

QUALIDADE DOS *PELLETS* DE BIOMASSA FLORESTAL PRODUZIDOS EM SANTA CATARINA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

Alana Spanhol¹, Daniela Letícia Nones², Fabricio Junki Blanco Kumabe³, Martha Andreia Brand^{2*}

¹Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, Santa Catarina, Brasil - alana_spanhol@hotmail.com

²Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Florestal, Lages, Santa Catarina, Brasil - dani_nones@hotmail.com; *martha.brand@udesc.br

³Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal Botucatu, São Paulo, Brasil - fabricio.kumabe@hotmail.com

Recebido para publicação: 26/09/2014 – Aceito para publicação: 21/10/2015

Resumo

Este estudo objetivou determinar as propriedades físicas, químicas e energéticas de *pellets* de biomassa residual de *Pinus* spp. produzidos em Santa Catarina, e realizar a comparação com os parâmetros estabelecidos pelas normas internacionais existentes. Foram coletadas nove amostras, onde foram determinadas as propriedades de: dimensões dos *pellets*, densidade aparente e da unidade, teor de umidade, análise imediata, poder calorífico, durabilidade mecânica e teor de finos. Comparativamente à literatura e aos parâmetros de qualidade das normas: os *pellets* apresentaram densidade aparente (663,46 kg/m³), densidade da unidade (1711 kg / m³), durabilidade mecânica (99,07%) e poder calorífico superior (20,21 MJ / kg) altos; teor de umidade (7,89%) e de cinzas (0,38%) baixos, indicando boa qualidade dos *pellets*. Os *pellets* apresentaram alto teor de finos (1,05%), como característica negativa. Tiveram diâmetro de 6,58 mm; comprimento de 17,31 mm; teor de materiais voláteis de 81,29% e carbono fixo de 18,33%. Os valores médios das propriedades dos *pellets* atenderam plenamente as normas alemã (DIN Plus) e austríaca (Önorm M7135) e as classes G2 e G3 da suécia (SS 187120), e as classes I1, I2 e I3 da ISO (17225-2), podendo ser usados no setor de serviços e indústrias.

Palavras-chave: Resíduos de *Pinus*; densificados; normas de qualidade de *pellets*.

Abstract

Quality of forest biomass pellets produced in State of Santa Catarina for power generation. This study aimed to determine the physical, chemical and energetic properties of pellets of residual forest biomass of *Pinus* spp. production chain from the state of Santa Catarina, and compare them to the parameters set by existing international standards. Nine samples were collected, in which the properties were determined: size of pellets; bulk density and unit density; moisture content; immediate analysis; calorific value; mechanical durability and fines content. Compared to literature and quality standards parameters: the pellets showed high apparent density (663.46 kg / m³), unit density (1711 kg / m³), mechanical durability (99.07%) and gross calorific value (20.21 MJ / kg); low moisture content (7.89%) and ash (0.38%), indicating good quality pellets. The pellets had a high fines content (1.05%), as a negative characteristic. They had diameter of 6.58 mm; length 17.31 mm; volatiles content of 81.29% and 18.33% fixed carbon. The average values of properties of the pellets fully met the German standards (DIN Plus) and Austria (ÖNORM M7135) and G2 and G3 classes of Swedish (SS 187 120), and the classes I1, I2 and I3 ISO (17225-2), and can be used in the service and industry sectors.

Keywords: Pinus waste; densified; pellet quality standards.

INTRODUÇÃO

A necessidade de produção de energia barata, limpa e eficiente, subordinada a urgência na otimização do uso dos recursos, coloca a biomassa no foco da pesquisa mundial para a produção de energia renovável, por meio do uso de seus resíduos.

Dentre as fontes renováveis de energia, insere-se o grupo das biomassas lignocelulósicas onde se destaca a biomassa florestal. Este recurso pode ser diferenciado em três grandes e principais grupos: o

material advindo da colheita florestal (galhos, tocos, folhas e raízes), os resíduos gerados no processamento da madeira (serragem, aparas e cepilhos) e a madeira oriunda de florestas energéticas (SOUZA, 2010), além de florestas plantadas de uso múltiplo (BRAND, 2010).

O Brasil possui um relevante número de empresas que processam espécies florestais derivadas de plantios. Por exemplo, o estado de Santa Catarina possui uma área plantada de aproximadamente 539.377 mil ha de espécies do gênero *Pinus*, representando 30% dos plantios deste gênero no país, segundo o Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, ano base 2012 (ABRAF, 2014).

A cadeia produtiva de base florestal, segundo Couto *et al.*, (2004) é evidenciada pela geração de grande quantidade de resíduos, em todas as suas fases, o que acaba constituindo em um grande passivo ambiental. Por sua vez, estes resíduos podem ser convertidos em energia de diferentes formas, como por exemplo a geração de calor pelo processo de combustão, produção de carvão, combustíveis líquidos, etc. No processo de combustão, a biomassa pode ser utilizada *in natura* ou compactada, pela densificação ou aglomeração da biomassa florestal, na forma de *pellets*.

Pellets de biomassa florestal ou *pellets* de madeira são pequenos blocos ou esferas cilíndricas, compactadas e densas, resultantes da aglomeração de material lignocelulósico, que são utilizadas na geração de energia na forma de calor ou eletricidade (DIAS *et al.* 2012; GARCIA *et al.* 2013). Caraschi e Garcia (2013) acrescentam ainda que o *pellet* é um biocombustível renovável produzido a partir da biomassa agroflorestal, com baixo teor de umidade, forma homogênea e alta densidade energética. Além disso, é um produto natural de fácil manuseio e estocagem.

Os *pellets* são utilizados para a geração de energia térmica e elétrica em pequenas ou médias unidades geradoras (LOUÇÃO, 2008). Ainda segundo o autor, o uso dos *pellets* proporciona uma série de vantagens, quando comparado ao uso da madeira *in natura*, principalmente no tocante ao armazenamento, manuseio, aumento da densidade, poder calorífico, facilidade de transporte, uniformização do material e redução substancial da ação poluidora. A ação poluidora é reduzida principalmente pela minimização na produção de fumaça e pelo maior controle da combustão nos equipamentos de aquecimento disponíveis no mercado, proporcionando assim maior eficiência de queima com menor emissão de monóxido de carbono.

No entanto, os *pellets* de madeira devem atender a alguns padrões de qualidade para se constituir em um produto homogêneo. Além disso, a normalização deve garantir a quantidade e qualidade da energia requerida nos sistemas de geração para os quais este produto será destinado. A padronização das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos *pellets* é um fator de extrema importância, tanto para emissão de laudos de qualidade nacional, que muitas vezes são requeridos pelos próprios consumidores, quanto para o mercado internacional, que investe cada vez mais na importação de resíduo florestal compactado.

No Brasil, observa-se que a produção de *pellets* ainda ocorre de forma desestruturada, sem qualquer padronização ou normatização, uma vez que o país não possui máquinas peletizadoras adequadas e nem normas oficiais para a produção de compactados de madeira (GARCIA, 2010; NONES, 2014).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi comparar a qualidade dos *pellets* de biomassa florestal residual de *Pinus* spp., provenientes da cadeia produtiva do estado, com os critérios de qualidade das normas internacionais existentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Os compactados de biomassa residual florestal ou também chamados *pellets* foram coletados no estado de Santa Catarina, em duas mesorregiões: Serrana e do Vale do Itajaí. Foram obtidas nove amostras de três diferentes procedências, coletadas tanto em produtores como em consumidores de *pellets* (Tabela 1). Foram considerados como procedências os três produtores de Santa Catarina, localizados nos municípios de Benedito Novo, Timbó e Curitibaanos.

Após a coleta, as amostras foram submetidas a análises laboratoriais para determinação das propriedades de: dimensões, densidade da unidade e densidade aparente, teor de umidade, análise imediata, poder calorífico, durabilidade e teor de finos. As análises foram realizadas na Universidade do Estado de Santa Catarina, na Universidade do Planalto Catarinense e na Empresa Soluções e Inovações em Tecnologias de Madeiras Ltda., localizadas em Lages, Santa Catarina.

As dimensões dos *pellets* foram determinadas de acordo com a norma austríaca ÖNORM M 7135 (ÖNORM, 2000), através da medição do diâmetro e do comprimento de cada *pellet* com paquímetro digital. Nesse caso, as amostras foram separadas em sacos plásticos compostas por 40 unidades. A densidade da unidade foi determinada dividindo-se a massa pelo volume, sendo que a massa foi obtida em balança analítica e o volume calculado a partir das dimensões dos *pellets*.

A determinação da densidade aparente (a granel) foi realizada a partir da adaptação das normas NBR 6922 (ABNT, 1981) e EN 15103 (EN, 2005a), onde se utilizou um cilindro de volume conhecido de 2,0 litros, o qual foi preenchido até a borda com o biocombustível, e com o auxílio de uma balança de precisão de 0,1g obteve-se a massa, com variação admitida entre as repetições de 2%. Nesse caso, a densidade também foi obtida através da razão entre a massa e o volume. Ambas as densidades foram obtidas no teor de umidade determinado nos *pellets* conforme descrição abaixo.

A obtenção do teor de umidade seguiu os princípios da norma EN 14774-2 (EN, 2009), em que a umidade é obtida a partir da diferença de peso da amostra antes e após a secagem a $105 \pm 2^\circ\text{C}$. O equipamento utilizado foi o analisador de umidade infravermelho.

Tabela 1. Descrição das amostras de *pellets* analisadas em Santa Catarina.

Table 1. Description of samples pellets analyzed in Santa Catarina State.

Origem	Município do local de coleta	Amostra
Local da Coleta: Produtor 1 Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 1	Timbó	A1
Local da Coleta: Indústria (Consumidor 1) Produtor do <i>pellet</i> : (Produtor 1)	Blumenau	A2
Local da Coleta: Produtor 2. Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 2.	Curitibanos	A3
Local da Coleta: Academia de natação (Consumidor 2) Produtor do <i>pellet</i> : (Produtor 2)	Lages	A4
Local da Coleta: Hotel (<i>pellet</i> 8 mm) – Consumidor 3 Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 2.	Lages	A5
Local da Coleta: Hotel (<i>pellet</i> 6 mm) – Consumidor 3 Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 2.	Lages	A6
Local da Coleta: Academia de Natação (Consumidor 4) Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 2.	Lages	A7
Local da Coleta: Produtor 3 Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 3.	Benedito Novo	A8
Local da Coleta: Indústria (Consumidor 5) Produtor do <i>pellet</i> : Produtor 3	Blumenau	A9

Todos os *pellets* analisados tiveram a mesma composição: *Pellets* de maravalha de *Pinus spp.* produzidos em peletizadora de ração adaptada para biomassa.

A quantificação do carbono fixo, teor de materiais voláteis e teor de cinzas procedeu-se de acordo com a norma ASTM 1762 (ASTM, 2007), a partir da análise imediata em Termobalança Gravimétrica (TGA). A análise do poder calorífico superior, inferior e líquido seguiu a norma DIN 51900 (DIN, 2000), em que a amostra é testada em calorímetro a 0% de umidade.

Para a determinação da durabilidade mecânica foram colocadas 500 g de *pellets* em um friabilômetro durante 20 minutos, sendo que o material foi rotacionado a uma velocidade de 25 rpm. Após a execução do ensaio, os *pellets* passaram por uma peneira com malha de 3,35 mm a fim de separar as partículas menores das maiores. A durabilidade mecânica foi determinada conforme a equação 1. A determinação e classificação foram realizadas com base na norma EN 15210-1 (EN, 2005b).

$$Du (\%) = 100 - (100 * \frac{mr}{mi}) \text{Equação 1}$$

em que: *Du* é a durabilidade mecânica expressa em porcentagem, *mr* é a massa que passou pela peneira e *mi* é a massa inicial.

A partir do procedimento para a determinação da durabilidade, obteve-se também o teor de finos das amostras através da equação 2.

$$F(\%) = \frac{mA}{mE} * 100 \text{Equação 2}$$

em que: *mA* é a massa antes do peneiramento e *mE* é a massa das partículas peneiradas.

Para a avaliação da qualidade energética dos *pellets* foi ainda determinada a densidade energéticas dos mesmos por meio da relação entre o poder calorífico superior e sua densidade aparente dos *pellets*.

Para todas as propriedades analisadas foram feitas três repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro, utilizando programa Sisvar (FERREIRA, 1998).

A escolha e utilização das diferentes normas para o estabelecimento das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos *pellets* se baseou na análise dos procedimentos de todas as normas, de modo a escolher aquele que melhor representasse a maioria ou todas as normas avaliadas. Outro critério foi a disponibilidade das normas para consulta pelos pesquisadores. Assim, foram utilizadas as normas adquiridas e cujo documento original estava de posse dos pesquisadores.

As normas utilizadas para a determinação do poder calorífico e análise imediata estão registradas nos equipamentos de análise, sendo que estes realizam as análises com base nestas normas.

Os valores das propriedades obtidos em laboratório para os *pellets* produzidos em Santa Catarina foram comparados com os parâmetros existentes em todas as normas internacionais existentes para o controle de qualidade de *pellets*. Estas normas foram selecionadas e obtidas por meio de busca bibliográfica e compra das mesmas, e tem seus parâmetros de comparação descritos nas tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2. Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas europeia e alemã.

Table 2. Technical specifications of pellets according to the European and German standards.

Especificação	Europa CEN CEN/TS 14961-2			Alemanha DIN Plus
	A1	A2	B	
Tamanho (mm)	Ø = 6 ou 8 L= 3,15 a 40	6 ou 8 3,15 a 40	6 ou 8 3,15 a 40	Ø = 6±1 ou 8±1 L= 3,15 a 40
Densidade aparente (kg/m³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Densidade da unidade (kg/cm³)	-	-	-	-
Teor de Umidade (%)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3,0	≤ 0,7
Poder Calorífico (MJ/kg)	16,5 a 19,0	16,3 a 19,0	16,0 a 19,0	≥ 16,5
Durabilidade	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 96,5	97,5
Finos (%) < 3 mm	≤ 1	≤ 1	≤ 1	-

Fonte: EUROPEAN PELLET COUNCIL (2013), DIN CERTCO (2014).

Ø: diâmetro; L: comprimento.

Tabela 3. Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas austríaca e sueca.

Table 3. Technical specifications of pellets according to the Austrian and Swedish standards.

Especificação	Áustria Önorm M 7135	Suécia SS 18 71 20		
	Madeira	G1	G2	G3
Tamanho (mm)	Ø = 4 ≤ D < 10 L= ≤ 5xD	Ø= < 25 L= < 4 x Ø	Ø= < 25 < 5 x Ø	Ø= < 25 < 5 x Ø
Densidade Aparente (kg/m³)	-	≥ 600	≥ 500	≥ 500
Densidade da Unidade (kg/cm³)	≥ 1120	-	-	-
Teor de Umidade (%)	< 10	≤ 10	≤ 10	≤ 12
Teor de Cinzas (%)	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 1,5	< 1,5
Poder Calorífico (MJ/kg)	> 18,0	≥ 17,0	≥ 17,0	≥ 15
Durabilidade	-	-	-	-
Finos (%) < 3 mm	< 2,3	≤ 0,8	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: Ostreiches Normungs Institut (2000), Selkimäki e Röser (2008), García-Maraver *et al.* (2011).

Ø: diâmetro; L: comprimento.

Tabela 4. Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas italiana e americana.

Table 4. Technical specifications of pellets according to the Italian and American standards.

Especificação	Itália CTI-R 04/05			EUA PFI		
	A	B	C	P	S	U
Tamanho (mm)	$\varnothing = 6 \pm 0,5$ ou $8 \pm 0,5$ $L = \varnothing - 5 \times \varnothing$ ou $\varnothing - 4 \times \varnothing$			$\varnothing = 5,84$ a $7,25$ -		
Densidade Aparente (kg/m ³)	620-720	600-720	≥ 550	640 a 736	640 a 736	608 a 736
Densidade da Unidade (kg/cm ³)	-	-	-	-	-	-
Teor de Umidade (%)	≤ 10	< 10	≤ 15	≤ 8	≤ 10	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	$\leq 0,7$	$< 1,5$	-	$\leq 1,0$	≤ 2	≤ 6
Poder Calorífico (kcal/kg)	$> 17,0$	$> 16,20$	-	-	-	-
Durabilidade	97,7	95,0	90,0	$\geq 96,5$	$\geq 95,0$	$\geq 95,0$
Finos (%) < 3 mm	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	-	$\leq 0,50$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$

Fonte: COMITATO TERMOTECNICO ITALIANO (2004), PELLET FUELS INSTITUTE (2011).

 $\varnothing$: diâmetro; L: comprimento; P: Premium; S: Standard; U: Utility.Tabela 5. Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas da Organização Internacional de Padronização.

Table 5. Technical specifications of pellets according to the International Organization for Standardization.

Especificação	ISO 17225-2					
	A1	A2	B	I1	I2	I3
Tamanho (mm)	$\varnothing = 6 \pm 1$ $\varnothing = 8 \pm 1$	$\varnothing = 6 \pm 1$ $\varnothing = 8 \pm 1$	$\varnothing = 6 \pm 1$ $\varnothing = 8 \pm 1$	$\varnothing = 6 \pm 1$ $\varnothing = 8 \pm 1$ $\varnothing = 10 \pm 1$ $\varnothing = 12 \pm 1$	$\varnothing = 6 \pm 1$ $\varnothing = 8 \pm 1$ $\varnothing = 10 \pm 1$	$\varnothing = 6 \pm 1$ $\varnothing = 8 \pm 1$
	$L = 3,15 < L \leq 40$			$L = 3,15 < L \leq 40$		
Densidade Aparente (kg/m ³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Densidade da Unidade (kg/cm ³)	-	-	-	-	-	-
Teor de Umidade (%)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	$\leq 0,7$	$\leq 1,2$	≤ 2	≤ 1	$\leq 1,5$	≤ 3
Poder Calorífico (MJ/kg)	$\geq 16,5$	$\geq 16,5$	$\geq 16,5$	$\geq 16,5$	$\geq 16,5$	$\geq 16,5$
Durabilidade	$\geq 97,5$	$\geq 97,5$	$\geq 96,5$	97,5 – 99	97 – 99	96,5 - 99
Finos (%) < 3 mm	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	≤ 4	≤ 5	≤ 6

Fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014.

 $\varnothing$: diâmetro; L: comprimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos na caracterização dos *pellets* de biomassa florestal estudados são apresentados na tabela 6, onde são apresentados também, os valores do comprimento máximo e mínimo de cada amostra analisada.

Os diâmetros encontrados nas diferentes amostras apresentaram valores variando de 6,09 mm a 6,94 mm, sendo que somente as amostras A3 e A7 do Produtor 2 e A8 do Produtor 3, foram semelhantes estatisticamente. Para a amostra A5, o valor encontrado de 8,35 mm foi devido ao fato dos *pellets* serem produzidos em uma matriz perfurada com diâmetro de 8 mm. Entre os *pellets* que são fabricados em matriz de 6 mm, os produzidos pelo Produtor 1 foram os que tiveram maiores diâmetros e diferiram de todos os outros e o Produtor 2 produziu os *pellets* de menor diâmetro para essa matriz.

Tabela 6. Propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* produzidos e comercializados em Santa Catarina.
Table 6. Physical and mechanical properties of pellets produced and marketed in Santa Catarina State.

Amostra	Ø (mm)		L (mm)		L mín	L max	Densidade aparente (kg/m³)		Densidade unidade (kg/m³)		Durabil. (%)		Finos (%) < 3 mm	
A1	6,55	a3	12,00	a6	9,7	13,2	701,55	a1	1717	a2	98,35	a2	1,65	a2
A2	6,94	a2	10,48	a7	9,8	11,1	670,67	a2	1717	a2	98,30	a2	1,70	a2
A3	6,22	a5	23,14	a1	16,4	21,2	664,92	a2	1678	a2	99,24	a1	0,76	a1
A4	6,18	a6	17,09	a4	16,6	18,3	657,40	a3	1642	a3	99,46	a1	0,54	a1
A5	8,35	a1	18,24	a3	16,4	21,2	649,26	a3	2073	a1	99,24	a1	0,76	a1
A6	6,09	a7	21,46	a2	20,2	69,1	653,84	a3	1632	a3	99,15	a1	0,85	a1
A7	6,21	a5	18,20	a3	16,6	18,4	637,45	a3	1630	a3	99,06	a1	0,94	a1
A8	6,22	a5	21,98	a2	19,4	23,2	663,65	a2	1651	a3	99,38	a1	1,62	a1
A9	6,42	a4	13,19	a5	11,9	14,6	672,37	a2	1655	a3	99,41	a1	0,59	a1
Média	6,58		17,31		15,2	23,4	663,46		1711		99,07		1,05	
Desvio padrão	0,69		4,41		3,9	17,6	18,94		0,12		0,46		0,47	

Ø: diâmetro e L: comprimento. Valores seguidos do mesmo número após a letra “a”, na coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 95% de probabilidade pelo Teste de Médias de Scott-Knott.

Produtor 1

Produtor 2

Produtor 3

Já o comprimento apresentou valores variando de 10,48 mm a 23,14 mm, onde as amostras A6 e A8 foram semelhantes (produtores 2 e 3) e as amostras A5 e A7 também foram semelhantes entre si (ambas do Produtor 2). Os maiores comprimentos dos *pellets* foram observados para o Produtor 2 e os menores foram do Produtor 1.

Garcia (2010) analisando quatro diferentes *pellets* produzidos a partir de serragem de espécies florestais não identificadas (P1, P2, P3 e P4), obteve resultados similares. O autor destacou que os diâmetros finais não tiveram variações significativas porque todos foram produzidos com uma matriz perfurada com diâmetro padronizado de 6 mm. No entanto, o comprimento mínimo encontrado de 6,6 mm (para os *pellets* P1) e o máximo 34,4 mm (para os *pellets* P4) permitiram verificar que há grandes variações nos processos de fabricação dos mesmos, o que também foi constatado nesse estudo.

Para a densidade aparente os valores variaram de 649,26 kg/m³ a 701,55 kg/m³. Com relação à análise estatística, a densidade aparente formou três grupos, sendo que os *pellets* produzidos pelo Produtor 1 tiveram a maior densidade, tendo uma amostra semelhante aos produtores 2 e 3. O Produtor 2 teve uma amostra semelhante as amostras do Produtor 3.

Os valores obtidos neste trabalho estão de acordo com os valores obtidos por Garcia (2010) e Pastre (2002). Garcia (2010), estudando quatro diferentes procedências de *pellets* obteve valores entre 638,0 kg/m³ e 647,4 kg/m³. Pastre (2002), analisando 22 diferentes amostras de *pellets* de madeira, encontrou valores de densidade aparente na faixa de 520,0 a 640,0 kg/m³.

Em relação à densidade da unidade, as amostras apresentaram valores que variaram de 1630 a 2073 kg/m³. O Produtor 1 produz os *pellets* com maior densidade da unidade (*pellets* de 6 mm de diâmetro), sendo estatisticamente igual ao Produtor 2. Estas duas empresas são estatisticamente diferentes do Produtor 3 que produz os *pellets* com menor densidade da unidade.

Para a durabilidade mecânica, todas as amostras apresentaram valores elevados, acima de 98%, confirmando o estudo de Garcia (2010), que obteve valores entre 96,3 a 98,1%. Ainda segundo o autor, de acordo com o método descrito pela norma CEN/TS 15210-1, os *pellets* de madeira produzidos no Brasil tem alta durabilidade mecânica com medida superior a 80%. O Produtor 1 apresentou a menor durabilidade mecânica e maior produção de finos, sendo diferente estatisticamente dos outros dois produtores, que por sua vez não tiveram diferença estatística entre si.

Quanto à proporção de materiais finos, os *pellets* apresentaram teores que variaram de 0,54 a 1,7%, sendo que o Produtor 1 teve a maior produção de finos e foi estatisticamente diferente dos demais produtores.

Na tabela 7 são apresentados os valores obtidos na caracterização energética dos *pellets* de biomassa florestal estudados.

Tabela 7. Propriedades energéticas dos *pellets* produzidos e comercializados em Santa Catarina.
Table 7. Energetic properties of pellets produced and marketed in Santa Catarina State.

Amostra	Teor de Umidade (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de materiais voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Poder calorífico líquido (MJ/kg)	Densidade energética (GJ/m ³)
A1	7,46 a2	0,25 a1	82,38 a1	17,37 a1	19,84 a3	16,93 a3	13,92 a1
A2	8,67 a3	0,16 a1	81,20 a1	18,64 a1	20,17 a2	16,98 a3	13,54 a1
A3	8,91 a3	0,30 a1	81,21 a1	18,49 a1	20,29 a1	17,04 a2	13,50 a1
A4	8,03 a2	0,18 a1	82,42 a1	17,40 a1	20,49 a1	17,41 a1	13,48 a1
A5	8,67 a3	0,41 a1	81,25 a1	18,34 a1	20,13 a2	16,94 a3	13,08 a2
A6	7,38 a2	0,35 a1	80,44 a1	19,21 a1	20,29 a1	17,36 a2	13,28 a2
A7	8,27 a3	0,77 a1	81,44 a1	17,79 a1	20,38 a1	17,26 a2	13,00 a2
A8	5,91 a1	0,52 a1	81,12 a1	18,36 a1	20,09 a2	17,49 a1	13,34 a2
A9	7,70 a2	0,52 a1	80,13 a1	19,36 a1	20,07a2	17,09 a2	13,50 a1
Média	7,89	0,38	81,29	18,33	20,20	17,17	13,41
Desvio padrão	0,99	0,32	1,05	1,06	0,22	0,25	0,31

Valores seguidos do mesmo número após a letra “a”, na coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 95% de probabilidade pelo Teste de Médias de Scott-Knott.

 Produtor 1

 Produtor 2

 Produtor 3

O teor de umidade é um parâmetro importante porque afeta diretamente no balanço energético da densificação, pois quanto menor o teor de umidade, maior será a produção de calor por unidade de massa (VALE *et al.*, 2000). Além disso, Carvalho (2011) concluiu que os *pellets* tem uma combustão mais eficiente devido ao reduzido teor de umidade (5 a 10%), quando comparado com o da madeira convencional (30 a 60%).

As amostras analisadas nesse estudo apresentaram teor de umidade que variou de 6 a 9%, sendo similar aos resultados de Garcia (2010), que obteve teores entre 6 a 15% em *pellets* produzidos em Santa Catarina, Paraná e São Paulo.

Os *pellets* do Produtor 3 tiveram o menor teor de umidade na amostra coletada na fábrica deste produtor. Esta amostra foi estatisticamente diferente dos outros dois produtores e dos *pellets* coletados nos usuários. Para as demais amostras, foram formados dois grupos que diferiram entre si, mas não houve uma separação clara por origem do produto (produtores).

Os valores de teor de cinzas encontrados nas amostras analisadas foram considerados baixos quando comparados com os obtidos por Garcia (2010), sendo que as amostras não diferiram entre si estatisticamente. Os mesmos variaram de 0,16 a 0,77% e os maiores valores foram observados para os Produtores 2 e 3.

Garcia (2010) encontrou índices de 0,33 a 2,69% e citou que esse maior índice percentual pode ser explicado pela carga de nutrientes e minerais adicionados a planta na sua formação. De acordo com Lehtikangas (2001), valores superiores podem vir de fontes externas como impurezas adquiridas no transporte ou no processamento da matéria-prima.

Os *pellets* apresentaram ainda, teor de materiais voláteis entre 80,44 e 82,42% e carbono fixo entre 17,37 e 19,36%, estando de acordo com a literatura. Obernberger e Thek (2002) e Werther *et al.* (2000) obtiveram, em termos gerais, teores de materiais voláteis entre 75% a 85% e de carbono fixo entre 14% a 25%. Segundo esses autores, combustíveis com alto índice de carbono fixo devem ter queima mais lenta, implicando maior tempo de residência destes dentro dos queimadores, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo. Os dados são semelhantes também com o que foi apresentado por Garcia (2010), em que o teor de materiais voláteis variou de 83,4 a 84,9% e o carbono fixo ficou entre 14,56 e 15,63%. Com relação à análise química imediata (teores de voláteis, carbono fixo e cinzas), não houve diferença estatística entre os produtores.

Avaliando o poder calorífico superior (PCS) observou-se que o mesmo variou de 19,8 MJ/kg a 20,5 MJ/kg. O Produtor 2 produz os *pellets* com maior poder calorífico, tendo somente uma amostra igual estatisticamente aos Produtores 1 e 3. Os resultados apresentaram-se superiores aos encontrados por Garcia (2010), que obteve PCS de 18,71 MJ/kg a 19,48 MJ/kg.

Com relação à densidade energética dos pellets, os valores das amostras variaram entre 13 a 13,92 GJ/m³, formando dois grupos de similaridade estatística. O produtor 1 teve os pellets com maior densidade energética e os dois outros tiveram amostras em ambos os grupos de densidade energética. Garcia (2010) mencionou valores médios de 12,20 GJ/m³, enquanto Lehtikangas (2001) citou valores entre 9,3 a 12,3 GJ/m³ para a densidade energética de pellets, sendo muito próximos aos obtidos neste trabalho.

Considerando-se a adequação das propriedades dos pellets de cada uma das amostras às especificações das normas internacionais apresentadas nas tabelas 2, 3, 4 e 5, pode-se observar que:

- Para o diâmetro dos pellets, somente a amostra A5 não atendeu a variação estabelecida na norma norte americana e nenhuma amostra atendeu as especificações da norma européia. Isso porque esta última norma estabelece valores fixos, sem possibilidade de variação em relação ao valor inteiro. Todas as demais amostras atendem a todas as normas para esta propriedade.
- Para o comprimento dos pellets, todas as amostras atenderam a todas as normas existentes.
- Para densidade aparente somente a amostra A7 não atendeu as especificações das classes P e S da norma norte americana, que são mais restritivas em função da destinação de uso dos pellets (doméstico e serviços).
- Para densidade da unidade, somente a norma austríaca apresenta especificações para esta propriedade, sendo inclusive a norma austríaca utilizada para a determinação da densidade da unidade. Assim, todas as amostras atenderam os parâmetros de controle de qualidade das normas.
- Para durabilidade, todas as amostras atenderam as especificações de todas as normas.
- Para teor de finos, nenhuma amostra atendeu as especificações da classe P da norma norte americana. As amostras A6 e A7 não atenderam a classe G1 da norma suéca, e as amostras A1, A2 e A8 não atenderam as classes S e U da norma norte americana, e nenhuma classe das normas europeia, italiana, a classe G1 da Suécia, e as classes A1, A2 e B da ISO. Em virtude da influência negativa da formação de pó no local de uso dos pellets, essa característica requer maior atenção na produção deste combustível no estado de Santa Catarina. Porém, deve-se considerar que, analisando individualmente, apenas três das nove amostras estudadas apresentaram valores maiores que 1% para o teor de finos.
- Para o teor de umidade, as amostras A2, A3, A4, A5 e A7 não atenderam as especificações da classe P da norma norte americana, pois esta classe é mais restritiva para esta propriedade em função do uso ser doméstico.
- Para teor de cinzas, a amostra A7 não atendeu a classe A1 da norma europeia, a norma alemã, austríaca, a classe G1 suéca, a classe A italiana, e a classe A1 ISO. Além disso, as amostras A8 e A9 também não atenderam a norma austríaca.
- Para poder calorífico superior, com relação à norma europeia, nenhuma amostra atendeu os valores de PCS porque esta norma estabelece um intervalo de valores determinados. No entanto, os valores obtidos nos pellets de todas as amostras catarinenses foram superiores aos determinados na norma. Portanto, considerando que, quanto maior o poder calorífico, melhor a qualidade dos combustíveis, todas as amostras atenderam a todas as normas.
- As propriedades de teor de voláteis e carbono fixo não são especificadas por nenhuma norma.

As tabelas 8 e 9 mostram a comparação entre os valores médios das amostras, para as propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos pellets produzidos em Santa Catarina, e as normas internacionais analisadas.

Ao se avaliar os valores médios obtidos a partir de todas as amostras para as propriedades físicas, mecânicas e energéticas pode-se observar que:

- O valor médio de diâmetro dos pellets não atendeu as especificações das normas italiana e europeia. No entanto, a norma europeia não informa variações admitidas em relação ao valor inteiro, o que gera dúvida na adequação dos valores obtidos.
- Os valores médios de comprimento, densidade aparente, densidade da unidade, durabilidade mecânica, teor de umidade e teor de cinzas dos pellets atenderam as especificações de todas as normas analisadas.
- O valor médio de teor de finos não atendeu as normas europeia, norte americana, a classe G1 da suéca, as classes A e B da italiana e as classes A1, A2 e B da ISO.
- O poder calorífico superior não atendeu as especificações da norma europeia, porém os valores médios obtidos no estudo foram superiores aos exigidos pela norma, o que é bom em termos energéticos.

Tendo em vista que os principais usos dos *pellets* produzidos no estado de Santa Catarina são no setor de serviços e no setor industrial, de forma geral, os valores das propriedades analisadas atendem aos critérios exigidos pelas normas internacionais e, as variações constatadas para o diâmetro e o teor de finos não são suficientes para inviabilizar a comercialização e o uso do produto.

Tabela 8. Qualidade dos *pellets* produzidos em Santa Catarina em comparação com as normas internacionais: europeia, norte americana, alemã, austriaca e italiana.

Table 8. Pellet quality produced in Santa Catarina compared to international standards: European, North American, German, Austrian and Italian

Propriedades	Valores médios	Europa CEN/TS 14961-2			Itália CTI-R 04/05		EUA PFI			Alemanha DIN Plus	Áustria ÖnormM 7135
		A1	A2	B	A	B	P	S	U		
Ø (mm)	6,58	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S
L (mm)	17,31	S	S	S	S	S	-	-	-	S	S
Densidade Apar. (kg/m³)	663,46	S	S	S	S	S	S	S	S	S	-
Densidade Unid. (kg/m³)	1711	-	-	-	-	-	-	-	-	-	S
Durabilidade (%)	99,07	S	S	S	S	S	S	S	S	S	-
Finos < 3 mm (%)	1,05	N	N	N	N	N	N	N	N	-	S
Teor Umidade (%)	7,89	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Teor de Cinzas (%)	0,38	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Teor de Voláteis (%)	81,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbono Fixo (%)	18,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PCS (MJ/kg)	20,21	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S

N: parâmetro não atende a norma; S: parâmetro atende a norma; -: valor não exigido pela norma. A classe C da norma italiana não foi incluída na tabela por se tratar de pellets com diâmetros entre 10 a 25 mm.

Tabela 9. Qualidade dos *pellets* produzidos em Santa Catarina em comparação com as normas internacionais: sueca e da ISO (*International Organization for Standardization.*).

Table 9. Pellet quality produced in Santa Catarina compared to international standards: Swedish and ISO (International Organization for Standardization).

Propriedades	Valores médios	Suécia SS187120			ISO 17225-2					
		G1	G2	G3	A1	A2	B	I1	I2	I3
Ø (mm)	6,58	S	S	S	S	S	S	S	S	S
L (mm)	17,31	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Densidade Aparente (kg/m³)	663,46	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Densidade Unidade (kg/m³)	1711	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durabilidade (%)	99,07	-	-	-	S	S	S	S	S	S
Finos < 3 mm (%)	1,05	N	S	S	N	N	N	S	S	S
Teor de Umidade (%)	7,89	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Teor de Cinzas (%)	0,38	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Teor de Voláteis (%)	81,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbono Fixo (%)	18,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PCS (kcal/kg)	20,21	S	S	S	S	S	S	S	S	S

N: parâmetro não atende a norma; S: parâmetro atende a norma; -: valor não exigido pela norma.

CONCLUSÕES

Quanto à qualidade e adequação dos *pellets* produzidos em Santa Catarina às normas internacionais de qualidade do produto:

- Comparativamente à literatura e aos parâmetros de qualidade estipulados pelas normas internacionais de qualidade: os *pellets* apresentaram densidade aparente, densidade da unidade, durabilidade mecânica e poder calorífico superior elevados; teor de umidade e teor de cinzas baixos, que conferem boa qualidade aos *pellets*. No entanto, este combustível apresentou alto teor de finos, como característica negativa.
- Os *pellets* de melhor qualidade foram produzidos pelo Produtor 2.
- Todas as amostras analisadas atenderam todas as classes de qualidade de todas as normas para as propriedades de: comprimento dos pellets, densidade da unidade e durabilidade mecânica.
- As propriedades que não atenderam as especificações de pelo menos uma classe de qualidade das normas analisadas foram: o diâmetro dos *pellets*, densidade aparente, teor de finos, teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico superior.
- Os valores médios das propriedades dos *pellets* catarinenses atenderam plenamente as normas alemã e austríaca e as classes G2 e G3 da suéca, e as classes I1, I2 e I3 da ISO, possibilitando o uso dos pellets no setor industrial e de serviços.
- As normas que não foram atendidas pelos *pellets* foram as normas europeia, quanto ao diâmetro e poder calorífico superior; a norte americana, italiana e as classes G1 da suéca e A1, A2 e B da ISO quanto ao teor de finos.

De forma geral, os *pellets* produzidos em Santa Catarina atendem as exigências das normas internacionais de qualidade do produto para uso industrial e no setor de serviços.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762**: Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide and Oxygen Concentrations in Emissions from Natural Gas-Fired Reciprocating Engines, Combustion Turbines, Boilers and Process Heaters using Portable Analyzers. West Conshohocken, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6922**. Carvão vegetal - Ensaio físicos - Determinação da massa específica - Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico ABRAF 2013. Ano Base 2012**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>> Acesso em 25/09/2014.

BRAND, M. A. **Energia De Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência. 2010. 114 p.

CARASCHI, J. C.; GARCIA, D. P. **Pellets de Madeira**: mercado em crescimento. 2013. Disponível em: < http://www.paginasustentavel.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=491:pellets-de-madeira-mercado-em-crescimento&catid=8:artigos&Itemid=17> Acesso em 22/04/2015.

CARVALHO, N. P. R. **Implementação do plano de controlo, inspeção e ensaio na produção de pellets de madeira**. 43 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Instituto Politécnico de Viseu, Portugal, 2011.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valoração energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, Viçosa v. 1, n. 1, p. 71 - 92, 2004. Disponível em: <http://www.renabio.org.br/arquivos/p_vias_biomassa_5919.pdf> . Acesso em 23/09/2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - **DIN 51900**: Determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value (Ed.). Berlin, 2003.

DIAS, J. M. C. de S.; SANTOS, D. T. dos; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 132 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - **Technical Specification CEN/TS 14774-2:2009**: Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - **Technical Specification CEN/TS 15103:** Solid biofuels – Methods for the determination of bulk density. London, 2005a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **Technical Specification CEN/TS 15210-1:** Methods for determination mechanical durability of pellets. Solid biofuels – fuel specification and classes. London, 2005b.

FERREIRA, D. F. **Sisvar** - sistema de análise de variância para dados balanceados. Lavras: UFLA, 1998. 19 p.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Guaratinguetá/ Campus de Guaratinguetá, 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, p. 14 - 18, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-2**. Solid Biofuels – Fuel Specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets. Genebra, Suíça, 9 p. 2014.

LEHTIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, Uppsala, v. 19, n. 20, p. 351 - 360, 2001.

LOUÇÃO, I. J. G. **Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nemátodo de pinheiro, para produção de pellets**. 177 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

NONES, D. L. **Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their composition behaviour. In: THE FIRST WORLD CONFERENCE ON PELLETS. **Proceedings...** Estocolmo, 2002, p. 115 - 121.

OSTREICHES NORMUNGS INSTITUT. **ONORM M 7135**. Compressed wood or compressed bark in natural state - Pellets and briquettes, Requirements and test specifications, Vienna, 2000.

PASTRE, O. **Analysis of the technical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues**. EUBIA, 2002, 107 p.

SOUZA, M. M. de. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de Pinus taeda L.** 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M. de; VEIGA, R. A. de A. Produção de energia do fuste de Eucalyptus grandis Hill Ex-Maiden e acácia mangium Willd em diferentes níveis de adubação, **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83 - 88, 2000.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**. Hamburg, Germany, v. 26, n. 1, p. 1 - 27, feb. 2000.