

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Ronan Corrêa

**UTILIZAÇÃO DE ESPUMA RÍGIDA DE TANINO NA CONFECÇÃO DE
PAINÉIS SANDUÍCHE**

Santa Maria, RS
2019

Ronan Corrêa

UTILIZAÇÃO DE ESPUMA RÍGIDA DE TANINO NA CONFECÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**

Orientador: Profº Dr. Clóvis Roberto Haselein

Santa Maria, RS

Corrêa, Ronan

UTILIZAÇÃO DE ESPUMA RÍGIDA DE TANINO NA CONFECÇÃO DE
PAINÉIS SANDUÍCHE / Ronan Corrêa.- 2019.
67 p.; 30 cm

Orientador: Clóvis Roberto Haselein
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2019

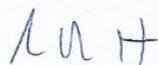
1. Extrato tânico 2. Resistência ao fogo 3. Painéis
estruturais 4. Polímero natural I. Haselein, Clóvis
Roberto II. Título.

Ronan Corrêa

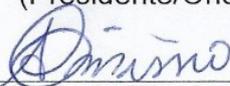
**UTILIZAÇÃO DE ESPUMA RÍGIDA DE TANINO NA CONFECÇÃO DE
PAINÉIS SANDUÍCHE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**

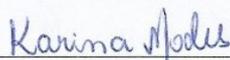
Aprovado em 27 de fevereiro de 2019



Clóvis Roberto Haselein, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



André Luiz Missio, Dr. (UFSM)



Karina Soares Modes, Dra. (UFSC)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus queridos e amados pais,
HAMILTON e ROSANE
grandes apoiadores e
responsáveis pela minha essência.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, pela estrutura, aprendizado e pela oportunidade de desenvolver o presente estudo.

À minha família, em especial aos meus pais Hamilton e M. Rosane e meus irmãos Jota e Vania, pelo amor, carinho, confiança e incentivo em todos os momentos.

À minha companheira Melina, pelo companheirismo, amor, compreensão e por todas as ajudas durante essa caminhada.

À CAPES, pela bolsa concedida durante o período do mestrado.

Ao meu orientador Professor Dr. Clóvis Roberto Haselein, pela confiança, suporte e ensinamentos.

Ao Dr. André Luiz Missio, por toda ajuda e ensinamentos transmitidos para elaboração desse trabalho, e pela amizade e companheirismo.

Aos meus amigos do LPF 88, Rodrigo Coldebella, Marina Gentil, Rossana Cortelini, Camila Berger, Carline Welter, Fernanda Andrade, Bruna Giesbrecht, Henrique Dalla Costa, pela ajuda, amizade, companheirismo e por todos os momentos convividos.

Ao Professor Dr. Pedro Cademartori da UFPR, pela ajuda na realização da análise TGA.

E aos amigos e professores que me ajudaram de alguma maneira durante o período de mestrado.

Muito obrigado!

RESUMO

UTILIZAÇÃO DE ESPUMA RÍGIDA DE TANINO NA CONFEÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHE

AUTOR: RONAN CORRÊA
ORIENTADOR: CLÓVIS ROBERTO HASELEIN

Espumas rígidas de poliuretano (PU) são os materiais de núcleos mais difundidos no mercado de painéis sanduíche, devido as boas propriedades estruturais e versatilidade de aplicações. No entanto, elas são altamente inflamáveis, liberam gases tóxicos e são derivadas do petróleo. Nesse contexto, as espumas rígidas a base de extrato de tanino (TA) são inovadoras e naturais, possuindo como características a excelente resistência ao fogo, baixa emissão de fumaça e gases nocivos. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial das espumas de TA visando a produção de painéis sanduíche. Desta forma, para produção das espumas de TA foi utilizado extrato de tanino de *Acacia mearnsii* De Wild., álcool furfurílico, água destilada, éter dietílico e ácido sulfúrico a 32%. A homogeneização desses componentes gerou um creme viscoso que foi colocado em um molde com faces de MDF. Na sequência, colocou-se em uma prensa hidráulica a 120°C durante 10 min para um controle industrial. Findado o processo, retirou-se as bordas do molde para obtenção do painel sanduíche. Em nível de comparação, foram confeccionados painéis sanduíche de espuma rígida de PU. As espumas e painéis confeccionados de TA e PU foram transformados em corpos de prova, e avaliados por meio de análise morfológica, ensaios físicos, mecânicos e térmicos. Para caracterização morfológica das espumas utilizou-se imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As propriedades físicas avaliadas foram teor de umidade, densidade aparente, absorção de água e inchamento em espessura. Para avaliação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de compressão plana e paralela e flexão estática. Também foram avaliadas as propriedades térmicas através da análise termogravimétrica (TGA) e resistência ao fogo. Os resultados mostraram que as espumas TA possuem uma estrutura celular frágil e quebradiça, com predominância de células abertas de diâmetro médio de 165,99 µm. As análises das propriedades físicas mostram que painéis com espumas TA possuem alta afinidade por água e maior densidade aparente que as espumas PU. Nas análises mecânicas os painéis TA demonstraram ser menos resistentes que os painéis de espuma sintética. Entretanto, as propriedades térmicas das espumas de TA foram superiores, apresentando boa estabilidade térmica e menor perda de massa em relação as espumas PU, devido a capacidade das espumas de auto-extinguir a chama. De modo geral as espumas de TA possuem grande potencial para uso em painéis sanduíche e substituição das espumas sintéticas, principalmente por causa de sua excepcional característica de resistência ao fogo e por serem ecologicamente corretas. No entanto, mais pesquisas precisam ser realizadas a fim de melhorar as propriedades físicas e mecânicas do material.

Palavras-chave: Extrato tânico. Resistência ao fogo. Painéis estruturais. Polímero natural.

ABSTRACT

TANNIN-BASED RIGID FOAMS AS CORE IN SANDWICH PANELS

AUTHOR: RONAN CORRÊA
ADVISOR: CLÓVIS ROBERTO HASELEIN

Rigid polyurethane (PU) foams are the most widespread core materials in the sandwich panel market due to the good structural properties and versatility of applications. However, they are highly flammable materials, release toxic gases and are petroleum derivative. Tannin-based rigid foams (TA) fits as innovative alternative mainly owing great fire resistance, low smoke emission and harmful gases. Therefore, the objective of the study was to evaluate the potential of TA foams for the production of sandwich panels. Thus, for the production of TA foams, tannin extract of *Acacia mearnsii* De Wild., furfuryl alcohol, distilled water, diethyl ether and 32% sulfuric acid was used. They were homogenized generating a viscous cream which was placed in a mold with MDF faces. For industrial control the material was placed in a hydraulic press at 120°C for 10 min. After, the mold was removed to obtain the MDF sandwich panel. At the comparison level, PU rigid foam sandwich panels were made. The foams and panels made of TA and PU were transformed into specimens and evaluated by means of morphological analysis, physical, mechanical and thermal tests. For morphological characterization of foams, was used pictures scanning electron microscopy (SEM). The evaluated physical properties were moisture content, apparent density, water absorption and swelling in thickness. For evaluation of the mechanical properties were carried out tests of flatwise and edgewise compression and static bending. Thermal properties were also evaluated through thermogravimetric analysis (TGA) and fire resistance. The results shown TA foams have a fragile and brittle cell structure, with a predominance of open cells with a mean diameter of 165.99 µm. Panels with TA foams have high affinity for water and higher bulk density than PU foams. In the mechanical analyzes, the TA panels showed less resistance than the synthetic foam panels. However, the thermal properties of TA foams were higher, presenting good thermal stability and lower mass loss in relation to PU foams, due to the ability of the foams to self-extinguish the flame. In general, TA foams have great potential for use in sandwich panels and replacement of synthetic foams, mainly because of their exceptional fire resistance characteristic and because they are ecologically correct. However, more research needs to be done in order to better the physical and mechanical properties of the material.

Keywords: Tannic extract. Fire resistance. Structural panels. Natural polymer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos compósitos.	17
Figura 2 – Composição estrutural do painel sanduíche.	19
Figura 3 – Principais tipos de núcleo para estruturas sanduíche.	21
Figura 4 - Estrutura química do tanino condensável.	25
Figura 5 – Painéis sanduíche: (a) espuma rígida TA; (b) espuma rígida PU.	27
Figura 6 – Ensaio de compressão plana: (a) painel sanduíche TA; (b) painel sanduíche PU.	31
Figura 7 – Ensaio de compressão lateral: (a) painel sanduíche TA; (b) painel sanduíche PU.	32
Figura 8 – Ensaio de flexão estática: (a) painel sanduíche TA; (b) painel sanduíche PU.	32
Figura 9 – Ensaio de resistência ao fogo em um painel sanduíche TA e o equipamento bico de Bunsen: (a) painel sanduíche TA antes do ensaio; (b) painel sanduíche TA exposto a chama.	35
Figura 10 – Imagens de MEV de espumas de TA: a) base do painel TA no aumento de 80x; b) meio do painel, com presença de espaços vazios, no aumento 80x; c) topo do painel no aumento 80x; d) estruturas quebradiças, aumento 200x; e) células fechadas conservadas, aumento 200x; f) célula, aumento 1500x; g) morfologia da parede celular, aumento 6000x; h) poros, aumento 6000x; i) poros, aumento 25000x.	37
Figura 11 – Imagens de MEV para espumas de PU: a) espaço vazio, aumento 80x; b) parede celular perfurada, aumento 200x; c) aumento de 500x; d) ligações entre as células, aumento de 1500x.	38
Figura 12 – Ensaio de absorção de água dos painéis e seus componentes em 2h e 24h.	42
Figura 13 – Ensaio de inchamento em espessura dos painéis e seus componentes em 2h e 24h.	44
Figura 14 - Curva termogravimétrica e sua derivada de espuma TA.	49
Figura 15 - Curva termogravimétrica e sua derivada de espuma PU.	50
Figura 16 – Valores médios de perda de massa de painéis e espumas de TA e PU quando expostos ao fogo.	51

Figura 17 – Painéis e espumas TA e PU pós-combustão: a) painel TA; b) espuma TA;
c) painel PU; d) espuma PU.52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões dos corpos de prova para cada ensaio, segundo normatização.	27
Tabela 2 – Valor médio do teor de umidade obtido para painéis sanduíche, espumas e chapa MDF condicionados a 20°C e 65% de umidade.	39
Tabela 3 – Valor médio da densidade aparente dos painéis sanduíche, espumas e chapa MDF.....	41
Tabela 4 – Valor médio de resistência à compressão plana e lateral para painéis sanduíche.....	45
Tabela 5– Valor médio para as propriedades de flexão estática de painéis TA e PU.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 MATERIAL COMPÓSITO.....	16
2.1.1 Compósitos Estruturais	17
2.1.1.1 <i>Painéis sanduíche</i>	18
2.2 FACES.....	19
2.3 NÚCLEO	20
2.4 ESPUMAS POLIMÉRICAS	22
2.4.1 Espuma rígida de poliuretano	22
2.4.2 Espumas rígida de tanino	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 MATÉRIA-PRIMA	26
3.2 PREPARAÇÃO DAS ESPUMAS E PAINÉIS SANDUÍCHE	26
3.2.1 Espuma rígida de tanino (TA)	26
3.2.2 Espuma rígida de poliuretano (PU)	26
3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	27
3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA	28
3.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	28
3.4.2 Dimensões das células	28
3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	28
3.5.1 Teor de umidade (TU)	28
3.5.2 Densidade aparente	29
3.5.3 Absorção de água e Inchamento em espessura	29
3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	30
3.6.1 Resistência à compressão plana e lateral	30
3.6.2 Ensaio de flexão estática	32
3.7 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	34
3.8 RESISTÊNCIA AO FOGO.....	34
3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 FORMAÇÃO DAS ESPUMAS	36
4.2 ANÁLISE MORFOLÓGICA DAS ESPUMAS	36

4.3 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	39
4.3.1 Teor de umidade (TU).....	39
4.3.2 Densidade aparente.....	40
4.3.3 Absorção de água e Inchamento em espessura.....	42
4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	45
4.4.1 Resistência à compressão plana e lateral.....	45
4.4.2 Ensaio de flexão estática.....	47
4.5 ANÁLISE TÉRMICA (TGA).....	49
4.6 RESISTÊNCIA AO FOGO.....	51
5. CONCLUSÃO.....	54
6. RECOMENDAÇÕES.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
APÊNDICE A – Análise de Variância (ANOVA).....	64

1. INTRODUÇÃO

Ao decorrer das últimas décadas estruturas sanduíche foram objeto de estudo e pesquisa de muitos cientistas, tanto no ponto de vista de substituição dos componentes, como fabricação e design (FUNARI; GRECO; LONETTI, 2018). Essas estruturas são essencialmente baseadas na utilização de duas lâminas de alta resistência e rigidez nas extremidades separadas por um núcleo espesso de baixa densidade (ALLEN, 1969; GAGLIARDO; MASCIA, 2010). Seu arranjo, aliado com a combinação dos materiais formam um produto leve com ótimas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Tais características fazem com que painéis sanduíche sejam amplamente utilizados nas indústrias aeroespacial, automobilística e civil (MANALO et al., 2017).

O material núcleo é um importante componente dos painéis sanduíche, o qual desempenha funções cruciais no sistema estrutural. As espumas rígidas de poliuretano são um dos materiais núcleo mais utilizados e difundidos no mercado dos painéis sanduíche, devido sua versatilidade de aplicações e elevadas propriedades, como: baixa densidade, boa resistência mecânica e facilidade de processamento (LUCKMANN, 2005). Entretanto, espumas de poliuretano são materiais sintéticos altamente inflamáveis, que quando expostos ao fogo emitem gases tóxicos, como monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio e uma alta emissão de fumaça (CIECIERSKA et al., 2015; SANCHEZ, 2017). Incêndios causados pela queima de poliuretanos não é algo raro em nosso país. O incêndio mais conhecido foi a tragédia na Boate Kiss, em Santa Maria – RS, no ano de 2013, o qual a queima das espumas sintéticas causou a morte de centenas de pessoas por asfixia. Desta maneira, a busca por novos materiais que substitua essas espumas sintéticas se faz necessário a fim de prevenir que outras tragédias como essa não se repita. Outra desvantagem é que produtos de PU são derivados do petróleo, e com o aumento do preço das matérias-primas petroquímicas, aliado a diminuição da disponibilidade de petróleo, está levando as indústrias a encontrar alternativas por produtos sustentáveis (JEREZ et al., 2007; PAWLIK; PROCIAK, 2011; TONDI et al., 2014). Nesse contexto, novos produtos ambientalmente corretos e com propriedades equivalentes as espumas convencionais estão sendo desenvolvidos e aperfeiçoados, como é o caso das espumas rígidas à base de extrato de tanino.

Espumas de tanino são materiais poliméricos inovadores e naturais obtidos através da copolimerização do extrato tânico com álcool furfurílico em meio ácido, a reação proporciona a expansão do material que cura simultaneamente com a evaporação de um solvente de baixo ponto de ebulição, resultando em um material leve e poroso (TONDI; PIZZI, 2009; TONDI et al., 2009). A estrutura dessa substância porosa é completamente composta por matérias-primas naturais. O componente majoritário são taninos condensados, produto vegetal presente em várias espécies vegetais, obtido principalmente da casca de árvores de Acácia (*Acacia mearnsii*, *Acacia mollissima*) (TONDI et al., 2009). E o álcool furfurílico derivado furânico obtido por hidrólise e desidrogenação de açúcares de diversas culturas agrícolas (NAGARAJA et al., 2003).

Atrelado as questões ambientais, essas espumas fenólicas têm sido testadas e aperfeiçoadas por diversos pesquisadores. Estudos demonstram a capacidade dessas espumas em equiparar-se as espumas sintéticas, devidos as boas características de isolamento térmico, baixa densidade e custo reduzido (PIZZI et al., 2008; TONDI et al., 2009; BASSO et al., 2015). Ao contrário das espumas PU a principal vantagem das espumas TA é sua excepcional característica de resistência ao fogo, juntamente com sua baixa emissão de fumaça e gases nocivos (TONDI et al., 2009), o que reforça ainda mais o grande potencial dessas espumas em substituir as espumas petroquímicas convencionais nas mais diversas aplicações.

Desta forma, o presente estudo teve como objetivo principal avaliar o potencial de espumas rígidas de tanino visando a produção de painéis sanduíche. Como objetivos específicos, caracterizar e avaliar as propriedades físicas, mecânicas, térmicas das espumas e painéis de TA e PU, comparando-as diretamente. Ao final indicar a melhor utilização dos painéis TA.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MATERIAL COMPÓSITO

Desde tempos remotos até os dias atuais a tecnologia continua em franca ascensão e a procura por novos materiais que atendam as especificações almejadas sempre despertaram interesse de muitos pesquisadores ao redor do mundo (TAPIA, 1998). Com o conhecimento dos vários tipos de compósitos, bem como sua compreensão estrutural, geometria, disposição e propriedades de cada fase constituinte é possível arquitetar materiais com propriedades superiores aquelas encontradas nas ligas metálicas, polímeros e cerâmicas (CALLISTER JR, 2007).

Nas indústrias e no cotidiano está cada vez mais comum a utilização dos compósitos, estando presente de forma representativa nos automóveis, aeronaves e produtos eletrônicos. Este crescente aumento está relacionado a uma série de vantagens e ampla versatilidade que o produto apresenta (GAMA, 2017).

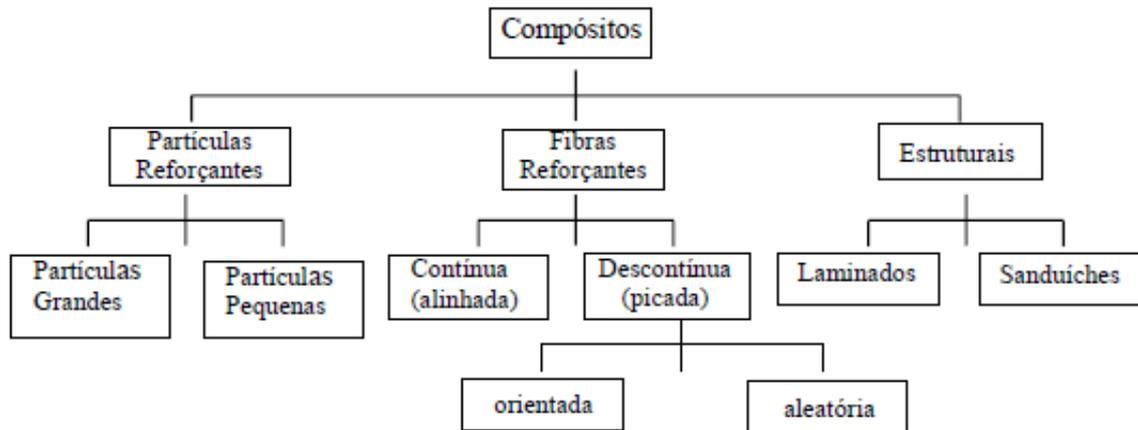
Apesar de soar como um material recente, a arte de combinar materiais já era praticada na antiguidade por egípcios e hebreus, os quais utilizavam palhas secas na fabricação de tijolos, com o objetivo de fornecer resistência mecânica ao material (TAPIA, 1998). Desta forma, o termo compósito pode ser definido com o resultado de um sistema composto pela mistura ou combinações de dois ou mais macroconstituintes distintos em sua forma e/ou composição e que são fundamentalmente insolúveis um ao outro, proporcionando propriedades únicas e diferentes daquelas dos componentes individuais (SCHWARTZ, 1984).

Basicamente, o material compósito apresenta duas fases: a matriz e o elemento de reforço. A matriz é responsável pelo preenchimento, dando forma ao compósito. E o elemento de reforço determina a estrutura interna, o qual realça as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou química do material (SCHWARTZ, 1997). No entanto, painéis laminados e sanduíche não apresentam matriz, sendo compostos apenas por camadas, essas responsáveis pelo formato do material (SCHWARTZ, 1984).

A Figura 1 apresenta a classificação dos compósitos de acordo com a geometria do material de reforço, sendo: reforçados com partículas, reforçados com

fibras e os estruturais (laminares), no qual cada elemento de reforço possui no mínimo duas subdivisões (Figura 1).

Figura 1 - Classificação dos compósitos.



Fonte: (CALLISTER JR, 2007, p. 579).

2.1.1 Compósitos Estruturais

Compósitos estruturais, formam uma importante divisão entre os compósitos, sendo o mais antigo entre eles. Tem como característica marcante a presença de camadas, e por esse motivo são mais fáceis de projetar, produzir e controlar que outros tipos de compósito (SCHWARTZ, 1984).

De acordo com Callister Jr (2007), um compósito estrutural é formado por materiais compostos e homogêneos, o qual as propriedades do produto final não dependerão apenas das propriedades dos materiais constituintes, mas também do desenho geométrico dos vários elementos estruturais presentes. Os dois principais e mais conhecidos tipos de compósitos estruturais são: compósitos laminados e compósitos sanduíche (CALLISTER JR, 2007). Os compósitos laminados são constituídos por várias camadas de lâminas ligadas entre si através de uma cola adesiva, onde a orientação de cada lâmina é variada para melhor atender as especificações de fabricação. O tipo de material, assim como sua espessura e as orientações de cada lâmina fazem com que o produto final apresente características diferentes daquelas vistas nas lâminas individuais (DIACENCO, 2010).

Já os compósitos estruturais do tipo sanduíche são formados por lâminas mais resistentes nas extremidades (faces) e um núcleo constituído por um material de

menor densidade. Os painéis sanduíche são projetados com intuito de serem um material leve, rígido e com resistência relativamente alta, os quais são passíveis de inúmeras combinações diferenciando as formas do núcleo e o material das chapas exteriores (DIACENCO, 2010).

2.1.1.1 *Painéis sanduíche*

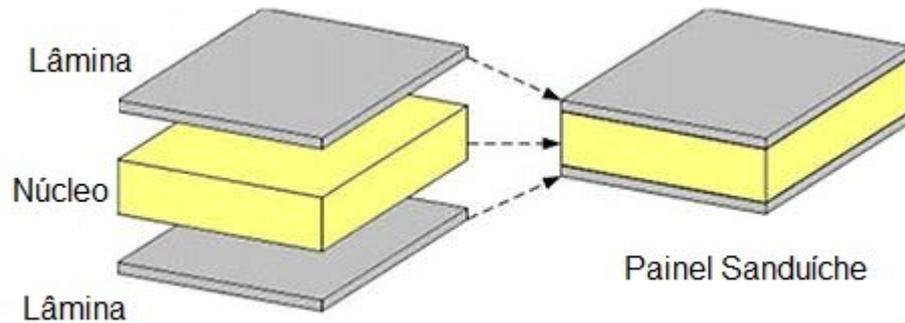
Os primeiros relatos da utilização expressiva de painéis sanduíche ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial. Sendo a primeira grande estrutura a receber tal material a aeronave “mosquito”, o qual era composto por faces de madeira folhada e núcleo de madeira balsa, tal uso ocorreu devido à escassez de materiais na Inglaterra durante a guerra. Entretanto, o princípio da combinação de duas lâminas separadas por uma determinada distância foi introduzido pelo francês Duleau em meados de 1820, e posteriormente Fairbairn discutiu o mesmo princípio na Inglaterra em 1849 (DIAB, 2003). A utilização mais intensa do material começou na década de 50. Na década de 60 surgiram compósitos sanduíche mais avançados, com elevado módulo de elasticidade e resistência, porém, o elevado custo de produção restringia o seu uso às indústrias aeroespacial e naval. Apenas nas décadas de 80 e 90 esses materiais obtiveram seu custo reduzido, despertando interesse de outros setores industriais (ALMEIDA, 2009).

O uso da estrutura do tipo sanduíche vem expandido cada vez mais, resultado da composição específica das camadas, que proporcionam ao material final características de elevado interesse, como, baixo peso, rigidez e resistência à flexão elevadas (ARBAOUI et al., 2009). O primeiro setor a reconhecer tais características e utilizar o produto de forma massiva foi o aeronáutico, o qual o peso e resistência dos materiais é priorizado nos projetos de aviação. Em seguida, indústrias automotivas, civil e mecânica também aderiram ao seu uso, consolidando de vez o material no mercado (GAGLIARDO; MASCIA, 2010).

Os compósitos sanduíche são caracterizados por possuírem a combinação de duas lâminas exteriores composta por algum material rígido e resistente, e no núcleo um material leve e de baixa rigidez e menor resistência em relação as lâminas (ALLEN, 1969; GAGLIARDO; MASCIA, 2010). Em geral a ligação entre as partes é feita através de um elemento adesivo, ou até mesmo pelo próprio material do núcleo.

Na Figura 2, pode ser visualizado os principais componentes de uma estrutura do tipo sanduíche.

Figura 2 – Composição estrutural do painel sanduíche.



Fonte: Adaptação de Sandwich (2017).

São vários os componentes possíveis para compor uma estrutura sanduíche, sendo que combinações do material variam de acordo com o tipo de painel sanduíche, o design e o processo de fabricação o qual se pretende realizar (RØSDAL, 2017). Apesar da grande diversidade de materiais e das diversas configurações já existentes capazes de formar um painel sanduíche, pesquisadores buscam propor novas combinações e materiais, a fim de diversificar o uso e atender as mais elevadas especificações do produto (FERREIRA, 2013).

2.2 FACES

As faces ou lâminas são responsáveis por carregar as tensões de tração e compressão no painel (DIAB, 2003). Deste modo, os materiais que compõe as faces devem atender uma série de requisitos a nível de fabricação, funcionalidade e estruturação (FERREIRA, 2013). Geralmente as lâminas são divididas em dois principais grupos: metálicos e os não metálicos. Os metálicos compreendem as ligas de alumínio, aço e aço inoxidável. O grupo não metálico abrange distintos e inúmeros materiais, os quais pode-se destacar: compensado, plásticos reforçados, cimento, compósitos de fibras, entre outros (ZENKERT, 1995). Apesar dos diferentes materiais que possam vir a envolver as faces de uma estrutura sanduíche algumas propriedades das lâminas são imprescindíveis, como, alta rigidez, alta resistência a tração e

compressão, bom acabamento superficial, resistência ao desgaste, entre outras (ZENKERT, 1995).

As chapas de MDF (Medium Density Fiberboard) segundo Maloney (1996) são definidas como painéis produzidos a partir de fibras celulósicas combinadas com uma resina sintética, presados a quente pelo processo seco, compactados a uma densidade de 500 a 800 Kg/m³. Sua composição é tipicamente composta por 82% de fibras de madeira, 10% de resina sintética, 7% de água e menos de 1% de parafina (RIBEIRO, 2015). Esses painéis surgiram com finalidade de suprir a demanda gerada pela redução da disponibilidade de madeira maciça (MATTOS; GOLÇALVES; LACERDA, 2008).

A vasta utilização de painéis MDF é resultado das inúmeras vantagens que o material apresenta, como, alta relação entre resistência mecânica e massa específica, homogeneidade, ausência de defeitos (nós, desvio de grã), superfície plana e lisa, que permite boa trabalhabilidade, além da possibilidade de controle de suas propriedades durante o processo de formação. Outras características relevantes do MDF é sua vantagem em relação a outros materiais de construção, pois sua matéria-prima é oriunda de fontes renováveis, são biodegradáveis e passivas de reciclagem, além da menor quantidade de energia gasta para produção em relação a materiais como, aço, plásticos, alumínio, etc. (ELEOTÉRIO; TOMAZELLO FILHO; BERTOLETTO JÚNIOR, 2000; TORQUATO, 2008). Tais característica adéquam as chapas de MDF a serem utilizadas como faces em estruturas sanduíche, visto que cumprem os requisitos necessários para uso em painéis sanduíche.

2.3 NÚCLEO

Outro componente de suma importância do painel sanduíche é o material do núcleo, que possui basicamente a função de dar apoio as lâminas, impedindo-as que fiquem deformadas, sustentando a distância entre elas e proporcionando um grau de rigidez mínimo à compressão, evitando o esmagamento do painel. As principais propriedades que o material do núcleo deve possuir são: baixa densidade, resistência ao cisalhamento, isolamento térmico, entre outras que conferem um melhor desempenho do material final (ZENKERT, 1995). Em geral o núcleo pode ser composto por materiais divididos em quatro grupos, sendo, espumas, favo de mel (colmeia), corrugado e madeira (Figura 3).

Figura 3 – Principais tipos de núcleo para estruturas sanduíche.



Fonte: Adaptação de Pflug et al. (2002).

As espumas são o tipo de material mais utilizado como núcleo de painéis sanduíche, geralmente utilizados em aplicações que priorizam a baixa condutividade térmica, baixo peso e custo reduzido (TRIANAFILLOU; GIBSON, 1987). As espumas mais usuais são do tipo polimérica (poliuretano, poliisocianurato, poliestireno) e espumas fenólicas (FERNANDES, 2014).

Os núcleos favo de mel são constituídos por células abertas e geometria tipicamente hexagonal, sendo suas grandes vantagens, o baixo peso, elevada rigidez e alta resistência à compressão, conferindo ao material um bom desempenho por unidade de área (ALMEIDA, 2009; VERAS 2013). Núcleos favos de mel podem ser constituídos de diversos materiais, como, polímeros, alumínio, aramida, papel kraf, entre outros (ALMEIDA, 2009; RØSDAL, 2017).

Os núcleos corrugados e de madeira, são utilizados em menor proporção que os mencionados anteriormente. Núcleos corrugados são estruturas perfiladas, com geometria complexa (VERAS 2013). Núcleo de madeira é utilizado em condições específicas, sendo a madeira mais utilizada pau-de-balsa, devido sua baixa densidade e elevada resistência (FERNANDES, 2014).

2.4 ESPUMAS POLIMÉRICAS

Espumas poliméricas são estruturas porosas constituída por células vazias tridimensionais circundada por uma fase condensada. Esses materiais são produzidos a partir da ação de um agente expensor capaz de gerar espaços vazios (células) no polímero, ou, pela incorporação de polímeros que produzem gás em sua reação de polimerização originando uma estrutura porosa (MACHADO, 2016). As células produzidas podem ser de duas formas, células abertas, que possuem como característica serem interconectadas, e as células fechadas, o qual cada célula individual está envolvida por uma parede (CARVALHO; FROLLINI,1999).

As aplicações desses materiais são muito amplas, uma vez que espumas poliméricas podem serem feitas de quase todos os tipos de polímeros. A escolha da macromolécula irá depender principalmente das suas propriedades, do processo de produção e da economia (POKORNY, 2006). Os polímeros mais comumente utilizados são, poliuretano (PU), polietileno (PE), poliestireno (PS), entre outros.

As propriedades finais almeçadas das espumas poliméricas serão dependentes da morfologia estrutural, densidade aparente e natureza do polímero (CARVALHO; FROLLINI,1999). Muitos autores qualificam as espumas a partir da temperatura de transação vítrea, da composição química, grau de reticulariedade e grau de cristalinidade, classificando-as em flexíveis, rígidas e semi-rígidas (ALMEIDA, 2006).

2.4.1 Espuma rígida de poliuretano

Poliuretanos são materiais poliméricos amplamente utilizados, resultado da sua grande versatilidade, seja na forma de espumas, adesivos, elastômeros e revestimentos. Espumas flexíveis e rígidas consistem nos produtos mais difundidos no mercado dos poliuretanos estando presente de forma significativa nos mais diversos segmentos comerciais (RANDALL; LEE, 2002; MICHALOWSKI; PIELICHOWSKI, 2018).

Segundo Vilar (2004) os poliuretanos foram desenvolvidos em 1937, por Otto Bayer. Bayer estava tentando sintetizar fibras de polímero para competir com o nylon, quando desenvolveu o primeiro poliuretano, sua invenção está entre os maiores avanços na química dos polímeros (SZYCHER, 2012). As propriedades físicas, mecânicas e térmicas das espumas rígida de poliuretano as torna apropriadas para

inúmeras aplicações, como: painéis divisórios, isolamento térmico de refrigeradores e câmara frias, pisos e telhas, componentes de automóveis (LUCKMANN, 2005).

A espuma rígida de poliuretano é produzida a partir da reação de poliadição de um isocianato com um poliol formando ligações repetidas de uretano. Simultaneamente a polimerização dos produtos ocorre a produção do gás CO₂ gerado através da reação do isocianato com a água presente na resina, que CO₂ fica alojado entre as células tridimensionais, contribuindo de forma efetiva para o bom desempenho térmico da espuma. Outros reagentes podem ser acrescentados na mistura para melhorar características específicas, como: agentes de cura e expansão, surfactantes, cargas, catalizadores, retardantes de chama (VILAR, 2004). Além das ligações de uretano, espumas de poliuretano podem conter grupos hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, ésteres, éteres, amidas, ureia e isocianurato (SZYCHER, 2012; BERTOLINI, 2014).

As matérias-primas da espuma de poliuretano podem variar de acordo com o uso final do material. Dentre os isocianatos pode-se destacar o tolueno diisocianato (TDI), difenilmetano diisocianato (MDI) e os isocianatos alifáticos. E para polióis destacam-se os polipropilenoglicóis, polióis poliésteres e polióis de óleo de mamona (VILAR, 2004). Essa grande variedade de substâncias faz com que o poliuretano seja tão difundido no mercado das espumas, pois é possível obter formulações e características específicas para cada uso.

2.4.2 Espumas rígida de tanino

As espumas rígidas de tanino foram desenvolvidas por Meikleham e Pizzi (1994). Essas espumas do tipo fenólicas porosas têm por base produtos de origem natural, representando 95% do material (PIZZI et al., 2008). De acordo com Kolbitsch et al. (2012) o esqueleto da espuma é 100% natural, visto que é feito pela condensação do extrato de tanino e do álcool furfurílico, ambos componentes orgânicos. O tanino, componente majoritário, é obtido através da extração em água quente da casca e madeiras de árvores (TONDI; PIZZI, 2009), enquanto o álcool furfurílico é obtido através da redução catalítica do furfural (NAGARAJA et al., 2003) que é obtido pela hidrólise dos açúcares (hemiceluloses) de diversas culturas agrícolas (AGUILAR et al., 2002).

A espuma rígida de tanino é resultado da capacidade do extrato de tanino em se submeter a reações de poliadição e do álcool furfurílico polimerizar em catálise ácida (TONDI; PIZZI, 2009; TONDI et al., 2009). O processo para formação e obtenção da espuma rígida de tanino consiste basicamente em três fases: mistura, expansão e cura. A mistura é um procedimento em que todos os componentes são agitados mecanicamente a fim de se obter uma mistura homogênea e viscosa. A fase de expansão inicia-se quando o catalizador (ácido forte) é adicionado a mistura. Nesta fase, o álcool furfurílico começa sua autopolimerização e reação com o extrato de tanino, simultaneamente acontece a cura do copolímero, devido a geração de calor da polimerização, evaporando o solvente de baixo ponto de ebulição utilizado como agente de expansão, originando um material poroso e leve (TONDI; PIZZI, 2009; TONDI et al., 2009; KOLBITSCH et al., 2012).

Pesquisas realizadas nas últimas décadas com espuma de tanino mostram o grande potencial do material comercialmente, tal destaque se deve às suas notáveis propriedades, tais como leveza, resistência mecânica similar as espumas petroquímicas, resistência ao fogo, baixa condutividade térmica e facilidade de preparação (SANCHEZ, 2017).

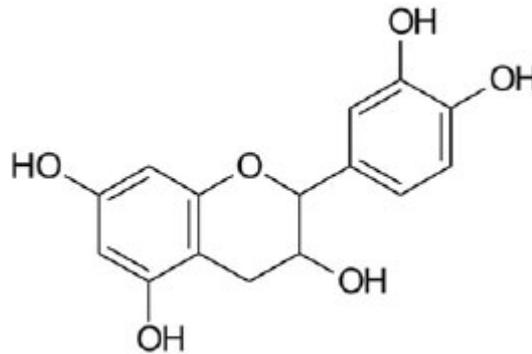
A primeira aplicação deste material poroso foi como espuma floral (MEIKLEHAM; PIZZI 1994), ao longo do tempo as espumas foram aprimoradas e novas aplicações surgiram. Tondi, Pizzi e Olives (2008) a utilizaram como material interno de isolamento para portas de madeira. Tondi et al. (2009) mostraram o potencial da espuma na adsorção de íons metálicos. Link et al. (2011); Basso et al. (2011) desenvolveram espumas de tanino livres de formaldeído com características semelhantes, assim, novas pesquisas de aplicação surgiram, ampliando seu uso para espuma rígidas para isolamento térmico (BASSO et al., 2011; ZHOU et al., 2013; CELZARD et al., 2014) e acústico (LACOSTE et al., 2015).

Principal material utilizado na confecção das espumas rígidas, os taninos são compostos polifenólicos naturais presentes em várias espécies vegetais, que desempenham uma importante função na proteção contra insetos, fungos e alguns herbívoros (HASLAM, 1989; HEMINGWAY; LAKS, 1992). Esses compostos são encontrados em qualquer parte da planta, desde folhas, raízes, casca e lenho (GROSS; HEMINGWAY; YOSHIDA, 1999). As concentrações do tanino podem variar dependendo da idade, tamanho e parte da planta, assim como o ambiente de crescimento do vegetal (MONTEIRO et al., 2005).

A palavra tanino está associada ao curtimento de pele animal desde os tempos antigos, originalmente derivada do termo “tanante” substância capaz de curtir peles, transformando-as em couro (HASLAM, 1989; GONÇALVES; LELIS, 2001). A substância tem atuação adstringente de retirar a água do interstício das fibras, contraindo os tecidos orgânicos, impedindo o seu apodrecimento (GONÇALVES; LELIS, 2001).

Os taninos são classificados em dois grupos: hidrolisáveis e os condensados. Os hidrolisáveis são ésteres de ácidos gálicos e ácidos elágicos glicosilados (MONTEIRO et al., 2005; ARBENZ; AVEROUS, 2015). Enquanto os condensados ou proantocianidinas são oligômeros constituídos por unidades repetitivas de flavonoides (Figura 4).

Figura 4 - Estrutura química do tanino condensável.



Fonte: Angelo e Jorge (2007).

Taninos condensados são considerados os mais importantes no ponto de vista comercial (JORGE et al, 2001). A extração desse composto se dá principalmente por casca de Acácia, (*Acacia mearsii*, *Acacia molissima*) e madeira de Quebracho (*Schinopsis balansae*, *Schinopsi lorentzii*) (TONDI et al., 2009). A utilização dos taninos condensados era inicialmente destinada para curtimento de couros, produção de adesivos e bebidas (SIMÕES et al., 2010). No entanto, pesquisas mais recentes avaliaram o potencial do extrato em atividades antioxidantes e antifúngicas em produtos farmacêuticos (WEI; CHEN; LIN, 2015; AIRES; CARVALHO; SAAVEDRA, 2016; MISSIO et al., 2017), e para revestimentos (PAN et al., 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA-PRIMA

Para formulação da espuma natural a base de tanino, foi utilizado extrato de tanino de *Acacia mearnsii* De Wild. cedido pela Indústria SETA[®], localizada no município de Estância Velha – RS. O material é constituído por 75% de taninos condensáveis e 25% de gomas hidrocoloidais, açúcares e flavan-3-ol. Os reagentes álcool furfurílico (98%) e éter dietílico 99,9% de pureza foram fornecidos pela Sigma-Aldrich e o ácido sulfúrico (95-98%) diluído a concentração de 32% foi adquirido através da empresa G.Gotuzzo.

A espuma de poliuretano (PU) foi produzida a partir da combinação de Polioli e Isocianato, adquiridos da empresa Redelease[®]. As chapas de MDF cru com espessura de 3 mm utilizadas nas faces de ambos os painéis foram obtidas no comércio local da cidade de Santa Maria – RS.

3.2 PREPARAÇÃO DAS ESPUMAS E PAINÉIS SANDUÍCHE

3.2.1 Espuma rígida de tanino (TA)

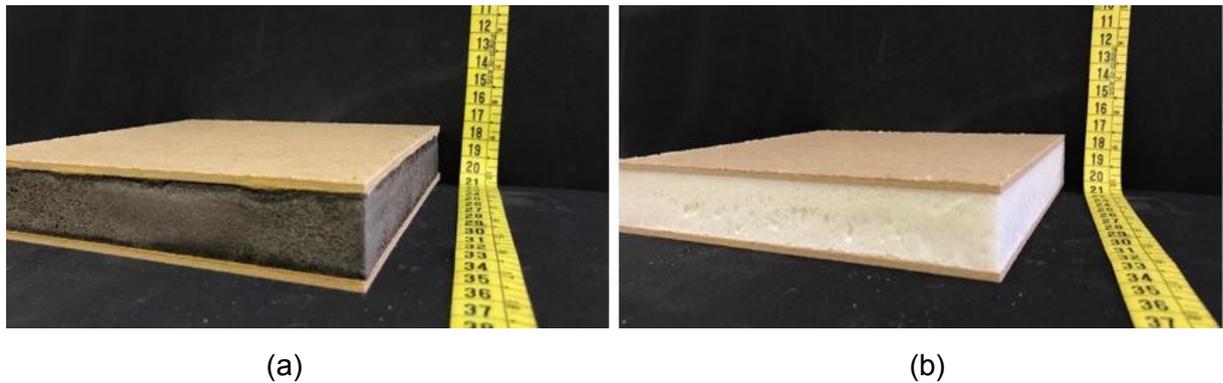
As espumas rígidas de tanino foram preparadas da seguinte forma: álcool furfurílico (46,87 g), água destilada (46,87 g) e éter dietílico (9,37 g) foram misturados com 187,5 g de extrato de tanino sob agitação manual. Após a homogeneização, adicionou-se 62,5 g de ácido sulfúrico (32% de concentração) como agente catalizador e homogeneizou-se a mistura por aproximadamente 30 s. Para confecção do painel, a mistura foi colocada em um molde de 25 x 25 x 2,5 cm sendo a última dimensão a espessura, com chapas de MDF nas duas faces e levadas a uma prensa hidráulica a 120°C, sem pressão durante 10 min. Posteriormente, esperou-se o material esfriar e retirou-se as bordas do molde a fim de se obter o painel sanduíche (Figura 5a).

3.2.2 Espuma rígida de poliuretano (PU)

A espuma rígida de poliuretano (PU) foi preparada por meio da adição de 90,8 g (52,5%) de isocianato e 82,17 g (47,5%) de polioli, que foram misturados com auxílio

de uma furadeira, até ficar com aspecto de creme. Após, a mistura foi colocada em molde de 25 x 25 x 2,5 cm com fundo de MDF e aguardou-se as reações químicas processarem por completo para que o excesso de espuma fosse removido. Para montar o painel sanduíche (Figura 5b) foi necessário preparar uma pequena quantidade da mistura de isocianeto e polioliol nas mesmas proporções anteriores a fim de aderir a espuma com a chapa de MDF na face superior.

Figura 5 – Painéis sanduíche: (a) espuma rígida TA; (b) espuma rígida PU.



3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Ao todo foram produzidos 8 painéis sanduíche de 25 x 25 x 3 cm para cada tipo de espuma, os painéis foram transformados em corpos de prova no Laboratório de Produtos Florestais, com dimensões específicas segundo normatização utilizada para cada tipo de ensaio, conforme tabela 1. Posteriormente, os corpos de prova foram levados a câmara climatizada a 20°C e 65% de umidade para condicionamento.

Tabela 1 – Dimensões dos corpos de prova para cada ensaio, segundo normatização.

Ensaio	Dimensões L x C x E (cm)			Norma/Procedimento
	Painéis	Espuma	MDF	
Teor de Umidade	5 x 3,5 x 3	5 x 5 x 2,3	5 x 5 x 0,3	—
Densidade Aparente	5 x 5 x 3	5 x 5 x 2,3	5 x 5 x 0,3	ASTM D1622 – 14
Absorção/ Inchamento	5 x 5 x 3	5 x 5 x 2,3	5 x 5 x 0,3	—
Compressão plana	5 x 5 x 3	—	—	ASTM C365-16
Compressão lateral	6 x 12 x 3	—	—	ASTM C364-16
Flexão estática	7,5 x 2 x 3	—	—	ASTM C393-16
Resistência ao fogo	5 x 5 x 3	5 x 5 x 2,3	—	Tondi et al (2009)

L = largura; C = comprimento e E = espessura.

3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

3.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das amostras de espumas foi analisada usando um microscópio eletrônico de varredura marca TESCAN modelo VEGA 3 SBU do Laboratório de Processos Ambientais – LAPAM do curso de Engenharia Química - UFSM. As amostras foram postas em um suporte metálico (*stub*) e submetidas à metalização em ouro, a fim de possibilitar a condutividade elétrica. A visualização foi realizada com aumentos de 80; 200; 500; 1500; 6000 e 25000x nas posições base, meio e topo das amostras.

3.4.2 Dimensões das células

A partir das imagens obtidas na MEV mediu-se 100 valores de diâmetro de célula para cada tipo de espuma (50 medidas de comprimento e 50 medidas de espessura) com auxílio de um software específico. O diâmetro médio foi calculado através da Equação empírica 1 proposta por Tondi et al. (2009).

$$D = (\pi/4) \cdot D\bar{x} \quad (1)$$

Onde:

D = Diâmetro das células, μm ;

$D\bar{x}$ = Média dos 100 valores medidos, μm .

3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS

3.5.1 Teor de umidade (TU)

Na obtenção do teor de umidade, cinco corpos de prova de cada tipo de material foram inicialmente climatizados a 20°C e 65% de umidade relativa. Em seguida os mesmos foram pesados em balança analítica com precisão de 0,01 g, posteriormente colocados em estufa a 105±3°C e pesados após atingirem massa

constante, obtendo-se o peso seco. O teor de umidade foi determinado conforme Equação 2.

$$TU\% = \frac{Mu - Ms}{Ms} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

TU% = Teor de umidade, %;

Mu = Massa do corpo de prova climatizado a 20°C e 65% de umidade relativa, g;

Ms = Massa do corpo de prova seco em estufa a 103°C, g.

3.5.2 Densidade aparente

Para determinação da densidade aparente dos materiais seguiu os procedimentos descritos na norma ASTM D1622 – 14, (Equação 3). Foram realizadas cinco repetições, com amostras de 5 x 5 x 3 cm para os painéis sanduíche e amostras de 5 x 5 x 2,3 cm para as espumas. As dimensões das amostras foram medidas com auxílio de paquímetro digital e a massa dos corpos de prova foi obtida com balança analítica.

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Onde:

D = Densidade da amostra, Kg/m³;

M = Massa da amostra, Kg;

V = Volume da amostra, m³.

3.5.3 Absorção de água e Inchamento em espessura

Para determinação dessas propriedades, cinco corpos de prova de cada material foram pesados e medidos em temperatura ambiente, posteriormente, foram submetidos a imersão repetida de 2h e 24h em água destilada. As amostras foram novamente pesadas e medidas ao fim dos respectivos tempos. O cálculo para

absorção de água e inchamento em espessura foi realizado por meio das equações 4 e 5, respectivamente.

$$AA\%_{2h;24h} = \frac{P_{ta} - P_{2h;24h}}{P_{2h;24h}} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

AA% = Absorção de água em 2h e 24h, %;

P_{ta} = Peso da amostra em temperatura ambiente;

P_{2h;24h} = Peso da amostra após imersão em água por 2h e 24h.

$$IE\%_{2h;24h} = \frac{E_{ta} - E_{2h;24h}}{E_{2h;24h}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

IE% = Inchamento em espessura em 2h e 24h, %;

E_{ta} = Espessura da amostra em temperatura ambiente;

E_{2h;24h} = Espessura da amostra após imersão em água por 2h e 24h.

3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.6.1 Resistência à compressão plana e lateral

A resistência à compressão dos corpos de prova dos painéis de espuma de TA e PU foram avaliadas seguindo os procedimentos da ASTM C365-16 para compressão plana e ASTM C364-16 para compressão lateral. Cinco repetições foram avaliadas para cada tipo de material. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos – LADIPP, localizado na UFSM. O equipamento utilizado foi uma Máquina Universal de Ensaio, modelo DL 2000, com capacidade de carga de 20 KN. Para os ensaios de compressão plana aplicou-se uma carga de 5 KN, a uma velocidade de 0,25 mm/min, com deformação máxima de 10%, conforme visto na Figura 6. O cálculo para resistência máxima em compressão plana foi realizado por meio da Equação 6.

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A} \quad (6)$$

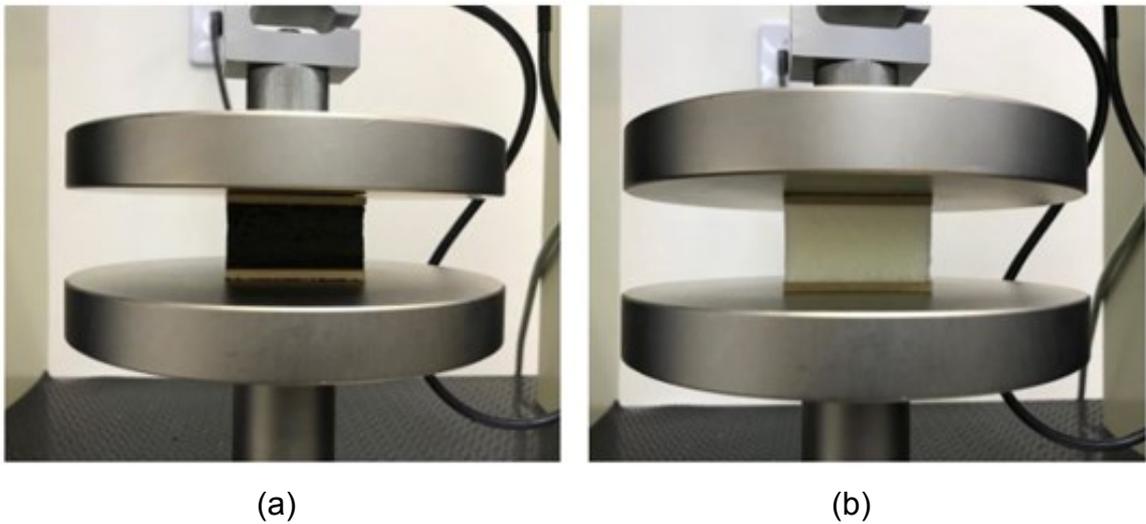
Onde:

$\sigma_{\text{máx}}$ = Resistência máxima à compressão plana, MPa;

$F_{\text{máx}}$ = Força máxima antes da falha, N;

A = Área do corpo de prova, mm².

Figura 6 – Ensaio de compressão plana: (a) painel sanduíche TA; (b) painel sanduíche PU.



Para o ensaio de compressão lateral aplicou-se uma carga de 5 kN, a uma velocidade de 0,50 mm/min, com deformação máxima de 10%, conforme visto na Figura 7. Para o cálculo da resistência máxima em compressão lateral utilizou-se a Equação 7.

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A} \quad (7)$$

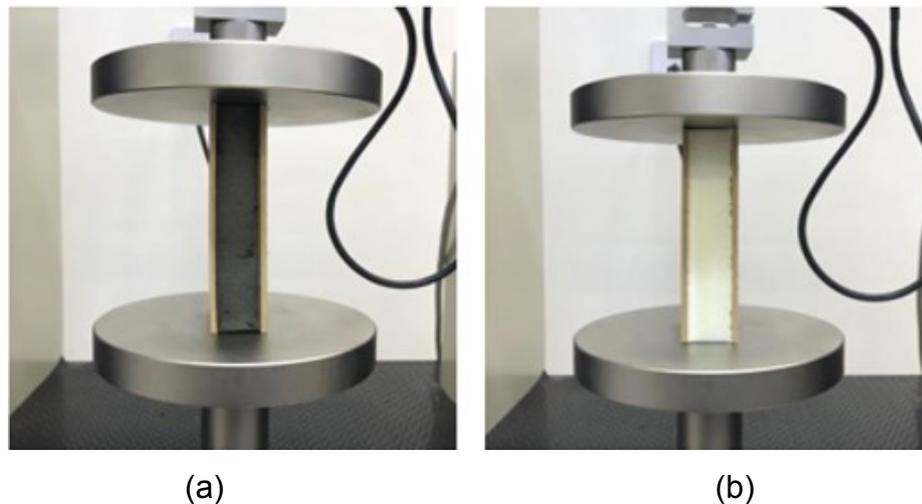
Onde:

$\sigma_{\text{máx}}$ = Resistência máxima à compressão lateral, MPa;

$F_{\text{máx}}$ = Força máxima antes da falha, N;

A = Área do corpo de prova, mm².

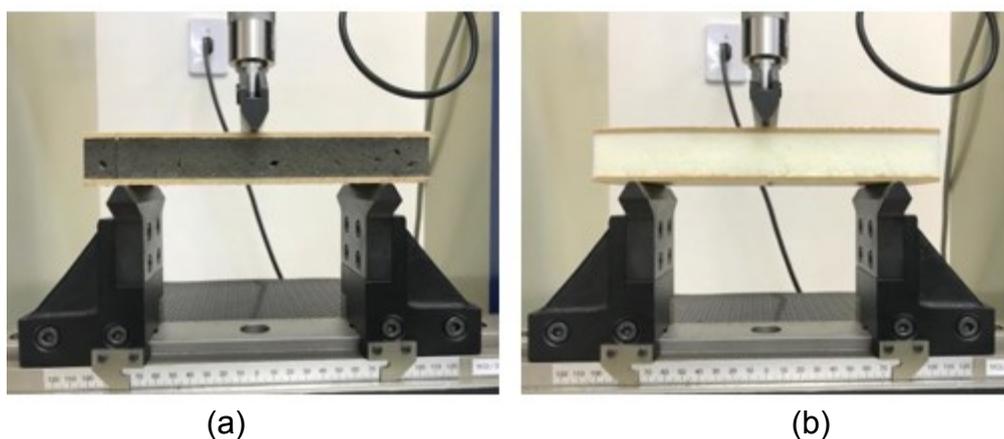
Figura 7 – Ensaio de compressão lateral: (a) painel sanduíche TA; (b) painel sanduíche PU.



3.6.2 Ensaio de flexão estática

Cinco corpos de prova para cada tipo de material foram submetidos a flexão estática a fim de determinar a resistência e rigidez dos painéis sanduíche e a resistência do núcleo. Para realização do ensaio utilizou-se o método de carregamento de 3 pontos, conforme descrito pela norma ASTM C393-16. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos – LADIPP, localizado na UFSM, e o equipamento utilizado foi uma Máquina Universal de Ensaio, modelo DL 2000, com capacidade de carga de 20 KN. Aplicou-se uma carga de 5 KN a velocidade de 0,20 mm/min, até a ruptura dos corpos de prova (Figura 8).

Figura 8 – Ensaio de flexão estática: (a) painel sanduíche TA; (b) painel sanduíche PU.



A partir das informações de força e deformação, calculou-se o módulo de elasticidade (MOE) (Equação 8), módulo de ruptura (MOR) (Equação 9) e resistência máxima do núcleo (Equação 10).

$$\text{MOE} = \frac{1}{4} \cdot \frac{F}{D} \cdot \frac{L^3}{b(h^3)} \quad (8)$$

Onde:

MOE = Módulo de elasticidade, MPa;

F = Força elástica linear, N;

D = Deformação, mm;

L = Largura do vão, mm;

b = Largura do corpo de prova, mm;

h = Espessura corpo de prova, mm.

$$\text{MOR} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\text{máx}}}{b(h^2)} \quad (9)$$

Onde:

MOR = Módulo de ruptura, MPa;

$F_{\text{máx}}$ = Força máxima antes da falha, N;

b = Largura do corpo de prova, mm;

h = Espessura corpo de prova, mm.

$$R_{\text{max núcleo}} = \frac{F_{\text{máx}}}{(h+c) b} \quad (10)$$

Onde:

$R_{\text{max núcleo}}$ = Resistência máxima do núcleo, MPa;

$F_{\text{máx}}$ = Força máxima antes da falha, N;

h = Espessura corpo de prova, mm;

c = Espessura do núcleo, mm;

b = Largura do corpo de prova, mm;

3.7 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A caracterização TGA foi realizada na Embrapa Florestas (Colombo-PR) no equipamento analisador termogravimétrico SDT Q600 (TA Instruments, New Castle, DE, USA). Amostras das espumas de TA e PU de aproximadamente 2 mg de massa foram aquecidas de 30°C a 1000°C com taxa de aquecimento de 20°C/min em atmosfera inerte de nitrogênio (fluxo de gás 25 ml/min).

3.8 RESISTÊNCIA AO FOGO

Para determinação da resistência ao fogo, amostras dos painéis sanduíche e espumas de TA e PU com densidades similares foram expostas facialmente à chama azul de um bico de Bunsen por 60 segundos para os painéis sanduíche e 30 segundos para as espumas. Após o período estabelecido, cronometrou-se o tempo até a chama apagar, considerou-se a chama extinta quando o brilho gerado nas espumas desapareceu. A análise de resistência ao fogo se deu através da perda de massa dos materiais. A realização da análise foi executada dentro de uma capela de exaustão. Cinco repetições foram avaliadas para cada tipo de material. Na Figura 9, pode ser visto o ensaio em um painel de espuma TA. A perda de massa de cada material foi determinada conforme Equação 11.

$$PM = \frac{PI - PF}{PI} \cdot 100 \quad (11)$$

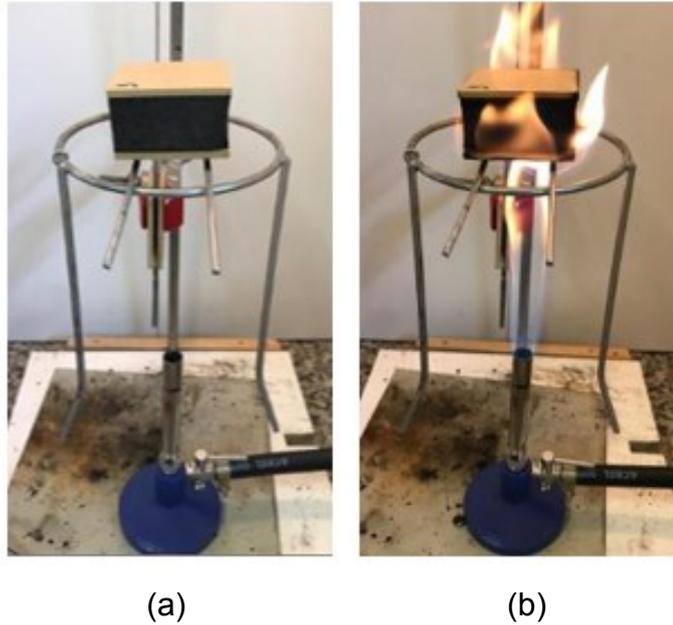
Onde:

PM = Perda de massa, %;

PI = Peso inicial da amostra, g;

PF = Peso final pós-combustão, g.

Figura 9 – Ensaio de resistência ao fogo em um painel sanduíche TA e o equipamento bico de Bunsen: (a) painel sanduíche TA antes do ensaio; (b) painel sanduíche TA exposto a chama.



3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados referentes ao estudo foram analisados com o auxílio de planilhas eletrônica, utilizando-se os programas Excel® 2013 e o software R. Primeiramente verificou-se a normalidade e homogeneidade de variância dos dados. A partir da validação, os dados foram interpretados através da análise de variância (ANOVA) por meio do teste F em 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FORMAÇÃO DAS ESPUMAS

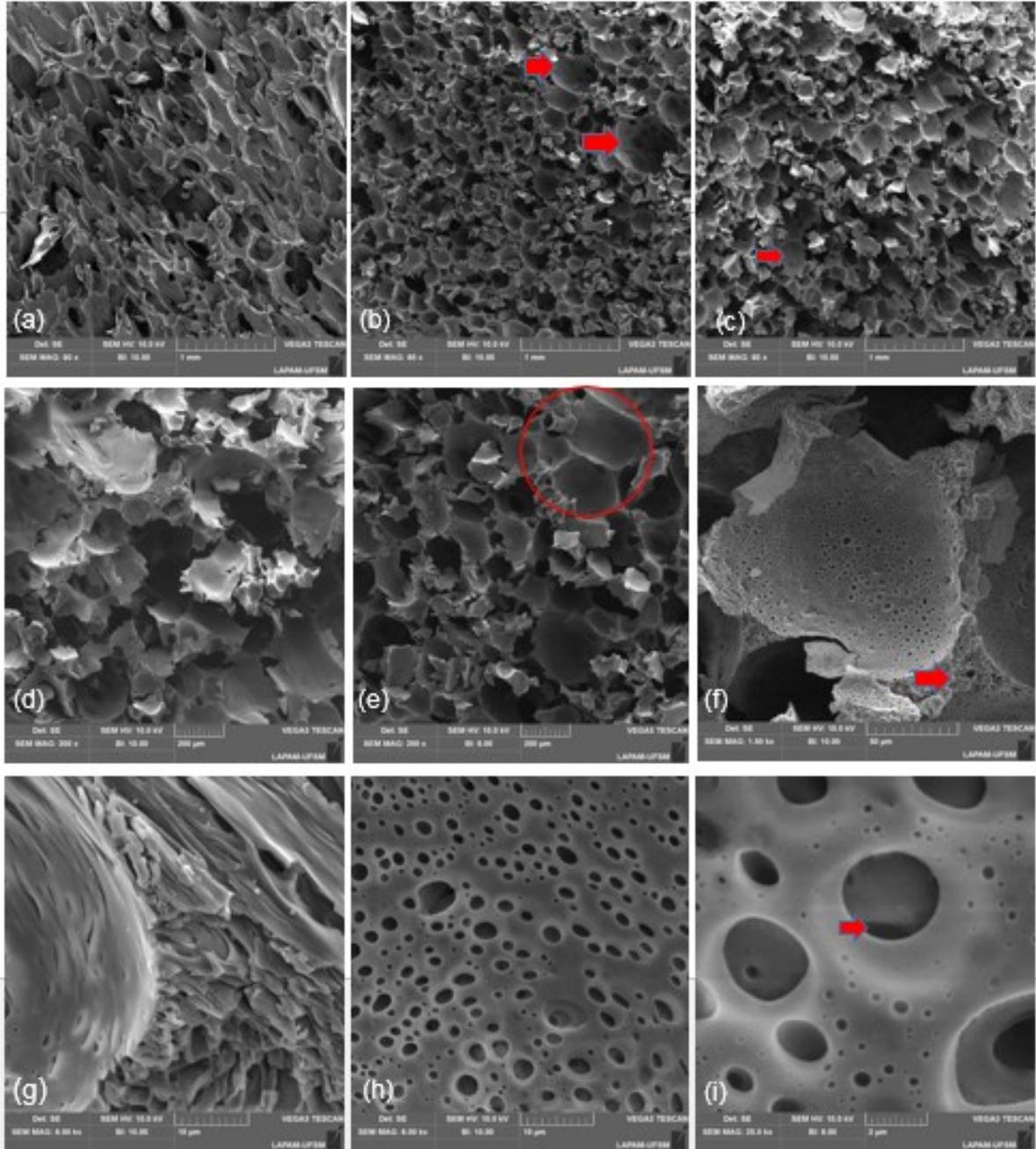
As espumas rígidas de TA foram formuladas e desenvolvidas visando um produto natural, sendo assim, não se fez uso do produto químico formaldeído. A escolha da formulação se deu através de pré-avaliações, o qual a melhor combinação dos constituintes foi submetida aos testes. A base para as avaliações eram aspectos visuais da mistura, bem como, expansão e cura. Misturas com grandes quantidades de extrato de tanino eram muito viscosas e conseqüentemente não homogêneas, o qual gerava pequenas porções de partículas aglomeradas, prejudicando o processo de formação do material, resultando em uma espuma pesada e de má formação. Já misturas com excesso de reagentes acelerava o processo de reação, estimulando um elevado sopro, produzindo grandes volumes de espumas quebradiças e com cavidades vazias. Por essa razão, buscou-se o equilíbrio ideal entres os componentes, fixando a relação de sólidos a 53% e 47% de líquidos.

O processo de formação das espumas rígidas de PU foram seguidas de acordo com as especificações do fabricante em 52,5% de isocianato e 47,5% de polioliol, o creme produzido era altamente viscoso, de rápida expansão e com crescimento desuniforme, que se tornou uma dificuldade na produção dos painéis, pois, a relação de catalise informada pelo fabricante não era suficiente para conformar o material nas caixas modeladoras. Como consequência se fez necessário aumentar a quantidade de PU, produzindo um grande volume de espuma excedendo os limites da caixa, para confecção do painel precisou cortar o excesso de material para depois unir a lâmina de MDF, processo desnecessário nos painéis de espuma de TA.

4.2 ANÁLISE MORFOLÓGICA DAS ESPUMAS

A morfologia das estruturas celulares das espumas TA e PU são mostradas nas figuras 10 e 11, respectivamente.

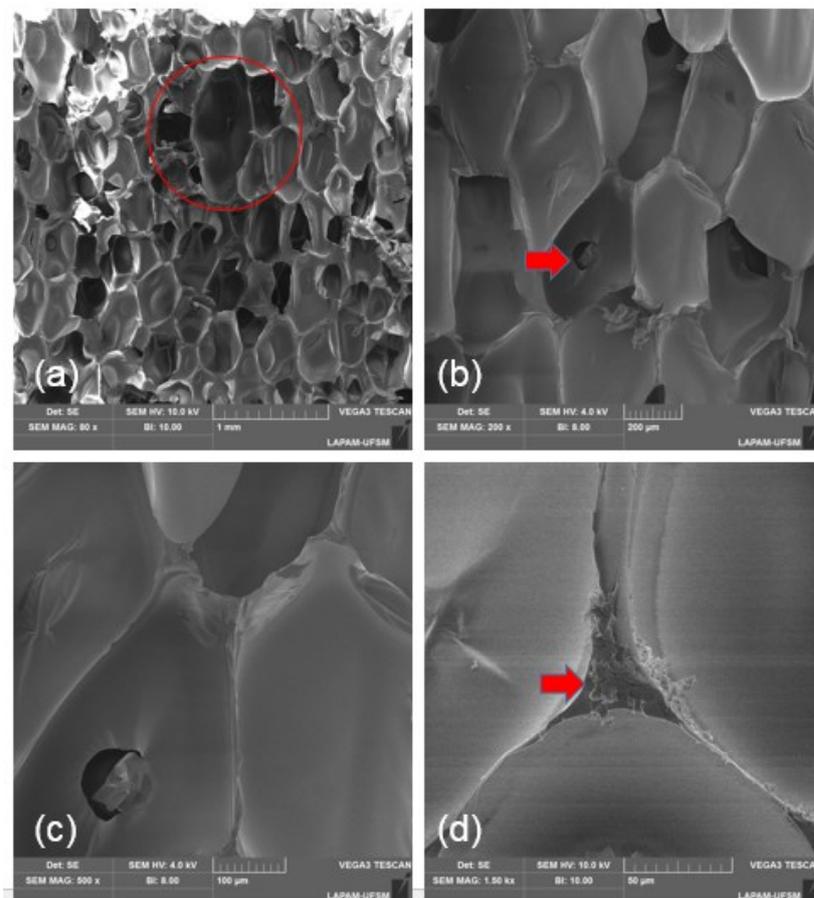
Figura 10 – Imagens de MEV de espumas de TA: a) base do painel TA no aumento de 80x; b) meio do painel, com presença de espaços vazios, no aumento 80x; c) topo do painel no aumento 80x; d) estruturas quebradiças, aumento 200x; e) células fechadas conservadas, aumento 200x; f) célula, aumento 1500x; g) morfologia da parede celular, aumento 6000x; h) poros, aumento 6000x; i) poros, aumento 25000x.



As imagens da espuma de TA apresentadas na Figura 10 em diferentes aumentos mostram uma estrutura irregular em relação a tamanho e forma das células. Observa-se que a característica da estrutura é de parede celular espessa com predominância de células abertas, entretanto com presença de células fechadas. O

diâmetro médio das células é de aproximadamente 165,99 μm , valor condizente com estudos realizados por Tondi et al. (2014) com densidades aproximadas de espuma de tanino. Uma peculiaridade encontrada na estrutura da parede das células mostra que apesar do formato ser de células fechadas, a parede celular possui orifícios de aproximadamente 2 μm (Figura 10i) que permitem uma interligação entre elas, tal característica também foi observada por Carvalho e Frollini (1999) em espumas fenólicas com lignina, que mencionam que essa formação de poros na parede celular é comum em espumas orgânicas. Com a micrografia detalhada foi possível identificar vários espaços vazios e células frágeis e quebradiças (Figura 10b; c). A Figura 10a; b; c, mostram o comportamento da base, meio e topo das espumas de TA no sentido crescente, observa-se que no início da formação do material não há presença de células definidas, à medida que ocorre a expansão da espuma as células vão se formando até atingirem seu formato original no topo do painel.

Figura 11 – Imagens de MEV para espumas de PU: a) espaço vazio, aumento 80x; b) parede celular perfurada, aumento 200x; c) aumento de 500x; d) ligações entre as células, aumento de 1500x.



Nas imagens da estrutura celular da espuma de PU (Figura 11), observa-se uma estrutura geométrica organizada e homogênea de células fechadas, com forte ligação entre elas (Figura 11d), o qual são responsáveis por prender o gás gerado no processo de expansão da espuma. O diâmetro médio das células de poliuretano é de aproximadamente 344,48 μm . A Figura 11b mostra pequenos buracos presentes na parede celular, responsáveis por possíveis vazamento do gás e entrada de líquidos quando exposta a tais condições.

De maneira geral, as características morfológicas da espuma de TA são diferentes em relação a espuma sintética, o diâmetro médio das células da espuma de PU é mais que o dobro das células de tanino, essa diferença é comprovada estatisticamente através da análise de variância ($F = 175,42$; $p < 0,05$) ao nível de 95% de confiança (APÊNDICE A). Algumas medidas podem ser tomadas a fim de melhorar as características morfológicas das espumas de TA, como: adequar e otimizar o processo de formação das espumas e fazer uso de surfactantes, Basso et al. (2014) relata que a incorporação de uma pequena proporção de surfactante não iônico leva a uma distribuição de tamanho de célula mais homogênea.

4.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

4.3.1 Teor de umidade (TU)

Os valores médios do teor de umidade dos painéis sanduíche e seus componentes são apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valor médio do teor de umidade obtido para painéis sanduíche, espumas e chapa MDF condicionados a 20°C e 65% de umidade.

Material	TU (%)	CV (%)
Painéis TA	12,16 \pm 0,22 b	1,79
Painéis PU	6,52 \pm 0,15 a	2,27
Espumas TA	15,47 \pm 0,52 b	3,35
Espumas PU	5,55 \pm 0,49 a	8,75
Chapas MDF	7,99 \pm 0,09	1,13

Os dados são apresentados como médias \pm desvio padrão. CV (%) = Coeficiente de variação, %. Valores seguidos da mesma letra na coluna não apresentam diferença estatisticamente significativa, ao nível de 95% de confiança.

Os painéis com núcleo de espuma de TA obtiveram valores maiores de teor de umidade em comparação aos painéis com espumas de PU. Nas espumas a diferença entre os materiais está mais acentuada, espumas de TA apresentaram um teor de umidade quase três vezes maior em relação a espuma comercial (Tabela 2). Essas diferenças significativas foram comprovadas estatisticamente através da análise de variância ($F = 2285,9$; $p < 0,05$ painéis) e ($F = 976,37$; $p < 0,05$ espumas) ao nível de 95% de confiança (APÊNDICE A). O valor médio do teor de umidade para as chapas MDF ficou próximo a 8%, valor que se enquadra nos critérios estabelecidos para painéis MDF (ABIPA, 2014).

Essa discrepância encontrada nos valores é resultado da interação dos constituintes de cada material com a água. Espumas à base de extrato de TA possuem uma grande quantidade de hidroxilas em sua estrutura polimérica, o que caracteriza o material como hidrofílico (SANCHEZ, 2017). Já o comportamento hidrofóbico das espumas rígidas de poliuretano pode estar relacionado ao tipo de polioliol utilizado (VILAR, 2004). A diferença do TU entre os painéis de espuma de TA (12,16%) para as espumas TA (15,47%) está associado a área superficial da espuma exposta, as lâminas de MDF reduziram a área superficial da espuma, restringindo a adsorção de umidade no material.

Outra possível justificativa referente ao alto teor de umidade presente nas espumas de TA é que, utilizou-se um excesso de mistura nas caixas modeladoras, como a expansão da espuma não foi livre, o tempo mantido em prensa à 120°C não foi suficiente para curar o material completamente. Essa hipótese parte do princípio que a mistura é composta por 47% de substâncias líquidas e que necessita de um certo tempo para que a temperatura consiga atravessar as faces do painel e propague o calor uniformemente em toda a mistura.

4.3.2 Densidade aparente

A densidade quando aplicada a polímeros rígidos refere-se a sua densidade aparente, o qual é definida pela razão entre o peso e o volume do polímero (HOLLAWAY, 1993). Nas espumas poliméricas é uma propriedade fundamental, pois implica diretamente nas propriedades mecânicas, termofísicas e elétrica dos materiais (CARVALHO; FROLLINI, 1999).

A Tabela 3 apresenta os valores médios da densidade aparente dos painéis sanduíche e seus componentes.

Tabela 3 – Valor médio da densidade aparente dos painéis sanduíche, espumas e chapa MDF.

Material	Densidade (kg/m³)	CV (%)
Painéis TA	298,78 ± 5,57 a	1,86
Painéis PU	226,65 ± 8,10 b	3,57
Espumas TA	127,86 ± 3,37 a	2,63
Espumas PU	48,33 ± 2,47 b	5,12
Chapas MDF	789,58 ± 4,88	0,62

Os dados são apresentados como médias ± desvio padrão. CV (%) = Coeficiente de variação, %. Valores seguidos da mesma letra na coluna não apresentam diferença estatisticamente significativa, ao nível de 95% de confiança.

Como era de esperar painéis confeccionados a partir de espuma de TA apresentaram aproximadamente 32% a mais de peso por unidade de área em relação aos painéis com espuma comercial. Nas espumas essa percentagem aumenta, aproximando-se dos 165% (Tabela 3). Essa diferença entre os valores é comprovada estatisticamente pela ANOVA (F = 269,12; p < 0,05 painéis) e (F = 1826,1; p < 0,05 espumas), ao nível de 95% de confiança (APÊNDICE A).

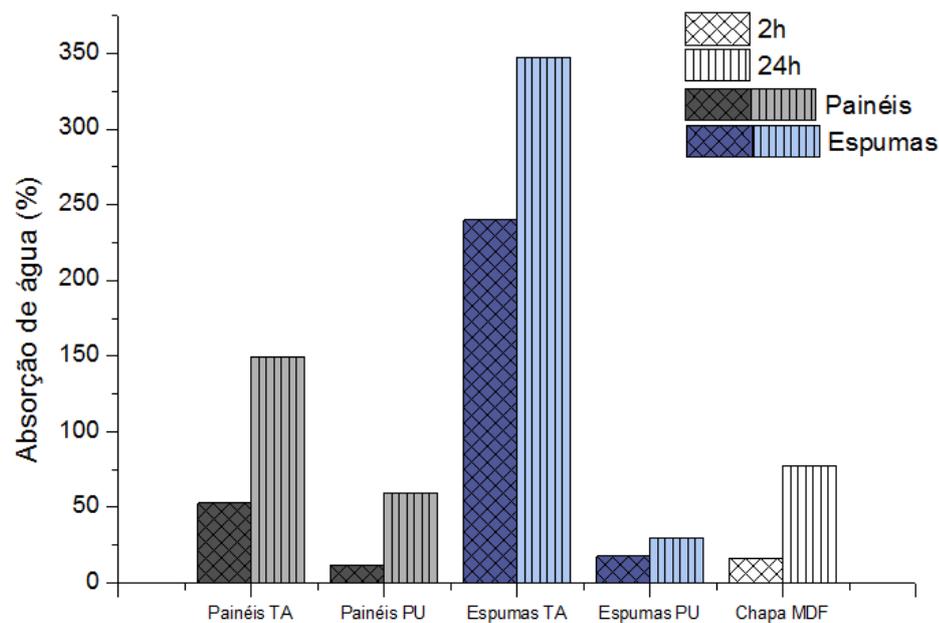
O maior peso apresentado pelas espumas de TA e conseqüentemente pelos painéis de TA pode ser explicado por vários fatores. O primeiro está relacionado a quantidade de material necessário para preencher determinado volume, no caso das espumas de TA é necessário quase o dobro de material em comparação com espumas PU. Outro fator que explica a maior densidade das espumas de TA é descrito por Tondi et al. (2009) o qual relatam que o uso de aditivos ou uma maior quantidade de água na formulação produzem uma espuma mais pesada, no caso de maior quantidade de água essa é responsável por dissipar o calor gerado no material. Já um excesso de álcool furfurílico gera maior quantidade de calor, induzindo uma cura acelerada, endurecendo a mistura antes mesmo da formação da espuma. Ao mesmo tempo, o maior teor de umidade nas espumas à base de tanino pode ter interferido na diferença significativa de peso entre os materiais. Todos estes fatores supracitados estão ligados diretamente a morfologia final do produto, como visto na caracterização morfológica (Figuras 10 e 11) em que espumas de TA apresentam características

morfológicas diferentes em relação as espumas de PU, como, diâmetro de célula menor e parede celular mais espessa. Tais características são comprovadas por Carvalho e Frollini (1999) que dizem que a diferença estrutural, tamanho de poro e espessura da parede celular, são os principais aspectos responsáveis pela diferença de densidade.

4.3.3 Absorção de água e Inchamento em espessura

Os resultados de absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água dos painéis e espumas são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Ensaio de absorção de água dos painéis e seus componentes em 2h e 24h.



Após 2 horas de imersão em água, observa-se que painéis com espumas TA absorveram mais água em relação as espumas petroquímicas, o qual os valores médios de absorção (Figura 12) variaram de 52,68% para os painéis TA e 11,66% para os painéis PU. Já para as espumas os valores foram bem discrepantes, espumas de TA absorveram 239% de água, enquanto as espumas sintéticas apenas 17,52%. Chapas MDF absorveram 16,35% de água nas duas primeiras horas de imersão. Os resultados da análise estatística apontam diferença significativa entre os painéis e

entre as espumas de TA e PU ($F = 207,5$; $p < 0,05$) e ($F = 123,16$; $p < 0,05$), respectivamente (APÊNDICE A).

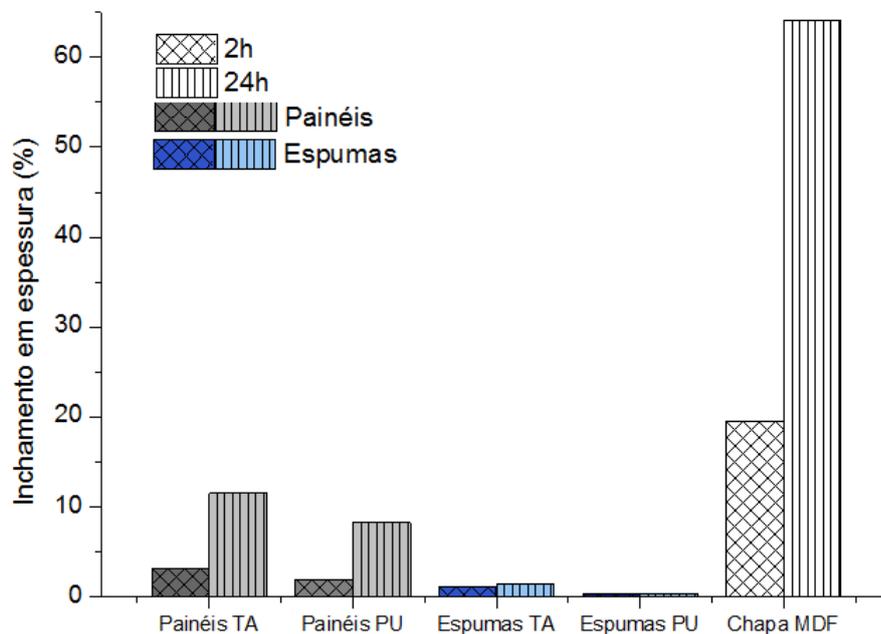
Para os resultados de absorção de água após 24 horas, percebe-se uma tendência natural de aumento de absorção com o passar do tempo, tal tendência é observada para todos os materiais (Figura 12). Os valores médios de absorção para painéis TA aumentaram 96,77% em relação a 2 horas, já para os painéis PU a porcentagem foi de 47,49%. Nas espumas de TA após 24 horas seu peso mais que triplicou (347,22%) em relação ao seu peso original e aumentou em 107,27% em referência a 2 horas, enquanto nas espumas PU a diferença ficou próxima a 12%. Chapas MDF absorveram 77,56% de água após 24 horas, 61,21% a mais que nas duas primeiras horas. A diferença entre os valores de painéis e entre valores de espumas após 24h é comprovada estatisticamente pela ANOVA ($F = 393,34$; $p < 0,05$ painéis) e ($F = 1793,3$; $p < 0,05$ espumas), ao nível de 95% de confiança (APÊNDICE A).

A absorção de água é o melhor parâmetro que explica a estrutura morfológica das espumas TA. Além da natural afinidade que extrato de tanino tem pela água, devido à grande presença de grupos OH (SANCHEZ, 2017), a distribuição dos orifícios (furos) na estrutura da parede celular (Figura 10) faz com que a água penetre por todo corpo do material, explicando a alta taxa de absorção de água dessas espumas (TONDI; PIZZI, 2009). Em relação ao comportamento das espumas PU a baixa absorção de água se deve a estrutura de células fechadas (BOLSONI, 2008) e a natureza hidrofóbica que o material apresenta, muito provavelmente pelo tipo de poliálcool utilizado em sua composição (VILAR, 2004). Os altos valores de absorção de água nas chapas MDF é explicado pela composição se dar basicamente por fibras lignocelulósicas, que possuem natureza hidrofílica, o qual os grupos OH livres principalmente da celulose interagem com as moléculas da água (ASHORI; NOURBAKHS, 2010).

No caso de inchamento em espessura (Figura 13) nota-se que após 2 horas de imersão os painéis apresentam valores médios próximos entre si, o qual variaram de 3,13% para os painéis TA e 1,90% para os Painéis PU. Para as espumas o inchamento nas duas primeiras horas de imersão foi praticamente nulo, aumentando em espessura apenas 1,10% para espumas TA e 0,31% para espumas PU. Como era de se esperar o maior inchamento em espessura atribuiu as chapas de MDF com 19,46%.

Após 24 horas de imersão os painéis TA aumentaram sua espessura em 11,49% e os painéis PU 8,18%, acréscimo de 8,36% e 6,28%, na devida ordem. Para as espumas o inchamento foi praticamente estável após 24 horas, espumas TA aumentaram 0,33% apenas, enquanto as espumas PU permaneceram nos mesmos 0,31% das primeiras 2 horas. Chapa de MDF tiveram um acréscimo de absorção de 44,61% (64,10%) em relação a 2h (Figura 13).

Figura 13 – Ensaio de inchamento em espessura dos painéis e seus componentes em 2h e 24h.



Apesar dos valores de inchamento em espessura dos painéis após 2 horas de imersão em água serem semelhantes entre si e apresentarem uma tendência de aumento similar ao decorrer do tempo até 24 horas. A análise estatística demonstra que a diferença entre os valores é significativa para os dois tempos em questão ($F = 33,08$; $p < 0,05$) para 2h e ($F = 12,76$; $p < 0,05$) para 24 horas, ao nível de 95% de confiança (APÊNDICE A). Já para as espumas nas duas primeiras horas de imersão a diferença apresentada não foi significativa estatisticamente ($F = 1,85$; $p > 0,05$). Já após o período de 24 horas, pois a diferença foi significativa ao nível de 95% de confiança ($F = 6,16$; $p < 0,05$).

Ao final dos resultados de inchamento em espessura, observa-se que as espumas de tanino apresentam estabilidade dimensional, embora tenham absorvido

mais água em relação as espumas PU. Tal afirmação é confirmada por Kolbitsch et al. (2012). Segundo os mesmos autores essa característica de estabilidade dimensional contra água e umidade nas espumas rígidas favorecem seu uso nas construções. Entretanto, o principal fator que colaborou para um elevado valor de inchamento nos painéis foram as chapas de MDF, conforme observado nos resultados desse componente, pois a água incha a parede celular da fibra até sua saturação, e começa a ocupar os espaços vazios livres entre os feixes de fibras, aumentando a espessura do painel (TITA; PAIVA; FROLLINI, 2002). Além da natural afinidade das fibras com a água, outras justificativas que respondem a alta absorção de água e inchamento obtidas pelas lâminas de MDF, é a liberação das tensões de compressão das chapas durante o processo de aquecimento da estrutura sanduíche, e que o MDF utilizado como face para os painéis sanduíche era cru, não havendo nenhum tipo de revestimento em sua superfície, facilitando a absorção de água. Como consequência dos altos índices de absorção de água e inchamento dos painéis TA, o seu uso se limita a ambientes internos, onde não há contato direto com água e umidade.

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.4.1 Resistência à compressão plana e lateral

O ensaio de compressão é a melhor maneira de verificar a máxima resistência mecânica do núcleo dos painéis durante a aplicação de uma força axial compressiva (GALVÃO; FARIAS; MENDES, 2015). A Tabela 4 apresenta os valores médios de força máxima de ruptura e resistência à compressão plana e lateral dos painéis sanduíche.

Tabela 4 – Valor médio de resistência à compressão plana e lateral para painéis sanduíche.

Material	Compressão Plana		Compressão Lateral	
	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	CV (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	CV (%)
Painel TA	0,16 ± 0,01 b	8,05	3,09 ± 0,69 a	22,47
Painel PU	0,27 ± 0,01 a	4,79	3,61 ± 0,02 a	0,45

Os dados são apresentados como médias ± desvio padrão. $\sigma_{\text{máx}}$ = Resistência à compressão; CV (%) = Coeficiente de variação, %. Valores seguidos da mesma letra na coluna não apresentam diferença estatisticamente significativa, ao nível de 95% de confiança.

De acordo com a ANOVA (Apêndice A) verificou-se para resistência máxima em compressão plana ($\sigma_{\text{máx}}$) que os valores médios apresentam diferença significativa entre si ($F = 177,94$; $p < 0,05$) ao nível de 95% de confiança. Observa-se na Tabela 4 que a tensão máxima de resistência à compressão dos painéis com espuma TA foi aproximadamente 40% inferior em relação a espumas sintética, na qual a força máxima aplicada nas espumas TA foi de 411,20 N e nas espumas PU 677,42 N.

Como pode-se perceber, apesar das espumas de TA serem mais densas que as espumas PU (seção 4.3.2; Tabela 3) a resistência a compressão foi menor. Tal comportamento pode ser explicado pela morfologia que cada espuma apresentou (seção 4.2), em que espumas TA apresentaram estrutura celular irregular, frágil e com presença de espaços vazios, essas características fizeram com que as células se colapsem mais facilmente quando aplicado uma força sobre o material. Uma possível explicação para isso é dada por Tondi et al. (2014), que pressupõem que maiores quantidades de catalizador e álcool furfurílico na formulação do material origina um polímero excessivamente rígido e conseqüentemente mais denso e frágil. Outro fator a ser ponderado é que, as espumas produzidas nesse trabalho são livres de formaldeído, devido a este produto químico ser altamente tóxico e carcinogênico (IARC, 2006). No entanto estudos anteriores desenvolvidos por Tondi e Pizzi (2009) mostram que espuma de TA reforçada com formaldeído possuem melhora nas propriedades do material, principalmente a mecânica, tendo obtido propriedades de resistência à compressão altas, superiores até mesmo as espumas sintéticas. Link et al. (2011) relatam que o uso do formaldeído está diretamente ligado ao grau de reticulação da resina, o qual polímeros de tanino/álcool furfurílico reforçados com formaldeído são mais propensos a criar essas reticulações, em razão dos grupos metilol (metiolados por formaldeído) dos taninos condensados poderem produzir mais facilmente ligações covalentes com outros oligômeros flavonoides e/ou com álcool furfurílico. Desta forma, há necessidade de encontrar um agente de reforço orgânico e não prejudicial à saúde que substitua o químico formaldeído e melhore as propriedades como um todo das espumas de tanino naturais. Já em relação as espumas PU, a sua maior resistência à compressão se deve a estrutura celular homogênea, de células fechadas e altamente reticulada, que foram capazes de resistir com mais eficiência a força aplicada (VILAR, 2004), embora tenham apresentado menor densidade.

O ensaio de compressão lateral foi realizado para verificar o comportamento dos painéis sanduíche quando submetidos a aplicação de uma força no sentido lateral do plano, bem como analisar o modo de falha que o painel possa sofrer com esse tipo de carga compressiva. Os resultados de compressão lateral (Tabela 4) mostram que os painéis confeccionados com espuma PU apresentaram comportamento igual ao de painéis de espuma TA. Através da análise estatística ANOVA, verificou-se que para resistência a compressão lateral os valores não apresentaram diferença significativa entre si ($F = 2,850$; $p > 0,05$) ao nível de 95% de confiança. A diferença de resistência máxima entre os painéis foi de 0,52 MPa (14,40%), cuja força máxima necessária para ocorrer a ruptura dos painéis TA foi de 4632,82 N e para painéis PU 5415,20 N, diferença também de aproximadamente 14%.

Durante o ensaio pode-se notar que ambos os painéis tiveram a mesma conduta no decorrer da análise. No painel com espuma TA a medida que se aplicava a força de compressão axial ocorria a flambagem do painel, com o deslocamento da lâmina superior e a ruptura por corte do núcleo. O mesmo ocorreu para os painéis PU, com diferença quanto ao nível de deslocamento da lâmina superior, para painéis PU o deslocamento foi parcial, enquanto que para painéis TA o deslocamento foi total. Esse tipo de deslocamento entre os materiais pode ter sido a responsável pela pequena diferença de resistência observada, e pode ser explicada através da força de adesão das espumas com a chapa MDF. No processo de sopro da espuma TA à medida que ocorre a expansão forma-se uma espécie de película na superfície da espuma, que é a primeira a polimerizar e sofrer o processo de cura, desta maneira, presume-se que essa característica possa ter influenciado na adesão do material poroso com a chapa MDF, reduzindo a afinidade entre eles. Já para os painéis PU, o procedimento para a confecção dos painéis foi diferente, visto que se fez necessário preparar uma pequena quantidade de creme de isocianato e polioliol nas mesmas proporções para unir a lâmina a espuma. Esse processo favoreceu a adesão entre os materiais, uma vez que a película também formada pela espuma sintética foi retirada devido ao excesso de material produzido.

4.4.2 Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática consiste na aplicação de uma carga crescente no ponto central de um corpo de prova, o qual deve estar apoiado nas extremidades.

Através deste ensaio mecânico é possível obter a máxima tensão suportada pelo material e a razão entre a tensão e a deformação no regime elástico (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Os valores médios de módulo de elasticidade, resistência à flexão e resistência do núcleo dos painéis TA e PU são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5– Valor médio para as propriedades de flexão estática de painéis TA e PU.

Material	MOE (MPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	R_{max} núcleo (MPa)
Painel TA	102,99 ± 14,19 a	1,99 ± 0,39 b	0,14 ± 0,03 b
Painel PU	97,91 ± 17,43 a	2,62 ± 0,34 a	0,22 ± 0,04 a

Os dados são apresentados como médias ± desvio padrão; MOE = Módulo de elasticidade; $\sigma_{\text{máx}}$ = resistência à flexão; R_{max} núcleo = resistência final do núcleo. Valores seguidos da mesma letra na coluna não apresentam diferença estatisticamente significativa, ao nível de 95% de confiança.

Conforme observado na Tabela 5, os valores obtidos com o ensaio de flexão estática mostram que para resistência à flexão painéis com espuma PU foram superiores aos painéis TA, com diferença de aproximadamente 32%. Conseqüentemente a mesma performance ocorreu com a resistência máxima do núcleo, visto que espumas PU demonstraram resistir 36,36% a mais que o núcleo de espuma TA. Essas diferenças apresentadas nas propriedades de resistência à flexão e resistência do núcleo pelos materiais foi confirmada estatisticamente através ANOVA (F = 7,556; p < 0,05) e (F = 13,462; p < 0,05), respectivamente (Apêndice A). Já na propriedade de rigidez (MOE) os painéis tiveram comportamento igual, uma vez que a diferença de 4,93% entre eles não foi significativa conforme análise de variância, (F = 0,254; p > 0,05) ao nível de 95% de confiança (Apêndice A).

A inferioridade demonstrada pelos painéis TA nas propriedades de flexão estática é consequência das características intrínsecas demonstradas por essas espumas. Como comentado na seção 4.4.1 a ausência de um agente de reforço influenciou de maneira significativa principalmente as propriedades mecânicas dos painéis. Possivelmente, a rigidez e a fragilidade da estrutura celular das espumas TA foram responsáveis pela baixa resistência dos painéis quando aplicado uma carga constante sobre a amostra. Em relação ao MOE, uma possível justificativa da similaridade dos valores entre os painéis é a influência das lâminas de MDF, que por serem materiais de alta rigidez e densidade, proporcionam boas resistências mecânicas, sendo responsáveis por suportar as possíveis tensões sobre o material.

De modo geral, independentemente do tipo de espuma, os valores obtidos para as propriedades mecânica avaliadas estão abaixo dos valores mencionados na literatura por outros autores, acontecimento que prejudica a comparação com outras fontes. Uma provável razão para isso foi a utilização de célula de carga inadequada nos testes, uma vez que era muito alta para a sensibilidades dos materiais, ocasionando uma possível distorção dos reais valores dos materiais. Entretanto, como as condições de ensaio foram as mesmas para ambas as amostras foi possível analisar e debater sobre as diferenças encontradas.

4.5 ANÁLISE TÉRMICA (TGA)

Análise térmica permite observar as mudanças das propriedades do material quando submetido a alteração controlada de temperatura (BROWN, 2011). A termogravimetria (TGA) é utilizada para caracterização do perfil de degradação de polímeros, no qual a curva de degradação permite mostrar o perfil de resistência ou estabilidade térmica do material quando submetido a uma variação programada de temperatura (RIBEIRO, 2009).

As figuras 14 e 15 apresentam os termogramas e suas derivadas das espumas de TA e PU, na devida ordem. As amostras foram analisadas por degradação térmica de 30°C a 1000°C.

Figura 14 - Curva termogravimétrica e sua derivada de espuma TA.

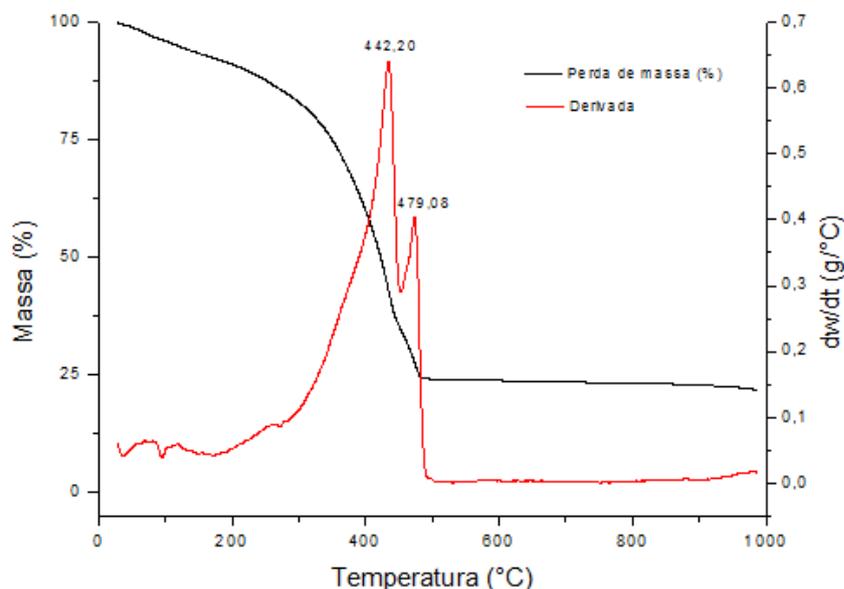
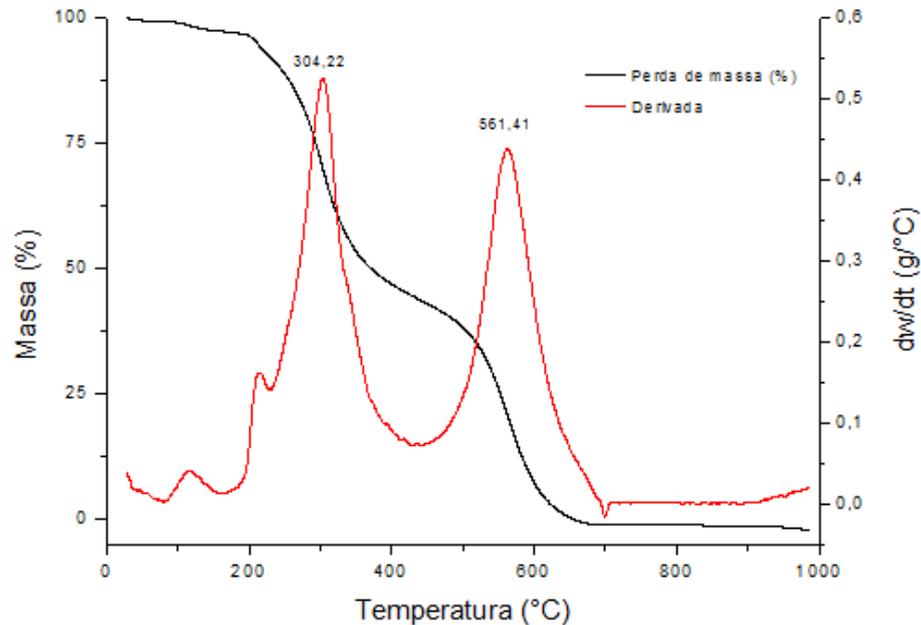


Figura 15 - Curva termogravimétrica e sua derivada de espuma PU.



Na Figura 14, observa-se que para espuma TA ocorre uma suave perda de massa de aproximadamente 13% com início abaixo dos 100°C e mantém-se constante até 300°C, essa perda se deve principalmente a evaporação de água relacionada a umidade presente no material e algumas degradações de materiais de baixo peso molecular presentes no extrato de tanino, com açúcares simples, fenol e monômeros (KHIARI et al., 2017). Após o primeiro estágio de perda de massa, ocorre uma perda de peso acentuada em mais de 60% da espuma TA entre 300°C e 500°C, nesse intervalo ocorre dois picos de degradação, o primeiro a 442,20°C e o segundo a 479°C, esses picos correspondem a degradação de materiais polifenólicos do extrato de tanino (GAUGLER; GRIGSBY, 2009) e da quebra de elos da cadeia, o qual ocorre a liberação de CO₂, CO, H₂O (CARVALHO; FROLLINI, 2002; HU, 2012; DUVAL; AVÉROUS, 2016). Acima de 500°C nenhuma degradação ocorreu, e uma taxa de 25% de resíduo foi obtida ao final do processo. Galletti e Reeves (1992) e Duval e Avérous (2016) relatam que provavelmente a massa residual é resultado da polimerização do material induzida pelo calor, o qual limita a pirólise da amostra.

Na Figura 15, observa-se a curva termogravimétrica de espuma PU. O início do processo de degradação ocorre aos 190°C e termina próximo a 600°C, nessa amplitude de temperatura basicamente ocorre dois picos de degradação: o primeiro é com 304,22°C, o qual a espuma perde aproximadamente 60% de sua massa. Esta

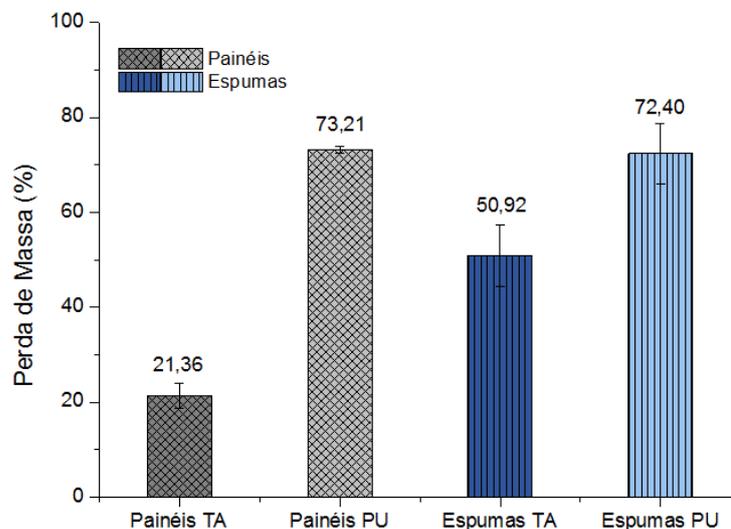
primeira degradação ocorre devido à quebra das ligações uretânicas, levando a formação de CO_2 , CO , aminas e aldeídos (NETA, 2011; GU; SAIN, 2012). Já o segundo pico de degradação ($561,41^\circ\text{C}$) degrada os outros 40% da massa da espuma restante, que é referente à quebra das ligações do polioliol (SARTORI, 2009; NETA, 2011; GU; SAIN, 2012). Para espuma PU não houve presença de resíduo.

Analisando as duas espumas, observa-se que ambas possuem boa estabilidade térmica, permitindo suas utilizações em ambientes numa faixa de temperatura ampla. No entanto, apesar da redução inicial da massa da espuma TA devido a evaporação de água presente no material, pode-se dizer que espumas TA possuem melhor estabilidade térmica que espuma PU, pois o grande pico de degradação inicia após 440°C para a espuma orgânica enquanto que para PU o maior pico ocorre próximo a 300°C .

4.6 RESISTÊNCIA AO FOGO

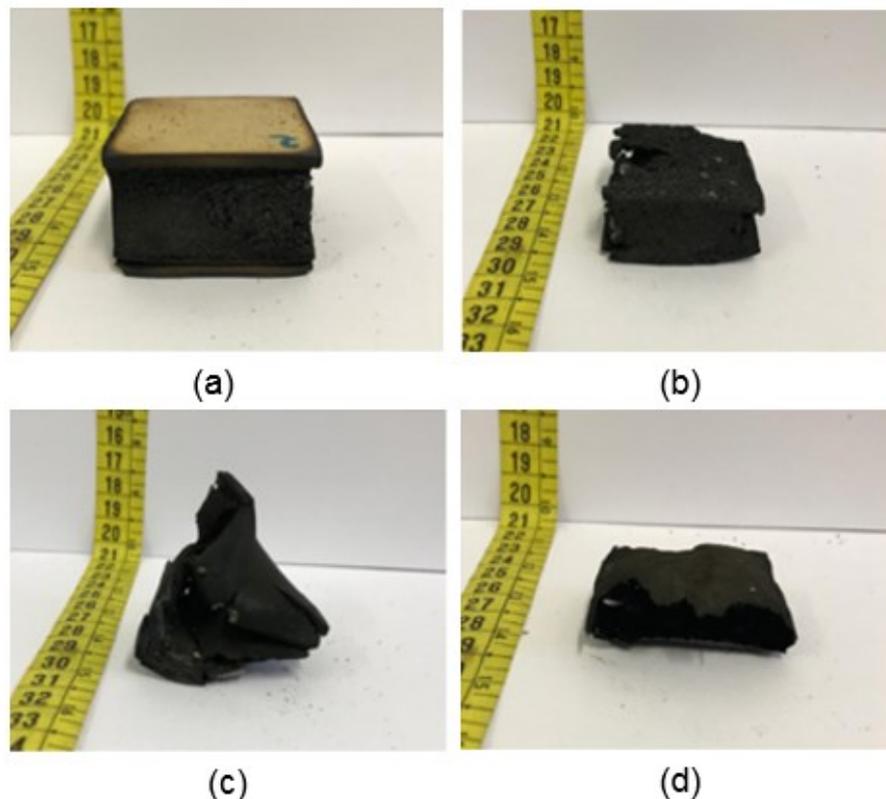
Os resultados obtidos de perda de massa dos painéis e espumas de TA e PU quando submetidos a exposição forçada ao fogo estão apresentados na Figura 16. O tempo de exposição padrão utilizados para as amostras de painéis foi de 60s, enquanto que para espumas o tempo foi reduzido para 30s. Após o período de exposição, cronometrou-se o tempo até que o brilho das espumas extinguisse.

Figura 16 – Valores médios de perda de massa de painéis e espumas de TA e PU quando expostos ao fogo.



Observa-se que para painéis TA a perda de massa foi de 51,85% inferior aos painéis PU, e o tempo necessário para que a chama dos painéis PU extinguissem foi de 3min e 41s, mais que quatro vezes o tempo dos painéis TA (43,63s). Conforme análise de variância (Apêndice A) verificou-se que os valores de perda de massa para painéis foram significativos ($F = 1771,4$; $p < 0,05$) ao nível 95% de confiança. Para as espumas a diferença de perda de massa entre elas foi de 21,48%. Essa diferença obtida para as espumas também foi significativa conforme ANOVA ($F = 6,165$; $p < 0,05$), (Apêndice A). Em relação ao tempo pós-combustão das espumas, verificou-se que para PU o material foi consumido totalmente pela chama antes do término de 30s. Já para espumas TA a chama se auto apagou após retirada do bico de Bunsen. A Figura 17 mostra os materiais após a realização do teste.

Figura 17 – Painéis e espumas TA e PU pós-combustão: a) painel TA; b) espuma TA; c) painel PU; d) espuma PU.



Como pode ser observado na Figura 18a painéis com espuma TA mantiveram sua estrutura após serem submetidos ao teste de resistência ao fogo, o qual a perda de massa apresentada (21,36%) e o tempo de brilho após a retirada do fogo (43,63s) foram resultado basicamente da queima da lâmina MDF que ficou em contato direto

com a chama. Na Figura 17c painéis PU tiveram comportamento inverso, o qual a espuma foi completamente degradada pelo fogo e restou apenas as lâminas de MDF carbonizadas e retorcidas, desta forma, o elevado tempo de extinção da chama dos painéis PU foi devido a queima das lâminas de MDF. Um fator muito relevante a ser mencionado, é a diferença observada de emissão de fumaça durante a análise. Espumas PU geraram grande quantidade de fumaça, sendo que ao final do teste o ambiente de trabalho (capela de exaustão) ficou completamente tomada por fumaça e cheia de fuligem. O mesmo não aconteceu para espumas TA, a emissão de fumaça foi quase nula para esse material.

A resistência ao fogo apresentada pela espuma de TA é consequência da estrutura química da resina curada, o qual é fundamentada nos vários anéis aromáticos de alta energia de ligação (TONDI et al., 2009). Segundo os mesmos autores, a estrutura carboniza em contato com o fogo, e essa camada de carbono criada impede que a chama atinja as partes internas do material. De acordo com Kolbitsch et al. (2012) o tempo até a auto-extinção da espuma TA depende de alguns fatores, como, área de superfície que é atingida por oxigênio durante a queima; grau de polimerização da resina; e espessura da parede celular. Deste modo, a morfologia apresentada pela espuma de tanino, com diâmetro de célula reduzido e parede celular espessa contribuiu para que a espuma se auto apagassem logo após a retirada do fogo. Em relação a alta inflamabilidade das espumas de poliuretano, a teoria do processo de queima das espumas se dá através de um processo endotérmico. O qual o calor decompõe a cadeia de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas formando produtos de pirólise, que reagem com o oxigênio gerando substâncias altamente reativas (VILAR, 2004). Ainda segundo o autor, os radicais livres formados pela combustão são responsáveis pelo acelerado processo de queima.

5. CONCLUSÃO

Após implementações e análise dos resultados sobre as espumas e painéis sanduíche verificou-se que:

- Para as propriedades térmicas as espumas TA apresentaram boa estabilidade térmica e ótima resistência ao fogo em relação as espumas PU;
- A morfologia das espumas TA apresentou estrutura celular irregular, frágil e quebradiça, formada por células abertas de diâmetro médio de 165,99 μm ;
- Para as propriedades físicas, as espumas e os painéis de TA demonstraram alta afinidade por água e maior densidade aparente em relação as espumas PU;
- Para as análises de compressão plana e flexão estática, verificou-se que os painéis de TA foram inferiores aos painéis de espuma PU. Já para compressão lateral os valores foram estatisticamente iguais.

Apesar de em alguns aspectos as espumas de TA possuírem propriedades inferiores às de PU, essas apresentam grande potencial para serem utilizadas como núcleo de painéis sanduíche e substituição das espumas sintéticas, principalmente por suas características de resistência ao fogo, estabilidade térmica e por serem ambientalmente corretas. Vale ressaltar que a espuma TA foi comparada com a melhor espuma do mercado. Portanto, deve-se levar em consideração as inúmeras vantagens que a espuma possa trazer a sociedade.

Desta forma, novos estudos precisam ser realizados a fim de melhorar a estrutura morfológica e a hidrofobicidade do material poroso, com a utilização de agentes de reforço, surfactantes e impermeabilizantes. Tendo em vista que essas características influenciaram diretamente nas propriedades da espuma.

Ao final, através dos resultados obtidos e considerações é possível concluir que os painéis possuem potencialidade para serem utilizados como isolantes térmicos em ambientes internos. Mas, se faz necessário análises complementares específicas que auxiliem a informar com precisão a melhor utilização do painel.

6. RECOMENDAÇÕES

As espumas de tanino apresentam bons resultados para produção de painéis sanduíche, principalmente no que se refere a baixa inflamabilidade do material. No entanto é importante a realização de outros estudos, como, análise de condutividade térmica, elétrica e das propriedades acústicas do material, a fim de informar com precisão e segurança a utilidade final dos painéis sanduíche.

Recomenda-se também estudos sobre os gases gerados na combustão da espuma de tanino e a troca das lâminas de MDF por outros materiais de face, para permitir a ampliação do seu uso nos diversos segmentos do mercado de painéis sanduíche.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, R. et al. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. **Journal of Food Engineering**, v. 55, p. 309–318, dez. 2002.
- AIRES, A.; CARVALHO, R.; SAAVEDRA, M. J. Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: Extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry. **Waste Management**, v. 48, p.457-464, fev. 2016.
- ALLEN, H. G. **Analysis and Design of Structural Sandwich Panels**: Pergamon, 1969. 300 p.
- ALMEIDA, M. G. **Incorporação de polietileno pós-consumo em espumas de polietileno de baixa densidade**. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.
- ALMEIDA, M. I. A. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**. 2009. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; KISSING, W. **Mechanics of Composite Structural Elements**. 1. ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 487 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C364-16: Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions**. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C365-16: Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores**. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C393-16: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure**. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1622-14: Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics**1. West Conshohocken, 2014.
- ANGELO, P. M.; JORGE, N. Compostos fenólicos em alimentos - uma breve revisão. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 66, n. 1, p.1-9,. 2007. Disponível em: <http://periodicos.ses.sp.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0073-98552007000100001&lng=pt>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- ASHORI, A.; SHESHMANI, S. Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior. **Bioresource Technology**, v.101, n.12, p.4717-4720, 2010.

ARBAOUI, J. et al. Experimental bending behaviour of multi-layer sandwich structures. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 54, n. 4, p. 1191-1198, mar. 2009.

ARBENZ, A.; AVEROUS, L. Chemical modification of tannins to elaborate aromatic biobased macromolecular architectures. **Green Chemistry**, v. 17, n. 5, p. 2626-2646, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAINÉIS DE MADEIRA - ABIPA. **Programa Setorial da Qualidade de Painéis de Partícula de Madeira (MDP) e Painéis de Fibras de Madeira (MDF)**. Relatório Setorial 008. São Paulo: TESIS, 2014. 23 p.

BASSO, M. C. et al. First Tools for Tannin-Furanic foams Design. **Bioresources**, v. 10, n. 3, p.5233-5241, 2015.

BASSO, M. C. et al. Green, Formaldehyde-free, Foams For Thermal Insulation. **Advanced Materials Letters**, v. 2, n. 6, p.378-382, 1 dez. 2011.

BERTOLINI, M. S. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma de poliuretano à base de mamona para aplicação como composições termoacústica**. 2014. 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

BOLSONI, E. **Estudo do reaproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo**. 2008. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

BROWN, M. E. **Introduction to thermal analysis: techniques and applications**. 2 ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

CALLISTER JR, W. D. **Materials Science and Engineering an Introduction**. 7. ed: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

CARVALHO, G.; FROLLINI, E. Lignina em espumas fenólicas. **Polímeros**, v. 9, n. 1, p.66-75, 1999.

CARVALHO, G; FROLLINI, E. Lignin in phenolic closed cell foams: thermal stability and apparent density. **Journal of Macromolecular Science**, v. 39, n. 7, p.643-656, 26 jun. 2002.

CELZARD, A. et al. Latest progresses in the preparation of tannin-based cellular solids. **Journal of Cellular Plastics**, v. 51, n. 1, p.89-102, 10 jun. 2014.

CIECIERSKA, E. et al. The influence of carbon fillers on the thermal properties of polyurethane foam. **Journal of Thermal Analysis And Calorimetry**, v. 123, n. 1, p.283-291, 1 ago. 2015.

DIAB, **Sandwich concept** – DIAB Sandwich Handbook, 2003.

DIACENCO, A. A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibração e ruído**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

DUVAL, A.; AVÉROUS, L. Characterization and Physicochemical Properties of Condensed Tannins from Acacia catechu. **Journal of Agricultural And Food Chemistry**, v. 64, n. 8, p.1751-1760, 17 fev. 2016.

ELEOTÉRIO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de MDF de diferentes densidades e teores de resina. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p.75-90, 2000.

FERNANDES, P. M. O. **Caracterização térmica de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)**. 2014. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Técnico Lisboa, Lisboa, 2014.

FERREIRA, M. R. S. **Estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais para aplicação como forro**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

FUNARI, M. F.; GRECO, F.; LONETTI, P. Sandwich panels under interfacial debonding mechanisms. **Composite Structures**, v. 203, p.310-320, nov. 2018.
GAGLIARDO, D. P.; MASCIA, N. T. Análise de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p.247-258, out. 2010.

GALLETTI, G. C.; REEVES, J. B.. Pyrolysis/Gas Chromatography/Ion-trap Detection of Polyphenols (Vegetable Tannins) : Preliminary Results. **Organic Mass Spectrometry**, v. 27, p.226-230, 1992.

GALVÃO, Á. C. P.; FARIAS, A. C. M.; MENDES, J. U. L. Obtenção e caracterização de espumas rígidas de poliuretano (PUR) com pó de vidro sodo-cálcico (PV) do rejeito da lapidação. **Holos**, v. 5, p.104-118, 1 out. 2015.

GAMA, D. P. N. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <<http://www.mec.uff.br/pdftheses/DanielPereiraNunesGama2017.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2018.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 378 p.

GAUGLER, M.; GRIGSBY, W. J. Thermal Degradation of Condensed Tannins from Radiata Pine Bark. **Journal of Wood Chemistry And Technology**, v. 29, n. 4, p.305-321, 30 nov. 2009.

GROSS, G. G.; HEMINGWAY, R. W.; YOSHIDA, T. (Ed.). **Plant Polyphenols 2: Chemistry, Biology, Pharmacology, Ecology**. New York: Springer Science & Business Media, 1999. 926 p.

GU, R.; SAIN, M. M. Effects of Wood Fiber and Microclay on the Performance of Soy Based Polyurethane Foams. **Journal of Polymers And The Environment**, v. 21, n. 1, p.30-38, 7 nov. 2012.

HASLAM, E. **Plant Polyphenols: Vegetable Tannins Revisited**. Cambridge: Cup Archive, 1989. 230 p.

HEMINGWAY, R. W.; LAKS, P. E. (Ed.). **Plant Polyphenols: Synthesis, Properties, Significance**. New York: Springer Science & Business Media, 1992. 1053 p.

HOLLAWAY, L. Low density rigid foam materials, sandwich construction and design methods. In: HOLLAWAY, L. **Polymer Composites for Civil and Structural Engineering**: Springer Netherlands, 1993. p. 157-186.

HU, L. et al. Characterization and properties of a liginosulfonate-based phenolic foam. **Bioresources**, v. 7, n. 1, p.554-564, 2012.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER - IARC.
Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol, v. 88, 2006.
Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/iarc/vol88/volume88.pdf>>.
Acesso em: 30 jan. 2019.

JEREZ, A. et al. Protein-based bioplastics: effect of thermo-mechanical processing. **Rheologica Acta**, v. 46, n. 5, p.711-720, 16 fev. 2007.

JORGE, F. C. et al. Aplicações para as Cascas de Árvores e para os Extractos Taninosos: Uma Revisão. **Silva Lusitana**, v. 9, n. 2, p.225-236, 2001.

KHIARI, R. et al. Properties of Tannin-Glyoxal Resins Prepared from Lyophilized and Condensed Tannin. **Journal of Textile Engineering & Fashion Technology**, v. 3, n. 4, p.705-711, 19 dez. 2017.

KOLBITSCH, C. et al. Microwave Produced Tannin-furanic Foams. **Journal of Materials Science Research**, v. 1, n. 3, p. 84-91, jun. 2012.

LACOSTE, C. et al. Pine (*P. pinaster*) and quebracho (*S. lorentzii*) tannin-based foams as green acoustic absorbers. **Industrial Crops and Products**, v. 67, p.70-73, maio 2015.

LINK, M. et al. Formaldehyde-free tannin-based foams and their use as lightweight panels. **Bioresources**, v. 6, n. 4, p.4218-4228, 2011.

LUCKMANN, L. **Reciclagem de resíduos de espuma rígida de poliuretano através da incorporação em polímeros termoplásticos, abs, psai e ps**. 2005.

171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2005.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 2, p. 19-26, Feb. 1996.

PAN, L. et al. Tannic-Acid-Coated Polypropylene Membrane as a Separator for Lithium-Ion Batteries. **Acs Applied Materials & Interfaces**, v. 7, n. 29, p.16003-16010, jul. 2015.

PAWLIK, H.; PROCIAK, A. Influence of Palm Oil-Based Polyol on the Properties of Flexible Polyurethane Foams. **Journal of Polymers And The Environment**, v. 20, n. 2, p.438-445, 24 nov. 2011.

PFLUG, J. et al. Development of a sandwich material with polypropylene/natural fibre skins and paper honeycomb core. In: European Conference on Composite Materials, 10., 2002, Belgium. **Proceedings of 10th European Conference on Composite Materials**. Belgium: Eccm-10, 2002. p. 1 - 6.

PIZZI, A. et al. Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Structure Determination of Complex Thermoset Networks: Polyflavonoid Tannin–Furanic Rigid Foams. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 110, p. 1451–1456, jul. 2008.

POKORNY, A. **Obtenção e caracterização de espumas vítrias a partir de resíduos de vidro sodo-cálcico e calcário dolomítico como agente espumante**. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MACHADO, G. B. Vieira. **Desenvolvimento e caracterização de nanofibras de poli (álcool vinílico) recobertas com gelatina**. 2016. 49 f. TCC (Graduação em Engenharia de materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MANALO, A. et al. State-of-the-Art Review on FRP Sandwich Systems for Lightweight Civil Infrastructure. **Journal of Composites For Construction**, v. 21, n. 1, fev. 2017.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; LACERDA, F. C. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, 2008.

MEIKLEHAM, N. E.; PIZZI, A. Acid- and Alkali-Catalyzed Tannin-Based Rigid Foams. **Journal of Applied Polymer Science** v. 53, p. 1547-1556, set. 1994.

MICHALOWSKI, S.; PIELICHOWSKI, K. 1,2-Propanediolizobutyl POSS as a co-flame retardant for rigid polyurethane foams. **Journal of Thermal Analysis And Calorimetry** v. 134, n. 2, p.1351-1358, 13 jul. 2018.

- MISSIO, A. L. et al. Analytical characterization of purified mimosa (*Acacia mearnsii*) industrial tannin extract: Single and sequential fractionation. **Separation and Purification Technology**, v. 186, p. 218-225, 2017
- MONTEIRO, J. M. et al. Taninos: uma abordagem da química à ecologia. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 5, p.892-896, out. 2005.
- MONTEIRO, J. M. et al. Teor de taninos em três espécies medicinais arbóreas simpátricas da caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 6, p.999-1005, ago. 2005.
- NAGARAJA, B.M. et al. A highly efficient Cu/MgO catalyst for vapour phase hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol. **Catalysis Communications**, v. 4, p. 287–293, jun 2003.
- NETA, J. J. S. **Síntese e caracterização de poliuretano à base de óleo de *Mabea fistulifera* Mart. e sua utilização para remoção de corantes têxteis**. 2011. 104 f. Tese (Doutorado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- RANDALL, D.; LEE, S. **The polyurethanes book**. New York: J. Wiley, 2002. 477 p.
- RIBEIRO, M. P. **Aplicação de termogravimetria acoplado à espectrometria de massas para caracterização de petróleo e determinação da curva de evolução de gás sulfídrico**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- RIBEIRO, V. C. N. **Caracterização anatômica da matéria-prima e avaliação das propriedades tecnológicas de painéis MDF de madeira de *Schizobium amazonicum* Huber ex Ducke e de resíduos de espécies da Amazônia**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- RØSDAL, A. **Analysis and Optimization of Sandwich Panels**. 2017. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engineering Design) - Curso de Engineering Science And Technology, Univesity Of Tromsø, Narvik, 2017.
- SANCHEZ, C. D. **New optimisation and characterisation methods of tannin-based foams for thermal insulation of buildings**. 2017. 266 f. Tese (Doutorado em Material Chemistry) – Curso de Material Chemistry, Université de Lorraine, Nancy, 2017.
- SANDWICH Steel Panels: Part One. 2017. Disponível em: <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=PT&NM=484>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- SARTORI, A. P. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos sanduíche para isolamento térmico**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.
- SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook**. [S. I.]: Mcgraw-hill Book Company, 1984.

SCHWARTZ, M. M. **Composite Materials: Processing, Fabrication and Applications**: Prentice Hall, 1997.

SIMÕES, C. M. O et al. **Farmacognosia da planta ao medicamento**. 6. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2010. 1104 p.

SZYCHER, M. **Szycher's handbook of Polyurethanes**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2012. 1144 p.

TAPIA, L. G. S. **Análise de Placas Laminadas de Materiais Compostos Pelo Método dos Elementos Finitos**. 1998. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258413/1/SedanoTapia_LuisGilbert_M.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2018.

TITA, S. P. S.; PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Resistência ao Impacto e Outras Propriedades de Compósitos Lignocelulósicos: Matrizes Termofixas Fenólicas Reforçadas com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 12, n. 4, p.228-239, jan. 2002.

TONDI, G. et al. Infrared-Catalyzed Synthesis of Tannin-Furanic Foams. **Bioresources**, v. 9, n. 1, p.984-993, 2014.

TONDI, G. et al. Metal adsorption of tannin based rigid foams. **Industrial Crops and Products**, v. 29, n. 2-3, p.336-340, mar. 2009.

TONDI, G. et al. Tannin-based rigid foams: A survey of chemical and physical properties. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5162-5169, maio. 2009.

TONDI, G.; PIZZI A.; OLIVES, R. Natural tannin-based rigid foams as insulation for doors and wall panels. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 10, n. 3, p.219-227, set. 2008

TONDI, G.; PIZZI, A. Tannin-based rigid foams: Characterization and modification. **Industrial Crops and Products**, v. 29, p. 356-363, jan. 2009.

TORQUATO, L. P. **Caracterização dos painéis MDF comerciais produzidos no Brasil**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

TRIANAFILLOU, T. C.; GIBSON, L. J. Failure mode maps for foam core sandwich beams. **Materials Science And Engineering**, v. 95, p.37-53, nov. 1987.

VERAS, M. A. N. **Estudo, Fabrico e Caracterização de Painéis Sanduíche com Núcleos em Materiais Compósitos de Cortiça**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

VILAR, W. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004. Disponível em: <<https://www.poliuretanos.com.br/>>. Acesso em: 14 jan. 2019.

WEI, S.; CHEN, H.; LIN, Y. Comparison of Chemical Compositions and Antioxidant Activities of Condensed Tannins From Different Parts of *Calliandra haematocephala*. **Journal Of Wood Chemistry and Technology**, v. 35, n. 3, p.193-206, abr. 2015.

ZENKERT, D., **An introduction to sandwich construction**. Warley: EMAS Publ, 1995.

ZHOU, X. et al. Lightweight tannin foam/composites sandwich panels and the coldset tannin adhesive to assemble them. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p.255-260, maio 2013.

APÊNDICE A – Análise de Variância (ANOVA)

Diâmetro das células

	F. Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	2582450.08	2582450.08	175.42	2.22045E-16
	Resíduo	198	2914731.58	14720.8666		
	Total	199	5497181.667			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Teor de Umidade (TU)

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	79,479	79,479	2285,9	4,051E-11
	Resíduo	8	0,278	0,035		
	Total	9	79,757			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	246,144	246,144	976,37	1,197E-11
	Resíduo	8	2,017	0,252		
	Total	9	248,161			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Densidade Aparente

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	13008	13008	269,12	1,921E-07
	Resíduo	8	386,7	48,3		
	Total	9	13394,7			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	15936,5	15936,5	1826,1	9,916E-11
	Resíduo	8	69,8	8,7		
	Total	9	16006,3			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Absorção de Água 2h

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	4208	4208	207,5	5,272E-07
	Resíduo	8	162,2	20,3		
	Total	9	4370,2			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	123686	123686	123,16	3,881E-06
	Resíduo	8	8034	1004		
	Total	9	131720			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Absorção de Água 24h

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	20385,1	20385,1	393,34	4,352E-08
	Resíduo	8	414,6	51,8		
	Total	9	20799,7			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	252183	252183	1793,3	1,066E-10
	Resíduo	8	1125	141		
	Total	9	253308			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Inchamento em Espessura 2h

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	3,7632	3,7632	33,084	0,0004281
	Resíduo	8	0,9100	0,1137		
	Total	9	4,6732			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	1,5443	1,5443	1,8549	0,2103
	Resíduo	8	6,6602	0,83253		
	Total	9	8,2045			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Inchamento em Espessura 24h

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	27,4123	27,4123	12,761	0,007269
	Resíduo	8	6,1812	0,7727		
	Total	9	33,5935			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	3,0642	3,0642	6,1653	0,03793
	Resíduo	8	3,9761	0,49701		
	Total	9	7,0403			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Flexão Estática – MOE

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	64,31296	64,31296	0,2545	0,627473
	Resíduo	8	2021,03421	252,629276		
	Total	9	2085,34717			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Flexão Estática – Resistência à flexão

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	0,99225	0,99225	7,5568	0,0251
	Resíduo	8	1,05044	0,13131		
	Total	9	1,12356			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Flexão Estática – Resistência do núcleo

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Núcleo	Tratamento	1	0,016895	0,016895	13,4628	0,00631
	Resíduo	8	0,010039	0,001254		
	Total	9	0,026934			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Compressão Plana – Resistência Máxima

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	0,03025	0,003025	177,94	9,535E-07
	Resíduo	8	0,00136			

Total	9	0,03161
-------	---	---------

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Compressão Lateral – Resistência Máxima

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	0,68644	0,68644	2,8507	0,1298
	Resíduo	8	1,92636	0,24080		
	Total	9	2,51300			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

Resistência ao Fogo – Perda de Massa

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Painéis	Tratamento	1	6719,5	6719,5	1771,4	1,119E-10
	Resíduo	8	30,3	3,8		
	Total	9	6749,8			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F

	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p - valor
Espumas	Tratamento	1	3,0642	3,0642	6,1653	0,03793
	Resíduo	8	3,9761	0,49701		
	Total	9	7,0403			

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrado; QM = Quadrado Médio; F = estatística F