

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DA TERMORRETIFICAÇÃO EM MADEIRAS DE PINUS

Kelly Cristina Ramos da Silva. (UNESP) E-mail: lifekelly@gmail.com  
Julio Cesar Molina. (UNESP) E-mail: molina@itapeva.unesp.br

**Resumo:** Neste trabalho analisou-se estatisticamente as propriedades de rigidez ( $E_{c0}$  e MOE) e resistência ( $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ ) de madeiras de *Pinus taeda* após termorretificação nas temperaturas 160, 180, 200, 220, 240 e 260 °C com relação madeira em temperatura ambiente. Na comparação dos resultados foram considerados os resultados experimentais obtidos por Silva (2012), sendo estes analisados através do software "R", versão 3.0.1. Os resultados da análise estatística mostraram que o tratamento térmico não influenciou significativamente a rigidez da madeira, mas para a resistência, houve influência para as variáveis  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ . A análise de componentes principais robusta identificou um ponto atípico inferior multivariado com valores extremos inferiores para as seis variáveis estudadas. A análise de agrupamentos robusta viabilizou a identificação de grupos e distâncias entre eles e, para uma análise de três grupos, notou-se que o grupo da madeira *in natura* foi o mais homogêneo se comparado aos grupos tratados com grau de homogeneidade próximo a um (silhueta = 0.92). O grupo de madeiras *in natura* também se mostrou heterogêneo com relação ao grupo tratado nas temperaturas 240 °C e 260 °C. Notou-se também grande variabilidade do grupo das amostras tratadas nas temperaturas: 160 °C a 220 °C (silhueta = 0.51)

**Palavras-chave:** Análise estatística, termorretificação, pinus taeda, resistência, rigidez.

## STATISTICAL ANALYSIS OF THE THERMAL RECTIFICATION IN PINUS WOOD

**Abstract:** In this work the stiffness ( $E_{c0}$ , MOE) and strength ( $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$ ,  $f_{v0}$ ) of *Pinus taeda* woods after thermal rectification at 160, 180, 200, 220, 240 and 260 °C with respect to the wood at room temperature was statistically analyzed. In the comparasion of the results the experimental results obtined by Silva (2012) were considered and these were analyzed by "R" software, version 3.0.1. The statistical results showed that the treatment had no significant influence on the stiffness of the wood, but with respect to strength, the influence for the  $f_{t0}$  and  $f_{v0}$  variables was observed. The main component analysis robust multivariate identified the identification of groups and the distance between them and for an analysis of three groups was observed that the group of wood *in natura* was more homogeneous compared to groups treated with a degree of homogeneity about 1,0 (silhouette equal to 0.92). The group of wood *in natura* also showed heterogeneous with respect to the group treated at 240 °C and 260 °C. It was observed also great variability presented by the group of treated at 160 °C to 220 °C temperatures (silhouette equal to 0.51).

**Keywords:** Statistical analysis, thermal rectification, pinus taeda, strength, stiffness.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Molina e Silva (2012), o tratamento preservante da madeira é importante para a melhoria da sua durabilidade. Neste contexto, para aumentar a vida útil das estruturas de madeira os tratamentos preservantes mais comumente utilizados e de ação prolongada são feitos por impregnação em autoclave, utilizando soluções de CCA (Cobre, Cromo e Arsênio) e CCB (Cobre, Cromo e Boro). Dentro deste grupo existem também os tratamentos à base de óleo como o Creosoto. Esses tratamentos, embora eficientes no que se refere a proteção da

madeira frente as ações biológicas, tem sido alvo de discussões quanto a sua toxicidade e também com relação ao descarte da madeira no meio ambiente. No intuito de diminuir os danos ao meio ambiente e utilizar os tratamentos preservantes mais eficazes para a madeira, pesquisas têm sido desenvolvidas por diferentes pesquisadores, dentre eles, Poncsák et al. (2006), Modes (2010) e Silva (2012), com o objetivo de avaliar a eficiência de tratamentos da madeira por termorreificação. O tratamento térmico por termorreificação não envolve compostos químicos e consiste num processo de baixo custo. Por esta razão, pode ser uma proposta viável para substituir o processo tradicional de tratamento preservativo realizado por impregnação de compostos químicos em autoclave. Segundo Brito (1992), o tratamento térmico por termorreificação tem como base a pirólise, que pode ser definida como o fenômeno que leva a madeira à degradação mediante a ação do calor na ausência de agentes oxidantes ou de catalizadores sem que haja combustão. A termorreificação da madeira é geralmente realizada em temperaturas abaixo de 280 °C.

Com base no exposto, o principal objetivo deste trabalho consistiu na comparação estatística das propriedades de rigidez ( $E_{c0}$  e MOE) e de resistência ( $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ ) de madeiras de *Pinus taeda* termorreificadas nas temperaturas 160 °C, 180 °C, 200 °C, 220 °C, 240 °C e 260 °C com relação às mesmas propriedades obtidas para a madeira em temperatura ambiente (*in natura*). Para atingir o objetivo proposto, utilizou-se o modelo paramétrico MANOVA e o teste de Tukey. A análise também considerou a detecção de pontos atípicos univariados e multivariados nos valores de resistência e rigidez. Vale mencionar ainda que as análises estatísticas, neste caso, foram efetuadas para avaliar resultados de ensaios experimentais de resistência e de rigidez obtidos por Silva (2012).

## 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS

O modelo paramétrico MANOVA consiste num eficiente método para análise de dados multivariados que seguem uma distribuição normal multivariada, para os quais a relação entre as variáveis respostas e as variáveis independentes é linear. O método é uma generalização do modelo univariado de análise de variância (ANOVA) para dados multivariados. Para utilização deste método outras ferramentas estatísticas devem ser consideradas. Nesse sentido, os comentários mais relevantes sobre estas ferramentas são apresentados de maneira simplificada nos parágrafos seguintes para facilitar o entendimento e a análise do problema em questão.

A ANOVA é comumente utilizada em estudos cujo objetivo é avaliar se há o efeito das variáveis independentes ou fatores na variável resposta. Neste trabalho, o fator estudado foi a termorreificação da madeira *Pinus taeda* em diferentes níveis de temperatura. Portanto, fez-se necessário a aplicação de um método de múltiplas comparações entre duas médias (teste de Tukey) devido ao fato de que o modelo MANOVA não informa as médias dos níveis do fator que são estatisticamente distintas. Dessa forma, se o modelo MANOVA indicar por meio do nível de significância que há efeito do fator com relação à variável resposta é necessário utilizar um método de múltiplas comparações entre duas médias para identificar quais níveis do fator exercem significativa influência estatística na variável resposta. O teste de Tukey tem a vantagem de apresentar os menores intervalos se comparados aos demais métodos de múltiplas comparações entre duas médias.

A análise de componentes principais (PCA) é uma popular técnica de análise estatística multivariada que tem como objetivo a redução da dimensão do espaço amostral. O método busca por variáveis denominadas de componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais e que são mutuamente ortogonais entre si, nas quais descrevem a variação do conjunto de dados original com  $p$  variáveis correlacionadas em

termos de  $k$  variáveis descorrelacionadas entre si, para todo  $p$  e  $k$  pertencentes ao conjunto dos naturais e para um  $k$  menor ou igual a  $p$ . Segundo Rousseeuw e Hubert (2011), na prática espera-se que os primeiros componentes principais expliquem a maior parte da variabilidade dos dados para que os demais componentes possam ser descartados, de modo que o número de variáveis a serem analisadas seja reduzido. Permite-se, assim, uma melhor interpretação e entendimento da fonte de variação dos dados. Na técnica de PCA clássica os estimadores são influenciados na presença de pontos atípicos nos dados, porque os pontos atípicos aumentam a variabilidade e levam a técnica a não capturar a adequada variabilidade das observações regulares. Por esta razão buscam-se estimadores menos sensíveis a presença de pontos atípicos nos dados.

Segundo Rousseeuw (1987) a análise de agrupamentos consiste em dividir os dados em grupos internamente homogêneos e externamente heterogêneos. Todos os grupos são baseados sobre dissimilaridades pareadas. Na análise de agrupamento robusta espera-se que as amostras atípicas, isto é, aquelas que se destoam da maioria das demais amostras do conjunto de dados não sejam incluídas em grandes grupos de dados. Portanto, de uma maneira geral, a análise de agrupamentos tem o propósito de identificar a formação dos grupos, a distância entre os grupos, e as homogeneidades intra grupo. Um critério de qualidade de homogeneidade intra grupo é o da “silhueta”, a qual indica *alta* homogeneidade entre as observações de um grupo quando apresenta valor próximo a um e *baixa* homogeneidade entre as observações de um grupo quando apresenta valor próximo do zero.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Seleção do conjunto de dados

Os dados analisados neste trabalho são referentes aos valores médios das propriedades mecânicas de resistência ( $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ ) e de rigidez ( $E_{c0}$  e MOE) da madeira *Pinus taeda* obtidas experimentalmente por Silva (2012). Os resultados de resistência e de rigidez, neste caso, foram obtidos considerando-se três repetições independentes nas mesmas condições. As variáveis experimentais de resposta consideradas nas análises estatísticas foram as seguintes:

- $f_{c0}$ : resistência à compressão paralela às fibras,
- $E_{c0}$ : módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras,
- MOR: módulo de resistência da madeira à flexão,
- MOE: módulo de elasticidade à flexão,
- $f_{t0}$ : resistência à tração paralela às fibras
- $f_{v0}$ : cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

Com relação a tais propriedades vale salientar que Silva (2012) realizou primeiramente ensaios para a obtenção dos valores de resistência e rigidez em madeiras que estavam em temperatura ambiente (*in natura*), ou seja, as quais não passaram por processo de termorreificação. Posteriormente, o autor realizou os mesmos ensaios em peças de madeira que foram termorreificadas nas temperaturas 160 °C, 180 °C, 200 °C, 220 °C, 240 °C e 260 °C. A taxa de aquecimento da madeira durante o processo de termorreificação foi de 0,033 °C.min<sup>-1</sup> para se evitar o aparecimento de rachaduras e trincas, sendo a umidade inicial das amostras para o tratamento térmico igual a 12% ± 2%. O acompanhamento da temperatura no interior dos corpos de prova durante o processo de aquecimento foi feito pelo uso de termopares do tipo K, colocados no interior das peças de madeira, em pontos específicos,

sendo estes ligados ao sistema externo de aquisição de dados “Agilent”. Os ensaios de resistência e de rigidez da madeira, assim como a confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios, foram realizados com base nas recomendações da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190 (1997). A Figura 1 mostra os detalhes de peças de madeira tratada por termorreificação em diferentes temperaturas.



Figura 1 – Alteração nas cores da madeira tratada termicamente: (A) testemunha (madeira *in natura*); (B): 160 °C; (C): 180 °C; (D): 200 °C; (E): 220 °C; (F): 240 °C; (G): 260 °C. Fonte: Silva (2012).

### 3.2 Análises estatísticas

As análises foram realizadas individualmente para cada uma das seis variáveis respostas estudadas ( $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ ,  $E_{c0}$  e MOE). O nível de significância nominal adotado foi de 5%. Os métodos estatísticos utilizados foram o modelo paramétrico multivariado para análise multivariada de variância (MANOVA), os métodos multivariados: análise de componentes principais (PCA) e análise de agrupamentos, o método de análise de experimentos, as múltiplas comparações de médias de Tukey e também a análise descritiva: o teste de normalidade univariado de Shapiro-Wilk, além do teste multivariado de Mardia para inferir sobre as suposições de normalidade univariada e multivariada, respectivamente.

Foi também utilizado o teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett para testar a hipótese de igualdade de variâncias, no qual, se a variabilidade de uma variável admitida para todos os grupos estudados não se diferir estatisticamente diz-se que a variável é homocedástica. No caso em que a variabilidade de uma variável se difere estatisticamente para pelo menos um grupo se comparado às variâncias dos demais grupos estudados, a variável é dita heterocedástica.

O gráfico tridimensional foi utilizado para identificar amostras atípicas unidimensionais e bidimensionais em cada tratamento e de cada variável. Foi utilizado também o estimador robusto multivariado de mínimo determinante de covariância (MCD), segundo Hubert e Debruyne (2010). O gráfico dos escores dos dois primeiros componentes principais, o biplot, foi utilizado para representar o efeito de iteração entre os dados e as variáveis, além de verificar o efeito do fator nas variáveis. Nos casos CPA's robustos também é possível identificar amostras atípicas multivariadas, pois esse é um dos objetivos dessa análise. A robustez do método, neste estudo, foi determinada pelo algoritmo K-medoids, visto que a tarefa de encontrar o número de grupos que minimize a variação interna dos grupos analisados não é trivial. Usualmente, adota-se um número grande de pequenos grupos com o objetivo de identificar pontos atípicos na amostra, sendo que o algoritmo de agrupamento não garante a mínima variância global nos grupos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção apresenta-se a análise descritiva, os resultados do ajuste do modelo MANOVA e das múltiplas comparações de médias de Tukey, além das análises de diagnósticos e detecção de pontos atípicos univariados. Os resultados da análise descritiva realizada inicialmente para

caracterização da amostra, mostraram que os valores médios seguiram uma normal multivariada, pelo teste de normalidade multivariada Mardia, para um nível de significância do teste de 24%. Segundo o teste paramétrico de homogeneidade de variâncias de Bartlett, para um nível de significância do teste  $> 60\%$ , houve evidências para não rejeitar a hipótese de homocedasticidade das variáveis, com exceção da variável  $f_{v0}$ , que apresentou ser heterocedastica ( $p$ -valor  $< 0.01$ ). Para dados balanceados, isto é, com números de observações para cada nível de tratamento iguais e com observações médias de cada tratamento e de cada variável normalmente distribuídas, as observações médias da variável  $f_{v0}$  foram normalmente distribuídas segundo o teste de normalidade univariado de Shapiro-Wilk, para um nível de significância do teste de 27%. Desta forma, o método paramétrico aplicado a este estudo foi viável e confiável para todas as variáveis em análise, incluindo a variável  $f_{v0}$ .

A análise tridimensional dos dados proporcionou visualizar eventuais problemas na amostra como pontos atípicos unidimensionais e bidimensionais, além das diferenças entre os valores médios, tanto entre os blocos, como também entre os tratamentos estudados. Os gráficos utilizados e os comentários mais relevantes são apresentados nas Figuras de 2 a 12. Na Figura 2, apresenta-se o gráfico tridimensional  $f_{c0}$  versus  $E_{c0}$  versus tratamento.

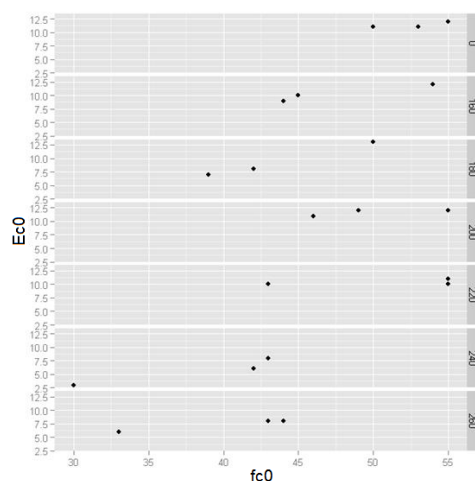


Figura 2 - Gráfico tridimensional:  $f_{c0}$  versus  $E_{c0}$  versus tratamento.

Observou-se, neste caso, que os valores médios da variável  $f_{c0}$  para a madeira *in natura* estão entre (50:55). Os valores médios apresentados pelas madeiras tratadas nas temperaturas 240 °C e 260 °C estão em intervalos inferiores ao da madeira *in natura*. Além disso, a variável  $f_{c0}$  apresentou a maior diferença entre as médias de seus blocos com relação às madeiras tratadas, se comparada às demais variáveis estudadas. Para as amostras das madeiras tratadas na temperatura 220 °C, duas amostras apresentaram médias iguais ao valor máximo do intervalo das madeiras *in natura*. Nas demais temperaturas analisadas os valores médios se mostraram inferiores ao intervalo desejado apresentado pelas madeiras *in natura*. A variável  $E_{c0}$  apresentou valores médios para a madeira *in natura* entre (10: 12.5) e as madeiras tratadas nas temperaturas 240° C e 260° C apresentaram valores médios inferiores a esse intervalo. A variabilidade das médias dos blocos da variável  $E_{c0}$  foi menor, 2.54, se comparada à variabilidade das médias dos blocos da variável  $f_{c0}$ , 7.14, a qual, pode indicar um maior efeito da termorretificação com relação à variável  $f_{c0}$  se comparada ao efeito provocado a variável  $E_{c0}$ . Pode existir ainda, neste caso, a presença de amostras atípicas univariadas na variável  $f_{c0}$ .

Na Figura 3, apresenta-se o gráfico tridimensional MOR versus MOE versus tratamento.

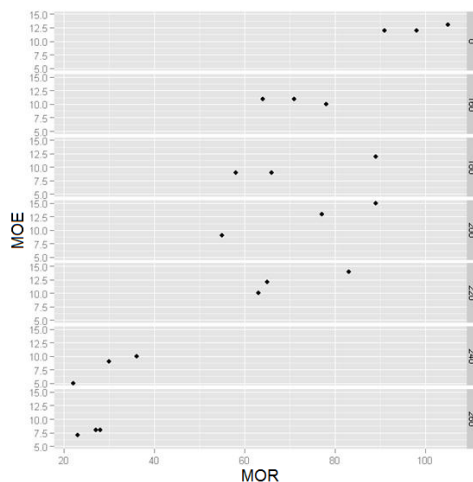


Figura 3 - Gráfico tridimensional: MOR versus MOE versus tratamento

Neste caso, os valores médios da variável MOR para a madeira *in natura* estiveram entre (85:105) e todos os valores médios apresentados pela madeira tratada foram inferiores a esse intervalo. A variável MOE apresentou valores médios da madeira *in natura* entre (11.25: 13.75) e as madeiras tratadas com 240° C e 260° C apresentaram valores médios inferiores a esse intervalo, ou seja, quando se observou o parâmetro MOR o efeito da termorretificação esteve presente em todos os níveis de temperatura. Com relação à rigidez, MOE, o efeito do tratamento esteve presente apenas nos dois últimos níveis de temperatura. A variabilidade das médias dos blocos da variável MOE foi menor, 2.44, se comparada à variabilidade das médias dos blocos da variável MOR, 26.20, a qual pode indicar uma influência maior da termorretificação com relação à variável MOR se comparada ao efeito provocado a variável MOE. Pode existir ainda a presença de pontos atípicos univariados na variável MOR. Na Figura 4, apresenta-se o gráfico tridimensional  $f_{t0}$  versus  $f_{v0}$  versus tratamento.

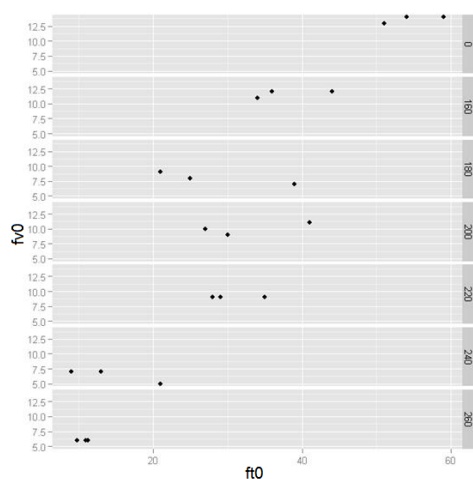


Figura 4 - Gráfico tridimensional:  $f_{t0}$  versus  $f_{v0}$  versus tratamento.

Observou-se, neste caso, que os valores médios das variáveis  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$  tratadas nas temperaturas estudadas foram inferiores aos das madeiras *in natura*, que estiveram entre (50:60) e (12.5: 15.0), respectivamente, para qualquer nível de temperatura estudado. Notou-

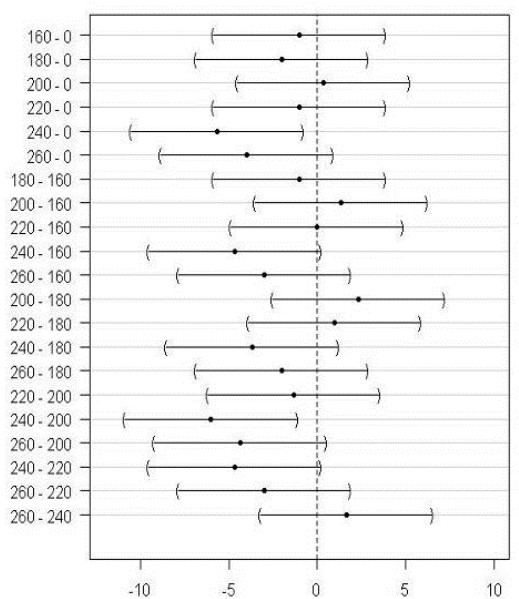


se também que os piores resultados foram obtidos nos casos em que as madeiras foram tratadas nas temperaturas 240° C e 260° C. A variabilidade das médias dos blocos da variável  $f_{v0}$  foi menor, 2.72, se comparada à variabilidade das médias dos blocos da variável  $f_{t0}$ , 13.48, a qual pode indicar um maior efeito da termorreificação com relação à variável  $f_{t0}$ , se comparada ao efeito provocado a variável  $f_{v0}$ . Possivelmente pode existir a presença de pontos atípicos univariados na variável  $f_{t0}$ . A presença de pontos atípicos univariados e o efeito da termorreificação foram verificados no ajuste do modelo MANOVA com os testes de Tukey.

#### 4.1 Modelos ajustados a rigidez da madeira - variáveis $E_{c0}$ e MOE

Na Figuras 5, os resultados dos ajustes dos modelos para as variáveis  $E_{c0}$  e MOE evidenciaram que o tratamento influenciou nos valores médios para os níveis de significância (p-valor) dos testes de 0.008 e 0.03, respectivamente. Para verificar quais níveis do tratamento exerceram significativa influência nos valores médios das variáveis  $E_{c0}$  e MOE foram analisadas as múltiplas comparações de médias de Tukey. Foi observado que o tratamento, quando realizado na temperatura 240° C, apresentou evidências de que a média da variável  $E_{c0}$  se diferiu da média da madeira *in natura*. Para os demais níveis de temperatura, as médias das madeiras tratadas não apresentaram diferenças significativas com a média da madeira *in natura*. Com relação à variável MOE foi identificado que não houve diferenças significativas entre as médias da madeira *in natura* quando comparadas às médias da madeira tratada, isto é, o valor zero esteve presente em todos os intervalos e o nível de significância do teste foi maior que o nível nominal de 5%.

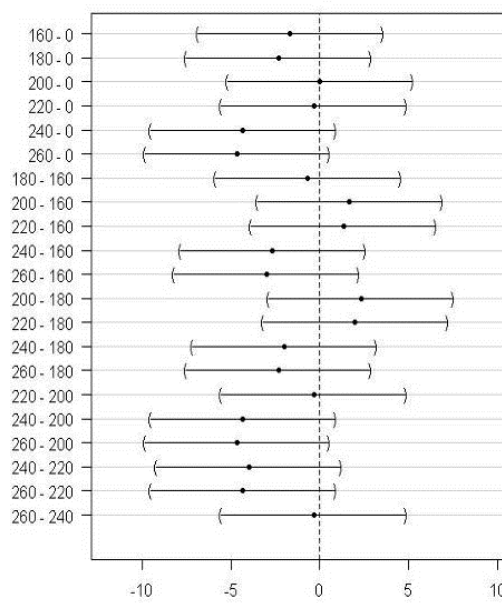
Múltiplas comparações de Tukey entre as médias de  $E_{c0}$



Diferenças das médias para cada nível de tratamento

(a)

Múltiplas comparações de Tukey entre as médias de MOE



Diferenças das médias para cada nível de tratamento

(b)

Figura 5 - Múltiplas comparações de médias de Tukey: (a) Para a variável  $E_{c0}$ ; (b) Para a variável MOE

#### 4.2. Análises de diagnósticos dos ajustes dos modelos - variáveis $E_{c0}$ e MOE

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico dos resíduos do ajuste da variável  $E_{c0}$  com e sem as amostras numeradas por 7 e 16. Na Figura 7 apresenta-se os gráficos de resíduos do ajuste da variável MOE com e sem as amostras numeradas por 12 e 16.

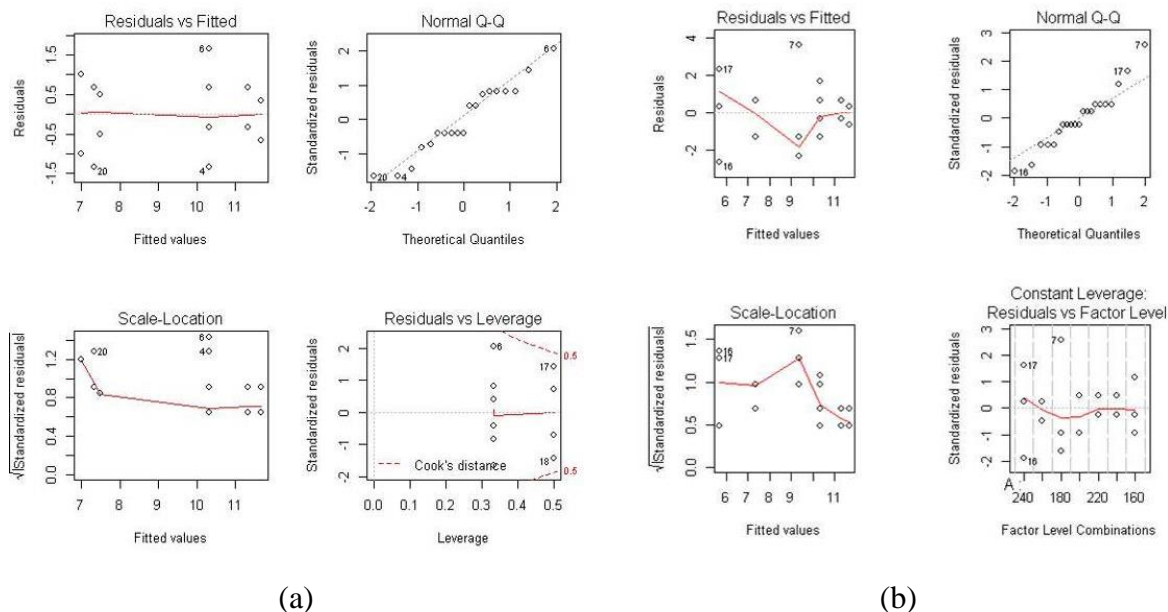


Figura 6 - Gráficos de resíduos do ajuste de  $E_{c0}$  com e sem as amostras (7 e 16), respectivamente.

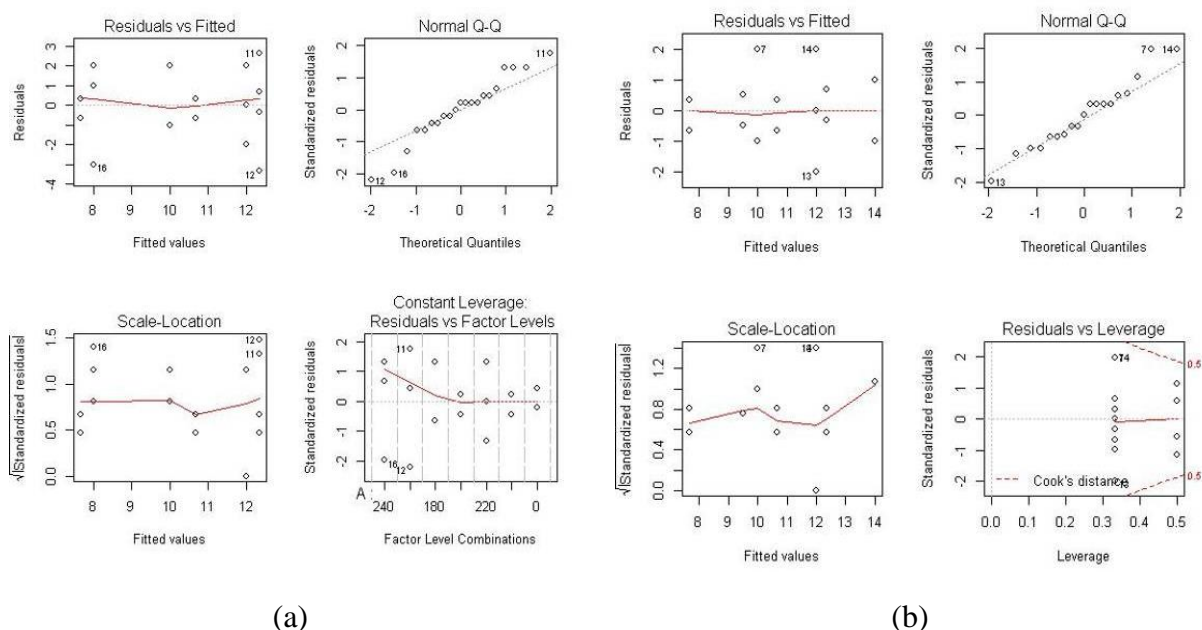


Figura 7 - Gráficos de resíduos do ajuste de MOE com e sem as amostras (12 e 16).

Na Figura 6, os gráficos dos resíduos dos ajustes dos modelos para as variáveis  $E_{c0}$  e MOE se mostraram normalmente distribuídos pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk ( $p$ -valor  $> 0.39$ ) e homocedásticos pelo teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett ( $p$ -valor  $> 0.17$ ). Observando-se os gráficos da esquerda superior 6-a, presume-se que, do total de amostras analisadas, as amostras numeradas por 7 e 16 consistiram em amostras atípicas nas observações da variável  $E_{c0}$ . Individualmente as amostras foram investigadas e identificadas como amostras influentes, pois alteraram as estimativas dos parâmetros do modelo e, conseqüentemente, as inferências. Sem as referidas amostras 7 e 16, obteve-se que, além do nível 240 °C ( $p$ -valor = 0.006), também os níveis 180 °C ( $p$ -valor = 0.015) e 260 °C ( $p$ -valor = 0.005) foram níveis de temperatura que influenciam significativamente os valores médio da



variável  $E_{c0}$ . Notou-se que o modelo melhor se ajustou aos dados sem a presença das amostras 7 e 16 (gráficos a direita superior), de tal forma que o gráfico de resíduos versus valores ajustados foram aleatórios em torno de (-1.5, 1.5). No gráfico quantis normais versus quantis observados (QQ plot) os pontos ficaram mais próximos de uma reta. No gráfico de resíduos versus leverage (gráficos na direita inferior 6-b) os resíduos com relação aos níveis de tratamento também apresentaram melhores resultados após a retirada dos pontos referentes às referidas amostras com valores aleatórios entre o intervalo de (-2, 2).

Por outro lado, na Figura 7 (gráficos a esquerda superior 7-a), presumiu-se que as amostras 12 e 16 foram atípicas nas observações da variável MOE. Individualmente as amostras foram investigadas e identificadas que são amostras influentes. O resultado inicial com todos os pontos mostrou que não houve efeito significativo do tratamento na variável MOE para qualquer temperatura estudada. Com a retirada das amostras 12 e 16, a média para a madeira *in natura* com a média da madeira tratada a 260° C se mostraram significativamente diferentes. Sem as amostras 12 e 16 o modelo apresentou melhor ajuste dos dados (Figura 7-b), devido ao fato de que os gráficos dos resíduos versus valores ajustados, e resíduos versus leverage foram aleatórios em torno de (-2, 2), enquanto que no gráfico quantis normais versus quantis observados (QQ plot) os resíduos estiveram mais próximos a uma reta.

### 4.3. Modelos ajustados a resistência da madeira - variáveis $f_{c0}$ , MOR, $f_{t0}$ e $f_{v0}$

Nos resultados dos ajustes dos modelos as variáveis  $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$  indicaram que existiram fortes evidências de que o tratamento influenciou nos seus valores médios (p-valor < 0.01) com exceção da variável  $f_{c0}$ , que apresentou um resultado inconclusivo, isto é, os níveis de significância nominal e do teste coincidiram a 5%. Na Figura 8 observou-se que para inferir a respeito de qual(is) nível(is) de temperatura influenciam nas variáveis  $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$  foram analisadas as múltiplas comparações de médias de Tukey.

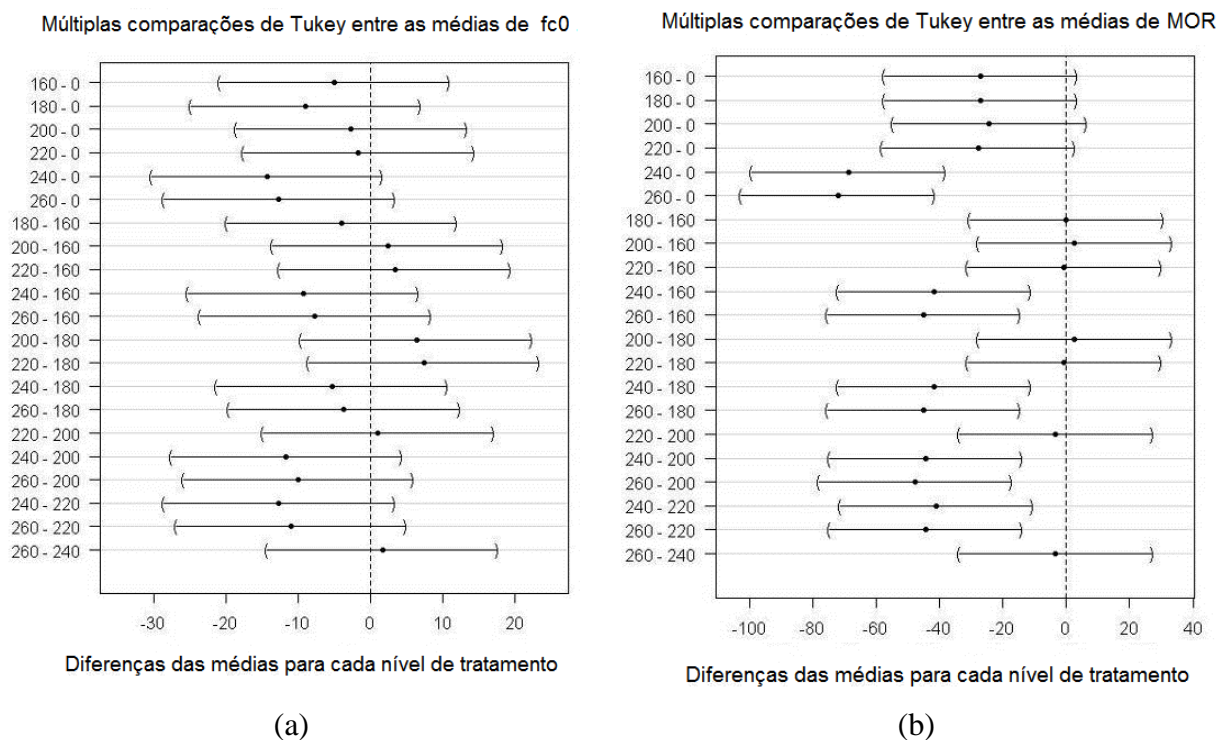


Figura 8 - Múltiplas comparações de médias de Tukey para as variáveis: (a)  $f_{c0}$ ; (b) MOR.

Foram identificadas, neste caso, evidências de que o tratamento não influenciou significativamente os valores médios da variável  $f_{c0}$ . Em outras palavras, o valor zero esteve presente em todos os intervalos e o nível de significância do teste foi maior que o nível nominal de 5%.

Com a relação à variável MOR foram identificadas evidências do efeito do tratamento quando a madeira foi termorretificadas nas temperaturas 240° C e 260° C ( $p$ -valor < 0.01).

Na Figura 9, nas análises das variáveis  $f_{v0}$  e  $f_{t0}$  observou-se diferenças significativas entre as médias das madeiras *in natura* e das madeiras tratadas em temperaturas entre 180° C e 260° C ( $p$ -valor < 0.01), isto é, o valor zero não esteve presente nos intervalos de confiança ao nível de confiança de 95%, quando as madeiras foram tratadas nas temperaturas: 180° C, 200° C, 220° C, 240° C e 260° C.

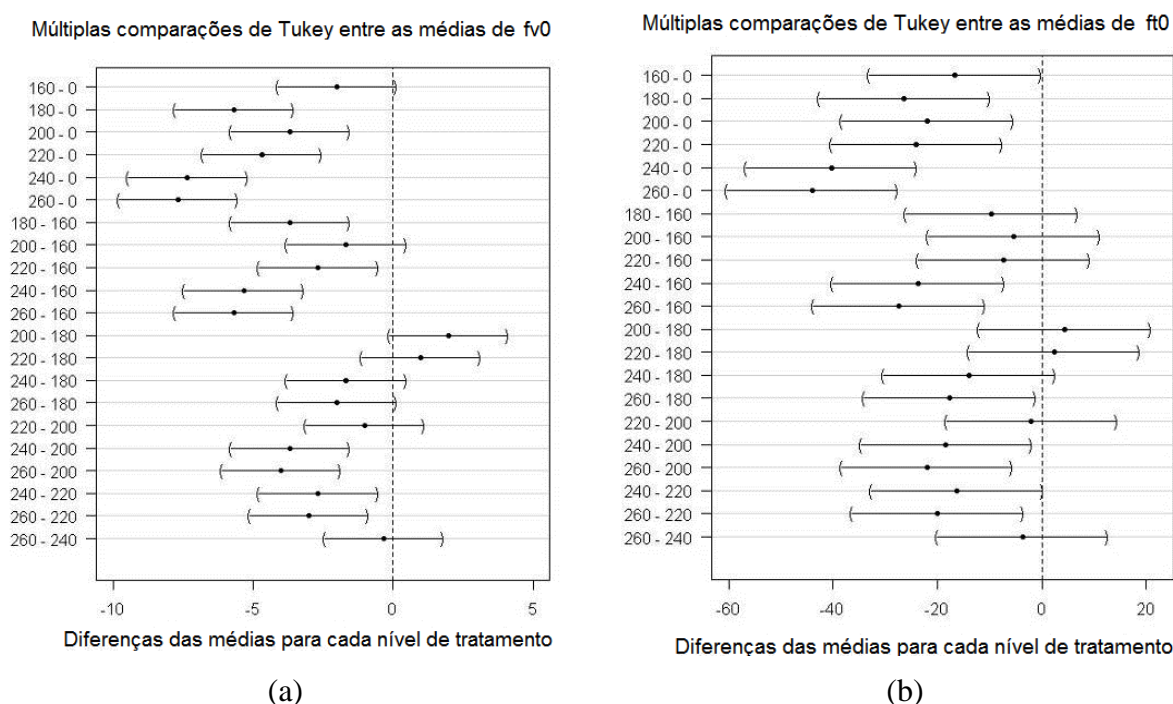


Figura 9 - Múltiplas comparações de médias de Tukey para as variáveis: (a)  $f_{v0}$ ; (b)  $f_{t0}$ .

**4.4. Diagnósticos dos ajustes dos modelos - variáveis  $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$**

Nas Figuras 10 e 11 os resíduos dos ajustes dos modelos para as variáveis  $f_{c0}$ , MOR,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$  se mostraram normalmente distribuídos ( $p$ -valor > 0.09) pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk e homocedásticos ( $p$ -valor > 0.14) pelo teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett com exceção dos resíduos do ajuste da variável  $f_{v0}$  que apresentou heterocedasticidade ( $p$ -valor < 0.01), o que já havia sido constatado inicialmente na análise de descritiva dessa variável.

A heterocedasticidade dessa variável se deu devido aos valores médios dos blocos de dois níveis da temperatura coincidirem, ou seja, a variância dessas amostras foi nula.

Para as demais amostras a variância foi diferente de zero e, desta forma, a variável  $f_{v0}$  apresentou variabilidade estatisticamente diferente para os diferentes grupos estudados.

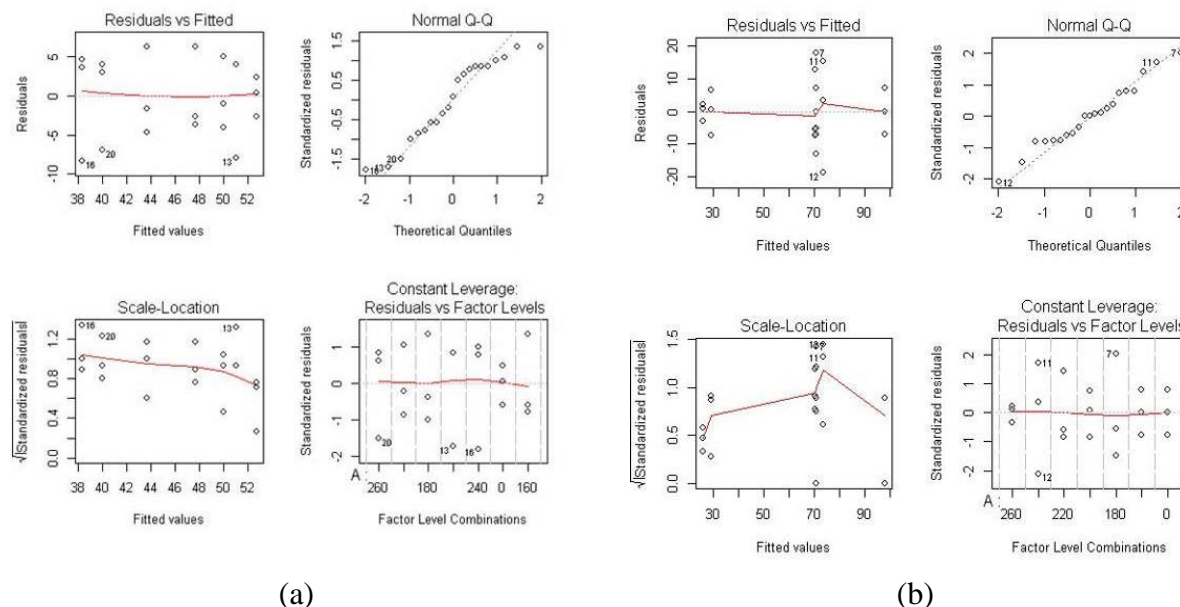


Figura 10 - Gráficos de resíduos do ajuste da variável: (a)  $f_{c0}$ ; (b) MOR.

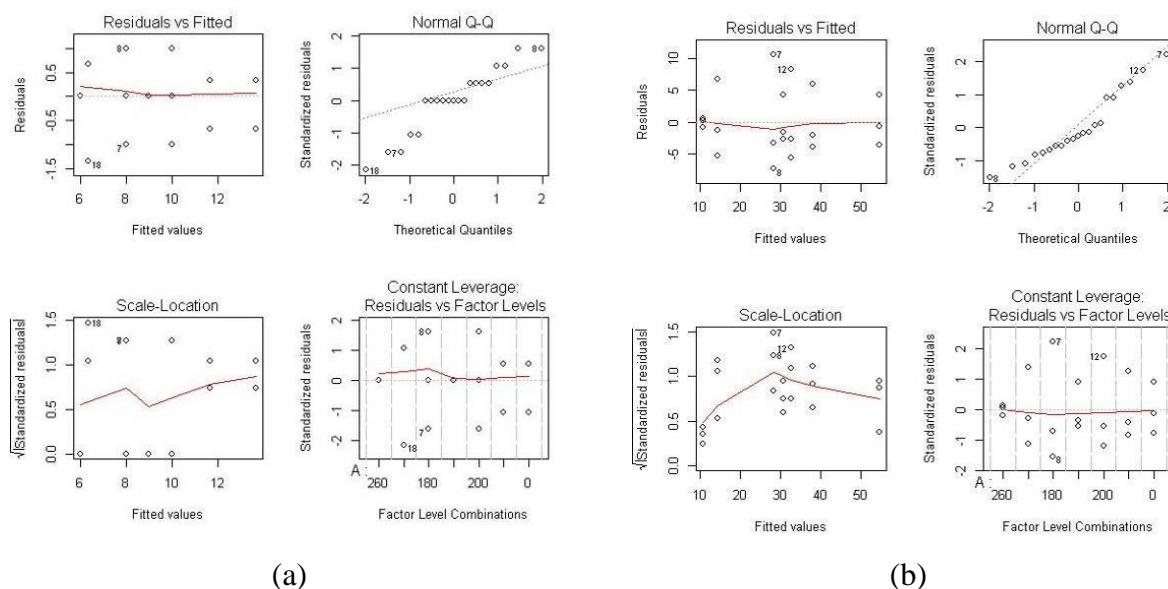


Figura 11 - Gráficos de resíduos do ajuste da variável: (a)  $f_{v0}$ ; (b)  $f_0$ .

Nos ajustes das variáveis referentes à resistência não foram identificadas amostras influentes, ou seja, apesar de existirem amostras distantes da maioria das demais amostras, a análise com ou sem essas amostras não alteraram as conclusões finais.

De uma maneira geral, pode-se afirmar que os modelos se ajustaram satisfatoriamente aos dados, já que os resíduos apresentaram bons comportamentos, ou seja, estiveram distribuídos aleatoriamente no intervalo entre (-2;2).

#### 4.5. Análise de agrupamentos

A análise de agrupamentos robusta proporcionou identificar a formação dos grupos, além do grau de homogeneidade entre os grupos. Para tanto, neste estudo foi adotado um número de

grupos  $k$  igual a três, sendo que a escolha de  $k$  foi adotada analisando-se as formações de dois, três e quatro grupos. Assim, foi identificado que o número de grupos que melhor representou os dados deste estudo, sem erro de classificação, foi três. Nesta análise os componentes principais estiveram representando 92.25% da variabilidade total dos dados.

Na Figura 12, os resultados mostraram que os valores médios das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* tratada nas temperaturas: 160° C, 180° C, 200° C e 220° C apresentaram grande variabilidade ( $si = 0.51$ ) se comparada à variabilidade dos valores médios das madeiras *in natura* ( $si = 0.94$ ).

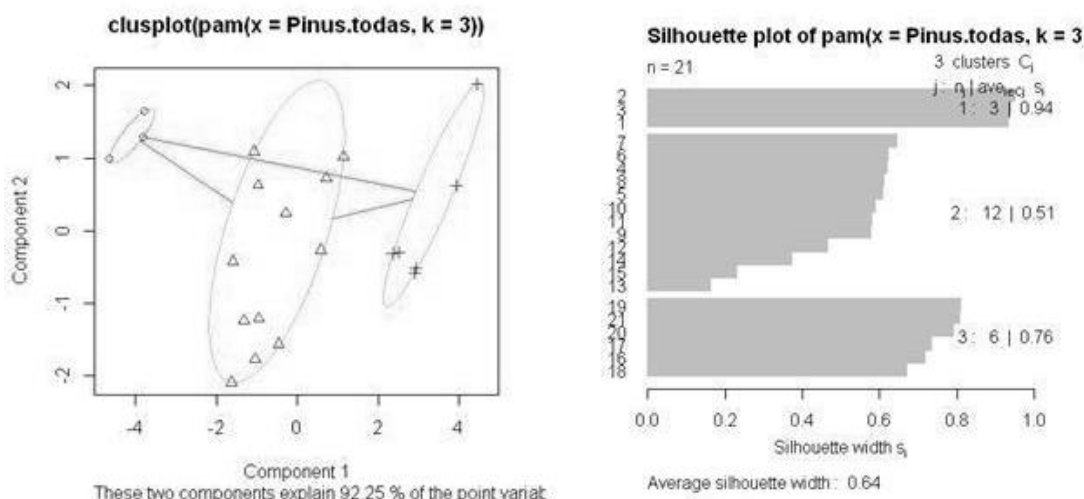


Figura 12 - Análise de agrupamentos para três grupos.

Tanto o grupo formado pelas observações das madeiras *in natura* quanto o grupo das observações das madeiras tratadas nas temperaturas: 240° C e 260° C se mostram com ótima homogeneidade intra grupos com medidas de silhueta iguais a 0.76 e 0.94, respectivamente. No entanto, entre os grupos notou-se uma grande distância, ou seja, uma grande diferença entre os valores médios das propriedades mecânicas das madeiras tratadas nas temperaturas 240° C e 260° C (extra direita) se comparado aos valores das madeiras *in natura* (grupo da extra esquerda). Desta forma, tem-se que os valores médios das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda in natura* (grupo da extra - esquerda) se encontraram mais próximos dos valores médios das madeiras tratada nas temperaturas 160° C, 180° C, 200° C e 220° C (grupo do meio).

#### 4.5. Detecção de amostras atípica multivariadas

A importância da detecção de pontos atípicos se deve ao fato de que as anormalidades nos dados podem traduzir informações úteis e muitas vezes críticas sobre o domínio de aplicação.

Segundo Filzmoser, Marona e Werner (2008), a análise de dados contaminados pode levar a conclusões equivocadas, pois anomalias nos dados podem desviar o comportamento dos dados e/ou alterar as conclusões finais.

Para detectar amostras atípicas nos dados das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* foi aplicada a PCA robusta, na qual a robustez da técnica se remete ao emprego do estimador menos sensível na presença de pontos atípicos nos dados, ou seja, o estimador

de mínimo determinante de covariância (MCD). Neste estudo, os primeiros dois componentes principais estiveram representando 95.1% da variabilidade total dos dados.

Na Figura 13, segundo os resultados das análises de diagnóstico do ajuste dos modelos para a rigidez da madeira ( $E_{c0}$  e MOE), obteve-se que as amostras (7 e 16) e (12 e 16) foram atípicas univariadas com relação às variáveis  $E_{c0}$  e MOE, respectivamente.

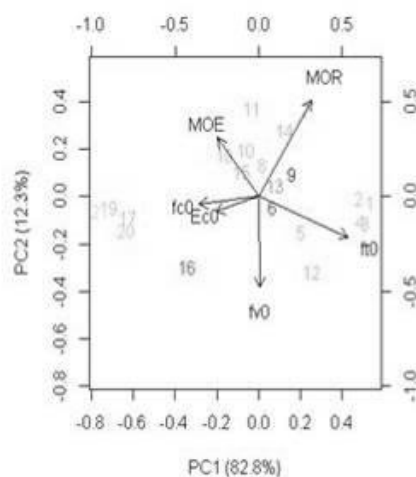


Figura 13 - Biplot dos dois primeiros componentes principais robustos.

Como a amostra 16 foi atípica para ambas as variáveis, então foi também considerado um ponto atípico bivariado. Pela técnica de CPA robusta foi identificado que a amostra 16 foi também um ponto atípico multivariado, ou seja, a amostra 16 apresentou valores distantes da maioria das demais observações com relação à todas as variáveis estudadas referentes às propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda*. No entanto, vale destacar que a amostra 16 não foi atípica univariada nas variáveis referentes à resistência da madeira, mas apenas nas variáveis referentes à rigidez. Vale mencionar também que cabe ao pesquisador identificar se as amostras atípicas são ou não representativas e se estas devem permanecer ou não na análise. De uma maneira geral, foi identificado que o tratamento térmico não apresentou grandes influências com relação à rigidez ( $E_{c0}$  e MOE) da madeira *Pinus taeda*, mas com relação à resistência, principalmente nas variáveis  $f_{i0}$  e  $f_{v0}$ , as madeiras tratadas apresentaram valores significativamente inferiores àqueles determinados pela norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190 (1997). Este fato foi observado em praticamente todos os níveis de temperatura analisados neste trabalho, com uma menor influência apresentada no primeiro nível de temperatura, 160° C.

#### 4. CONCLUSÕES

As diferentes análises estatísticas realizadas neste trabalho indicaram para uma mesma conclusão, ou seja, as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* termoretificada nas temperaturas 240° C e 260° C apresentam valores inferiores aqueles determinados em temperatura ambiente com base na recomendações de ensaios da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190 (1990);

As variáveis  $f_{v0}$  e  $f_{i0}$  foram as que apresentaram as maiores diferenças considerando os níveis de temperatura entre 180° C a 260° C;



Não existiram diferenças estatísticas significativas para as variáveis  $f_{c0}$ ,  $E_{c0}$  e MOE da madeira termorretificada com relação à madeira *in natura*, e no caso da variável MOR até a temperatura 220 °C;

Os métodos paramétricos utilizados se mostraram precisos e eficientes, indicando os problemas nos dados, sendo que o modelo MANOVA apresentou uma boa capacidade de identificar o efeito do tratamento nas seis variáveis independentes referentes às propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda*;

A pressuposição do modelo MANOVA de normalidade multivariada foi identificada nas observações analisadas.

## REFERÊNCIAS

**ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *Projeto de estruturas de madeira (NBR 7190)*, 1997.

**BRITO, J. O.** *Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de Eucalyptus maculata e Eucalyptus citriodora sobre os resíduos sólidos da pirólise. Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.*

**FILZMOSER, P., MARONNA, R., WERNER, M.** *Outlier identification in high dimensions. Computational Statistics & Data Analysis. v. 52, n. 3, p. 1649-1711, Jan, 2008.*

**HUBERT M.; DEBRUYNE M.** *Minimum covariance determinant. Wiley Interdisciplinary Review, v. 2, n.1, p. 36-43. Dec., 2010.*

**MODES, K. S.** *Efeitos da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras Pinus taeda e Eucaliptos grandis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.*

**MOLINA, J. C.; SILVA, K. C. R.** *Efeito da termorretificação nas propriedades de resistência e rigidez da madeira Eucalipto citriodora. Madeira: arquitetura e Engenharia . v. 13, n. 33, p. 53-68, 2012.*

**PONCSAK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A.** *Efect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (Betula papyrifera). Wood Science Technology, v 40, n. 8, p. 647-663. May, 2006.*

**R version 13.1.0**, GNU General Public License, 1993.

**ROUSSEEUW, P. J., HUBERT, M.** *Robust statistics for outlier detection. Wiley Interdisciplinary Review. v.1, n.1, p. 71-73. Jan., 2011.*

**ROUSSEEUW, P. J.** *Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 20, n. 1, p. 53-65, Nov., 1987.*

**SILVA, M. R.** *Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e Pinus Taeda. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.*