



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

# **IMPACTO DA TORREFAÇÃO SOBRE A FRIABILIDADE DA BIOMASSA DURANTE O PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO**

Aluna: Karina Fernandes Oliveira

Orientador: Patrick Louis Albert Rousset - CIRAD/LPF-SFB, UnB

Projeto de Pesquisa apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília visando à obtenção do título de Engenheira Florestal.

- Brasília, dezembro 2011 -

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu tudo, por todo cuidado, proteção e provisão. Sem Ele nada disso faria sentido.

Aos meus pais, meu exemplo, por todo cuidado desde o nascimento até hoje. Obrigada por todos os ensinamentos, por terem formado meu caráter e serem responsáveis por essa pessoa que sou hoje.

Ao meu irmão, Paulo, pelo apoio e companheirismo, pelos momentos de alegria e boas risadas. Obrigada pela companhia nas madrugadas durante as viagens rumo à faculdade.

Agradeço também ao meu namorado, meu amor, Wesley. Obrigada por ser meu melhor amigo, meu confidente, aquele com quem não tenho medo e nem vergonha de dizer nada. Obrigada pelos abraços de conforto, por todo carinho e companheirismo.

À minha família, tios, primos. Agradeço pelos momentos inesquecíveis, por toda alegria a mim proporcionada.

Agradeço às minhas amigas, que não foram apenas colegas de curso, mas que se tornaram pessoas essenciais à minha vida, Ana Liu, Isa, Thaísa, Laura. Sem vocês a faculdade não teria a menor graça. Obrigada por sempre estarem comigo, por todo companheirismo, pelos infinitos momentos de alegria, dos quais não me esquecerei, pelas caronas literais e figuradas! Obrigada Isa e Ana pela ajuda com esse projeto e pela companhia constante.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo, reclamações conjuntas, alegrias...

Ao Dr. Patrick, por toda orientação, disponibilidade e troca de conhecimentos. Aos caros colegas do Laboratório de Energia do LPF, Lucélia, Alessandro, Ana Cristina, Yuri, Thiago, Fred e ao Dr. Waldir Quirino. Agradeço todo apoio, atenção, disposição em ajudar e pela amizade que construímos.

Ao Dr. Mário Rabelo pelas soluções dadas ao problemas que surgiram durante a execução dos ensaios.

Ao Laboratório de Pesquisas Florestais pela permissão para execução do projeto final em suas dependências.

À Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento – FUNTEC pelo apoio durante a realização desse projeto.

Enfim, obrigado a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

O consumo de energia no mundo se fundou na utilização de combustíveis fósseis, uma fonte não renovável e que apresenta aspectos negativos em relação ao meio ambiente. Nesse sentido, a madeira se mostra como uma alternativa viável, sendo utilizada de forma cada vez maior na geração de energia. Dentre outros processos de transformação da madeira, a torrefação aparece como uma forma de obter um combustível sólido com melhores características energéticas, além de reduzir suas propriedades mecânicas e gerar um material mais friável. Desta forma, nesse estudo tratou-se a madeira de eucalipto nas temperaturas de 210°C, 240°C e 270°C em atmosfera com reduzido teor de oxigênio. A madeira em estado natural e as amostras torrificadas passaram pelo processo de fluidização e em seguida se avaliou o aumento da friabilidade através das mudanças granulométricas ocorridas. O rendimento gravimétrico da torrefação é menor para temperaturas mais altas. No tratamento a 270°C ocorreu a extrapolação do limite da temperatura programada, em virtude da ocorrência de reações exotérmicas, no entanto não houve a carbonização do material. Observou-se um aumento de partículas de menores dimensões nas amostras torrificadas, bem como o aumento do poder calorífico superior. Observa-se uma relação direta, tanto da friabilidade, como do poder calorífico, com a intensidade térmica do tratamento.

**Palavras-chaves:** Torrefação, granulometria, friabilidade, biomassa, *Eucalyptus*.

## ABSTRACT

Energy consumption in the world was founded on the use of fossil fuels, a non-renewable source and that has negative aspects in relation to the environment. The use of wood for energy generation is shown as an alternative and is becoming more and more frequent. Torrefaction is a process that allows obtaining a solid fuel with better energy, beyond reducing its mechanical properties and increasing its grindability. In this study, biomass (eucalyptus) was treated at three temperatures (210°C, 240°C and 270°C) in an atmosphere with reduced oxygen content. The raw biomass and treated biomass were fluidized and after that the increase of grindability was assessed by evaluating the change in distribution particle size. The gravimetric yield of torrefaction was lower for higher temperatures. In the treatment at 270°C occurred the extrapolation of the limit temperature, due to the occurrence of exothermic reactions. There was an increase of smaller particles in the treated samples, as well as increasing the gross calorific value. There is a direct relationship, both the grindability, as the gross calorific value, with the intensity of the thermal treatment.

**Keywords:** Torrefaction, grindability, granulometry, biomass, *Eucalyptus*.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema demonstrativo do equipamento utilizado para a realização dos ensaios de torrefação. (Adaptado de Rousset *et al*, no prelo 2012b). ..... **8**
- Figura 2.** Esquema demonstrativo do equipamento utilizado para a realização dos ensaios de fluidização. (Adaptado de Rousset *et al*, no prelo 2012a). ..... **9**
- Figura 3.** Representação sintetizada da metodologia utilizada no presente estudo. .... **11**
- Figura 4.** Amostras das faixas granulométricas  $X_1$ ,  $X_2$  e da Mistura da biomassa (M) antes e após a torrefação: a) Sem torrefação; b) 210°C; c) 240°C; d) 270°C. .... **12**
- Figura 5.** Temperatura na biomassa e perda de massa para o tratamento da torrefação a 210°C: a)  $X_1$ ; b)  $X_2$ ; c) M. .... **14**
- Figura 6.** Temperatura na biomassa e perda de massa para o tratamento da torrefação a 240°C: a)  $X_1$ ; b)  $X_2$ ; c) M. .... **15**
- Figura 7.** Temperatura na biomassa e perda de massa para o tratamento da torrefação a 270°C: a)  $X_1$ ; b)  $X_2$ ; c) M. .... **17**
- Figura 8.** Mudança granulométrica em M sem a torrefação, antes e após a fluidização. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade. .... **20**
- Figura 9.** Composição Granulométrica de amostras de  $X_1$  antes da fluidização e após a fluidização para amostras testemunha e torrificadas. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade. .... **21**
- Figura 10.** Composição Granulométrica de amostras de  $X_2$  antes da fluidização e após a fluidização para amostras testemunha e torrificadas. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade. .... **23**
- Figura 11.** Composição Granulométrica de amostras de M antes da fluidização e após a fluidização para amostras testemunha e torrificadas. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade. .... **24**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características das peneiras utilizadas para classificação da biomassa.....	<b>6</b>
<b>Tabela 2.</b> Composição Granulométrica da biomassa estudada.....	<b>7</b>
<b>Tabela 3.</b> Rendimento gravimétrico da torrefação ( $\gamma$ ) em porcentagem para cada tratamento. .....	<b>13</b>
<b>Tabela 4.</b> Sensibilidade dos componentes da madeira à torrefação. (Adaptado de Chen & Kuo, 2011).....	<b>13</b>
<b>Tabela 5.</b> Poder calorífico superior de amostras sem torrefação e torrificadas a 210°C, 240°C e 270°C. ....	<b>17</b>
<b>Tabela 6.</b> Análise de Variância (ANOVA) do impacto da fluidização sobre a granulometria para a Mistura de Biomassa (M) sem a torrefação antes e após a fluidização. ....	<b>19</b>
<b>Tabela 7.</b> Análise de Variância (ANOVA) do fator temperatura de torrefação sobre a granulometria em $X_1$ .....	<b>21</b>
<b>Tabela 8.</b> Análise de Variância (ANOVA) do fator temperatura de torrefação sobre a granulometria em $X_2$ .....	<b>22</b>
<b>Tabela 9.</b> Análise de Variância (ANOVA) do fator temperatura de torrefação sobre granulometria em M. ....	<b>24</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivo .....	<b>2</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>2</b>
2.1. Torrefação .....	<b>2</b>
2.1.1. Impactos da Torrefação sobre as propriedades mecânicas e energéticas da madeira 3	
2.1.1.1. Propriedades Energéticas.....	<b>4</b>
2.1.1.2. Propriedades Mecânicas .....	<b>4</b>
2.2. Fluidização.....	<b>5</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>6</b>
3.1. Material utilizado .....	<b>6</b>
3.2. Preparo do Material .....	<b>6</b>
3.3. Ensaios de Torrefação .....	<b>7</b>
3.4. Determinação do Poder Calorífico .....	<b>8</b>
3.5. Ensaios de Fluidização.....	<b>8</b>
3.6. Reclassificação do material .....	<b>10</b>
3.7. Análise Estatística.....	<b>10</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>11</b>
4.1. Torrefação .....	<b>12</b>
4.2. Poder calorífico.....	<b>17</b>
4.3. Fluidização.....	<b>18</b>
4.4. Reclassificação da Biomassa e Mudança na Composição Granulométrica.....	<b>18</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>25</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>26</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia no mundo apresenta uma taxa de crescimento cada vez maior. Essa energia, no entanto, se fundou no uso de combustíveis fósseis, que além de não se mostrarem como uma fonte renovável, apresentam uma série de aspectos negativos em relação ao meio ambiente. Frente a isso, atualmente nota-se um aumento na busca de energias provenientes de fontes renováveis, dentre as quais está a madeira.

A madeira sempre ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade, tendo sido sua primeira fonte de energia, inicialmente empregada para aquecimento e cocção de alimentos. Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007).

A utilização de madeira como combustível sólido em sua grande parte limita-se ao uso direto sob a forma de lenha e transformada sob a forma de carvão. O uso de lenha como combustível ainda não se mostra muito eficiente, pois muitas vezes a madeira ainda se apresenta com alto teor de umidade no momento da utilização reduzindo seu poder calorífico e, além disso, muitas vezes os resíduos produzidos na obtenção desse produto não são aproveitados.

Os resíduos de plantios florestais apresentam-se como uma importante fonte de biomassa para a produção energética. Além dos resíduos produzidos durante a exploração florestal, há também aqueles provenientes do beneficiamento das toras nas serrarias e que podem ser melhor aproveitados visando à produção de energia, contribuindo assim para a diversificação dos biocombustíveis.

A torrefação aparece como uma forma de diversificar essa oferta de biocombustíveis. Esse processo consiste em um tratamento térmico da biomassa em temperaturas mais baixas, com um limite de aproximadamente 300 °C, objetivando obter um combustível sólido com melhores características energéticas.

Como uma das características da madeira torrificada é o aumento da friabilidade, ou seja, o aumento da geração de finos, um dos prováveis usos para esse produto seria em reatores de grande porte utilizados para a gaseificação da biomassa, uma vez que para a alimentação dos mesmos as partículas devem ser de tamanho reduzido.



## **1.1. Objetivo**

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da torrefação sobre a friabilidade da biomassa de *Eucalyptus* sp durante a fluidização, com a utilização de níveis distintos de temperatura de torrefação e diferentes granulometrias.

No trabalho controlou-se os parâmetros que são determinantes no impacto da torrefação sobre a biomassa, identificando a melhor forma de condução do tratamento, de modo a contribuir para sua provável utilização industrial.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Torrefação**

O processamento termoquímico da biomassa é o ato de expor o material a temperaturas elevadas em um ambiente com restrição de oxigênio, o que leva à desagregação termicamente ativada do material lignocelulósico, sem a oxidação que ocorre durante a combustão. O produto predominante do processo pode ser selecionado por meio do controle das condições de processamento: pressão, temperatura e tempo de residência (CIOLKOSZ & WALLACE, 2011).

Dentre os processos de conversão da biomassa em energia através da via termoquímica, encontra-se a torrefação. A torrefação consiste no processamento da biomassa em uma temperatura relativamente baixa (200-300°C) em atmosfera inerte ou com taxa reduzida de oxigênio.

De acordo com Luengo, Felfli & Bezzon (2008), durante a torrefação podem ser identificados dois tipos de reações, classificadas em reações de termocondensação e carbonização, sendo que a carbonização é cineticamente lenta no domínio térmico da torrefação, mas pode crescer bruscamente acima de 250°C, com reações fortemente exotérmicas, o que pode conduzir a um aumento descontrolado da temperatura e, conseqüentemente a uma carbonização total do material.

O processo de torrefação, utilizado como pré-tratamento, tem como objetivo concentrar a energia da biomassa em curto tempo e obter altos rendimentos, operando com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas para permitir que os voláteis de maior

poder calorífico fiquem retidos no produto sólido denominado Biomassa Torrificada (LUENGO, FELFLI & BEZZON, 2008).

Segundo Bridgeman *et al* (2010), a torrefação é um processo de pirólise leve que remove a umidade e uma proporção do conteúdo volátil, deixando um sólido, seco e parcialmente carbonizado.

Rousset *et al* (2011) afirmam que um grande desafio é controlar a qualidade da biomassa através de parâmetros da torrefação, tais como tempo e temperatura. Rodrigues (2009) afirma que as características da madeira torrificada variam principalmente em função da temperatura final do processo, mas também sofrem interferência do tempo sob tal temperatura, da velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira.

A temperatura é um parâmetro importante na torrefação, uma vez que todas as propriedades da madeira sofrem alterações graduais de acordo com o aumento da mesma (RODRIGUES, 2009). A temperatura tem forte influência sobre a composição química da madeira, à medida que a temperatura aumenta o teor de carbono aumenta proporcionalmente e os teores de oxigênio e hidrogênio diminuem ostensivamente (LUENGO, FELFLI & BEZZON, 2008). A taxa de aquecimento também influencia o processo, principalmente em relação à formação de voláteis e à sua permanência ou não no conteúdo sólido.

Dentre as propriedades da biomassa que influenciam o processo da torrefação, a granulometria aparece como característica importante, uma vez que pode influenciar a condução térmica, bem como o rendimento gravimétrico do processo. Ferro *et al* (2004) concluíram que o tipo de biomassa influencia as taxas de distribuição do produto em sólido, líquido e gás.

### **2.1.1. Impactos da Torrefação sobre as propriedades mecânicas e energéticas da madeira**

Segundo Ciolkosz & Wallace (2011) o produto torreficado ideal deve ter perda de energia mínima, associado a uma melhora na friabilidade e densidade de energia. Bergman *et al* (2005) sugerem que as condições ideais para torrefação devem resultar num material com boa friabilidade, baixo custo de processamento e alto conteúdo de energia.

A torrefação melhora as propriedades do combustível sólido. Segundo Arias *et al* (2008) uma das vantagens da torrefação é a uniformidade da qualidade do produto.

### **2.1.1.1. Propriedades Energéticas**

A densidade energética de uma biomassa mostra a quantidade de energia presente em um volume específico dessa biomassa. Luengo, Felfli & Bezzon (2008) definem como uma das características da biomassa torrificada uma alta densidade energética, já que os voláteis de alto teor energético são conservados no sólido.

De acordo com Bridgeman *et al* (2010), a torrefação executa duas funções: retira a umidade (e compostos voláteis de baixo peso molecular) do combustível, e cria um sólido hidrofóbico que reabsorve apenas pequenas quantidades de umidade. Essa redução da higroscopicidade se mostra muito importante para o armazenamento do combustível, além de permitir um melhor desempenho na geração de energia, já que não são necessários gastos para evaporação da água (RODRIGUES, 2009).

O poder calorífico de uma biomassa é uma importante propriedade, uma vez que irá determinar o seu uso em aplicações energéticas. Segundo Arias *et al* (2008) com a torrefação de eucalipto há um aumento do poder calorífico com a temperatura e o tempo de residência.

Bergman *et al* (2004) afirmam que todos os produtos não-sólidos da torrefação contém relativamente mais oxigênio em comparação com a biomassa não tratada, demonstrando que a razão O/C da biomassa torrificada é menor que na biomassa não tratada, o que resulta no aumento do poder calorífico do produto sólido.

### **2.1.1.2. Propriedades Mecânicas**

Rodrigues (2009) cita como alterações provenientes da torrefação a diminuição das propriedades mecânicas. Dentre essas propriedades mecânicas, pode-se citar a friabilidade.

#### **a) *Friabilidade***

A friabilidade é a capacidade do combustível sólido em gerar finos (pó) quando submetido à abrasão ou queda (RODRIGUES, 2009), sendo uma propriedade que está intimamente ligada à composição granulométrica da biomassa.

Bridgeman *et al* (2010) afirmam que com a torrefação há um aumento na sua natureza frágil e uma redução na tenacidade das fibras presentes na biomassa de espécies lenhosas e herbáceas, o que sugere que a friabilidade do combustível aumenta.

Segundo Van der Stelt *et al* (2011) a torrefação é a tecnologia que melhora a friabilidade da biomassa, aparecendo como uma alternativa para o grande consumo energético que se tem hoje em dia para se obter partículas menores de biomassas típicas, como a madeira.

Arias *et al* (2008) estudando a influência da torrefação sobre a friabilidade e a reatividade da biomassa lenhosa, mostraram que há uma melhoria nas características de friabilidade da biomassa torrificada. Nesse estudo foi usado um moinho e após a moagem, as amostras de biomassa torrificada em diferentes temperaturas foram peneiradas em diferentes frações de tamanho, com o objetivo de avaliar as mudanças na friabilidade das amostras torrificadas. Observou-se que a porcentagem de partículas de tamanho menor aumentou após a torrefação.

## **2.2. Fluidização**

A fluidização baseia-se fundamentalmente na circulação de sólidos juntamente com um fluido (gás ou líquido). À medida que se aumenta a velocidade do gás, as partículas sólidas afastam-se e algumas começam a apresentar uma leve vibração — tem-se nesse momento um leito expandido. Com velocidade ainda maior, atinge-se uma condição em que a soma das forças causadas pelo escoamento do gás no sentido ascendente igualam-se ao peso das partículas. Nessa situação, em que o movimento do material é mais vigoroso, atinge-se o que se chama de leito fluidizado (NITZ & GUARDANI, s.d.).

A principal vantagem da fluidização é que o sólido é vigorosamente agitado pela passagem do fluido através do leito, então as camadas limites do fluido são quebradas e a mistura do sólido garante que praticamente não haja gradiente de temperatura no leito, mesmo com a ocorrência de reações exotérmicas ou endotérmicas (CHASE, 2001).

Leitos fluidizados têm sido amplamente aplicados em processos envolvendo a pirólise, gaseificação e combustão de uma ampla gama de materiais particulados, incluindo biomassa. As vantagens da fluidização incluem a elevada transferência de calor, temperaturas controláveis e uniformes, contato favorável entre gás e sólido e a habilidade de lidar com uma ampla variação nas propriedades das partículas (CUI & GRACE, 2006).

A fluidização em si também pode levar ao atrito das partículas sólidas. Por causa desse atrito, o tamanho das partículas sólidas é reduzido e a possibilidade de envolvimento das partículas sólidas com o fluido é maior (ROUSSET *et al*, no prelo 2012a).

Abdullah *et al* (2003) afirmam que o tamanho da partícula é um importante parâmetro para a fluidização, favorecendo-a ou não.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Material utilizado

O material utilizado no presente estudo foram resíduos provenientes da transformação da madeira de *Eucalyptus* sp na Marcenaria do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do SFB (Serviço Florestal Brasileiro).

#### 3.2. Preparo do Material

Inicialmente a biomassa passou por um processo de classificação, uma vez que a mesma apresentava diferentes tamanhos de partículas, obtendo assim a sua composição granulométrica. Foram utilizadas três peneiras para a classificação (tabela 1), com um tempo de peneiramento de aproximadamente 03 minutos.

**Tabela 1.** Características das peneiras utilizadas para classificação da biomassa.

Abertura (cm)	ABNT/ASTM	TYLER/MESH
0,28	7	7
0,475	4	4
1,6	6/8"	-

Foram obtidas então quatro faixas de composição granulométrica:

- < 0,28 cm (**X<sub>0</sub>**)
- Entre 0,28 cm e 0,475 cm (**X<sub>1</sub>**)
- Entre 0,475 cm e 1,6 cm (**X<sub>2</sub>**)
- >1,6 cm (**X<sub>3</sub>**)

A composição granulométrica da biomassa obtida é apresentada na Tabela 2. Nota-se que a faixa X<sub>2</sub>, que apresenta partículas com dimensões entre 0,475 cm e 1,60 cm, foi a que possuiu um maior percentual de participação na composição da biomassa estudada (44,19%).

**Tabela 2.** Composição Granulométrica da biomassa estudada.

<b>Faixa Granulométrica (cm)</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
$X_0 < 0,28$	34,79
$0,28 < X_1 < 0,475$	18,62
$0,475 < X_2 < 1,60$	44,19
$X_3 > 1,60$	2,4

Como a faixa acima de 1,60 cm ( $X_3$ ) mostrou ter uma reduzida participação na composição da biomassa, representando apenas 2,4% de sua composição, e a faixa abaixo de 0,28 cm ( $X_0$ ) trata-se de partículas com tamanho bastante reduzido, já sendo possível a sua utilização direta nos reatores de gaseificação, as mesmas não foram tratadas através da torrefação e nem passaram pelo processo de fluidização. Portanto, optou-se tratar através da torrefação as faixas granulométricas  $X_1$ ,  $X_2$  e a mistura da biomassa (M) contendo todas as faixas granulométricas citadas acima ( $X_0$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ).

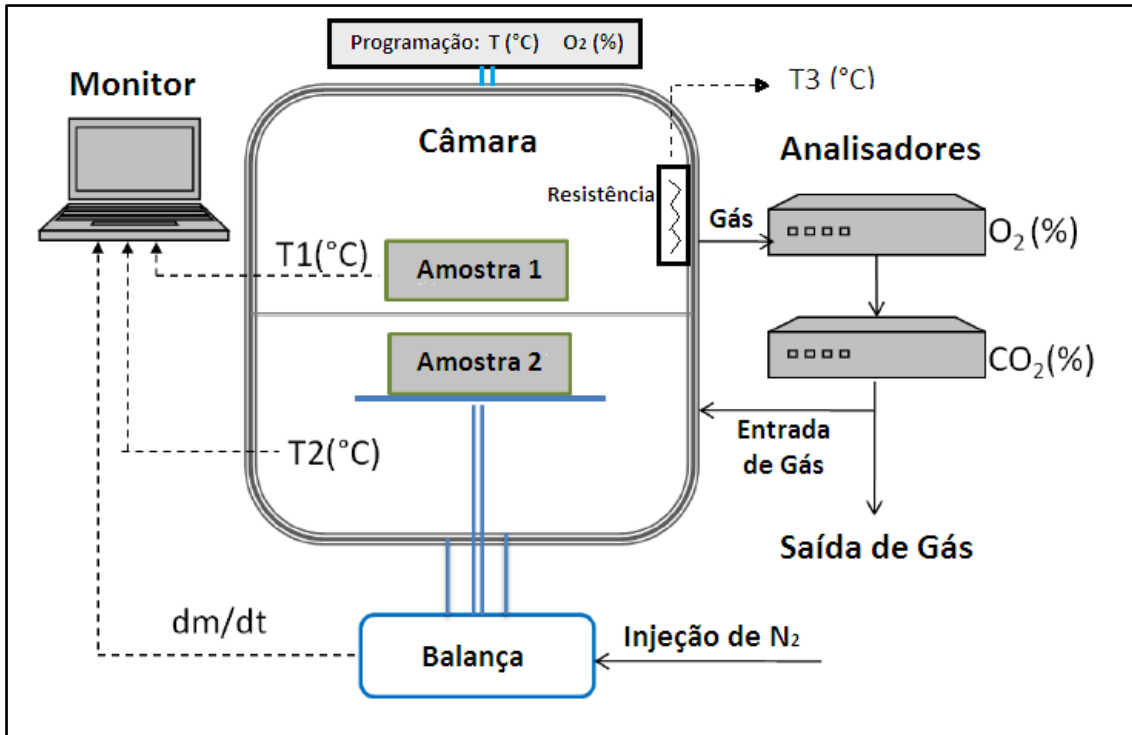
Após a classificação, as amostras foram secas em estufa a 102° C por 24 horas.

### **3.3. Ensaios de Torrefação**

Após secas, as amostras foram torrificadas em três temperaturas distintas: 210°C, 240°C e 270°C.

A torrefação foi realizada em um reator em escala laboratorial (figura 1), tal como o descrito em Rodrigues & Rousset (2009). Ligado ao reator há:

- uma balança de precisão de  $10^{-2}$  gramas através da qual se obtém dados referentes à perda de massa durante a torrefação;
- um balão de nitrogênio, garantindo que a torrefação ocorra em um ambiente inerte ou com reduzido teor de oxigênio;
- um leitor de gases que indica a concentração de oxigênio dentro do reator e a relação entre monóxido e dióxido de carbono (CO e CO<sub>2</sub>);
- termopares que indicam a temperatura dentro da atmosfera do reator, a temperatura no interior da biomassa e a temperatura da resistência do reator;
- um painel de controle, onde é possível acompanhar os valores de temperatura e teor de oxigênio programados e os valores atuais durante o ensaio;
- um conversor entre o computador e outros componentes;
- e um computador, onde através do software “Torrefação” é realizada a coleta e o processamento dos dados.



**Figura 1.** Esquema demonstrativo do equipamento utilizado para a realização dos ensaios de torrefação. (Adaptado de Rousset *et al*, no prelo 2012b).

Em todos os tratamentos foi utilizada uma taxa de aquecimento de 1,5°C/min e um tempo de residência de 15 minutos após o alcance da temperatura desejada para a torrefação. O teor máximo de oxigênio dentro do reator foi de 5%. Após o término do tempo de residência, programou-se o reator para o resfriamento das amostras até 150°C, numa taxa de 2°C/min.

### 3.4. Determinação do Poder Calorífico

Foi determinado o poder calorífico superior (PCS) de amostras torrificadas em cada temperatura (210°C, 240°C e 270°C) e para uma testemunha (amostra de biomassa não torrificada). O poder calorífico foi calculado conforme a norma ABNT NBR 8633/84, utilizando-se uma bomba calorimétrica modelo PARR 1261. A fração da amostra com granulometria abaixo de 60 MESH foi a utilizada para essa determinação.

### 3.5. Ensaios de Fluidização

Após a torrefação, as amostras passaram por um processo de fluidização, com 2 repetições em cada tratamento. Optou-se por esse número de repetições devido à quantidade

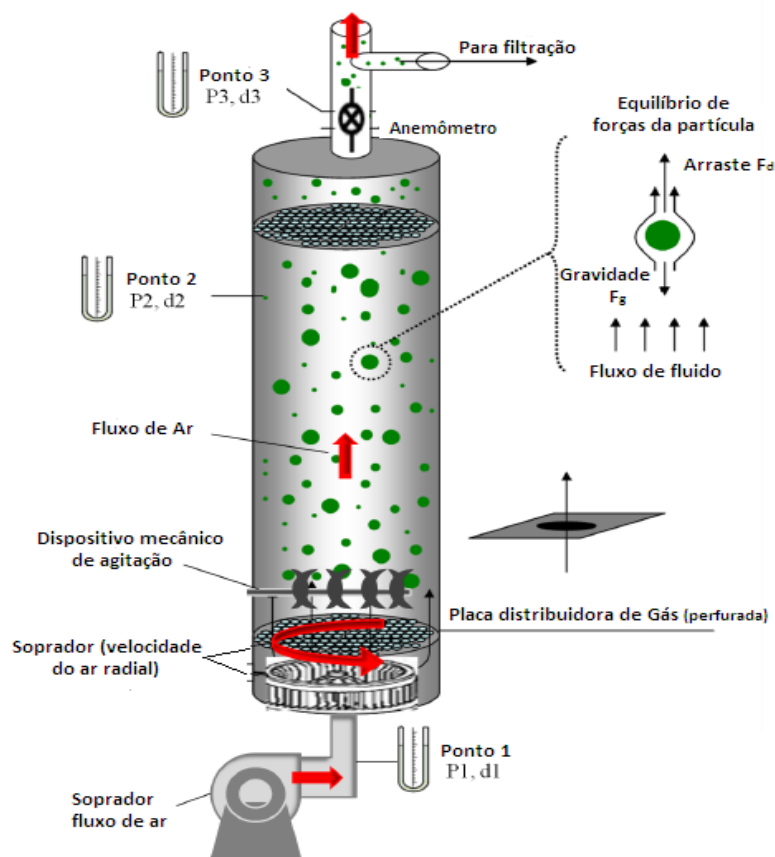
de biomassa disponível para os ensaios. Além da biomassa torrificada em cada temperatura (210°C, 240°C e 270°C), também passaram pelo processo de fluidização amostras sem o tratamento da torrefação, compondo as amostras testemunhas.

Os ensaios de fluidização foram realizados em um reator em escala laboratorial (figura 2), composto por uma coluna de flexiglass, com comprimento aproximado de 750 mm e diâmetro interno de 150 mm. As amostras de biomassa foram colocadas nessa coluna, formando um leito de 10 cm de altura.

A coluna apresentava filtros acoplados tanto em seu topo, como no fundo, onde foram ligados dutos flexíveis que promoviam o fluxo de ar gerado por um motor elétrico, com frequência entre 0 e 66 Hz . A saída de ar foi controlada por um inversor de frequência, da WEG, modelo CFW 08.

A velocidade do fluxo de ar e a temperatura dentro da coluna foram medidas por um anemômetro ITAN 720, da Instrutemp, localizado na saída de ar do reator (parte superior).

No fundo do reator, foi instalado um mecanismo de agitação com o intuito de aumentar a eficiência da fluidização.



**Figura 2.** Esquema demonstrativo do equipamento utilizado para a realização dos ensaios de fluidização. (Adaptado de Rouset *et al*, no prelo 2012a).



A intensidade do fluxo de ar no reator foi alterada à medida que se alterava a frequência do motor, sendo que esta variou de 0 a 66 Hz, num intervalo de 3 em 3 Hz. A cada alteração, mediu-se a velocidade do fluxo de ar, a temperatura dentro do reator e a pressão parcial e a pressão total dentro do reator.

Tubos flexíveis ligados ao reator foram conectados através de válvulas a um manômetro em U, através do qual foram realizadas as medidas de pressão no reator, sendo essas dadas em mm/H<sub>2</sub>O. O intuito de se medir a pressão foi avaliar a sua queda, ou seja, a perda de carga ao longo do reator, e assim estabelecer uma relação com a velocidade do fluxo de ar no reator. A diferença de pressão parcial no reator foi obtida através do ponto 2 e a diferença de pressão total através dos pontos 1 e 3 (figura 2).

### **3.6. Reclassificação do material**

Depois da fluidização, as amostras de cada tratamento foram novamente classificadas, com o intuito de observar a mudança na composição granulométrica nas amostras tratadas e não tratadas através da torrefação e dessa forma avaliar a influência desse tratamento térmico sobre a friabilidade da biomassa. As duas repetições de cada tratamento foram peneiradas e foi feita uma média da mudança granulométrica para cada tratamento. Foram utilizadas as peneiras já citadas anteriormente.

### **3.7. Análise Estatística**

Os dados encontrados foram analisados através de análises estatísticas.

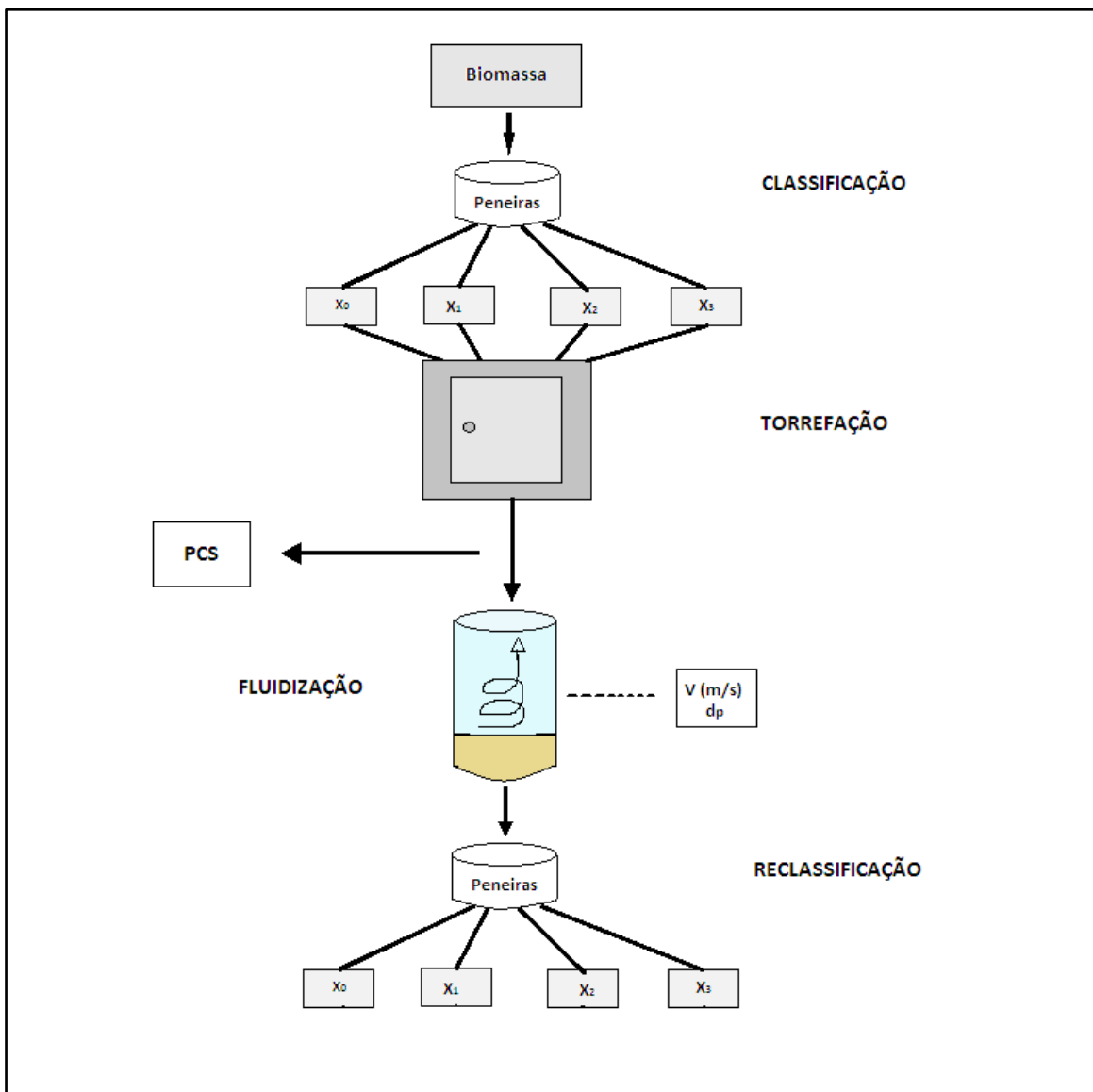
Foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), sendo que sua principal aplicação consiste no teste de comparações múltiplas, cujo objetivo é verificar se os parâmetros para as várias categorias de um fator diferem significativamente ou não. No caso, foram avaliados os parâmetros para as categorias dos fatores ‘tamanho de partícula’ e ‘temperatura de torrefação’.

Com o intuito de avaliar se houve um impacto apenas da fluidização sobre a granulometria da biomassa, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com os dados de composição granulométrica da mistura da biomassa (M) sem a torrefação, antes e após a fluidização.

Aliado à ANOVA foi aplicado o Teste de Tukey, com o objetivo de comparar as médias dos diferentes tratamentos e verificar quais dessas médias são significativamente diferentes umas das outras.

Para tanto, foi utilizado o software estatístico modular XLSTAT, que se baseia no software Excel para a entrada dos dados e a exibição dos resultados, mas realiza o processamento usando componentes próprios.

A figura 3 resume a metodologia utilizada nesse trabalho.



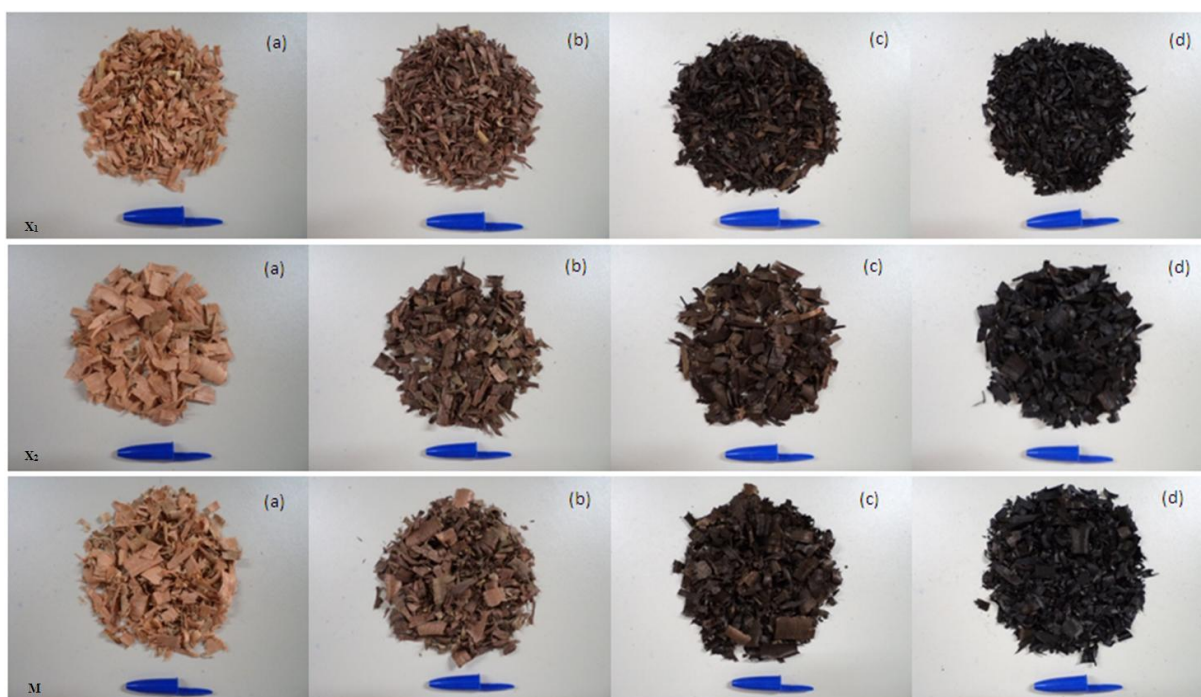
**Figura 3.** Representação sintetizada da metodologia utilizada no presente estudo.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1. Torrefação

Na figura 4 são apresentadas amostras de cada faixa granulométrica e da mistura da biomassa sem a torrefação e amostras torrificadas nas temperaturas de 210°C, 240°C e 270°C. Nota-se que com o aumento da temperatura, tanto nas faixas  $X_1$  e  $X_2$  como na mistura (M), as amostras passam a ter uma coloração mais escura e também apresentam um aspecto mais friável, principalmente nas amostras tratadas a 270°C.

Gouveia (2008) estudando a colorimetria de madeiras tropicais tratadas termicamente encontrou que mesmo quando submetidas a tratamentos térmicos brandos, as madeiras sofrem escurecimento da cor original. Ele afirma que quanto maior foi a temperatura do tratamento térmico, maior a degradação e mais escuras as madeiras ficaram.



**Figura 4.** Amostras das faixas granulométricas  $X_1$ ,  $X_2$  e da Mistura da biomassa (M) antes e após a torrefação: a) Sem torrefação; b) 210°C; c) 240°C; d) 270°C.

O rendimento gravimétrico apresentou valores entre 84,62% e 98,47% (tabela 3). Observa-se que para temperaturas mais altas o rendimento é menor devido à maior perda de massa. Tipicamente, a perda de massa durante a torrefação, sob a forma de gases, pode alcançar até 30%, sendo 70% da massa retida no produto sólido (Bioenergy, 2000).

Rodrigues & Rousset (2009) encontraram para a torrefação de eucalipto rendimentos de 96,39%, 88,27% e 80,15% para amostras torrificas a 220°C, 250°C e 280°C, respectivamente. As dimensões das amostras eram de 2x4x8centímetros.

Também é possível observar que para a faixa X<sub>1</sub>, que trata das partículas de menor tamanho (< 0,28 cm), o rendimento gravimétrico na torrefação a 240°C e 270°C foi menor que em X<sub>2</sub> e M, demonstrando então que houve uma maior perda de massa nas partículas menores.

**Tabela 3.** Rendimento gravimétrico da torrefação ( $\gamma$ ) em porcentagem para cada tratamento.

TEMP. / GRAN.	$\gamma X_1$ (%)	$\gamma X_2$ (%)	$\gamma M$ (%)
210°C	98,47	97,86	97,13
240°C	90,17	94,63	95,02
270°C	84,62	88,00	87,14

Observa-se que para a torrefação realizada a 210°C (figura 5), nas faixas granulométricas X<sub>1</sub> e X<sub>2</sub> e na mistura da biomassa (M), a perda de massa foi bastante reduzida, limitando-se entre 2 a 3% aproximadamente.

Como se sabe a madeira é composta principalmente por três polímeros da parede celular: celulose, hemicelulose e lignina. A degradação química da madeira ocorre nesses componentes, e a decomposição térmica dos mesmos ocorre através de uma série de reações químicas aliadas à transferência de massa e calor. Hemiceluloses são os componentes mais instáveis termicamente e são fortemente afetadas pelas reações de degradação e desidratação (TURNER *et al*, 2010).

Chen & Kuo (2011) estudaram o comportamento desses componentes em três níveis de torrefação: suave (230°C), moderada (260°C) e severa (290°C). Eles observaram que a reação de degradação da hemicelulose é fracamente ativada na torrefação leve, sendo mais fortemente ativada na torrefação moderada e severa. A celulose é degradada fortemente na torrefação severa e já a lignina, em todas essas temperaturas apresentou apenas uma reação de degradação leve (tabela 4).

**Tabela 4.** Sensibilidade dos componentes da madeira à torrefação. (Adaptado de Chen & Kuo, 2011)

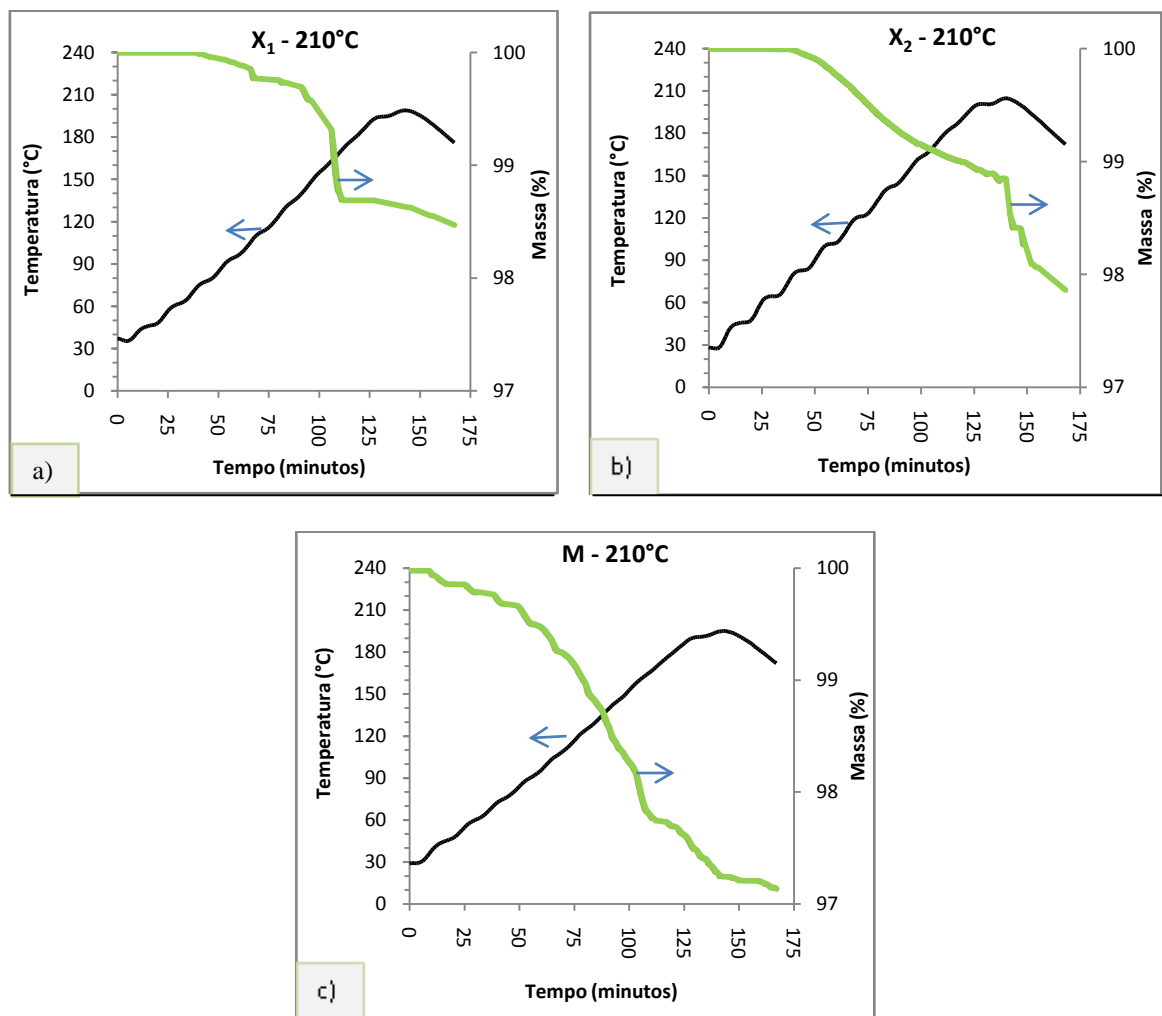
	230°C	260°C	290°C
<b>Hemicelulose</b>	△	○	○
<b>Celulose</b>	△	△	○
<b>Lignina</b>	△	△	△

△ : reação fracamente ativada (perda de massa < 10%)

○ : reação fortemente ativada (perda de massa > 35%)

Rousset *et al* (2009) observaram que as mudanças ocorridas na madeira tratada a 220°C são decorrentes da perda de componentes da hemicelulose. Essa reduzida perda de massa no tratamento realizado a 210°C provavelmente deve-se ao fato de que em temperaturas mais baixas, a degradação dos componentes da madeira, principalmente hemicelulose, está apenas se iniciando.

Já em relação à temperatura na biomassa, em X<sub>2</sub> a temperatura ficou bem próximo do patamar programado para a torrefação (210°C), sem ultrapassar tal limite. Em X<sub>1</sub> e M a temperatura na biomassa alcançou valores entre 195°C e 200°C. (figura 5).

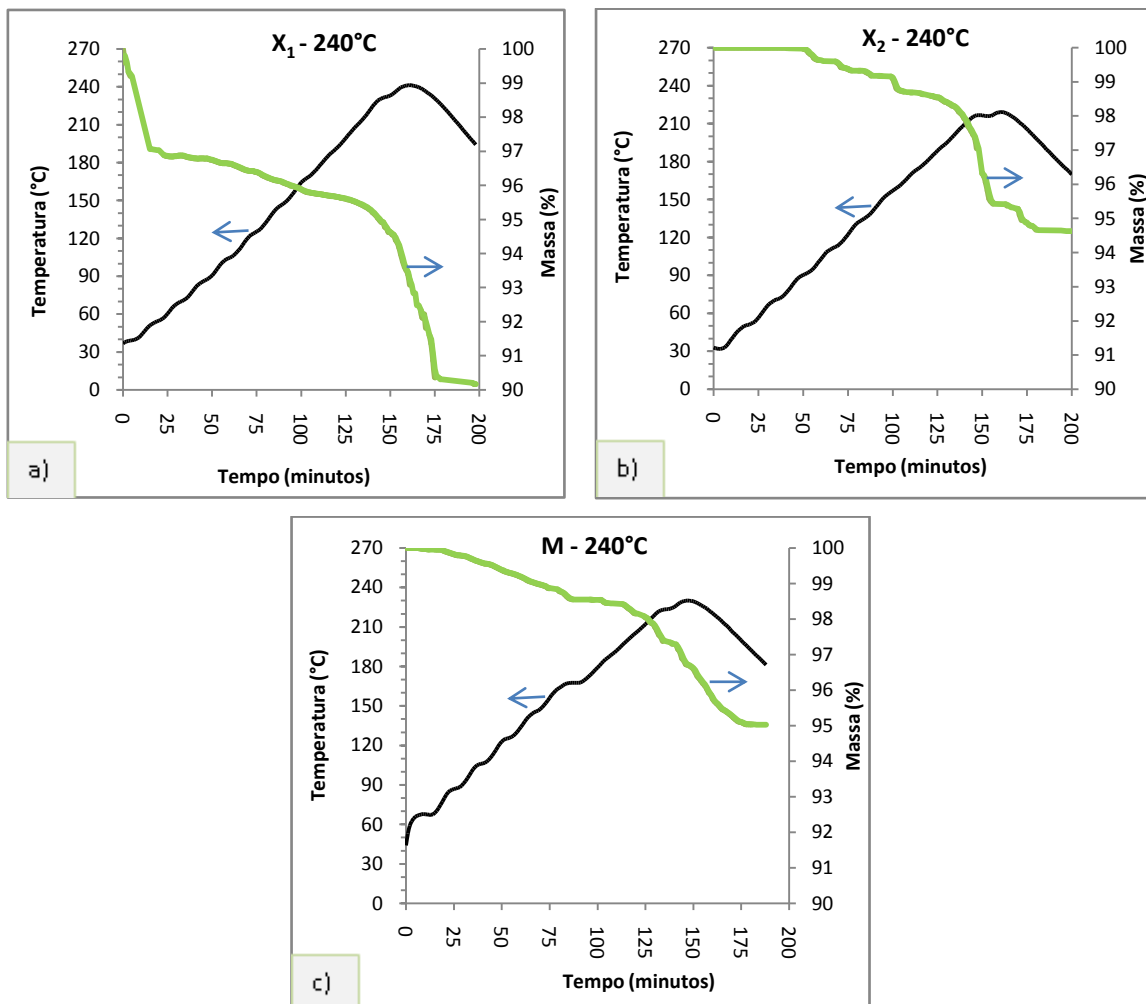


**Figura 5.** Temperatura na biomassa e perda de massa para o tratamento da torrefação a 210°C: a) X<sub>1</sub>; b) X<sub>2</sub>; c) M.

Para a torrefação realizada a 240°C (figura 6), em X<sub>1</sub> a temperatura na biomassa alcançou o patamar programado de 240°C, no entanto para X<sub>2</sub> e M, a temperatura na biomassa alcançou aproximadamente 220°C e 230°C, respectivamente.

Em relação a perda de massa, observa-se que na torrefação realizada a 240°C (figura 6), tanto em X<sub>2</sub> como em M, a perda de massa durante a torrefação foi cerca de 5%. Já para X<sub>1</sub>, a perda de massa durante o processo alcançou o valor aproximado de 10%. Tais valores foram um pouco maiores que na torrefação realizada a 210°C, demonstrando reações de degradação mais intensas.

Observa-se então que nas partículas menores (X<sub>1</sub>) a condução térmica ocorreu de forma mais eficiente em relação a M e X<sub>2</sub>, uma vez que a temperatura na biomassa alcançou o limite programado. É possível então relacionar a maior perda de massa nessa granulometria à condução térmica mais eficiente.



**Figura 6.** Temperatura na biomassa e perda de massa para o tratamento da torrefação a 240°C: a) X<sub>1</sub>; b) X<sub>2</sub>; c) M.

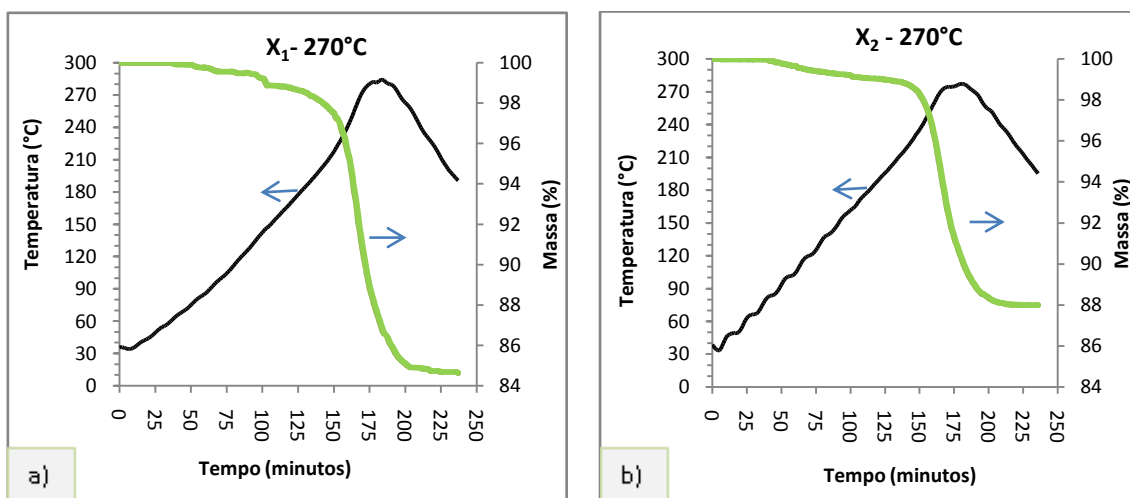
Na figura 7, é possível observar que na torrefação realizada a 270°C, a temperatura na biomassa em M alcançou o limite programado de 270°C, já em X<sub>1</sub> e X<sub>2</sub> a temperatura da biomassa ultrapassou o limite programado, alcançando 284°C e 277°C, respectivamente. Essa

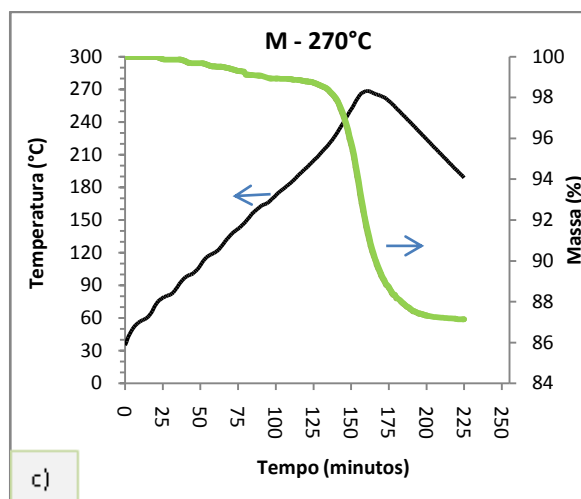
extrapolação pode ser explicada pelo que foi relatado por Luengo, Felfli & Bezzon (2008): “as reações de carbonização podem crescer bruscamente acima de 250°C, com reações fortemente exotérmicas, podendo até mesmo levar à carbonização total do material”. Turner *et al* (2010) através do desenvolvimento de um modelo capaz de captar o comportamento geral da madeira durante seu tratamento térmico, mostraram essa extrapolação do limite de temperatura no tratamento realizado a 250°C devido à ocorrência de reações exotérmicas.

Já a perda de massa a 270°C (figura 7) alcançou valores entre 12 e 15%. É possível observar então que para maiores temperaturas, há também uma maior perda de massa. Essa maior perda de massa resulta da decomposição mais intensa dos componentes da madeira, não se limitando apenas à hemicelulose, mas alcançando também a celulose e posteriormente, mas de forma bem menos intensa, a lignina. Arias *et al* (2008) encontraram para um tempo de residência fixo uma maior perda de massa para temperaturas entre 260 e 280°C que entre 240 e 260°C.

Novamente observa-se que nas partículas menores ( $X_1$ ) a condução térmica ocorreu de forma mais efetiva, alcançando uma temperatura maior que nas outras granulometrias, e dessa forma também apresentou um valor de perda de massa maior.

Observa-se que principalmente para as torrefações realizadas a 240°C e 270° (figuras 6 e 7), o comportamento da mistura (M) em relação à massa foi bem parecido ao de  $X_2$ , o que provavelmente explica-se pelo fato de  $X_2$  ser a faixa com maior percentual de composição da mistura, representando 44,19% da mesma, ou seja, quase metade da composição.





**Figura 7.** Temperatura na biomassa e perda de massa para o tratamento da torrefação a 270°C: a) X<sub>1</sub>; b) X<sub>2</sub>; c) M.

#### 4.2. Poder calorífico

Como encontrado por Arias *et al* (2008) e Rodrigues & Rousset (2009) o poder calorífico das amostras torrificadas foi superior ao da amostra não tratada (tabela 5), o que demonstra que a torrefação melhora as propriedades energéticas da biomassa. Esse aumento do poder calorífico é devido a uma menor razão O/C na biomassa torrificada em relação à biomassa não tratada (BERGMAN *et al*, 2004), à permanência dos voláteis de alto teor energético no produto sólido, uma vez que na torrefação opera-se com temperaturas relativamente baixas (LUENGO, FELFLI & BEZZON, 2008), e também à menor quantidade de água de constituição nas amostras torrificadas.

**Tabela 5.** Poder calorífico superior de amostras sem torrefação e torrificadas a 210°C, 240°C e 270°C.

Amostra	PCS (Kcal/Kg)	Aumento do poder calorífico em relação à amostra testemunha (%)
Testemunha	4.527,55	-
Torrificada a 210°C	4.585,98	1,29
Torrificada a 240°C	4.753,87	5,00
Torrificada a 270°C	5.137,47	13,47

Houve um aumento do poder calorífico com o aumento da temperatura. Comparando o valor encontrado em cada tratamento com a amostra testemunha, observa-se um aumento de 1,29% e de 5% para as amostras tratadas a 210°C e 240°C, respectivamente. A amostra



torrificada a 270°C foi a que apresentou o maior valor de PCS, 5.137,47 Kcal/Kg, representando um aumento de 13,47% em relação a biomassa em estado natural.

Rodrigues & Rousset (2009) avaliando os efeitos da torrefação sobre as propriedades energéticas de *Eucalyptus grandis* encontraram um aumento do PCS em relação à biomassa natural de 3,93%, 9,56%, e 15,74% para amostradas tratadas a 220°C, 250°C e 280°C, respectivamente.

### **4.3. Fluidização**

Durante a realização dos ensaios de fluidização encontrou-se um problema para a medida da velocidade do fluxo de ar através do anemômetro, pois ao realizar o ensaio com partículas menores, houve uma obstrução do anemômetro, não sendo possível obter os dados de velocidade do fluxo de ar. Devido à limitação do tempo para execução do trabalho, não foi possível solucionar tal problema. Mas sugere-se que para ensaios futuros seja instalado um ciclone no equipamento, com o intuito de impedir tal obstrução.

Como não foi possível a obtenção dos dados de velocidade do fluxo de ar e o objetivo de se medir a diferença de pressão no reator era estabelecer uma relação entre tais fatores, não se trabalhou também com os dados de diferença de pressão. Dessa forma, avaliou-se no presente trabalho principalmente a mudança na composição granulométrica em virtude do tratamento da torrefação durante a fluidização.

### **4.4. Reclassificação da Biomassa e Mudança na Composição Granulométrica**

Após a reclassificação da biomassa, observou-se, de modo geral, uma tendência de aumento percentual de partículas com menores dimensões e conseqüentemente, uma diminuição de partículas maiores.

A Análise de Variância (ANOVA) realizada com os dados de composição granulométrica da mistura da biomassa (M) sem a torrefação, antes e após a fluidização, é apresentada na tabela 6. Essa análise foi realizada com a finalidade de avaliar se houve um impacto apenas da fluidização sobre a granulometria da biomassa. A análise de significância estatística pode ser avaliada comparando-se o valor de F calculado com F tabelado, ou mesmo, comparando o valor P com o nível de significância escolhido.

Analisando-se o valor de F, observa-se que apenas em X<sub>3</sub> o valor de F<sub>calc</sub> é maior que F<sub>tab</sub> (161,44), demonstrando o impacto significativo ao nível de 5% da fluidização sobre a granulometria. A partir da análise do valor P, percebe-se que apenas para a porção de X<sub>3</sub> que compõe a Mistura, esse valor é menor que 0,05, o que também demonstra que apenas em X<sub>3</sub> há um impacto significativo da fluidização sobre a granulometria a um nível de significância de 5%. Isso provavelmente é devido ao maior tamanho das partículas de X<sub>3</sub>, ocorrendo a redução das mesmas através da fluidização devido ao atrito das partículas.

**Tabela 6.** Análise de Variância (ANOVA) do impacto da fluidização sobre a granulometria para a Mistura de Biomassa (M) sem a torrefação antes e após a fluidização.

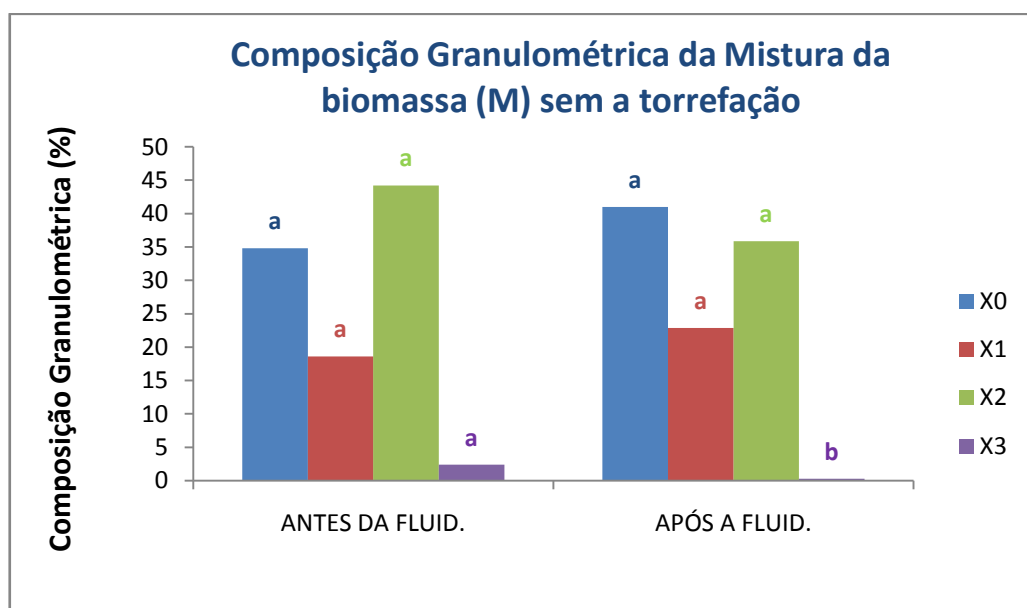
Granulometria	Fonte de Variação	GL	QM	F	Valor P
X <sub>0</sub>	Tratamentos	1	25,50	0,92 ns	0,51 ns
	Resíduo	1	27,60		
X <sub>1</sub>	Tratamentos	1	12,10	3,27 ns	0,32 ns
	Resíduo	1	3,70		
X <sub>2</sub>	Tratamentos	1	46,20	4,39 ns	0,28 ns
	Resíduo	1	10,53		
X <sub>3</sub>	Tratamentos	1	3,00	416,15 *	0,03 *
	Resíduo	1	0,01		

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

F<sub>tab</sub> = 161,44

ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade

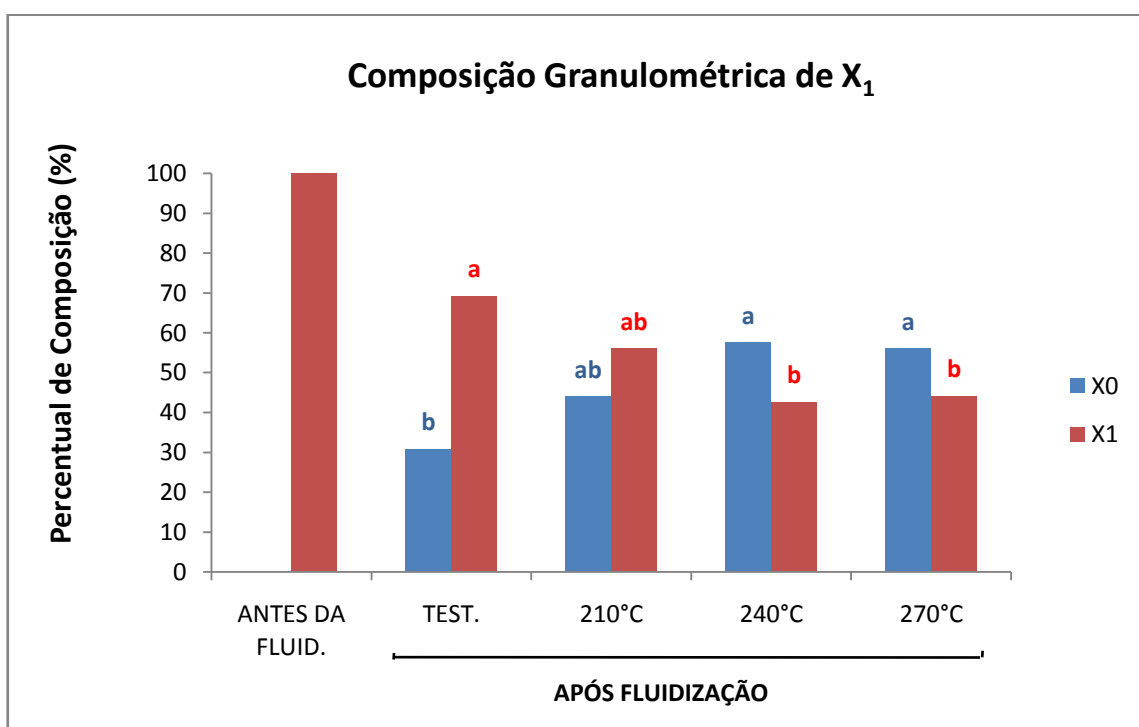
A comparação das médias através do Teste de Tukey (figura 8) também mostra diferença significativa ao nível de 5% para os tratamentos em X<sub>3</sub>, revelando diferença entre a não realização e a realização da fluidização.



**Figura 8.** Mudança granulométrica em M sem a torrefação, antes e após a fluidização. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade.

A figura 9 mostra a composição granulométrica média das amostras de  $X_1$  antes da fluidização e a mudança ocorrida nas mesmas após a fluidização das amostras tratadas em cada temperatura de torrefação, bem como para a amostra testemunha. Previamente à fluidização, as amostras eram compostas em sua totalidade por partículas com dimensões entre 0,28 cm e 0,475 cm ( $X_1$ ), após a fluidização observa-se uma tendência de aumento da faixa  $X_0$ , que antes não aparecia na composição e a 270°C representou 55,95%. Com esse aumento observa-se a conseqüente diminuição de partículas da faixa  $X_1$ , passando de 100% antes da fluidização para 44,05% após a fluidização na torrefação a 270°C. Essa tendência mostra-se diretamente proporcional ao aumento da temperatura de torrefação. Arias et al (2008) também observaram o aumento de partículas menores em amostras lenhosas tratadas através da torrefação.

Phanphanich & Mani (2011) avaliando o impacto da torrefação na friabilidade de resíduos de exploração madeireira e em partículas de pinus, relataram que a torrefação não apenas reduz a energia necessária para a moagem, mas também reduz o tamanho médio das partículas da biomassa. Eles também mostraram que as partículas menores aumentaram à medida que se aumentou a temperatura de torrefação.



**Figura 9.** Composição Granulométrica de amostras de  $X_1$  antes da fluidização e após a fluidização para amostras testemunha e torrificadas. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade.

Essa redução do tamanho das partículas da biomassa com o aumento da temperatura resulta da degradação térmica ocorrida nos componentes da parede celular, principalmente a hemicelulose, deixando assim o material mais friável, o que resulta em partículas com menores dimensões. Li *et al* (no prelo 2012) observaram que para a torrefação de serragem realizada em um reator de leito fluidizado as partículas finas geradas durante a torrefação estão ligadas às mudanças estruturais ocorridas durante a decomposição de lignoceluloses. Eles afirmam que a decomposição da hemicelulose é a responsável pelas mudanças significativas ocorridas nas propriedades químicas, físicas e mecânicas da serragem torrificada, dentre elas a distribuição de tamanho das partículas.

A ANOVA (tabela 7) realizada para os dados de mudança granulométrica para essa faixa ( $X_1$ ) mostra que a temperatura de torrefação tem impacto significativo ao nível de 5% sobre o percentual de composição das faixas granulométricas  $X_0$  e  $X_1$  ( $P < 0,05$  e  $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$ ).

A comparação das médias através do Teste de Tukey (figura 9), mostra que para a mudança de composição granulométrica de  $X_1$ , tanto para as médias de composição da faixa  $X_0$  como para  $X_1$ , o tratamento realizado a 210°C não difere estatisticamente dos demais, porém há diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos realizados a 240°C e 270°C. Observa-se então que nas maiores temperaturas (240°C e 270°C) não há diferença significativa, o que demonstra que a degradação térmica ocorrida nessas temperaturas apresenta comportamento similar.

**Tabela 7.** Análise de Variância (ANOVA) do fator temperatura de torrefação sobre a granulometria em  $X_1$ .

Granulometria	Fonte de Variação	GL	QM	F	Valor P
$X_0$	Tratamentos	3	307,54	13,15 *	0,02 *
	Resíduo	4	23,38		
$X_1$	Tratamentos	3	307,54	13,15 *	0,02 *
	Resíduo	4	23,38		

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

$F_{\text{tab}} = 6,59$

Em relação à composição granulométrica de  $X_2$  (figura 10), as tendências são similares às encontrados para  $X_1$ . Antes da fluidização, as amostras eram compostas por 100%

de partículas entre 0,475 cm e 1,6 cm ( $X_2$ ). Posteriormente à fluidização, observa-se o surgimento de partículas com dimensões tanto da faixa granulométrica  $X_1$  como  $X_0$  (19,23% e 38,7% nas amostras torrificadas a 270°C, respectivamente). Novamente observa-se a tendência de aumento de partículas menores ( $X_0$ ) e de redução (de 100% para 42,07%) de partículas com maiores dimensões ( $X_2$ ) com o aumento da temperatura de torrefação.

Nota-se uma tendência de aumento na porcentagem de composição de  $X_1$  para as amostras torrificadas a 210°C e uma leve redução no percentual de composição para as amostras torrificadas a 240°C e 270°C. Talvez isso possa ser explicado devido ao maior aumento da friabilidade nesses tratamentos, fazendo com que as partículas apresentem uma redução de tamanho ainda maior, deixando de compor  $X_1$  e passando a fazer parte da faixa granulométrica  $X_0$ .

A ANOVA para as mudanças granulométricas ocorridas em  $X_2$  é apresentada na tabela 8. Os valores de P e de F mostram que todas essas faixas granulométricas ( $X_0$ ,  $X_1$  e  $X_2$ ) foram impactadas significativamente pela temperatura de torrefação ao nível de 5% de probabilidade, uma vez que os valores de P foram menores que 0,05 e os de  $F_{calc}$  foram maiores que  $F_{tab}$ .

**Tabela 8.** Análise de Variância (ANOVA) do fator temperatura de torrefação sobre a granulometria em  $X_2$ .

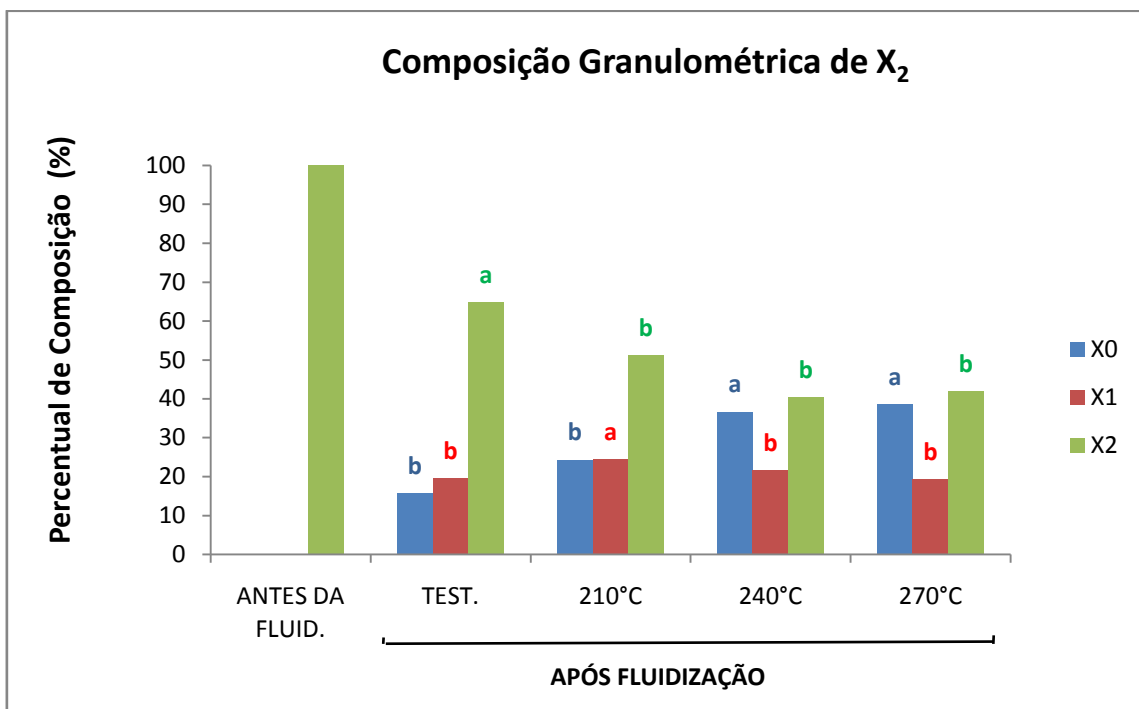
Granulometria	Fonte de Variação	GL	QM	F	Valor P
$X_0$	Tratamentos	3	234,51	44,24 *	0,002 *
	Resíduo	4	5,30		
$X_1$	Tratamentos	3	11,53	17,78 *	0,009 *
	Resíduo	4	0,65		
$X_2$	Tratamentos	3	228,17	38,18 *	0,002 *
	Resíduo	4	5,98		

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

$F_{tab} = 6,59$

O Teste de Tukey (figura 10) mostra que em relação ao percentual de  $X_0$ , as médias encontradas para cada tratamento mostram que não há diferença significativa entre a testemunha e a amostra a 210°C. Também não há diferença estatística entre as amostras a 240°C e 270°C. Sendo assim, percebe-se a diferenciação dos tratamentos em dois grupos, um composto pela testemunha e 210°C e outro pelas temperaturas maiores (240°C e 270°C), o que reforça que a degradação nas maiores temperaturas é similar, sendo também possível

observar que a torrefação realizada a 210°C apresenta semelhança à testemunha, uma vez que a essa temperatura as reações de degradação estão apenas se iniciando, em uma baixa intensidade, restringindo-se em parte à secagem da biomassa.



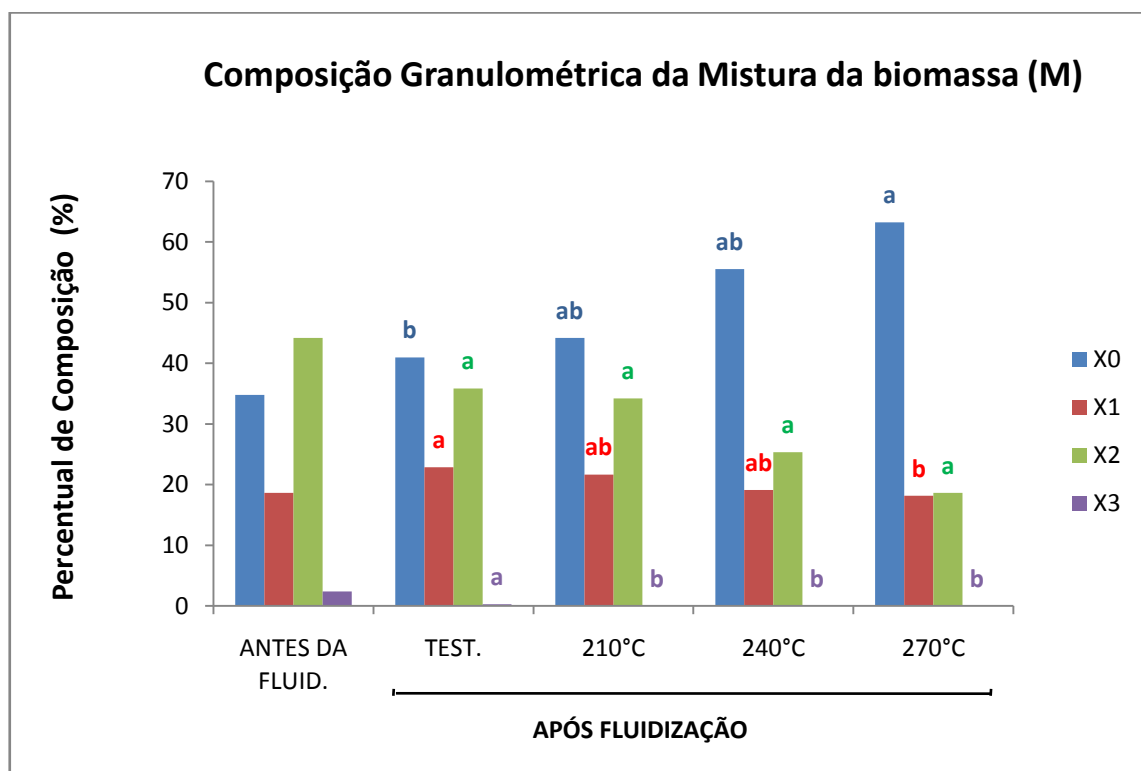
**Figura 10.** Composição Granulométrica de amostras de X<sub>2</sub> antes da fluidização e após a fluidização para amostras testemunha e torreficadas. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade.

Rousset et al (2011) caracterizando a torrefação de madeira de faia através de NIRS, uma tecnologia que permite determinar as quantidades de componentes constituintes na madeira, como celulose, hemicelulose, lignina, dentre outros, encontraram estreita semelhança entre os espectros de amostras controle (não tratadas) e de amostras tratadas a 220°C por 1 hora, o que segundo eles sugere que tal tratamento tem relativamente poucas conseqüências para a constituição química da madeira.

Na mistura da biomassa (M), observa-se as mesmas tendências (figura 11). Antes da fluidização a mistura era composta em sua maioria por partículas pertencentes à faixa X<sub>2</sub> (44,19%). Após a fluidização observa-se a tendência de redução de tais partículas (18,63% em 270°C) e de aumento de partículas de X<sub>0</sub>, passando a apresentar o maior percentual de composição granulométrica das amostras (40,98%, 44,16%, 55,53% e 63,23%, para as amostras testemunha, 210°C, 240°C e 270°C, respectivamente). A faixa X<sub>3</sub> que já apresentava um baixo percentual de composição antes da fluidização (2,4%), passou a representar 0,28%

da composição das amostras testemunhas e para as amostras torrificadas não foram encontradas partículas representativas de tal faixa.

A faixa X<sub>1</sub> apresentou o mesmo comportamento relatado anteriormente, apresentando uma tendência de redução proporcional à temperatura para as amostras torrificadas, devido provavelmente ao maior aumento da friabilidade, resultando assim no aumento de partículas ainda menores (X<sub>0</sub>).



**Figura 11.** Composição Granulométrica de amostras de M antes da fluidização e após a fluidização para amostras testemunha e torrificadas. Médias com a mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade.

A análise de variância (tabela 9) mostra que para a mudança granulométrica ocorrida em M, a porcentagem de X<sub>2</sub> não foi influenciada significativamente pela temperatura de torrefação ao nível de 5% de significância, uma vez que apresentou um valor de P maior que 0,05 e  $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$ . Já o percentual das demais faixas foi sim afetado significativamente pela temperatura de torrefação, pois o valor P de tais faixas foi menor que 0,05, bem como o de  $F_{\text{calc}}$  maior que o de  $F_{\text{tab}}$ .

**Tabela 9.** Análise de Variância (ANOVA) do fator temperatura de torrefação sobre granulometria em M.

Granulometria	Fonte de Variação	GL	QM	F	Valor P
<b>X0</b>	Tratamentos	3	211,47	7,27 *	0,04 *
	Resíduo	4	29,08		
<b>X1</b>	Tratamentos	3	9,61	7,25 *	0,04 *
	Resíduo	4	1,33		
<b>X2</b>	Tratamentos	3	129,29	5,31 ns	0,07 ns
	Resíduo	4	24,33		
<b>X3</b>	Tratamentos	3	0,04	21,78 *	0,01 *
	Resíduo	4	0,00		

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

$F_{tab} = 6,59$

ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade

A comparação das médias dos diferentes tratamentos (figura 13) mostra que em relação ao percentual de composição de  $X_0$  e de  $X_1$  na mistura da biomassa há diferença significativa apenas entre a testemunha e o tratamento realizado a 270°C. Em relação à percentagem de  $X_3$  há diferença significativa entre a não realização do tratamento da torrefação (testemunha) e o tratamento realizado em qualquer uma das três temperaturas.

## 5. CONCLUSÕES

A torrefação como tratamento térmico da madeira possibilita a geração de um produto com melhores características energéticas, sendo isso observado através do aumento do poder calorífico com o aumento da intensidade térmica do tratamento. Foi possível observar que há um impacto desse tratamento sobre a friabilidade da biomassa, uma vez que houve o aumento de partículas menores nas amostras torrificadas, também sendo possível observar uma relação direta com a intensidade térmica do tratamento. Esse impacto se dá através da degradação térmica dos elementos constituintes da madeira. É possível observar que para temperaturas mais baixas, como a de 210°C utilizada nesse trabalho, essa degradação é bastante reduzida, o que é demonstrado pelos baixos valores de perda de massa nesse tratamento.

Diante disso, a torrefação aparece como uma forma de facilitar a moagem da biomassa, uma vez que aumenta a sua friabilidade, possibilitando a sua utilização em equipamentos que demandam partículas com tamanho bastante reduzido, como gaseificadores por exemplo.

Para estudo futuros sugere-se a análise do modelo de fluidização, com o controle dos parâmetros do processo, uma vez que o mesmo também contribui para a redução do tamanho



das partículas através do atrito que ocorre entre elas e é um processo que vem sendo utilizado de forma conjunta com outros, tais como a pirólise e a gaseificação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. Z.; HUSAIN, Z.; YIN PONG, S. L. **Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels.** Biomass and Bioenergy, v. 24, p. 487 – 494, 2003.

ARIAS, B.; Pevida, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M. G.; RUBIERA, F.; PIS, J. J. **Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass.** Fuel Processing Technology, v. 89, p. 169-175, 2008.

BERGMAN, P. C. A.; KIEL, J. H. A. **Torrefaction for biomass upgrading.** Published at 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France, p. 17-21, October 2005.

BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R. ; KIEL J. H. A.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN; F. J. J. G. **Torrefaction for entrained flow gasification of biomass.** In: Contributions ENC Biomass to “The 2<sup>nd</sup> World Conference and Thecnology Exhibition on Biomass for Energy. Rome, Italy, May 10-14, 2004. p. 78-82.

BIONERGY. **“A new process for Torrefied wood manufacturing”.** General bioenergy, vol. 2, n.4. Abril de 2000, in:  
<[https://www.bioenergyupdate.com/magazine/security/NL0400/bioenergy\\_update\\_april\\_2000.htm](https://www.bioenergyupdate.com/magazine/security/NL0400/bioenergy_update_april_2000.htm)>

BRIDGEMAN, T.G.; JONES, J.M; WILLIAMS, A.; WALDRON, D.J. **An investigation of the grindability of two torrefied energy crops.** Fuel, v. 89, p. 3911–3918, 2010.

BRITO, J. O. **O Uso Energético da Madeira.** Estudos Avançados, v. 21, n.59. São Paulo, abril 2007.

CHASE, G. **Fluidization**, in: Lecture Notes  
<<http://coel.ecgf.uakron.edu/~chem/fclty/chase/SolidsNotes5.PDF>>, University of Akron, 2001

CHEN, W-H. ; KUO, P-C. **Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass.** Energy, v. 36, p. 803 – 811, 2011.

CIOLKOSZ, D.; WALLACE, R. **A review of torrefaction for bioenergy feedstock production.** Biofuels, Bioproducts & Biorefining, v. 5, p. 317-329, 2011.

CUI, H.; GRACE, J. R. **Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow spectra.** Chemical Engineering Science, v. 62, p. 45 – 55, 2007.

FERRO, D. T.; VIGOUROUX, V.; GRIMM, A.; ZANZI, R. **Torrefaction of agricultural and forest residues**. Cubasolar 2004, April 12-16, 2004, Guantánamo, Cuba, 2004.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p, 2008.

LI, H.; LIU, X.; LEGROS, R.; BI, T. X.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. **Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor**. Bioresource Technology, v. 103, p.453–458, no prelo 2012.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. E. F.; BEZZON, G. **Pirólise e Torrefação da biomassa**. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E.; GÓMEZ, E. O. “Biomassa para energia”. Campinas, SP. Editora da UNICAMP, 2008.

NITZ, M.; GUARDANI, R. **Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços**, in: Instituto Mauá de Tecnologia, <http://www.maua.br/imprensa/artigos>

PHANPHANICH, M.; MANI, S. **Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass**. Bioresource Technology, n.102, p. 1246–1253, 2011.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPGEFL.DM-109/2009, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 p, 2009.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. L. A. **Effects of Torrefaction on Energy Properties of *Eucalyptus grandis* Wood**. Cerne, Lavras, v. 15, n. 4, p. 446-452, out./dez. 2009.

ROUSSET P. L. A; LAPIERRE, C.; POLLET, B.; QUIRINO, W. F.; PERRÉ P. **Effect of severe thermal treatment on spruce and beech wood lignins**. Annals of forest science, v. 66, p. 110p1-110p8, 2009.

ROUSSET, P. L. A.; DAVRIEUX, F.; MACEDO, L.; PERRE, P. **Characterization of the torrefaction of beech wood using NIRS: Combined effects of temperature and duration**. Biomass and Bioenergy, v. 35, p. 1219 – 1226, 2011.

ROUSSET, P. L. A.; PETITHUGUENIN, T.; RODRIGUES, T. O.; AZEVEDO, A. C. **The Fluidization Behaviour of Torrefied Biomass in a Cold Model**. Fuel. No prelo 2012.

ROUSSET, P. L. A; MACEDO, L; JEAN-MICHEL, C.; MOREIRA, A. **Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. No prelo 2012.

TURNER, I.; ROUSSET, P.; RÉMOND, R.; PERRÉ, P. **An experimental and theoretical investigation of the thermal treatment of wood (*Fagus sylvatica* L.) in the range 200-260°C**. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, n. 4, p. 715-725, 2010.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER ,H.; KIEL , J. H. A.; PTASINSKI , K. J.  
**Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review.** Biomass and Bioenergy, v. 35, p. 3748 – 3762, 2011.