

## **Caracterização de resíduos gerados na colheita e no beneficiamento da macieira para fins energéticos em leitos fluidizados polidispersos**

### **Characterization of residues generated in the harvest and processing of pomiculture for energy purposes in polydispersed fluidized beds**

**Vitória Sgorla<sup>a</sup>, Leandro Gomes<sup>b</sup>, Fabiano Simões<sup>c</sup>, Paulo Eichler<sup>d</sup>, Guilherme de Souza<sup>e</sup>,  
Flávia Zinani<sup>f</sup>, Fernando Santos<sup>c</sup>**

vitoria\_sgdasilva@hotmail.com, leandrogomesfsc@gmail.com, simoes.f@gmail.com, pauloeichler@hotmail.com,  
guidesouza@gmail.com, fzinani@unisinis.br, fernandoasantos7@gmail.com

<sup>a</sup>Universidade de Caxias do Sul – UCS, Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Caxias do Sul – RS, Brasil

<sup>b</sup>Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa - FCT/UNL, Caparica, Portugal

<sup>c</sup>Universidade Estadual do Rio Grande – UERGS, Rua 7 de Setembro, 1156, Porto Alegre – RS, Brasil

<sup>d</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre – RS, Brasil

<sup>e</sup>Governo do Estado do Rio Grande do Sul - Secretaria de Minas e Energia, Av. Borges de Medeiros, 1501, Porto Alegre – RS, Brasil

<sup>f</sup>Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Av. Unisinis, 950, São Leopoldo – RS, Brasil

#### **Resumo**

O Brasil é destaque na produção mundial de frutas, ficando atrás apenas da China e da Índia. Laranja, banana e maçã são as frutas mais cultivadas nacionalmente. Segundo Food and Agriculture Organization (2012), maçã é a segunda fruta mais consumida in natura no mundo. A produção de maçã gera uma grande quantidade de resíduos, do pomar à armazenagem, e na indústria de processamento. A poda é a etapa da produção em que mais se gera resíduo, podendo ser estimado uma média de 5 ton/ha de resíduo de madeira. Na etapa de classificação e armazenagem, as frutas que não se enquadram nas categorias comerciais são destinadas a indústria de processamento, onde, após o beneficiamento, tem-se como resíduo o bagaço. Visto o grande potencial energético desses resíduos é interessante o estudo de sua utilização em processos de biorrefinaria. O objetivo desse estudo é investigar o potencial uso dos resíduos da pomicultura (galhos, folhas e maçã de descarte) em processos de biorrefinaria para fins energéticos. Para isso, as amostras de resíduos foram caracterizadas quanto as suas propriedades termoquímicas e termogravimétricas, e testadas em equipamento

#### **Abstract**

Brazil is prominent in world fruit production, behind only China and India. Orange, banana and apple are the most cultivated fruits nationally. According to the Food and Agriculture Organization (2012), apple is the second most consumed fruit in natura in the world. Apple production generates a large amount of waste, from the orchard to storage, and in the processing industry. Pruning is the stage of production in which more waste is generated, and an average of 5 tons / ha of wood residue can be estimated. In the classification and storage stage, fruits that do not fall into the commercial categories are destined to the processing industry, where, after the processing, the residue is the bagasse. Considering the great energetic potential of these residues, it is interesting to study their use in biorefinery processes. The objective of this study is to investigate the potential use of the residues of the pomiculture (branches, leaves and apple of discard) in processes of biorrefinaria for energetic purposes. For this, the residue samples were characterized for their thermochemical and thermogravimetric properties, and were tested in laboratory scale fluidization equipment. The upper calorific value for apple tree branch, apple leaf and discard was 18,427 MJ / kg, 19,900 MJ / kg and 16,501 MJ / kg,

de fluidização em escala laboratorial. O poder calorífico superior para o galho de macieira, folha de macieira e maçã de descarte foi de 18,427 MJ/kg, 19,900 MJ/kg e 16,501 MJ/kg, respectivamente. Nas curvas termogravimétricas, foram observadas as zonas as perdas mássicas relacionadas ao teor de umidade da amostra, a 100°C, referente a degradação da celulose, das hemiceluloses e da lignina, a 230°C, 260°C e 350°C respectivamente. As amostras testadas no leito corresponderam a misturas entre biomassa e areia, utilizada como material inerte. Os percentuais mássicos de biomassa presente nas misturas testadas foram 10%, 30%, 50%, 70% e 90%. Para misturas contendo 10%, 30% e 50% do volume de biomassa, as curvas características de fluidização foram observadas. Na fluidização para misturas com 50% do seu volume composto por biomassa, apesar da formação de caminhos preferenciais, foi possível verificar o fenômeno de fluidização. O que não foi possível verificar Nas misturas contendo um volume de 70-90% de biomassa. Entretanto, nestas misturas, dois casos foram observados: formação de caminhos preferenciais grandes e segregação de partículas. Comparando as características físicas com biomassas de eucalipto e pinus, que fluidizam com misturas de 70% do volume de biomassa, a não fluidização da mistura contendo volume superior a 50% de galhos de macieira pode ser, possivelmente, explicada pela diferença na forma das partículas. Contudo, foi possível concluir que a utilização dos resíduos da produção de maçã apresenta um elevado potencial de uso para fins energéticos em processos de biorrefinaria devido às suas características termoquímicas. No entanto, verifica-se a necessidade de realização de análises mais precisas para fundamentar os resultados obtidos em relação às frações químicas e energéticas afim de obter maior eficiência e rendimento.

**Palavras-chave:** Aproveitamento integral. Potencial energético. Caracterização química. Biorrefinaria.

respectively. In the thermogravimetric curves, the zones were observed the mass losses related to the moisture content of the sample, at 100 ° C, related to degradation of cellulose, hemicelluloses and lignin, at 230 ° C, 260 ° C and 350 ° C respectively. The samples tested in the bed corresponded to mixtures between biomass and sand, used as an inert material. The biomass mass percentages present in the tested mixtures were 10%, 30%, 50%, 70% and 90%. For mixtures containing 10%, 30% and 50% of the biomass volume, the fluidization characteristic curves were observed. In fluidization for mixtures with 50% of its volume composed of biomass, despite the formation of preferred paths, it was possible to verify the fluidization phenomenon. What was not possible to verify In the mixtures containing a volume of 70-90% of biomass. However, in these mixtures, two cases were observed: formation of large preferential paths and segregation of particles. Comparing the physical characteristics with eucalyptus and pinus biomasses, which fluidize with mixtures of 70% of the biomass volume, the non-fluidization of the mixture containing a volume greater than 50% of apple tree branches may possibly be explained by the difference in the shape of the particles . However, it was possible to conclude that the use of waste from apple production has a high potential for energy use in biorefinery processes due to its thermochemical characteristics. However, it is necessary to carry out more precise analyzes to base the results obtained in relation to chemical and energy fractions in order to obtain greater efficiency and yield.

**Keywords:** Integral use. Potential energy. Chemical characterization. Biorefinery.

## **Introdução**

O Brasil é destaque na produção mundial de frutas, ficando atrás apenas da China e da Índia. Laranja, banana e maçã são as frutas mais cultivadas nacionalmente. Segundo Food and Agriculture Organization (2012), maçã é a segunda fruta mais consumida in natura no mundo. A produção de maçã gera uma grande quantidade de resíduos, do pomar à armazenagem, e na indústria de processamento. A poda é a etapa da produção em que mais se gera resíduo, podendo ser estimado uma média de 5 ton/ha de resíduo de madeira. Na etapa de classificação e armazenagem, as frutas que não se enquadram nas categorias comerciais são destinadas a indústria de processamento, onde, após o beneficiamento, tem-se como resíduo o bagaço. Visto o grande potencial energético desses resíduos é interessante o estudo de sua utilização em processos de biorrefinaria.

No Brasil, a produção nacional de frutas é de grande relevância, já que o país ocupa a terceira colocação no ranking de maior produtor mundial, produzindo cerca de 43,6 milhões de toneladas anualmente, ficando atrás apenas da China (137,06 milhões de toneladas) e Índia (71,7 milhões de toneladas). As frutas mais cultivadas nacionalmente são laranja, banana e maçã, sendo que esta última é segunda fruta mais consumida in natura no mundo (MU & BEL, 2018). Estima-se que a produção mundial de maçã é de cerca de 80,8 milhões de toneladas por ano e é liderada pela China com produção de 39,5 milhões de toneladas (WILLIEMS, LOW, 2018). A produção de maçã anual do Brasil é de cerca de 1,2 milhão de toneladas, ocupando a décima segunda colocação (FAO, 2012).

Com essa grande produção da fruta no Brasil, tem-se, também, uma grande geração de resíduos provenientes da poda (folhas e galhos) e maçãs que não se enquadram na classificação comercial, que são descartados sem nenhum aproveitamento. Tendo em vista a demanda por materiais de origem renovável, é fundamental que se desenvolvam produtos que sejam sustentáveis e que não prejudiquem o meio ambiente (HUANG et al., 2013; SINGH et al., 2015).

Buscando gerar energia e produtos com menor impacto ambiental, a utilização de resíduos agrícolas se mostra uma excelente opção. Uma das alternativas de aproveitamento destes resíduos é a gaseificação através de um reator de leito fluidizado,

gerando assim gás de síntese e calor que poderá ser utilizado para gerar eletricidade (PÉREZ et al., 2017). Devido à forma irregular das partículas bem como a de seu diâmetro médio, faz-se necessário a adição de um material inerte na biomassa formando assim, uma mistura binária, tornando possível a utilização da mesma em um reator de leito fluidizado (OLIVEIRA, 2012; HABL et al., 2017).

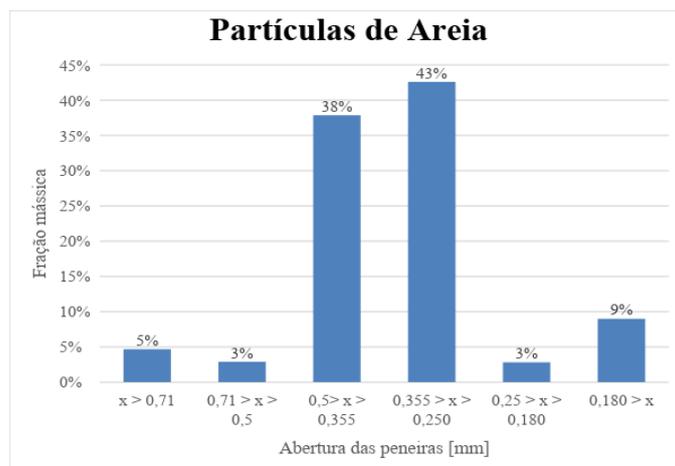
O objetivo do presente trabalho foi caracterizar e avaliar o potencial energético de diferentes resíduos obtidos da colheita e no beneficiamento da macieira para fluidização em leitos polidispersos.

## **Metodologia**

As matérias-primas utilizadas nos experimentos foram provenientes da colheita (galhos e folhas) e do beneficiamento da macieira (descartes - frutos não comerciais) da variedade fuji. As amostras foram colhidas em um pomar comercial de macieira, localizado no município de Vacaria/RS.

As biomassas coletadas foram colocadas em uma estufa a 105°C por um período de 8h, para a retirada de umidade. Após a secagem das biomassas foi utilizado, no laboratório de caracterização e valorização de materiais (LCVMAT), o moinho de facas da marca SEIBT, modelo MGHS 270 A, possibilitando que a biomassa tivesse seu tamanho reduzido, utilizando uma peneira com abertura de 4mm<sup>2</sup>.

A areia foi adquirida em uma loja de materiais de construção, sendo do tipo comumente utilizado na construção civil. As peneiras utilizadas são da marca Bertel para a determinação da granulometria da areia foram de números 24, 32, 42, 60 e 80, também da série Tyler/Mesh. A curva granulométrica obtida pode ser observada na Figura 1.



**Figura 1.** Curva granulométrica.

A determinação da massa específica real da biomassa via picnometria com gás hélio. O picnômetro utilizado foi da marca Micromeritics, modelo AccuPcy II 13 do LCVMAT.

Na análise citada, uma quantidade conhecida de amostra foi inserida em um compartimento, sendo este então, pressurizado com gás hélio. Espera-se então a estabilização de pressão neste compartimento. Após isso, o gás foi então liberado ao segundo compartimento, de volume conhecido, aferindo-se então, a pressão no segundo compartimento. A massa específica do material analisado no primeiro compartimento foi calculada levando-se em consideração a variação de pressão aferida nos dois compartimentos, ao volume do gás (considerando que os dois compartimentos estão calibrados para comportar o mesmo volume de gás) e a massa da amostra.

Para medição da massa específica aparente do material, mediu-se a massa de material necessária para preencher o leito até a altura (H) de 94mm, sendo este valor também, correspondente ao diâmetro do leito (D). Desta forma, a proporção  $H/D=1$ . O volume contido neste cilindro foi de  $2,60 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , sendo este o volume padrão utilizado no preparo das amostras. A razão obtida entre a massa do material e o seu volume aparente determinou a massa específica aparente do material.

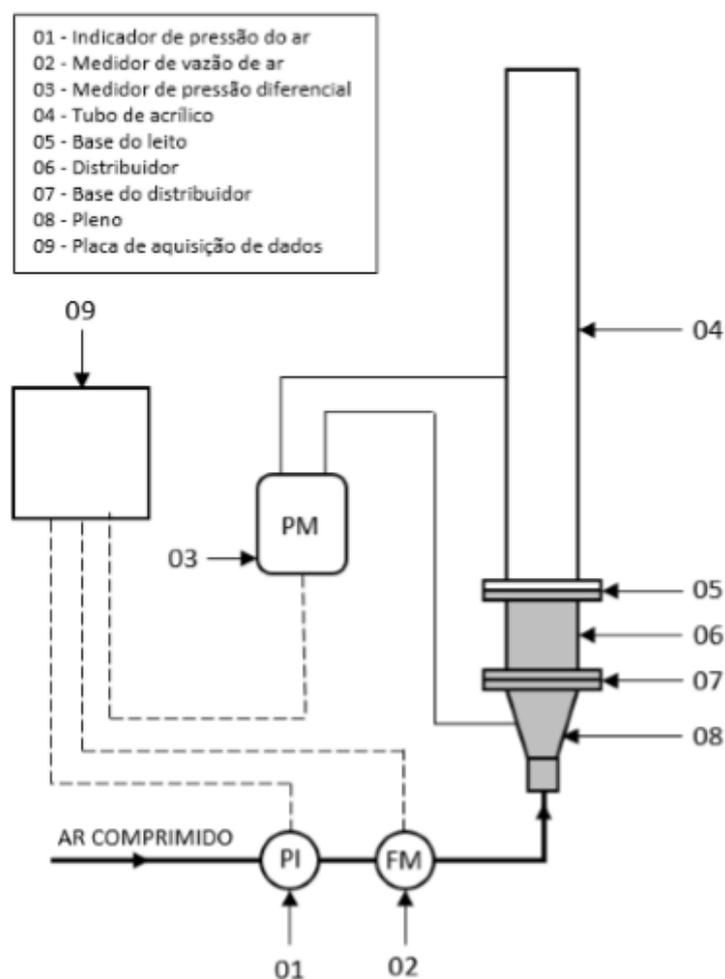
Para estimativa do potencial energético das amostras (galhos, folhas e descartes) foi realizada a determinação do Poder Calorífico Superior em equipamento (referir marca e modelo). Uma bomba calorimétrica foi utilizada para determinação do poder calorífico.

Para a determinação do Poder Calorífico Superior foi utilizada uma bomba calorimétrica Parr, modelo 6300 seguindo o manual do calorímetro. As análises foram

realizadas em duplicata. As análises Termogravimétricas foram realizadas nas amostras (galhos, folhas e descartes) utilizando equipamento modelo SDT Q600 TA Instrument em cadinho de alumina de 90  $\mu$ L com taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}$ C/min. Para as análises de fluidização, utilizou-se a bancada de fluidização, que consiste basicamente em um tubo de acrílico acoplado a medidores de vazão e pressão diferencial e a uma placa de aquisição de dados.

As análises Termogravimétricas foram realizadas nas amostras (galhos, folhas e descartes) utilizando equipamento modelo SDT Q600 TA Instrument. Amostras de folha de macieira de aproximadamente 13,0 g foram aquecidas de 25 a 600  $^{\circ}$ C, em atmosfera de ar e de N<sub>2</sub>, a uma taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}$ C/min. Amostras de galhos de macieira de aproximadamente 20,0 g foram aquecidas de 25 a 900  $^{\circ}$ C, em atmosfera de ar e de N<sub>2</sub>, a uma taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}$ C/min. Amostras de maçã de descarte de aproximadamente 45,0 e 23,0 g, foram aquecidas de 25 a 900  $^{\circ}$ C e 25 a 650  $^{\circ}$ C, em atmosfera de ar e de N<sub>2</sub>, respectivamente, a uma taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}$ C/min.

Os resíduos de maçã (galhos, folhas e descarte) foram secos em uma estufa para a remoção da umidade a uma temperatura de 105  $^{\circ}$ C por um período de 8 horas. Após a secagem, os resíduos foram submetidos a um processo de moagem. Os teores de umidade das amostras foram determinados de acordo com a norma TAPPI T 264 om-88. Utilizou-se a bancada de fluidização do Departamento de Engenharia Mecânica da UNISINOS, que é constituída por um tubo acrílico cilíndrico de diâmetro interno de 94 mm e parede com espessura de 3 mm (Figura 2) para realizar os ensaios de fluidização.



**Figura 2.** Estrutura da bancada de fluidização.  
Fonte: Genehr, (2015).

## Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para Poder Calorífico Superior são apresentados na Tabela 1, juntamente com dados de Poder Calorífico de outras biomassas.

**Tabela 1.** Poder Calorífico de diferentes biomassas.

Biomassas	Poder Calorífico (MJ/kg)	Referências
Galhos de Macieira	18,427	Autores
Folha de Macieira	19,900	Autores
Maçã de Descarte	16,501	Autores
Palha de Milho	17,630	Horst (2013)
Casca de Arroz	15,830	Horst (2013)

Capim-elefante	17,500	Horst (2013)
Palha de Trigo	17,980	Horst (2013)
Fibra de Coco	17,419	Cortez <i>et al</i> (2009)
Casca de Coco	16,746	Cortez <i>et al</i> (2009)
Casca de Banana	18,781	Ferreira <i>et al</i> (2013)
Folha da Bananeira	19,171	Ferreira <i>et al</i> (2013)

Considerando que o poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão de uma quantidade definida (massa) de um material, a análise do poder calorífico das biomassas utilizadas em processos termoquímicos é fundamental (DUPONT *et al.*, 2014; ANCA-COUCÉ, SCHARLER, 2017). No caso específico da gaseificação, onde por vezes, além da geração de gás de síntese se busca a geração de calor para a posterior produção de eletricidade, quanto maior a quantidade de calor gerada maior será a pressão gerada na caldeira, sendo assim, para uma certa quantidade de energia, quanto maior o poder calorífico do material utilizado no recheio do leito, menor a massa de material necessária que a energia seja produzida.

### ***Análise Termogravimétrica***

Nas Figuras 3 a 8 são mostradas as curvas Termogravimétricas obtidas para as amostras de folha de macieira, galhos de macieira e maçã de descarte.

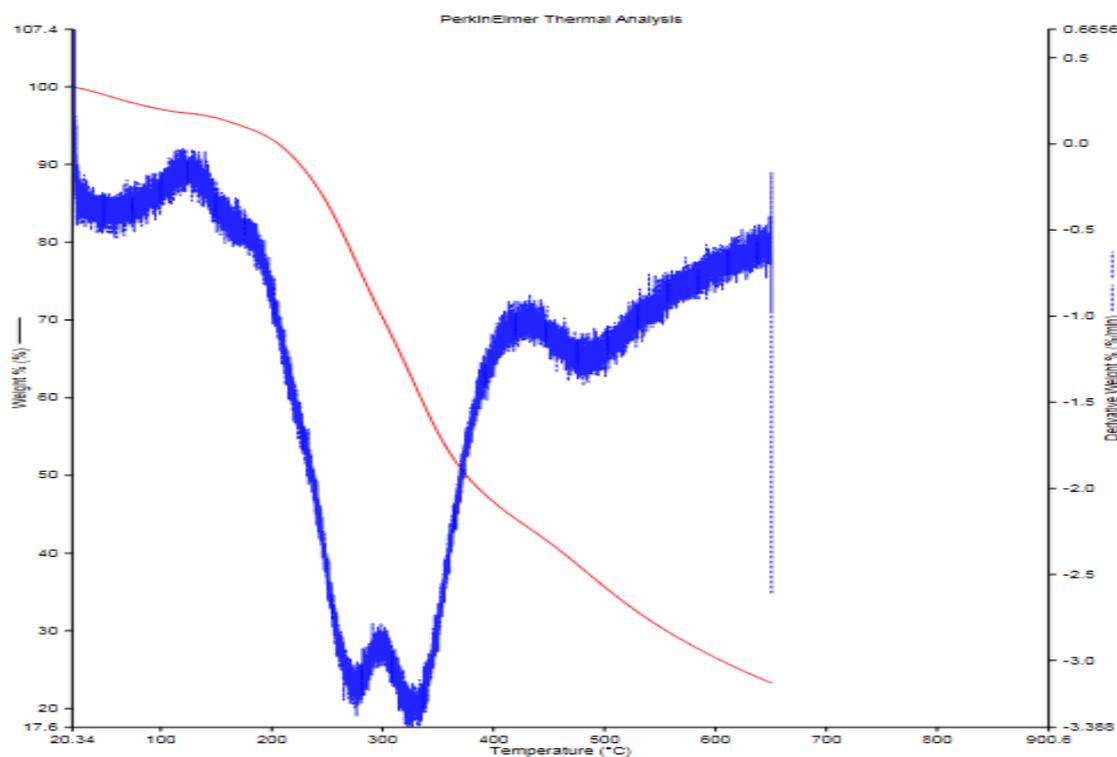


Figura 3. Curvas de TGA para folhas de macieira – atmosfera de ar (25 a 600°C).

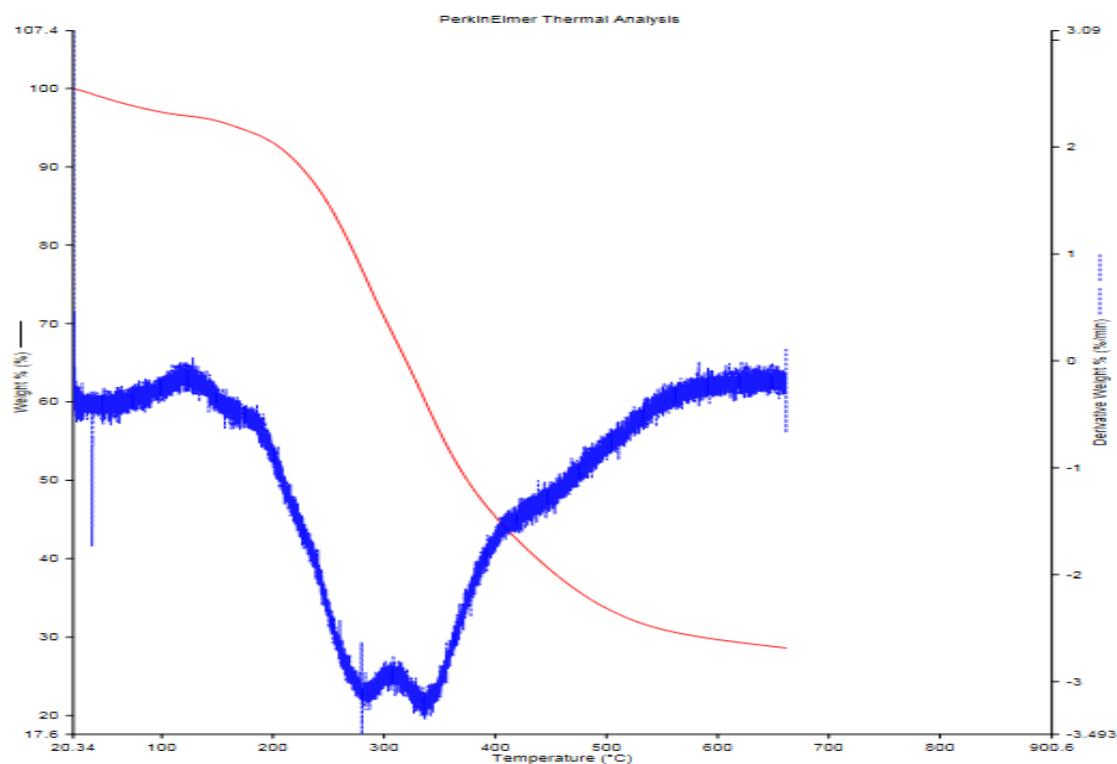


Figura 4. Curvas de TGA para folhas de macieira – atmosfera de N<sub>2</sub> (25 a 600°C).

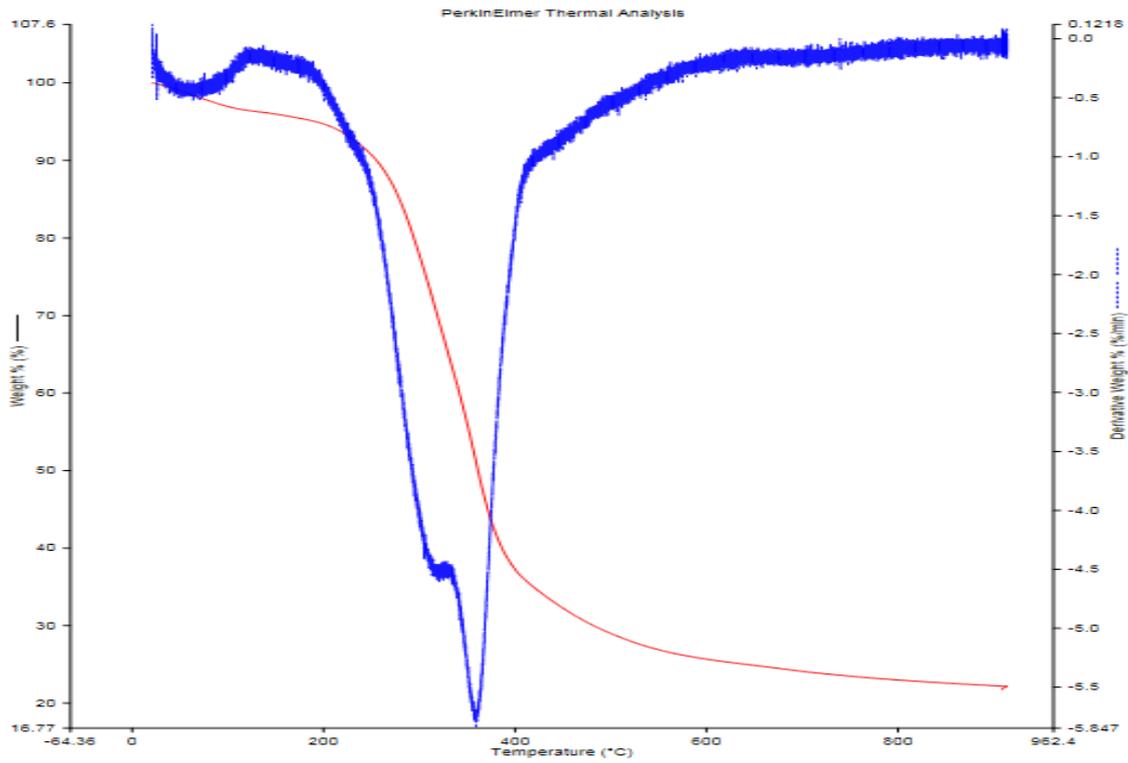


Figura 5. Curvas de TGA para galhos de macieira – atmosfera de ar (25 a 900°C).

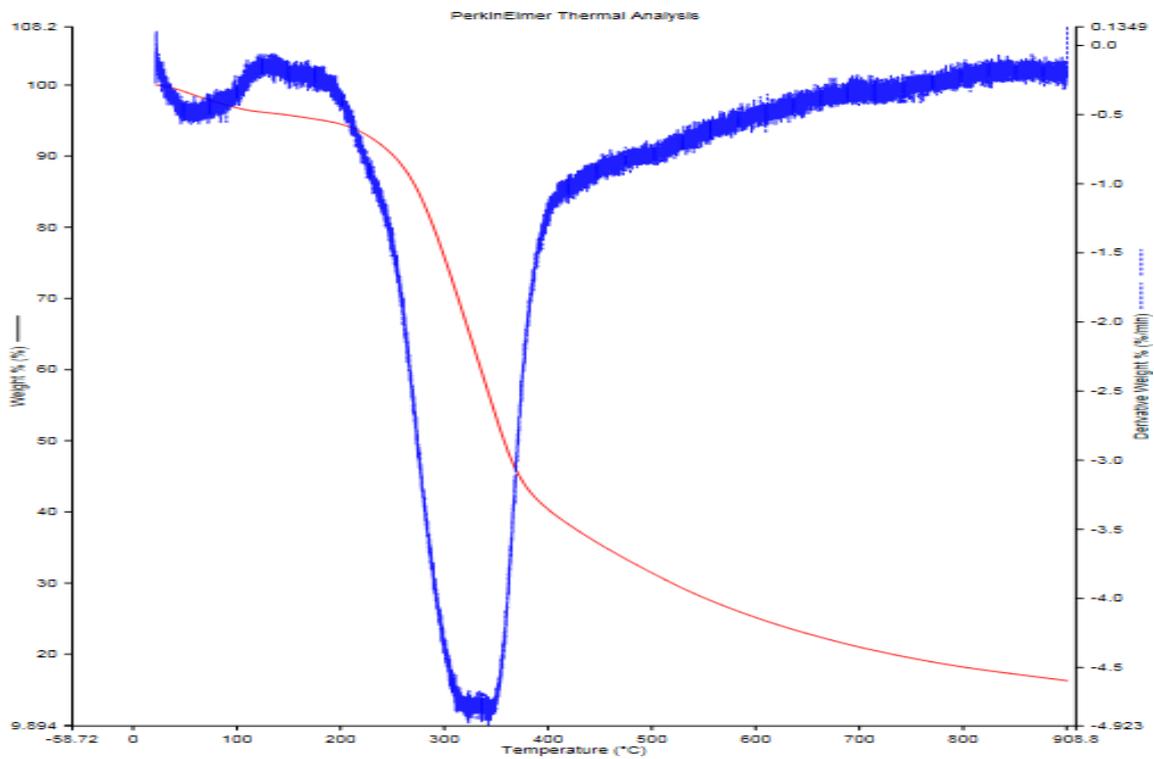
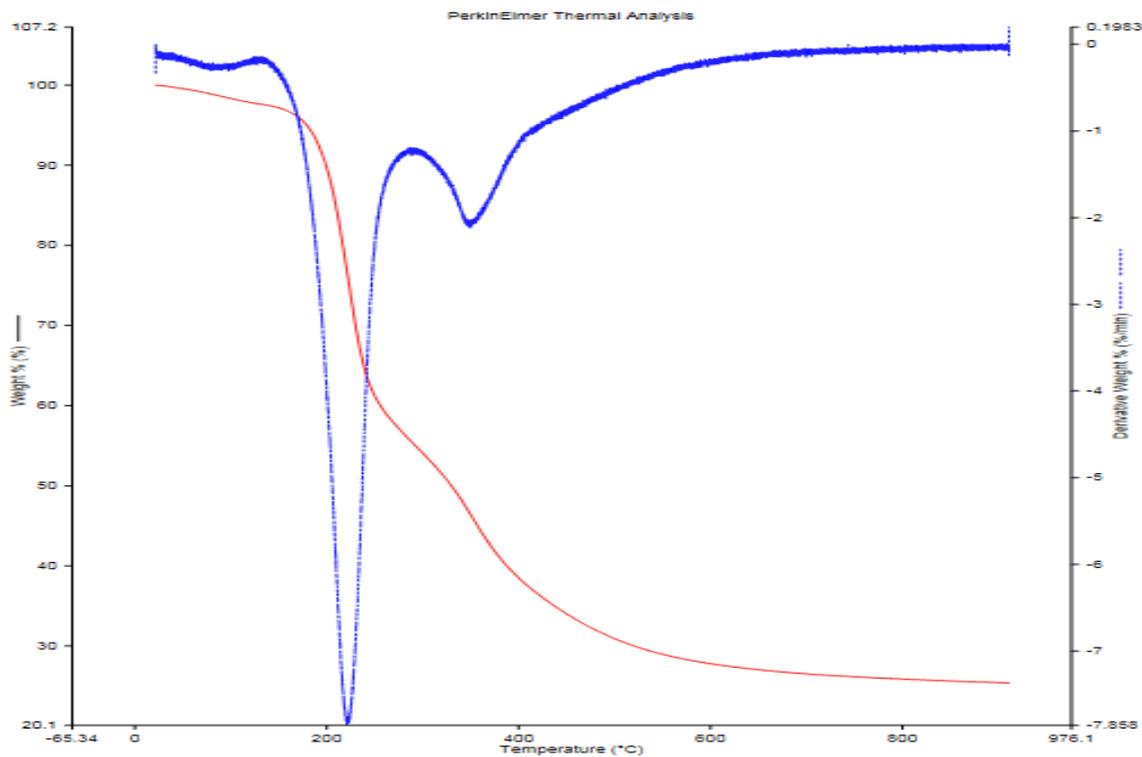
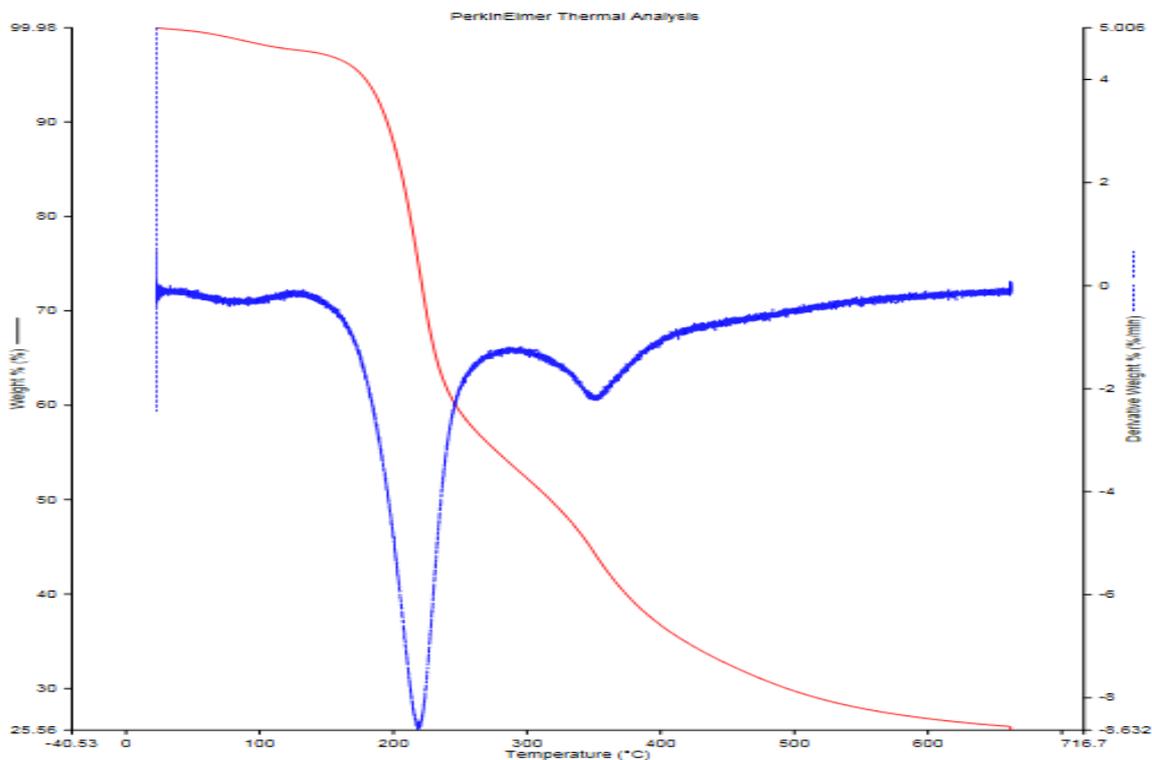


Figura 61. Curvas de TGA para galhos de macieira – atmosfera de N<sub>2</sub> (25 a 900°C).



**Figura 72.** Curvas de TGA para maçãs de descarte – atmosfera de ar (25 a 900°C).



**Figura 8.** Curvas de TGA para maçãs de descarte – atmosfera de N<sub>2</sub> (25 a 650°C).

As curvas de TGA representam três partes bem definidas, tradicionais a degradação térmica de biomassas, notadamente reações exotérmicas, sendo a primeira em torno de 100 °C atribuída à perda

de água, e outras duas regiões, uma em torno de 200-400 °C e outra em torno de 350-500 °C devido a degradação da matéria orgânica (SEYE et. al.2000).

O primeiro pico a 100 °C representa cerca de 10% da perda de massa relacionada à umidade da amostra, podendo-se comparar com os valores do bagaço (9,26%) e palha de cana-de-açúcar (10,17%).

A decomposição das hemiceluloses ocorre predominantemente abaixo de 230 °C em função da instabilidade dos grupos acetila (ALVAREZ & VÁZQUEZ, 2004; PEREIRA et al., 2013). Assim, a segunda etapa de perda de massa (cerca de 25%) ocorre por volta de 230 °C, podendo ser comparada aos valores obtidos para bagaço (26,48%) e palha de cana-de-açúcar (24,35%).

Entre 230-260 °C ocorre à degradação de hemiceluloses e celulose, sendo que a degradação de hemiceluloses termina por volta de 290 °C e a da celulose, entre 275-500 °C. Nessa terceira etapa, observa-se a perda de massa de cerca de 40%, semelhantes a análise termogravimétrica do bagaço (46,82%) e palha de cana-de-açúcar (40,48%). A decomposição de lignina, ocorre em uma extensa faixa de temperatura, sendo que abaixo de 500 °C cerca de 40% da lignina se decompõe, enquanto o restante é degradado em temperaturas mais altas (ALVAREZ & VÁZQUEZ, 2004; PEREIRA et al., 2013).

### *Caracterização física dos particulados ou componentes*

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos no que diz respeito a massa específica, densidade aparente e diâmetro médio das partículas. Conforme os resultados obtidos, pode-se observar que a classificação de ambas as partículas, referente a classificação de Geldart, é pertencente ao grupo B.

**Tabela 2.** Características físicas dos galhos de macieira e areia.

	Massa específica	Densidade aparente	Densidade do ar	Classificação de Geldart		
	$\rho_{dm}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{ap}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{ar}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{dm}-\rho_{ar}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Diâmetro médio [μm]	Classif.
Galhos de macieira	1,3781	0,214	0,00121	1,377	592,42	B
Areia	2,61	1,554		2,609	329,07	B

O grupo B é o de fluidização tipo areia, sendo este tipo de fluidização o mais utilizado em escala industrial. É caracterizado pelo aparecimento de bolhas na superfície do leito. Pode-se observar também que mesmo sendo o diâmetro médio dos galhos de macieira aproximadamente 80% maiores que o das partículas de areia utilizadas como material inerte, a massa específica das partículas de

biomassa é 47% menor, o que permite que ocorra a mistura ao menos parcial dos componentes do leito, desta forma, apesar da enorme diferença entre as características físicas entre as partículas de biomassa e do material inerte utilizado, ocorre entre eles uma mistura parcial, caracterizada por uma fluidização do tipo areia no diagrama de Geldart .

A Tabela 3 apresenta os valores de massa específica, densidade aparente e diâmetro médio das partículas para diferentes biomassas e materiais utilizados em reatores de leito fluidizados.

**Tabela 3.** Massa específica, densidade aparente e diâmetro médio das partículas para diferentes biomassas e materiais.

	<b>Massa Específica das Partículas [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Densidade aparente [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Diâmetro médio [mm]</b>	<b>Referências</b>
Galhos de Macieira	1,380	0,214	0,59	Autores
Areia	2,610	1,554	0,33	Autores
Tabaco	1,301	0,727	0,79	Oliveira (2012)
Eucalipto	1,386	0,093	0,54	Genehr (2015)
Pinus	1,271	0,286	0,58	Genehr (2015)
Areia 1	2,670	1,626	0,29	Genehr (2015)
Areia 2	2,639	1,598	0,22	Genehr (2015)

A massa específica da biomassa utilizada apresenta um valor intermediário entre o tabaco (1,301 g/cm<sup>3</sup>) (OLIVEIRA, 2012) e a casca de eucalipto (1,386 g/cm<sup>3</sup>) (GENEHR, 2015). Sendo ainda maior que a massa específica da casca do pinus (1,271 g/cm<sup>3</sup>) (GENEHR, 2015), os galhos de macieira possuem uma massa específica semelhante à de materiais comumente utilizados em escala industrial.

A densidade aparente dos galhos de macieira (0,243 g/cm<sup>3</sup>) é também intermediária às densidades do pinus (0,286 g/cm<sup>3</sup>) e do eucalipto (0,093 g/cm<sup>3</sup>) (GENEHR, 2015), levando em conta que os diâmetros médios das partículas também são semelhantes, (galhos de macieira, 0,59 µm, pinus, 0,58 µm e eucalipto, 0,54 µm) (GENEHR, 2015), espera-se que, para um mesmo material inerte utilizado as curvas de fluidização observadas sejam semelhantes.

O material inerte utilizado tanto neste trabalho, quanto por Genehr (2015) foi areia. Sendo o leito formado por uma mistura binária, as características do material inerte utilizado também são de extrema importância. A Tabela 4 apresenta uma comparação entre as areias utilizadas como material inerte por Genehr (2015) e a areia utilizada como material inerte no presente trabalho.

**Tabela 4.** Características do material inerte.

	<b>Autores</b>	<b>GENEHR (2015) 01</b>	<b>GENEHR (2015) 02</b>
Diâmetro médio [mm]	0,33	0,29	0,22
Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	2,610	2,670	2,639
Densidade aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1,554	1,626	1,598

O diâmetro médio das partículas dos materiais inertes utilizados nos experimentos de Genehr (2015) (0,29mm para a areia 1 e 0,22 mm para a areia 2) são menores do que o que foi utilizado na realização deste experimento. A massa específica e a densidade aparente tiveram pouca alteração.

### **Análise da fluidização**

A velocidade de fluidização inicial ( $U_{fi}$ ) ocorre quando algumas partículas começam a se movimentar. A velocidade de fluidização aparente ( $U_{fa}$ ) está relacionada com a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) em sistemas homogêneos e é o ponto onde o leito passa do estado fixo para fluidizado. A velocidade de fluidização completa ( $U_{fc}$ ) ocorre quando ambos os componentes passam para o estado fluidizado (GENEHR, 2015). Os valores das velocidades de fluidização e perda de carga estão descritos na Tabela 5.

**Tabela 5.** Análise fluidodinâmica.

<b>% Massa</b>	<b>Estudo Fluidodinâmico</b>			
	<b><math>U_{fa}</math> [m/s]</b>	<b><math>\Delta_{press\tilde{a}o}</math> [mbar]</b>	<b><math>U_{mf}</math> [m/s]</b>	<b><math>\Delta_{press\tilde{a}o}</math> [mbar]</b>
2%	0,03842	10,246	0,02869	9,225
6%	0,02485	8,19	0,03706	7,418
12%	0,08209	7,701	0,1017	3,454
24%		4,4623		1,595
55%		2,608		1,64

Nas Figuras 9 a 19 são apresentadas as curvas de fluidização e defluidização das misturas binárias compostas por areia e galhos de maçã.

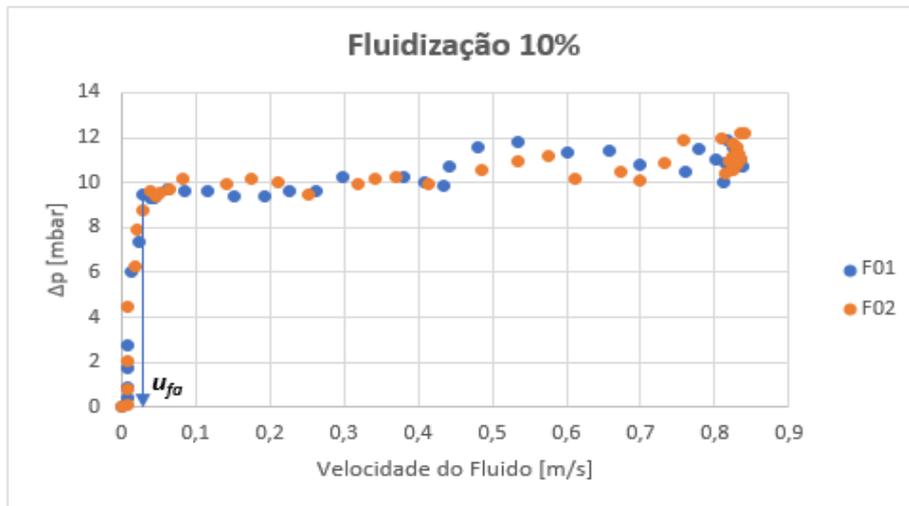


Figura 9. Curvas de fluidização da mistura composta por 10% de galhos de maçã e 90% de areia.

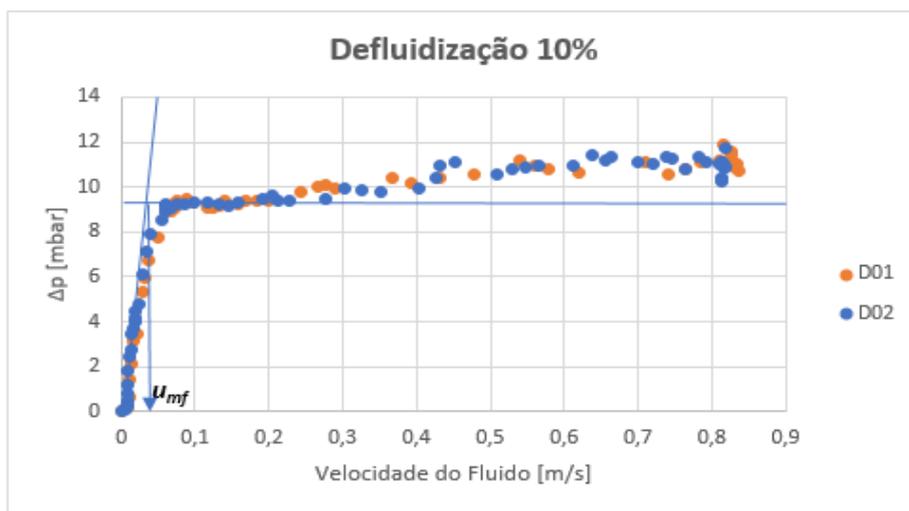


Figura 10. Curvas de defluidização da mistura composta por 10% de galhos de maçã e 90% de areia.

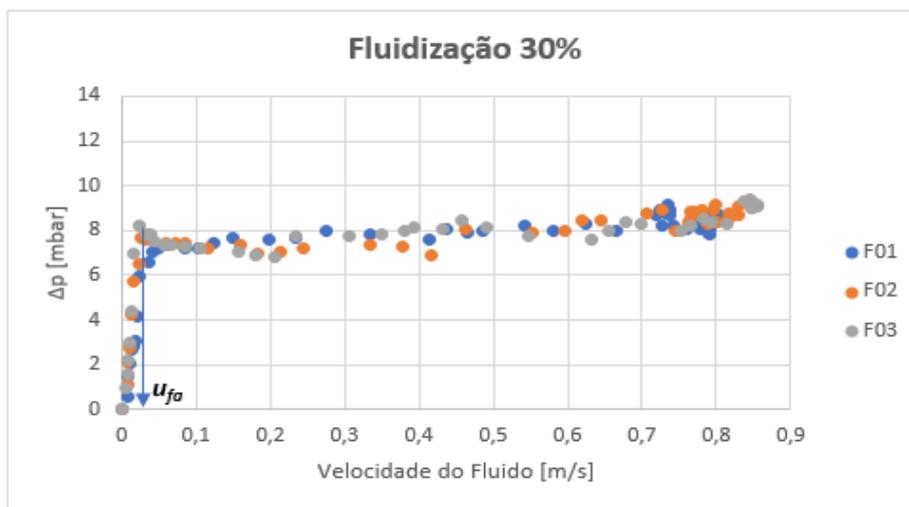


Figura 11. Curvas de fluidização da mistura composta por 30% de galhos de maçã e 70% de areia.

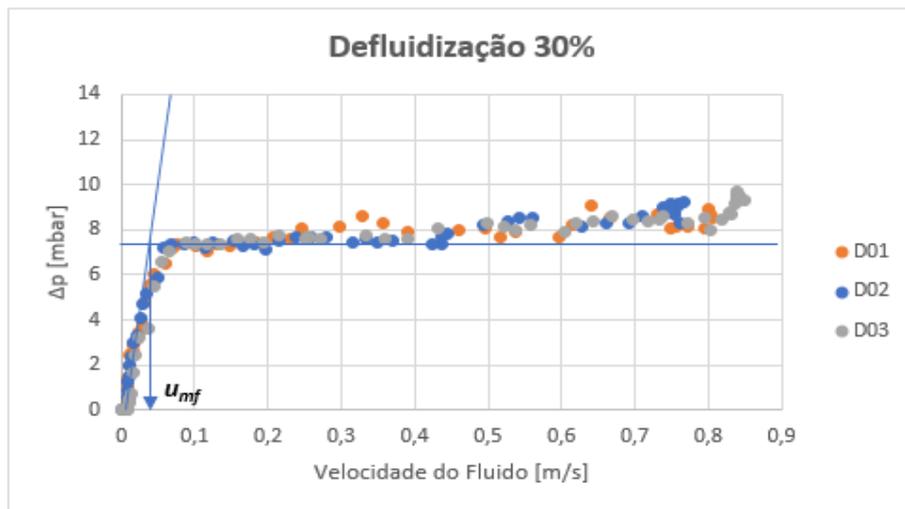


Figura 12. Curvas de defluidização da mistura composta por 30% de biomassa e 70% de areia.

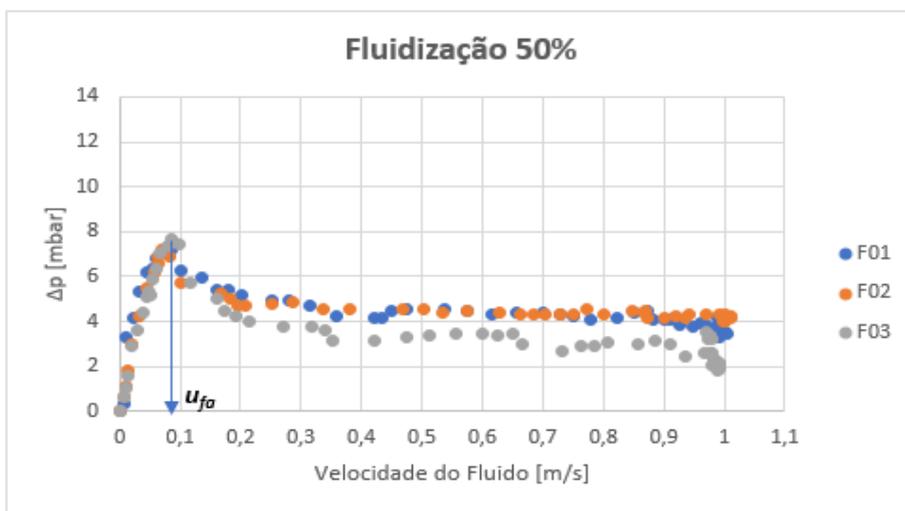


Figura 133. Curvas de fluidização da mistura composta por 50% de galhos de maçã e 50% de areia.

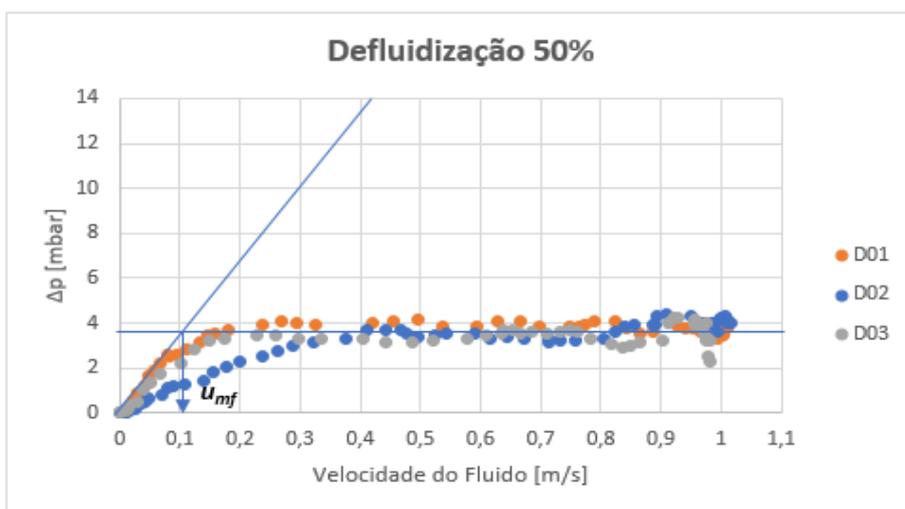


Figura 14. Curvas de defluidização da mistura composta por 50% de galhos de maçã e 50% de areia.

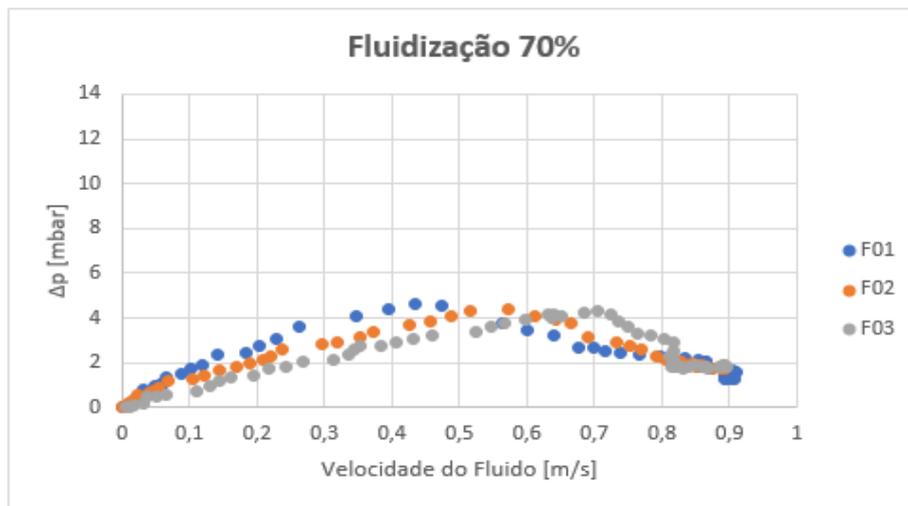


Figura 15. Curvas de fluidização da mistura composta por 70% de galhos de maçã e 30% de areia.

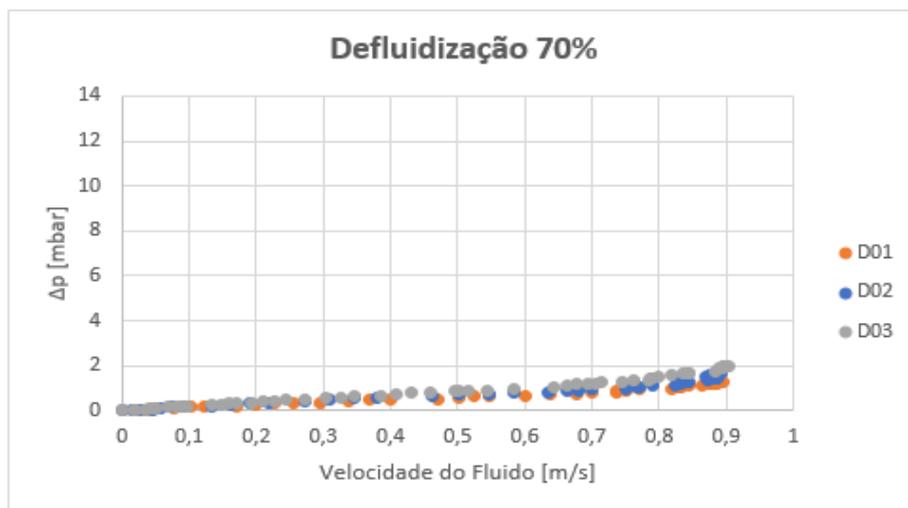


Figura 16. Curvas de defluidização da mistura composta por 70% de galhos de maçã e 30% de areia.

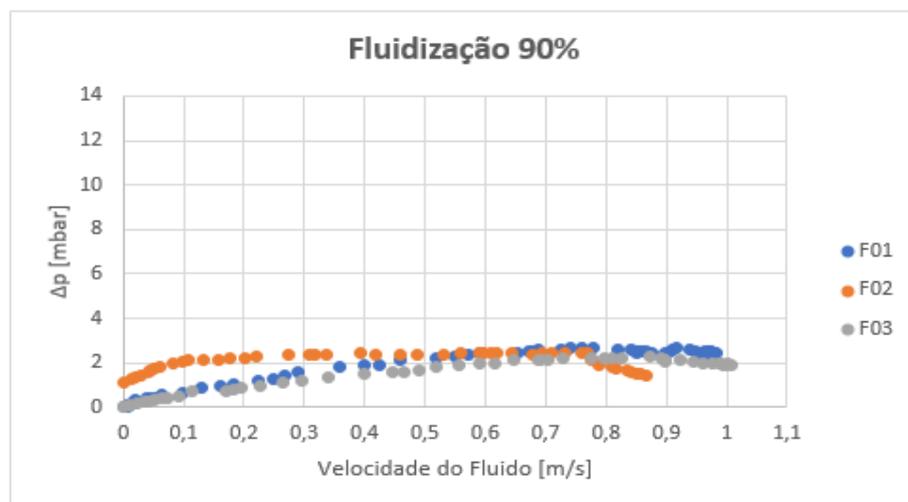


Figura 17. Curvas de fluidização da mistura composta por 90% de galhos de maçã e 10% de areia.

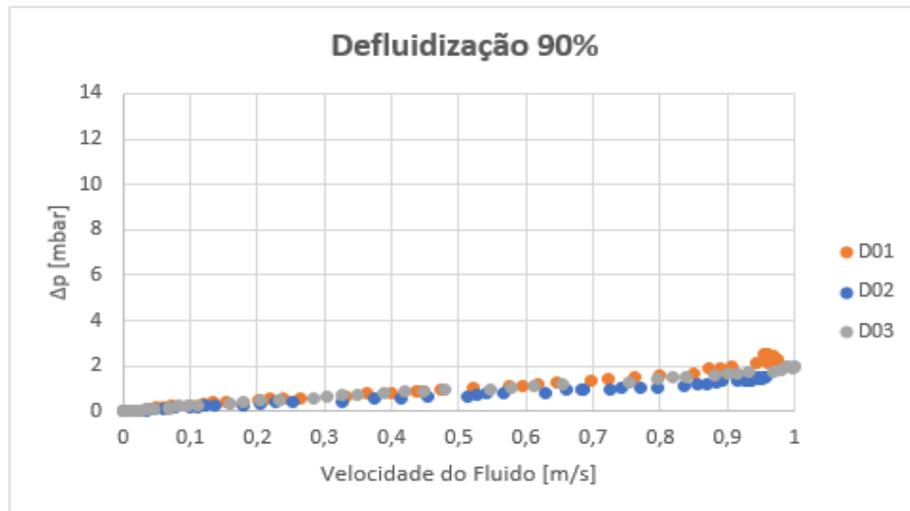


Figura 18. Curvas de defluidização da mistura composta por 90% de biomassa e 10% de areia.

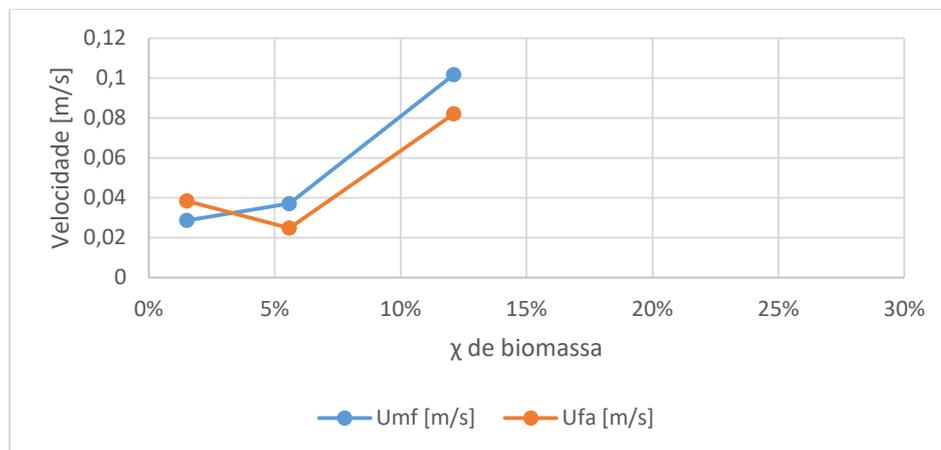


Figura 19. Velocidade Mínima de Fluidização (Umf) e Velocidade de Fluidização Aparente (Ufa).

É possível observar que na mistura contendo 10% de biomassa, ao iniciar o aumento da velocidade do fluido de entrada, ocorre a expansão do leito até que a velocidade de entrada atinja aproximadamente 0,03 m/s, no ponto em que a perda de carga do sistema atinge o seu valor máximo, 10,246 mbar. Neste instante, as partículas do leito entram em movimento e, apesar de ocorrer a diminuição da altura do leito, o movimento das partículas permite que o ar escoe entre elas com uma menor resistência. Observa-se então uma queda no valor da perda de carga do leito para aproximadamente 9,225 mbar. A este valor, a perda de carga no leito se estabiliza com relação ao aumento da velocidade do ar entrando no leito.

Após estabilizada a perda de carga, inicia-se a diminuição da velocidade de entrada do fluido. Ao atingir uma velocidade menor, 0,028 m/s, as partículas do leito começam a se depositar no fundo do mesmo, ocorrendo então, diminuição da perda de carga do leito (até o ponto onde a velocidade do fluido é nula, assim como a perda de carga).

Um comportamento semelhante é observado na mistura contendo 30% de biomassa. Ao atingir a velocidade de entrada de aproximadamente 0,025 m/s, a perda de carga do fluido atinge seu valor máximo, 8,190 mbar. Observa-se então que o aumento do volume de biomassa na mistura diminuiu o valor máximo da perda de carga. Isto pode ser explicado devido a menor massa específica dos galhos de macieira em comparação com a areia utilizada (1,380 g/cm<sup>3</sup> e 2,610 g/cm<sup>3</sup> respectivamente), que necessitam de uma menor velocidade de entrada do fluido para que a componente da força de arraste, força que o fluido exerce sobre a partícula a empurrando para cima, seja igual ao componente da força peso, força que a aceleração da gravidade exerce sobre a partícula a empurrando para baixo.

Para misturas que possuem 50% do seu volume composto por biomassa, observa-se um pico na perda de carga, chegando a 7,71 mbar quando o fluido atinge a velocidade de entrada de 0,08 m/s. Após atingir esse valor máximo, a perda de carga sofre uma queda, estabilizando-se em cerca de 4,00 mbar. Neste caso, a grande diminuição que ocorre na perda de carga pode ser formada pelo aparecimento de pequenos caminhos preferenciais no recheio do leito, pelos quais o fluido escoava com facilidade sofrendo pouca ou nenhuma resistência das partículas.

Em misturas contendo um volume superior a 50% de biomassa, não foi possível observar a fluidização. Nestas misturas, contendo 70% e 90% de biomassa, dois casos foram observados: o primeiro foi a formação de caminhos preferenciais grandes, os quais permitem que o fluido escoe pela mistura sofrendo pouca resistência das partículas, conforme observado na Figura 20. Outro comportamento observado e que impediu a fluidização do leito foi a segregação das partículas do leito, conforme observado na Figura 21.



**Figura 20.** Formação de caminhos preferenciais no leito fluidizado.

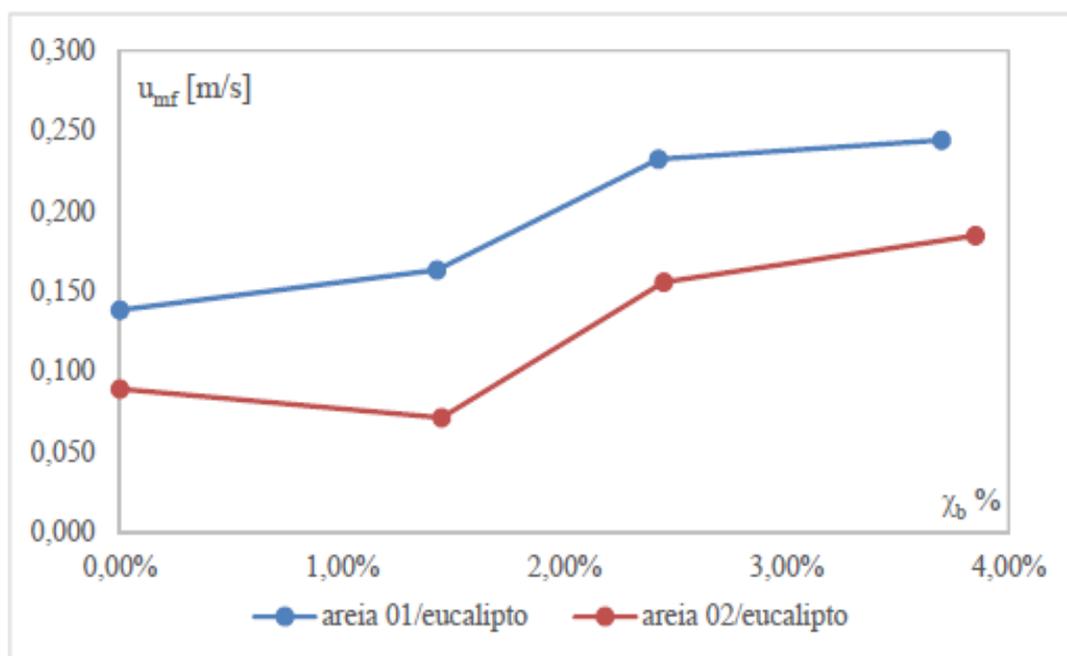


**Figura 21.** Segregação de partículas no leito fluidizado.

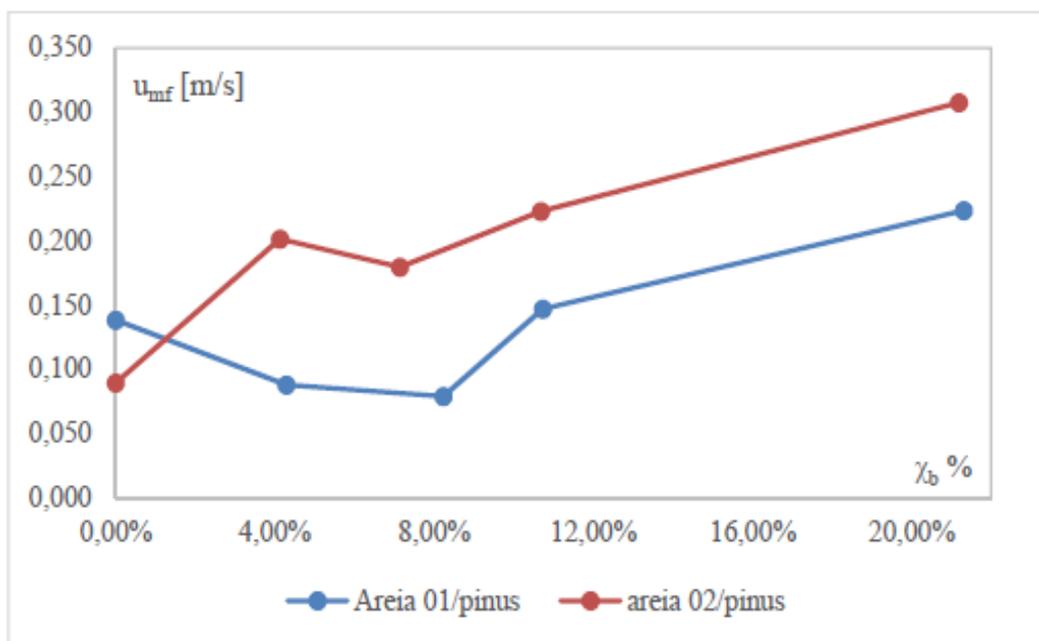
Neste caso, as partículas dos galhos de macieira, possuindo massa específica menor que as partículas da areia, são observadas na parte superior do leito, enquanto as partículas de areia são observadas na parte inferior.

Sendo assim, não foi possível observar a fluidização para amostras contendo um volume de biomassa superior a 50% do total da mistura. O que foi observado nesses casos foi uma redução muito grande da perda de carga, comparando com os valores observados em misturas contendo 10% de biomassa, e um comportamento irregular, indicando ou a formação de caminhos preferenciais ou a segregação das partículas do leito.

Genehr (2015) estudou o comportamento de diferentes misturas de casca de eucalipto e casca de pinus com material inerte, neste caso dois tipos de areia. Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as evoluções das velocidades de mínimas fluidização em função da fração mássica de biomassa. Pode-se observar que, com o aumento do teor de biomassa na mistura, tem-se um aumento das velocidades de mínima fluidização. Neste estudo foi possível determinar a velocidade mínima de fluidização para um leito contendo 60% e 80% de seu volume compostos por biomassa (nos gráficos representados pelos pontos de fração mássica,  $\chi_b$ %, de aproximadamente 2,5% e 3,7% para o eucalipto e 11% e 21% para o pinus).



**Figura 22.** Velocidade de mínima fluidização em função da fração de eucalipto.  
Fonte: Genehr, (2015).



**Figura 23.** Velocidade de mínima fluidização em função da fração de pinus.  
Fonte: Genehr, (2015).

Conforme ressaltada a semelhança entre massa específica de pinus, eucalipto e galhos de macieira, bem como outras propriedades físicas tanto das biomassas como do material inerte utilizado nos experimentos, a não fluidização da mistura contendo um volume superior a 50% de galhos de macieira pode ser explicada pela diferença na forma das partículas.

Embora possuam um caráter alongado, de forma que o diâmetro médio das partículas seja apenas uma aproximação, o grau de esfericidade das partículas de eucalipto e pinus é muito grande comparado ao aspecto extremamente alongado e fino das partículas de galhos de macieira.

Esta forma irregular faz com que a componente da força de arraste na partícula varie de forma aleatória e com alta frequência, o que não permite que partículas que por sua vez estejam fluidizadas permaneçam fluidizadas.

Além disso, a formação de caminhos preferenciais, que mesmo observados por Genehr (2015) não são suficientes para impedir a determinação das velocidades mínimas de fluidização, são maiores, fazendo com que seja necessário o aumento da velocidade de entrada do fluido no leito para que os caminhos preferenciais sejam desconstruídos. Esse aumento de velocidade do fluido no leito provoca o arraste das partículas para fora do mesmo, o que geraria em escala industrial, a perda de rendimento do reator.

## **Conclusão**

O Poder Calorífico Superior obtido para galhos e folhas da macieira, (18,427 MJ/kg) e (19,900 MJ/kg), respectivamente, foram superiores aos encontrados nos descartes de macieira (16,501 MJ/kg), evidenciando que os galhos e as folhas são energeticamente superiores aos descartes da macieira.

Nas curvas das análises Termogravimétricas pode-se observar que o comportamento de degradação das frações de celulose, hemiceluloses e lignina presentes nos galhos, folhas e nos descartes de macieira foram similares nas três zonas: a primeira, em torno de 100°C, com perda de cerca de 10% da massa, referente a umidade; a segunda zona, em torno de 230-260°C se refere a degradação de hemiceluloses e celulose; e, por fim, a terceira zona, com temperatura superior a 350°C, observa-se a perda de massa de cerca de 40%, referente a lignina, sendo que o restante é degradado em temperaturas mais altas.

Para as proporções de galhos de macieira e areia (10%, 30% e 50%), observou-se curvas de fluidização. Apesar da formação de pequenos caminhos preferenciais na mistura de 50%, esta é a proporção volumétrica ideal para ser utilizada em leitos fluidizados. Estas proporções provocaram a diminuição de perda de carga do fluido no leito, fazendo necessário o aumento da velocidade de entrada do fluido. Nas proporções contendo 70% e 90% de biomassa, foram observados: formação de caminhos preferenciais e segregação de partículas, impedindo fluidização.

Finalmente, a utilização dos resíduos da produção de maçã apresenta grande potencial em processos de termoquímicos, sendo que a gaseificação em leito fluidizado, como o objetivo de gerar gás para mover turbina e gerar energia elétrica, é a alternativa mais passiva de execução em grande escala. No entanto, é necessário que sejam feitas análises mais profundas quanto às frações químicas e energéticas presentes nos galhos e folhas de macieira e na maçã de descarte para maior eficiência e rendimento nos diferentes processos de biorrefinaria, além de uma análise financeira.

## **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e Universidade do Vale do Rio dos Sinos pelos recursos e equipamentos disponibilizados para esta pesquisa.

## **Referências**

ANCA-COUCÉ, A., & SCHARLER, R. 2017. Modelling heat of reaction in biomass pyrolysis with detailed reaction schemes. *Fuel*, **206**: 572–579. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.011>

ALVAREZ, V., VÁZQUEZ, A. 2004. Thermal degradation of cellulose derivatives/starch blends and sisal fibre biocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, **84**(1):13-21. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2003.09.003>

CORTEZ, L.A.B. et al. 2009. Processamento de Casca e Fibra de Coco Verde por Carbonização para Agregação de Valor. *BioEng*, 3(1). [tp://dx.doi.org/10.18011/bioeng2009v3n1p21-30](http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2009v3n1p21-30)

DUPONT, C. et al. 2014. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues. *Fuel*, **115**: 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.086>

FAO – Food and Agriculture Organization of United Nations, 2012.

FERREIRA, P.; PROENÇA, M. B. Estudo sobre o Uso de Casca da Banana, Folha e Tronco de Bananeira como Biomassa para Substituição de Lenha em Caldeiras Flamotubulares, 5º Foro Científico Estudantil do Instituto Superior Tupy, SOCIESC, 2013.

GENEHR, G. A. *Caracterização da Fluidização de Biomassas de Casca de Madeiras em Leitos Polidispersos*. 2015. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

HABL, M. A. et al. 2017. Fluid dynamics study on a dual fluidized bed cold-flow model. *Powder Technology*, **316**: 469–475. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.064>

HORST, D. J. *Avaliação da Produção Energética a partir de Ligninas Contidas em Biomassas*. 2013. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Paraná.

HUANG, C-F., JIANG, Y-F., HWANG, W-S. 2013. Method of 2,3-butanediol production from glycerol and acid-pretreated rice straw hydrolysate by newly isolated strains: Pre-evaluation as an integrated biorefinery process. *Bioresour. Technol.*, **135**: 446–453. [10.1016/j.biortech.2012.10.141](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.141)

MU, E., & BEL, A. 2018. Life cycle assessment of second generation ethanol derived from banana agricultural waste. *Environmental impacts and energy balance*, **174**: 710–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.298>

OLIVEIRA, T. J. P. 2012. *Aspectos fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduo de tabaco e areia em leito fluidizado*. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

PEREIRA, B. L. C et al. 2013. Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria. *Revista Árvore*, **37**(3):567-576. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000300020>

PÉREZ, N. P. et al. 2017. Fluid dynamic study of mixtures of sugarcane bagasse and sand particles: Minimum fluidization velocity. *Biomass and Bioenergy*, **107**:135–149. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.015>

SEYE, O., CORTEZ, L. A. B., GÓMEZ, E. O. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. *In: Proceedings of the 3º Encontro de Energia no Meio Rural*, 3, Campinas, 2000.

SINGH, R. et al. 2015. Conversion of rice straw to monomeric phenols under supercritical methanol and ethanol. *Bioresource Technology*, **188**: 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.001>

WILLEMS, J. L., & LOW, N. H. 2018. Structural identification of compounds for use in the detection of juice-to-juice debasing between apple and pear juices. *Food Chemistry*, **241**: 346-352. [10.1016/j.foodchem.2017.08.104](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.104)

*Submetido: 09/06/2017*

*Aceito: 03/01/2018*