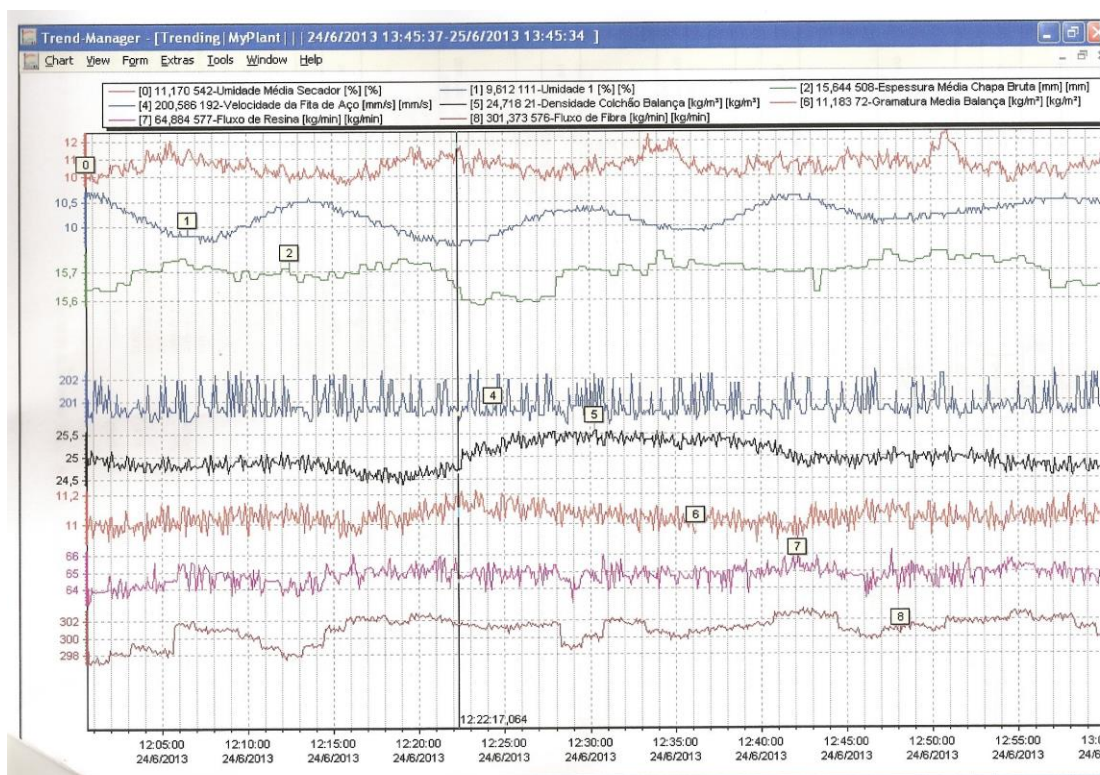


Figura 26 – Rastreamento da Chapa MF(Dahmos Trend Manager<sup>®</sup>, 2013.)

### **5.1.5 – Espessura da chapa (mm)**

O Trend (Figuras 25 e 26) mostra também que as espessuras estavam com 15,69 e 15,64 mm para Chapas UF e MF respectivamente. No momento da retirada da amostra, as espessuras estavam dentro da tolerância prescrita na especificação. Se a espessura está boa e a gramatura do colhão de fibras também está dentro do especificado conseqüentemente a densidade da chapa estará dentro do especificado ( $\text{Kg/m}^3$ ). As chapas com espessura e densidade dentro do especificado apresentam maior probabilidade de apresentarem bons resultados nos testes de tração perpendicular, tração superficial e resistência a flexão devido boa compactação do material.

### **5.1.6 – Velocidade (mm/s)**

Outra variável importante para o processo monitorada pelo Trend é a velocidade de produção (mm/s). O gráfico (Figuras 25 e 26) mostra valores de 248 e 200 mm/s para as Chapas UF e MF respectivamente. A velocidade de 248 mm/s encontra-se 0,8% abaixo de especificado e 200 mm/s está 2,56% acima do esperado para essa produção. A Chapa UF apresenta diferença mínima de velocidade não sendo um valor relevante para o processo. Os resultados obtidos nos testes físico-mecânicos foram satisfatórios.

Por outro lado, a Chapa MF apresenta um ganho considerável de produção se a quantidade solicitada for muito grande. Em outras palavras, quanto mais rápida for a velocidade de produção, o custo do produto tende a diminuir. Assim, mesmo neste cenário de maior velocidade, a resina termofixa apresentou bom desempenho quanto a sua reatividade consolidando a chapa num menor tempo. Os testes físico-mecânicos apresentaram resultados muito satisfatórios e bem acima do especificado.

### **5.1.7 – Fluxos de fibra e resina (Kg/min)**

O Trend mostra também o monitoramento de outras duas variáveis muito importantes para o processo: fluxo de fibra e de resina termofixa. Ambas são expressas em Kg/min. A quantidade de resina dosada no sistema ocorre em função do fluxo da fibra, pois a resina é dosada diretamente nessa mesma fibra. Por meio de “setpoint”, o sistema permite o aumento ou diminuição da

dosagem de resina em particular, mas a lógica do sistema estabelece: se o consumo de fibra aumentar, o fluxo de resina dosada aumentará também.

Por isso, a possibilidade de interferência da dosagem de resina nos resultados de testes físico-mecânicos de chapas MDF é pequena e se baseia principalmente em erros determinados em balanças, falta de calibração de sensores eletrônicos e/ou entupimentos em tubulações de resina existentes no processo.

Seguem abaixo os dois gráficos de monitoramento gerados pelo Trend durante o processo de produção de chapas de 15,0 mm de espessura usando resina termofixa UF e MF respectivamente:

Portanto, o software (Dahmos Trend Manager<sup>®</sup>) foi usado neste trabalho para auxiliar a compreensão dos resultados, pois algumas variáveis do processo de produção MDF (umidade, gramatura, espessura, velocidade, etc) influenciam muito na reatividade da resina termofixa dentro da prensa aquecida.

#### 5.1.8 – Perfil de densidade das chapas UF e MF

Outro recurso instrumental para análise das características físico-mecânicas das Chapas UF e MF é o Grecon Dax 5000.

Como já citado anteriormente, o equipamento analisa as amostras e gera perfis de densidade. Esses perfis são comparados com outros perfis de referência que foram desenvolvidos para auxiliar no diagnóstico das condições físico-mecânicas da chapa MDF. Pelo perfil de densidade é possível observar se a resina termofixa polimerizou totalmente ou não. Segue abaixo uma figura ilustrando esses perfis de referência:

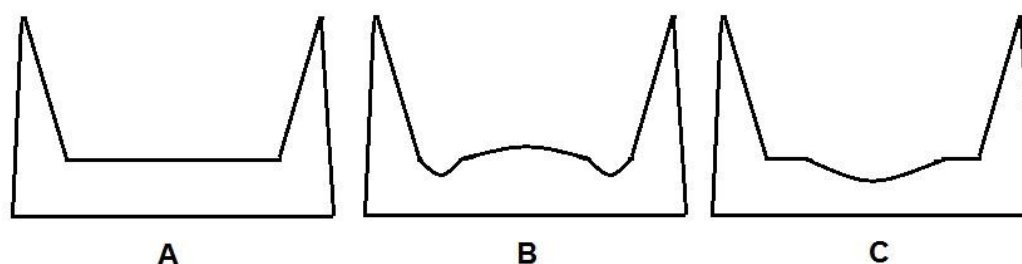


Figura 27 – Perfis de Referência

O perfil de referência A é o ideal. Neste caso, a cura da resina foi satisfatória, a chapa apresenta-se bem compactada. A matéria (fibra) foi bem consolidada ou aglutinada pela força da reação da resina termofixa.

O perfil de referência B não é satisfatório. Apresenta excesso de cura da resina termofixa no centro da chapa e provavelmente as bordas dessa chapa estão fracas e apresentarão valores de tração perpendicular abaixo do especificado.

O perfil de referência C também não é satisfatório. Desta vez, a cura da resina no centro da chapa não foi total. Os valores de tração perpendicular no centro da chapa estarão abaixo do especificado.

As Chapas UF e MF em estudo foram analisadas e o instrumento gerou dois gráficos.

Como pode ser observado na Figura 28, o perfil de densidade da Chapa UF apresenta-se muito próximo do perfil de referência A, isto é, apresenta boa compactação das fibras devido a perfeita reação da resina termofixa durante o processo de consolidação.

As densidades máximas na esquerda e direita também podem ser chamadas de picos de densidade. Os valores de referência estão entre 1000 e 1100 Kg/m<sup>3</sup> e esta chapa apresentou valores de 1036 Kg/m<sup>3</sup> na esquerda e 1023 Kg/m<sup>3</sup> na direita. A densidade média (%) apresentou valor de 88,3%. Valores acima de 80% são considerados satisfatórios. Assim, conclui-se que o perfil de densidade da Chapa UF está dentro da normalidade e apresentam valores que estão de acordo com os resultados dos testes físico-mecânicos aplicados nessa chapa.

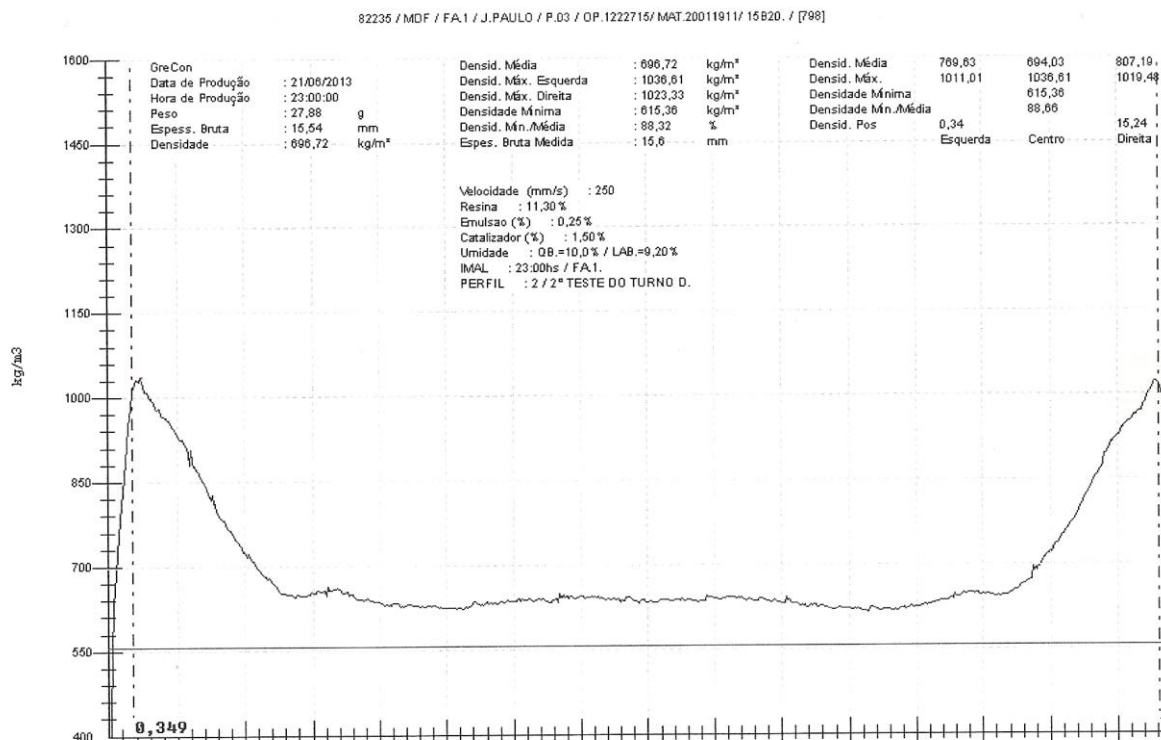


Figura 28 – Perfil de densidade da Chapa UF (Grecon DAX 5000, 2013).

Como pode ser observado na Figura 29, o perfil de densidade da Chapa MF também se apresenta muito próximo do perfil de referência A, isto é, apresenta boa compactação das fibras devido a perfeita reação da resina termofixa durante o processo de consolidação. Nota-se uma leve tendência para um perfil de referência B, mas é possível observar que a densidade mínima (%) está bem acima do mínimo necessário representado pela linha na horizontal (80%) acima do eixo X.

Os picos de densidade (esquerdo e direito) apresentaram valores de 1012 e 1018 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Tais valores também estão dentro da tolerância estipulada na norma (entre 1000 e 1100 Kg/m<sup>3</sup>). A densidade média (%) apresentou valor de 86,9%, isto é, também se apresenta dentro do especificado. Logo, conclui-se que o perfil de densidade da Chapa MF também está dentro da normalidade e apresentam valores que estão em sintonia com os resultados dos testes físico-mecânicos aplicados nessa chapa.

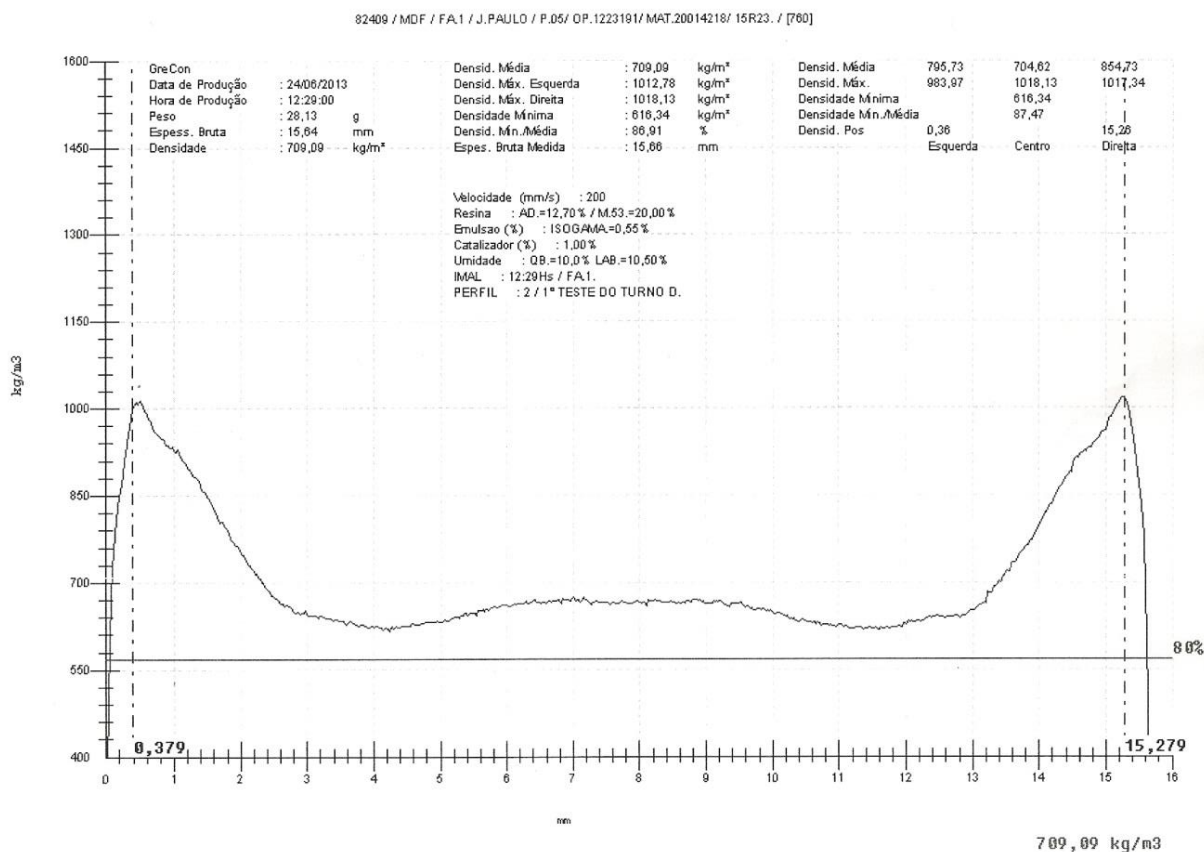


Figura 29 – Perfil de densidade da Chapa MF (Grecon DAX 5000, 2013).

### 5.1.9 – Chapa UF fora de especificação

Buscando melhorar a compreensão desse estudo da influência das resinas termofixas UF e MF nas chapas de MDF, inseriu-se aqui um tópico buscando para analisar uma chapa de 15,0 mm de espessura que não atendeu as normas ou requisitos mínimos de qualidade tecnológica. Esta chapa será chamada de Chapa D, pois foi descartada ao final do processo.

Analisando os dados da resina contidos na Tabela 7, pode-se verificar que os valores estão dentro do especificado, ou seja, a resina não foi a responsável pela retenção da Chapa D. Porém, como já visto antes, outros fatores do processo podem influenciar no desempenho da resina termofixa dentro da prensa aquecida.

Tabela 7 - Resultados da análise da resinas termofixa UF – ChapaD

Variáveis	Observação	Unidade	Especificação	Resina UF
Viscosidade Brookfield	25°C	cP	45-65	47,2
Viscosidade Copo Ford	25°C	s	15-25	17,5
pH	25°C	-	7,0-8,5	7,6
Gel Time	-	s	45-65	64,4
Densidade	25°C	g/mL	1,24-1,26	1,25

Novamente, recorreu-se a ferramenta Dahmos Trend Manager<sup>®</sup>, ou Trend para auxiliar na compreensão deste caso (Figura 28).

Observando a Figura 30, nota-se que a umidade da fibra estava com 11,02 %, isto é, trata-se de um valor muito acima do ideal (9,0 a 9,5%). Sua influência no processo foi muito grande, pois facilitou a transferência de calor da prensa para a chapa e isso acelerou demasiadamente a cura da resina favorecendo a geração excessiva de vapores de formaldeído. Houve excesso de pressão interna no interior da chapa causando seu rompimento e conseqüente perda do produto. As chapas saíram muito fracas, fato que foi comprovado ao se verificar os resultados das trações perpendiculares conforme Tabela 8:

Tabela 8 – Resultados dos testes físico-mecânicos da chapa D

Chapa D - espessura 15,0 mm							
Nº	C	L	E	P	D	PS	TP
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
1	50,6	50,7	16,0	28,4	693,0	11,1	3,7
2	50,6	50,5	15,9	28,5	701,0	11,2	3,9
3	50,6	50,7	15,9	28,5	698,0	11,1	4,9
4	50,2	50,8	16,0	28,0	688,0	11,0	4,1
5	50,4	50,8	15,9	28,2	694,0	11,0	4,9
6	50,5	50,7	16,0	29,2	713,0	11,4	3,9
Média	50,5	50,7	15,9	28,4	697,8	11,1	4,2

C= comprimento; L= largura; E= espessura; P= peso; D= densidade; PS= peso por superfície; TP= tração perpendicular.

O Trend (Figura 30) mostra também que a média das espessuras da Chapa D estava com 15,9 mm. No momento da retirada da amostra, as espessuras estavam 0,2 mm mais grossas que o determinado (15,7 mm), mas ainda estavam dentro da tolerância prescrita na especificação. Como já estudado antes, se a espessura e a gramatura estão dentro do especificado consequentemente a densidade da chapa estará dentro do especificado (Kg/m<sup>3</sup>). Isso se comprova na densidade observada no teste: 697,8 Kg/m<sup>3</sup>. Logo, constata-se que a espessura e a densidade não influenciaram no resultado ruim do teste físico-mecânico.

Outra variável importante para o processo monitorada pelo Trend é a velocidade de produção (mm/s). O gráfico mostra que a velocidade de produção na hora do teste estava em 235 mm/s. O valor da velocidade de produção especificado é de 250 mm/s. Seja por qualquer motivo, se a velocidade estiver muito baixa, maior será o tempo de exposição da chapa ao calor da prensa. Se nenhuma outra variável for ajustada, por exemplo, diminuição da pressão, esse calor excessivo acelera a reação e a cura da resina é antecipada. Logo, o excesso de pressão de vapor no interior da chapa causará rompimento e consequente perda do produto. Percebe-se outro agravante para justificar as más condições tecnológicas da Chapa D.



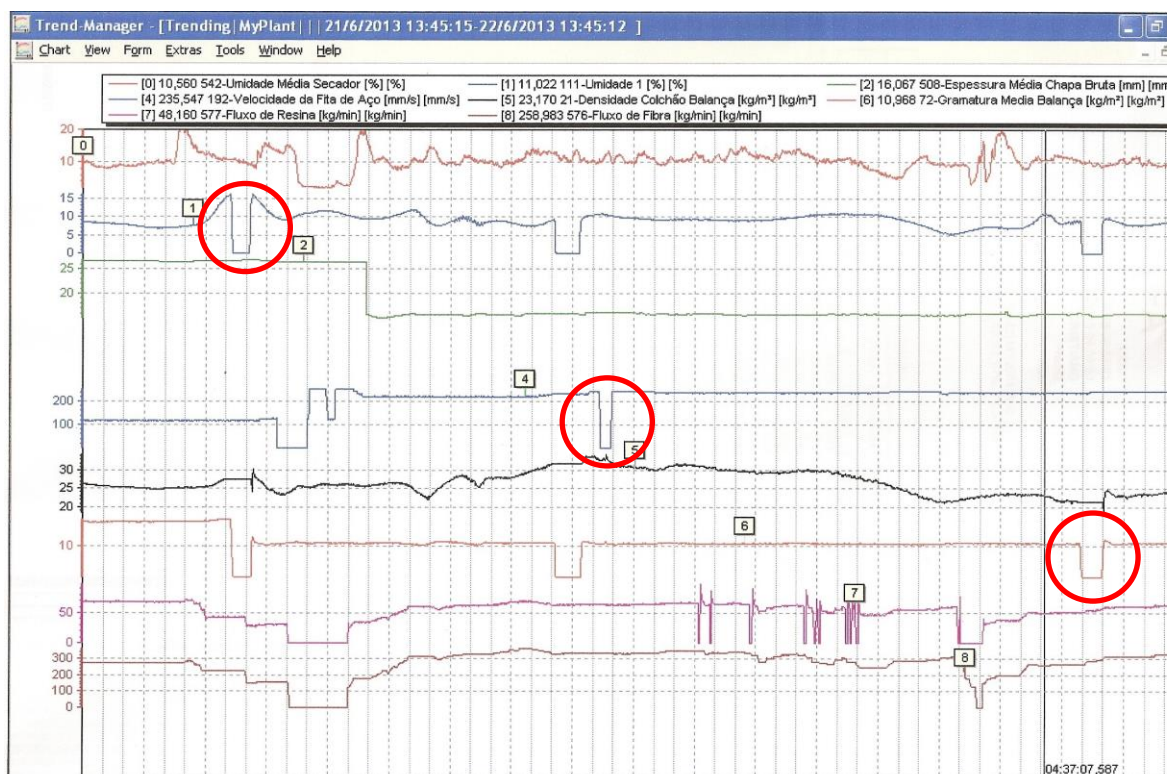


Figura 30 – Rastreamento da Chapa D (Dahmos Trend Manager<sup>®</sup>, 2013.)

O Grecon Dax 5000 foi também usado para auxiliar na análise dos resultados dos testes (Figura 31).

Como pode ser observado na Figura 31, o perfil de densidade da Chapa D apresenta-se muito próximo do perfil de referência C, isto é, apresenta má compactação das fibras no centro da chapa. A cura da resina termofixa não foi perfeita, ou seja, ela não polimerizou completamente causando má consolidação do produto.

Os valores dos picos de densidade na esquerda e na direita foram de 994,2 e 1002 Kg/m<sup>3</sup>. Como já citado antes, os valores de referência estão entre 1000 e 1100 Kg/m<sup>3</sup>. Assim, o pico de densidade esquerdo está abaixo e o direito está próximo do limite inferior. A densidade média (%) apresentou valor de 82,6%, isto é, também está bem próximo do mínimo exigido (80%). Conclui-se que o perfil de densidade da Chapa UD não está dentro da normalidade e confirma o péssimo estado da chapa previamente evidenciado pelos resultados dos testes físico-mecânicos.

Resumindo, a resina usada na produção da Chapa D estava em boas condições físico-químicas conforme o laudo apresentado, mas as variáveis do processo (umidade e velocidade) estavam fora de especificação e influenciaram muito no mau desempenho da resina termofixa durante o processo de consolidação da chapa D dentro da prensa. Mais uma vez, as ferramentas de processo Dahmos Trend Manager<sup>®</sup> e Grecon Dax 5000 contribuíram na análise dos resultados dos testes tecnológicos da chapa MDF.

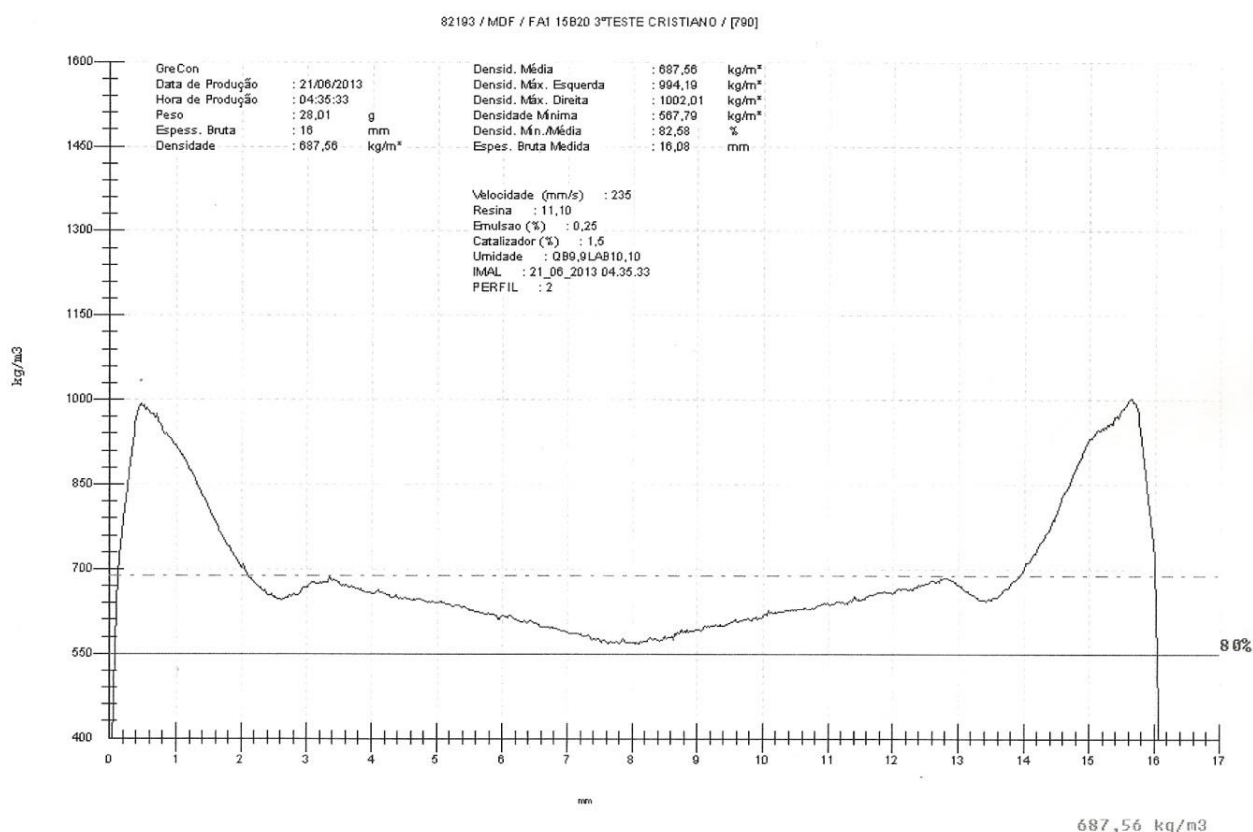


Figura 31 – Perfil de densidade da Chapa D (Grecon DAX 5000, 2013.)

## 5.2. – Chapas UF e MF analisadas por TG-DSC

Quatro amostras de chapas MDF (A, B, C e D) com resinas termofixas diferentes foram analisadas por TG-DSC. A composição de cada amostra se encontra na Tabela 10. As curvas TG-DSC das referidas amostras de chapas de MDF são mostradas nas Figuras 32-35 e os detalhes referentes aos eventos térmicos estão descritos na Tabela 9.

As curvas TG mostram que as amostras de chapas MDF se decompõem em quatro etapas. A primeira perda de massa para todas as amostras analisadas ocorre entre 41 e 185 °C sendo atribuída a volatilização de solventes que compõem a formulação do MDF, o qual ocorre em uma única etapa.

Após a volatilização, a perda de massa observada em todas as amostras é devida a decomposição térmica (combustão) do MDF. Essas perdas ocorrem em etapas consecutivas e com grande similaridade em todas as amostras mesmo tendo resinas (aglutinantes) de composições diferentes (tipos e dosagens).

A quarta etapa se caracteriza pela presença de resíduos de madeira (cinzas). Em todas as amostras, os resíduos apresentaram valores próximos a 1,0% num intervalo de temperatura de 547 a 994 °C.

Tabela 9 – Eventos térmicos das amostras de chapas MDF

Amostras		Etapas			
		Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
A	θ°C	47,1-185,6	281,2-343,9	389,6-515,9	547,2-993,9
	perda / %	4,41	39,52	25,54	0,79
	pico / °C	155,6	352,8	91,2 (endo)	494,9
B	θ°C	46,46-184,9	270,4-331,6	365,2-525,1	553,4-990,5
	perda / %	3,93	42,26	31,39	1,02
	pico / °C	145,49	335,3	93,1 (endo)	476,5
C	θ°C	41,2-155,4	256,4-335,9	381,9-528,1	555,9-989,3
	perda / %	4,32	43,23	29,43	1,09
	pico / °C	143,1	340,2	103,1(endo)	475,7
D	θ°C	49,7-148,6	251,1-341,5	395,2-539,5	556,8-993,5
	perda / %	4,37	43,56	28,91	0,81
	pico / °C	155,3	348,3	102,2(endo)	498,1

Nas curvas DSC das amostras A, B, C e D observa-se os picos endotérmicos 91, 93, 103 e 102 °C respectivamente. Estes picos estão associados a evaporação de compostos voláteis. A mesma curva ainda exhibe outros três picos exotérmicos referentes a decomposição/oxidação da amostra de MDF e estão de acordo com as perdas de massa observadas nas curvas

TG. Segue abaixo a Tabela 10 que mostra a composição ou os aditivos usados no processo de fabricação de cada amostra de painel MDF:

Tabela 10 – Composição das amostras de MDF

Amostras	Aditivos	Dosagem (%)
A	Resina Uréia Formaldeído	11,00
	Sulfato de amônio (catalisador)	1,50
B	Resina Uréia Formaldeído	12,56
	Resina Melamina Formaldeído	9,87
C	Resina Uréia Formaldeído	10,50
	Resina Melamina Formaldeído	9,87
D	Resina Uréia Formaldeído	12,00
	Resina Melamina Formaldeído	16,00
	Trifenilmetano (corante)	18,00
	Sulfato de amônio (catalisador)	0,60

Como pode ser observado na Tabela 9, as amostras continham resinas termofixas UF e MF juntas e separadas. Algumas continham também sulfato de amônio (catalisador) e trifenilmetano como agente corante para chapa MDF. Mesmo assim, o comportamento da curva TG apresentou grande similaridade entre todas as amostras, ou seja, a perda de massa (%) em função do aumento da temperatura (°C) apresentou comportamento uniforme.

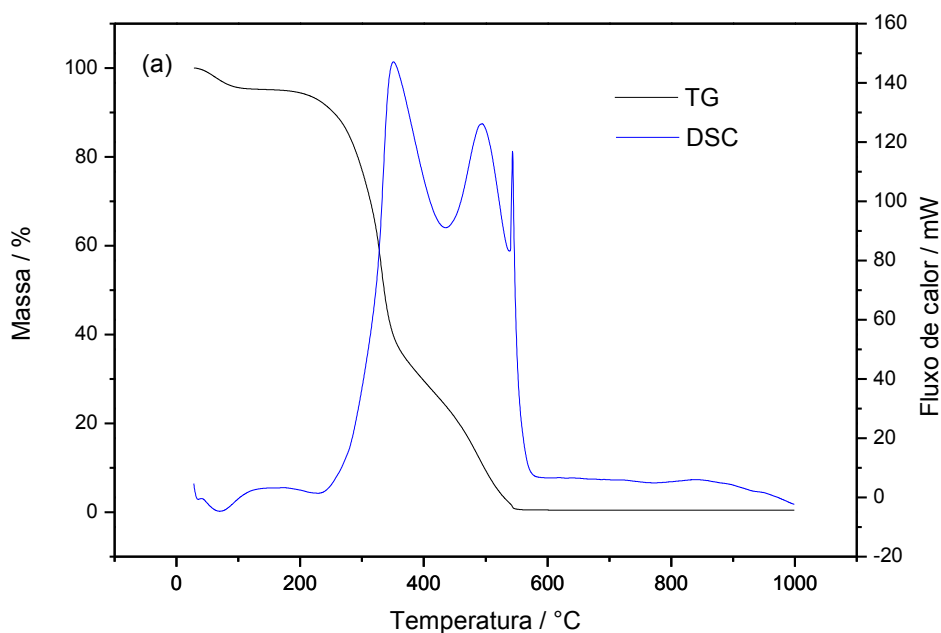


Figura 32 – Curva TG-DSC amostra A

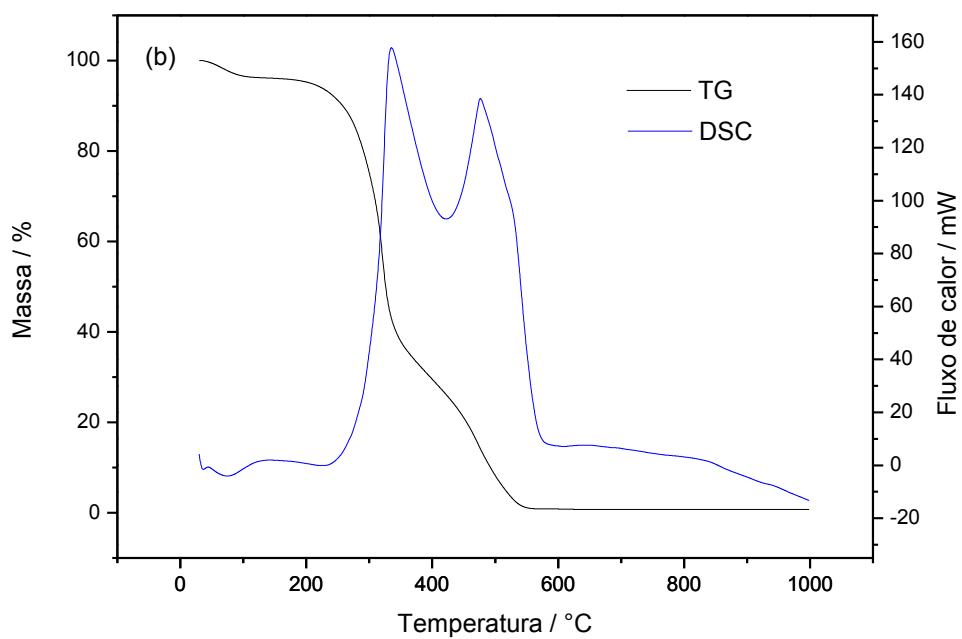


Figura 33 – Curva TG-DSC amostra B

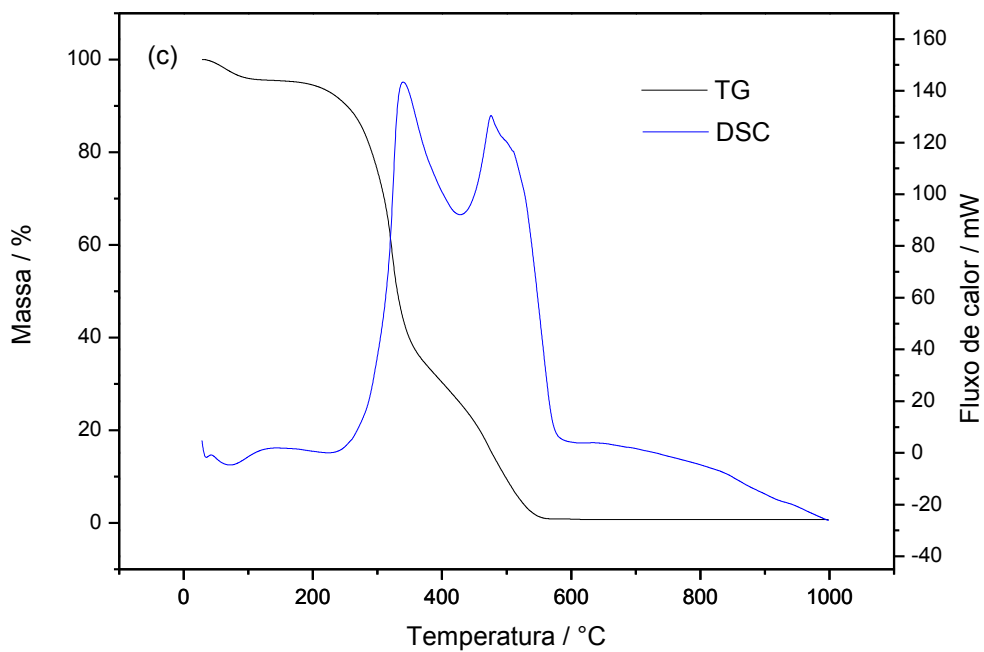


Figura 34 – Curva TG-DSC amostra C

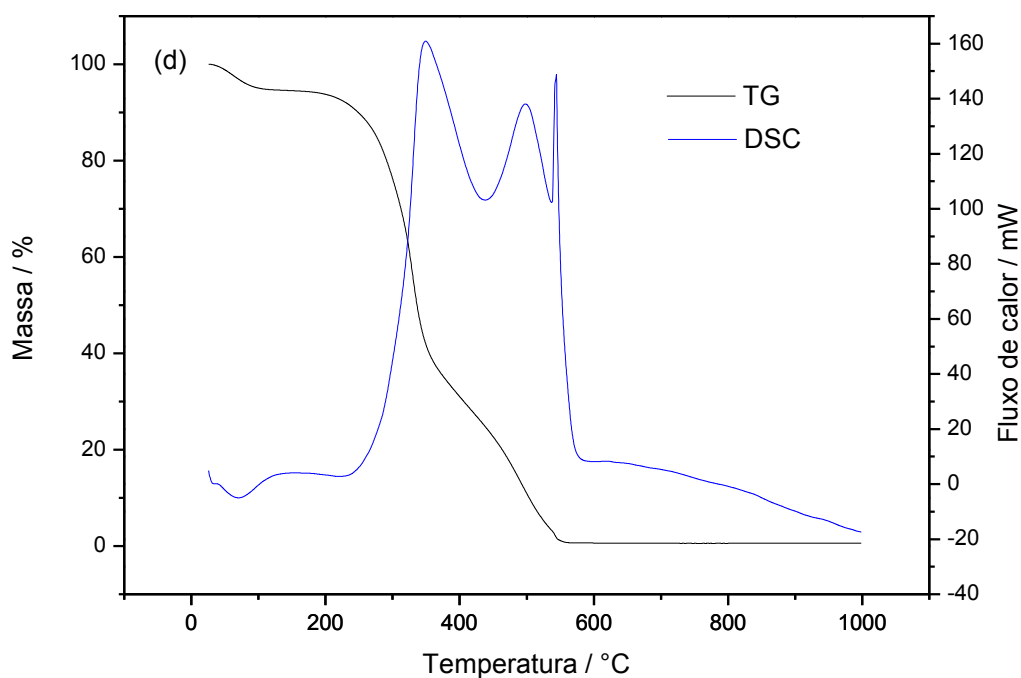


Figura 35 – Curva TG-DSC amostra D

## 6- CONCLUSÃO

Após as análises das amostras dos dois tipos de resinas termofixas ureia-formaldeído (UF) e melamina formaldeído (MF) foi possível concluir que:

- As resinas em estudo apresentaram algumas diferenças entre si nos parâmetros físico-químicos, porém nada significativo;
- No parâmetro viscosidade Brookfield, a resina termofixa MF apresentou-se 2,67% mais viscosa que a resina UF;
- O pH das amostras de resinas também apresentou pequena diferença, sendo a resina termofixa MF um pouco mais ácida que a resina UF;
- O Gel Time exibiu uma diferença de 6 segundos, isto é, a resina termofixa UF polimerizou-se num menor espaço de tempo;
- A resina termofixa UF tem demanda muito maior que a resina MF no processo de fabricação de chapas MDF devido ao baixo custo e boa eficiência no processo de consolidação dos painéis MDF;
- A produção de chapas MDF a base de resina termofixa MF ocorre com menor velocidade de produção, mas apresenta vantagens como maior

resistência a umidade e possibilita agregar maior valor ao produto final, pois passa por outros processos subsequentes como a laminação.

Quanto às análises das variáveis físico-mecânicas das amostras de chapas MDF de 15,0 mm de espessura, pode-se concluir que:

- Na média, a chapa MF superou a chapa UF nas variáveis trações perpendiculares, tração superficial e resistência à flexão, ou seja, a chapa MF apresentou-se mais resistente. Contudo, a chapa UF também atendeu a todas as especificações físico-mecânicas;
- Em decorrência do baixo custo da resina, as grandes indústrias produtoras de painéis MDF obviamente optam pela maior produção de chapas a base de resina termofixa uréia-formaldeído;
- A resina termofixa polimeriza a partir do calor e pressão dentro da prensa. A umidade facilita a transferência de calor. Assim, altos valores de umidade podem acelerar a reação (cura) da resina e valores muito baixos podem retardar a reação da mesma causando defeitos nas chapas MDF;
- A espessura e a gramatura da chapa dentro do especificado contribuem para bons resultados tecnológicos;
- A velocidade de produção também contribui na aceleração ou retardo da reação da resina. Por isso, deve ser monitorada e alterada conforme as condições do processo produtivo;

O aparelho Grecon Dax 5000 e o software Dahmos Trend Manager<sup>®</sup> foram usados na análise das condições tecnológicas das chapas MDF e no respectivo monitoramento das variáveis do processo de produção das mesmas.

As técnicas de análises por TG-DSC foram usadas para quantificar a perda de massa (%) em função da temperatura (°C) de algumas amostras de chapas MDF produzidas com resinas e teores (%) diferentes. Os resultados obtidos foram similares para as quatro amostras de MDF

Foi apresentado neste trabalho uma amostra de chapa MDF cujos testes tecnológicos apresentaram maus resultados com o intuito de estudar quais condições ou variáveis do processo interferem na reação (cura) da resina termofixa no processo de consolidação de um painel MDF.

## 7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELINI, U.L. **Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira eucalyptus grandis em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF**. 2007. 90p. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BELINI, U.L. **Adesivos para painéis de madeira**. 2003. 32p. Documento de revisão - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COSTA, Nuno et al. **Alternativa para catalisadores latentes para a cura de resinas UF utilizados na produção de painéis à base de madeira de baixa emissão de formaldeído**. *Jornal Internacional de Adesão e Adesivos*, Porto, v. 33, p.56-60, mar. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749611001515>>. Acesso em: 30 nov. 2013.

CYR, L.P; RIEDL, B.; WANG, X.M; SHALER, S. **Urea-melamine-formaldehyde (UMF) resin penetration in medium-density fiberboard (MDF) wood fibers**. *International science publishers*, vol. 20, nº 8, p. 787-801, 2006.

Duratex SA. Disponível em: <http://www.duratex.com.br/pt/Produtos/Madeira.aspx>. Acesso em 14.04.2013.

ELEOTÉRIO, J.R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 2000. 117p. Tese (Mestrado em Ciencia e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GÁLICO, D. A. **Síntese e caracterização de complexos de cetoprofeno com lantanídeos (iii) e ítrio (iii) no estado sólido com exceção do promécio**. 2012. 79p. (Trabalho de conclusão de curso) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

GPC Química. Disponível em : <http://www.gpcquimica.com.br/portal/empresa.html#topo>. Acesso em 13.04.2013.

Grecon. Disponível em : <http://www.grecon-us.com/pdfs/full-range-of-products-brochure-GreCon.pdf>. Acesso em 05/10/2013.

GUERRA, R. **Síntese e caracterização do complexo de lantânio (iii) e indometacina no estado sólido**. 2012. 62p. (Trabalho de conclusão de curso) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.



HALVARSSONA, S.; EDLUNDA, H.; NORGRENA, M. **Properties of medium-density fibreboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin.** Industrial crops and products, nº28, p. 37–46, 2008.

IONASHIRO, M. **Giolito: Fundamentos Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial.** São Paulo: Editora Giz, 2005.

KIM, S.; KIM, H.J. **Comparison of standard methods and gas chromatography method in determination of formaldehyde emission from MDF bonded with formaldehyde-based resins.** Bioresource Technology, nº96, p. 1457-1464, 2005.

LESSMANN, V.E. **Estudo da reação de cura de resinas uréia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear.** 2008. 121p. Tese (Mestrado em Ciências Exatas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MATTOS, R.L.; GONÇALVES, R.M; CHAGAS, F.B. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas.** BNDES – Produtos Florestais. 2008. 36p.

SIEMPELKAMP HANDLING SISTEM. Disponível em: <http://www.siempelkamp.com>. Acesso em 15.05.2013.

SILVA, S. A. M. **Chapa de média densidade (mdf) fabricada com poliuretana mono-componente derivada de óleo de mamona – caracterização por método destrutivo e por ultra-som.** 2003. 259p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Unicamp, Campinas, 2003.

SUNDIN, M. **Design of blow line resin injector for mdf production.** 2007. 67p. Master's thesis. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering - Luleå University of Technology, Luleå, 2007.

USTAOMER, D.; USTA, M. **The effects of boron compounds and different melamine contents in muf resins on some properties of mdf panels.** Bioresources, nº 7, p. 437-446, 2012.

Preventol. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/quimica/index.php?sessao=reportagem&id=600&pagina=4>. Acesso em 30.04.2013.

University of Queensland. **Urea formaldehyde polimerization.** Disponível em : [http://www.uq.edu.au/\\_school\\_science\\_lessons/appendixd.html](http://www.uq.edu.au/_school_science_lessons/appendixd.html). Acesso em: 01/11/2013.