

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL

RODRIGO KONZEN SEIBEL

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE SERRAGEM DE EUCALIPTOS E PÓ  
DE BORRACHA UTILIZANDO MATRIZ DE POLIURETANO À BASE DE  
MAMONA**

Feliz  
2019



RODRIGO KONZEN SEIBEL

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE SERRAGEM DE EUCALIPTOS E PÓ  
DE BORRACHA UTILIZANDO MATRIZ DE POLIURETANO À BASE DE  
MAMONA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau  
de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de  
Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de  
Engenharia

Orientador: André Zimmer      Coorientador: Rudinei Fiorio

FELIZ

2019

**RODRIGO KONZEN SEIBEL**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE SERRAGEM DE EUCALIPTOS E PÓ DE BORRACHA UTILIZANDO MATRIZ DE POLIURETANO À BASE DE MAMONA**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Diego Piazza – UCS

---

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti – IFRS

---

Prof. Dra. Daiane Romanzini – IFRS

---

Orientador: Prof. Dr. André Zimmer - IFRS

Apresentado em: 31 de julho de 2019.

Local da defesa: Feliz, RS

## **DEDICATÓRIA**

Pelo apoio e confiança, dedico à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus maiores agradecimentos aos professores André Zimmer e Rudinei Fiorio pela orientação e paciência durante os anos.

Aos servidores dos campi Caxias do Sul e Feliz do Instituto Federal do Rio Grande do Sul pela contribuição e apoio na realização das análises.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de realização do trabalho.

À família de Caxias do Sul, em especial ao primo Ezequiel Milicich Seibel, pelo apoio.

À família de Tupandi, em especial ao primo Pedro Konzen Rhoden e à tia Rejane Konzen Rhoden, pela ajuda na coleta de materiais.

À minha mãe, Lissete Konzen Seibel, ao meu pai, Luis Nicolau Seibel e à minha irmã, Martina Konzen Seibel, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas de trabalho, em especial ao André Jacó Schnorremberger, pela confiança.

A todos os demais que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“An Tagen wie diesen,  
wünscht man sich Unendlichkeit.

An Tagen wie diesen,  
haben wir noch ewig Zeit.

Wünsch' ich mir Unendlichkeit.”<sup>1</sup>

Die Toten Hosen

---

<sup>1</sup> “Em dias como este, se deseja o infinito. Em dias como este, temos tempo eterno. Desejo para mim o infinito” Die Toten Hosen

## RESUMO

A produção de novos compósitos eco amigáveis consistindo de poliuretano à base de óleo de mamona (COPR), serragem de madeira e pó de pneu de borracha foram produzidos e as propriedades morfológicas, físicas e térmicas foram investigadas. Os compósitos foram produzidos variando a concentração de resina (30, 40 e 50% em massa) e a mistura de partículas (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 e 50/50, correspondente ao % em massa de serragem/% em massa de pó de borracha). A morfologia dos compósitos foi avaliada através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas foram avaliadas quanto aos módulos de: elasticidade, ruptura e tenacidade à flexão; e as propriedades físicas, em relação a absorção de água e ao inchamento de espessura. A análise estatística foi realizada através de projeto fatorial  $2^k$ , sendo os resultados tratados por meio de análise de variância e as médias comparadas através de teste de Tukey com 99% de confiança. Os compósitos de poliuretano, serragem de madeira e pó de borracha foram moldados com sucesso e suas características são promissoras. De acordo com os resultados, o aumento da concentração de serragem nos particulados aumentou o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade. Além disso, o aumento do teor de COPR e borracha reduziu significativamente a absorção de água e o inchamento de espessura.

**Palavras-chave:** *compósitos, serragem de madeira, pó de borracha de pneu, resina poliuretana vegetal à base de mamona, análise estatística.*

## ABSTRACT

New eco-friendly composites consisting of castor oil-based polyurethane (COPR), wood sawdust, and rubber tire powder were produced and the morphological, physical and flexural properties were investigated. The composites were composed varying the concentration of the COPR matrix (30, 40 and 50 m%) and the wood-rubber ratio of the disperse phase (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 and 50/50 m%/m% wood/rubber, respectively). The morphology of the composites was studied by optical microscopy and scanning electron microscopy, and the flexural properties, water absorption, and thickness swelling were also investigated. The statistical analysis was performed by a  $2^k$  factorial design and the analysis of variance was used to study the effect of each factor (COPR content and wood/rubber ratio) on the characteristics of the composites. Polyurethane/wood/rubber composites were successfully molded and their characteristics are promising. According to the results, the increase in wood content (in the wood/rubber ratio) increased the modulus of rupture and the modulus of elasticity. Moreover, increasing both COPR and rubber content significantly reduced the water absorption and thickness swelling.

**Keywords:** *composites, wood sawdust, rubber tire powder, castor oil-based polyurethane resin, statistical analysis.*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVO.....	18
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	19
2.1. COMPÓSITOS.....	19
2.1.1 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS.....	20
2.2. PARTICULADOS DE MADEIRA.....	21
2.3. PARTICULADOS DE BORRACHA DE PNEU .....	22
2.4. COMPÓSITOS DE MADEIRA E BORRACHA.....	24
2.5. RESINA POLIURETANA À BASE DE ÓLEO DE MAMONA.....	25
2.6. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS PRODUZIDOS COM RESINA POLIURETANA À BASE DE MAMONA .....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1. MATERIAIS .....	28
3.1.1. SERRAGEM DE EUCALIPTOS .....	28
3.1.2. PÓ DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS .....	29
3.1.3. RESINA POLIURETANA À BASE DE MAMONA.....	30
3.2. MÉTODOS .....	30
3.2.1. PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	30

3.2.2. CORPOS-DE-PROVA.....	32
3.2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	33
3.2.3.1. TESTE DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS .....	33
3.2.3.2. INCHAMENTO DE ESPESSURA E ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	34
3.2.3.3. DENSIDADE .....	34
3.2.3.4. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA .....	35
3.2.3.5. MICROSCOPIA ÓTICA.....	35
3.2.3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	35
3.2.3.7. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER.....	35
3.2.3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	36
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	38
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	38
4.1.1. MÓDULO DE RUPTURA .....	38
4.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	43
4.1.3. TENACIDADE À FLEXÃO .....	48
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS .....	49
4.2.1. DENSIDADE .....	49
4.2.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	50
4.2.3. INCHAMENTO DE ESPESSURA .....	54
4.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	59

4.4. ANÁLISE DE MICROSCOPIA.....	61
4.5. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER.....	63
5. CONCLUSÕES .....	65
5.1 POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS.....	66
REFERÊNCIAS.....	67
MOLDE (FÊMEA) – ORIGINALMENTE COM 25 MM DE PROFUNDIDADE.....	75
MOLDE (MACHO).....	76
APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA (MINITAB).....	77
ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	77
INCHAMENTO DE ESPESSURA .....	81
MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	85
MÓDULO DE RUPTURA .....	89
MÓDULO DE TENACIDADE.....	93
ANEXO A – FICHA TÉCNICA DA MATRIZ.....	96
ANEXO B – TABELA-F ALFA=0,01 .....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica da serragem de eucaliptos.....	29
Tabela 2 - Análise granulométrica do pó de borracha de pneus inservíveis .....	30
Tabela 3 - Formulações dos compósitos produzidos com % em massa de resina na mistura final, % em massa de particulados na mistura final e % de serragem e pó de borracha na mistura de particulados .....	31
Tabela 4 - Análise de variância do módulo de ruptura .....	40
Tabela 5 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para o módulo de ruptura .....	40
Tabela 6 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para o módulo de ruptura .....	41
Tabela 7 - Análise de variância do módulo de elasticidade.....	44
Tabela 8 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para o módulo de elasticidade .....	45
Tabela 9 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para o módulo de elasticidade .....	47
Tabela 10 – Análise de Variância da tenacidade à flexão.....	48
Tabela 11 - Densidade média dos compósitos produzidos .....	49
Tabela 12 - Análise de variância da absorção de água.....	52
Tabela 13 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para a absorção de água .....	52
Tabela 14 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para a absorção de água .....	53
Tabela 15 - Análise de variância do inchamento de espessura .....	56
Tabela 16 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para o inchamento de espessura.....	57
Tabela 17 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para o inchamento de espessura.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação simplificada das fases de um compósito.....	19
Figura 2 - Grupos de classificação dos tipos de compósitos <sup>31</sup> .....	20
Figura 3 - Reação de formação do poliuretano através da polimerização de pré-polímero com poliol <sup>70</sup> .....	26
Figura 4 - Desenho do corte dos corpos-de-prova para os ensaio físicos e mecânicos .....	32
Figura 5 - Efeito da concentração de resina no módulo de ruptura dos compósitos produzidos.....	38
Figura 6 - Efeito da razão serragem/borracha no módulo de ruptura dos compósitos produzidos.....	39
Figura 7 - Efeito da concentração de resina no módulo de elasticidade dos compósitos produzidos.....	43
Figura 8 - Efeito da razão serragem/borracha no módulo de elasticidade dos compósitos produzidos.....	44
Figura 9 - Efeito da razão serragem/borracha na absorção de água dos compósitos produzidos.....	50
Figura 10 - Efeito da concentração de resina na absorção de água dos compósitos produzidos.....	51
Figura 11 - Efeito da razão serragem/borracha no inchamento de espessura dos compósitos produzidos.....	55
Figura 12 - Efeito da concentração de resina no inchamento de espessura dos compósitos produzidos.....	55
Figura 13 - Análise Termogravimétrica da serragem de eucaliptos, do pó de borracha de pneus inservíveis e da amostra de compósito produzido com 40% de PU, 30% de serragem e 30% de borracha.....	59
Figura 14 - Microscopia eletrônica de varredura para as partículas de pó de borracha (a) e para a serragem de eucaliptos (b) .....	61

Figura 15 - Morfologia, respectivamente, de MO (microscopias à esquerda) e MEV (microscopias à direita) de: (a) e (b) formulação 1 (30% de resina e 70% de serragem); (c) e (d) formulação 16 (30% de resina, 35% de serragem e 35% de pó de borracha); e (e) e (f) formulação 18 (50% de resina, 25% de serragem e 25% de pó de borracha).....62

Figura 16 - Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier da serragem, pó de borracha, a amostra 3 (50% de COPR e 50% de serragem na mistura final) e a amostra 16 (30% de COPR na mistura final e 35% de serragem e 35% de borracha).....64

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o interesse em fabricar produtos utilizando resíduos de materiais está se tornando cada vez mais popular. A preocupação ambiental resulta na pesquisa e interesse em materiais ambientalmente amigáveis, a fim de identificar destinos apropriados destes materiais após o seu tempo de vida útil.

Neste contexto, o presente estudo visa encontrar uma alternativa para o destino da serragem de madeira de eucaliptos, bem como para o pó de borracha de pneus inservíveis, através do desenvolvimento de compósitos.

A serragem de eucaliptos provém da indústria de transformação da madeira, que gera grandes volumes de resíduos em todas as etapas de produção<sup>39</sup>, sendo que cerca de 40 a 60% do volume inicial é aproveitado ao final do processo<sup>1, 38</sup>.

Os pneus inservíveis também são resíduos abundantes. Na década de 2000, o Brasil possuía um passivo ambiental estimado em 100 milhões de pneus inservíveis<sup>2,3</sup>. Este passivo gera problemas ao meio ambiente e à saúde da população. Alternativas de destino, como a incineração, são frequentemente adotadas. Porém, a queima desse resíduo produz uma fumaça negra altamente poluidora pela diversidade de produtos químicos que são liberados na combustão, capazes de produzir efeitos adversos à saúde<sup>2-4</sup>.

A produção de compósitos utilizando estes dois resíduos, a serragem e o pó de borracha, possui diversas vantagens.

A madeira apresenta densidade relativamente baixa, baixo custo e podem ser desenvolvidos compósitos mais resistentes do que a própria madeira original, bem como existe a possibilidade de criar tamanhos e formas diferentes<sup>5</sup>.

Já o material elastomérico de pneus inservíveis apresenta boa tenacidade, excelente absorção de energia, isolamento acústico, durabilidade, resistência à abrasão, e pode ser usado tanto para fins de isolamento elétrico, quanto para aplicações que requerem baixa condutividade térmica<sup>6-11</sup>. Além disso, as partículas dos pneus são quase completamente hidrofóbicas e minimamente afetadas pela umidade<sup>7,8</sup>.

A literatura possui estudos de compósitos que combinam madeira particulada e borracha proveniente de resíduo de pneu com diversos tipos de matrizes poliméricas<sup>1,5,7,8,9,12,13</sup>.

Melamina–ureia–formaldeído (MUF) e poliisocianato, bem como a combinação de diisocianato difenilmetano polimérico (PMDI) e ureia-formaldeído (UF), já foram empregadas em outros estudos como matrizes de compósitos de madeira-borracha. Resina poliuretana à base de óleo de mamona já foi utilizada como matriz em diversos compósitos, sendo uma resina de menor impacto para o meio ambiente<sup>14-30</sup>. No entanto, compósitos constituídos de serragem e pó de borracha com uma matriz bem distribuída de poliuretano, ainda não foram investigados.

Neste sentido, o presente trabalho se propõe ao desenvolvimento de novos compósitos particulados a partir da combinação de dois resíduos, a serragem de madeira e o pó de borracha de pneus inservíveis, empregando uma resina polimérica adequada e não tóxica, de fonte renovável e de boa compatibilidade com os particulados.

## **1.1 Justificativa**

O apelo pela produção amigável do mundo moderno e a oportunidade de obter uma alternativa de destino para resíduos abundantes e de baixo custo, e que muitas vezes não possuem o destino correto, bem como a possibilidade de combinar dois materiais, serragem de eucaliptos e borracha de pneus inservíveis, para obter um novo compósito, é extremamente relevante e foram as motivações para realização deste estudo.

Também é utilizada neste trabalho a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, pois é um material obtido a partir de recurso natural e renovável. A resina poliuretana derivada da indústria petroquímica, por outro lado, possui a matéria-prima para a sua produção nos compostos derivados do petróleo, que são recursos considerados de maior impacto ao meio ambiente.

Portanto, este trabalho descreve a produção de compósitos particulados pelo aproveitamento de serragem de eucalipto e pó de borracha de pneus inservíveis com resina de poliuretano à base de óleo de mamona. As propriedades físicas, mecânicas,

térmicas e morfológicas dos compósitos foram investigadas de acordo com a quantidade de resina na mistura final e a razão de serragem-borracha nos particulados.

## **1.2 Objetivo**

Neste trabalho, busca-se desenvolver e caracterizar compósitos particulados contendo serragem de eucaliptos e pó de borracha de pneus inservíveis utilizando a resina poliuretana à base de mamona como matriz.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

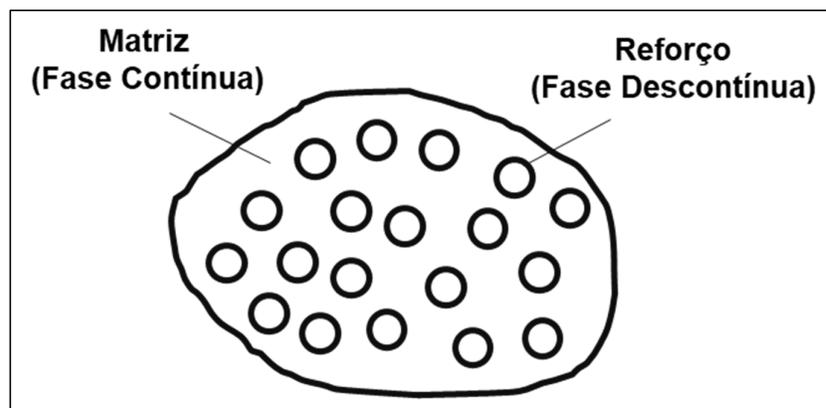
Na produção dos compósitos, almeja-se:

- Produzir compósitos particulados variando as proporções dos constituintes elencados e avaliando os respectivos efeitos;
- Verificar a influência da razão serragem de eucaliptos / borracha de pneus inservíveis, bem como a concentração da resina de poliuretano, na morfologia, propriedades físicas e mecânicas dos compósitos;
- Através da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, obter conclusões estatisticamente fundamentadas sobre a influência da composição dos compósitos nos resultados obtidos.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Compósitos

A produção de compósitos possui o objetivo de atingir propriedades que os materiais sozinhos não seriam capazes de fornecer<sup>31</sup>. De forma geral, os compósitos podem ser definidos como um ou mais materiais aglomerados por uma fase chamada de matriz<sup>31</sup>. Ou seja, os constituintes de um compósito são geralmente arranjados de forma que uma ou mais fases descontínuas, chamados de reforços, são embebidas em uma fase contínua ou matriz<sup>32-34</sup>. A Figura 1 apresenta a representação das fases de um compósito.



**Figura 1 - Representação simplificada das fases de um compósito.**

Os compósitos podem ser classificados em três grupos: compósitos particulados (reforçados com partículas), fibrosos (reforçados com fibras) e estruturais. Os compósitos reforçados com partículas são divididos em compósitos de partículas grandes e reforçados por dispersão, conforme a Figura 2, que apresenta as classificações dos compósitos<sup>31</sup>.

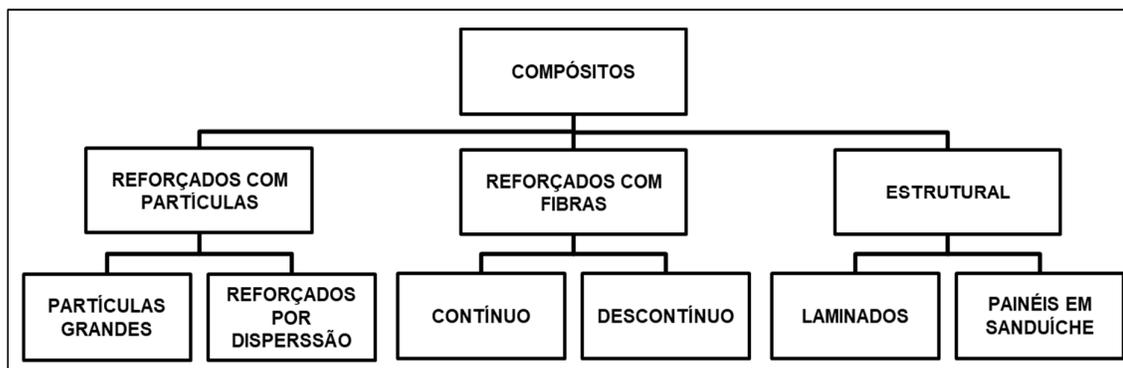


Figura 2 - Grupos de classificação dos tipos de compósitos<sup>31</sup>.

### 2.1.1 Compósitos reforçados com partículas

Os compósitos reforçados com partículas ou particulados são caracterizados como sendo materiais constituídos de partículas de determinados materiais aglomerados por uma matriz, ao que os particulados podem apresentar praticamente qualquer forma, tamanho e configuração<sup>32</sup>. Geralmente, não apresentam a mesma resistência que os compósitos reforçados por fibras, porém a produção é mais fácil e eles oferecem diversas composições e flexibilidade de *design*, além de apresentarem um custo de desenvolvimento bem menor quando comparados com compósitos de fibras<sup>33,35</sup>.

As propriedades finais dos compósitos particulados são previsíveis em todas as direções, por serem livres de orientação<sup>35</sup>. Por este motivo, os compósitos particulados tendem a ser isotrópicos e ter as mesmas propriedades em todas as direções.

Além disso, a fase particulada é mais dura e rígida do que a matriz em muitos casos. Estas partículas tendem a restringir o movimento da matriz na vizinhança de cada partícula<sup>31</sup>. Em suma, a matriz transfere tensão aplicada às partículas, que suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende da forte ligação na interface matriz-partícula<sup>31</sup>.

Este grupo de compósitos é subdividido em compósitos de partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão<sup>31</sup>. Os compósitos reforçados por dispersão utilizam reforços com diâmetros médios de 0,01 a 0,1 $\mu$ m.

### **2.1.1.1. Compósito de partículas grandes**

O compósito particulado é classificado como “grande”, quando a interação partícula-matriz não puder ser tratada em níveis atômicos ou moleculares, como nos particulados por dispersão<sup>31</sup>.

Este tipo de compósito é utilizado com todos os materiais, seja metal, polímero ou cerâmico. As partículas podem ter uma variedade de geometria, mas elas devem ter dimensões parecidas em todas as direções e devem ser distribuídas através de toda a matriz<sup>31</sup>.

## **2.2. Particulados de madeira**

A indústria de transformação da madeira gera grandes volumes de resíduos diversos<sup>39</sup>. Estes resíduos têm variações de quantidade conforme os processos produtivos utilizados, assim como o tipo e o estado do maquinário<sup>36</sup>.

Por gerar resíduos em todas as fases de produção, cerca de 40 a 60% do volume é aproveitado no final do processo<sup>38</sup> e, segundo Macedo<sup>1</sup>, para cada metro cúbico de madeira em tora utilizado na indústria é necessário até um metro cúbico extra.

Além disso, por serem originados em todas as fases do processo produtivo da madeira, os resíduos apresentam formas e granulometrias variadas<sup>37</sup>. Estes resíduos gerados no processo produtivo são: serragem, cepilho (maravalha), lenha (retalhos) e outros (casca e pó)<sup>38,39</sup>.

Segundo o Instituto Brasileiro de Qualidade e Produção<sup>40</sup>, os resíduos gerados são classificados em quatro tipos: i) lenhas e resíduos maiores; ii) maravalha, com dimensões de mais de 2,5 mm; iii) serragem, com dimensões entre 0,5 e 2,5 mm; e iv) pó, resíduos menores que 0,5 mm.

Estes particulados gerados no processo produtivo da madeira, como a serragem, podem ser utilizados para a produção de compósitos, sendo que as vantagens de os utilizar no desenvolvimento de materiais compósitos são a densidade relativamente baixa, baixo custo e a possibilidade de criar tamanhos e formas diferentes<sup>5</sup>. A madeira possui alto desempenho e capacidade de processamento, além

de estrutura porosa, que proporciona excelentes propriedades de adesão com diversos tipos de resina<sup>8</sup>.

Apesar de suas vantagens, as partículas de madeira são altamente higroscópicas. A umidade pode causar inchamento da parede celular ou diminuição de tamanho, enquanto a madeira absorve ou perde água, respectivamente<sup>7</sup>. Além de serem dimensionalmente instáveis, são facilmente atacadas por fungos e insetos, limitando a sua aplicação<sup>8</sup>.

### **2.3. Particulados de borracha de pneu**

Os pneus são compostos de borracha natural e sintética, vários hidrocarbonetos, negro de fumo e outros componentes, sendo que esses componentes somam de 85 a 90% do pneu<sup>41</sup>. O material remanescente é o aço.

Elastômeros à base de butadieno são amplamente utilizados na indústria automobilística e o elastômero mais utilizado na confecção de pneus é o copolímero butadieno-estireno (SBR), contendo 25%, em peso, de estireno. Outros componentes que fazem parte da composição do pneu são o poli cis-isopreno, que é a borracha natural, o poli trans-isopreno, e o poli cis-butadieno<sup>42,44</sup>. A borracha natural garante as propriedades elásticas, e a sintética fornece a estabilidade térmica<sup>44</sup>.

O negro de fumo é usado para conferir à borracha resistência aos esforços e à abrasão, e as misturas de hidrocarbonetos aromáticos são óleos que servem para conferir maciez à borracha e aumentar a moldabilidade durante a confecção dos pneus<sup>43</sup>. Outros componentes que também fazem parte da composição são o enxofre, catalisadores, óxido de zinco e o ácido esteárico<sup>76</sup>.

Quando um pneu não possui mais possibilidade de reforma ou aproveitamento, ele se torna um pneu inservível<sup>44</sup>. Os destinos possíveis para os pneus inservíveis são: deposição em lixões ou aterros sanitários; recuperação dos materiais pela produção de artefatos de borracha ou aproveitamento em materiais não poliméricos (asfalto, Concreto Deformável e Isolante – Concreto DI®, etc); reutilização em playground, drenagem de águas pluviais, recifes artificiais marinhos, flutuantes em portos, proteção nas estradas; utilização para geração de energia através da queima

ou obtenção de óleos e gases derivados do pneu; além de outras ações não controladas como armazenamento nas residências<sup>3</sup>.

Na década de 2000, o Brasil possuía um passivo ambiental estimado em 100 milhões de carcaças de pneus inservíveis<sup>2,3</sup>, para as quais a destinação precária deste resíduo pode causar danos ambientais e também acúmulo de água da chuva, servindo de local para deposição de ovos de mosquitos transmissores de doenças, como a dengue e a febre amarela.

Uma das alternativas de destino para os pneus inservíveis, a incineração, causa preocupação ambiental<sup>7</sup>. Por isso, diversos esforços têm sido colocados para a reciclagem e reaproveitamento dos pneus depois do seu tempo de uso. A queima do pneu produz uma fumaça negra altamente poluidora pela diversidade de produtos químicos que são liberados na combustão, capazes de produzir efeitos adversos à saúde, como perda de memória, deficiência no aprendizado, supressão do sistema imunológico, danos nos rins e fígado. Sendo assim, uma abordagem possível para a eliminação de resíduos de pneus é incorporá-lo em outros compósitos<sup>4</sup>.

A fim de utilizar os resíduos de pneus na produção de compósitos, evitando o descarte e a incineração, estes pneus podem ser transformados em pó de borracha. O processo consiste na separação dos materiais, sendo o pneu inservível triturado várias vezes até ser reduzido a pó de borracha e o aço removido por eletroímãs<sup>44</sup>.

Segundo a literatura<sup>6-11</sup>, o resíduo do pneu inservível é um ótimo material a ser utilizado em compósitos, pois apresenta várias vantagens, como elevada tenacidade, excelente absorção de energia, isolamento acústico, durabilidade, resistência à abrasão, e pode ser usado tanto para fins de isolamento elétrico, quanto para aplicações que requerem baixa condutividade térmica. De acordo com Yang e co-autores<sup>10</sup>, é possível usar borracha de pneu em praticamente todos os tipos de condições, devido à sua capacidade de resistir a climas quentes e frios. Além disso, as partículas dos pneus são quase completamente hidrofóbicas e minimamente afetadas pela umidade<sup>7,8</sup>.

## 2.4. Compósitos de madeira e borracha

A literatura apresenta diversos estudos sobre compósitos produzidos com partículas de borracha de pneus inservíveis e madeiras na forma de fibras e partículas. Estes compósitos apresentam diversas vantagens como resistência à água, estabilidade dimensional, isolamento acústico e absorção de energia<sup>12</sup>.

Ayrilmis et al.<sup>7</sup> investigaram a possibilidade de usar partículas de borracha de pneus inservíveis e partículas de madeira para a produção de compósitos particulados. Dois tipos de resina, melamina-ureia-formaldeído (MUF) e poliisocianato, foram utilizadas como matrizes. Na produção dos compósitos, foram utilizadas partículas de borracha de pneus inservíveis com tamanhos variados. Para o centro do compósito, as partículas utilizadas tinham entre 0,8 e 2,75 mm. Já para as camadas da superfície, as partículas tinham entre 0,01 e 0,8 mm. As partículas de borracha diminuíram a absorção de água dos compósitos produzidos devido à sua propriedade hidrofóbica, embora as propriedades mecânicas tenham diminuído. Já o inchamento de espessura diminuiu significativamente com a adição de borracha à mistura, quando comparado com o compósito produzido somente com madeira particulada.

A produção de compósitos de partículas de madeira de lariço (*larix gmelini*) e partículas de borracha de pneus inservíveis utilizando a combinação de ureia-formaldeído (UF) e dissocianato de difenilmetano polimérico (PMDI) como matriz foi investigada por Jun et al.<sup>13</sup>. Os melhores resultados mecânicos foram obtidos com um tempo de moldagem de 300 s, temperatura de 170 °C, e 1000 kg/m<sup>3</sup> de densidade.

Zhao et al.<sup>9</sup> estudaram as propriedades acústicas de compósitos produzidos com partículas de madeira de lariço (*larix gmelini*) e partículas de borracha de pneus inservíveis, utilizando matriz de UF e PMDI. Com o aumento da quantidade de partículas de borracha na mistura, as propriedades de isolamento acústico aumentaram. Como resultados, as análises de microestrutura revelaram que as partículas de madeira e de borracha são intimamente aderidas na presença da matriz, o que influencia não somente as propriedades acústicas do material, mas também as suas propriedades mecânicas.

Song e Hwang<sup>8</sup> utilizaram diisocianato de difenilmetano (MDI) como fase matriz de compósitos de fibras de madeira e borracha de pneus inservíveis. Os fatores avaliados foram a razão madeira-borracha, com variações de 25%, 50%, 75% e 100%

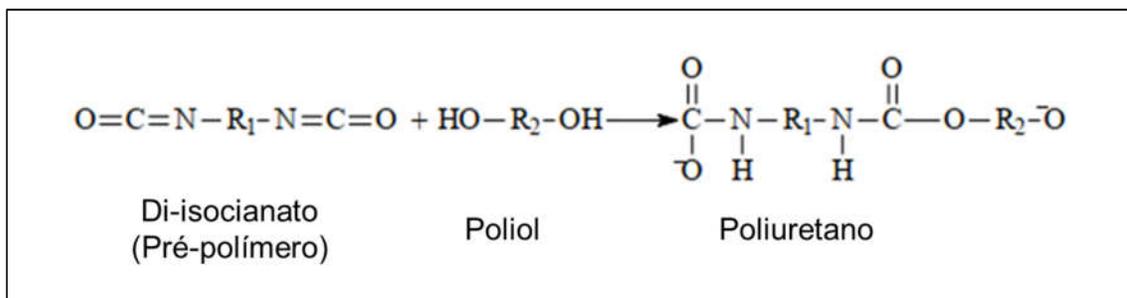
de fibras de madeira e a concentração de MDI variando em 5%, 10%, 15% e 20%. A análise revelou que ambos os fatores tiveram efeito significativo no módulo de ruptura (MOR) e no módulo de elasticidade (MOE), sendo que o teor de fibras de madeira é um fator crítico para estas propriedades. As partículas de borracha preenchem os vazios entre as fibras de madeira, fazendo com que tenham pequena contribuição na resistência do material.

Utilizando diisocianato de difenilmetano (MDI) como matriz de compósitos de madeira e borracha, quando a borracha é adicionada à mistura, a resistência ao impacto é melhorada<sup>5</sup>. Em contrapartida, o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade e a resistência à tração aumentam com a maior proporção de madeira em relação à borracha.

O estudo de Xu e Li<sup>45</sup> buscou desenvolver compósitos de partículas de borracha de pneus inservíveis e partículas de madeira de álamo e avaliou o efeito nas propriedades mecânicas e no inchamento de espessura. Foi utilizada a resina diisocianato de difenilmetano (MDI) como matriz com concentrações variando de 2 a 6% e as partículas de borracha variaram de 0 a 40%. Apesar da diminuição dos valores encontrados para MOE e MOR com a adição de borracha à mistura, o inchamento de espessura foi aprimorado.

## **2.5. Resina poliuretana à base de óleo de mamona**

Poliuretanos são polímeros que são formados pela combinação de um polioliol e um isocianato. Misturando o polioliol com o isocianato, ocorre a polimerização da mistura (Figura 3)<sup>70</sup>. Esta reação de polimerização leva à formação do poliuretano, que pode apresentar maior ou menor dureza de acordo com a quantidade e tipo de polioliol utilizado. O uso de um catalisador pode acelerar a cura da reação<sup>46</sup>.



**Figura 3 - Reação de formação do poliuretano através da polimerização de pré-polímero com polioliol<sup>70</sup>.**

Utilizando óleo de mamona, também é possível sintetizar polióis e pré-polímeros, que, quando misturados, originam a resina poliuretana à base de óleo de mamona (COPR)<sup>46</sup>.

As matérias-primas das resinas de poliuretano são comumente derivadas do petróleo, que são recursos finitos, além de serem prejudiciais à saúde<sup>41</sup>. Como alternativa, fontes naturais para a obtenção de poliuretano estão disponíveis, como os óleos vegetais, dentre eles o óleo de mamona<sup>24</sup>. A resina poliuretana derivada do óleo de mamona possui a vantagem de ser um material obtido a partir de recurso natural e renovável e é classificada como impermeável e não ambientalmente agressiva<sup>14-16,47</sup>.

A utilização de poliuretanos como matrizes para compósitos tem se provado viável por sua flexibilidade e resistência à abrasão<sup>25</sup>, sendo que este polímero desenvolveu uma alta reputação por sua confiabilidade e desempenho na produção de compósitos<sup>69</sup>. Poliuretanos ainda apresentam a particularidade de serem mais compatíveis com fibras vegetais do que outras resinas, devido à possibilidade de reação com grupos hidroxila dos compostos lignocelulósicos com os grupos isocianato do poliuretano<sup>17, 18, 29</sup>.

Por causa da sua funcionalidade e por apresentar grupos hidroxila, o óleo de mamona é compatível para produção de poliuretanos sendo utilizado em reações com isocianato<sup>47</sup>. O óleo de mamona contém praticamente 90% de ácido ricinoleico e é este triglicerídeo que contém grupos hidroxila em suas cadeias que reagem com os

grupos isocianato para formar ligações uretano<sup>48</sup>. Estes grupos adicionais de isocianato do poliuretano podem reagir com os grupos hidroxila da madeira para produzir uma ligação cruzada, melhorando a adesão interfacial entre a os compostos lignocelulósicos e a matriz<sup>20</sup>.

## **2.6. Compósitos poliméricos produzidos com resina poliuretana à base de mamona**

Silva et al.<sup>18</sup> desenvolveram um compósito de COPR reforçado com fibras de sisal e coco e avaliaram a sua tenacidade à fratura. Os resultados relatam que a fibra de coco, em geral, obteve desempenho inferior à fibra de sisal e também em relação à matriz de COPR pura. Além disso, foi observado o aumento da tenacidade à fratura com o aumento da fração volumétrica da fibra.

Fiorelli et al.<sup>19</sup> utilizaram o COPR e UF (ureia-formaldeído) como matrizes com fibras de coco para a produção de compósitos eco eficientes com densidades de 800 kg/m<sup>3</sup> e 1000 kg/m<sup>3</sup>. O resultado para o inchamento de espessura encontrado na utilização de COPR foi menor que para UF. Para o MOR, os resultados foram maiores utilizando COPR. A análise microscópica indicou que o poliuretano à base de óleo de mamona ocupa os espaços entre as partículas, o que contribui para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos.

Fibras de banana foram eficientemente utilizadas com a matriz de COPR na produção de compósitos ambientalmente amigáveis<sup>20</sup>. A resistência à tração e módulo de elasticidade aumentaram com maior concentração de fibras nos compósitos produzidos, sendo que as fibras tratadas com hidróxido de sódio levaram a resultados maiores para ambas as propriedades. Este fenômeno ocorreu pela modificação morfológica e química das fibras tratadas, o que promoveu melhor adesão com a matriz poliuretana.

Campos et al<sup>14</sup> utilizaram COPR na produção de painéis de fibras de *Pinus caribaea var. hondurensis* de média densidade (MDF), sendo que este tipo de painel normalmente é produzido com ureia-formaldeído (UF), melamina-formaldeído (MF) e/ou fenol-formaldeído (FF). Os compósitos poliméricos produzidos atingiram eficiência superior aos padrões europeus na produção de painéis de fibras de

eucalipto de média densidade. O uso de COPR indicou que ela pode ser usada como matriz e substituir outras tóxicas de forma promissora<sup>9</sup>.

Santos et al.<sup>21</sup> estudaram a produção de compósitos particulados de madeira tauari utilizando resina COPR como matriz com concentração de 16% e 1000 kg/m<sup>3</sup> de densidade aparente. As densidades atingidas ficaram entre 930 e 940 kg/m<sup>3</sup> e as propriedades físicas e mecânicas compatíveis com o uso comercial e industrial, sendo que os compósitos produzidos a 130°C obtiveram melhores resultados.

Gryzak<sup>30</sup> produziu compósitos com a utilização de casca de arroz e COPR, e observou que a absorção de água dos compósitos está diretamente relacionada à quantidade de reforço utilizada. Os resultados obtidos permitiram concluir que o compósito pode ser classificado como de baixa densidade, com valores menores que 640 kg/m<sup>3</sup>, sendo adequado para a utilização em núcleo de portas, conforme a norma ANSI A 208.1.

Rodrigues<sup>41</sup> produziu compósitos de resíduos de borracha de pneus inservíveis e resina poliuretana à base de óleo de mamona. As temperaturas de compactação foram de 90 a 100°C, o que permitiu a obtenção de menor tempo de polimerização. Os resultados obtidos permitem concluir que os compósitos produzidos são adequados a aplicações em diversas áreas da construção civil.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Materiais**

Os materiais utilizados para a produção dos compósitos foram o pó de borracha de pneus inservíveis e serragem de eucaliptos, ambos na forma de partículas, e resina poliuretana à base de mamona como matriz. Esses materiais são descritos a seguir.

##### **3.1.1. Serragem de eucaliptos**

A mistura de serragem de eucalipto (*Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus microcorys* e *Corymbia citriodora*) foi fornecida pela empresa madeireira São Luiz localizada na cidade de Tupandi, Rio Grande do Sul, Brasil. Ela foi classificada utilizando peneiras

Bronzinox de malhas 6 (3,360 mm), 12 (1,680 mm), 20 (0,841 mm), 30 (0,595 mm), 40 (0,420 mm), 50 (0,297 mm) e fundo sob um agitador Marqlabor de 10 velocidades.

A Tabela 1 mostra a análise granulométrica das partículas de madeira, sendo que as partículas retidas entre as peneiras de malha 12 (1,680 mm) e malha 20 (0,841 mm) foram utilizadas para a produção dos compósitos, as quais, segundo o Instituto Brasileiro de Qualidade e Produção<sup>40</sup>, são denominadas como serragem.

**Tabela 1 - Análise granulométrica da serragem de eucaliptos.**

<b>Abertura (mm)</b>	<b>Mesh (malha)</b>	<b>% retido</b>	<b>% acumulado</b>
3,360	6	5,10%	5,10%
1,680	12	8,50%	13,60%
0,841	20	33,20%	46,80%
0,595	30	21,30%	68,10%
0,420	40	12,10%	80,20%
0,297	50	7,50%	87,70%
Fundo		12,30%	100,00%

### **3.1.2. Pó de borracha de pneus inservíveis**

O pó de borracha de pneus inservíveis foi fornecido pela empresa Usina da Borracha, localizada na cidade de Novo Hamburgo, no Rio Grande do Sul, Brasil.

O pó foi classificado e as partículas que passaram pela peneira de malha 40 (0,420 mm) foram utilizadas para a produção dos compósitos, o que correspondeu a mais de 96% do material fornecido. A Tabela 2 mostra a análise granulométrica do pó de borracha.

**Tabela 2 - Análise granulométrica do pó de borracha de pneus inservíveis**

<b>Abertura (mm)</b>	<b>Mesh (malha)</b>	<b>% retido</b>	<b>% acumulado</b>
3,360	6	0,00%	0,00%
1,680	12	0,00%	0,00%
0,841	20	0,00%	0,00%
0,595	30	0,11%	0,11%
0,420	40	3,72%	3,83%
0,297	50	46,17%	50,00%
Fundo		50,00%	100,00%

### **3.1.3. Resina poliuretana à base de mamona**

A resina poliuretana derivada do óleo de mamona foi fornecida pela empresa Imperveg com o nome de IMPERVEG® AGT 1315<sup>50</sup>. Ela é bicomponente, isenta de solventes, formada pela mistura de um pré-polímero (componente A) e um polioliol (componente B) na proporção de 1:1,5 (uma parte do componente A e 1 parte e meia do componente B, em volume) e pode ser utilizada como para produção de compósitos com fibras, pó de serragem de madeiras e outros. Esta resina possui perda de massa somente após 210°C, é isenta de liberação de elementos tóxicos, consistência fluída e cor âmbar após a cura<sup>50</sup>.

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Preparação dos compósitos**

Os compósitos foram preparados através da mistura da resina poliuretana à base de mamona com os particulados (serragem de eucaliptos e o pó de borracha de pneus inservíveis). Todas as formulações foram preparadas para atingirem 50g por placa moldada, apresentando uma densidade aparente de 860 kg/m<sup>3</sup>.

Tendo em vista a mistura final dos compósitos, a resina poliuretana à base de mamona foi preparada através da mistura de uma parte de pré-polímero com uma parte e meia de polioliol (volume/volume), com o intuito de obter 30%, 40% ou 50% em massa da mistura final. Consequentemente, os particulados foram misturados com o

intuito de obter 50%, 60% ou 70% em massa da mistura final. O pó de borracha foi adicionado à serragem em proporções de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% com base na massa de serragem a 13% de umidade. A Tabela 3 apresenta as 18 formulações preparadas.

**Tabela 3 - Formulações dos compósitos produzidos com % em massa de resina na mistura final, % em massa de particulados na mistura final e % de serragem e pó de borracha na mistura de particulados.**

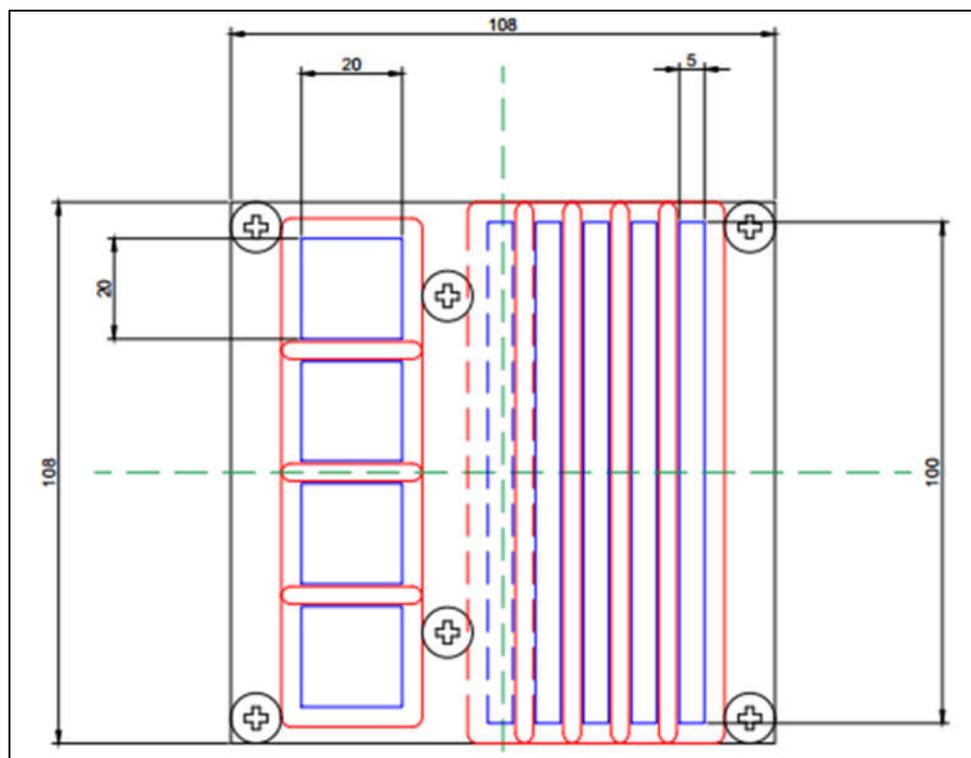
Formulação	% em massa de resina na mistura final	% em massa de particulados na mistura final	% em massa de serragem nos particulados	% em massa de pó de borracha nos particulados
1	30	70	100	0
2	40	60	100	0
3	50	50	100	0
4	30	70	90	10
5	40	60	90	10
6	50	50	90	10
7	30	70	80	20
8	40	60	80	20
9	50	50	80	20
10	30	70	70	30
11	40	60	70	30
12	50	50	70	30
13	30	70	60	40
14	40	60	60	40
15	50	50	60	40
16	30	70	50	50
17	40	60	50	50
18	50	50	50	50

Os três materiais foram homogeneizados manualmente por um minuto através da utilização de bastão de vidro. Após a homogeneização, as misturas foram colocadas em um molde de aço com dimensões de 108 mm x 108 mm para atingirem uma espessura de 5 mm, contendo filme de polietileno como agente desmoldante, e então comprimidas por prensa hidráulica aquecida a 100 °C com 2,4 MPa de pressão por 5 min. Os compósitos foram produzidos aleatoriamente dentro de cada replicação

(três replicações de cada formulação), conforme recomendação para análise estatística<sup>51</sup>.

### 3.2.2. Corpos-de-prova

Os compósitos produzidos foram usinados utilizando uma fresa de topo reto (*End mill*) de corte duplo com estilo espiga de milho (*Corn Teeth*), com rotação de 13.000 RPM, profundidade de 0,75 mm por passo e avanço de corte de 700 mm/min, a fim de obter os corpos-de-prova para a realização dos ensaios físicos e mecânicos. A Figura 4 representa o desenho do corte dos corpos-de-prova.



**Figura 4 - Desenho do corte dos corpos-de-prova para os ensaio físicos e mecânicos com medidas em milímetros.**

### 3.2.3. Caracterização dos compósitos produzidos

#### 3.2.3.1. Teste de flexão de três pontos

Para a caracterização mecânica dos compósitos, foi realizado o teste de flexão de três pontos, que determina o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), em uma máquina universal EMIC, modelo DL2000.

Três corpos de prova de cada formulação com dimensões de 100 mm x 5 mm x 5 mm foram utilizados com base na norma ASTM D790<sup>52</sup>.

O módulo de ruptura na flexão é calculado conforme a Equação 1<sup>52</sup>:

$$MOR = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (1)$$

onde:

- MOR = módulo de ruptura na flexão, MPa,
- P = força aplicada, N,
- L = distância do suporte, mm
- b = largura do feixe, mm, e
- d = espessura do feixe, mm.

O módulo de elasticidade na flexão é calculado através da Equação 2<sup>52</sup>:

$$MOE = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot d^3} \quad (2)$$

onde:

- MOE = módulo de elasticidade na flexão, MPa,
- L = distância do suporte, mm,
- b = largura do feixe, mm,
- d = espessura do feixe, mm, e
- m = inclinação da secante da curva força-deformação.

Também é possível determinar o módulo de tenacidade à flexão ( $U_{tf}$ ) através dos resultados obtidos no ensaio de flexão usando a equação 3<sup>53</sup>:

$$U_{tf} = \frac{2 \cdot P_{m\acute{a}x} \cdot v_{m\acute{a}x}}{3 \cdot S \cdot L} \quad (3)$$

onde:

- $U_{f}$  = valor numérico da tenacidade em flexão (Nm/m<sup>3</sup>),  
 $P_{máx}$  = carga máxima (ruptura) atingida no ensaio (N),  
 $U_{máx}$  = máxima deformação atingida na carga máxima (m),  
 $S$  = área da seção transversal (m<sup>2</sup>), e  
 $L$  = comprimento da amostra (m).

### 3.2.3.2. Inchamento de espessura e absorção de água

Testes de inchamento de espessura (TS) e absorção de água (WA) foram realizados com amostras contendo medidas de 20 mm x 20 mm x 5 mm. Seis corpos-de-prova, dois para cada réplica, foram analisados com base na norma ASTM D1037<sup>38</sup>.

Os corpos de prova foram colocados em estufa a 60°C por 24h para condicionamento e resfriados à temperatura ambiente por mais 24h. Após a medição da espessura e da pesagem, foram imersos em água destilada por 24 horas e a espessura e a massa foram novamente medidas.

A obtenção da absorção de água foi baseada na norma ASTM D1037<sup>54</sup> e foi calculada através da Equação 4:

$$A = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (4)$$

onde:

- $A$  = absorção de água, em porcentagem (%),  
 $m_1$  = massa após 24h de imersão em água destilada (g), e  
 $m_0$  = massa inicial (g).

### 3.2.3.3. Densidade

Os compósitos foram produzidos a fim de se obter uma densidade aparente de aproximadamente 860 kg/m<sup>3</sup>. Para a verificação da densidade, os compósitos produzidos foram pesados em balança analítica e medidos com paquímetro. A obtenção da densidade foi baseada na norma ASTM D2395<sup>55</sup> e foi calculada através da Equação 5:

$$D = \frac{m}{V} \times 1000 \quad (5)$$

onde:

D = densidade (kg/m<sup>3</sup>),

m = massa (g), e

V = volume (cm<sup>3</sup>).

#### **3.2.3.4. Análise Termogravimétrica**

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada utilizando um equipamento STA 449 F3 Júpiter, da Netzsch, em atmosfera de nitrogênio (50 mL/min.) utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min de 30 até 900°C, em cadinhos de Pt-Rh.

#### **3.2.3.5. Microscopia ótica**

A microscopia ótica foi realizada utilizando um microscópio estereoscópio trinocular DI-106 T LED, da marca Digilab, sendo que as amostras foram transversalmente cortadas na direção de compactação, embutidas em resina acrílica e lixadas a seco em sequência de granas: 100, 200, 400, 600, 1000 e 1200.

#### **3.2.3.6 Microscopia eletrônica de varredura**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada utilizando um equipamento Phenom SEM G1 (FEI Company). A tensão de aceleração utilizada foi de 5 kV.

Com exceção do pó de borracha e de serragem, as amostras dos compósitos foram fraturados criogenicamente após imersão em nitrogênio líquido por aproximadamente 1 min. Antes dos ensaios, o pó de borracha, a serragem e as amostras foram secas em estufa com circulação de ar a 80°C por 20h e mantidas em dessecador até o momento da análise. O pó de borracha, a serragem e as amostras foram utilizadas sem modificação superficial por *sputtering* (pulverização catódica).

#### **3.2.3.7. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier**

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica importante para a caracterização de polímeros. Para o ensaio de FTIR, todas

as amostras foram secas em estufa com circulação de ar a 80°C por 20h antes das análises. Foi utilizado um equipamento FTIR modelo Tensor 27 (Bruker) no modo de reflectância total atenuada (ATR) usando um cristal de ZnSe. O intervalo de análise foi de 4000 a 600 1/cm, com resolução de 2 1/cm. Foi aplicada a correção de linha base para os resultados obtidos.

### **3.2.3.8. Análise estatística**

A análise estatística foi realizada através de projeto fatorial  $2^k$ , que é utilizado para experimentos envolvendo o estudo de diversos fatores, onde todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores estudados são investigadas. A análise é realizada através de um instrumento chamado de ANOVA (análise de variância)<sup>51</sup>.

A ANOVA realiza um teste estatístico a fim de comparar a igualdade de médias e verificar se existe algum tratamento realizado que é discrepante dos demais. O projeto deve ser totalmente aleatorizado e possuir pelo menos duas replicações<sup>51</sup>.

Na análise dos experimentos, é realizado um teste de hipóteses na aplicação da ANOVA, para verificar se há diferença entre os tratamentos<sup>51</sup>.

Onde,

$H_0$ : Hipótese nula (todos os tratamentos são iguais),

$H_1$ : Hipótese alternativa (pelo menos um tratamento é diferente dos demais).

Há diferença entre os tratamentos se o valor-F calculado foi maior que o valor-F tabelado (Anexo B – Teste F para nível de significância de 0,01), sendo rejeitada, então, a hipótese nula. Caso contrário, a hipótese nula é aceita e pode ser afirmado que todos os tratamentos são iguais com o nível de confiança escolhido para a análise. A rejeição da hipótese nula indica que pelo menos um dos tratamentos realizados possui média diferente dos demais<sup>51</sup>.

O valor-P encontrado na ANOVA também é analisado, com o intuito de reforçar a interpretação do valor-F. Se o valor-P for menor que o nível de significância escolhido, pode ser afirmado que existe pelo menos um par de médias diferente das demais<sup>51</sup>.

A fim de saber quais tratamentos são diferentes, o teste de Tukey foi utilizado. Ele faz a comparação entre os pares de médias dos tratamentos. Caso o teste de

Tukey encontrar médias de tratamentos iguais, é possível afirmar que estes tratamentos são estatisticamente iguais ao nível de confiança escolhido para a análise<sup>51</sup>.

Neste estudo, três repetições foram realizadas aleatoriamente para cada uma das 18 formulações no teste de flexão de três pontos para determinar as propriedades físicas de MOE, MOR e Utf. Para os testes de WA e TS, três repetições foram realizadas, mas para cada replicação foi feita uma repetição.

A análise de variância (ANOVA) com 99% de confiança foi utilizada para analisar as propriedades MOR, MOE, Utf, WA e TS. Para todas as propriedades, considerou-se o fator concentração de resina, o fator razão serragem-borracha na mistura e a interação entre estes fatores.

Após a análise de variância, o teste de Tukey foi realizado com 99% de nível de confiança para identificar diferença ou igualdade entre os pares de médias dos tratamentos.

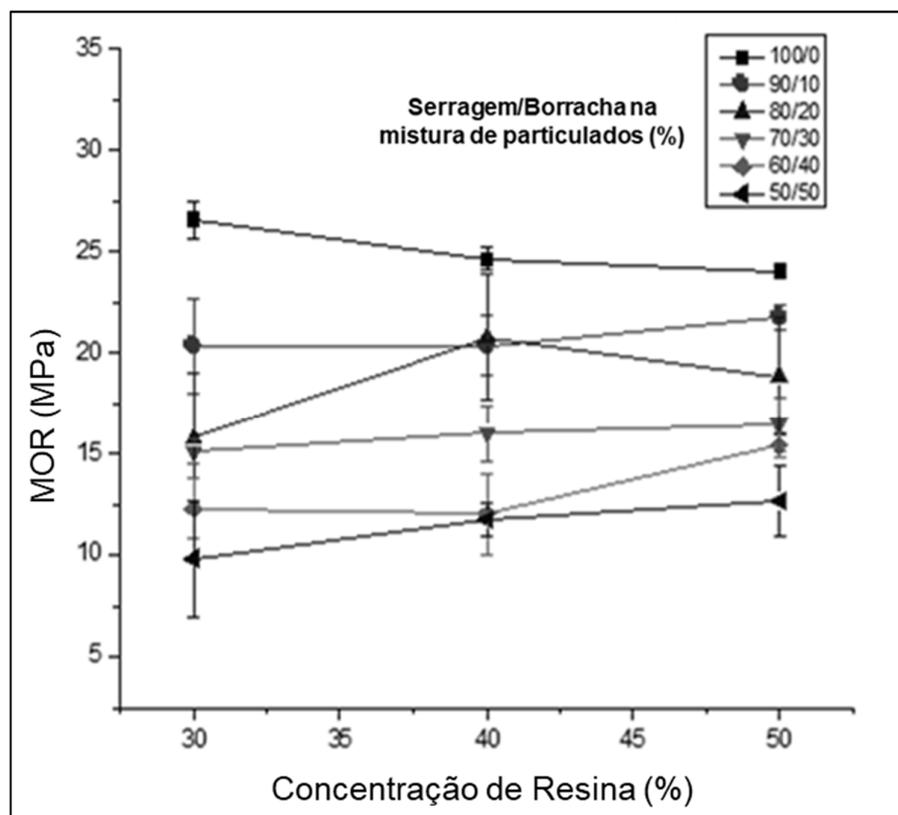
As análises realizadas com os dados obtidos, tanto para ANOVA quanto para o teste de Tukey, foram realizados com a utilização do software MINITAB<sup>75</sup>.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Propriedades mecânicas

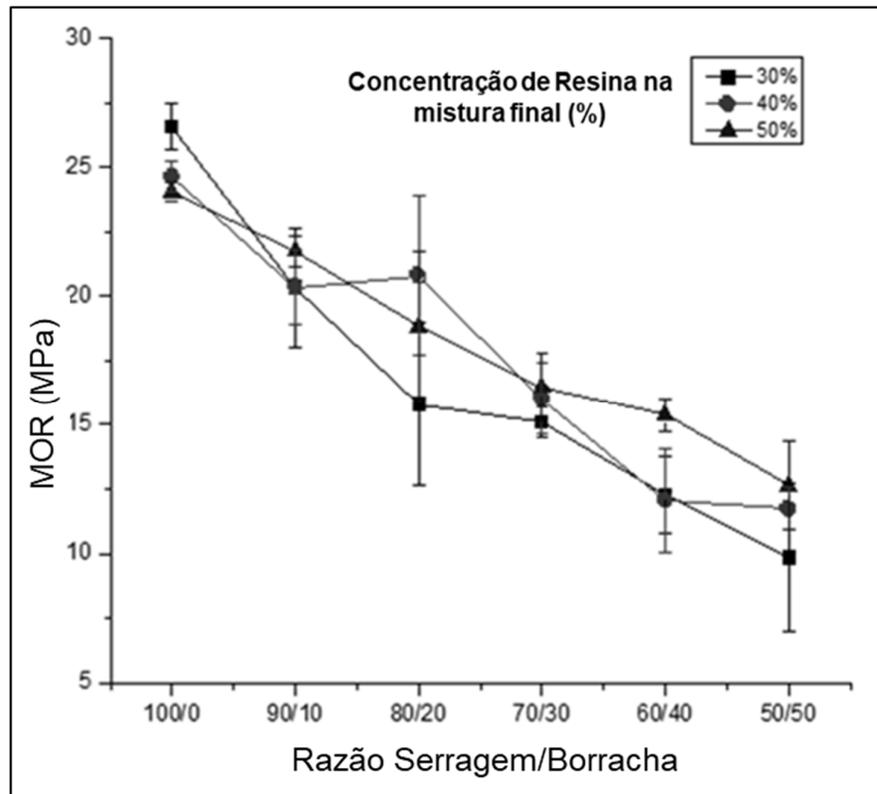
#### 4.1.1. Módulo de ruptura

A Figura 5 apresenta os resultados de módulo de ruptura (MOR) em relação à concentração de resina. Com base na Figura 5, o fator de concentração de resina para MOR apresenta efeito marginal nesta propriedade.



**Figura 5 - Efeito da concentração de resina no módulo de ruptura dos compósitos produzidos.**

A Figura 6 apresenta os resultados para MOR em relação à razão de serragem-borracha na mistura. Com base da Figura 6, o aumento da quantidade de borracha tende a reduzir o valor de MOR.



**Figura 6 - Efeito da razão serragem/borracha no módulo de ruptura dos compósitos produzidos.**

A Tabela 4 apresenta a análise de variância (ANOVA) aplicada para a propriedade mecânica MOR com um intervalo de confiança de 99% e um nível de significância de 0,01.

Os resultados da ANOVA mostram que o fator de concentração da resina não apresentou influência significativa nesta propriedade, pois o valor-F tabelado, igual a 5,25, é menor que o valor-F calculado, que foi de 3,21. Já o valor-P foi de 0,052, maior que o nível de significância de 0,01. No entanto, se o nível de significância fosse 0,052, a concentração de resina poderia ser considerada significativa para MOR.

**Tabela 4 - Análise de variância do módulo de ruptura.**

<b>ANOVA - Módulo de Ruptura (MOR)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média dos Quadrados</b>	<b>Valor-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Concentração de Resina</b>	21,34	2	10,67	3,21	0,05200
<b>Razão Seragem-Borracha</b>	1148,57	5	229,71	69,16	<0,0001
<b>Interação</b>	67,20	10	6,72	2,02	0,05697
<b>Erro</b>	119,58	36	3,32	1	
<b>Total</b>	1356,69	53			

Os valores médios encontrados para MOR, em relação ao fator concentração de resina, são colocados na Tabela 5, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 5 indica que, conforme a concentração de resina aumenta na mistura, o valor obtido para MOR também aumenta. Porém, o teste de Tukey indica que, para o fator concentração de resina, todos os tratamentos realizados são estatisticamente iguais. Isto confirma estatisticamente a interpretação de que este fator tem efeito marginal em MOR.

**Tabela 5 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para o módulo de ruptura.**

<b>Tratamentos Concentração de Resina (%)</b>	<b>MOR (MPa)</b>	
<b>30</b>	16,66 ± (5,93)	<b>A</b>
<b>40</b>	17,60 ± (5,10)	<b>A</b>
<b>50</b>	18,19 ± (4,17)	<b>A</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

A ANOVA apresentada na Tabela 4 também traz resultados para o fator razão serragem-borracha. O valor-F encontrado foi de 69,16, maior que o valor-F tabelado de 3,57, sendo este o fator de maior significância para o módulo de ruptura. O valor-P encontrado, menor que 0,0001, confirma a significância deste fator.

Os valores médios encontrados para MOR, em relação ao fator razão serragem-borracha, são apresentados na Tabela 6, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 6 indica que, conforme a quantidade de borracha aumenta na mistura, o valor obtido para MOR diminui. O teste de Tukey para o fator razão de serragem-borracha indica que os tratamentos com 10% de borracha e com 20% de borracha são iguais estatisticamente. O mesmo ocorre com os pares de tratamento de borracha 20-30%, 30-40% e 40-50%. Isto confirma que o aumento da concentração de borracha na mistura final influencia esta propriedade.

**Tabela 6 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para o módulo de ruptura.**

Tratamentos Razão Serragem-Borracha		MOR (MPa)	
Serragem nos particulados (%)	Borracha nos particulados (%)		
100	0	25,10 ± (1,28)	<b>A</b>
90	10	20,81 ± (1,57)	<b>B</b>
80	20	18,47 ± (3,43)	<b>BC</b>
70	30	15,87 ± (1,18)	<b>CD</b>
60	40	13,23 ± (2,06)	<b>DE</b>
50	50	11,41 ± (2,12)	<b>E</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

Também foram comparados os resultados obtidos com a norma ANSI A 208.1, que estabelece requisitos e métodos de teste para tolerâncias dimensionais, propriedades físicas e mecânicas para painéis de partículas. Esta norma admite como

valor mínimo requerido de 14,9 MPa para MOR em painéis particulados de alta densidade<sup>56</sup>. Das 18 formulações preparadas, somente 5 não atingiram este valor, sendo elas:

- 1- Concentração de resina de 30% com mistura de particulados de 50% serragem / 50% borracha;
- 2- Concentração de resina de 30% com mistura de particulados de 60% serragem / 40% borracha;
- 3- Concentração de resina de 40% com mistura de particulados de 50% serragem / 50% borracha;
- 4- Concentração de resina de 40% com mistura de particulados de 60% serragem / 40% borracha;
- 5- Concentração de resina de 50% com mistura de particulados de 50% serragem / 50% borracha.

Conforme os resultados obtidos, o aumento da concentração de borracha na mistura final tende a diminuir o valor de MOR, sendo que as formulações que não foram classificadas como de alta densidade possuem alta concentração de borracha na mistura final. As partículas de borracha ocupam os espaços entre as partículas de madeira e contribuem pouco com as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos<sup>8</sup>.

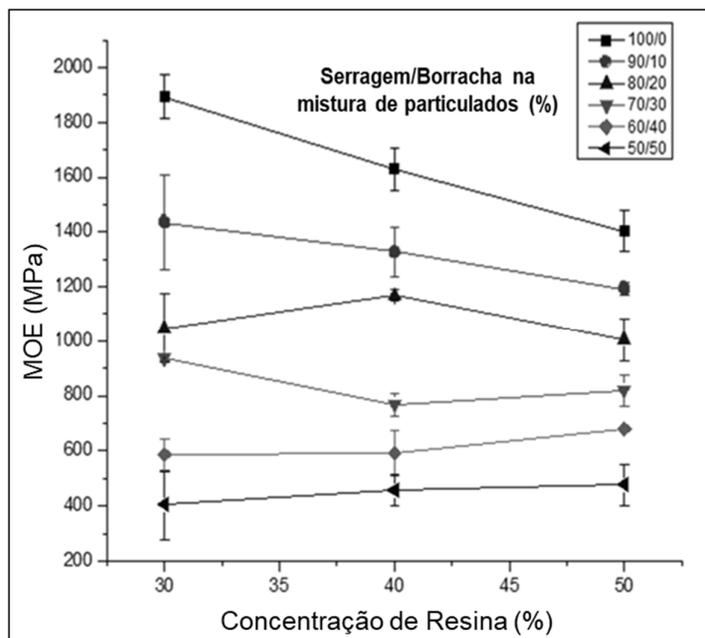
Comparada à borracha, a serragem de madeira tem uma fração volumétrica maior e maior área específica, o que contribui para as propriedades mecânicas do compósito. Assim sendo, aumentando a fração de serragem para borracha aumentam as propriedades mecânicas, como o módulo de ruptura, dos compósitos<sup>57</sup>.

A madeira possui maior rigidez que os outros componentes do compósito. Com maior concentração de madeira na mistura, a força aplicada para flexionar o compósito produzido é mais elevada, o que, conseqüentemente, aumenta o valor de MOR e está de acordo com os resultados reportados por Song e Hwang<sup>8</sup>. Hein e Brancheriau<sup>73</sup> reportaram MOR na ordem de 76 MPa para variedades de eucaliptos, sendo este valor mais elevado que o encontrado para os compósitos produzidos. Portanto, quanto maior a concentração de serragem na mistura, maior a influência deste particulado no aumento do valor de MOR.

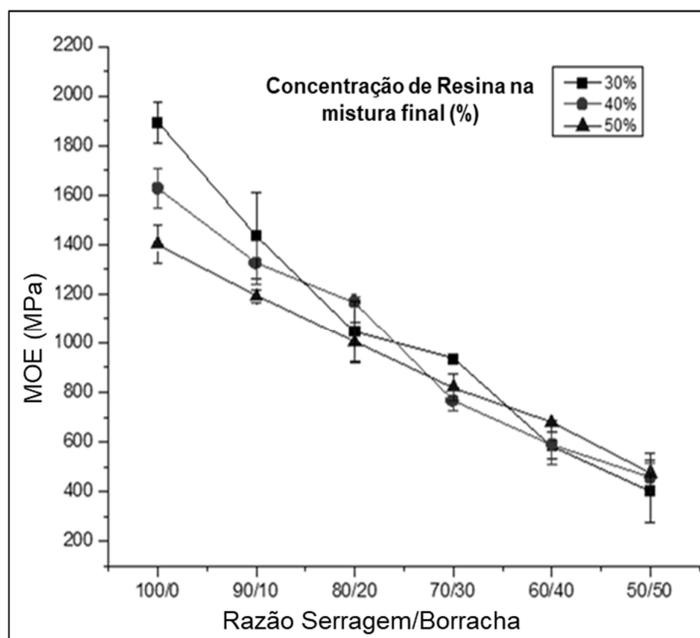
Os resultados encontrados para MOR foram similares aos encontrados por Ayrlimis et al.<sup>7</sup>, apesar do estudo ter utilizado menor concentração de resina como matriz (10% em massa de poliisocianato baseado na massa de madeira seca) e densidades para os compósitos em torno de 650 kg/m<sup>3</sup>. Song e Hwang<sup>8</sup> encontraram valores maiores para MOR do que o presente trabalho, porém os autores investigaram compósitos com 1000 kg/m<sup>3</sup> de densidade e menores concentrações de resina (de 5 a 20% de MDI).

#### 4.1.2. Módulo de elasticidade

A Figura 7 apresenta os resultados de módulo de elasticidade (MOE) em relação à concentração de resina. O fator de concentração de resina também tem, de modo geral, efeito marginal nesta propriedade, exceto para aos compósitos contendo apenas serragem (razão serragem/borracha 100/0, respectivamente), onde o aumento da concentração de resina ocasionou redução do MOE. Já a Figura 8 apresenta os resultados para MOE em relação à razão de serragem-borracha na mistura, sendo que, conforme a quantidade de borracha aumenta na mistura, os valores de MOE tendem a diminuir.



**Figura 7 - Efeito da concentração de resina no módulo de elasticidade dos compósitos produzidos.**



**Figura 8 - Efeito da razão serragem/borracha no módulo de elasticidade dos compósitos produzidos.**

A Tabela 7 apresenta a análise de variância (ANOVA) aplicada para a propriedade mecânica MOE com um intervalo de confiança de 99% e um nível de significância de 0,01.

**Tabela 7 - Análise de variância do módulo de elasticidade.**

ANOVA - Módulo de Elasticidade (MOE)					
Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Valor-F	Valor-P
Concentração de Resina	131458,27	2	65729,13	9,92	0,0004
Razão Seragem-Borracha	8951026,12	5	1790205,22	270,24	<0,0001
Interação	432016,46	10	43201,65	6,52	<0,0001
Erro	238479,82	36	6624,44	1	
Total	9752980,66	53			

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 7 mostram que o fator de concentração da resina apresentou influência significativa ao nível de significância de 0,01. O valor-F obtido foi de 9,92, que é maior que o valor-F tabelado de 5,25, e o valor-P de 0,0004 confirmam a significância deste fator, pois é menor que o valor de significância de 0,01.

Os valores médios encontrados para MOE, em relação ao fator concentração de resina, são colocados na Tabela 8, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 8 indica que, conforme a concentração de resina aumenta na mistura, o valor obtido para MOE diminui. O teste de Tukey indica que para o fator concentração de resina, as médias dos tratamentos com 30% e com 50% são estatisticamente diferentes entre si. Já a média dos tratamentos com 40% de resina são estatisticamente iguais aos tratamentos de 30% e de 50%.

Estudos anteriores identificaram valores médios de MOE para a resina poliuretana pura à base de óleo de mamona situam-se na ordem de 160 MPa<sup>17</sup>. Já a serragem de eucalipto, pode atingir valores muito mais elevados conforme Hein<sup>73</sup>, que encontrou MOE médio de 12500 MPa para diversas variedades de eucaliptos. Com o aumento da concentração de resina na mistura final, menor o valor de serragem, o que, conseqüentemente, diminuiu o valor de MOE para os compósitos.

**Tabela 8 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para o módulo de elasticidade.**

<b>Tratamentos Concentração de Resina (%)</b>	<b>MOE (MPa)</b>	
<b>30</b>	1049,84 ± (523,00)	<b>A</b>
<b>40</b>	989,35 ± (433,00)	<b>AB</b>
<b>50</b>	929,98 ± (323,50)	<b>A</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

A ANOVA apresentada na Tabela 7 também traz resultados para o fator razão serragem-borracha. Em relação a este fator, o valor para o valor-F encontrado foi de 270,24, bem maior que o valor-F tabelado de 3,57, sendo este o fator de maior significância para o módulo de elasticidade. O valor-P encontrado, menor que 0,0001, confirma com a significância deste fator.

Os valores médios para MOE, em relação ao fator serragem-borracha, são apresentados na Tabela 9, indicando que, conforme a quantidade de borracha aumenta na mistura, o valor obtido para MOE diminui. Também é apresentado os resultados do teste de Tukey para o fator razão de serragem-borracha com 99% de confiança, revelando que todos os tratamentos realizados são estatisticamente diferentes. Este resultado comprova a significativa influencia que a concentração de borracha tem na propriedade MOE.

Os resultados dos valores de MOE também foram comparados os resultados obtidos com a norma ANSI A 208.1<sup>56</sup>. A norma admite como valor mínimo requerido de 2160 MPa para MOE em painéis particulados de alta densidade. Nenhuma das formulações atingiu este valor. Para média densidade, o valor mínimo da norma é de 1380 MPa<sup>56</sup>. Das 18 formulações, 13 não atingiram este valor mínimo, tendo como característica, então, a de painéis de baixa densidade. Somente 5 formulações atingiram o valor para média densidade, sendo elas:

- 1- Concentração de Resina de 30% com mistura de particulados de 100% serragem / 0% borracha;
- 2- Concentração de Resina de 30% com mistura de particulados de 90% serragem / 10% borracha;
- 3- Concentração de Resina de 40% com mistura de particulados de 100% serragem / 0% borracha;
- 4- Concentração de Resina de 40% com mistura de particulados de 90% serragem / 10% borracha;
- 5- Concentração de Resina de 50% com mistura de particulados de 100% serragem / 0% borracha.

**Tabela 9 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para o módulo de elasticidade.**

Tratamentos Razão Serragem-Borracha		MOE (MPa)	
Serragem nos particulados (%)	Borracha nos particulados (%)		
<b>100</b>	<b>0</b>	1640,59 ± (223,20)	<b>A</b>
<b>90</b>	<b>10</b>	1317,78 ± (144,00)	<b>B</b>
<b>80</b>	<b>20</b>	1072,79 ± (105,00)	<b>C</b>
<b>70</b>	<b>30</b>	841,25 ± (83,10)	<b>D</b>
<b>60</b>	<b>40</b>	618,68 ± (67,30)	<b>E</b>
<b>50</b>	<b>50</b>	445,15 ± (85,10)	<b>F</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

A proporção de partículas de serragem e borracha é um fator crítico que influencia as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com esses materiais. Partículas de madeira têm elevados valores de resistência e módulo de elasticidade. Como elastômero, as partículas de borracha têm um módulo de elasticidade menor e um alongamento maior que o da madeira, sendo que a borracha consiste em longas cadeias flexíveis de macromoléculas conferindo a capacidade de suportar grandes deformações<sup>7</sup>.

Em estudo de elastômeros como o SBR contendo negro de fumo, o valor máximo de módulo de elasticidade encontrado é de 17,6 MPa<sup>74</sup>, sendo muito menor que os valores de 12500 MPa encontrados para variedades de eucaliptos<sup>73</sup>. Portanto, com o aumento da quantidade de borracha na mistura, e a consequente diminuição da quantidade de serragem, o valor de MOE para o compósito diminui.

Os resultados encontrados para MOE também foram similares aos encontrados por Ayrilmis et al.<sup>7</sup>, apesar do estudo ter utilizado menor concentração de resina como matriz e menor valor de densidade. Song e Hwang<sup>8</sup> encontraram valores maiores para MOE do que o presente trabalho, porém os autores investigaram compósitos com maior densidade e menores concentrações de resina.

#### 4.1.3. Tenacidade à flexão

A Tabela 10 apresenta a análise de variância (ANOVA) aplicada para a propriedade mecânica tenacidade à flexão ( $U_{tf}$ ) com um intervalo de confiança de 99% e um nível de significância de 0,01.

**Tabela 10 – Análise de Variância da tenacidade à flexão.**

ANOVA - Tenacidade à Flexão ( $U_{tf}$ )					
Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Valor-F	Valor-P
Concentração de Resina	218525799	2	109262900	1,77	0,1850
Razão Seragem-Borracha	999551893	5	199910379	3,23	0,0160
Interação	1007010396	10	100701040	1,63	0,1380
Erro	2224836657	36	100701040	1	
Total	4449924745	53			

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 10 mostram que o fator de concentração da resina não apresentou influência significativa ao nível de significância de 0,01, pois o valor-F obtido foi de 1,77, que é menor que o valor-F tabelado de 5,25, e o valor-P de 0,1850 confirma a não significância deste fator.

Em relação ao fator razão serragem-borracha, o valor para o valor-F encontrado foi de 3,23, também menor que o valor-F tabelado de 3,57. O valor-P encontrado foi de 0,016, maior que o nível de significância de 0,01, o que indica que este fator também não teve significância em  $U_{tf}$ .

O teste de Tukey com 99% de confiança apresenta para esta propriedade resultados de igualdade estatística, o que é esperado conforme as indicações da ANOVA. Estes resultados são apresentados no Apêndice B.

O módulo de tenacidade à flexão não apresenta dependência de qualquer formulação dos compósitos produzidos. O aumento da carga máxima ( $P_{máx}$ ) é

acompanhado do decréscimo no valor máximo de formação atingido na carga máxima ( $U_{máx}$ ). Como os outros valores da Equação 3, S (área da seção transversal) e L (comprimento da amostra), não são modificados, os resultados finais não são significativamente diferentes.

## 4.2. Propriedades físicas

### 4.2.1. Densidade

Os resultados para a densidade aparente são mostrados na Tabela 11. Pode-se observar que a média se situa entre  $816 \text{ kg/m}^3$  e  $836 \text{ kg/m}^3$ . Ou seja, menor que a densidade aparente pretendida aproximada de  $860 \text{ kg/m}^3$ . Com estas densidades, a norma ANSI A 208.1<sup>56</sup> nos permite dizer que os painéis produzidos são de alta densidade.

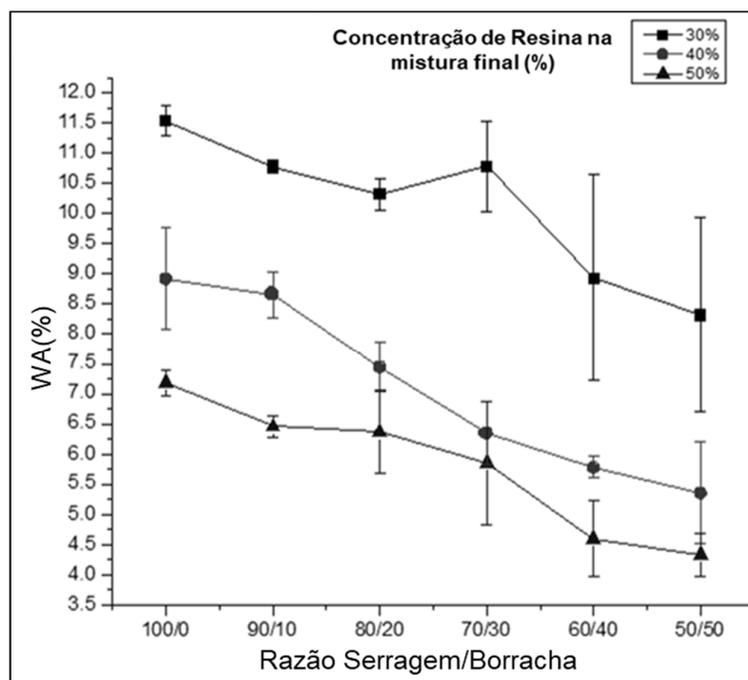
**Tabela 11 - Densidade média dos compósitos produzidos.**

Formulação	Densidade Média ( $\text{kg/m}^3$ )	Desvio Padrão
1	834	2,3
2	821	6,8
3	816	5,2
4	836	1,7
5	830	2,9
6	822	2,3
7	833	1,9
8	833	4,0
9	822	1,3
10	834	4,3
11	828	1,6
12	820	4,1
13	836	2,3
14	832	3,1
15	825	1,2
16	833	0,5
17	829	0,6
18	823	5,0

Esta diferença entre a densidade aparente pretendida e a densidade aparente média encontrada pode ser explicada pela perda de material durante o processo de mistura<sup>21</sup> e também pode estar relacionada a expansão do poliuretano em função da reação do isocianato com a água, gerando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), reduzindo a densidade aparente<sup>62</sup>.

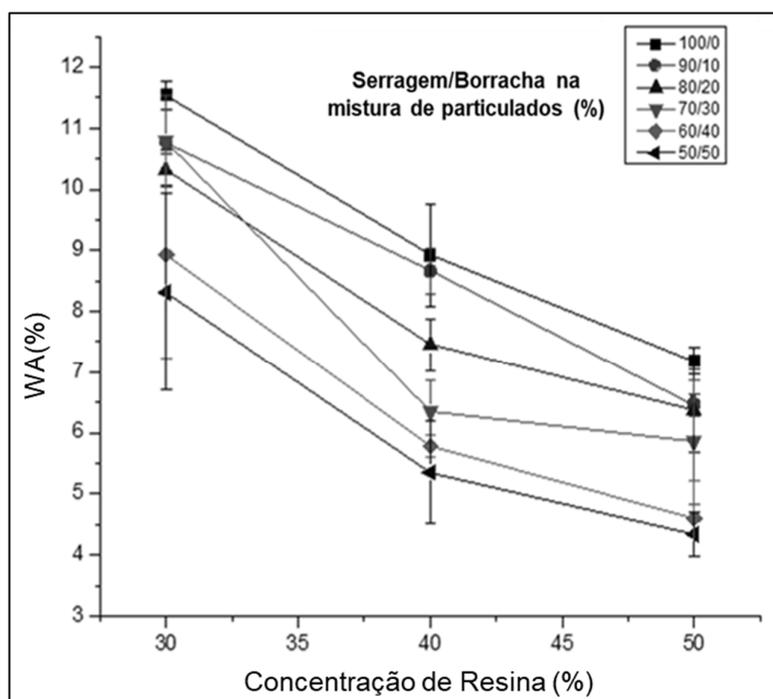
#### 4.2.2. Absorção de água

A Figura 9 apresenta os resultados de absorção de água (WA) em relação à razão de serragem-borracha. Conforme a razão de borracha em relação à serragem aumenta na mistura, a absorção de água tem a tendência de diminuir o valor. A Figura 10 apresenta os resultados absorção de água (WA) em relação à concentração de resina, sendo que, com o aumento da concentração de resina na mistura, a absorção de água também diminuiu de forma acentuada.



**Figura 9 - Efeito da razão serragem/borracha na absorção de água dos compósitos produzidos.**

A borracha é hidrofóbica e tem mínima interação com a água, ao contrário da serragem que é hidrofílica. Ao aumentar-se a concentração de borracha na mistura, a quantidade de partículas de serragem diminui, o que contribui para diminuir a absorção de água. Da mesma forma, ao aumentar-se a concentração de resina, a quantidade final de serragem diminui, o que também contribui para a diminuição da absorção de água.



**Figura 10 - Efeito da concentração de resina na absorção de água dos compósitos produzidos.**

A Tabela 12 apresenta a análise de variância (ANOVA) aplicada para a propriedade física WA com um intervalo de confiança de 99% e um nível de significância de 0,01.

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 12 mostram que o fator razão serragem-borracha apresentou influência significativa ao nível de significância de 0,01. O valor-F obtido foi de 24,13, maior que o valor-F tabelado de 3,57, e o valor-P menor que 0,0001 confirma a significância deste fator.

**Tabela 12 - Análise de variância da absorção de água.**

<b>ANOVA - Absorção de Água (WA)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média dos Quadrados</b>	<b>Valor-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Concentração de Resina</b>	0,0176	2	0,0088	152,48	<0,0001
<b>Razão Serragem-Borracha</b>	0,0070	5	0,0014	24,13	<0,0001
<b>Interação</b>	0,0005	10	0,0001	0,94	0,5071
<b>Erro</b>	0,0021	36	0,0001	1	
<b>Total</b>	0,0272	53			

Os valores médios encontrados para WA são mostrados na Tabela 13, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 13 indica que, conforme a quantidade de borracha aumenta na mistura, o valor obtido para WA diminui.

**Tabela 13 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para a absorção de água.**

<b>Tratamentos Razão Serragem-Borracha</b>		<b>WA (%)</b>	
<b>Serragem nos particulados (%)</b>	<b>Borracha nos particulados (%)</b>		
<b>100</b>	<b>0</b>	9,21 ± (1,95)	<b>A</b>
<b>90</b>	<b>10</b>	8,63 ± (1,88)	<b>AB</b>
<b>80</b>	<b>20</b>	8,04 ± (1,82)	<b>AB</b>
<b>70</b>	<b>30</b>	7,66 ± (2,45)	<b>BC</b>
<b>60</b>	<b>40</b>	6,43 ± (2,15)	<b>CD</b>
<b>50</b>	<b>50</b>	6,00 ± (2,02)	<b>D</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

O teste de Tukey indica que para o fator razão de serragem-borracha as médias dos tratamentos com 0%, 10% e 20% de borracha são estatisticamente iguais. O mesmo ocorre para as médias dos tratamentos com 10%, 20% e 30%, para as médias com 30% e 40% e para as médias com 40% e 50%.

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 12 também mostram que o fator de concentração da resina apresentou influência significativa ao nível de significância de 0,01. O valor-F obtido foi de 152,45, bem maior que o valor-F tabelado de 5,25, e o valor-P menor que 0,0001 confirma a significância deste fator, sendo este o fator de maior significância para a absorção de água.

Os valores médios encontrados para WA são mostrados na Tabela 14, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 14 indica que, da mesma forma que na Figura 10, conforme a concentração de resina aumenta na mistura, o valor obtido para WA diminui. O teste de Tukey também indica que para o fator concentração de resina todas as médias dos tratamentos são estatisticamente diferentes, confirmando a significativa influência deste fator para WA.

**Tabela 14 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para a absorção de água.**

<b>Tratamentos Concentração de Resina (%)</b>	<b>WA (%)</b>	
<b>30</b>	10,11 ± (1,44)	<b>A</b>
<b>40</b>	7,08 ± (1,49)	<b>B</b>
<b>50</b>	5,80 ± (1,17)	<b>C</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

A menor concentração de serragem na mistura explica os resultados encontrados para a WA, já que a serragem de madeira apresenta maior afinidade com a água que os outros dois materiais, fazendo com que formulações com maior concentração de serragem tenham absorvido mais água. A borracha melhora a

resistência à água dos compósitos produzidos devido à sua propriedade hidrofóbica e também limita o acesso das moléculas de água à celulose. A quantidade de grupos hidroxila diminui com a adição de borracha e a consequente diminuição da quantidade de serragem de madeira resulta em menor absorção de água<sup>7</sup>.

A redução da absorção de água também foi resultado do aumento da concentração de resina na mistura final. Resinas bicomponentes que utilizam polióis, como o óleo de mamona, apresentam elevada resistência à hidrólise, devido às suas longas cadeias hidrófobas. Outra possível justificativa pode estar relacionada ao aumento de adesão entre partículas e o encapsulamento destas pela resina criando barreiras à penetração de moléculas de água no seu interior<sup>58</sup>.

Os valores observados para WA foram menores em todas as formulações deste trabalho do que os encontrados por outros autores, onde utilizaram menor quantidade de resina, e podem ser explicados justamente pela quantidade mais significativa de resina nas formulações. A produção de MDF usando *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e COPR obtiveram 30,7% para WA<sup>14</sup>. Utilizando fibras de coco e COPR foram encontrados valores entre 22,38% e 36,59% para WA<sup>19</sup>. Os resultados para os painéis particulados de madeira de Tauari também com COPR como matriz ficaram entre 19,87% e mais de 30% para o WA<sup>21</sup>.

#### **4.2.3. Inchamento de espessura**

A Figura 11 apresenta os resultados de inchamento de espessura (TS) em relação à razão de serragem-borracha. Da mesma forma que em WA, conforme a razão de borracha em relação à serragem aumenta na mistura, o inchamento de espessura tem a tendência de diminuir de valor.

Já a Figura 12 apresenta os resultados de inchamento de espessura em relação à concentração de resina. É observada a diminuição do inchamento de espessura, conforme a concentração de resina aumenta na mistura, semelhante ao comportamento observado para a WA.

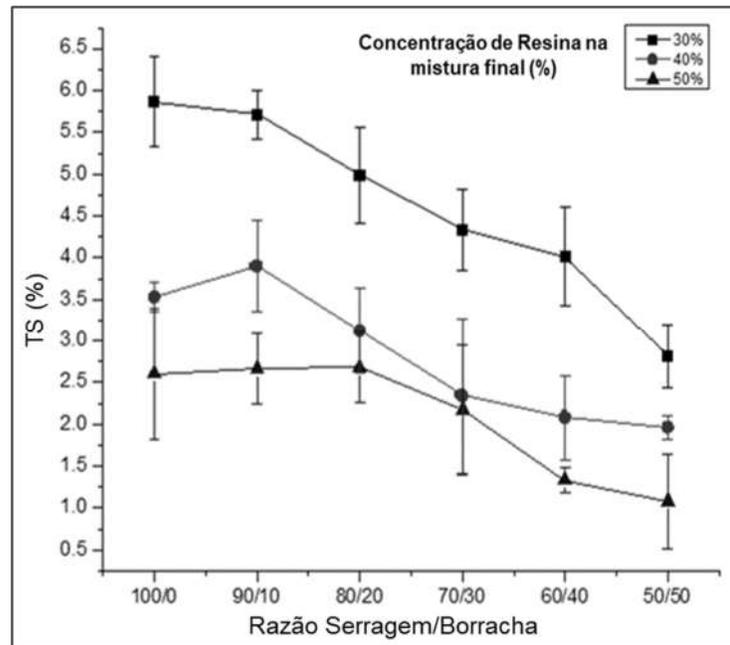


Figura 11 - Efeito da razão serragem/borracha no inchamento de espessura dos compósitos produzidos.

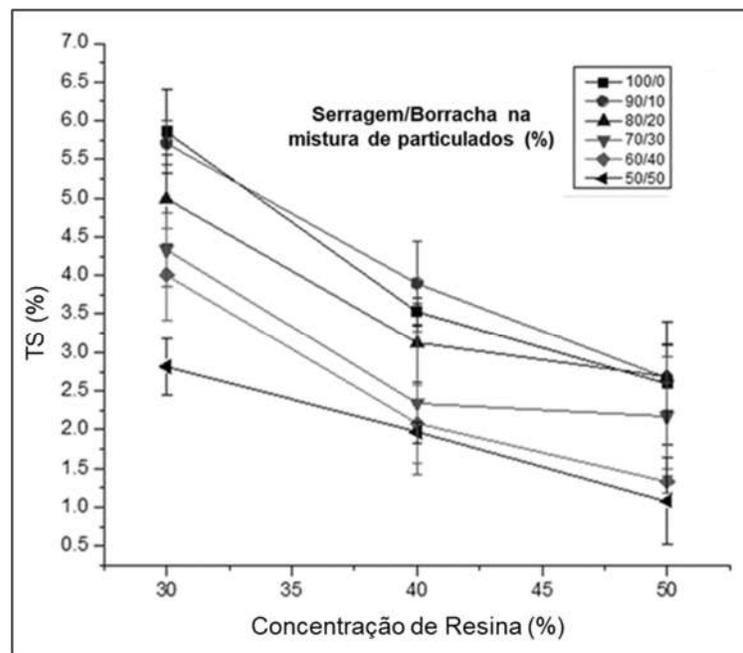


Figura 12 - Efeito da concentração de resina no inchamento de espessura dos compósitos produzidos.

A Tabela 15 apresenta a análise de variância (ANOVA) aplicada para a propriedade física TS com um intervalo de confiança de 99% e um nível de significância de 0,01.

**Tabela 15 - Análise de variância do inchamento de espessura.**

ANOVA - Inchamento de Espessura (TS)					
Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Valor-F	Valor-P
Concentração de Resina	0,0061	2	0,0031	108,58	<0,0001
Razão Seragem-Borracha	0,0034	5	0,0007	23,89	<0,0001
Interação	0,0004	10	0,0000	1,28	0,2773
Erro	0,0010	36	0,0000	1	
Total	0,0108	53			

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 15 mostram que o fator de serragem-borracha apresentou influência significativa ao nível de significância de 0,01. O valor-F obtido foi de 23,89, maior que o valor-F tabelado de 3,57, sendo este um fator de influência, e o valor-P menor que 0,0001 confirma a significância deste fator, sendo este o fator de maior significância para o inchamento de espessura.

Os valores médios encontrados para TS são colocados na Tabela 16, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 16 indica que, conforme a quantidade de borracha aumenta na mistura, o valor obtido para TS diminui. O teste de Tukey também indica que para o fator razão de serragem-borracha as médias dos tratamentos com 0%, 10% e 20% de borracha são estatisticamente iguais. O mesmo ocorre para as médias dos tratamentos com 20% e 30%, para as médias com 30% e 40% e para as médias com 40% e 50%.

**Tabela 16 - Teste de Tukey do fator razão serragem/borracha para o inchamento de espessura.**

Tratamentos Razão Serragem-Borracha		TS (%)	
Serragem nos particulados (%)	Borracha nos particulados (%)		
<b>100</b>	<b>0</b>	4,00 ± (1,53)	<b>A</b>
<b>90</b>	<b>10</b>	4,09 ± (1,38)	<b>A</b>
<b>80</b>	<b>20</b>	3,60 ± (1,15)	<b>AB</b>
<b>70</b>	<b>30</b>	2,95 ± (1,23)	<b>BC</b>
<b>60</b>	<b>40</b>	2,47 ± (1,26)	<b>CD</b>
<b>50</b>	<b>50</b>	1,95 ± (0,83)	<b>D</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 15 também mostram que o fator de concentração da resina apresentou influência significativa ao nível de significância de 0,01. O valor-F obtido foi de 108,58 e é bem maior que o valor-F tabelado de 5,25, sendo este o fator de maior influência, e o valor-P menor que 0,0001 confirma a significância deste fator, sendo este o fator de maior significância para o inchamento de espessura.

Os valores médios encontrados para TS são colocados na Tabela 17, que apresenta também os resultados encontrados para o teste de Tukey com 99% de confiança. A Tabela 17 indica que, conforme a concentração de resina aumenta na mistura, o valor obtido para TS diminui. O teste de Tukey também indica que para o fator concentração de resina todas as médias dos tratamentos são estatisticamente diferentes, confirmando a grande influência que este fator proporciona à propriedade de inchamento de espessura.

**Tabela 17 - Teste de Tukey do fator concentração de resina para o inchamento de espessura.**

<b>Tratamentos Concentração de Resina (%)</b>	<b>TS (%)</b>	
<b>30</b>	4,62 ± (1,15)	<b>A</b>
<b>40</b>	2,82 ± (0,88)	<b>B</b>
<b>50</b>	2,09 ± (0,82)	<b>C</b>

\* Tratamentos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais conforme o teste de Tukey.

Para Ayrlimis et al.<sup>7</sup>, os resultados da ANOVA também indicaram que a concentração de borracha teve significativa influencia no inchamento de espessura, sendo o fator de maior significância no estudo. A tipo de resina teve significativa influencia, porém não houve variação da concentração na mistura final, como no presente estudo.

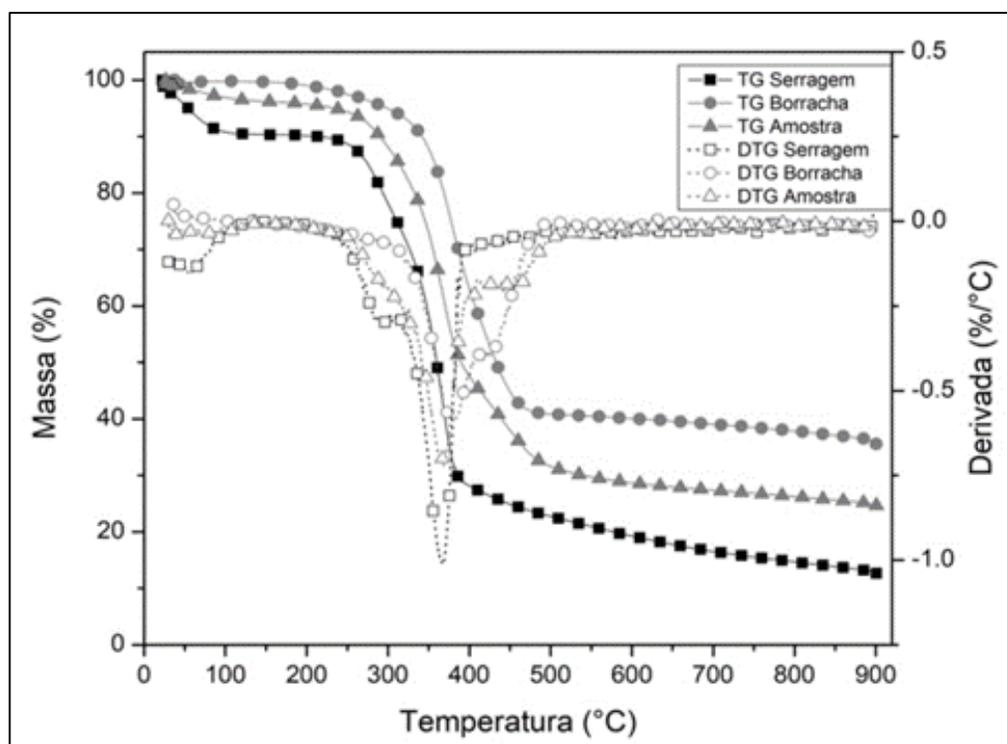
A maior concentração de borracha na mistura final melhora as propriedades de resistência à água dos compósitos produzidos, de forma análoga à absorção de água. A quantidade de grupos hidroxila diminui com a adição de borracha e a consequente diminuição da quantidade de serragem de madeira resulta em menor inchamento de espessura, afetando positivamente a estabilidade dimensional<sup>7</sup>.

Os valores observados para TS foram menores em todas as formulações deste trabalho do que os encontrados por outros autores, onde utilizaram menor quantidade de resina, e podem ser explicados justamente pela quantidade mais significativa de resina nas formulações.

Na produção de MDF usando *Pinus caribaea var. hondurensis* e COPR o TS foi de 12%<sup>19</sup>. Utilizando fibras de coco e COPR foram encontrados valores entre 15,30% e 16,67%<sup>19</sup>. E os resultados para os painéis particulados de madeira de Tauari também com COPR como matriz ficaram entre ~ 15% e ~ 13%<sup>21</sup>.

### 4.3. Propriedades térmicas

A análise termogravimétrica (ATG) é importante ferramenta de caracterização de materiais, por medir a estabilidade térmica dos materiais estudados. Ela é importante por desenvolver um melhor entendimento dos mecanismos de degradação e oferece métodos de avaliação de parâmetros cinéticos<sup>43</sup>. A ATG foi utilizada para avaliar a estabilidade térmica da serragem de eucaliptos, do pó de borracha de pneus inservíveis e de uma amostra de compósito produzido com 40% de PU, 30% de serragem e 30% de borracha.



**Figura 13 - Análise Termogravimétrica da serragem de eucaliptos, do pó de borracha de pneus inservíveis e da amostra de compósito produzido com 40% de PU, 30% de serragem e 30% de borracha.**

A termogravimetria dos componentes lignocelulósicos, como a serragem de eucaliptos, apresenta normalmente características semelhantes. As perdas de massa abaixo de 100°C são associadas as moléculas de água das partículas de serragem de eucaliptos<sup>58</sup>. Logo após, em torno de 120°C, começa a perda de massa pela

evaporação dos extrativos solúveis em água como ceras, ácidos graxos, resinas, óleos essenciais, tanino dentre outros, evento este que atinge uma temperatura em torno de 250°C, totalizando uma perda de massa de aproximadamente 10%. A decomposição da hemicelulose acontece no intervalo 260 a 320°C e nesta temperatura inicia-se a decomposição da celulose. Na temperatura de 430 a 460°C ocorre a decomposição da lignina<sup>58</sup>. A massa residual da serragem foi de 12,4%.

Também é possível avaliar que o pó de borracha apresenta estabilidade térmica até aproximadamente 200°C, onde começa a redução de massa, provavelmente associada a aditivos e óleos extensores. A massa residual do pó de borracha foi de 35,3%. Segundo Rodrigues<sup>41</sup>, que obteve em torno de 34% de massa residual, parte deste resíduo é o sulfato de zinco que está relacionado com a oxidação do enxofre, presente na composição da borracha de pneu, que também pode estar associada a presença de cargas como o negro-de-fumo e cargas minerais<sup>71</sup>.

São verificadas perdas de massa para o pó de borracha em três eventos: a perda de aditivos, degradação da borracha natural e degradação da borracha sintética, como o copolímero butadieno-estireno (SBR)<sup>59,64,71,72</sup>.

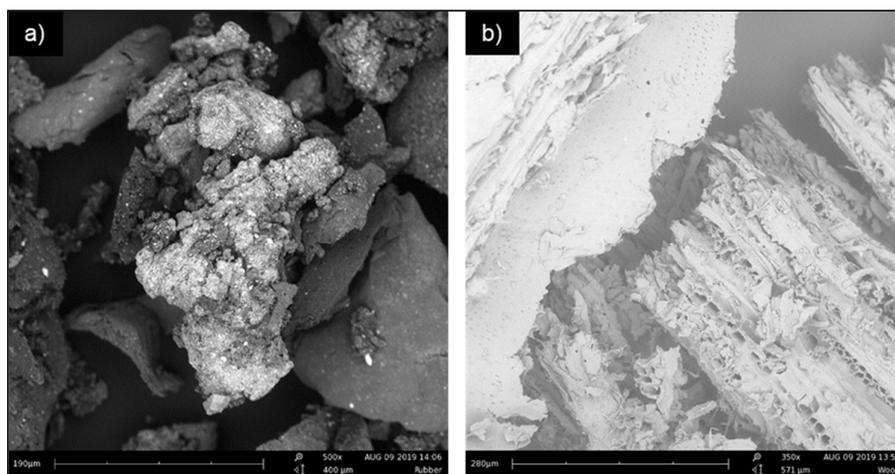
A amostra do compósito obteve comportamento intermediário à serragem e ao pó de borracha. As primeiras perdas de massa, abaixo de 100°C também são associadas à umidade. Segundo Nelson et al<sup>58</sup>, o poliuretano permanece estável no compósito até a faixa de 250°C, evidenciando seu caráter hidrofóbico, quando começa a perder massa até 350°C; este resultado está de acordo com Araújo<sup>60</sup>, que verificou a estabilidade térmica do poliuretano entre 215 e 340°C.

Na faixa de temperatura de 350°C, o poliuretano apresenta uma perda de massa de aproximadamente 40% referente ao rompimento dos segmentos rígidos, quebra das ligações uretânicas e uréicas. Este deslocamento da degradação térmica para maiores valores de temperatura sugerem que durante a polimerização da resina houve interação química entre os componentes particulados e o poliuretano<sup>58</sup>.

Segundo Nelson et al<sup>58</sup>, a massa residual do PU puro é de 6%, referente à formação de carvão. A massa residual da amostra do compósito foi de 24,6%, sendo intermediária ao pó de borracha e à serragem.

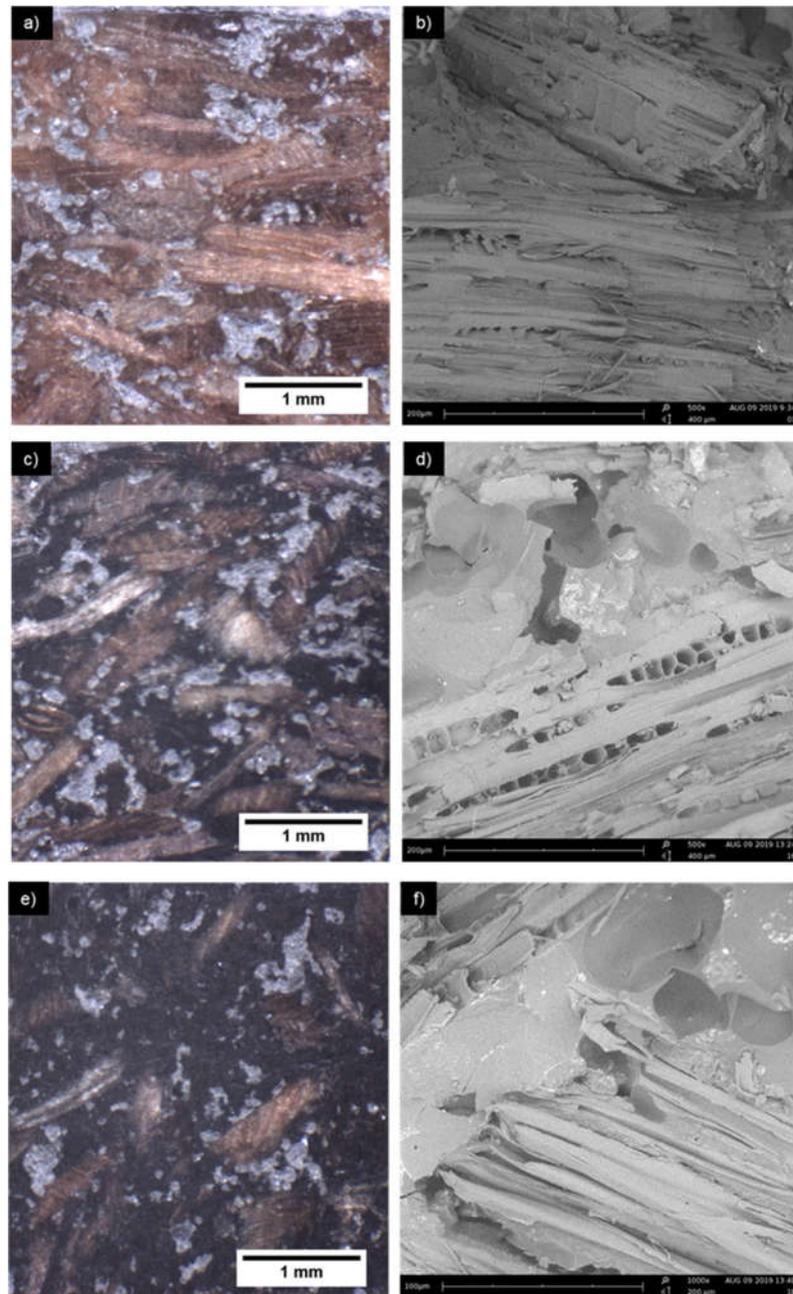
#### 4.4. Análise de microscopia

A Figura 14 apresenta micrografias de uma amostra do pó de borracha e de serragem, utilizadas neste estudo. Pode-se observar na Figura 14(a) o formato irregular das partículas de borracha, que variam de superfícies planas e rugosas. Também é possível verificar a presença de cargas na superfície. Partículas com formato irregular e superfície rugosa, obtidas por moagem, apresentam boa adesão partícula-matriz, quando comparadas a partículas lisas e de formato esférico<sup>49,61</sup>. As partículas de serragem (Figura 14(b)) apresentam superfície irregulares e espaços vazios.



**Figura 14 - Microscopia eletrônica de varredura para: (a) as partículas de pó de borracha e (b) serragem de eucaliptos.**

A Figura 15 apresenta as micrografias de diferentes compósitos, obtidas por microscopia óptica (MO - Figuras 15 (a), (c) e (e)) e microscopia eletrônica de varredura (MEV - Figuras 15 (b), (d) e (f)). É possível observar na Figura 15 (a), (c) e (e) que as partículas de madeira foram distribuídas aleatoriamente nos compósitos produzidos. Também é possível observar que há clara distinção entre as interfaces das partículas de madeira, de borracha com a matriz. Na Figura 15 (a), (c) e (e), é possível identificar partes mais claras nas imagens, o que aparentemente podem ser partes de resina segregada dos particulados. Este fenômeno pode estar associado à saturação na absorção e na interação superficial entre a resina e os particulados.



**Figura 15 - Morfologia, respectivamente, de MO (microscopias à esquerda) e MEV (microscopias à direita) de: (a) e (b) formulação 1 (30% de resina e 70% de serragem); (c) e (d) formulação 16 (30% de resina, 35% de serragem e 35% de pó de borracha); e (e) e (f) formulação 18 (50% de resina, 25% de serragem e 25% de pó de borracha).**

Existem vazios e espaços entre as partículas, que podem ser provenientes da liberação de CO<sub>2</sub> e a presença de vapor de água durante a preparação dos compósitos na prensagem a quente<sup>58, 62</sup>. Os vazios são formados principalmente pela característica hidrofílica da serragem de madeira e da alta reatividade que o isocianato da resina poliuretana tem com a água ou umidade<sup>18, 62</sup>.

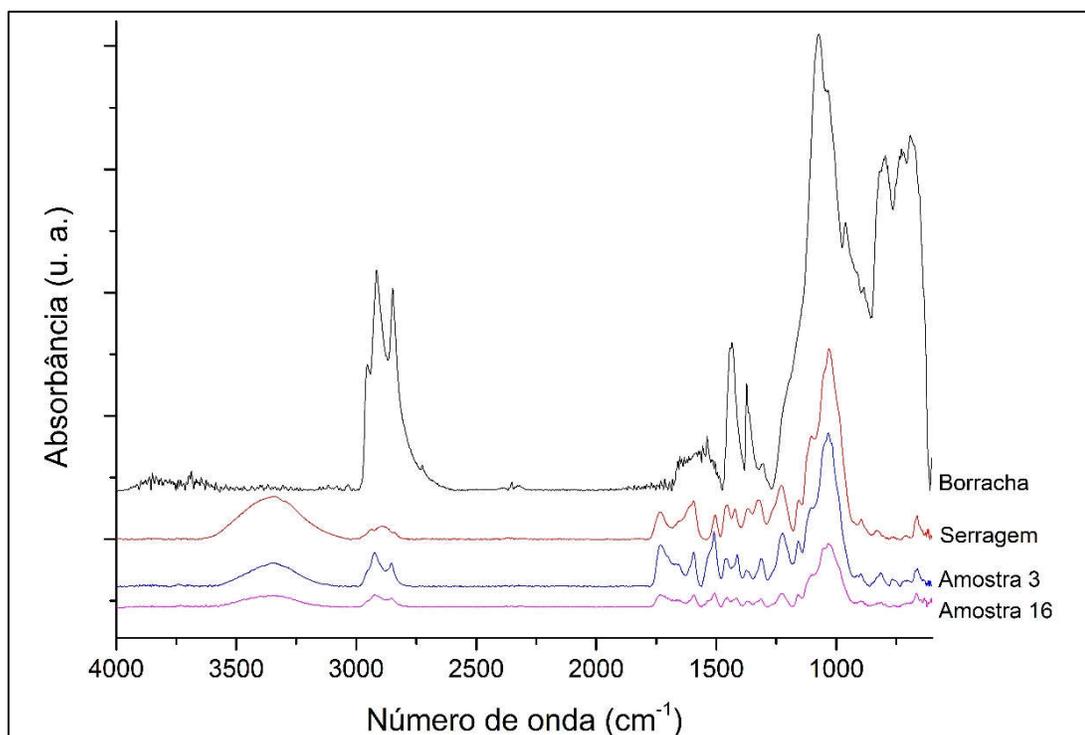
A Figura 15 revela que há melhor interação entre a matriz poliuretana e os particulados de borracha. No entanto, quando a concentração de partículas de borracha aumenta na mistura, o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade decrescem, o que está relacionado a propriedades individuais deste particulado. As partículas de borracha apresentam maior elasticidade e menor módulo de elasticidade do que os particulados de madeira<sup>7</sup>, sendo que o aumento da concentração de partículas de madeira promove o aumento na resistência do compósito, uma vez que as cargas mecânicas são transmitidas da matriz para as partículas de madeira<sup>57</sup>.

#### **4.5. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier**

A análise espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi realizada para caracterizar a borracha de pneus inservíveis, a serragem de eucaliptos e duas amostras de compósitos, a amostra 3, contendo 50% de COPR e 50% de serragem na mistura final e a amostra 16, contendo 30% de COPR na mistura final e 35% de serragem e 35% de borracha. A Figura 16 apresenta os espectros obtidos para o pó de borracha, serragem e para as amostras de compósitos.

Para a borracha de pneus inservíveis foram identificadas bandas na região entre 3000 cm<sup>-1</sup> e 2850 cm<sup>-1</sup>, bem como na região de 1500 cm<sup>-1</sup> e 1350 cm<sup>-1</sup>, que são atribuídas a hidrocarbonetos CH<sub>3</sub> e CH<sub>2</sub><sup>49,63</sup>. A banda da região de 1550 cm<sup>-1</sup>, atribuída ao estiramento de COO de carboxilato de zinco, pode ser resultado do envelhecimento da borracha utilizada através de ataque de O<sub>2</sub><sup>49</sup>.

A serragem apresenta na região de 3400 cm<sup>-1</sup> a banda relacionada ao grupo hidroxila. Na região de 2950 a 2850 cm<sup>-1</sup> são bandas relacionadas a grupos de hidrocarbonetos. As bandas para as ligninas estão localizadas entre 1300 cm<sup>-1</sup> e 1150 cm<sup>-1</sup> <sup>65,66</sup>.



**Figura 16 - Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier da serragem, pó de borracha, a amostra 3 (50% de COPR e 50% de serragem na mistura final) e a amostra 16 (30% de COPR na mistura final e 35% de serragem e 35% de borracha).**

Nas amostras 3 e 16 analisadas, contendo COPR, pode-se observar o pico de NH, característico da resina poliuretana, na região de banda 3500–3250 cm<sup>-1</sup>. A ausência de qualquer pico na região da banda de 2250 cm<sup>-1</sup> confirma que não há grupo –NCO livre na estrutura do polímero, o que representa reação de polimerização completa<sup>20,67,68</sup>. Esta observação indica que os grupos livres de isocianato reagiram com grupos hidroxila. A reação de grupos isocianato com grupos hidroxila presentes na superfície dos particulados de madeira também é possível, o que aprimora as propriedades mecânicas dos compósitos<sup>20</sup>.

## 5. CONCLUSÕES

Resíduos particulados de serragem de eucaliptos e pó de borracha de pneus inservíveis podem ser utilizados com resina poliuretana à base de mamona para produzir compósitos por moldagem à compressão com características promissoras.

Os compósitos apresentaram baixa absorção de água e consequente baixo inchamento de espessura devido à exposição das amostras à água. Foram observados menores valores de absorção de água e inchamento de espessura do que aqueles relatados por outros autores na literatura. Aumentando a quantidade de borracha do compósito, suas propriedades hidrofóbicas contribuem para a obtenção de maior estabilidade dimensional e diminuição da absorção de água e inchamento de espessura, além de proporcionar maior flexibilidade ao material. O aumento na concentração de resina também proporciona diminuição acentuada da absorção de água e do inchamento de espessura.

Também foi observado aumento da resistência mecânica com o aumento da quantidade de partículas de serragem. Os módulos de ruptura e elasticidade foram consideravelmente reduzidos com o aumento da concentração de borracha. Os compósitos produzidos também apresentaram, em sua maioria, valores de MOR de painéis particulados de alta densidade e, em sua maioria, valores de MOE de painéis de baixa densidade. Com a variação da formulação dos compósitos, a tenacidade à flexão não sofre mudanças. Essas propriedades estão intimamente ligadas às propriedades intrínsecas dos três componentes principais (COPR, serragem e borracha) dos compósitos produzidos.

Os compósitos apresentaram considerável estabilidade térmica, com degradação em temperaturas elevadas (maior que 200°C) e as análises morfológicas revelam que as partículas foram uniformemente distribuídas na matriz, havendo uma clara distinção entre as fases, sendo que foram encontrados indícios de uma melhor interação entre a matriz poliuretana e os particulados de borracha, quando relacionados aos particulados de madeira.

### **5.1 Possibilidades de trabalhos futuros**

Trabalhos futuros podem ser realizados, a fim de caracterizar os compósitos produzidos através de análise dinâmico mecânica (DMA) com a finalidade de identificar a temperatura de transição vítrea e caracterizar a viscoelasticidade do material produzido. Avaliar a viabilidade econômica de produção dos compósitos também pode ser parte de estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

1. Macedo, D.G. Compósitos de Serragem de Madeira e Resíduos de Recauchutagem de Pneu. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 144 f., 2008.
2. Ramos, K. C. S., Ramos Filho, L. S. N. A logística reversa dos pneus inservíveis. Anuário de Produção Acadêmica Docente, vol. 12, 2008.
3. Motta, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. Ambiente. soc. Vol. 11, p. 167-184, 2008.
4. Segre, N., Ostertag, C., Monteiro, P. J. M. Effect of Tire Rubber Particles on Crack Propagation in Cement Paste. *Materials Research*, vol.9, n.3, São Carlos, 2006.
5. Shao, D., Xu, M., Cai, L., Shi, S.Q. Fabrication of wood-rubber composites using rubber compound as a bonding agent instead of adhesives. *Materials (Basel)*, 9(6), 469, 2016.
6. Ashori, A., Ghofrani, M., Rezvani, M.H., Khojasteh, K. S. Utilization of waste tire rubber in hybrid plywood composite panel. *Polym Adv Technol*, 26(8):1034–40, 2015.
7. Ayrlmis, N., Buyuksari, U., Avci, E. Utilization of waste tire rubber in the manufacturing of particleboard. *Mater Manuf Process*, 24(6):688–92, 2009.
8. Song, X.M., Hwang, J.Y. Mechanical properties of composites made with wood fiber and recycled tire rubber. Vol. 51, *Forest Products Journal*. p. 45–51, 2001.
9. Zhao, J., Wang, X.M., Chang, J.M., Yao, Y., Cui, Q. Sound insulation property of wood-waste tire rubber composite. *Compos Sci Technol*, 70(14):2033–8, 2010.
10. Yang, H.S, Kim, D.J., Lee, Y.K., Kim, H.J., Jeon, J.Y., Kang, C.W. Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresour Technol*, ;95(1):61–5, 2004.
11. Grohens, Y., Sadasivuni, K.K., Boudenne, A. Recycling and Reuse of Materials and Their Products. Thomas S, Sebastian M, George A, Weimin Y, editors. Oakville: CRC Press, 262 p, 2013.

12. Shao, D., Xu, M., Cai, L., Shi, S.Q. Fabrication of Wood Fiber-rubber Composites with Reclaimed Rubber. *Bioresources*, 13(2):3300–14, 2018.
13. Jun, Z., Xiang-ming, W., Jian-min, C., Kai, Z. Optimization of processing variables in wood–rubber composite panel manufacturing technology. *Bioresour Technol.* May 1;99(7):2384–9, 2008.
14. Campos, C.I. De., Antonio, F., Lahr, R., Christoforo, A.L., Fátma, M. Castor Oil Based Polyurethane Resin Used in the Production of Medium Density Fiberboard, 4(4):185–9, 2014.
15. Dias, F.M., Lahr, F.A.R. Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood. *Mater Res. Sep*;7(3):413–20, 2004.
16. Milanese, A.C., Cioffi, M.O.H., Voorwald, H.J.C. Flexural behavior of Sisal/Castor oil-Based Polyurethane and Sisal/Phenolic Composites. *Mater Res.* Feb 24;15(2):191–7, 2012.
17. Miléo, P.C., Mulinari, D.R., Baptista, C.A.R.P., Rocha, G.J.M., Gonçalves, A.R. Mechanical behaviour of polyurethane from castor oil reinforced sugarcane straw cellulose composites. In: *Procedia Engineering*. p. 2068–73, 2011.
18. Silva, R.V., Spinelli, D., Bose Filho, W.W., Claro Neto, S., Chierice, G.O., Tarpani JR. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. *Compos Sci Technol.* 66(10):1328–35, 2006.
19. Fiorelli, J., Curtolo, D.D., Barrero, N.G., Savastano, H., de Jesus Agnolon Pallone, E.M., Johnson, R. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. *Ind Crops Prod.* 40(1):69–75, 2012.
20. Merlini, C., Soldi, V., Barra, G.M.O. Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites. *Polym Test.* 30(8):833–40, 2011.
21. Santos, W.L.F., Silva, A.J.P., Cabral, A.A., Mercury, J.M.R. Particleboard manufactured from Tauari (*Couratari oblongifolia*) wood waste using castor oil based polyurethane resin. *Mater Res.*17(3):657–63, 2014.
22. Pereira, C.R., Mölleken, R.E., de Souza, F.H., Capellari, G.S., Neto, S.C.,

- Azevedo, E.C. Evaluation of MDF bonding with polyurethane of castor oil. *Appl Adhes Sci*, 4(1), 2016.
23. Chen, J., Hu, D., Li, Y., Meng, F., Zhu, J., Zeng, J. Castor oil derived poly(urethane urea) networks with reprocessibility and enhanced mechanical properties. *Polymer*. 143. 10.1016, 2018.
  24. Mosiewiczji, M. A., Dell'arciprete, G. A., Aranguren, M. I., Marcovich, N. E. Polyurethane Foams Obtained from Castor Oil-based Polyol and Filled with Wood Flour. *Journal of Composite Materials*, vol. 43, 2009.
  25. Melo, B. N., Paso, V. M. D. Composites Based on Eucalyptus Tar Pitch/Castor Oil Polyurethane and Short Sisal Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 89, p. 3797-3802, 2003.
  26. Mussati, E., Merlini, C., Barra, G. M. O., Güths, S., Oliveira, A. P. N, Siligardi, C. Evaluation of the Properties of Iron Oxide-Filled Castor Oil Polyurethane. *Materials Research*, p. 65-70, 2013.
  27. Ferro, F. S.; Almeida, D. H.; Souza, A. M.; Icimoto, F. H.; Christoforo, A. L. Varanda, D. L; Lahr, F. A. C. Mechanical Properties of Particleboards Manufactured with *Schizolobium amazonicum* and Castor oil Based Polyurethane Resin: Influence of Proportion Polyol/Pre-Polymer. *International Journal of Composite Materials*, 4(2), p. 52-55, 2014.
  28. Campos, C. I.; Lahr, F. A. R. Production and Characterization of MDF Using Eucalyptus Fibers and Castor Oil-based Polyurethane Resin. *Materials Research*, vol 7, No. 3, p. 421-425, 2004.
  29. Michałowski, S.; Mosiewicki, M. A.; Kurańska, M.; Aranguren, M. I.; Prociak, A. Polyurethane Composites Synthesized Using Natural Oil-Based Polyols and Sisal Fibers. *Journal of Renewable Materials*, 6(4), 426-437(12), 2018.
  30. Gryczak, M. Compósito sustentável casca de arroz/resina de óleo de mamona de baixa densidade. 102 p. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais. Unidade Acadêmica em Humanidades, Ciência e Educação, Universidade de do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2016.

31. Callister, W. D., *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., 7<sup>th</sup> ed, 2007.
32. Staab, G. H. *Introduction to composite materials. Laminar Composites*. 1-16, 2015.
33. German, R. M. *Introduction. Particulate Composites*. 1–22, 2016.
34. Chen, Y., Tai, W. *Castor Oil-Based Polyurethane Resin for Low-Density Composites with Bamboo Charcoal*. *Polymers*. 10. 1100, 2018.
35. Newell, J. A. *Essentials of Modern Materials Science and Engineering*. 1<sup>o</sup>ed. United States of America: Wiley Global Education. 368p, 2008.
36. Maffessoni, D; Meneguzzi, A. *Diagnóstico da gestão dos resíduos de madeira e de chapas nas indústrias do Pólo Moveleiro de Bento Gonçalves*. 3<sup>o</sup> Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves, 25 a 27 abr. 2012.
37. Donato, C. J; Takenaka, E. M. M. *O Aproveitamento de resíduos de madeira para o desenvolvimento sustentável*. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, Tupã*, v. 12, n. 4, 2016.
38. Lima, E. G. de. Silva, D. A. da. *Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas, PR*. *Floresta*. v. 35, n. 1, p. 105-116, 2005.
39. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos*. Curitiba, 2009.
40. IBQP - Instituto Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Paraná. *Análise da competitividade da cadeia produtiva da madeira no estado do Paraná*. Curitiba. 345 f. Relatório Final. IBQP, 2002.
41. Rodrigues, M. R. P. *Caracterização e utilização do resíduo da borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicáveis na construção civil*. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

42. Rocha, T. C. J.; Soares, B. G.; Coutinho, Fernanda MB. Principais copolímeros elastoméricos à base de butadieno utilizados na indústria automobilística. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 17, n. 4, p. 299, 2007.
43. Santos, R. M. Efeito da adição de partículas de borracha de pneu nas propriedades físico-mecânicas de compósito cimentício. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei/MG, 2012.
44. Faria, J.S. Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha. Dissertação de mestrado, UENF, Fluminense, RJ, 137 p, 2015.
45. Xu, M., and Li, J. "Effect of adding rubber powder to poplar particles on composite properties" *Bioresource Technol.* 118, 56-60, 2012.
46. Campos, C. I.; Lahr, F. A. R. Production and Characterization of MDF Using Eucalyptus Fibers and Castor Oil-based Polyurethane Resin. *Materials Research*, vol 7, No. 3, p. 421-425, 2004.
47. Ogunniyi, D. S. Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource Technology*, 97(9) p. 1086–1091, 2006.
48. Mutlu, H., & Meier, M. A. R. Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(1) p. 10–30, 2010.
49. Zanchet, A. Caracterização de compósitos elastoméricos com resíduos industriais de copolímero de butadieno e estireno desvulcanizado por microondas. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2011.
50. Imperveg. Datasheet: IMPERVEG® AGT 1315 [Internet]. Aguaí: Imperveg; Disponível em: <http://imperveg.com.br/wp-content/uploads/2015/05/FICHA-TÉCNICA-IMPERVEG-AGT-1315.pdf>, 2018.
51. Montgomery, D. C.; *Design and Analysis of Experiments*; 5th.e; John Wiley & Sons, New York, 684 p, 1991.
52. ASTM. ASTM D 790 Standard Test Method for Flexural Properties of

- Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Astm D790-2010.
53. Garcia, A., Spim, J.A., Santos, C.A. Ensaios Mecânicos. 2nd ed. Rio de Janeiro: LTC. 384 p, 2012.
  54. ASTM. ASTM D1037-13 Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle. Annual Book of ASTM Standards. 2013.
  55. ASTM. ASTM D2395-17. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. ASTM Standards. 2017.
  56. ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. Particleboard, ANSI A 208.1. New York, 2009.
  57. Song, X.M., & Hwang, J. A Study of the Microscopic Characteristics of Fracture Surface of MDI-Bonded Wood Fiber/Recycled Tire Rubber Composites Using Scanning Electron Microscopy, 1997.
  58. Nelson, P. M., Nascimento, E. M., Nisgoski, S, Magalhães, W. L. E., C. Neto, S., & Azevedo, E. C. Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. *Polímeros*, 23(2), 201-205. Epub February 01, 2013
  59. Vilela, A. P.. Utilização da borracha de pneu para produção de painéis MDP e cimento-madeira / Alan Pereira Vilela. – Lavras: UFLA, 104 p, 2016.
  60. Araújo, L. C. R. Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos. São Carlos, 105p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1992.
  61. Bilgili, E., Arastoopour, H., & Bernstein, B. Pulverization of rubber granulates using the solid-state shear extrusion (SSSE) process: *Powder Technology*, 115(3), 265–276, 2001.
  62. Kurańska M, Aleksander P, Mikelis K, et al. Porous polyurethane composites based on bio-components. *Compos Sci Technol*; 75: 70–76, 2013.

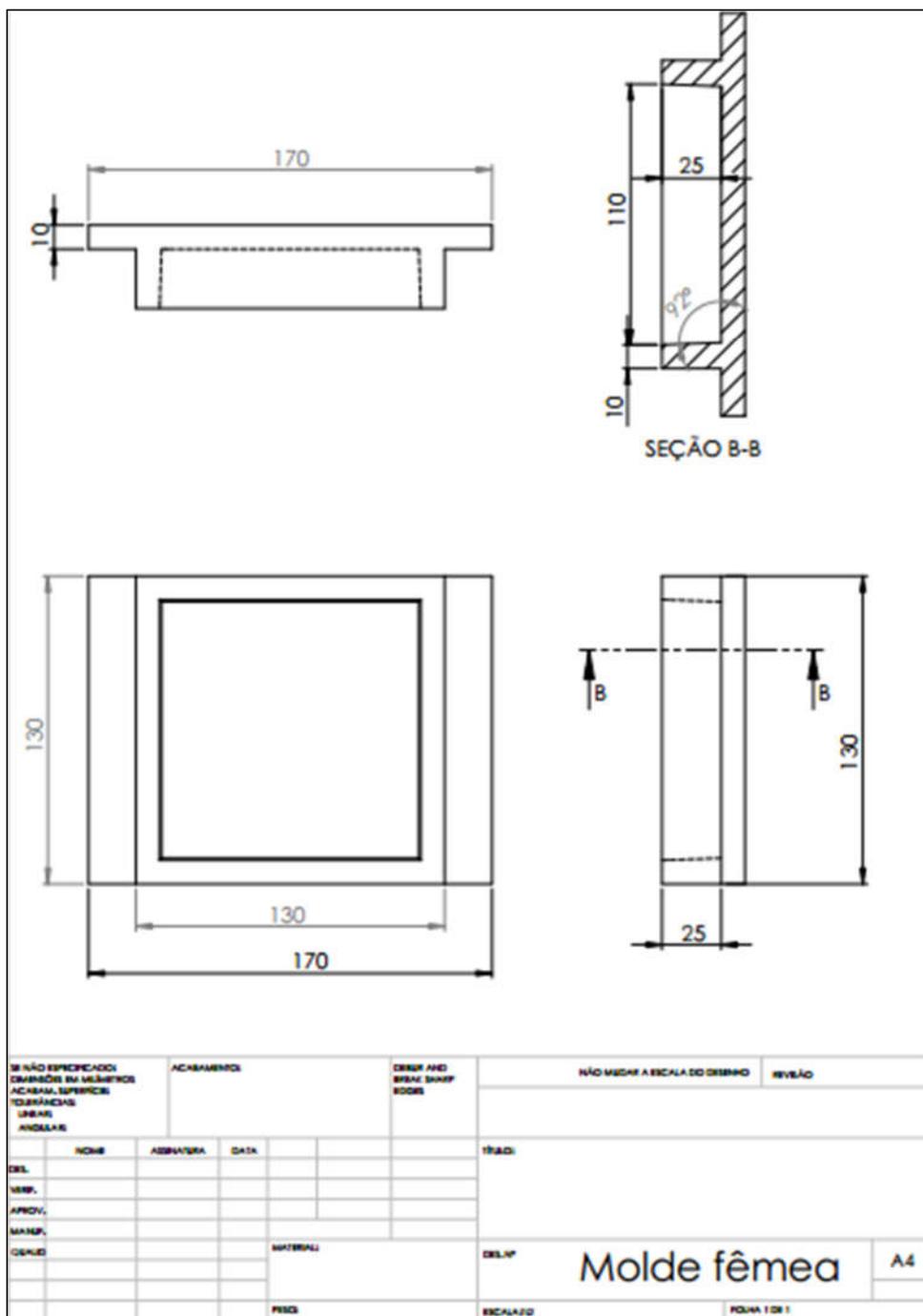
63. Gunasekaran, S., Natarajan, R. K., & Kala, A. FTIR spectra and mechanical strength analysis of some selected rubber derivatives. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 68(2), 323–330, 2007.
64. Fernández-Berridi, M. J., González, N., Mugica, A., & Bernicot, C. Pyrolysis-FTIR and TGA techniques as tools in the characterization of blends of natural rubber and SBR. *Thermochimica Acta*, 444(1), 2006.
65. Esteves, B, Velez Marques, A, Domingos, I, & Pereira, H. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(2), 245-258, 2013.
66. Gonultas, Oktay, & Candan, Zeki. Chemical characterization and ftir spectroscopy of thermally compressed eucalyptus wood panels. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(3), 431-442, 2018.
67. Thakur, S.; Karak, N. Castor oil-based hyperbranched polyurethanes as advanced surface coating materials. *Prog. Org. Coat*, 76, 157–164, 2013.
68. Ibrahim, Salmiah & Ahmad, Azizan & Mohamed, Nor Sabirin. Characterization of Novel Castor Oil-Based Polyurethane Polymer Electrolytes. *Polymers*. 7. 747-759, 2015.
69. Gadhawe, R.V., Mahanwar, P.A., Gadekar, P.T. Bio-Renewable Sources for Synthesis of Eco-Friendly Polyurethane Adhesives—Review. *Open J Polym Chem*. 07(04):57–75, 2017.
70. Vilar, W. D. *Química e Tecnologia dos Poliuretanos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.
71. Scuracchio C, Waki D and Da Silva M. Thermal analysis of ground tire rubber devulcanized by microwaves. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*; 87(3): 893–897, 2007.

72. Williams P.T., Besler S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. *Fuel*. 74(9): 1277–1283, 1995.
73. Hein, P. R. G., Brancheriau, L. Comparison between three-point and four point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, (ahead), 2018.
74. Mark, J.E. *Polymer Data Handbook*. 2nd Edition, Oxford University Press, Oxford, 2009.
75. Minitab, Inc. *Statistical Software Data Analysis Software*. Versão 17. State College, PA, 2010.
76. Goulart, E. A; Mariotoni, C. A; Sanchez, C. G. A Utilização da Gaseificação de Pneus Usados em Leito Fluidizado para a Produção de Energéticos. *Polímeros*, v.9, n. 4, São Carlos, 1999

## APÊNDICE A – MOLDE DE AÇO

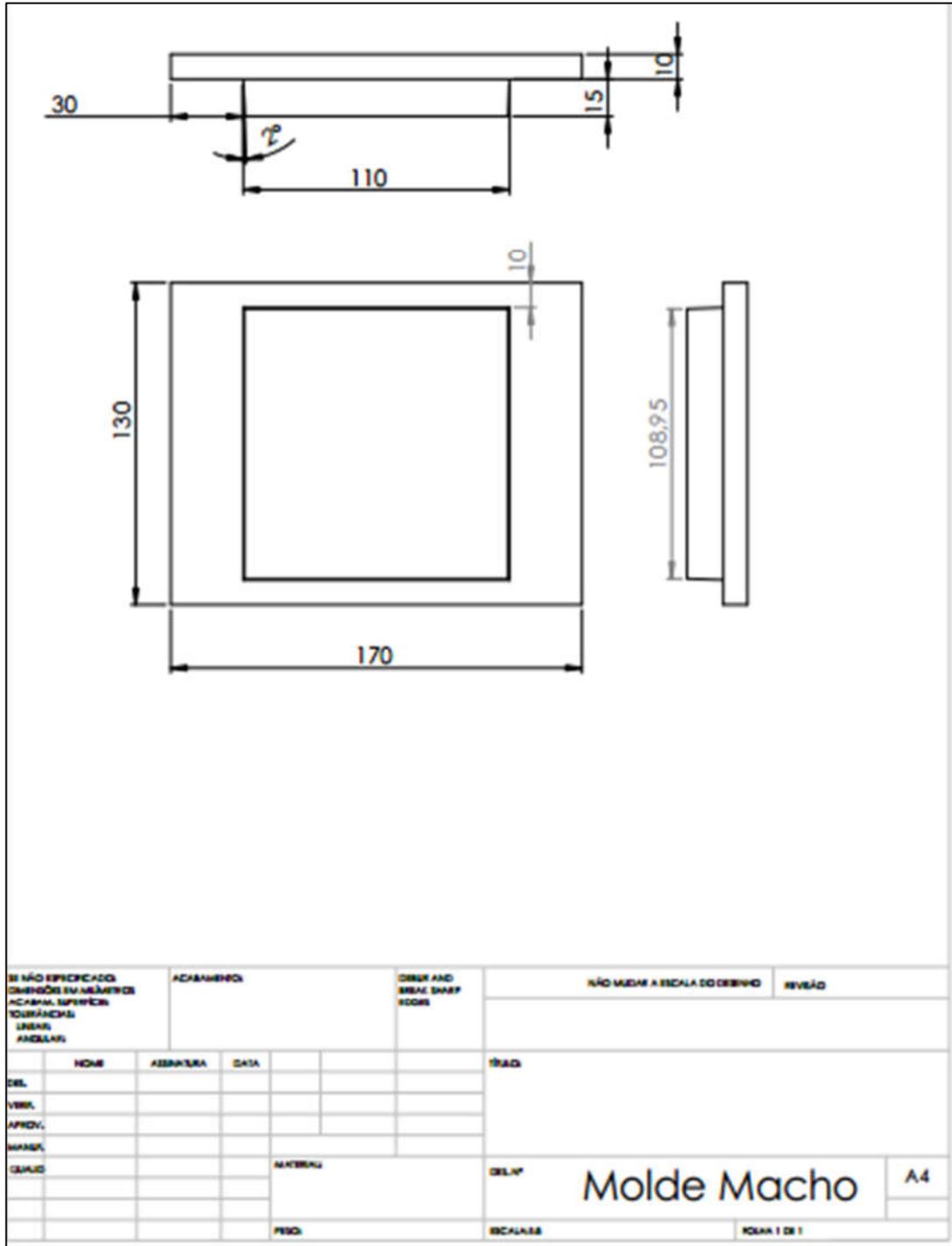
### MOLDE (FÊMEA) – Originalmente com 25 mm de profundidade.

Representação da parte fêmea do molde de aço utilizado para a confecção dos compósitos. O molde originalmente tinham 25 mm de profundidade, porém o que foi utilizado neste trabalho tinha 15 mm.



### MOLDE (MACHO)

Representação da parte macho do molde de aço utilizado para a confecção dos compósitos.



## APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA (MINITAB)

Apresentação da análise estatística utilizando o software Minitab.

### ABSORÇÃO DE ÁGUA

Apresentação da análise estatística utilizando o software Minitab para absorção de água.

#### Análise de Variância

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Resina (%)	2	0,017618	0,008809	152,48	0,000
Razão MB	5	0,006971	0,001394	24,13	0,000
Concentração de Resina (%) *Razão MB	10	0,000545	0,000054	0,94	0,507
Erro	36	0,002080	0,000058		
Total	53	0,027213			

#### Teste de Tukey – Concentração de Resina

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = %, Termo = Concentração de Resina (%)				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Concentração de Resina (%)				
	N	Média	Agrupamento	
30	18	0,101080	A	
40	18	0,070846	B	
50	18	0,057988	C	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

#### Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = %, Termo = Razão MB				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Razão MB				
	N	Média	Agrupamento	
100/0	9	0,0921165	A	
90/10	9	0,0862937	A B	
80/20	9	0,0804397	A B	
70/30	9	0,0766145	B C	
60/40	9	0,0643378	C D	
50/50	9	0,0600259	D	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

## Teste de Tukey – Interação entre fatores

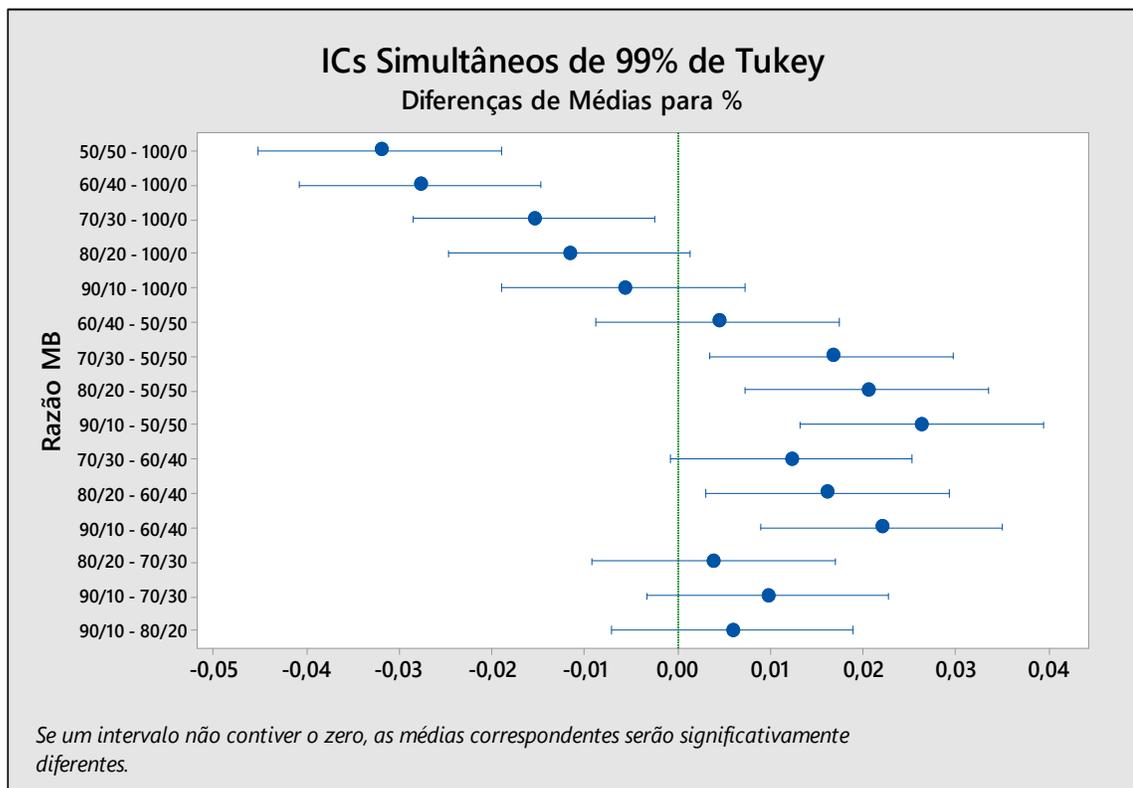
### Comparações Paredadas de Tukey: Resposta = %, Termo = Concentração de Resina (%) \* Razão MB

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%

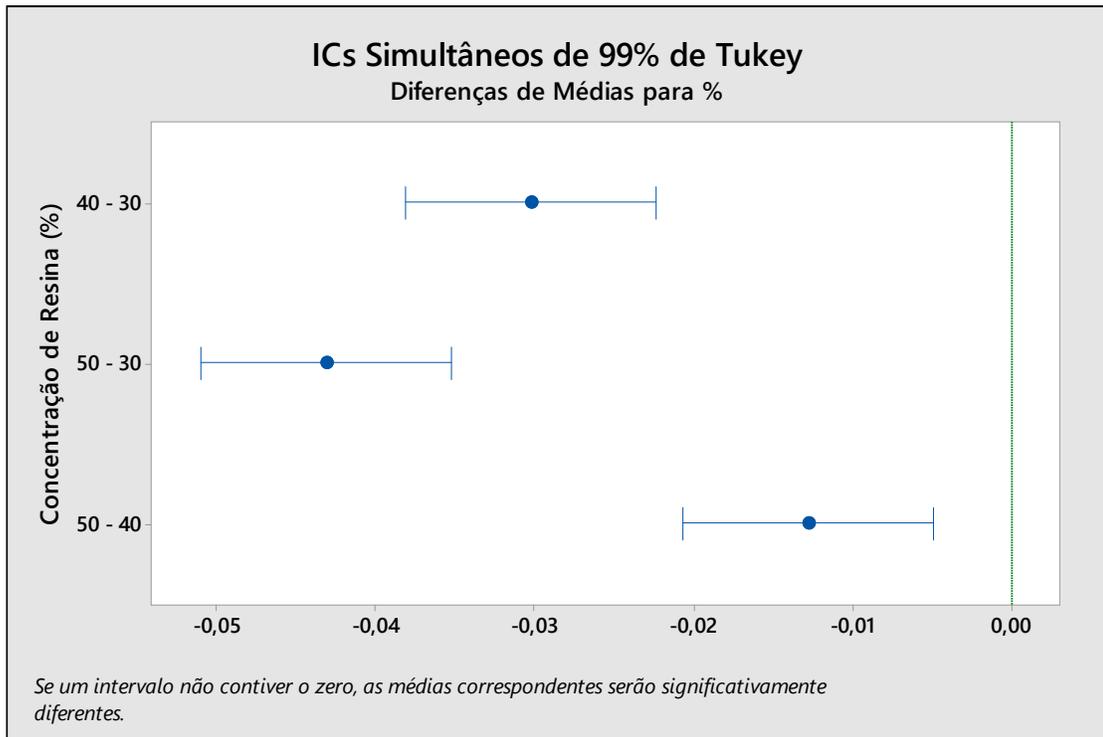
Concentração de Resina (%) * Razão MB		N	Média	Agrupamento
30	100/0	3	0,115332	A
30	70/30	3	0,107830	A B
30	90/10	3	0,107690	A B
30	80/20	3	0,103166	A B
30	60/40	3	0,089308	A B C
40	100/0	3	0,089190	A B C
40	90/10	3	0,086591	B C
30	50/50	3	0,083154	B C D
40	80/20	3	0,074459	C D E
50	100/0	3	0,071828	C D E F
50	90/10	3	0,064600	C D E F G
50	80/20	3	0,063694	C D E F G
40	70/30	3	0,063497	C D E F G
50	70/30	3	0,058516	D E F G
40	60/40	3	0,057797	D E F G
40	50/50	3	0,053540	E F G
50	60/40	3	0,045908	F G
50	50/50	3	0,043384	G

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

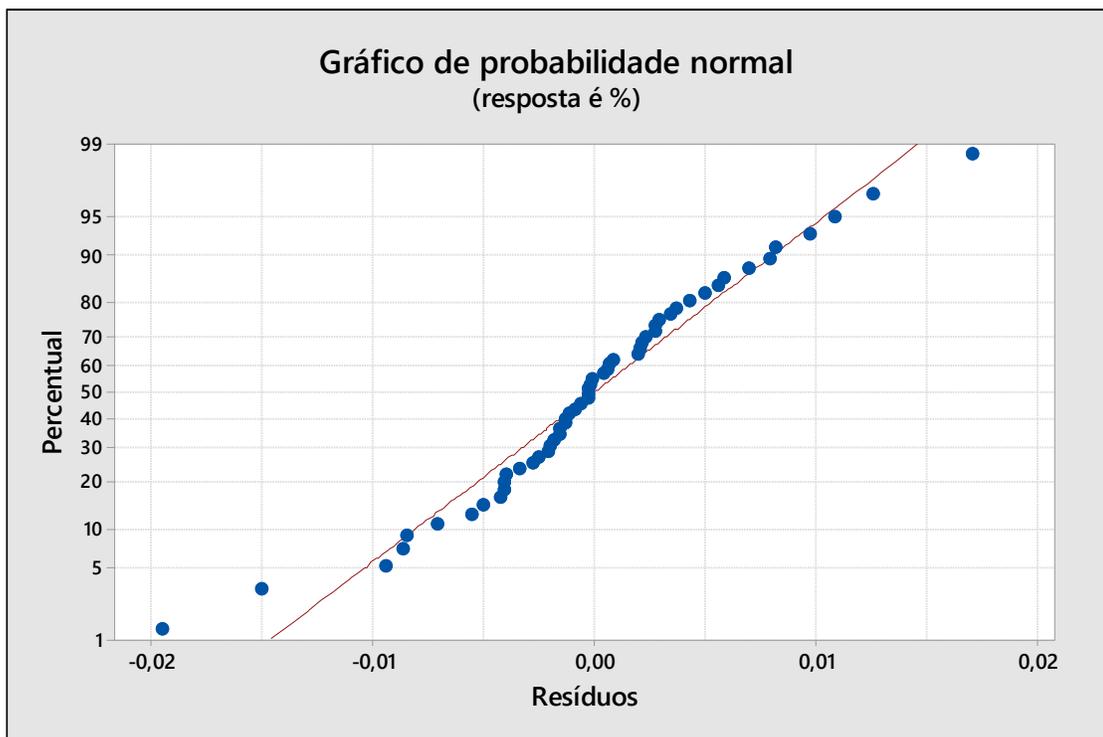
## Representação do Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

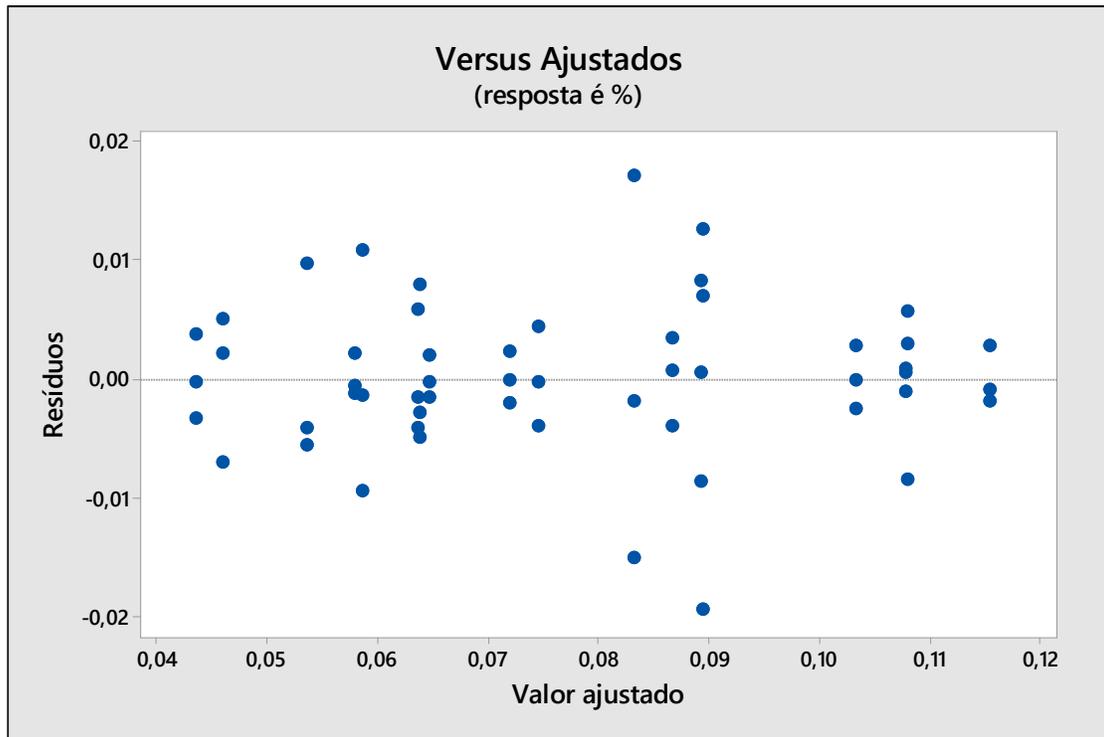


### Representação do Teste de Tukey – Concentração de Resina



### Gráfico de Probabilidade normal



**Gráfico de resíduos e valores ajustados**

## INCHAMENTO DE ESPESSURA

Apresentação da análise estatística utilizando o software Minitab para inchamento de espessura.

### Análise variância

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Resina (%)	2	0,006106	0,003053	108,58	0,000
Razão MB	5	0,003359	0,000672	23,89	0,000
Concentração de Resina (%) * Razão MB	10	0,000360	0,000036	1,28	0,277
Erro	36	0,001012	0,000028		
Total	53	0,010838			

### Teste de Tukey – Concentração de Resina

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = %, Termo = Concentração de Resina (%)				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Concentração de Resina (%)	N	Média	Agrupamento	
30	18	0,0462010	A	
40	18	0,0282200	B	
50	18	0,0208891	C	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

### Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = %, Termo = Razão MB				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Razão MB	N	Média	Agrupamento	
90/10	9	0,0409116	A	
100/0	9	0,0399820	A	
80/20	9	0,0359705	A B	
70/30	9	0,0295029	B C	
60/40	9	0,0247158	C D	
50/50	9	0,0195373	D	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

## Teste de Tukey – Interação entre fatores

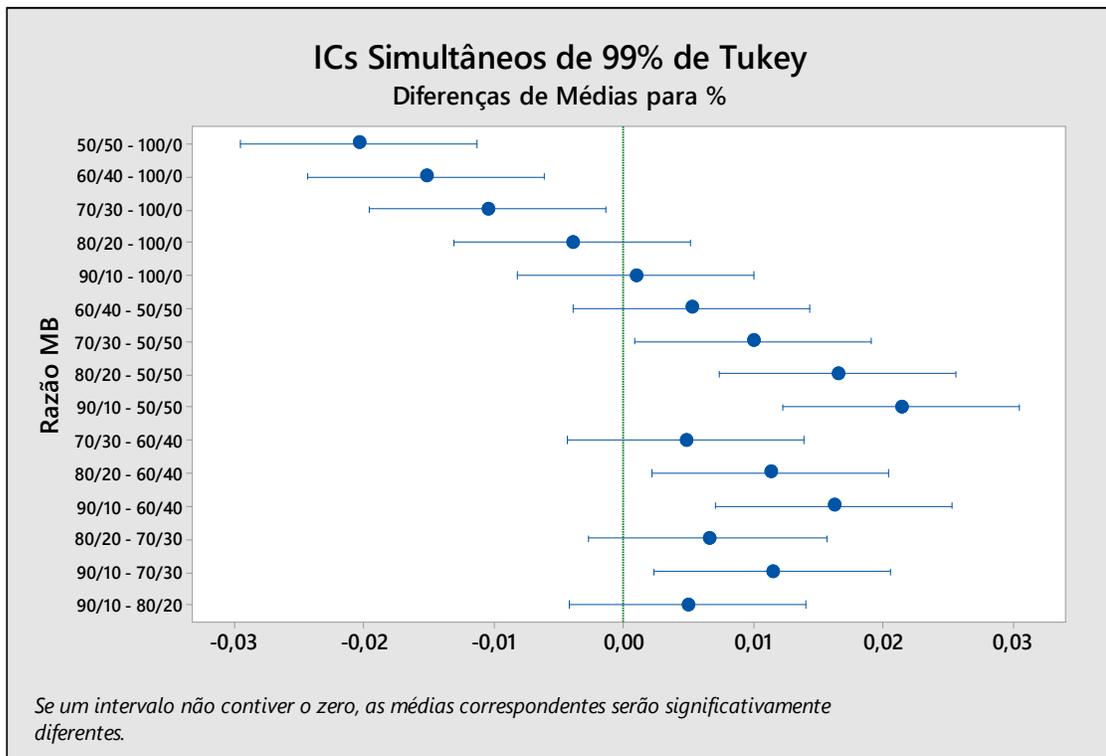
### Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = %, Termo = Concentração de Resina (%)\*Razão MB

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%

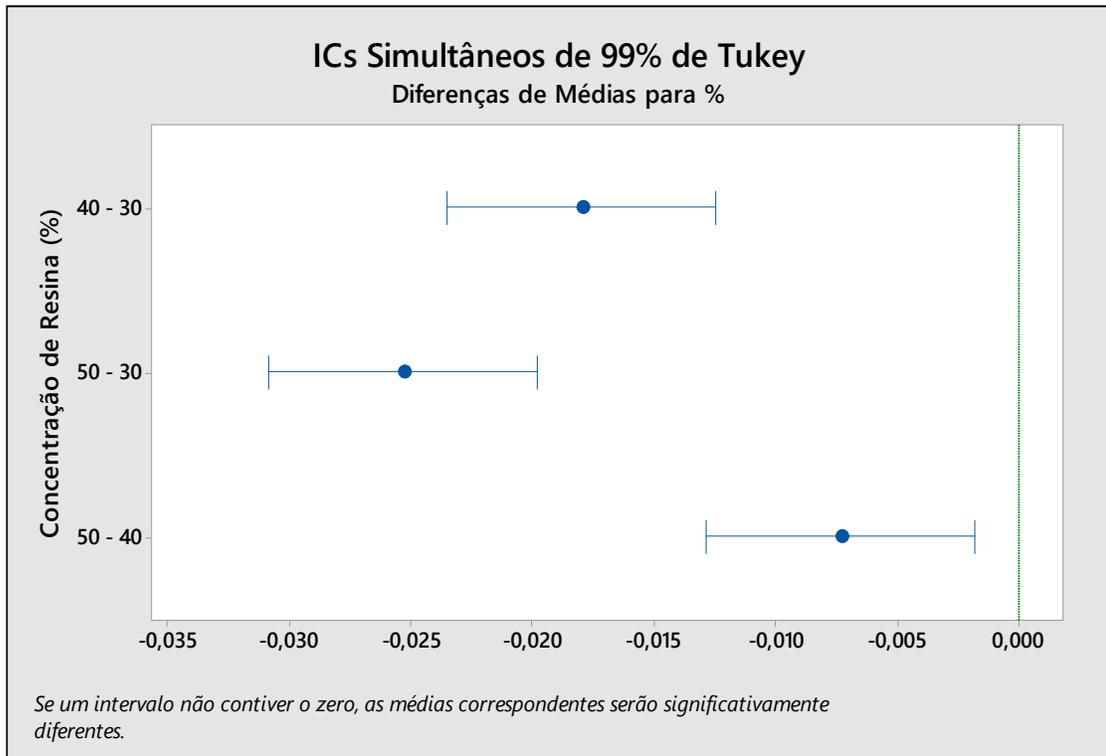
Concentração de Resina (%) * Razão MB	N	Média	Agrupamento
30 100/0	3	0,0586207	A
30 90/10	3	0,0570979	A B
30 80/20	3	0,0499075	A B C
30 70/30	3	0,0433451	A B C D
30 60/40	3	0,0400885	A B C D E
40 90/10	3	0,0389880	B C D E F
40 100/0	3	0,0353017	C D E F G
40 80/20	3	0,0312256	C D E F G H
30 50/50	3	0,0281460	D E F G H I
50 80/20	3	0,0267784	D E F G H I
50 90/10	3	0,0266490	D E F G H I
50 100/0	3	0,0260235	D E F G H I
40 70/30	3	0,0234090	E F G H I
50 70/30	3	0,0217547	E F G H I
40 60/40	3	0,0207423	F G H I
40 50/50	3	0,0196536	G H I
50 60/40	3	0,0133165	H I
50 50/50	3	0,0108123	I

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

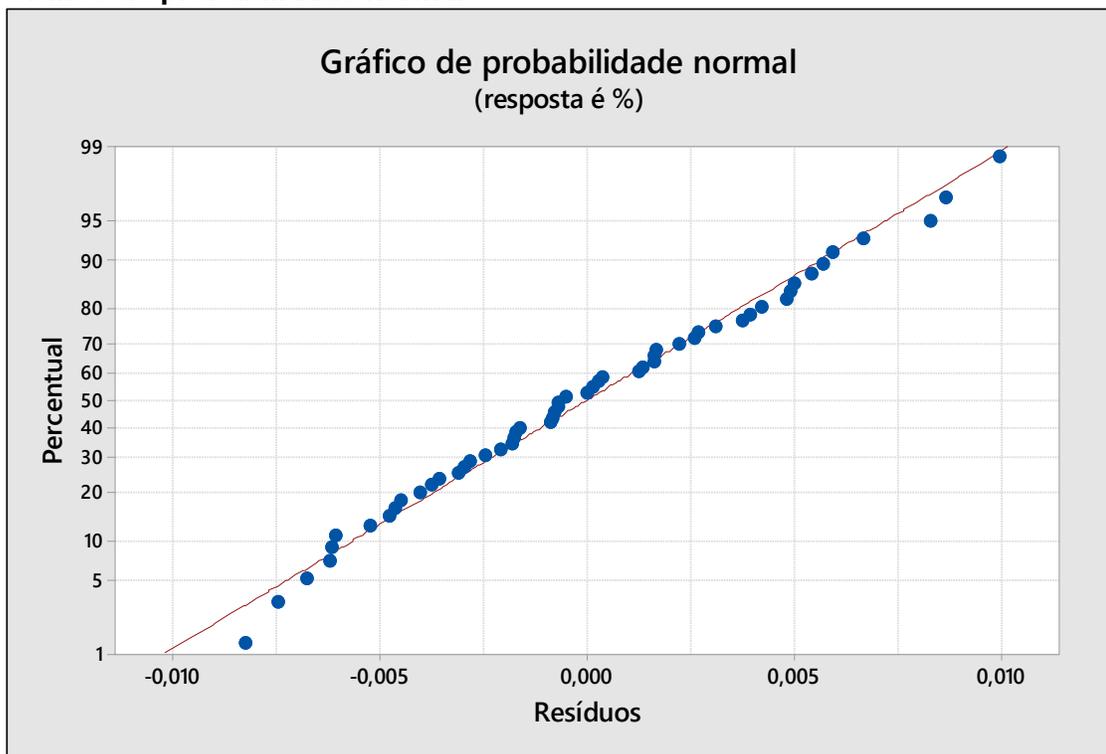
## Representação do Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

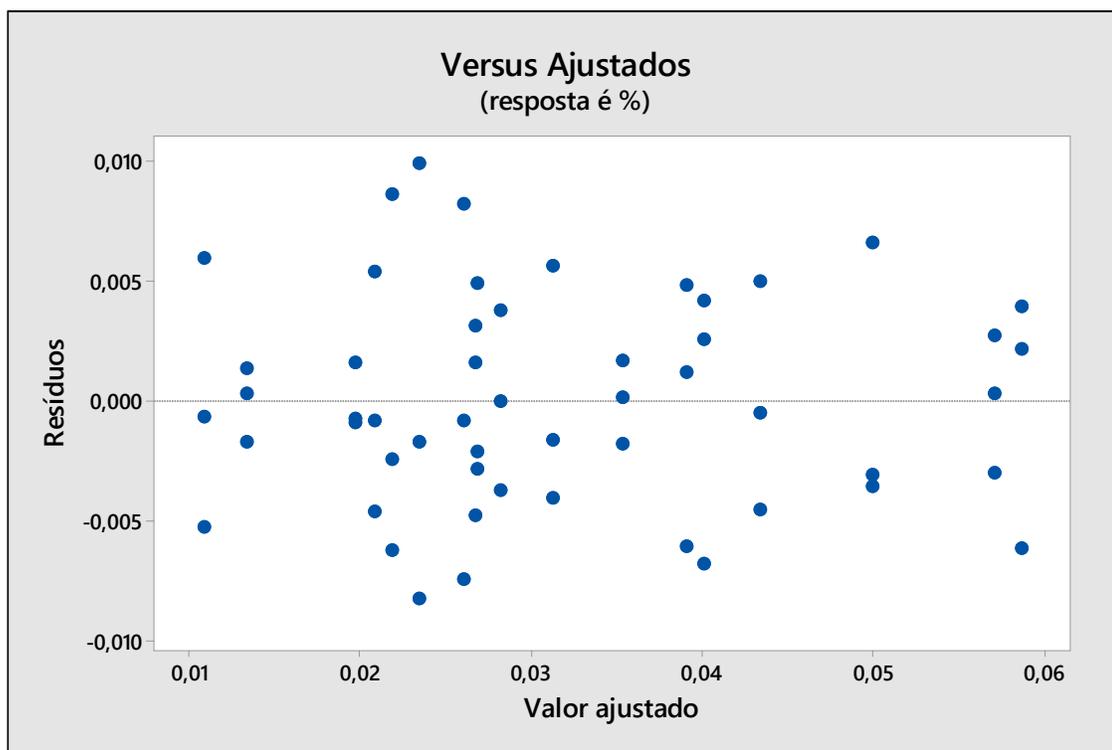


### Representação do Teste de Tukey – Concentração de Resina



### Gráfico de probabilidade normal



**Gráfico de resíduos e valores ajustados**

## MÓDULO DE ELASTICIDADE

Apresentação da análise estatística utilizando o software Minitab para módulo de elasticidade.

### Análise de variância

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Resina (%)	2	131458	65729	9,92	0,000
Razão MB	5	8951026	1790205	270,24	0,000
Concentração de Resina (%) * Razão MB	10	432016	43202	6,52	0,000
Erro	36	238480	6624		
Total	53	9752981			

### Teste de Tukey – Concentração de Resina

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = MPa, Termo = Concentração de Resina (%)				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Concentração de Resina (%)	N	Média	Agrupamento	
30	18	1049,84	A	
40	18	989,35	A	B
50	18	928,98		B
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

### Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = MPa, Termo = Razão MB				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Razão MB	N	Média	Agrupamento	
100/0	9	1640,69	A	
90/10	9	1317,78	B	
80/20	9	1072,79	C	
70/30	9	841,25	D	
60/40	9	618,68	E	
50/50	9	445,15	F	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

## Teste de Tukey – Interação entre fatores

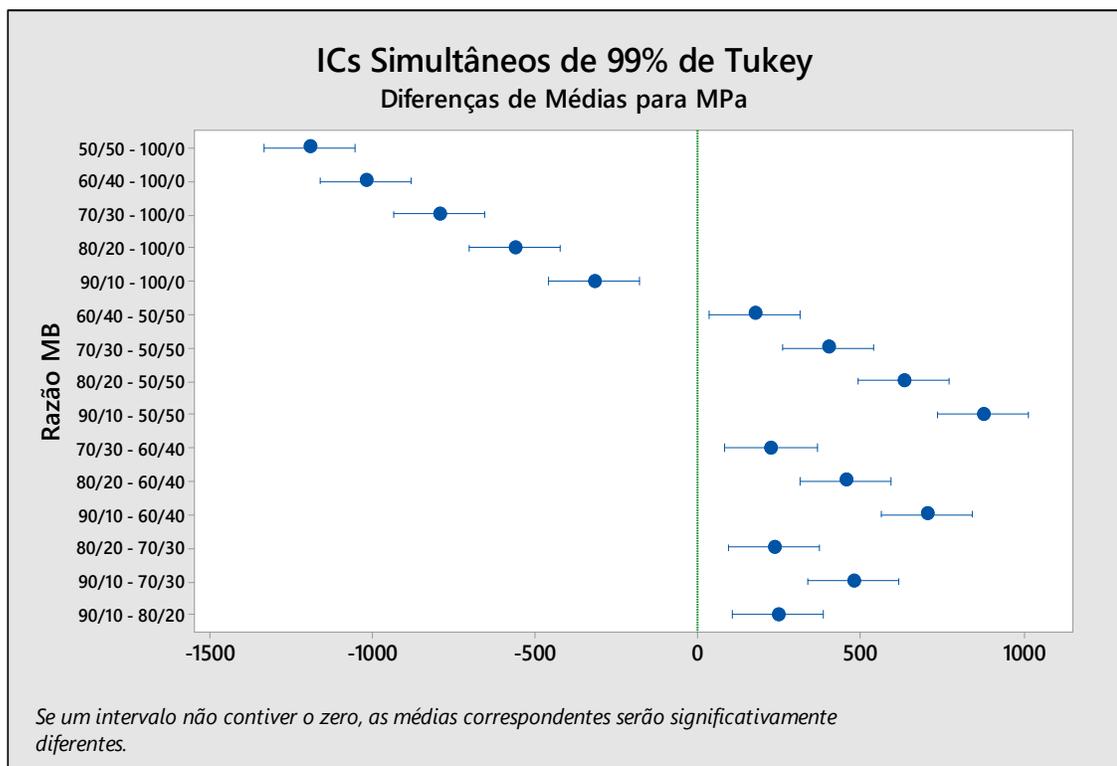
### Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = MPa, Termo = Concentração de Resina (%)\*Razão MB

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%

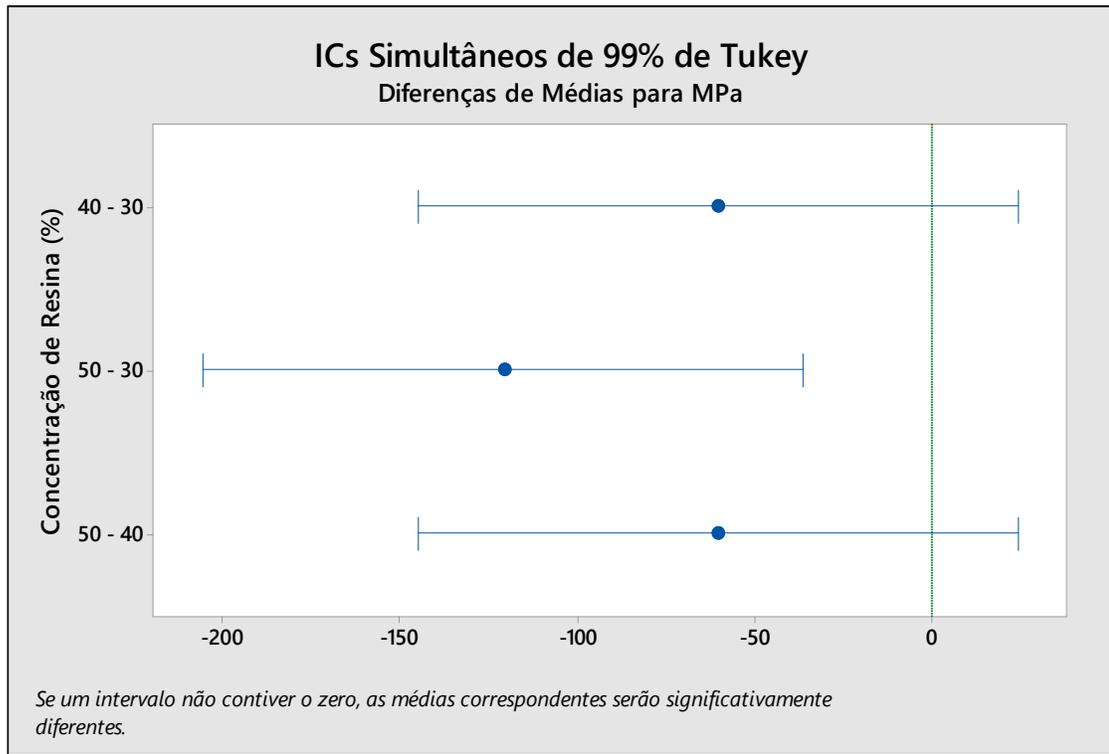
Concentração de Resina (%) * Razão MB	N	Média	Agrupamento
30 100/0	3	1892,70	A
40 100/0	3	1627,49	A B
30 90/10	3	1434,54	B C
50 100/0	3	1401,89	B C
40 90/10	3	1326,48	C D
50 90/10	3	1192,32	C D E
40 80/20	3	1167,80	C D E
30 80/20	3	1045,69	D E F
50 80/20	3	1004,89	E F
30 70/30	3	936,47	E F G
50 70/30	3	820,18	F G H
40 70/30	3	767,11	F G H
50 60/40	3	678,95	G H I
40 60/40	3	590,51	H I
30 60/40	3	586,57	H I
50 50/50	3	475,69	I
40 50/50	3	456,68	I
30 50/50	3	403,09	I

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

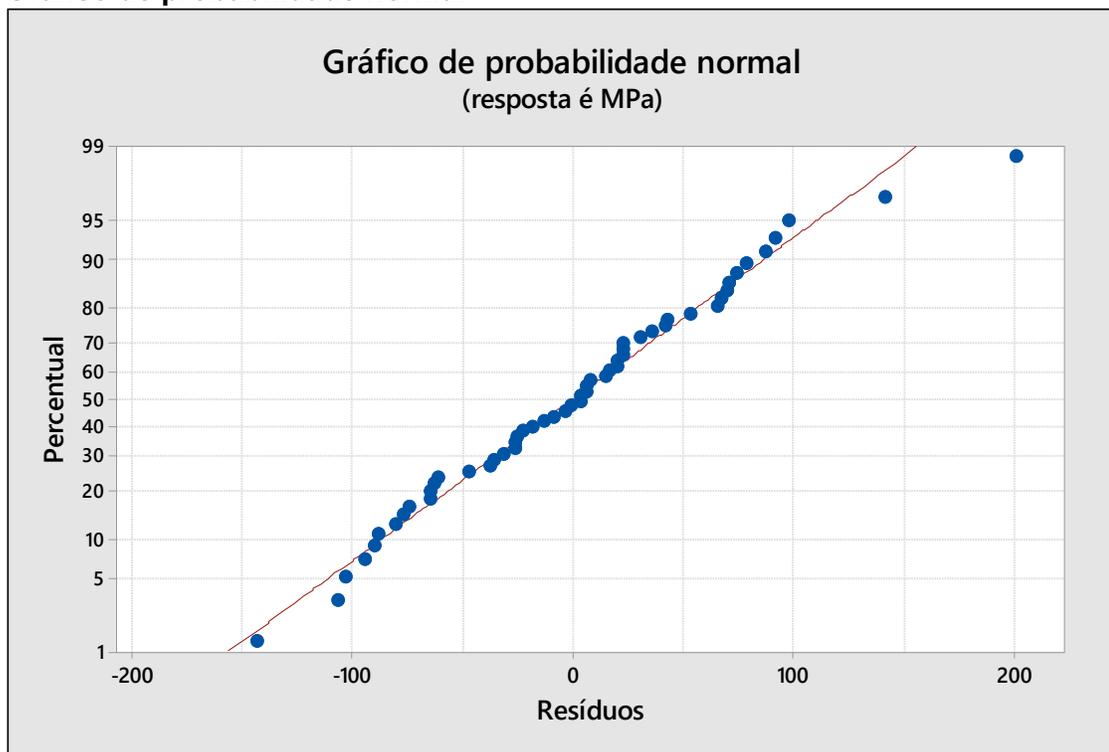
## Representação do Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

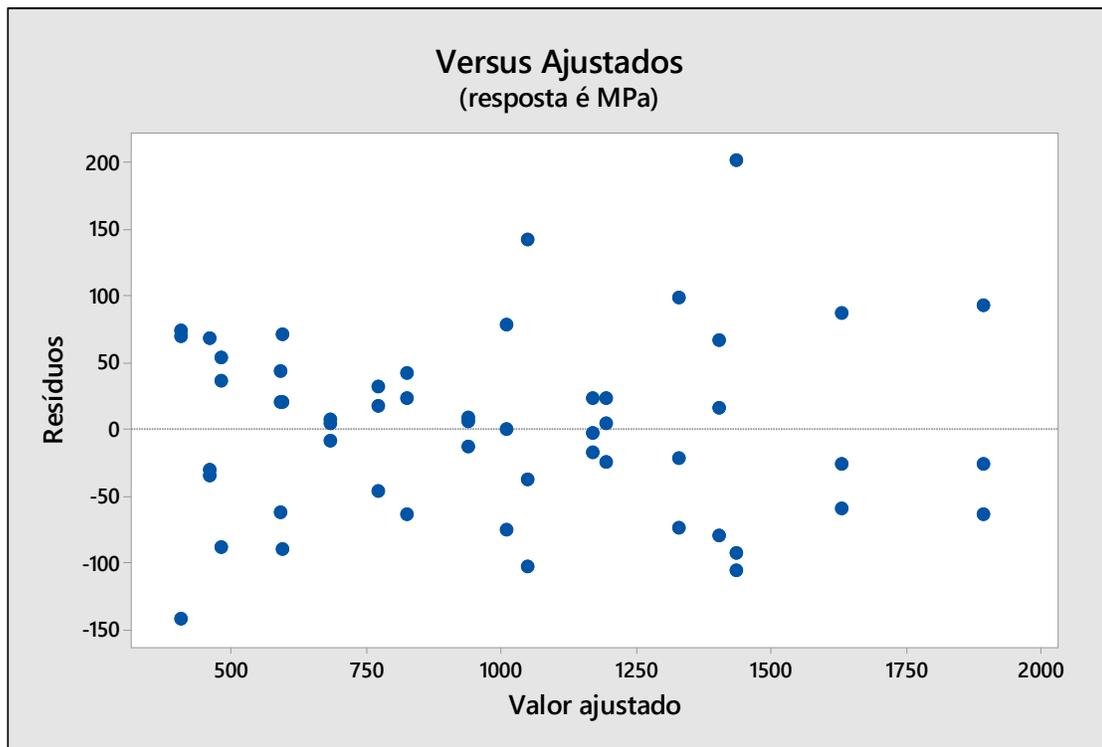


### Representação do Teste de Tukey – Concentração de Resina



### Gráfico de probabilidade normal



**Gráfico de resíduos e valores ajustados**

## MÓDULO DE RUPTURA

Apresentação da análise estatística utilizando o software Minitab para módulo de ruptura.

### Análise de Variância

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Resina (%)	2	21,34	10,670	3,21	0,052
Razão MB	5	1148,57	229,714	69,16	0,000
Concentração de Resina (%) *Razão MB	10	67,20	6,720	2,02	0,060
Erro	36	119,58	3,322		
Total	53	1356,69			

### Teste de Tukey – Concentração de Resina

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = MPa, Termo = Concentração de Resina (%)				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Concentração de Resina (%)				
	N	Média	Agrupamento	
50	18	18,1883	A	
40	18	17,5950	A	
30	18	16,6611	A	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

### Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = MPa, Termo = Razão MB				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
	N	Média	Agrupamento	
100/0	9	25,0967	A	
90/10	9	20,8122	B	
80/20	9	18,4700	B C	
70/30	9	15,8711	C D	
60/40	9	13,2333	D E	
50/50	9	11,4056	E	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

## Teste de Tukey – Interação entre fatores

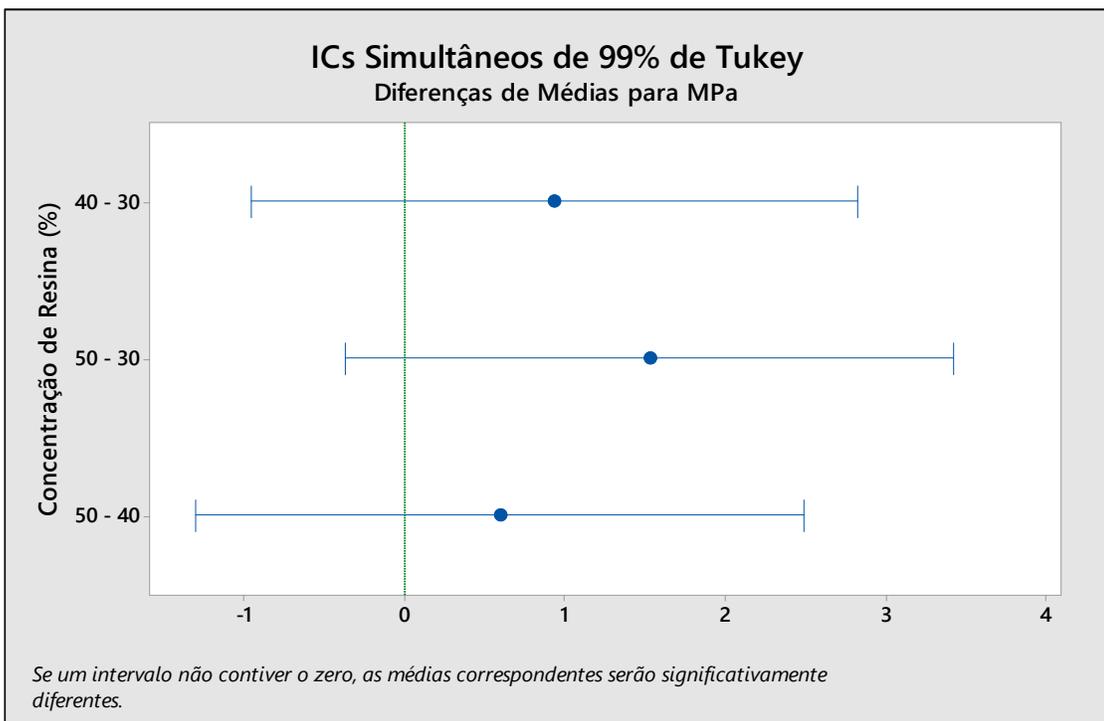
### Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = MPa, Termo = Concentração de Resina (%)\*Razão MB

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%

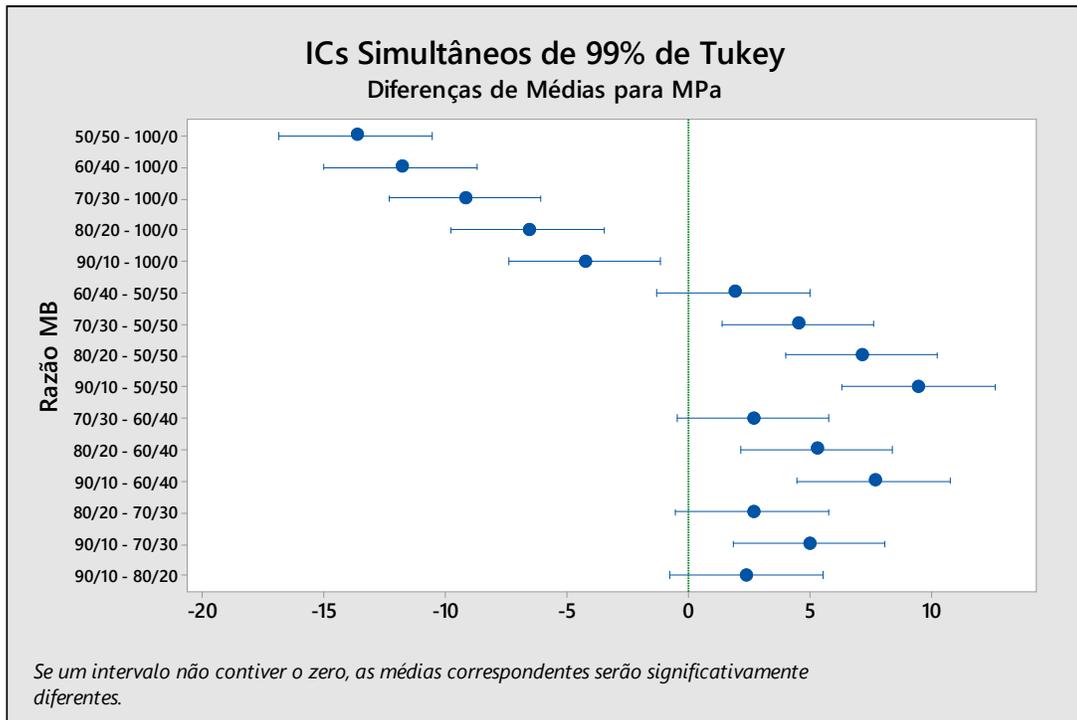
Concentração de Resina (%) * Razão MB		N	Média	Agrupamento
30	100/0	3	26,5967	A
40	100/0	3	24,6433	A B
50	100/0	3	24,0500	A B
50	90/10	3	21,7533	A B C
40	80/20	3	20,7833	A B C D
40	90/10	3	20,3433	A B C D
30	90/10	3	20,3400	A B C D
50	80/20	3	18,8300	B C D E
50	70/30	3	16,4667	C D E F
40	70/30	3	16,0233	C D E F G
30	80/20	3	15,7967	C D E F G
50	60/40	3	15,3833	C D E F G
30	70/30	3	15,1233	D E F G
50	50/50	3	12,6467	E F G
30	60/40	3	12,2733	F G
40	60/40	3	12,0433	F G
40	50/50	3	11,7333	F G
30	50/50	3	9,8367	G

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

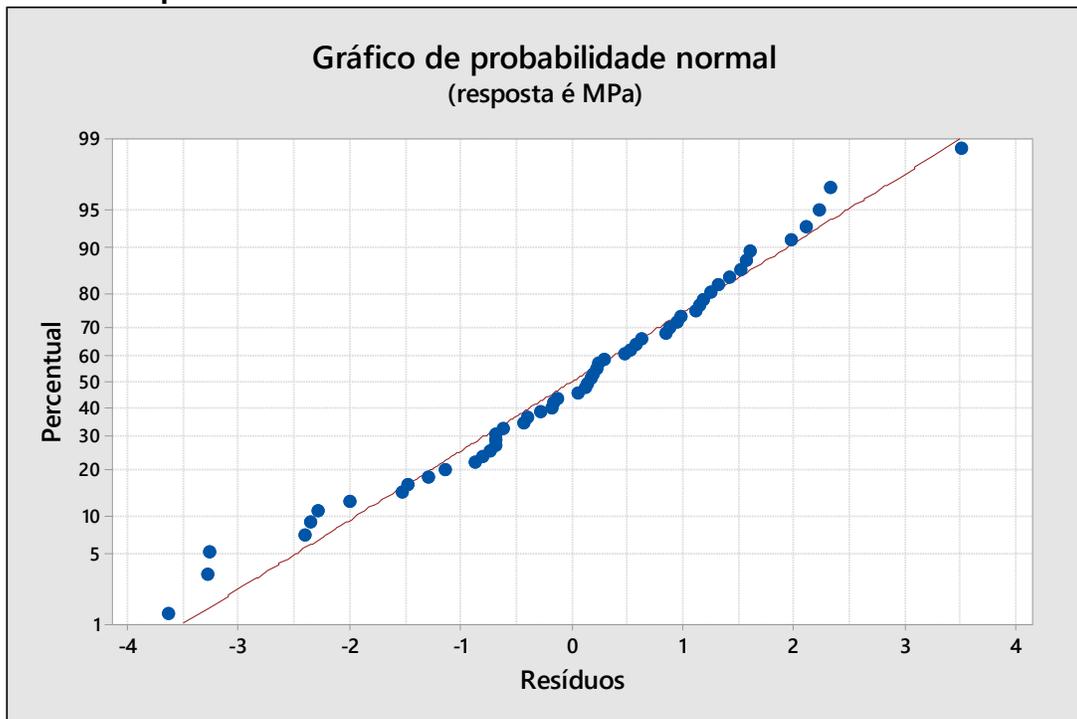
## Representação do Teste de Tukey – Concentração de resina

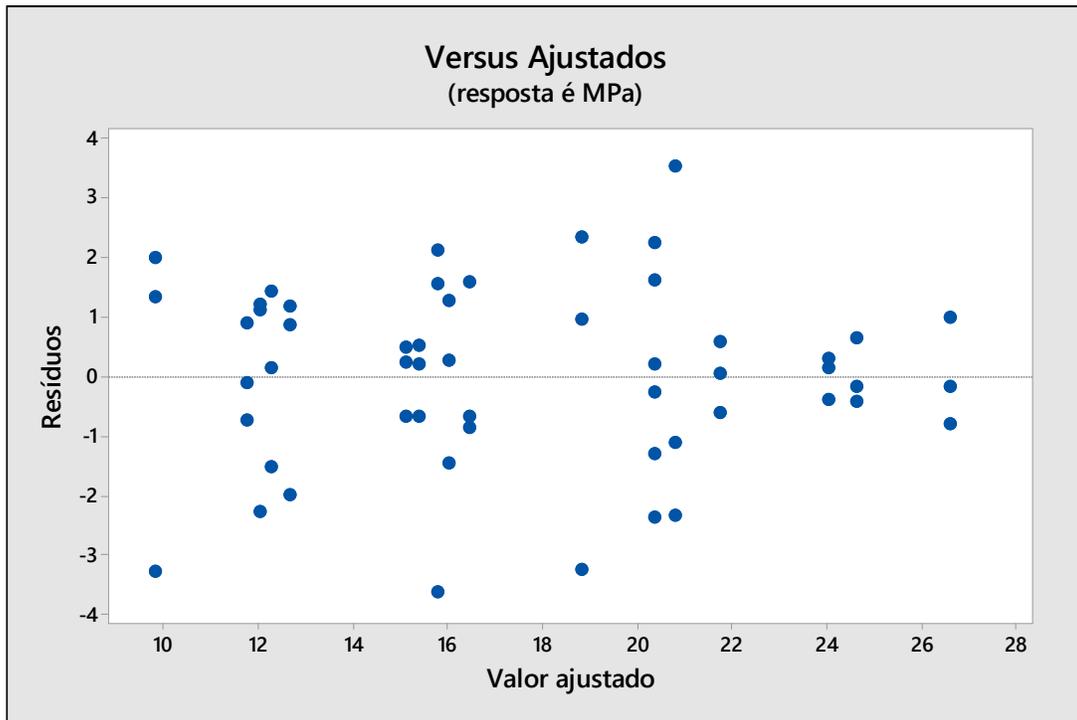


### Representação do Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha



### Gráfico de probabilidade normal



**Gráfico de resíduos e valores ajustados**

## MÓDULO DE TENACIDADE

Apresentação da análise estatística utilizando o software Minitab para módulo de tenacidade.

### Análise de variância

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Resina (%)	2	218525799	109262900	1,77	0,185
Razão MB	5	999551893	199910379	3,23	0,016
Concentração de Resina (%) *Razão MB	10	1007010396	100701040	1,63	0,138
Erro	36	2224836657	61801018		
Total	53	4449924745			

### Teste de Tukey – Concentração de Resina

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = Nm/m <sup>3</sup> , Termo = Concentração de Resina (%)				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Concentração de Resina (%)	N	Média	Agrupamento	
50	18	40432,1	A	
40	18	38356,7	A	
30	18	35524,0	A	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

### Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha

Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = Nm/m <sup>3</sup> , Termo = Razão MB				
Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%				
Razão MB	N	Média	Agrupamento	
60/40	9	43911,6	A	
80/20	9	41891,0	A	
100/0	9	40905,5	A	
70/30	9	35592,0	A	
50/50	9	33189,1	A	
90/10	9	33136,4	A	
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.				

## Teste de Tukey – Interação entre fatores

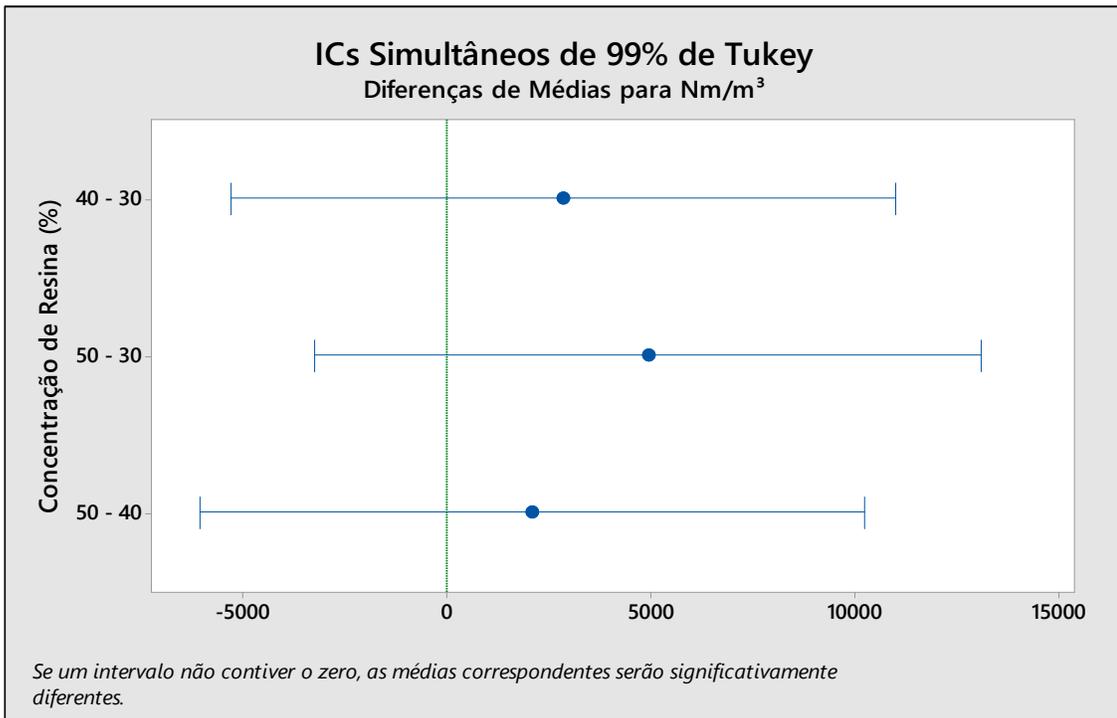
### Comparações Pareadas de Tukey: Resposta = $\text{Nm/m}^3$ , Termo = Concentração de Resina (%) \* Razão MB

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 99%

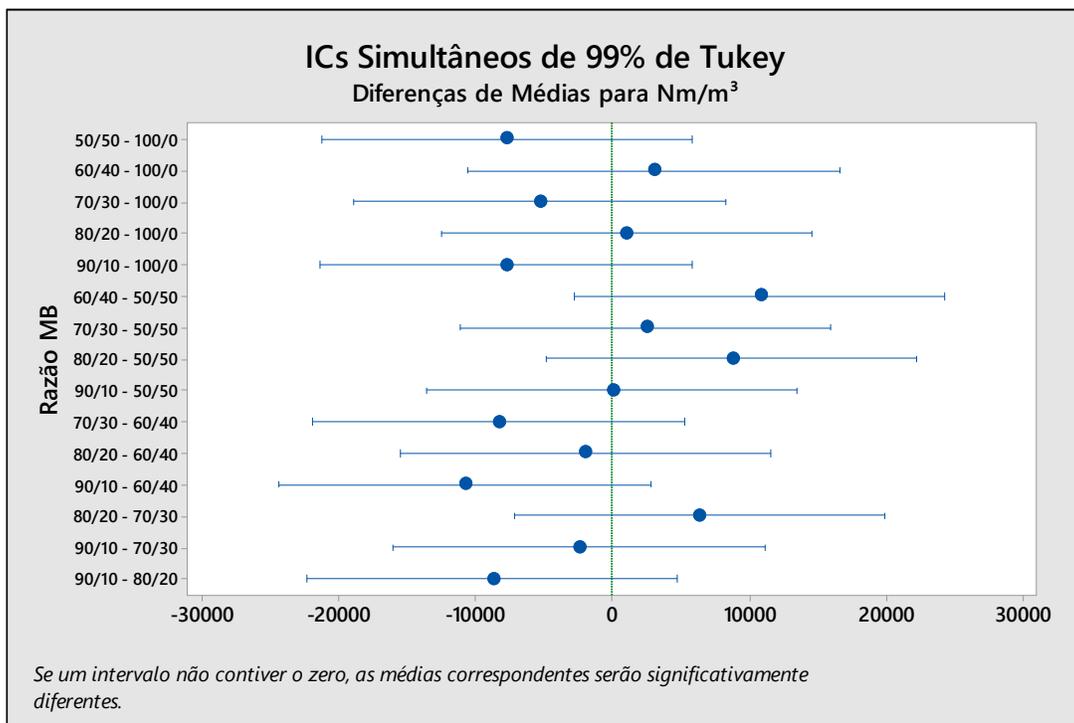
Concentração de Resina (%) * Razão MB	N	Média	Agrupamento
40 80/20	3	49768,8	A
30 60/40	3	47644,8	A
50 100/0	3	46209,7	A
40 100/0	3	45444,6	A
50 60/40	3	43251,3	A
50 90/10	3	41595,1	A
40 60/40	3	40838,7	A
50 80/20	3	38682,4	A
30 80/20	3	37221,8	A
50 50/50	3	37050,1	A
30 70/30	3	36606,4	A
50 70/30	3	35803,8	A
40 70/30	3	34365,9	A
30 50/50	3	33244,4	A
30 100/0	3	31062,1	A
40 90/10	3	30449,8	A
40 50/50	3	29272,7	A
30 90/10	3	27364,3	A

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

## Representação do Teste de Tukey – Concentração de Resina



### Representação do Teste de Tukey – Razão Serragem-Borracha



## ANEXO A – Ficha técnica da matriz

Ficha técnica da resina poliuretana à base de óleo de mamona Imperveg® AGT1315 da empresa Imperveg®<sup>50</sup>.

### **IMPERVEG® AGT 1315**

**Descrição**

**IMPERVEG® AGT 1315** é uma resina a base de poliuretano vegetal (originado do óleo de mamona), bi-componente, 100% sólido (isento de solventes) não liberando vapores tóxicos, formulado pela mistura a frio de um pré-polímero (componente A) e um políol (componente B), resultando em polímeros com diferentes características, de excepcional estabilidade físico-química, elasticidade, impermeabilidade.

**Propriedades**

**IMPERVEG® AGT 1315** apresenta excelente resistência à ação do intemperismo e águas contendo substâncias agressivas como sais, ácidos e álcalis.  
Os compósitos obtidos com esta resina apresentam as seguintes características:

- Alta durabilidade;
- Grande resistência aos raios ultravioleta;
- Estanqueidade a líquidos e gases;
- Excelente penetração nos poros da superfície, garantindo uma boa aderência;
- Não apresenta retração volumétrica após a cura.

**Campos de Aplicação**

Utilizado como adesivo e aglomerante para formação de compósitos com fibras vegetais, pó de serragem de madeiras, inservíveis e outros.

**IMPERVEG® AGT 1315** é fornecido em dois componentes (A + B) que devem ser misturados na proporção de 1:1,5 (uma parte do componente A + uma parte e meia do componente B, em volume respectivamente). Após a mistura o tempo de trabalho (pot life) gira em torno de 15 minutos, quando a resina entra no ponto de gel dificultando o manuseio do material, gerando conseqüentemente perdas. É recomendada inicialmente a mistura de pequenas quantidades.

**Características**

- Consistência: fluída
- Cor após cura: âmbar;
- Resistência ao calor: apresenta perda de massa somente após 210 °C
- Liberação de elementos tóxicos: isento
- Secagem ao Toque: 60 a 90 minutos dependendo da temperatura ambiente
- tempo mínimo de retirada do molde: 6 horas
- Tempo de cura e manuseio: 24 horas

**Rendimento**

Varia de 10 a 50 % em relação à massa do material a ser utilizado, dependendo das características e resistências mecânicas que se queira dar ao compósito. Vale lembrar que as propriedades mecânicas da peça variam em função da porcentagem a ser utilizada e da carga a ser exercida. Caberá ao interessado a definição da porcentagem e carga para definir as características que pretenda dar ao seu compósito.

**Acondicionamento e estocagem do IMPERVEG® AGT 1315**

O produto deve ser estocado dentro de sua embalagem original, evitar grandes oscilações de temperatura e conservar as embalagens fechadas. Nestas condições, o produto pode ser conservado por 06 (seis) meses, sem alterações de suas propriedades.  
Embalagem - bombonas plásticas de 05, 10 e 20 quilos.

**IMPORTANTE**

As informações fornecidas nesta literatura objetivam apenas orientar os interessados. Não assumimos, entretanto, qualquer responsabilidade pelo uso incorreto do produto ou dessas informações.

**ANEXO B – Tabela-F Alfa=0,01**

Tabela-F utilizada para as análises estatísticas com alfa 0,01<sup>51</sup>.

v <sub>1</sub> \ v <sub>2</sub>	Degrees of Freedom for the Numerator (v <sub>1</sub> )												∞						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15		20	24	30	40	60	120
1	4052	4999.5	5403	5625	5764	5889	5928	5982	6022	6056	6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339	6366
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.48	99.49	99.50	99.50
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35	27.23	27.05	26.87	26.69	26.00	26.50	26.41	26.32	26.22	26.13
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.75	13.65	13.56	13.46
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.34	2.26	2.17	2.06
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.03
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38