



**JEIMY BLANCO FLÓREZ**

**COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DA MADEIRA  
JOVEM DE *Tectona grandis* L.f COM DIFERENTES  
ACABAMENTOS PARA USO EM AMBIENTE  
EXTERNO**

LAVRAS-MG-BRASIL  
2016

**JEIMY BLANCO FLÓREZ**

**COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DA MADEIRA JOVEM DE *Tectona grandis* L.f COM DIFERENTES ACABAMENTOS PARA USO EM AMBIENTE EXTERNO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutora.

Orientador

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

LAVRAS-MG-BRASIL  
2016

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Blanco-Flórez, Jeimy.

Comportamento em serviço da madeira jovem de *Tectona grandis* L.f com diferentes acabamentos para uso em ambiente externo / Jeimy Blanco-Flórez. – Lavras : UFLA, 2016.

109 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Simulação de pisos em serviço. 2. Envelhecimento acelerado. 3. Colorimetria. 4. Rugosidade. 5. Espectroscopia no Infravermelho Próximo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**JEIMY BLANCO FLÓREZ**

**COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DA MADEIRA JOVEM DE *Tectona grandis* L.f COM DIFERENTES ACABAMENTOS PARA USO EM  
AMBIENTE EXTERNO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 28 de janeiro de 2016.

Dr. Franciane Andrade de Pádua	UFSCAR
Dr. Juliano Elvis de Oliveira	UFLA
Dr. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein	UFLA

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
Orientador

LAVRAS-MG-BRASIL  
2016

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade de realização do doutorado e concessão da bolsa de estudos ao Programa Estudante Convênio de Pós-graduação PEC-PG Brasil-Colômbia.

Ao professor José Reinaldo Moreira da Silva, pelo apoio, pela disposição e pela orientação.

Aos professores Paulo Trugilho e José Tarcísio Lima pela amizade, compreensão e ensinamentos.

Aos professores Franciane Andrade de Pádua e Juliano Elvis de Oliveira pelas contribuições para o aprimoramento do trabalho.

Aos professores Gustavo Tonoli, Lourival Mendes, e Rafael Mendes pela disponibilidade e apoio no Laboratório de Nanotecnologia e Unidade Experimental de Painéis de Madeira UEPAM.

Aos técnicos do Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, Carlos, Ernani, Cristiane, Francisca, Claret e Raisa pelo apoio e disposição durante esses anos.

À professora Alcinéia Ramos e Ana Alice Oliveira pela colaboração nas análises no Departamento de Ciências dos Alimentos.

Ao professor Paulo Hein pela colaboração nas análises NIR e no aprimoramento da pesquisa.

Aos colegas Pedro e Samuel pela disposição e ajuda nos ensaios de simulação de pisos.

À minha mãe, que com suas palavras deu-me força nos momentos de saudade e teve paciência durante a minha ausência na procura de novos conhecimentos.

A meu pai e os meus irmãos pela confiança e apoio nas minhas decisões.

Aos meus tios e primos pelo carinho e admiração.

Ao meu companheiro Ney Robson, que sem dúvida foi parte fundamental para a culminação deste trabalho. Obrigada por me estimular a crescer intelectualmente, profissionalmente e emocionalmente.

À minha grande amiga Sylvia sempre por perto me apoiando, orando e incentivando.

Ao professor Alfredo Napoli e a amiga e professora Julieth Parra pela amizade, colaboração e bons momentos compartilhados.

Às amigas DeJane e Ana Beatriz pelo carinho e apoio e pelos bons momentos durante o tempo de convivência.

Aos colegas e amigos de Lavras, em especial a Alessandra, Andrea, Ana Clara, Bárbara, Bruno, Carol, Danilo, Elder, Fábio, Iara, Isabel, Karina, Luisi, Madson, Maira, Maria Fernanda, Renata, Tattiane, Thiago Monteiro, Thiaguinho e Wilson, obrigada pelo carinho e apoio.

Aos colegas, também estrangeiros, com quem compartilhamos bons momentos e aflições em comum fora de casa.

Aos meus amigos Alexander, Aura, Bibiana, Debby, Mireya, Mónica, Roxana e Yolima que mesmo longe sempre torceram e acreditaram em mim.

Às pessoas que de alguma forma contribuíram para a finalização desta etapa tão importante. Muchas Gracias!

## RESUMO

Visando a utilização em ambientes externos da madeira jovem de teca *Tectona grandis* L.f, oriunda de reflorestamento, objetivou-se com este estudo entender e avaliar o seu comportamento em serviço em função do tempo e tipo de acabamento aplicado. O trabalho dividiu-se em duas partes. A primeira, ensaios de simulação de pisos em serviço na madeira sem acabamento. A segunda, ensaios de envelhecimento acelerado em ciclos de 24, 48, 84, 168 e 256 horas, na madeira sem acabamento, com impregnante *stain* e com cera incolor. Foram avaliadas as variações nas coordenadas colorimétricas, rugosidade da superfície e espectrometria na região do infravermelho próximo (NIR). As análises foram auxiliadas por fotografias e Microscopia Eletrônica de Varredura. A madeira de teca apresentou baixa resistência em ensaios de simulação de pisos para esforços máximos, sendo apta para tráfego leve. O acabamento com *stain* proporcionou maior proteção à madeira, menor rugosidade e que se manteve constante ao longo dos ciclos de envelhecimento. A variação total de cor ( $\Delta E$ ) para a madeira sem acabamento e para a madeira com cera foi classificada como apreciável, entretanto para a madeira com *stain* a variação foi perceptível. As regressões baseadas em espectros no NIR apresentaram correlações moderadas que permitiram prever as propriedades colorimétricas da madeira. A madeira jovem de teca sem produto de acabamento apresentou-se estável em relação à variação da cor e rugosidade em função do tempo, sendo que, com aplicação do *stain*, apresentou melhor desempenho, com menores variações para todos os parâmetros avaliados, assim considera-se apta para o uso em ambientes externos.

**Palavras-chave:** Simulação de pisos em serviço, envelhecimento acelerado colorimetria, rugosidade, Espectroscopia no Infravermelho Próximo.

## ABSTRACT

In order to use outdoors young wood of teak *Tectona grandis* L.f teak coming from reforestation, the aimed this study was to understand and evaluate their behavior in service due to the time and kind of coating applied. The study was divided into two parts, the first, simulation testing in service on uncoated wood. The second, accelerated aging tests in cycles 24, 48, 84, 168 and 256 hours in the uncoated wood, with stain coating and wax colorless. The color change was evaluated in the coordinate system CIElab, surface roughness and near infrared spectroscopy (NIR). Analyses were aided by photographs and Scanning Electron Microscopy. The teak wood had low resistance in service floors for maximum strength, being able to light traffic. The finish with stain provided greater protection to the wood, lower roughness and has remained constant over the aging cycles. The finish with stain provided greater protection to the wood, lower roughness and has remained constant over the aging cycles. The total color change ( $\Delta E$ ) for the uncoated wood and wood with wax was classified as perceived; however, for wood stain the change was barely perceived. Regressions based on NIR spectra showed moderate correlations which allowed predicting the colorimetric properties of wood. The young teak wood uncoated was stable in relation to the variation of color and roughness as a function of time, and with application of stain performed better, with minor variations for all parameters, so it is considered suitable for use outdoors.

Keywords: simulation testing in service, accelerated aging test, surface roughness, CIE system, NIR.

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
3	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
3.1	A espécie <i>Tectona grandis</i> L.f.....	15
3.2	Plantações de teca de rápido crescimento.....	16
3.3	Ensaio de simulação em serviço para avaliar o desempenho de pisos de madeira.....	20
3.4	Fenômeno de fotodegradação e mudanças ocasionadas na madeira.....	23
3.4.1	Variação da cor da madeira durante ensaios de envelhecimento acelerado.....	25
3.4.2	Variação na textura e rugosidade da superfície de madeira.....	27
3.4.3	Acabamentos para madeira e sua influência no desempenho para uso externo.....	30
3.5	Estudos das propriedades da madeira por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	33
4	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	36
4.1	Material.....	36
4.2	Ensaio de simulação de pisos em serviço.....	39
4.2.1	Ensaio de carga rolante.....	39
4.2.2	Ensaio de endentação de cargas aplicadas em pequenas áreas....	41
4.2.3	Ensaio da esfera de aço cadente.....	42
4.2.4	Ensaio de abrasividade.....	44
4.2.5	Determinação do coeficiente de atrito.....	45
4.3	Ensaio de envelhecimento acelerado.....	47
4.3.1	Análises colorimétricas.....	49
4.3.2	Rugosidade da superfície.....	50
4.3.3	Análises no Infravermelho próximo NIR.....	51
4.3.4	Análises da superfície da madeira com fotografias emicroscopia eletrônica de varredura.....	53
4.4	Análises estatísticas.....	53
4.4.1	Estatística multivariada.....	54
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	57
5.1	Ensaio de simulação de pisos em serviço.....	57
5.2	Ensaio de envelhecimento acelerado.....	64
5.2.1	Variação das coordenadas colorimétricas.....	64
5.2.2	Variação total de cor na madeira ( $\Delta E$ ).....	73
5.2.3	Variação na rugosidade da madeira e desgaste da superfície.....	75
5.2.4	Espectroscopia do infravermelho próximo (NIR).....	81
5.2.5	Análise de componentes principais - PCA.....	84
5.2.6	Análises de regressão PLS para as coordenadas cromáticas.....	85
5.2.7	Análises de regressão PLS para os parâmetros de rugosidade.....	89

5.2.8	Análise morfológica e estrutural.....	91
6	CONCLUSÕES.....	95
	REFERÊNCIAS.....	96

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da madeira ao ar livre ocasiona mudanças na aparência do material. Percebe-se perda de brilho e da cor, desgaste da superfície e diminuição do desempenho mecânico. Estes aspectos resultam em depreciação estética e diminuição da sua vida útil. Desta forma, são de interesse as pesquisas relacionadas à proteção da madeira exposta à intempérie.

Testes que simulam o desempenho em serviço são utilizados na prática como forma de aproximar a exposição natural, acelerando o tempo de ensaio. Assim, torna-se possível aferir os efeitos do tempo no desgaste do material.

Apesar do surgimento de materiais de origem sintética para usos em ambientes externos, a madeira é material único do ponto de vista técnico e estético, sendo que este é fundamental no uso em móveis, pisos e revestimentos. Além disto, a madeira proporciona benefícios de isolamento térmico e de resistência mecânica e facilidade de manutenção, que com os cuidados adequados resultam em longa duração.

Contudo, a madeira que é composta majoritariamente por celulose é suscetível à degradação pelo efeito combinado da radiação solar e outros agentes ambientais como água, calor, poluição e certos microrganismos. Este efeito é devido às complexas alterações físico-químicas que degradam os polímeros que constituem as camadas superficiais da madeira.

Também se observa a dificuldade de avaliar o desempenho mecânico de pisos de madeira durante a sua vida em uso. Nesta utilização, a madeira está sujeita às injúrias mecânicas, a danos por quedas e/ou ao arraste de objetos e aos desgastes por elementos abrasivos e, ou por tráfego de pessoas. Todas estas interferências afetam visivelmente o piso.

Para aumentar a resistência da madeira às mudanças decorrentes da ação do tempo e do meio de exposição se faz necessária a aplicação de produtos de

acabamento. Estes produtos que podem ser químicos ou naturais contribuem com o aumento da vida útil. Eles devem oferecer proteção especialmente contra os efeitos da umidade e radiação ultravioleta. Além disto, deve-se observar a interação do produto com a madeira.

A qualidade da madeira para utilizações em ambiente externo possui papel fundamental no desempenho das mudanças que este material estará sujeito. Alguns dos fatores que devem ser considerados são a durabilidade natural, a estabilidade dimensional e a beleza estética. Para este fim, a madeira mais utilizada é a *Tectona grandis* L.f (teca). Ela é a mais valorizada para a confecção de embarcações de recreio, de móveis, de assoalhos, de decks e de pisos. Esta valorização se dá pelas propriedades físicas, mecânicas, estéticas e a alta durabilidade, características atribuídas ao cerne de árvores adultas de 60 a 80 anos de idade (BHAT, 1998; KEOGH; MORALES, 2013; TEWARI, 1999; WILLIAM; MILLER; GANGSTAND, 2001).

No entanto, no Brasil e outros países tropicais as plantações de teca são aproveitadas em ciclos de 15 a 25 anos. A madeira de plantações de rápido crescimento contém maior proporção de madeira juvenil, que diminuem a sua qualidade. Contudo, alguns estudos revelam comportamentos similares entre a madeira adulta e juvenil em relação às propriedades físicas e mecânicas (BHAT; PRIYA; RUGMINI, 2001; BLANCO-FLÓREZ et al., 2014). Estes estudos não trazem informações da resposta em serviço ou de mudanças na cor e na superfície dessa madeira jovem.

O uso da espectroscopia do infravermelho próximo (NIR) se apresenta como potencial para avaliar as variações no material em decorrência do efeito do tempo, uma vez que as características de cor na madeira estão relacionadas à natureza da sua composição química, portanto, a técnica do NIR é viável para estimar as suas propriedades colorimétricas.

Nesse sentido, deve-se conhecer a resposta da madeira jovem de teca em função do uso com o tempo e assim subsidiar a adequação deste material para uma utilização específica, no caso o uso em ambientes externos.

## **2 OBJETIVOS**

-Determinar o comportamento em serviço de pisos de confeccionados a partir da madeira jovem de teca e indicar qual o tipo de tráfego que os mesmos devem ser empregados.

-Avaliar o efeito do tipo de acabamento e do tempo de envelhecimento da madeira nas propriedades colorimétricas e de rugosidade da superfície.

-Determinar modelos de variação total da cor da madeira em função do envelhecimento acelerado.

-Monitorar por meio da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) as variações químicas, decorrentes do processo de envelhecimento.

-Aplicar a técnica NIR para estimativa das propriedades colorimétricas e da rugosidade na madeira.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 A espécie *Tectona grandis* L.f

Entre as madeiras mais utilizadas para aplicações em ambientes externos, como na confecção de embarcações de recreio, móveis, assoalhos, decks e pisos, a *Tectona grandis* (teca), é a mais valorizada devido as suas propriedades físicas, mecânicas, a sua estética e alta durabilidade natural (BHAT, 1998; KEOGH; MORALES, 2013; TEWARI, 1999; WILLIAM; MILLER; GANGSTAND, 2001), atribuída principalmente à alta quantidade de extrativos presentes no cerne de árvores adultas (HAUPT et al., 2003; KOKUTSE et al., 2006, 2010).

Originária do Sul da Ásia, a teca é a espécie de folhosa tropical mais plantada no mundo. Cultivada há 150 anos em mais de 50 países dentro e fora da área de distribuição natural (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2015). A distribuição natural da teca compreende a região entre as latitudes 10°N a 23°N no sudeste da Ásia. Porém, plantações bem sucedidas estendem-se hoje desde os 28°N até os 18°S, compreendendo o sudeste de Ásia, Austrália, África e América latina (WEAVER, 1993).

A teca é uma espécie de alta adaptabilidade a diferentes climas. Esta espécie cresce em áreas tropicais de clima de monção com precipitações entre 1300 e 2500 mm.ano<sup>-1</sup> e temperaturas de 2° e 48°C. No entanto, desenvolve-se melhor na temperatura mínima, que varia de 13°C a 17°C e máxima de 39°C a 43°C e temporadas secas de 3 a 5 meses (PANDEY; BROWN, 2000; WEAVER, 1993).

Recentemente, tem havido interesse em pesquisas com teca por causa do incremento médio de 10 a 15 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, por razões econômicas, rotações

relativamente curtas de 15 a 25 anos estão sendo propostas comparativamente a rotação tradicional de 120 a 150 anos (LADRACH, 2009; MOYA; BOND; QUESADA, 2014; SCHMINCKE, 2000).

### 3.2 Plantações de teca de rápido crescimento

A área plantada de teca no mundo está estimada em 3 milhões de hectares (KEOGH; MORALES, 2013). Enquanto que a produção mundial total anual de madeira de teca comercial é estimada em 3 milhões de metros cúbico (Tabela 1). O volume de 3,6 milhões de metros cúbicos não comerciais corresponde à madeira de teca de pequenos diâmetros, que se desenvolve em sítios com potencial de crescimento variável e condições de manejo limitado, produto de desbastes, madeira jovem e com problemas de manejo entre outros (KEOGH; MORALES, 2013; ORGANIZACION INTERNACIONA DE MADERAS TROPICALES - OIMT, 2014).

Tabela 1 Produção atual de teca no mercado internacional

Fonte	Área (10 <sup>6</sup> ha)	Produção total (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Não comercial (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Comercial (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Florestas nativas	16,5	0,5	--	0,5
Plantações de grande potencial de crescimento	0,2	2	1,5	0,5
Plantações com potencial de crescimento variável	2,8	5,6	3,6	2
<b>Total</b>	<b>19,5</b>	<b>8,1</b>	<b>5,1</b>	<b>3</b>

Fonte: Keogh e Morales (2013).

De outro lado, os 3 milhões de metros cúbicos de madeira comercial de teca correspondem a uma pequena porcentagem da demanda anual de madeiras

duras de qualidade, cuja origem corresponde a fontes de manejo não sustentáveis. Nesse cenário espera-se que a demanda por teca continue a aumentar. Sendo assim as plantações de teca se mostram como uma ótima opção de investimento e fornecimento de madeira de fontes sustentáveis (KEOGH; MORALES, 2013).

No Brasil, a teca foi introduzida na região de Cáceres, no Mato Grosso, na década de 1970 e hoje cobre uma área plantada de aproximadamente 67 mil hectares em vários estados do país principalmente, Mato Grosso, Pará e Rondônia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

O fuste de árvores jovens de teca varia de 12 a 30 cm de diâmetro, sendo denominada madeira de árvores de crescimento rápido em comparação com o ciclo tradicional (MOYA; BOND; QUESADA, 2014). Estas toras, provenientes de teca de plantações de rápido crescimento, têm grandes quantidades de madeira juvenil e possuem muitas aplicações. Apesar disso, esta madeira não é muito desejável, apresenta cor castanho claro e tem baixa resistência ao ataque de fungos e insetos e apresenta menor valor no mercado (MOYA; PEREZ, 2007; RICHTER; LEITOFF; SONNTAG, 2003; THULASIDAS; BHAT; OKUYAMA, 2006).

A madeira juvenil corresponde à região central da árvore. De forma cilíndrica, com diâmetro aproximadamente uniforme, estende-se desde a base até o topo da árvore (ZOBEL; BUIJTENEN, 1989). É o xilema secundário formado durante a fase jovem do cambio vascular da árvore (início da vida da árvore). Esse período pode variar de acordo com a espécie e as condições ambientais (BENDTSEN; 1978; PANSHIN; ZEEUW, 1970; RAMSAY; BRIGGS, 1986).

A madeira juvenil diferencia-se da madeira adulta por apresentar menor densidade, elementos celulares mais curtos, maior ângulo microfibrilar, maior

proporção de lenho de reação, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemiceluloses e menor resistência em relação à madeira adulta (BENDTSEN, 1978; SENFT; BENDTSEN; GALLIGAN, 1985).

Em estudo com madeira juvenil de teca desenvolvido em Ghana, foi demonstrado a diminuição do ângulo microfibrilar dos 5 para os 20 anos. Mas, quase todos os parâmetros foram muito variáveis para definir o limite entre a madeira juvenil e madeira adulta (RICHTER; LEITOFF; SONNTAG, 2003).

Outro estudo realizado por Bhat (2001) demonstrou a similaridade entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de teca juvenil e adulta. Na Tabela 2 são apresentados os valores de densidade básica para madeira de teca de diferentes idades, em diversos estudos ao redor do mundo. Em madeiras de 8 a 20 anos, como demonstrado na tabela, a densidade variou de 0,48 g.cm<sup>-3</sup> a 0,550 g.cm<sup>-3</sup>.

Tabela 2 Valores médios para densidade básica de *Tectona grandis* L.f de diferentes procedências e idades.

Local	Densidade básica (g.cm <sup>-3</sup> )	Idade (anos)	Fonte
Bolívia	0,500	8	Rivero e Moya (2006)
Brasil	0,490	10	Arruda (2013)
Costa Rica	0,540	10	Moya e Arce (2003)
Colômbia	0,550	13	Betancur, Herrera e Mejía (2000)
Brasil	0,540	13	Blanco-Flórez et al. (2014)
Nigeria	0,480	15	Izekor, Fuwape e Oluyege (2010)
Venezuela	0,550	20	Valero, Reyes e Garay (2005)
Timor Oriental	0,600	50 a 80	Miranda, Souza e Pereira (2011)
Indonésia, Tailândia, Myanmar, Togo	0,620 a 0,820	--	Baillères e Durand (2000)

Em estudo recente sobre propriedades de resistência e rigidez de madeira jovem de teca, determinou-se valor próximo do Modulo de elasticidade

na flexão (MOE) para a madeira de 13 anos, comparado com madeira adulta de 65 a 70 anos (Tabela 3).

Tabela 3 Valores médios para as propriedades mecânicas de *Tectona grandis* L.f de diferentes procedências e idades.

Local	Idade Anos	MOE MPa	RMax Mpa	Dureza Kg	Fonte
Brasil	13	13,046	47	451	Blanco-Flórez et al. (2014)
Costa Rica	17	9,767	33	593	Castro (2000)
Panamá	34	14,209	49	575	Posch et al. (2004)
Kerala-Índia	21 a 65	8,273 a 13,379	43 a 52	---	Bhat e Priya (2004)
Timor leste	50 a 70	14,109	49	---	Miranda, Souza e Pereira (2011)

MOE=Módulo de elasticidade na flexão; RMax=Resistência máxima na compressão.

A madeira de teca caracteriza-se pela transição da cor distinta entre cerne e alborno. O primeiro de cor marrom dourado ganha diferentes tonalidades em função do sítio e das condições genéticas (KOKUTSE et al., 2010; LADRACH, 2009; MOYA; BERROCAL, 2010).

A coloração marrom-amarela, acompanhada de listras marrom escuro, é característica da formação do cerne na madeira de plantação. Esta coloração se deve a migração de componentes químicos das células de parênquima do raio para as fibras e vasos (LUKMANDARU; TAKAHASHI, 2009; NOBUCHI; JANMAHASATIEN; SAKAI, 1996). Acredita-se que tal condição deve-se à influência de solos de origem calcário, argilitos e com alta basicidade (KOKUTSE et al., 2010; MOYA; CALVO-ALVARADO, 2012). Já a madeira com coloração dourada tem influência de solos de origem vulcânica e ligeiramente ácidos, como na Figura 1.

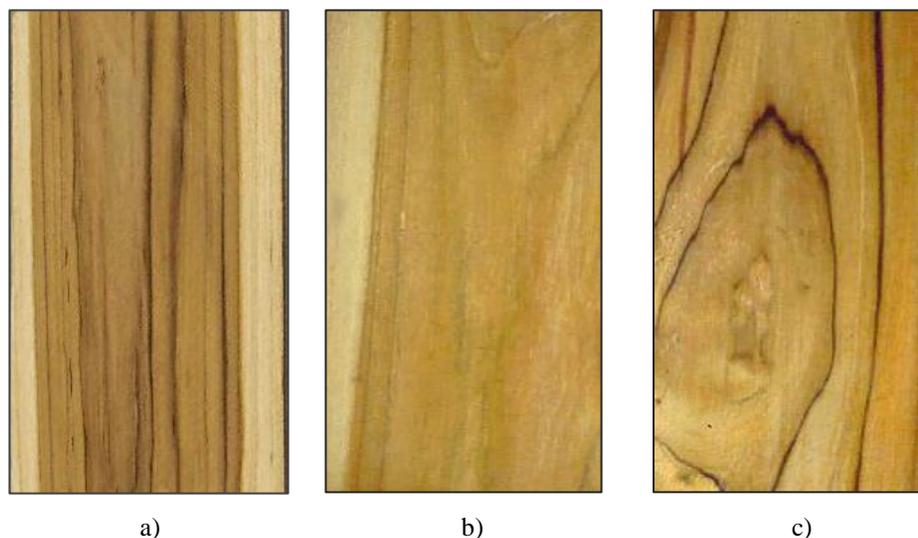


Figura 1 Diferentes padrões de desenho e cor da madeira de teca, em que: a) madeira de teca listrada do Brasil- MG b) madeira de teca dourada da Colômbia, c) madeira de teca listrada, também, da Colômbia. Fonte: Foto a) Autora, fotos b e c (LADRACH, 2009).

### **3.3 Ensaio de simulação em serviço para avaliar o desempenho de pisos de madeira**

Pisos de madeira têm sido tradicionalmente, preferidos pelo mercado. A razão se dá pelo fato deles satisfazer aos critérios de resistência ao desgaste, à estabilidade, à beleza e à renovabilidade. O desempenho real é observado a partir do uso com o tempo que, para fins de comercialização, dificilmente poderá esperar vários anos para obter os resultados.

Apesar do surgimento de materiais compósitos e engenheirados, um recente estudo de pesquisa de mercado sobre este setor nos Estados Unidos, revelou que a madeira maciça ainda é a mais demandada para pisos (FREDONIA GROUP, 2015).

Ensaio de simulação de pisos em serviço constituem-se em importante ferramenta para avaliar o seu comportamento. Com isso, é fornecido um

conjunto de critérios de desempenho e valores de referência que, podem ser estabelecidos para fins de especificação (UNITED STATES FOREST LABORATORY, 1971).

As normas, avaliadas e aprovadas pela AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) e descritas no procedimento D2394-05 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM, 2011), tem servido de base, ao redor do mundo, para avaliar o desempenho de pisos de madeira de espécies conhecidas e potenciais.

Os ensaios consistem em medir a resistência às cargas concentradas, a endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas, a resistência a carga rolante e o impacto de esfera de aço. Métodos também são descritos para determinar a abrasividade da superfície e o coeficiente de atrito, assim como o teste de umedecimento da superfície. Destes ensaios é possível encontrar resultados disponíveis na literatura.

Padilha, Lima e Silva (2006), com o intuito de avaliar a qualidade de clones de *Eucalyptus urophylla*, com oito anos de idade para a utilização em pisos, realizaram ensaios de carga rolante, de atrito, de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas e de impacto por esfera de aço segundo o procedimento D2394-83 da norma ASTM (1994). Os resultados mostraram diferença significativa entre os clones e a posição radial de amostragem, exceto para o ensaio de impacto por esfera de aço, que não apresentou diferenças entre os clones. Assim, entre os sete clones e posições de amostragem na tora, pôde-se identificar madeira potencialmente apta para aplicação em pisos.

Santos, Lima e Silva (2010) avaliaram a produção de pisos a partir de toras de pequenos diâmetros de clones MN 89 e MN 249 de *Eucalyptus* e realizaram ensaios de simulação adaptados do procedimento D2394 da norma ASTM (1994). Os resultados determinaram valores de 0,313 mm a 0,382 para os ensaios de esfera de aço e carga rolante, respectivamente, sendo o clone MN249

o mais apto para a utilização em pisos, pois apresentou os melhores resultados em termos de deformação.

Knapic, Machado e Pereira (2012) avaliaram o desempenho em serviço de pisos de madeira de *Quercus suber* L. Foi determinada a estabilidade dimensional, a resposta à aplicação de cargas em serviço, a dureza, a resistência ao umedecimento e a abrasão devido a tráfego de pessoas. Os resultados permitiram classificar a madeira apta para uso doméstico e comercial de tipo moderado.

Ensaio de simulação de uso em pisos também foram realizados por Martins et al. (2013) em espécies dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* com 35 anos de idade. Foram realizados os ensaios de impacto da esfera de aço cadente, de carga rolante, de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas e atritos estático e dinâmico, assim como ensaio de abrasividade. Os resultados determinaram a aptidão para a utilização em pisos principalmente da madeira de *E. clöziana*. Esta espécie apresentou em média, o melhor comportamento, pois resultou em menor endentação após a aplicação de cargas em pequenas áreas. Já, a madeira de *E. microcorys* apresentou estatisticamente comportamento inferior à madeira do *C. maculata*.

Oliveira (2015) estabeleceu três classes de qualidade, sendo alta, intermediária e baixa, para pisos comerciais de madeira. Essa classificação foi com base nos ensaios de simulação em serviço (ASTM, 1994) para as espécies *Bowdichia nitida* Benth (Spr.) -Sucupira, *Dipterxy odorata* (aubl.) Willd - Cumaru, *Mimosa scabrella* Benth - Amêndola e *Tabebuia impetiginosa* - Ipê. Na Tabela 4 apresenta-se o resumo das classes de qualidade atribuída para os pisos, pela referida autora.

Tabela 4 Resumo das classes de qualidade para pisos comerciais de madeiras em ensaios de simulação em serviço

Ensaio	Espécies			
	Ipê	Cumarú	Sucupira	Amêndola
Atrito	Alta	Intermediária	Intermediária	Baixa
Endentação por cargas aplicadas em pequenas áreas	Alta	Alta	Intermediária	Intermediária
Carga rolante	Alta	Alta	Intermediária	Baixa
Impacto da Esfera de aço cadente	Alta	Alta	Intermediária	Baixa

Fonte: Oliveira (2015)

### 3.4 Fenômeno de fotodegradação e mudanças ocasionadas na madeira

As mudanças mais características da madeira exposta ao ambiente são a descoloração e a aspereza da superfície (EVANS et al., 2005; OZGENC; HIZIROGLU; YILDIZ, 2012). Estas mudanças são ocasionadas principalmente pela radiação ultravioleta, devido à geração de grupos cromóforos, processo também influenciado pela chuva, pela evaporação e pela transpiração (PANDEY, 2005b). Como a radiação eletromagnética não penetra profundamente na madeira, os efeitos das intempéries estão restritos a uma camada superficial fina. A taxa de perda de material degradado pela erosão é lenta, mas indesejável do ponto de vista estético (DERBYSHIRE; MILLER, 1981).

A madeira é um bom absorvente de radiação eletromagnética, a luz visível, por exemplo, penetra em cerca de 200  $\mu\text{m}$  e a radiação ultravioleta penetra 75  $\mu\text{m}$ . Apesar de a radiação visível penetrar mais profundamente, sua energia (menor que 70  $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) é insuficiente para romper as ligações

químicas dos constituintes da madeira (HON, 2001). Assim, a radiação ultravioleta é considerada a mais prejudicial para a madeira em uso. A luz visível situa-se na faixa de 400-700 nm enquanto que a radiação ultravioleta está entre 300-400 nm de acordo com o espectro eletromagnético.

Entre os constituintes poliméricos da madeira, a lignina é a mais suscetível à degradação do que os demais componentes químicos da madeira, celulose e hemiceluloses (FEIST; HON, 1984; HON, 2001; PANDEY, 2005a). As mudanças decorrentes da fotodegradação afetam principalmente a cor da madeira. Essa característica é uma das mais importantes nos produtos de madeira utilizada em ambiente externo.

O envelhecimento acelerado simula condições de intemperismo em ambiente controlado, sendo utilizado como medida de controle de qualidade em diversos processos de fabricação e análise de materiais. O envelhecimento acelerado permite obter informações como a resistência a corrosão, a durabilidade e a estabilidade à luz, as mudanças na cor, perda de brilho, escamação, rachaduras, fissuras, nevoas, bolhas, fragilização, perda de força e oxidação, entre outros, obtendo resultados rápidos e confiáveis (Q-LAB, 2015).

Os ciclos de envelhecimento acelerado simulam efeitos da radiação eletromagnética, chuva, orvalho, obtendo em poucas semanas a reprodução do dano que levaria anos. Em teoria, ciclos de envelhecimento de 84 horas correspondem a um ano em exposição ao ar livre, sendo útil como padrão de comparação e auxílio para tomada de decisões (Q-LAB, 2015).

Alguns estudos na literatura relatam o comportamento da madeira de teca em decorrência do intemperismo. Izekor e Fuwape (2011) avaliaram o efeito da idade nas mudanças dimensionais e superficiais na madeira devido ao efeito da exposição por 12 meses ao ar livre. Os resultados determinaram aumento da resistência ao intemperismo com o aumento da idade das árvores.

### **3.4.1 Variação da cor da madeira durante ensaios de envelhecimento acelerado**

A cor da madeira é um fator determinante principalmente para uso em móveis e chapas decorativas, além de importante atributo para fins de comercialização (MAZET; JANIN, 1990; ROSU et al., 2010). A cor da madeira exposta às condições ao ar livre, muda rapidamente em curto espaço de tempo (BAAR; GRYC, 2011).

Nas madeiras claras como a maioria das coníferas, a cor destas madeiras tende a escurecer ou torna-se amarelo-marrom devido ao acúmulo de foto degradados constituintes da lignina, já nas folhosas tropicais as mudanças são mais complexas devido às diferenças de cor entre cerne e alburno, mas a tendência é ficar com aspecto mais claro ou cinzento (BAAR; GRYC, 2011; GEORGE et al., 2005; OZGENC; HIZIROGLU; YILDIZ, 2012).

Na teca, por exemplo, que é rica em extrativos fenólicos, a cor da madeira pode torna-se cinza quando exposta por muito tempo a intempérie. A causa desses fenômenos é principalmente a degradação (foto oxidação) da lignina e extrativos. A degradação da lignina e extrativos resulta em quinonas (de cor mais escura) as quais são lixiviadas deixando as camadas superficiais de cor mais claras e ricas em celulose (BAAR; GRYC, 2011; FEIST, 1983), além da geração de grupos cromóforos (HON, 1991; PANDEY, 2005b).

Mudanças na cor da madeira podem ser determinadas por meio de técnicas qualitativas e quantitativas. Os métodos qualitativos são baseados na percepção visual, como no caso do sistema de cores Munsell, que depende do ângulo de observação e da fonte de luminosidade, apresentando um tanto de subjetividade devido a possíveis falhas de interpretação.

Métodos quantitativos que utilizam variáveis numéricas para as interações provocadas pela luz em uma superfície, são recentemente utilizados, dentre eles o sistema CIElab (COMMISSION INTERNATIONALE DE

L'ECLAIRAGE - CIE, 2007), que é obtido por meio de coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h$ . Quando as cores são ordenadas, elas podem ser expressas em termos de tonalidade, luminosidade e saturação.

Com a criação de escalas para esses atributos é possível expressar cores de forma precisa. O espaço de cor  $L^*a^*b^*$  foi criado após a teoria de cores opostas, em que duas cores não podem ser verdes e vermelhas ao mesmo tempo, ou amarelas e azuis ao mesmo tempo (KONICA MINOLTA, 2015).

De acordo com Gonnet (1993) a diferença colorimétrica entre duas amostras de madeira pode ser expressa como o índice  $\Delta E$  no sistema CIElab. Este índice mede a diferença de cor entre dois pontos num plano cartesiano e é calculado pela soma dos quadrados das diferenças de cada parâmetro na cor da madeira. Este índice  $\Delta E$  pode ser associado à percepção visual em escala proposta por Dirckx et al. (1992) (Tabela 5).

Tabela 5 Correspondência entre observação visual e  $\Delta E$  no CIElab System (DIRCKX et al., 1992)

Percepção visual	$\Delta E$
Negligenciável	0-0,5
Ligeiramente perceptível	0,5-1,5
Perceptível	1,5 – 3
Apreciável	3-6
Muito apreciável	6-12

Recentemente, diversos estudos têm sido realizados para determinar mudanças na cor da madeira. Costa et al. (2011) estudaram a fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais, jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*), submetidas à radiação ultravioleta e sua influência na cor da madeira. Foi observado o escurecimento da cor das madeiras causada pela fotodegradação, sendo quantificado pela intensidade da luz refletida.

Martins et al. (2011) estudaram o envelhecimento artificial acelerado por radiação ultravioleta de madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. Os autores avaliaram os processos de fotodegradação da cor superficial ao longo do tempo de exposição à radiação ultravioleta em um reator fotoquímico. A técnica utilizada para avaliação dos parâmetros colorimétricos foi o sistema CIELab (1976) ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C, e  $h^*$ ). Ambas as espécies apresentaram um escurecimento ao longo do tempo, principalmente nas primeiras horas de exposição à radiação.

Valverde e Moya (2013) avaliaram o grau de descoloração da superfície em madeira de *Acácia mangium*, *Cedrela odorata* e *Tectona grandis* tratadas com verniz poliuretano e sob intemperismo natural e acelerado, usando madeira não tratada como referência. Foram determinadas alterações na cor da madeira e diminuição da qualidade do acabamento em função do tempo.

### **3.4.2 Variação na textura e rugosidade da superfície de madeira**

As superfícies de madeira quando expostas as condições ambientais sofrem complexas mudanças físicas e químicas devido à ação do intemperismo. Tais efeitos induzem a descoloração e deterioração física de superfícies de madeira. A superfície da madeira exposta torna-se áspera devido à erosão, desenvolvendo rachaduras e fissuras microscópicas (FEIST; HON, 1984).

A textura da superfície da madeira depende não só do processamento, mas também da estrutura anatômica específica, uma vez que a madeira contém cavidades celulares que são independentes de qualquer processamento (GURAU; MANSFIELD-WILLIAMS; IRLE, 2005; MAGOSS, 2008; TAYLOR; CARRANO; LEMASTER, 1999).

De acordo com o sistema de textura da superfície proposto por Marian, Stumbo e Maxey (1958), a estrutura anatômica provoca uma textura de primeiro grau devido às dimensões dos elementos celulares. A textura de segundo grau (marcas da ferramenta) é terceiro grau (vibrações, desalinhamento e ferramentas maçantes) são geradas como resultado do método de usinagem.

A rugosidade de um material é a medida das irregularidades presentes em uma superfície. Estas irregularidades são determinadas pela medição micro geométrica da altura, largura e a forma dos picos e vales na superfície da madeira.

Vários métodos são utilizados para medir a rugosidade da superfície da madeira de acordo com Funck et al. (1992) como a inspeção visual, métodos de triangulação baseados em laser e ultrassom, porém a maioria utiliza o sistema de arraste de agulha ou perfilômetro sobre a superfície da madeira.

Os parâmetros de rugosidade resultantes da medição com perfilômetros mecânicos representam a forma da expressão matemática entre a variação vertical das superfícies, representado pelos picos e vales e o deslocamento horizontal do sensor (agulha) em relação a um plano de referência. Para o cálculo dos parâmetros de rugosidade devem ser considerados os seguintes termos: Comprimento de amostragem, comprimento de medição e comprimento de avaliação.

O comprimento de amostragem é chamado também de *cut-off* ou  $L_c$  e representa o comprimento medido em que são calculados os parâmetros de rugosidade que deve ser no mínimo 5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002). Os comprimentos  $L_o$ , são o início e o final da medição em que ocorre a aceleração e comprimentos de amostragem da medição. A distância total percorrida ou  $L_t$  representa o caminhamento total do sensor (agulha) durante a medição da rugosidade. O  $L_t$  contém o comprimento de avaliação ou  $L_m$  juntamente com a distância para atingir a velocidade de

medição ( $L_o$ ) e a distância para reduzir a velocidade de medição ( $L_o$ ). O esquema é mostrado na Figura 2.

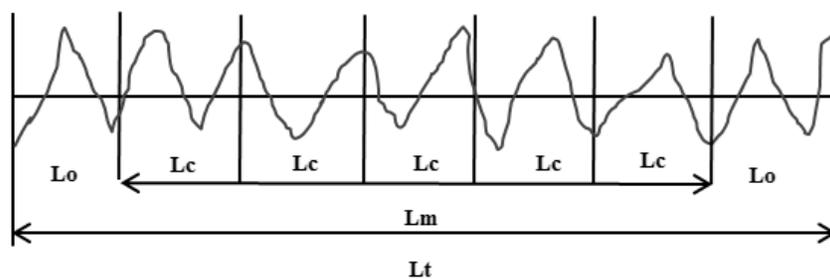


Figura 2 Esquema do comprimento de amostragem ( $L_c$ )

Fonte: ABNT (2002)

A qualidade da superfície é uma definição complexa e é caracterizada por diferentes parâmetros de amplitude, sendo que os mais utilizados para avaliar a rugosidade da superfície são  **$R_a$**  (Rugosidade média),  **$R_z$**  (Rugosidade total),  **$R_t$**  (Rugosidade máxima).

A o parâmetro  $R_a$ , define-se como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento do perfil em relação à linha média num comprimento de avaliação, quanto maior o valor de  $R_a$ , mais rugosa será a superfície. Este parâmetro por si só, não descreve a rugosidade da superfície, embora seja o mais utilizado na indústria.

O parâmetro  $R_z$  corresponde a média aritmética dos cinco valores dentro do comprimento de avaliação da rugosidade máxima  $R_t$ . Já a rugosidade máxima  $R_t$  corresponde à soma dos valores absolutos das ordenadas de maior afastamento, acima e abaixo da linha média medido dentro do comprimento de amostragem.

Vários estudos têm avaliado os parâmetros de rugosidade obtidos com o rugosímetro de arraste para verificar o efeito da usinagem na rugosidade de superfícies de madeira (BRAGA et al., 2014; CHANG, 2010; KILIC; HIZIROGLU; BURDURLO, 2006; ZHONG, HIZIROGLU; CHAN, 2013),

porém são raros os estudos relacionados a mudanças na rugosidade em decorrência do intemperismo.

Temiz et al. (2005) avaliaram a rugosidade total  $R_z$  da superfície em madeira de *Pinus sylvestris* L. e *Alnus glutinosa* L. tratadas e não tratadas com CCA- Arseniato de Cobre Cromatado, após envelhecimento acelerado usando irradiação UV e spray de água. Os resultados mostraram que o tempo de exposição da madeira tratada aumentou o valor da rugosidade total na madeira de *Pinus*, contudo na madeira de *Alnus*, tal parâmetro, diminuiu. As duas espécies de madeira apresentaram diferenças na rugosidade da superfície em resposta a irradiação UV. Os autores afirmaram que outros fatores (usinagem, pré-tratamentos e diferenças anatômicas entre as espécies) afetam a referida propriedade e devem ser controlados.

Com relação à variação da rugosidade da superfície em função do desgaste por fotodegradação poucos trabalhos foram desenvolvidos. Hiziroglu et al. (2008) avaliaram a qualidade da superfície de 5 espécies da Malásia após 4 semanas de exposição ao ar livre a partir de parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$ . Tais autores avaliaram os respectivos perfis e determinaram alterações na superfície da madeira, decorrente da redução da qualidade superficial, que podem afetar o desempenho e utilização da madeira.

### **3.4.3 Acabamentos para madeira e sua influência no desempenho para uso externo**

Com a finalidade de proteger a madeira dos efeitos prejudiciais do intemperismo, diversos produtos de acabamento podem ser aplicados e assim manter o seu valor estético e desempenho (NCUBE; MEINCKEN, 2010). Alterações de cor são observadas visualmente depois de algumas semanas de exposição, causando lenta, mas permanente degradação das camadas superficiais

da madeira. Assim a melhor maneira de combater estes problemas é aplicando tintas anti-intemperismo adequadas. (PÁNEK; REINPRECHT, 2014).

Existem dois tipos básicos de acabamento ou tratamento, os métodos são usados para aumentar a resistência das superfícies de madeira contra as intempéries (WILLIAMS, 2005). O primeiro é a aplicação do acabamento à superfície sob a forma de camadas finas ou revestimentos com penetração limitada. O segundo tipo de tratamento inclui processos pressurizados e não pressurizados baseados na aplicação de produtos químicos como, por exemplo, o arsênio que é amplamente empregado para proteger a madeira (JACQUES, 2000).

Acabamentos podem ser transparentes ou revestimentos opacos, os primeiros não mascaram a cor natural da madeira, mas a penetração de luz visível pode degradar a superfície subjacente e causar descamação do acabamento (DERBYSHIRE; MILLER, 1981).

O uso de tintas à base de solventes é restrito por seu mau desempenho ambiental devido à alta evaporação de solventes durante o processamento e a aplicação (PANDEY, 2005a). Para minimizar estes efeitos ambientais surgiram os revestimentos à base de água, os mais comumente usados são os aglutinantes formadores de filme em sua maioria acrilato e metacrilato, ésteres de alcanóis inferiores (NCUBE; MEINCKEN, 2010).

Vernizes são os mais empregados, eles contêm óleos e resinas (orgânicos e inorgânicos) como componentes ativos os quais previnem a degradação de cor, gerando uma proteção eficaz para a superfície de madeira dos efeitos nocivos da radiação e da água (VALVERDE; MOYA, 2013).

Durante a última década, absorvedores de radiação ultravioleta inorgânicos têm recebido grande atenção em revestimentos de madeira transparentes, por causa de suas propriedades como bloqueadores de UV (ALLOUI et al., 2007). Os acabamentos a base de poliuretano com componentes

orgânicos do tipo pré-polímero de uretano, são absorvedores de radiação UV e insolúveis em água (VALVERDE; MOYA, 2013).

Uma nova geração de produtos de acabamento que não formam película são os impregnantes “*stain*”, os quais proporcionam maior penetração na madeira e são providos de filtro solar, impermeáveis e alguns possuem ação preservativa. Devido a sua maior penetração e formação de película muito fina, não apresentam problemas de trincas e o desgaste ocorre por erosão, sendo mais fácil para manutenção, dispensando raspagem. Com ação fungicida e inseticida, os ‘*stain*’ protegem a superfície da madeira contra o ataque de fungos, mofo, cupins e brocas. Além disso, são repelentes a água, proporcionam maior proteção contra a chuva e o sol, podendo ser usado em ambientes internos e externos (WILLIAMS; FEIST, 1999).

Alguns estudos tem avaliado o efeito do produto de acabamento nas mudanças decorrentes da fotodegradação da madeira. Silva, Pastore e Pastore Junior (2006), avaliaram o processo de foto-decomposição e o efeito de proteção de um verniz poliuretânico transparente e de impregnante *stain* semitransparente quando submetidos ao intemperismo artificial em madeiras de cinco espécies tropicais. A mudança da cor natural das madeiras foi monitorada por espectrocolorimetria. Foi observado que o verniz aplicado em ipê-roxo e maçaranduba forneceu maior proteção, enquanto o *stain* foi mais eficiente quando aplicado em itaúba e tatajuba. Ambos os produtos tiveram desempenho similar para a madeira de tauari.

Gonçalez et al. (2010) avaliaram o efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* huber), tratada com *stain* e seladora (base de nitrocelulose), com monitoramento dos parâmetros colorimétricos ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  C e  $h^*$ ). Após envelhecimento acelerado, tais autores observaram que o tratamento com *stain* foi o que ofereceu maior proteção à radiação ultravioleta e

o tratamento com seladora foi o que apresentou uma maior alteração da cor após a simulação de envelhecimento no reator fotoquímico.

### **3.5 Estudos das propriedades da madeira por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)**

A espectroscopia de infravermelho próximo NIR de madeira e produtos de madeira contém informações sobre a sua composição química e a sua estrutura molecular (SCHWANNINGER; RODRIQUES; FACKLER, 2011). A técnica baseia-se na interação da radiação eletromagnética na região do infravermelho com os elétrons das ligações dos componentes químicos que constituem a amostra (PASQUINI, 2003).

Entender a química subjacente e conhecer os grupos funcionais que absorvem comprimentos de onda distintos, é indispensável para atribuição de bandas na região de NIR (SCHWANNINGER; RODRIQUES; FACKLER, 2011). Alterações na composição química, morfologia e propriedades físico-químicas do material, causam alterações espectrais difusamente refletidas pela radiação do infravermelho próximo (POPESCU; POPESCU, 2013). Em comparação com espectroscopia de infravermelho (IR), em espectroscopia NIR é difícil atribuir as bandas para os grupos funcionais específicos devido aos picos sobrepostos (KELLEY et al., 2004). A avaliação e inspeção visual dos espectros apresentam neste sentido limitações, mas com os pré-tratamentos é possível fazê-las mais visíveis (POPESCU; POPESCU, 2013).

Devido a estas dificuldades de interpretação, na atualidade a espectroscopia NIR é principalmente utilizada seguindo a abordagem exploratória. Sendo que, o conteúdo dos componentes físico-químicos, bem como propriedades mecânicas das amostras de interesse é determinado pela aplicação de métodos estatísticos multivariados dos dados espectrais. Neste

caso, hipóteses concretas ou conhecimento prévio sobre a química e a estrutura da amostra de referência não são necessários para construir tais modelos multivariados (SCHWANNINGER; RODRIQUES; FACKLER, 2011).

As análises quimiométricas envolvem técnicas estatísticas no tratamento e interpretação de dados químicos, esta abordagem fornece o máximo de informação na análise de dados multivariados. Devido a fontes de variação aleatória ou sistemática que mascaram uma variação de interesse, são utilizados os pré-tratamentos dos dados antes da modelagem. O pré-tratamento da primeira derivada, por exemplo, permite tornar mais visíveis as diferenças mantendo o formato dos espectros e minimizando os ruídos e exclusão de amostras anômalas ou *outliers*. Desta forma, identificam-se as ligações químicas que são detectadas por faixa espectral. Posteriormente é possível, determinar, estimar, calcular ou gerar modelos de predição a partir dos dados.

O uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tornou-se um método rápido para previsão e classificação das propriedades da madeira (SCHIMLECK et al., 2007). Nesse setor, os primeiros trabalhos utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo e técnicas de análise multivariada foram voltadas para predição da composição química da madeira e propriedades do papel. Entretanto, estudos comprovam também o sucesso de aplicação deste método na determinação das propriedades anatômicas, físicas, e mecânicas da madeira (MUÑIZ et al., 2012).

Na Tabela 6 são apresentados alguns estudos que utilizaram a técnica do Infravermelho Próximo NIR para predição de propriedades da madeira.

Tabela 6 Estudos reportados na literatura para predição de propriedades da madeira pelo NIR

Propriedade	Autor
Densidade, propriedades físicas e mecânicas	Hein, Chaix e Lima (2010), Kelley et al. (2004), Rodrigues et al. (2013), Schimleck et al. (2006) e Vianna, Trugilho e Hein (2010)
Propriedades de carvão vegetal	Andrade et al. (2012) e Monteiro et al. (2010)
Propriedades em painéis de madeira	Hein et al. (2009, 2010)
Tratamento térmico	Esteves e Pereira (2008) e Popescu e Popescu (2013)
Conteúdo de óleo essencial	Nascimento et al. (2015)
Predição de compostos fenólicos em teca	Niamke et al. (2014)
Propriedades colorimétricas ( <i>Dalbergia sp</i> )	Yang, Lv e Fu (2012)
Propriedades colorimétricas ( <i>Eucalyptus sp.</i> )	Esteves e Pereira (2008)
Predição da rugosidade	Zhang, Liu e Yang (2015)
Efeito da rugosidade na densidade	Liu et al. (2012)

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Material

O material utilizado foi proveniente de um plantio experimental de teca (*Tectona grandis* L.f), com 13 anos de idade localizado no município de Vazante, região noroeste do estado de Minas Gerais (Brasil). As coordenadas locais foram de 18°01'37" de latitude sul e 46°51'21" de longitude oeste. A altitude de 630 metros e a temperatura média compreendida entre 21 a 24°C. O local possui clima tropical úmido de savana caracterizado por inverno seco e verão chuvoso, com média mensal de precipitação de 1400 mm ano<sup>-1</sup>. O solo predominante é do tipo Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico e conforme descrito por Macedo et al. (2005), o plantio foi instalado com mudas de sementes provenientes do estado de Mato Grosso com irrigação somente no ato do plantio, os demais tratos culturais (adubação, tutoramento, controle de plantas invasoras, desbrota e desrama) foram realizados nos primeiros anos da plantação. O experimento foi instalado em dois espaçamentos (3 x 2 metros e 3 x 3 metros).

Foram utilizadas nove árvores selecionadas de maneira aleatória no plantio, abatidas e obtidas toras de 2,60 metros. A tora da região do diâmetro a 1,30 m de altura foi dividida em três partes e estas desdobradas tangencialmente, obtendo-se tábuas de 850 X 20 mm (comprimento x espessura, respectivamente) e largura variável, em função do diâmetro. Posteriormente, as tábuas foram empilhadas e secas ao ar livre por período de três meses, na Unidade de desdobro e secagem do departamento de Ciências Florestais na Universidade Federal de Lavras. A seguir foram confeccionados e acondicionados os corpos de prova em câmara climática [ $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$  e  $UR = (65 \pm 5)\%$ ] até atingirem a

umidade de equilíbrio de 12% . O esquema de amostragem está apresentado na Figura 3.

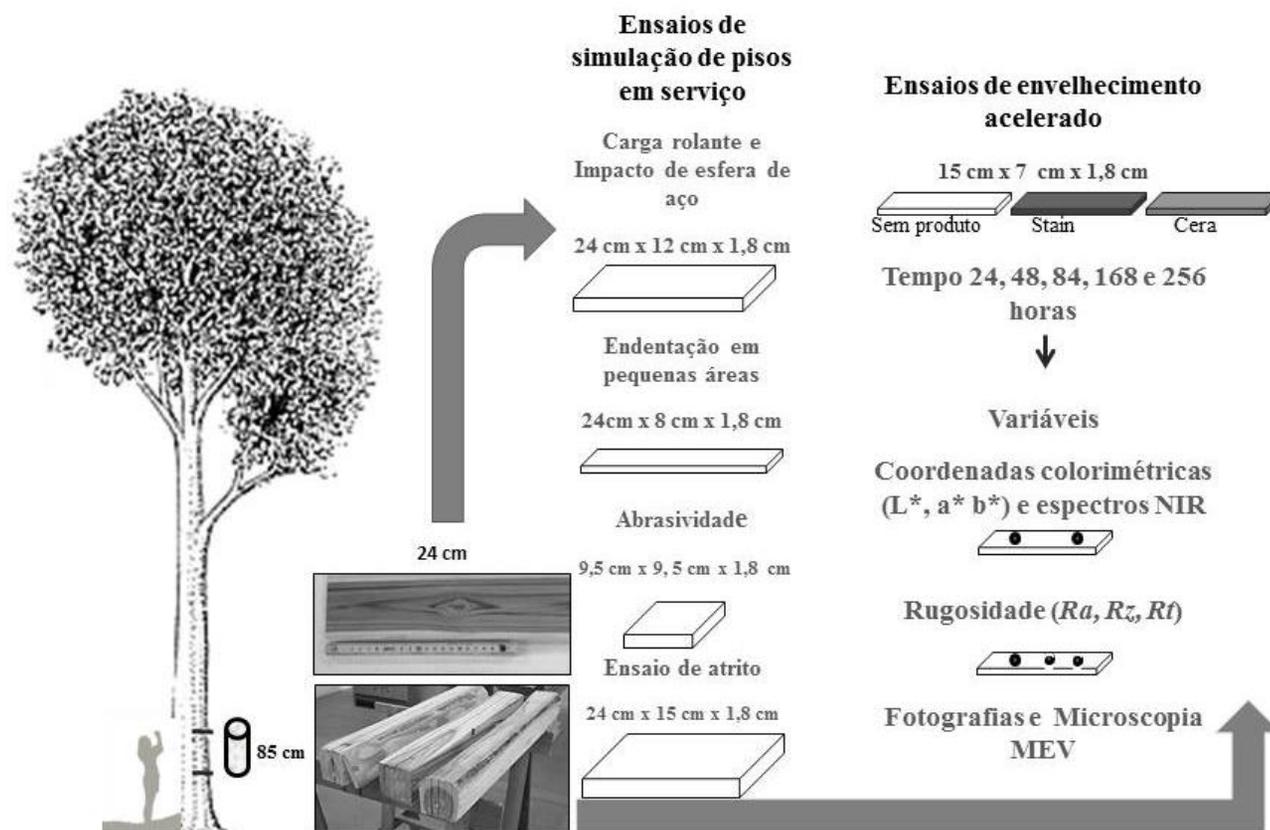


Figura 3 Esquema de amostragem e confecção de corpos de prova para os ensaios na madeira jovem de teca

## 4.2 Ensaios de simulação de pisos em serviço

Após acondicionamento, foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA), os ensaios de impacto da esfera de aço cadente, de atrito estático e dinâmico, de carga rolante, de endentação por cargas aplicadas em pequenas áreas e de abrasividade, seguindo o procedimento descrito por Martins et al. (2013), Padilha, Lima e Silva (2006) e Santos, Lima e Silva (2010) com base na norma D2394-05 (ASTM, 2011). As dimensões e quantidade de corpos de prova estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 Especificações dos corpos de prova para os ensaios de simulação de pisos em serviço na madeira de teca

Ensaio	Corpo de prova	
	Dimensões (mm)	Quantidade
Resistência à carga rolante	240 x 120 x 18	77
Endentação causada por cargas em pequenas áreas	240 x 80 x 18	81
Resistência ao impacto da esfera de aço cadente	240 x 120 x 18	72
Abrasividade	95 x 95 x 18	43
Atrito	240 x 150 x 18	30

### 4.2.1 Ensaio de carga rolante

O equipamento de ensaio de carga rolante consiste de uma base de ferro de 1750 x 400 mm, na qual são colocados os corpos de prova em ângulo de 45° entre o eixo axial do corpo de prova e o sentido de deslocamento da carga. O equipamento é movimentado sobre dois trilhos e a roda central que exerce o esforço na madeira possui carga de 890 N. A carga é movimentada por motor elétrico que a desliza sobre a superfície do corpo de prova em velocidade de

0,06 m/s (Figura 4). Após 10, 25 e 50 ciclos foi medida a intensidade da depressão gerada pela passagem da carga na região central do corpo de prova, por meio de relógio comparador (0,001mm).



Figura 4 Equipamento para o ensaio de carga rolante

Para o cálculo da depressão foram obtidos 9 pontos para leituras com o relógio comparador (0,001 mm), sendo 3 leituras realizadas na região central da depressão (leituras internas) e 6 leituras na região fora da depressão (leituras externas), tendo 3 leituras de cada lado. A depressão média gerada no ensaio foi determinada por meio da Equação 1

$$D = L_e - L_i \quad (1)$$

Em que:

$D$  = depressão;

$L_e$  = Média aritmética das leituras externas;

$L_i$  = Média aritmética das leituras internas.

#### 4.4.2 Ensaio de endentação de cargas aplicadas em pequenas áreas

Este ensaio permite obter a resistência de pisos de madeira a aplicação de cargas em pequenas áreas, como o caso de saltos de sapatos ou pequenos objetos que exercem cargas concentradas. O equipamento possui uma base de ferro, provido de um rolo com pinos de aproximadamente 5 mm de diâmetro, os quais exercem a carga distribuída de 890 N. A carga foi movimentada por motor elétrico à velocidade de 0,06m/s (Figura 5). O ensaio consistiu na avaliação da depressão (mm) causada na madeira pelos pinos, após a passagem de 100 ciclos do rolo sobre os corpos de prova.

A endentação devido a cargas aplicadas em pequenas áreas também foi medida (Figura 5) por meio de relógio comparador (0,001 mm). Para o cálculo da endentação foram obtidos 5 pontos para leituras, sendo 4 leituras externas a endentação (leituras externas) e 1 leitura central à endentação (leitura interna). A endentação média foi determinada conforme Equação 2.



Figura 5 Equipamento para ensaio de endentação em pequenas áreas

$$E = Le - Li \quad (2)$$

Em que:

$E$  = endentação;

$Le$  = Média aritmética das leituras externas;

$Li$  = Leitura interna.

Também foi analisada a superfície da madeira após o ensaio, a partir da observação e qualificação visual em relação ao tipo de dano gerado na superfície.

#### **4.2.3 Ensaio da esfera de aço cadente**

Este ensaio simula a eventual queda de objetos sobre o piso. O equipamento utilizado possui suportes em diferentes alturas para promover quedas de uma esfera de aço de 15 cm até 180 cm. A esfera de aço possui 535 g e 51 mm de diâmetro e é liberada por eletroímã sobre o corpo de prova (Figura 6).

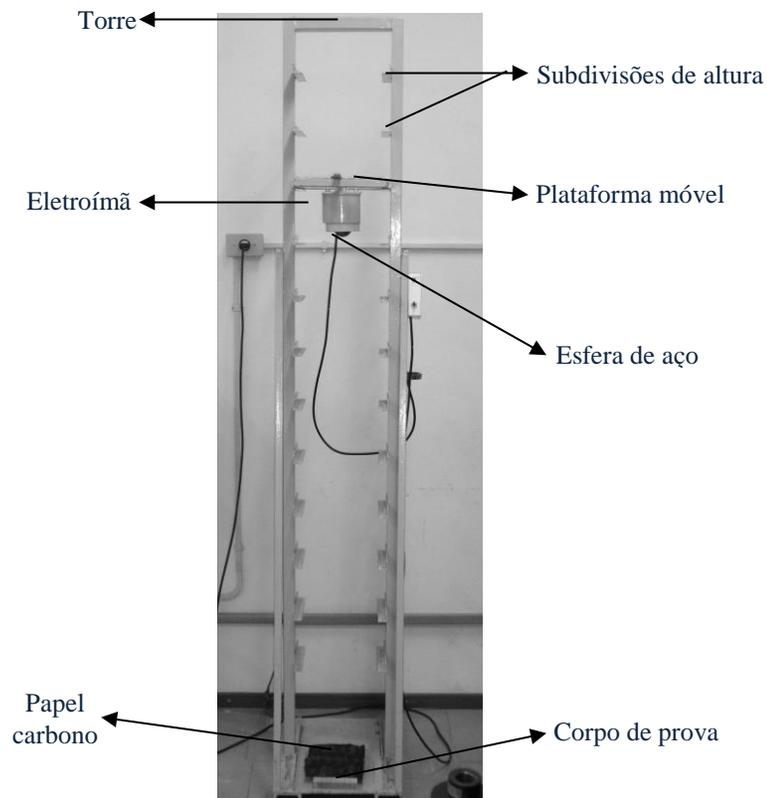


Figura 6 Equipamento para ensaio de impacto de esfera de aço

Fonte: Martins et al. (2013).

Para realçar a depressão foi utilizado papel carbono sobre o corpo de prova. Posteriormente foi calculado o valor da depressão originada pela queda da esfera (Equação 2), nas diferentes alturas de queda. As medições também foram realizadas com relógio comparador (0,001 mm). A partir dos dados de obtidos para as diferentes alturas foi obtida a equação ajustada de primeiro grau com o intuito de calcular o índice de endentação para o piso de madeira tomando como base o valor a 180 cm de altura.

#### 4.2.4 Ensaio de abrasividade

O ensaio avalia a possibilidade do piso de madeira ser utilizado para determinado tipo de tráfego de acordo com sua resistência a forças abrasivas. Corpos de prova isentos de defeitos com a superfície sem produto de acabamento foram submetidos a desgaste no abrasímetro Taber abraser modelo 5135 (Figura 7). Ele é provido de dois braços com cargas de 500 g cada, nos quais são colocados rebolos abrasivos do tipo H18. Esses abrasivos giram sobre o corpo de prova a frequência de 72 ciclos/min.

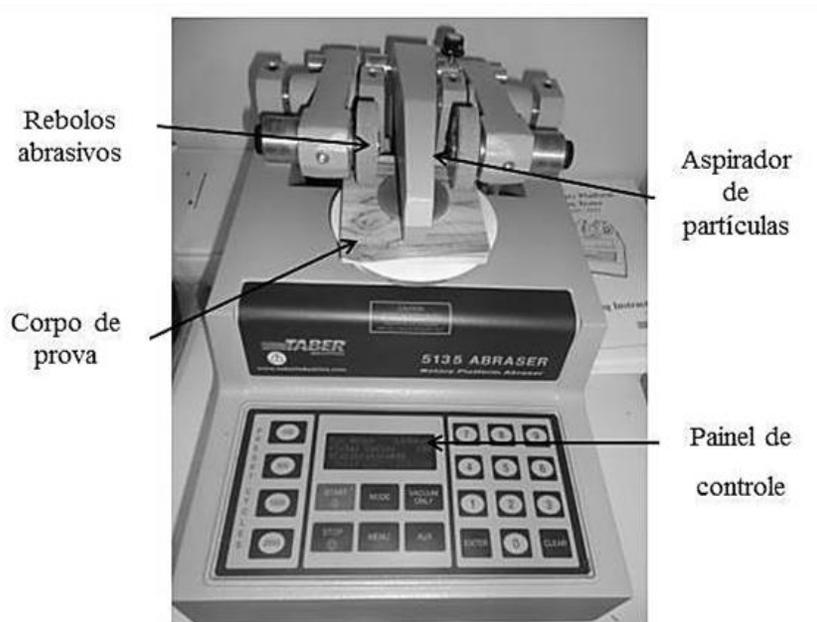


Figura 7. Equipamento para ensaio de abrasividade.

Ao final de 500 ciclos foi mensurada a profundidade da depressão originada pelo desgaste em 4 pontos externos e 4 pontos internos da depressão, sendo realizada a subtração entre uma externa e uma interna associadas

lateralmente e por fim a média aritmética das subtrações. Todas as leituras foram realizadas com relógio comparador (0,001 mm).

A norma NBR 1483 da ABNT (2014) classifica o tipo de tráfego de acordo com a resistência a abrasão da camada de revestimento para pisos de madeira laminados, porém para madeira maciça não existe norma, desta forma o padrão de comparação a empregar será a profundidade da depressão.

#### 4.2.5 Determinação do coeficiente de atrito

O ensaio foi realizado a partir da movimentação horizontal da carga de 11,5 kg forrado com couro para simular o uso de sapatos sobre a superfície da madeira. A carga é tracionada pelo cabo de aço que está ligado à célula de carga da máquina universal de ensaios. O conjunto é conectado ao computador para o registro das forças e adequação da velocidade de arraste (Figura 8).



Figura 8 *Setup* do ensaio de determinação do coeficiente de atrito.

Os coeficientes de atrito estático e dinâmico foram, respectivamente, calculados conforme Equações 3 e 4, descritas em D2394-05 (ASTM, 2011).

$$\mu_s = F_s/P \quad (3)$$

$$\mu_k = Fk/P \quad (4)$$

em que:

$F_s$  = força máxima necessária para movimentar a carga com velocidade de 1,27 mm/min;

$P$  = massa de 11,5 kg;

$Fk$  = força média necessária para manter a carga na velocidade de 51 mm/min.

Para os ensaios de atrito empregaram-se três tratamentos (Tabela 8), em que i) 10 corpos de prova para a madeira sem acabamento; ii) 10 corpos de prova para a madeira com três camadas de *stain* semitransparente; iii) 10 corpos de prova para a madeira com cera incolor. Todos os corpos de prova foram previamente lixados com sequência de lixas 100; 150 e 220.

Tabela 8 Características dos produtos de acabamento aplicados à madeira de teca

Tipo de Acabamento	Descrição
Sem produto	A superfície da madeira foi lixada com sequência de granulometria de lixa 120 seguida por lixa 200 sem aplicação de acabamento.
<i>Stain</i> semitransparente	Impregnante, penetra na madeira evitando rachaduras, trincas e bolhas no acabamento, repelente à água, absorvente de raios ultravioleta, fungicida. Composição, resina alquílica, hidrocarbonetos, pigmentos inorgânicos, secantes organometálicos e aditivos. Aplicação com pincel de três demãos. Viscosidade: $12 \pm 2$ s CF4 a 25°C, Densidade: $0,865 \pm 0,020$ g/cm <sup>3</sup> Sólidos: $35,866 \pm 2\%$
Cera incolor	Proporciona brilho, acabamento natural e realça o desenho da madeira. É uma composição de ceras naturais de carnaúba, parafinas e aguarrás. A aplicação foi realizada com pano em movimentos circulares e em três passagens.

Fonte: Ingleza (2015) e Sayerlack (2015).

### 4.3 Ensaios de envelhecimento acelerado

Corpos de prova de 150 x 70 x 18 mm (Comprimento, Largura e Espessura) foram confeccionados e acondicionados em câmara climática [ $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$  e  $\text{UR} = (65 \pm 5)\%$ ] até atingirem a umidade de equilíbrio de 12%. A superfície da madeira foi lixada com sequência de lixas 100; 150 e 220 e aplicados três tipos de acabamento (Tabela 8).

O material foi analisado após 24, 48, 84, 168 e 256 horas e avaliadas as coordenadas colorimétricas, rugosidade da superfície, espectros no infravermelho próximo NIR, análise estrutural por microscopia eletrônica de varredura e fotografias. Entre cada um dos cinco intervalos de medição, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climática [ $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$  e  $\text{UR} = (65 \pm 5)\%$ ] até massa constante. Foram utilizados 4 corpos de prova por tratamento, totalizando 60 corpos de prova.

Os corpos de prova foram dispostos em câmara de envelhecimento acelerado, marca EQUV-EQUILAM no laboratório de Nanotecnologia do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras. (Figuras 9 e 10).



Figura 9 Equipamento para ensaios de envelhecimento acelerado

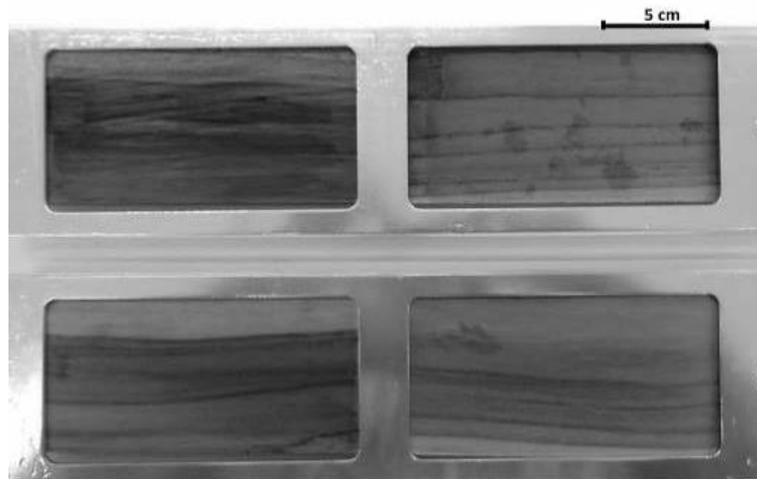


Figura 10 Porta amostras contendo a madeira de teca

O equipamento para ensaios de intempérie acelerada reproduz atmosferas com radiação ultravioleta (UVA e UVB), chuva e orvalho, composto de oito lâmpadas, efeitos de condensação e choque térmico.

Os corpos de prova foram colocados em ciclos de irradiação de 8 horas na região do UVB com 313 nm de comprimento de onda e energia máxima de  $0,63\text{W/m}^2/\text{nm}$ , seguidos de 15 minutos de spray e 3 horas e 45 minutos de efeitos de condensação a  $50\pm 3^\circ\text{C}$  (ASTM, 2006).

Para evitar a influência da cor do alburno, que é mais claro, todos os corpos de prova utilizados possuíam a mesma quantidade de cerne e desta forma poder também comparar com outros estudos.

#### **4.3.1 Análises colorimétricas**

As mudanças colorimétricas foram avaliadas antes e após cada ciclo de envelhecimento acelerado por meio do espectrofotômetro KONICA-MINOLTA C-5 no laboratório de Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Lavras. Foram obtidos os valores das coordenadas cromáticas cuja técnica utiliza o espaço de cor  $L^* a^* b^*$ , grandezas adimensionais definidas pela Commission Internationale de l'Eclairage -CIElab 1976 (CIE, 2007). Este espaço de cor baseia-se na teoria das cores opostas, em que duas cores não podem ser verdes e vermelhas ou amarelas e azuis ao mesmo tempo.

Para observação da reflexão na superfície do corpo de prova foi utilizado em modo SCI, componente especular incluso em ângulo de  $10^\circ$ , abertura de lente de 30 mm e D65 standard (MORI et al., 2005; VALVERDE; MOYA, 2013). Foram registradas leituras das coordenadas cromáticas em 2 pontos dos corpos de prova (Figura 11).

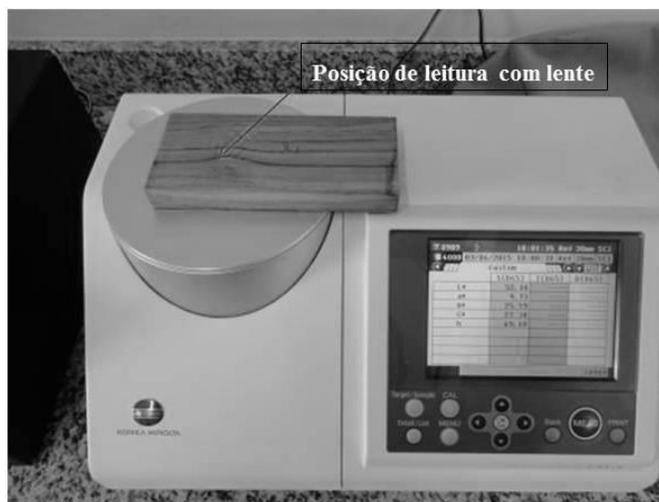


Figura 11 Espectrofotômetro C-5 KONICA-MINOLTA para medição da cor.

A variação total de cor ( $\Delta E$ ), que é uma grandeza adimensional, após cada ciclo de medição foi obtida conforme a Equação 5.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (5)$$

Em que:

$\Delta E$  = variação total de cor (adimensional);

$\Delta L$  = diferença de luminosidade (claro e escuro);

$\Delta a$  = diferença em vermelho e verde (+a indica vermelho e -a indica verde);

$\Delta b$  = diferença em amarelo e azul (+b indica amarelo e -b indica azul).

#### 4.3.2 Rugosidade da superfície

Com o intuito de entender as mudanças na rugosidade da superfície decorrentes do envelhecimento acelerado e do tipo de acabamento foram realizadas mensurações da rugosidade após os ciclos de 24, 48, 84, 168 e 256

horas de envelhecimento. Foi utilizado o rugosímetro de arraste Surtronic 3+ (Taylor Hobson) e determinados os parâmetros de rugosidade,  $Ra$  (média),  $Rz$  (total) e  $Rt$  (máxima).

O comprimento de amostragem (*cut-off*) utilizado foi de 0,8 mm e o comprimento de medição foi de 8 mm, conforme metodologia descrita por Braga et al. (2014), Hizirolu et al. (2008) e Lopes et al. (2014). O *Setup* utilizado nas mensurações de rugosidade está ilustrado na Figura 12.



Figura 12 *Setup* das mensurações da rugosidade da superfície após ciclos de envelhecimento.

#### 4.3.3 Análises no Infravermelho próximo NIR

Visando verificar a aptidão da técnica do NIR para predição das propriedades colorimétricas e de superfície da madeira, foram obtidos os espectros no infravermelho próximo antes e após os ciclos de envelhecimento de 24, 48, 84, 168 e 256 horas.

Os corpos de prova foram estabilizados por 48 horas após cada mensuração em câmara climática [ $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$  e  $UR = (65 \pm 5)\%$ ] até atingirem a umidade de equilíbrio de 12%. Foi utilizado o equipamento FT-NIR (Modelo BRUKER-MPA) em modo de refletância difusa utilizando a esfera de integração com auxílio do programa OPUS. O equipamento e o princípio são ilustrados na Figura 13. Em cada corpo de prova foram mensurados dois espectros sempre nos mesmos locais após cada ciclo de envelhecimento. A aquisição espectral se realizou na faixa de  $9000$  a  $4000\text{ cm}^{-1}$  com resolução espectral de  $8\text{ cm}^{-1}$  e leitura média de 32 varreduras.

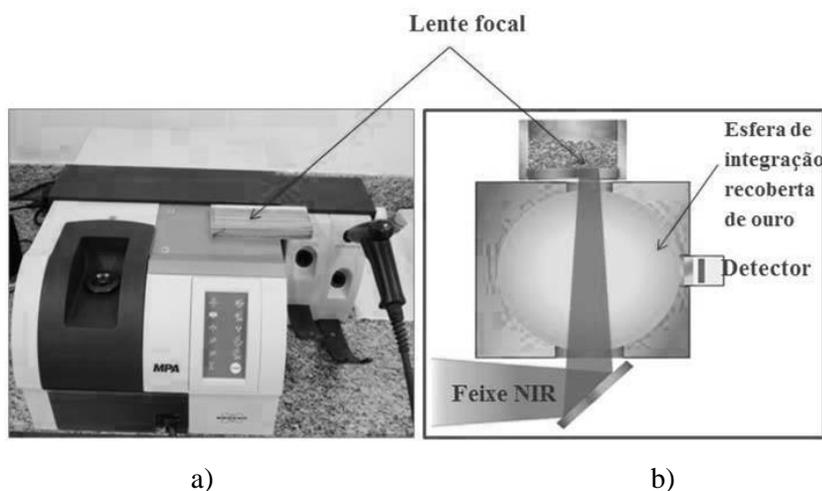


Figura 13, em que, a) Espectrômetro FT-NIR-MPA, b) mecanismo de refletância difusa

Fonte: NIR Spectroscopy (2013)

#### **4.3.4 Análises da superfície da madeira com fotografias e microscopia eletrônica de varredura**

Para detalhar a qualidade da superfície em decorrência do processo de envelhecimento foram registradas fotografias com câmera de 12 Megapixel ao longo dos ciclos de envelhecimento, assim como análise do material no Microscópio Eletrônico de Varredura. Para este último foi utilizado o Microscópio LEO modelo Evo 40, no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras.

Corpos de prova de 1 cm<sup>3</sup> foram retirados após cada ciclo de envelhecimento e acondicionados em dessecador a temperatura ambiente até atingirem massa constante. Os corpos de prova foram colados em *stubs* com fita de carbono dupla face, metalizadas a ouro e analisadas para obter as micrografias. Foi analisada visualmente a variação morfológica e estrutural das superfícies em cada acabamento e tempo de envelhecimento.

#### **4.4 Análises estatísticas**

Para os ensaios de carga rolante, endentação e abrasividade foi utilizada estatística descritiva com o número de repetições indicados na Tabela 7. No ensaio de impacto de esfera de aço foi utilizada a análise de regressão para determinar o índice de endentação sendo testado modelo linear.

O teste de Bartlett a 5% de significância foi empregado para determinar a homogeneidade da variância. Já para avaliação dos efeitos qualitativos do tipo acabamento no coeficiente de atrito e na rugosidade da superfície utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado de três tratamentos e 10 repetições. Para a comparação múltipla foi utilizado o teste Tukey a 5% de significância.

Para a análise estatística dos dados colorimétricos e de rugosidade foi empregado o delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial com dois fatores e 20 repetições. O modelo estatístico utilizado foi:

$$Y_{ijk} = u + A_i + T_j + (A \times T)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Em que:

$Y_{ijk}$  = Valor da variável resposta para o  $i$ -ésimo acabamento, no  $j$ -ésimo tempo na  $k$ -ésima repetição

$u$  = média geral das variáveis resposta

$A_i$  = Efeito do  $i$ -ésimo acabamento

$T_j$  = Efeito do nível  $j$ -ésimo tempo

$(A \times T)_{ij}$  = Efeito da interação entre o acabamento e tempo

$\varepsilon_{ijk}$  = Erro experimental

Para o efeito quantitativo (tempo) foi utilizada a análise de regressão linear e para o efeito qualitativo (acabamento) empregado o teste de comparação múltipla de Tukey a 5% de significância. Foi utilizado na análise estatística o software SISVAR 5.4.

#### 4.4.1 Estatística multivariada

Os dados espectrais foram submetidos à análise multivariada. Inicialmente foi feita a análise de componentes principais (PCA) para determinar diferenças entre os tratamentos e os ciclos de envelhecimento acelerado nos espectros na região do infravermelho adquiridos na superfície da madeira de teca.

Para estimar os modelos de predição das variáveis colorimétricas e de rugosidade pela espectroscopia de NIR foram realizados modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), ambos os métodos foram efetuados com o auxílio do software para análises estatísticas Unscrambler® versão 9, 7 (CAMO), visando estabelecer a relação entre dois conjuntos de dados, X (preditores) e Y (resposta).

Foram utilizados 8 segmentos de 55 corpos de prova por segmento e eliminando graficamente os dados do tipo 'outliers' para ajuste dos modelos. Para a validação dos modelos de predição foi empregada a validação cruzada (*cross validation*) por segmentos ao acaso.

O pré-tratamento dos dados foi realizado para aperfeiçoar os modelos de predição. Foram testados os pré-tratamentos espectrais de normalização, a primeira derivada e a SNV (Standard Normal Variate).

Para avaliação dos modelos de predição foram utilizados os parâmetros estatísticos como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro quadrático médio da calibração RMSEC, o erro quadrático médio da validação, RMSEV e a RPD ou relação de desempenho de desvio, que relaciona o desvio padrão das propriedades medidas e o RMSEV.

A obtenção dos parâmetros foram conforme às Equações 6, 7 e 8:

$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \hat{y}_i^2)}{N - A - 1}} \quad (6)$$

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_{CV\ i} - \hat{y}_i^2)}{N}} \quad (7)$$

$$RPD = \frac{\text{Desvio padrão}}{RMSEV} \quad (8)$$

Em que:

$y_i$  é obtido testando a equação de calibração directamente sobre a calibração ou validação cruzada dos dados -  $y_{cv}$ ;

$A$  é o número de variáveis latentes;

$N$  é o número de corpos de prova de conjunto de calibração.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio de simulação de pisos em serviço

Os valores médios da depressão produzida no ensaio de carga rolante em cada número de ciclos de 10, 25 ou 50 viagens corresponderam a 0,30 mm; 0,37 mm e 0,44 mm, respectivamente (Figura 14).

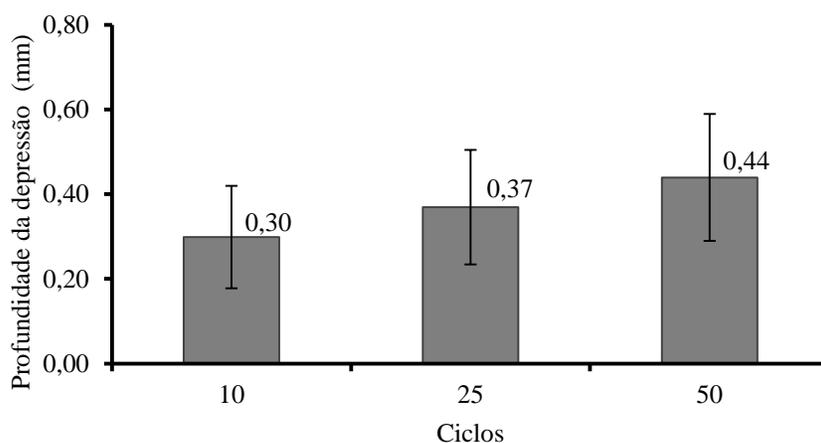


Figura 14 Profundidade média da depressão por número de ciclos, para a carga rolante.

O efeito da carga dinâmica periódica aplicada à madeira em função do tempo promove o adensamento das fibras da madeira, causado pela compressão perpendicular da carga. Normalmente é esperado o aumento da depressão média em função do incremento do número de passagens da carga, fato observado pelo acréscimo de 23,33% entre nos primeiros dez ciclos (1ª até 10ª viagens) e igualmente para os 25 ciclos restantes (26ª até 50ª viagens). Contudo, pode-se observar que o terceiro intervalo (26ª até 50ª viagens), em média, promoveu acréscimo de 0,0028 mm para cada viagem, diferentemente do primeiro

intervalo (dez primeiras viagens) que resultou no aumento médio de 0,03 mm por viagem e também do segundo intervalo (11ª até a 25ª viagem), cujo aumento médio, por viagem, foi de 0,0047 mm.

A resistência a este tipo de esforço é resultado da dureza e densidade do material, sendo esta última o principal fator a considerar para classificar os usos da madeira. Na Tabela 9 são apresentados os valores comparativos da depressão obtida em ensaios de carga rolante e a densidade do respectivo material. Pode-se observar que a maior densidade da madeira, foi menor a depressão obtida. Para madeira de teca foi observado o mesmo comportamento, sendo que a depressão de 0,44 mm após 50 ciclos foi classificada como alta, uma vez que a densidade deste material, segundo Blanco-Flórez et al. (2014) é de  $0,540 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Tabela 9 Comparação dos valores de depressão em ensaio de carga rolante e densidade básica com dados reportados na literatura.

Espécie	Depressão (mm)	Densidade Básica ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Fonte
<b><i>Tectona grandis</i></b>	<b>0,44</b>	<b>0,540</b>	<b>Este estudo</b>
<i>Mimosa scabrella</i>	0,45	0,510	Oliveira (2015)
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,36	0,590	Santos, Lima e Silva (2010)
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,23	0,770	Martins et al. (2013)
<i>Dipterxy odorata</i>	0,11	0,780	Oliveira (2015)

Segundo a classificação de qualidade estabelecida por Oliveira (2015), a resistência da madeira jovem de teca para esforço de carga rolante pode ser classificada como baixa, não sendo indicada para instalação como pisos de locais em que se observam tráficos intensos.

Na Tabela 10 encontram-se os valores médios para as endentações causadas por cargas aplicadas em pequenas áreas após 100 viagens. É possível observar o alto desvio padrão encontrado, que foi possivelmente devido à

heterogeneidade do material. Portanto, foi realizada também a análise visual segundo o procedimento D-2394-05 da norma ASTM (2011).

Tabela 10 Valores médios de endentação por cargas aplicadas em pequenas áreas

Estatísticas	Endentação por cargas em pequenas áreas (mm)
N	81
Média	0,10
Máximo	0,30
Mínimo	0,006
Desvio padrão	0,06

Da mesma forma que no ensaio de carga rolante, a resistência a cargas aplicadas em pequenas áreas se relaciona com a dureza e densidade da madeira. A média das endentações observadas na madeira de teca foi também superior às encontradas na literatura. O valor médio de 0,10 mm foi superior aos valores das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* (0,023 mm), *E. urophylla* (0,05 mm) e clones de *Eucalyptus* sp. (0,06 mm) registrados por Martins et al. (2013), Padilha, Lima e Silva (2006) e Santos, Lima e Silva (2010), respectivamente.

Oliveira (2015) em ensaios de pisos com madeiras comerciais determinaram que madeiras mais densas que a teca como Ipê e Cumaru não apresentaram danos por endentação causadas por cargas aplicadas em pequenas áreas. A madeira de teca deste estudo de acordo com a resposta em termos de endentação e o dano gerado na superfície pôde ser classificada como de baixa resistência, sendo passível de utilização em ambientes com baixo trafego.

Na avaliação qualitativa, por meio de classificação visual segundo o procedimento D-2394-05 (ASTM, 2011), o dano pôde ser classificado como moderado (Figura 15). Gonzalez (2006) também determinou baixa resistência e dano severo para este tipo de esforço em ensaios de simulação com a espécie *Gmelina arborea* da mesma família botânica da teca.



Figura 15 Dano gerado na madeira após o ensaio de endentação em pequenas áreas.

A relação entre a depressão causada pelo impacto da esfera de aço em função da altura de queda encontra-se apresentada na Figura 16. Observa-se que quanto maior a altura de queda da esfera, maior foi a depressão causada na madeira com tendência linear de incremento.

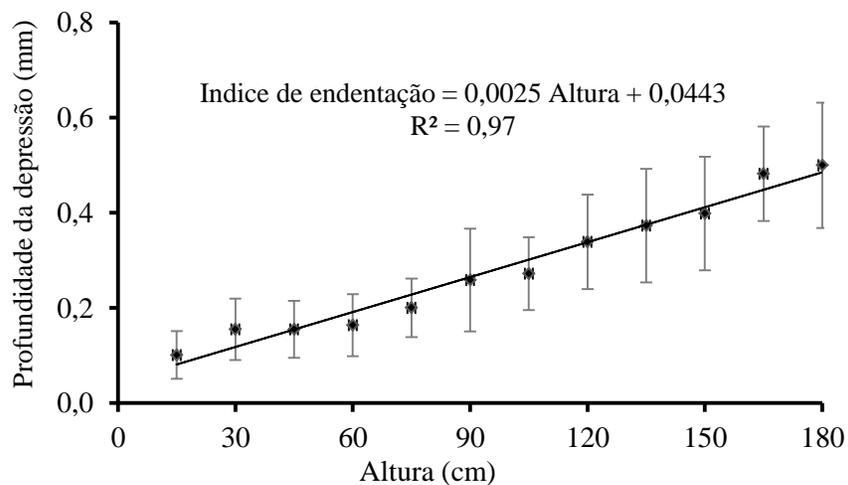


Figura16 Relação entre a endentação causada pela queda da esfera de aço e a altura de queda.

A partir da equação de regressão foi possível calcular o índice de endentação, para a altura máxima de queda de 180 cm (ASTM, 2011). Este índice representa o padrão de comparação da resistência das diversas madeiras para este tipo de esforço e expressa que quanto menor, melhor é a resistência da madeira para este tipo de esforço. O valor do índice de endentação para a madeira de teca jovem foi de 0,490. Este valor pode ser considerado alto se comparado com madeiras comerciais usadas para pisos, como são as madeiras de Cumaru (0,186) e Ipê (0,241), valores determinados por Oliveira (2015). De acordo com os valores de classes de qualidade estabelecidas pela citada autora, a madeira de teca pode ser classificada como de baixa resistência para este tipo de esforço, devendo-se evitar a queda de objetos que possam causar deformações e danos.

Os valores médios da depressão obtida nos corpos de prova após 500 ciclos de abrasividade encontram-se na Tabela 11. Observou-se alto desvio padrão em decorrência possivelmente da heterogeneidade do material.

Tabela 11 Valores médios de depressão no ensaio de abrasividade

Estatísticas	Depressão por abrasividade (mm)
N	43
Média	0,10
Máximo	0,34
Mínimo	0,04
Desvio padrão	0,06

O valor médio da depressão resultante do ensaio de abrasividade foi de 0,10. Este valor pode ser considerado alto. Após o ensaio foi possível observar diretamente nos corpos de prova que a madeira foi visivelmente afetada pelo efeito abrasivo dos rebolos. É importante mencionar que os corpos de prova não receberam nenhum produto de acabamento. Portanto, os valores de abrasividade

encontrados representam a resistência superficial da madeira e não de uma possível camada de revestimento.

Ao comparar os resultados com a depressão obtida por abrasividade em outras espécies potenciais para pisos, os valores neste estudo foram superiores, como por exemplo, pisos de *Eucalyptus cloeziana* (0,055 mm) e Edge Glued Panel- EGP de bambu-*Pinus* (0,08 mm), citados por Cortez-Barbosa et al. (2014) e Martins et al. (2013). Neste ultimo, os pisos de bambu, obtiveram valores de depressão 20% menor.

Na Figura 17 encontra-se o teste de comparação múltipla e os valores médios dos coeficientes de atrito dinâmico e estático da madeira de teca para os três tipos de acabamento.

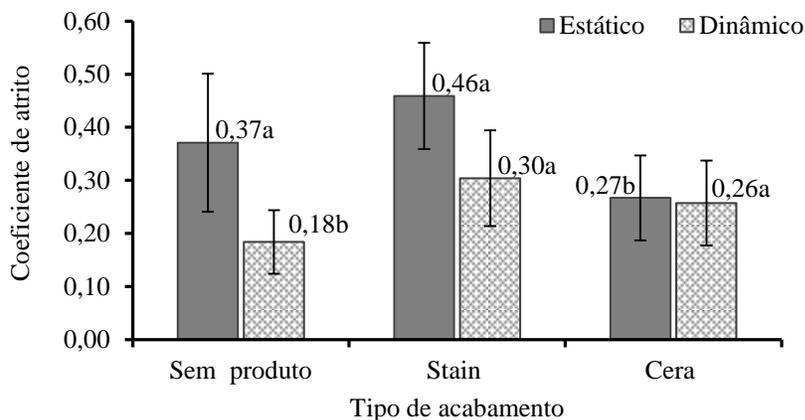


Figura 17 Comparação múltipla das médias dos coeficientes de atrito estático e dinâmico para a madeira de teca.

Médias seguidas por pelo menos uma mesma letra, para o mesmo fator de comparação, não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

Pode-se observar que o tratamento de acabamento com cera apresentou menores valores de atrito estático. Devido à superfície mais lisa é necessário menor força para iniciar o movimento. Em termos práticos representa a

resistência ao escorregamento, que no caso da madeira com cera, pode ser mais escorregadia. Entretanto, para o coeficiente de atrito dinâmico a madeira sem produto de acabamento apresentou o menor valor, indicando menor força necessária para a continuidade do movimento. O coeficiente de atrito para a madeira com *stain* e para a madeira com cera foram superiores aos valores para madeira sem acabamento. Este resultado difere do esperado, pois a presença de acabamento deveria apresentar menor valor de coeficiente de atrito, exigindo menor força para manter o movimento após início do mesmo. Contudo, de acordo com Li, Gong e Li (2013) diversas características do material e suas propriedades superficiais resultam nas características não lineares do atrito. Este fato é devido à influência sobre a força e a velocidade de deslizamento, resultando em espectro complexo de movimentos. Isto pôde ser verificado neste estudo sendo ampla a variação dos dados obtidos no ensaio e que o atrito dinâmico na madeira sem acabamento tenha sido o mais baixo.

De acordo com a classificação de Oliveira (2015), que avaliou madeiras comerciais, o coeficiente de atrito para madeiras mais densas foi maior. Particularmente, o coeficiente de atrito dinâmico para a madeira de teca sem acabamento (0,18) assemelhou-se ao determinado pela citada autora para a madeira de Cumarú e Sucupira, ambos com 0,17, que foram classificadas com de qualidade intermediária. Para a madeira com cera e *stain* os valores não apresentaram diferença estatística significativa, porém, foram mais altos que na madeira sem acabamento. A resistência ao escorregamento, portanto, foi satisfatória, sendo apta para utilização em decks, assoalhos em ambientes externos.

## 5.2 Ensaio de envelhecimento acelerado

### 5.2.1 Variação das coordenadas colorimétricas

Em geral, foi observado que a aplicação do *stain* promoveu redução da luminosidade na madeira ( $L^* = 42,39$ ) e o acabamento com a cera incolor apresentou maior valor de luminosidade ( $L^* = 53,09$ ). Este fato pode ter ocorrido em virtude do brilho proporcionado por este produto de acabamento. Considerando que o *stain* não forma uma película sobre a superfície da madeira, era de se esperar menor valor do brilho e conseqüentemente menor valor em sua luminosidade.

Quanto à coordenada  $a^*$  (vermelha), observou-se que o acabamento com *stain* apresentou maior incidência ( $a^* = 11,12$ ) que os outros dois tratamentos. Este valor representa o realce da cor do cerne da madeira, em que durante a aplicação da cera incolor, pôde-se observar maior tendência para a cor amarela.

Na Tabela 12 é apresentado o resumo da análise de variância das coordenadas cromáticas para a madeira de teca, em função do acabamento e do tempo de envelhecimento. Pode-se observar que houve diferença estatística significativa entre os tipos de acabamento e entre os tempos de envelhecimento para as coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ .

Também observou-se que não houve interação significativa entre o tipo de acabamento x tempos de envelhecimento para as coordenadas  $L^*$  e  $a^*$ . Entretanto, para a variável  $b^*$  foi observada interação significativa. Os baixos valores de coeficiente de variação experimental indicam a adequada escolha do delineamento.

Tabela 12 Resumo da análise de variância para os valores das coordenadas cromáticas

Fonte de variação	Quadrado médio das coordenadas cromáticas			
	GL	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Acabamento (A)	2	5.685,23*	124,01*	1.339,82*
Tempo envelhecimento (T)	4	133,83*	15,50*	86,56*
A x T	8	7,24 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	14,76*
Erro	285			
Média	--	49,21	10,18	23,64
Coefficiente de Variação (%)	--	6,07	6,15	8,49

\*= Significativo a 5%. ns= não significativo a 5%.

A comparação múltipla das médias para os valores das coordenadas cromáticas da madeira de teca com diferentes acabamentos está apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 Comparação múltipla das médias para os valores das coordenadas cromáticas na madeira de teca, com diferentes acabamentos

Acabamento	Médias das coordenadas cromáticas			
	$L^*$		$a^*$	
Cera incolor	53,09 a	(3,18)	9,43 a	(0,71)
Sem produto	51,81 b	(3,54)	10,09 b	(0,67)
Stain	42,39 c	(2,68)	11,12 c	(0,76)

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra na vertical não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Tukey. Os valores entre parênteses representam os desvios padrões.

As coordenadas  $L^*$  e  $a^*$  na cor do cerne estão correlacionados com a quantidade de extrativos presentes na madeira. Já a cor amarela se relaciona à fotoquímica dos principais componentes da madeira, em particular a lignina (GIERLINGER et al., 2004). Os valores médios apresentaram luminosidade

menor, menor incidência da cor amarela e mais tom vermelho que a madeira de plantações na Costa Rica conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14 Comparação de valores de coordenadas cromáticas para madeira de teca em diferentes locais

Local	Acabamento	$L^*$	$a^*$	$b^*$	Fonte
Costa Rica	Natural	58,2	8,9	29,6	Valverde e Moya (2013)
	Stain	53,4	12,3	34,4	
Costa Rica		62,35	9,47	28,59	Moya e Marín (2011)
Índia		56,34	6,85	23,44	Thulasidas, Bhat e Okuyama (2006)

Comparando com o cerne de árvores que crescem em plantações na Índia, os valores do tom vermelho neste estudo foram menores que os determinados por Thulasidas, Bhat e Okuyama (2006). Esta variação nas características da cor nos vários locais pode ser devida à composição da lignina da madeira que se desenvolve em solos com diferentes propriedades (MOYA; BERROCAL, 2010).

Decréscimos na coordenada  $L^*$  resultam em aumento da coordenada  $a^*$  e coordenada  $b^*$ , indicando relação entre as mesmas, por isso foi necessário realizar a análise de regressão para verificar a relação funcional entre as coordenadas cromáticas para os três tipos de acabamento. As referidas análises encontram-se apresentadas na Figura 18.

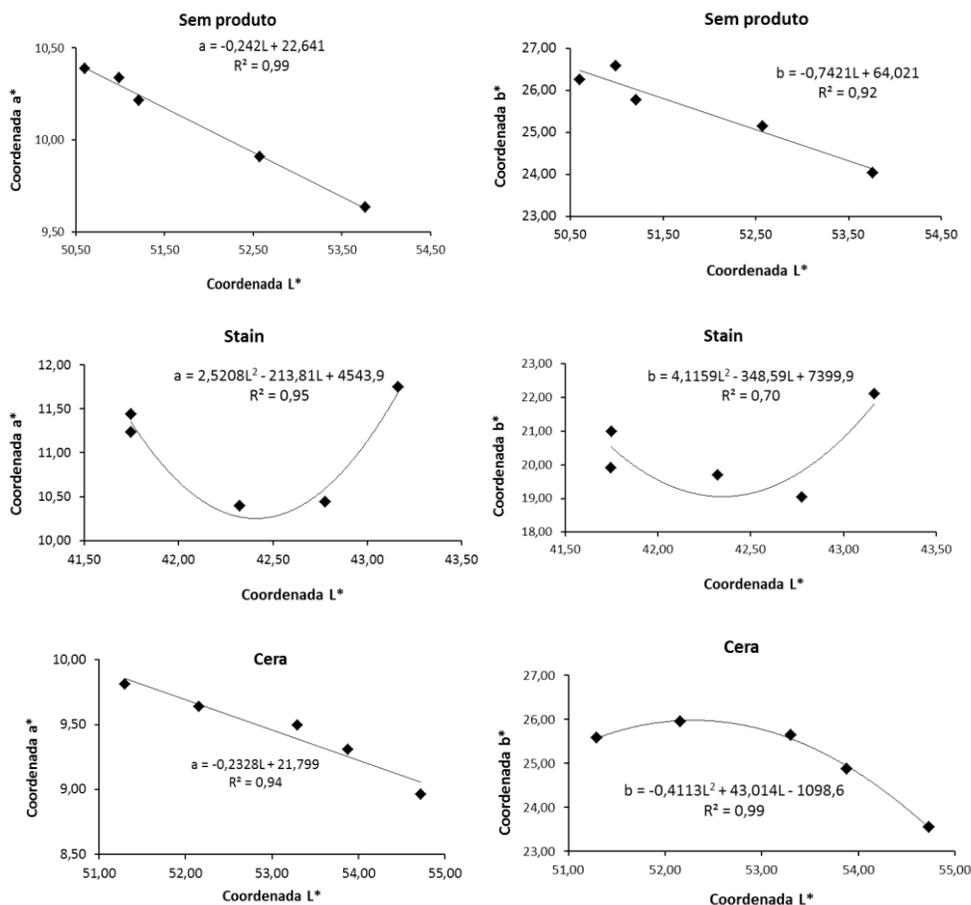


Figura 18 Relação funcional entre as coordenadas  $L^*$  e  $a^*$  e  $L^*$  e  $b^*$  para os diferentes tipos de acabamento.

As melhores relações foram apresentadas entre as coordenadas cromáticas  $L^*$  e  $a^*$  para a madeira sem produto de acabamento. Os coeficientes de determinação foram de 0,99 e 0,92, para  $a^*$  e  $b^*$ , respectivamente. Observa-se que houve relação linear inversa entre as coordenadas  $L^*$  (luminosidade) e  $a^*$  (vermelho) e entre  $L^*$  e  $b^*$  (amarelo). Entretanto para a madeira com *stain* o ajuste de modelo polinomial de 2 grau indicou que ocorreu um ponto de inflexão na curva com  $L^* = 42,50$ . Neste caso, o valor da coordenada  $a^*$  e  $b^*$  também

apresentam tendência ao aumento. Para a madeira com cera, foi observada relação linear inversa entre as coordenadas, sendo que a variação da cor da madeira é produzida por uma variação linear inversa entre  $L^*$  e  $a^*$  com  $R^2$  de 0,94 e tendência logarítmica para  $L^*$  e  $b^*$  com adequado ajuste e  $R^2$  de 0,99.

Os valores de  $R^2$  para a relação funcional entre as coordenadas cromáticas  $L^*$  e  $a^*$  e,  $L^*$  e  $b^*$  foram superiores que os encontrados por Moya e Berrocal (2010), cujos valores de  $R^2$  para cerne e alburno foram de 0,38 e 0,43, respectivamente. Moya e Marín (2011) ao avaliarem a relação entre as coordenadas cromáticas também determinaram valores baixos de coeficientes de determinação, diferente ao relatado neste estudo.

Com o intuito de verificar a relação entre a variação das coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  em função do tempo de envelhecimento, foram ajustadas regressões lineares a partir das médias das coordenadas cromáticas como observado nas Figuras 19, 20 e 21.

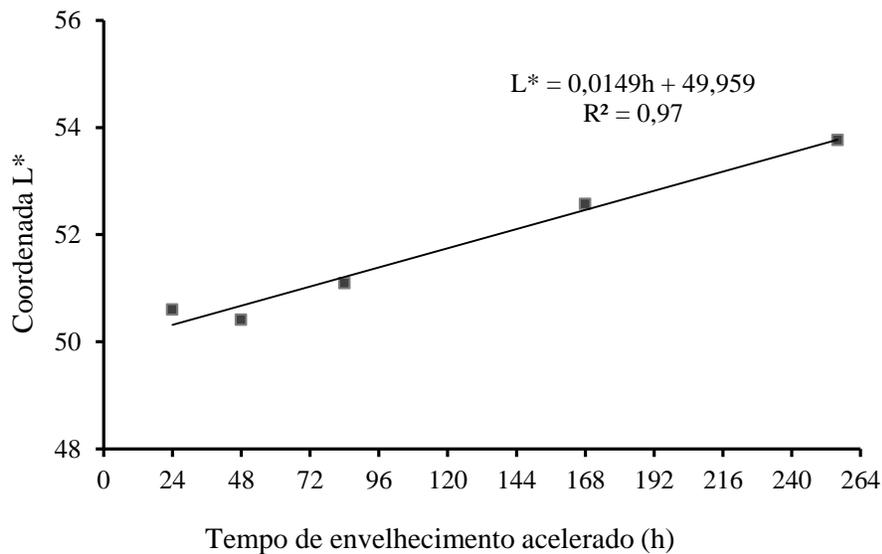


Figura 19 Variação da coordenada  $L^*$  em função do tempo de envelhecimento.

Na Figura 19 pode-se observar a relação direta entre as variáveis, em que, com o incremento do tempo de exposição ao envelhecimento acelerado ocorreu aumento da luminosidade  $L^*$ . Para as coordenadas  $a^*$  (vermelho) e  $b^*$  amarelo (Figuras 20 e 21), foi observado decréscimo em função do tempo de envelhecimento, sendo concordante com o aumento da coordenada  $L^*$  para as madeiras que tendem ao clareamento.

Aumentos na coordenada  $L^*$  resultam em decréscimos nas coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  o que foi observado. Contudo os resultados diferem da literatura, no sentido de que com o aumento do tempo de envelhecimento ocorre diminuição da luminosidade (HUANG et al., 2012; OZGENC; HIZIROGLU; YILDIZ, 2012; TOLVAJ et al., 2016). Esta diferença deve estar associado as espécies estudadas por esses autores que foram madeiras de gimnospermas, cuja tendência é o escurecimento. Em madeiras como a teca com alta quantidade de extrativos (HAUPT et al., 2003; KOKUTSE et al., 2006) a tendência é o clareamento devido ao acúmulo de foto degradados da lignina (FEIST, 1983; HON, 2001).

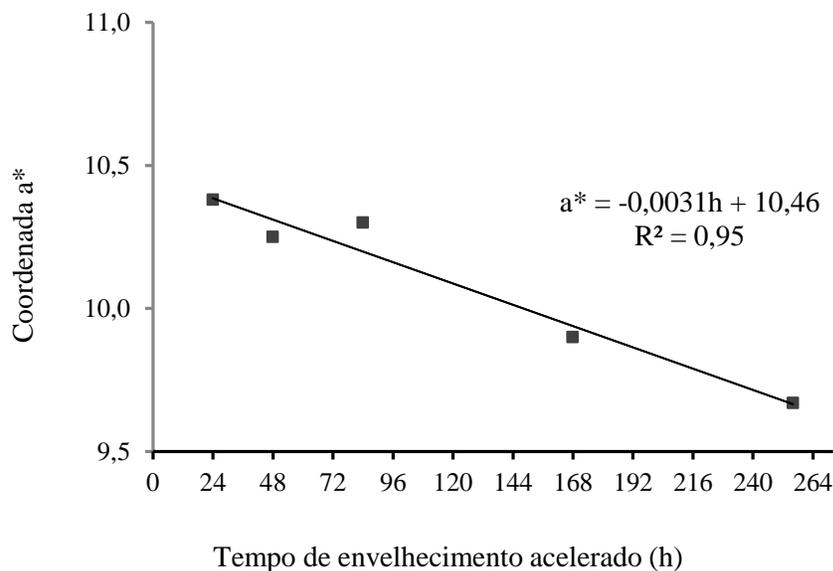


Figura 20 Variação da coordenada  $a^*$  em função do tempo de envelhecimento acelerado.

Quedas em luminosidade foram registradas a partir de 240 horas de envelhecimento acelerado em madeiras de tauari, marupa e cumaru, em estudo realizado por Telles (2014), diferente ao determinado no presente estudo. Também Nzokou e Kandem (2006) em madeira de carvalho encontraram diminuição desta variável e estabilização da luminosidade a partir de 200 horas de exposição. Estudos em madeiras tratadas e não tratadas termicamente de algumas espécies de coníferas determinaram diminuição da luminosidade a partir de 336 horas (OZGENC; HIZIROGLU; YILDIZ, 2012) e 72 horas de exposição (HUANG et al., 2012).

Para o desdobramento da coordenada colorimétrica  $b^*$  (Figura 21) em função do tempo de envelhecimento, houve interação significativa em função do tempo de envelhecimento e por tipo de acabamento. A variação para a madeira sem acabamento e a madeira com cera apresentaram tendência linear de decréscimo com altos coeficientes de determinação. Entretanto, para a madeira

com *stain* foi verificado que o ajuste do modelo logarítmico, representou melhor esta relação, com alto coeficiente de determinação.

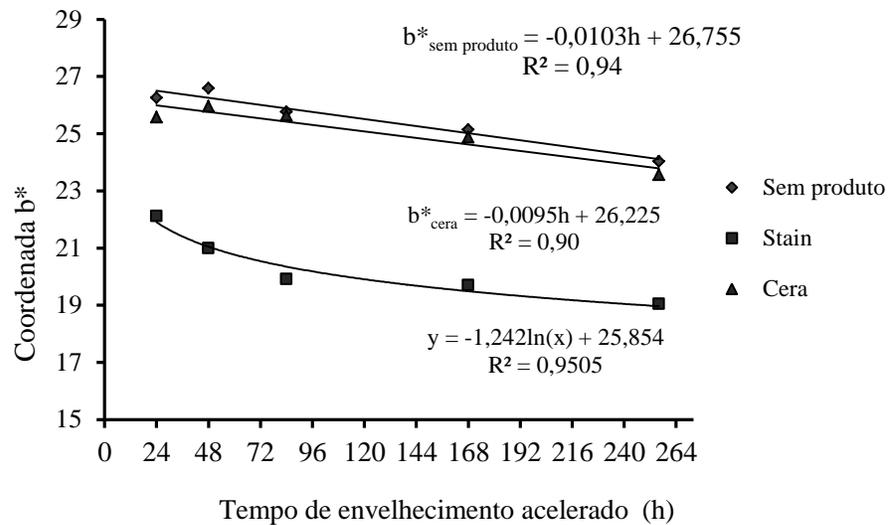


Figura 21 Variação da coordenada  $b^*$  em função do tempo de envelhecimento por tipo de acabamento

Na Figura 22 pode-se observar a mudança da cor da superfície da madeira em função do tempo de envelhecimento para os três tipos de acabamento na madeira. Para a madeira sem produto de acabamento, observa-se leve amarelecimento a partir do ciclo de 168 horas.



Figura 22 Superfície da madeira teca para os três tratamentos antes e depois do envelhecimento acelerado

Para a madeira com *stain* a mudança de cor foi mais estável, porém pôde ser observado para os ciclos de 168 horas e 256 horas o aparecimento de rachaduras superficiais. Isto pôde ter acontecido devido à perda por erosão do

acabamento e também ao efeito combinado da radiação ultravioleta, ciclos de spray e condensação, resultando em rachaduras e trincas superficiais em decorrência da saída da água.

A madeira tratada com cera incolor apresentou maior tendência ao amarelecimento a partir de 168 horas e tons mais amarelos devido a possíveis resíduos, produto dos componentes orgânicos deste tipo de acabamento.

### 5.2.2 Variação total de cor na madeira ( $\Delta E$ )

A variação total da cor da madeira foi determinada em função do tempo de envelhecimento por meio da Equação 5 (pág. 50). Posteriormente, foram ajustados os modelos de regressão que indicam a variação para cada tipo de acabamento. Os ajustes apresentaram-se bons, com altos coeficientes de determinação (Figura 23).

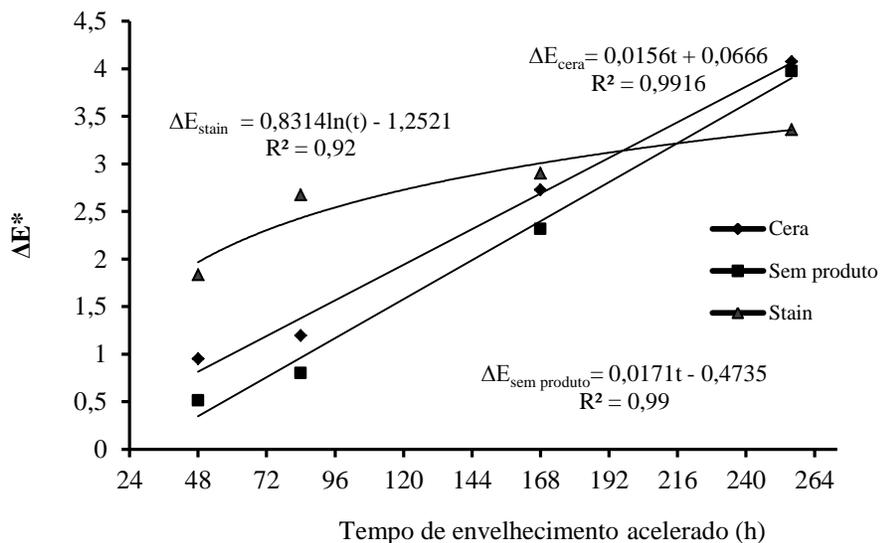


Figura 23 Relação entre a variação global de cor na madeira natural em função do tempo.

A madeira sem produto de acabamento e a madeira tratada com cera incolor apresentaram tendência linear de aumento da variação da cor em função do tempo. Para a madeira tratada com *stain* o modelo logarítmico apresentou o melhor ajuste, sendo que a partir de 168 horas de envelhecimento ocorreu estabilização. Os modelos de variação da cor estão de acordo com a variação da cor nos estágios iniciais do envelhecimento. Esses resultados já foram descritos em estudos anteriores (OZGENC; HIZIROGLU; YILDIZ, 2012; PANDEY, 2005b; TEMIZ et al., 2005; TOLVAJ; PERSZE; ALBERT, 2011).

A variação total de cor ( $\Delta E$ ) em função do tempo de envelhecimento acelerado para a madeira sem acabamento e para a madeira com cera foram classificadas segundo Dirckx et al. (1992) como mudança apreciável, já para madeira com *stain* a mudança nesta mesma classificação foi perceptível, sendo resultado da maior proteção oferecida por este acabamento contra a descoloração.

As mudanças de cor na madeira de teca podem ser atribuídas à influência dos extrativos, os quais, sendo solúveis em água, foram facilmente lavados pelo efeito do spray e condensação. Este fato foi observado durante o processo, em que a água proveniente do efeito do spray, continha grande quantidade de extrativos retirados dos corpos de prova, que tornaram a água de cor amarelo-laranja.

Comportamentos similares em relação à variação total da cor em função do envelhecimento acelerado foram determinados por Silva e Pastore (2004) para madeira de jatobá. Neste caso, a variação de cor ocorreu em menor medida para a madeira com produtos de acabamento como no caso do *stain*. Desta forma a aplicação de produtos de acabamento reduz a variação de cor global após ensaios de intemperismo (VALVERDE; MOYA, 2013).

A finalidade do acabamento para usos em ambiente externo é evitar a degradação física principalmente da cor da madeira. Se o acabamento é de baixa

resistência, a madeira irá degradar rapidamente, resultando numa maior alteração de cor com a exposição ao intemperismo. Portanto, formulações químicas em acabamentos destinam-se a evitar a fotodegradação (VALVERDE; MOYA, 2013). O acabamento com cera incolor apresentou altos níveis de variação de cor, atribuído principalmente aos compostos orgânicos presentes neste produto com aumento maior da variação da cor. Assim, é recomendável a não utilização da cera na madeira de teca como proteção para ambientes externos.

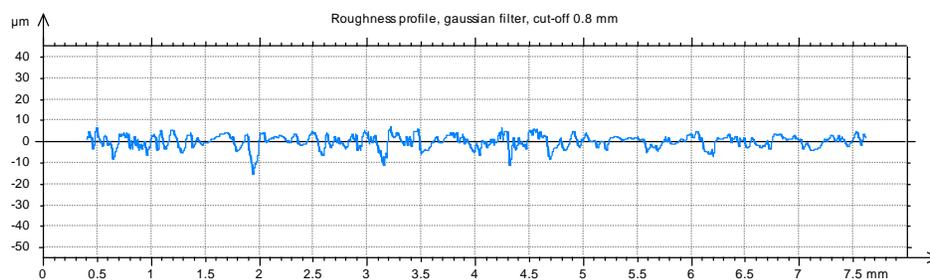
Valores de  $\Delta E$  maiores a 1,5 foram determinados por Moya e Calvo-Alvarado (2012) para madeira de teca na Costa Rica. Valverde e Moya (2013), também na Costa Rica, determinaram valores de  $\Delta E$  classificados como muito apreciáveis segundo a classificação de Dirckx et al. (1992) para a madeira de teca.

### **5.2.3 Variação na rugosidade da madeira e desgaste da superfície**

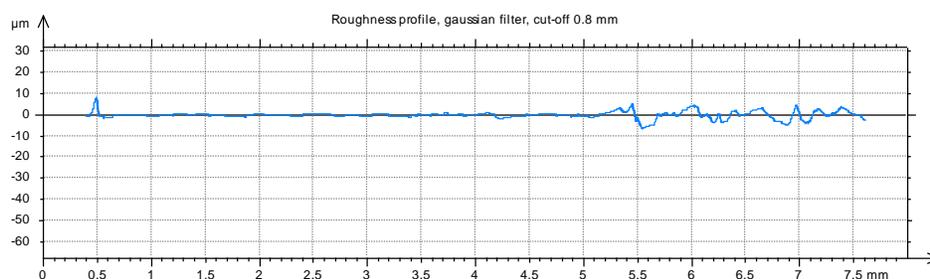
O valor do parâmetro ( $Ra$ ) de rugosidade da superfície de madeira com *stain* apresentou valores menores ( $Ra = 1,12$ ), sendo que a aplicação destes produtos diminuiu as irregularidades da superfície, tornando-a menos rugosa que a madeira sem produto de acabamento ( $Ra = 2,48$ ) e a madeira com cera ( $Ra = 1,90$ ). A teca apresenta porosidade em anel semicircular e a superfície de vasos e fibras geram as irregularidades que são captadas pela agulha do rugosímetro sobre a superfície. Os produtos de acabamento penetram nas irregularidades (cavidades) reduzindo a magnitude dos espaços vazios, que resultam em menores valores da rugosidade. Para o parâmetro ( $Rz$ ) que indica a média de 5 valores mais altos (picos) e mais baixos (vales) durante a medição, foi observada diferença entre os tratamentos. A madeira sem produto de acabamento apresentou maior valor de  $Rz$ , indicando presença de picos e vales, os quais foram diminuídos com a aplicação tanto da cera como do *stain*.

Observou-se predominância de picos e vales acima e abaixo da linha média assim como picos únicos de maior magnitude, os quais representam aumento na rugosidade máxima ( $R_t$ ), conforme pode-se observar na Figura 25a. A ocupação, mesmo que parcial, dos vazios dos elementos celulares pelos produtos resultou em diminuição dos valores dos picos e dos vales na superfície da madeira, conforme pode ser observado na Figura 25b para o *stain* e na Figura 25c para a cera incolor.

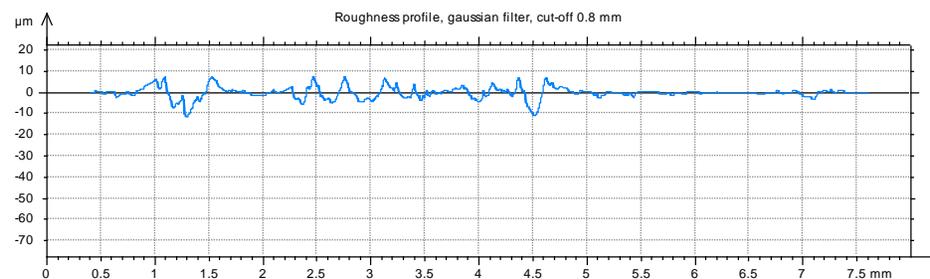
O acabamento com *stain* tendo a capacidade de penetrar na madeira, sem formar película resultou em superfície mais lisa e conseqüentemente proporcionou menores valores para todos os parâmetros. A maior rugosidade na madeira sem acabamento pode ser resultado de células esmagadas e a camada superficial de poeiras resultado do processo de lixamento. Moura e Hernandez (2005), relataram que ao aplicar o *stain* estas partículas podem ser removidas dando passo ao preenchimento das cavidades celulares. Contudo, a presença das partículas do processo de lixamento podem interferir negativamente na ancoragem dos produtos de acabamento, dando à superfície da madeira uma proteção inadequada, pois estes resíduos facilitam o “desplacamento” do produto aplicado.



a) sem acabamento



b) acabamento com stain



c) acabamento com cera incolor

Figura 25 Perfil de rugosidade para a madeira de teca em que a) sem produto de acabamento; b) *stain* e c) cera incolor.

Na Tabela 15 está apresentado o resumo da análise de variância para os efeitos do tipo de acabamento e os ciclos de envelhecimento na rugosidade da superfície da madeira de teca.

Tabela 15 Resumo da análise de variância para os parâmetros de rugosidade

Fonte de Variação	Quadrado médio			
	GL	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rt</i>
Acabamento (A)	2	84,34*	2385,71*	5250,11*
Tempo envelhecimento (T)	4	3,81*	82,24*	337,93*
A x T	8	0,22 <sup>ns</sup>	21,11 <sup>ns</sup>	139,81 <sup>ns</sup>
Erro	547			
Média	--	1,81	10,21	19,36
CV%	--	35	39	54

\*= Significativo a 5%, ns= não significativo a 5%, CV%= Coeficiente de variação, Ra=Rugosidade média, Rz=Rugosidade total, Rt= Rugosidade máxima

De acordo com a análise de variância, houve diferença estatística significativa para o tipo de acabamento e o tempo de envelhecimento para os parâmetros de rugosidade *Ra*, *Rz* e *Rt*. O efeito da interação entre o acabamento e o tempo de envelhecimento foi não significativo indicando a não dependência entre os fatores avaliados.

O teste de comparação múltipla e os valores médios para os parâmetros de rugosidade por tipo de acabamento encontram-se na Figura 24. Observa-se a diferenças estatísticas significativas dos valores de rugosidade para todos os acabamentos, sendo os valores mais baixos observados para a superfície da madeira com *stain*.

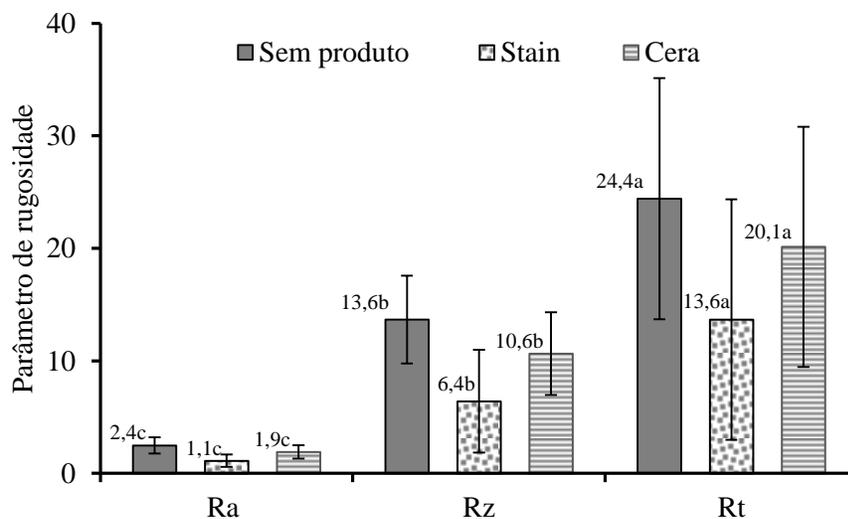


Figura 24 Comparação múltipla dos valores médios para os parâmetros de rugosidade, por tipo de acabamento, na madeira de teca. Médias do mesmo parâmetro de rugosidade seguidas por pelo menos uma mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

A análise de regressão para os valores médios dos parâmetros de rugosidade em função do tempo de envelhecimento mostrou-se que para o parâmetro *Ra*, houve tendência a estabilização. Para os parâmetros *Rz* e *Rt* foi observado incremento a partir de 84 horas de envelhecimento (Figura 25).

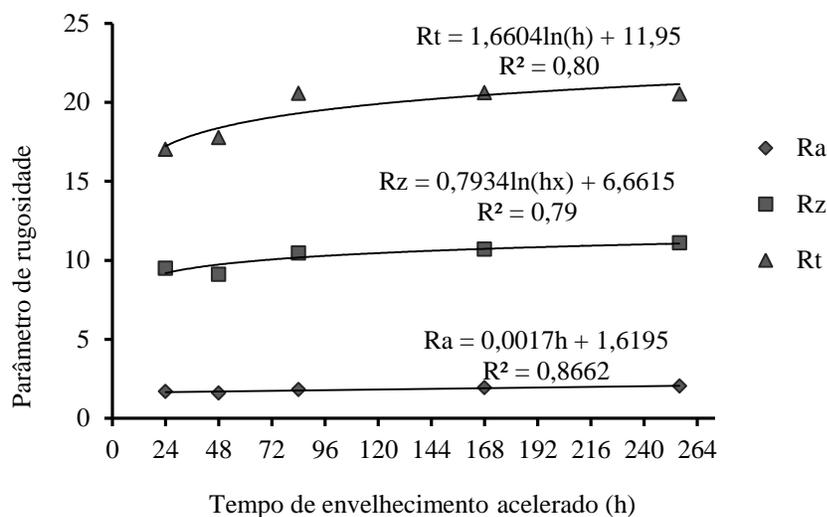


Figura 25 Variação dos parâmetros de rugosidade em função do tempo de envelhecimento

Para o parâmetro de rugosidade total ( $R_z$ ) e de rugosidade máxima ( $R_t$ ) ocorreu aumento a partir de 84 horas de exposição. O efeito dos ciclos de envelhecimento, devido ao aumento dos ciclos de irradiação e a ação principalmente da umidade pode causar erosão da superfície e com consequência aumento do valor destes parâmetros.

Devido às características anatômicas e a lavagem dos fragmentos dos elementos celulares em decorrência dos ciclos de envelhecimento acelerado, os parâmetros de rugosidade tendem a apresentar aumento de suas magnitudes. Ncube e Meincken (2010) avaliando a rugosidade de madeiras com acabamento de seladora mais tinta de emulsão acrílica e a madeira sem acabamento determinaram incrementos na rugosidade entre as 50 e 100 horas, possivelmente atribuídas à anatomia da madeira.

A porosidade, em anel semicircular, característica da madeira de teca pode ser condicionante da aparência da superfície madeira. Esse aspecto interfere nos valores do parâmetro da rugosidade máxima ( $R_t$ ) que é encontrada

nas maiores profundidades, como nas cavidades celulares, provavelmente nos vasos. Resultado similar em relação a influência dos vasos na rugosidade foi encontrada por Hiziruglu et al. (2008), após envelhecimento natural por 4 semanas em madeiras de porosidade em anel, na Malásia.

#### 5.2.4 Espectroscopia do infravermelho próximo (NIR)

Os espectros de refletância difusa da superfície da madeira de teca compreendidos no intervalo de 8000 a 3.700  $\text{cm}^{-1}$  apresentaram tendência semelhante, com bandas típicas de vibração e picos de absorção evidenciando os grupos funcionais característicos dos componentes químicos da madeira: celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos (Figura 26). Também é possível observar que à medida que aumenta o tempo de envelhecimento acelerado ocorreu diminuição na absorção, como evidenciado pelas diferentes curvas dos espectros (Figura 26).

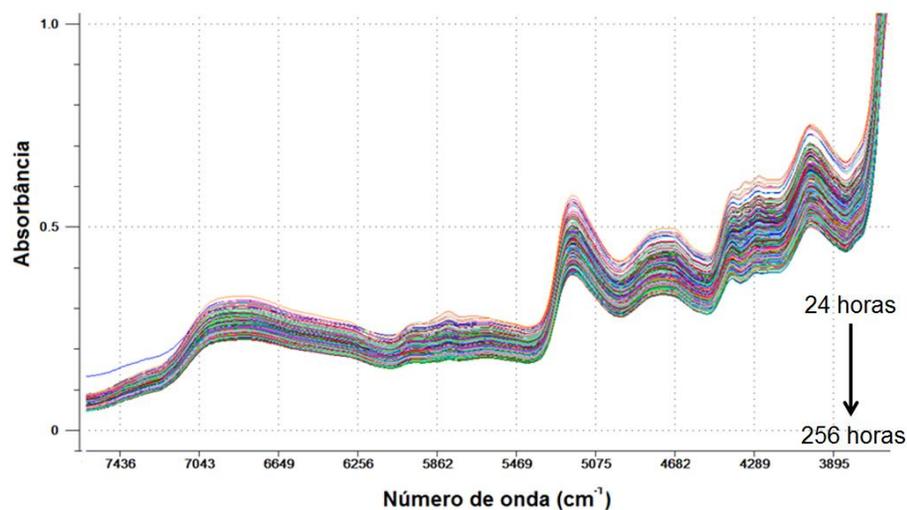


Figura 26 Espectros originais NIR da madeira de teca, com diferentes acabamentos e tempos de envelhecimento.

Para evidenciar os possíveis grupos funcionais das substâncias que foram degradadas e lixiviadas durante o envelhecimento acelerado construiu-se a curva da inclinação pelo número de onda (Figura 27). A curva foi construída por meio da primeira derivada da média da absorbância dos espectros anteriormente descritos em função do número de onda. Para o referido procedimento levou-se em consideração que os espectros apresentam picos das bandas de absorbância no mesmo número de onda ou em intervalos muito próximos.

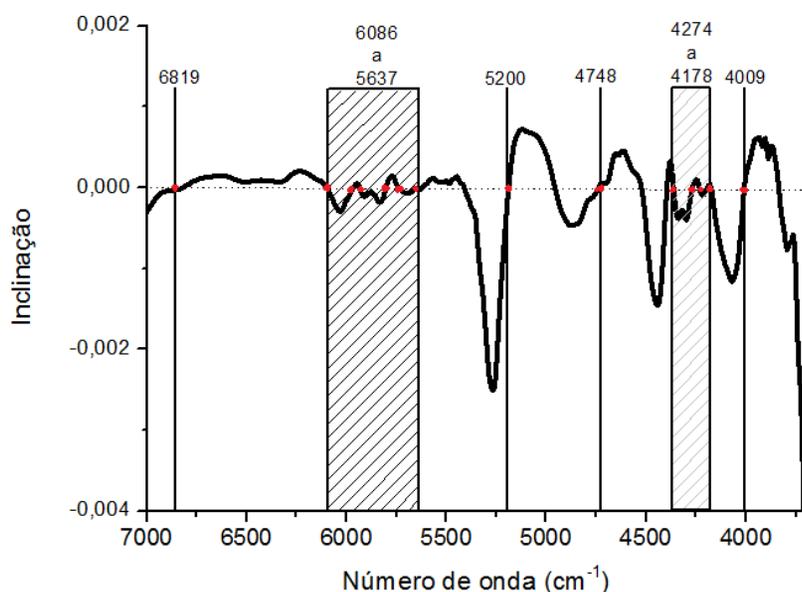


Figura 27 Primeira derivada da média dos espectros NIR da madeira de teca, utilizado com os referentes números de onda dos picos das bandas de absorção de radiação.

A primeira derivada permitiu localizar os picos das bandas de absorção dos espectros, os quais podem ser evidenciados no encontro da curva com a linha tracejada e nos pontos de interseção entre as linhas verticais e os intervalos hachurados (Figura 27). Estes picos apresentam inclinação zero.

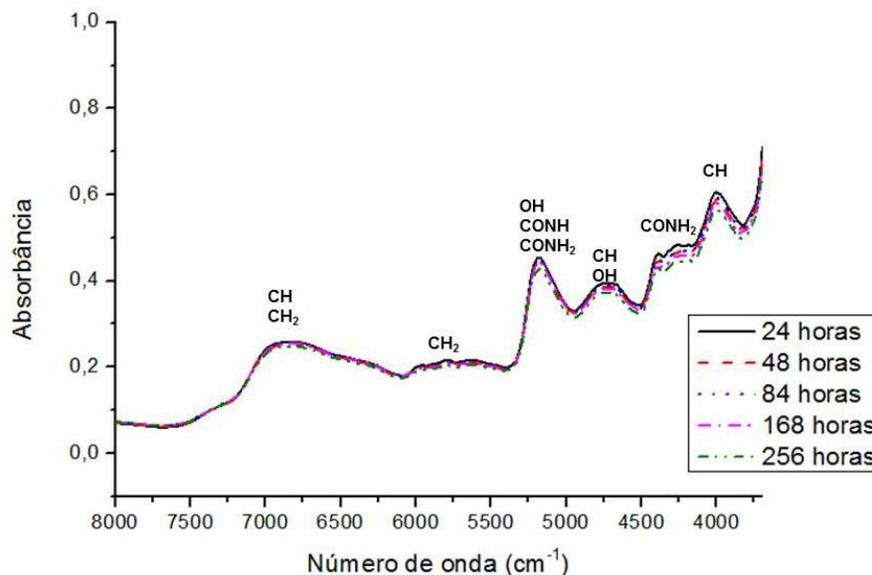


Figura 28 Espectros médios NIR em função do tempo de envelhecimento acelerado com os principais grupos funcionais na superfície da madeira de teca.

O primeiro pico registrado com número de onda  $6.819\text{ cm}^{-1}$  (Figura 28) é característico do estiramento de ligações de grupos C-H e C-H<sub>2</sub>, presentes na lignina, celulose e extrativos da madeira, nesta região são associados especialmente, mudanças na cor da madeira (KELLEY et al., 2004; SCHWANNINGER; RODRIQUES; FACKLER, 2011). O segundo pico, ocorre entre o intervalo  $6.086\text{ cm}^{-1}$  e  $5.637\text{ cm}^{-1}$  que pode ser atribuído a estiramentos nos grupos C-H<sub>2</sub> muito frequentes na lignina. O estiramento de grupos hidroxila (OH) da região cristalina da celulose e hidroxilas de hemiceluloses ligadas à água ocorre no terceiro pico em  $5.200\text{ cm}^{-1}$  que também é característico de grupos CONH-R e CONH<sub>2</sub>, provavelmente oriundos de extrativos da madeira. O quarto pico  $4.748\text{ cm}^{-1}$  se refere à deformação da ligação C-H e estiramento da ligação O-H, da celulose e lignina. Em  $4.274\text{ cm}^{-1}$  a  $4.178\text{ cm}^{-1}$  observa-se uma

banda de absorção por sobreposição de picos referentes a estiramentos das ligações O-H e C-O e estiramento das ligações C-H e C-C, todos relativos à celulose e lignina tal como encontrado em outros estudos (HEIN et al., 2010; POPESCU; POPESCU, 2013). Em  $4.009\text{ cm}^{-1}$  observa-se o pico que pode ser atribuído a estiramentos da ligação C-H da celulose e lignina da madeira.

Tanto a lignina como os extrativos possuem ligações duplas entre carbonos, estruturas moleculares rígidas e semirrígidas e grupos funcionais denominados de grupos cromóforos capazes de conferir uma coloração mais escura a madeira. Com o envelhecimento acelerado ocorre lavagem dos extrativos por meio do tratamento spray e oxidação da superfície, favorecida pela radiação ionizante UV que destroem extrativos e lignina, resultando em descoloração da madeira e consequente branqueamento (ALLOUI et al., 2007; DERBYSHIRE; MILLER, 1981; FEIST; HON, 1984; HON, 2001).

### **5.2.5 Análise de componentes principais - PCA**

A análise de componentes principais (PCA) em função do tempo de envelhecimento não mostrou agrupamento satisfatório, indicando que o tempo não influenciou na leitura do infravermelho próximo. Para a PCA em função do tipo de acabamento foram observadas diferenças espectrais entre os três acabamentos como mostram os scores da Figura 29. A componente principal 1 explicou 70% da variância e a componente principal 2 explicou o 20% da variância espectral. Neste caso, a análise PCA mostrou o agrupamento nos diferentes acabamentos. O agrupamento A foi formado pelos corpos de prova tratados com cera incolor, o agrupamento B pelos corpos de prova sem produto de acabamento e, finalmente, o agrupamento C que foi formado pelos corpos de prova tratados com *stain*. Este resultado corrobora com o encontrado na análise

de variância para as coordenadas colorimétricas. Foram observadas diferenças estatísticas significativas para os três acabamentos.

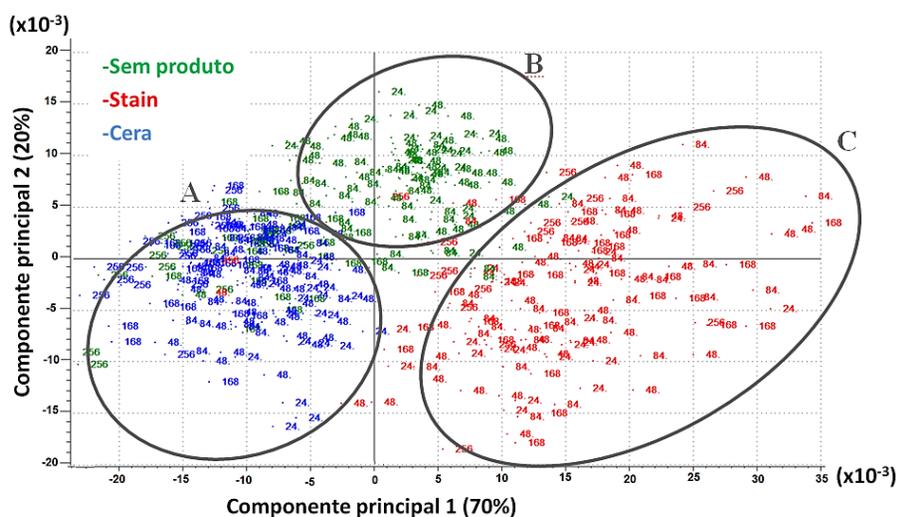


Figura 29 Análise de PCA agrupando os tipos de acabamento na superfície da madeira de teca.

### 5.2.6 Análises de regressão PLS para as coordenadas cromáticas

Para demonstrar melhor a relação dos valores da propriedade medida e a predita pelo NIR foram feitas as análises de regressão PLS, com intuito de determinar se o NIR mostra-se potencial para utilização na observação e predição dos parâmetros de cor e se estes estão associados.

A qualidade dos modelos de predição PLS foi avaliada por meio do coeficiente de correlação  $R^2$ , o erro quadrático médio da calibração RMSEc e o erro quadrático médio da validação RMSEv e o RPD. O melhor ajuste encontrado foi determinado por validação cruzada para os espectros tratados com a primeira derivada a partir de 6 variáveis latentes e usando 8 segmentos de 55 corpos de prova. Por inspeção visual foram eliminados os *outliers*. O teste de

incerteza (WESTAD; MARTENS, 1989) foi utilizado para selecionar os números de onda com coeficientes de regressão significativamente diferentes a partir do zero (Figura 30).

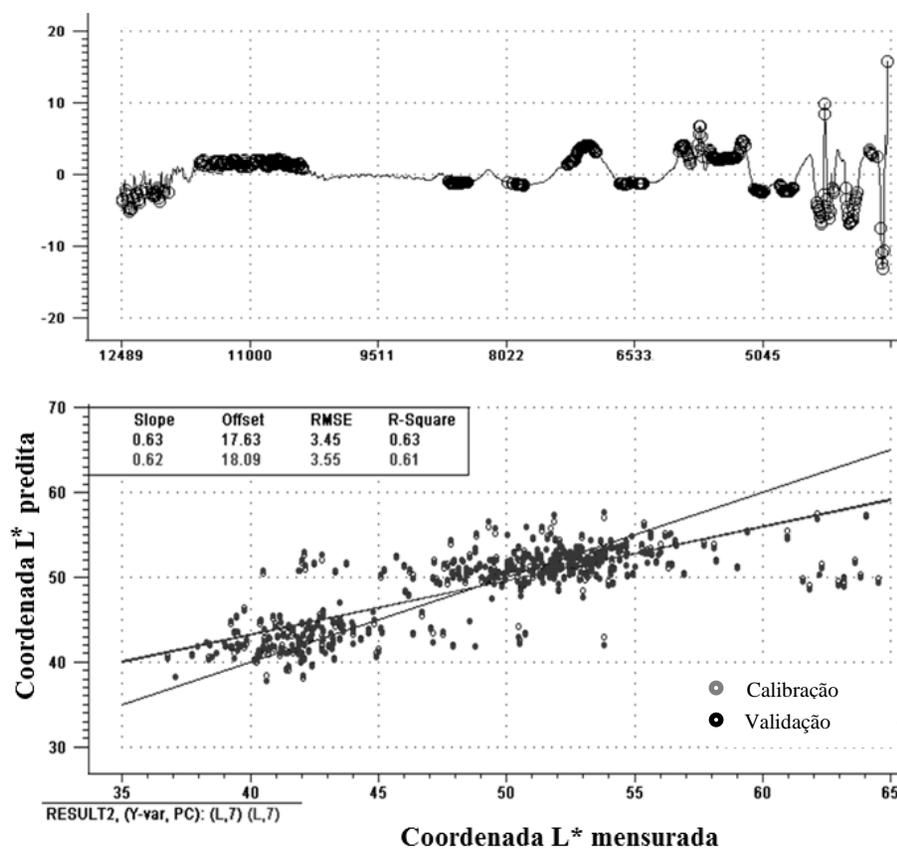


Figura 30 Resultados da análise de regressão PLS para predição da variável colorimétrica  $L^*$  com o teste de incerteza de Martens após ciclos de envelhecimento acelerado na superfície da madeira de teca.

O melhor modelo de predição para a variável  $L^*$  apresentou coeficiente de determinação para a calibração de 0,64 e para a validação de 0,62 indicando que a variável  $L^*$  predita com a espectroscopia na região do infravermelho e o valor medido apresentaram moderada relação entre eles. O RMSEp para o modelo foi de 3,45 e o RMSEv para a validação foi de 3,57. O RPD para a

variável  $L^*$  foi de 0,83. De acordo com William e Sobering (1993) o RPD permite comparar as calibrações entre diferentes propriedades, sendo que acima de 2,5 é considerado satisfatório para a seleção. Neste sentido, pode afirmar que o NIR apresenta-se como boa ferramenta de exploração, sendo passível de melhoria na robustez do modelo.

A variável colorimétrica  $a^*$  apresentou coeficiente de determinação de 0,56 para a calibração e de 0,54 para a validação, sendo ajustado e melhorado pelo teste de Martens para prever a variável (Figura 31). Os erros quadráticos médio da calibração e validação foram de 0,65 e 0,67, respectivamente. O RPD para a variável  $a^*$  de 0,93 foi mais alto que para a variável  $L^*$  sendo que os desvios do conjunto de dados se apresentaram menores.

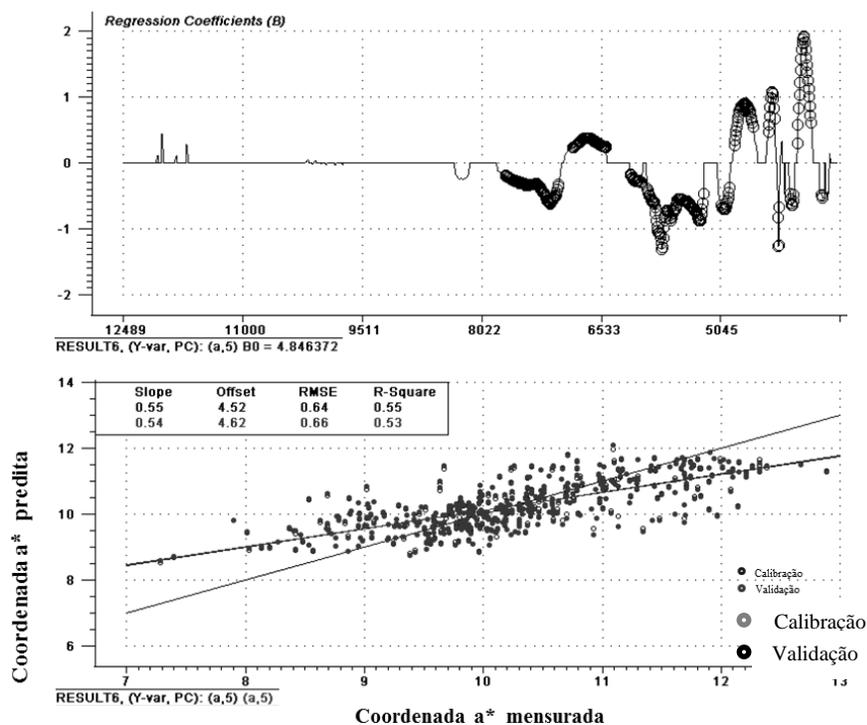


Figura 31 Resultados da análise de regressão PLS para predição da variável colorimétrica  $a^*$  com o teste de incerteza de Martens após ciclos de envelhecimento acelerado na superfície da madeira de teca.

Para a variável  $b^*$ , como pode ser observado na Figura 32, os coeficientes de determinação  $R^2 = 0,60$  e  $0,57$  indicam também boa correlação entre a coordenada colorimétrica medida e predita pelo NIR. O RPD para a variável  $b^*$  foi de  $0,93$ , similar a variável  $a^*$ .

Acredita-se que os modelos poderiam apresentar melhores coeficientes de correlação, isto se deve ao contraste de cores entre cerne e albarno na madeira de teca. Pôde-se observar pelos coeficientes de variação das mensurações, com o espectrofotômetro e a predição com o NIR.

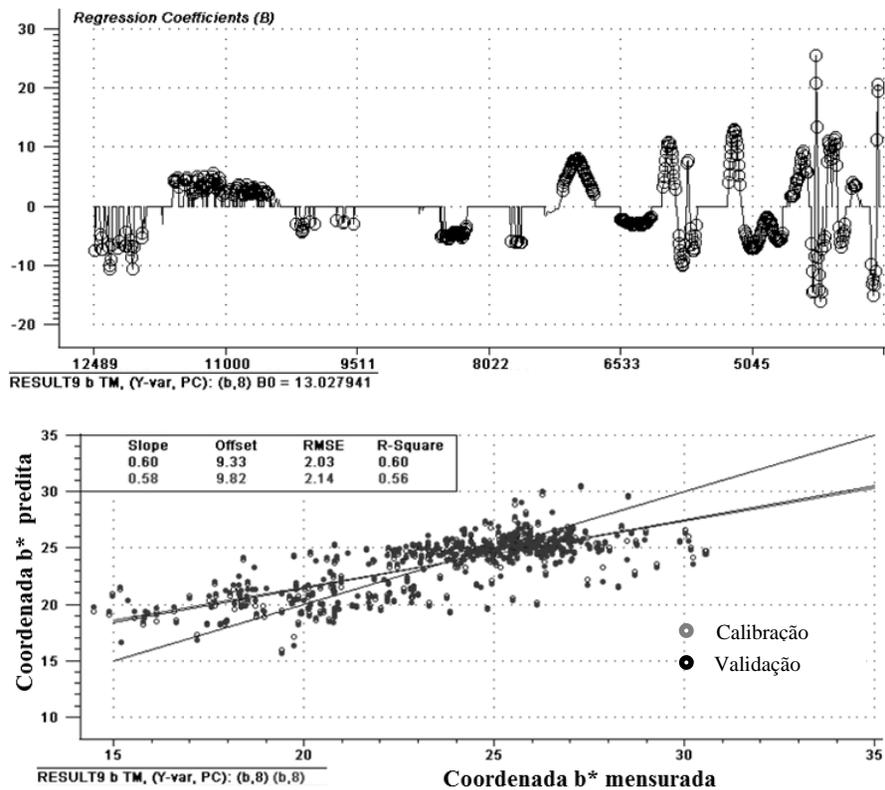


Figura 32 Resultados da análise de regressão PLS para predição da variável colorimétrica  $b^*$  com teste de incerteza de Martens, após ciclos de envelhecimento acelerado na superfície da madeira de teca.

Melhores coeficientes de correlação foram encontrados por Yang, Lv e Fu (2012) em madeira de rosewood (*Dalbergia*) com coeficientes de correlação entre os parâmetros mensurados e a predição com o NIR de 0,93 a 0,99. A diferença com este estudo pode estar relacionada à tonalidade, mais uniforme na cor da madeira utilizada, em comparação com a madeira da teca.

Esteves e Pereira (2008) avaliando madeira tratada de *Eucalyptus* sp. encontraram coeficientes mais altos, com coeficiente de determinação de mais de 95% e concluíram o bom potencial para predição da cor pelo NIR. Esta técnica, portanto, de acordo com os resultados do presente estudo, se apresenta potencial para predição e método controle da madeira em função da acurácia da medição, do material e do aprimoramento também das análises estatísticas.

#### **5.2.7 Análises de regressão PLS para os parâmetros de rugosidade**

Os modelos ajustados para predição de parâmetros de rugosidade por meio do NIR apresentaram baixos coeficientes de determinação. Pode-se observar na Figura 33a a relação entre o parâmetro ( $Ra$ ) e a mesma variável predita pelo NIR. Neste caso, o coeficiente de determinação foi de 0,35 para a calibração e de 0,33 para a validação. Para o parâmetro  $Rz$  os coeficientes de determinação foram de 0,37 para a calibração e 0,36 para a validação (Figura 33b). Para o parâmetro  $Rt$  os coeficientes de correlação (Figura 33c) foram baixos de 0,19 e 0,17 para calibração e validação, respectivamente.

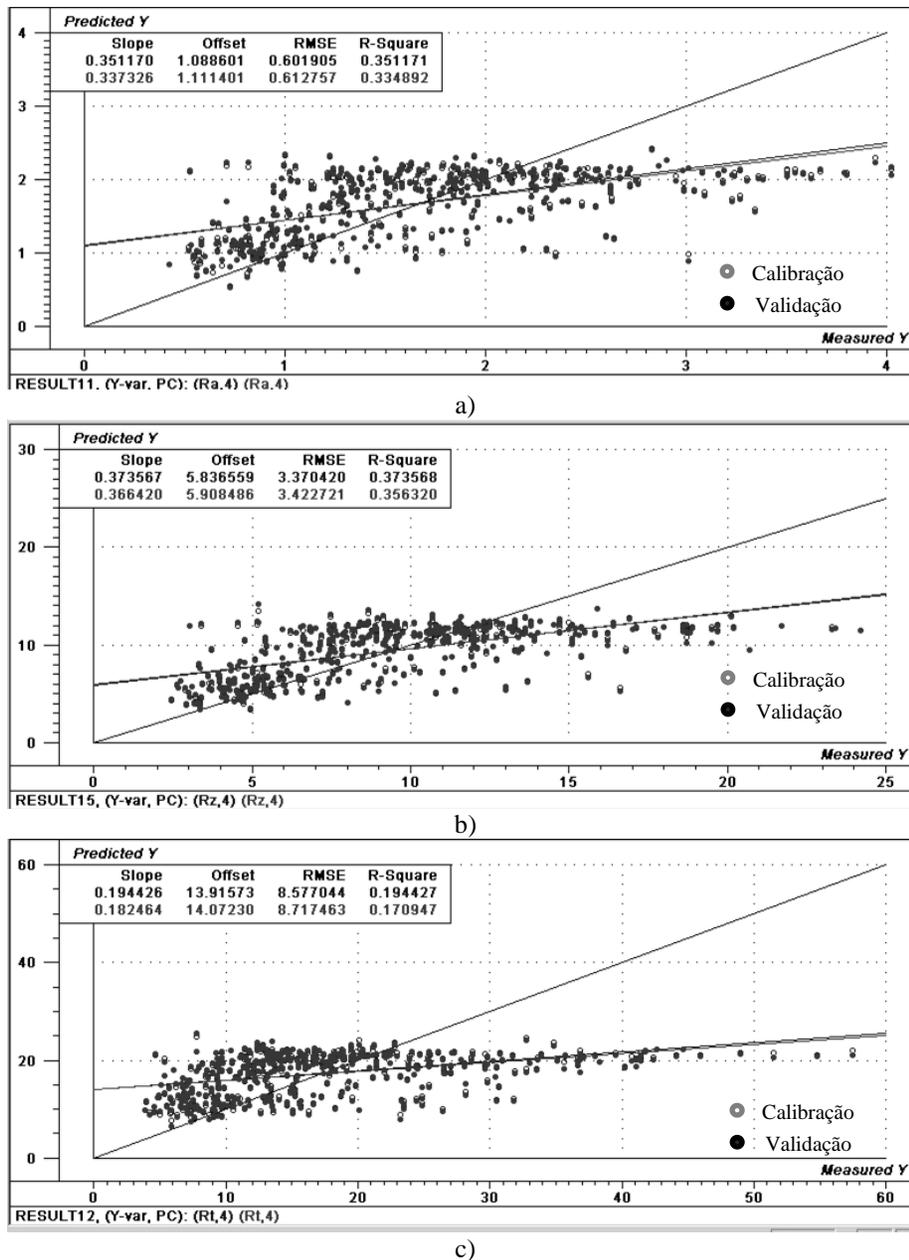


Figura 33 Resultados da análise de regressão PLS para predição do parâmetro de rugosidade da superfície da madeira de teca, após envelhecimento acelerado. Em que a) para o parâmetro  $Ra$ ; b) para o parâmetro  $Rz$  e c) para o parâmetro  $Rt$ .

Acredita-se que os baixos coeficientes de correlação podem ser explicados também pelos valores altos de desvio do conjunto de dados. A rugosidade média, embora seja a mais utilizada, não reflete o comportamento da superfície de madeira, em que a influência da anatomia é determinante, isto pode ser observado na alta variação das mensurações na madeira. A madeira de teca possui porosidade em anel, esta característica pode ter influenciado na alta variação principalmente no parâmetro  $R_t$ , o qual se refletiu nas baixas correlações destes parâmetros entre o valor medido e a predição do NIR.

São escassos os estudos reportados na literatura para predição da rugosidade pelo NIR. Zhang, Liu e Yang (2015) calibraram modelos de predição de rugosidade a partir do NIR em madeiras de *Cunninghamia* e *Eucalyptus*. Os autores obtiveram coeficientes de determinação de 0,71, 0,67 e 0,74 para os parâmetros  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_z$ , respectivamente. Diversas causas podem ser atribuídas além da anatomia da espécie em questão e a heterogeneidade do material.

Liu et al. (2012) determinaram o efeito da rugosidade da superfície na precisão dos modelos de predição da densidade básica em madeira de *Eucalyptus*. Os resultados mostraram que superfícies lisas apresentaram melhor desempenho nos modelos que as superfícies mais ásperas, sendo medida em termos dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ , e  $R_t$ .

### **5.2.8 Análise morfológica e estrutural**

A superfície microscópica da madeira de teca pode ser observada na Figura 34. É possível observar a aparência dos elementos celulares como fibras, vasos e raios em função do tipo de acabamento e o tempo de envelhecimento.

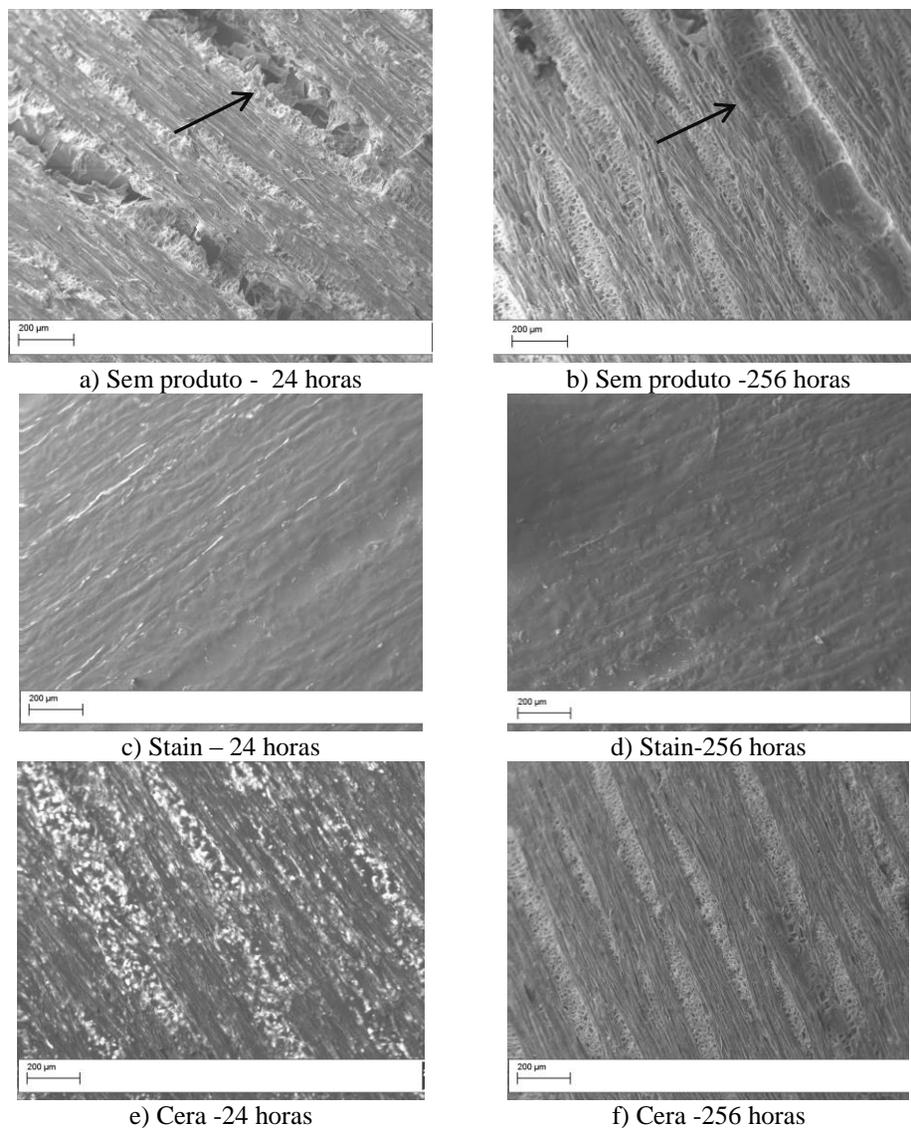


Figura 34 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para cada acabamento em função do tempo de envelhecimento. a) superfície da madeira com fragmentos dos elementos celulares (seta), b) lavagem de fragmentos da parede celular do vaso resultado do processo de envelhecimento (seta), c e d) Superfície da madeira com *stain*, sendo observado preenchimento dos elementos celulares por parte do produto, e) e f) superfície da madeira com cera.

Nas micrografias da madeira de teca sem acabamento, pode-se observar que com o aumento do tempo de envelhecimento ocorreu maior exposição de raios e elementos de vasos. No ciclo de 24 horas é possível observar a presença de fragmentos da parede celular de elementos de vasos, que posteriormente no ciclo de 256 horas, eles aparecem com lumes completamente abertos e raios mais expostos que nos demais tipos de acabamento.

Devido à madeira ficar exposta a ciclos de spray e condensação de vapor de água, radiação UV e temperatura elevada (50°C), ela sofre mudanças em função da perda e ganho de umidade. O desgaste e alteração da superfície foram promovidos também pela degradação de componentes químicos voláteis e solúveis em água em decorrência do processo de envelhecimento (KISHINO; NAKANO, 2004).

A madeira tratada com *stain* não apresentou, de forma bem definida, a exposição dos elementos celulares devido a ocupação, mesmo que parcial, destes elementos (Figura 34c e 34d). O recobrimento de *stain* apresentou maior ocupação das cavidades da madeira, contribuindo para a uniformidade das superfícies observadas nas micrografias nos diferentes ciclos de envelhecimento. Tal proteção pode ser explicada devido ao *stain* ser composto de poliésteres e resinas alquídicas, dentre outros aditivos (FEIST; HON, 1984), que são capazes de absorver a radiação na região UV. Da mesma forma devido à baixa polaridade desses compostos é possível que ocorra diminuição da penetração da umidade na madeira, resultando numa superfície mais lisa e com rugosidade menor ao longo dos ciclos de envelhecimento.

A madeira tratada com cera incolor, composta de ceras naturais de carnaúba, parafina e aguarrás, resultaram em melhor aspecto visual da madeira e proteção contra ação da umidade em relação à madeira sem acabamento, já que os componentes químicos apresentam grupos funcionais hidrofóbicos capazes de repelir a umidade. No entanto, o preenchimento superficial e a lavagem do

produto em decorrência dos ciclos de envelhecimento geraram maior exposição dos elementos celulares, observado visualmente nas referidas micrografias (Figura 34f).

## 6 CONCLUSÕES

- A madeira de teca apresentou baixa resistência em ensaios de simulação de pisos em serviço para esforços máximos, porém apta para tráfego leve ou usos externos na forma de decks para piscinas, em que as cargas são baixas e os agentes abrasivos são minimizados.
- O acabamento com *stain* proporcionou maior proteção à madeira, resultando em menores mudanças na cor, diminuindo a alteração da rugosidade ao longo dos ciclos de envelhecimento.
- A variação global da madeira  $\Delta E$  foi classificada como mudança apreciável para a madeira sem acabamento e para a madeira tratada com cera incolor. Para o acabamento *stain* a classificação foi apenas perceptível.
- As regressões baseadas em espectros no NIR apresentaram correlações que permitem a predição das propriedades colorimétricas da madeira.
- A madeira jovem de teca sem produto de acabamento apresentou-se estável em relação à variação da cor e rugosidade em função do tempo. Com a aplicação do *stain* apresentou melhor desempenho, com menores variações para todos os parâmetros avaliados, assim considera-se apta para o uso em ambientes externos.

## REFERÊNCIAS

ALOU, F. et al. Inorganic UV absorbers for the photostabilisation of wood-clearcoating systems: comparison with organic UV absorbers. **Applied Surface Science**, New York, n. 253, p. 3737-3745, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D 2394-05**: simulated service testing of wood and wood-base finish flooring. Philadelphia, 2011. 11 p. (Annual Book of ASTM Standards).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2394-83**. Philadelphia, 1994. 608 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - G-154-00a**: standar practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure on nonmetallic materials. Philadelphia, 2006. 11 p. (Annual Book of ASTM Standards).

ANDRADE, C. R. et al. Near infrared spectroscopy for estimating Eucalyptus charcoal Properties. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, n. 20, p. 657-666, 2012.

ARRUDA, T. P. M. **Secagem da madeira juvenil de Tectona grandis**. 2013. 98 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 4287**: especificações geométricas do produto (GPS): rugosidade: método do perfil: termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1483**: revestimento de pisos laminados melamínicos de alta resistência parte 1: requisitos, características, classificações e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014. 44 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013, ano base 2012**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 1 abr. 2015.

- BAAR, J.; GRYC, V. The analysis of tropical wood discoloration caused by simulated sunlight. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 1/3, p. 263-269, May 2011.
- BAILLÈRES, H.; DURAND, P. Y. Non -destructive techniques for wood quality assessment of plantation grown teak. **Bois et Forest dès Tropiques**, Montpellier, v. 54, n. 263, p. 17-20, 2000.
- BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.
- BETANCUR, C. A.; HERRERA, J. F.; MEJÍA, L. C. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas, trabajabilidad y secado de la teca (*Tectona grandis*) de Puerto Libertador, Córdoba. **Revista de la Facultad Nacional de Agronomía de Medellín**, Bogotá, v. 56, n. 1, p. 913-939, 2000.
- BHAT, K. M. Properties of fast-grown teakwood: impact on end-users requirements. **Journal of Tropical Forest Science**, Selangor Darul Ehsan, v. 4, n. 1, p. 1-10, 1998.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the western ghat region in india. **IWA Journal**, Utrecht, v. 25, n. 3, p. 273-282, Sept. 2004.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 34, n. 6, p. 517-532, 2001.
- BLANCO-FLÓREZ, J. et al. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 20, n. 1, p. 11-20, 2014.
- BRAGA, P. P. C. et al. Qualidade da superfície de madeira de *Coffea arábica* C. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 21-28, jan./mar. 2014.
- CASTRO, F. Crecimiento y propiedades físico mecánicas de la madera de teca *tectona grandis* de 17 años de edad en san Joaquín de Abangares Costa Rica. **Agronomia Costarricense**, San José, v. 24, n. 2, p. 7-23, 2000.
- CHANG, T. Z. et al. Influences of extractives on the photodegradation of wood. **Polymer Degradation and Stability**, New York, v. 95, n. 4, p. 516-521, 2010.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **CIE DS 014-4.3/E**. Vienna, 2007. 12 p.

CORTEZ-BARBOSA, J. et al. Simulation analysis of in-service Bamboo and pine EGP composite flooring. **Advanced Materials Research**, Pfaffikon, v. 1025/1026, p. 233-240, 2014.

COSTA, J. de A. et al. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 133-139, jan./mar. 2011.

DERBYSHIRE, H.; MILLER, E. R. The photodegradation of wood during solar irradiation. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 39, n. 8, p. 341-350, Aug. 1981.

DIRCKX, O. et al. Wood photodiscoloration of *Abies grandis* under solar light exposure. **Annals of Forest Science**, Berlin, v. 49, p. 425-447, 1992.

ESTEVEZ, B.; PEREIRA, H. Quality assessment of heat-treated wood by NIR spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 66, p. 323-332, 2008.

EVANS, P. et al. Weathering and surface protection of wood. In: \_\_\_\_\_. **Weathering and surface protection of wood: handbook of environmental degradation of materials**. New York: W. Andrew, 2005. chap. 14, p. 277-297.

FEIST, W. C. Finishing wood for exterior use. In: FINISHING EASTERN HARDWOODS, 1983, Madison. **Proceedings...** Madison: Forest Products Research Society, 1983. p. 185-198.

FEIST, W. C.; HON, D. N. S. Chemistry of weathering e protection. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **The Chemistry of solid wood**. Washington: American Chemical Society, 1984. p. 401-451.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Teak resources and market assessment 2010: planted forests and trees working paper FP/47/E**. Rome, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 15 out. 2015.

FREDONIA GROUP. **Wood & competitive decking**. Disponível em: <<http://www.fredoniagroup.com/industry-study/2959/wood-and-competitive-decking.htm>>. Acesso em: 6 abr. 2015.

FUNCK, J. W. et al. Measuring surface roughness of wood: a comparison of laser scatter and stylus tracing approaches. In: SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS, 1992, Bellingham. **Proceedings...** Washington, 1992. p. 173-183.

GEORGE, B. et al. Photodegradation and photostabilisation of wood e the state of the art. **Polymer Degradation and Stability**, New York, n. 88, p. 268-274, 2005.

GIERLINGER, N. et al. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, Berlin, v. 18, p. 102-108, 2004.

GONÇALEZ, J. C. et al. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana huber*) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 657-664, out./dez. 2010.

GONNET, J. F. CIELab measurement, a precise communication in power colour: an example with carnation (*Dianthus caryophyllus*) cultivars. **Journal of the Horticultural Science and Biotechnology**, Ashford, v. 68, p. 499-510, 1993.

GONZALEZ, G. Pisos de mader. **Kurú Revista Forestal**, San José, v. 3, n. 7, p. 1-9, 2006.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Processing roughness of sanded wood surfaces. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, n. 63, p. 43-52, 2005.

HAUPT, M. et al. Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.): a case study. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 61, n. 6, p. 473-474, Dec. 2003.

HEIN, P. R. G.; CHAIX, G.; LIMA, J. T. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforchung**, Berlin, v. 64, n. 1, p. 45-54, Jan. 2010.

HEIN, P. R. G. et al. Calibrations based on near infrared spectroscopic data to estimate wood-cement panel properties. **Bio Resources**, Raleigh, v. 4, n. 4, p. 1620-1634, 2009.

HEIN, P. R. G. et al. Estimation of physical and mechanical properties of agro-based particle boards by near infrared spectroscopy. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 69, n. 3, p. 431-442, 2010.

HIZIROGLU, S. et al. Evaluation of surface quality of some Malaysian species as function of outdoor exposure. **Journal of Materials Processing Technology**, New York, v. 199, n. 1/3, p. 156-162, 2008.

HON, D. N. S. Weathering and photochemistry of wood. In: HON, D. N. S.; SHIRAISHI, N. (Ed.). **Wood and cellulosic chemistry**. New York: M. Dekker, 2001. p. 513-546.

HUANG, X. et al. A spectrophotometric and chemical study on color modification of heat-treated wood during artificial weathering. **Applied Surface Science**, New York, n. 258, p. 5360-5369, 2012.

INGLEZA. **Cera pastaingleza incolor**. Disponível em: <<http://ingleza.com.br/produto/cera-pasta-ingleza-incolor/>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

IZEKOR, D. N.; FUWAPE, J. A performance of teak (*Tectonagrandis* L.F) wood on exposure to outdoor weather conditions. **Journal of applied Sciences and Environmental Management**, Grahamstown, v. 15, n. 1, p. 217-222, 2011.

IZEKOR, D. N.; FUWAPE, J. A.; OLUYEGE, A. O. Effects of density on variations in the mechanical properties of plantation grown *Tectona grandis*. **Wood Archives of Applied Science Research**, Mmabatho, v. 2, n. 6, p. 113-120, June 2010.

JACQUES, L. F. E. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings, prog. **Journal of applied polymer Science**, Hoboken, v. 25, n. 9, p. 1337-1362, 2000.

KELLEY, S. S. et al. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. **Wood Science and Technology**, New York, v. 38, p. 257-276, 2004.

KEOGH R, M.; MORALES, J. P. **Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades teca en América Latina: mitos y realidades**. San José: CATIE, 2013. 410 p. (Serie Técnica Boletín Técnico, 397).

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, New York, v. 41, n. 8, p. 1074-1078, Aug. 2006.

KISHINO, M.; NAKANO, T. Artificial weathering of tropical woods: part 2, color change. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, n. 5, p. 558-565, Dec. 2004.

KNAPIC, S.; MACHADO, J. S.; PEREIRA, H. Properties of cork oak wood related to solid wood flooring performance. **Construction and Building Materials**, New York, v. 30, p. 569-573, May 2012.

KOKUTSE, A. D. et al. Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L.f.) heartwood and relationship with colour. **Trees**, Berlin, v. 20, n. 2, p. 219-223, Mar. 2006.

KOKUTSE, A. D. et al. Influence of soil properties on the natural durability, extractive content and colour of teak (*Tectona grandis* L.f) wood in Togo. **Annales de l'Université de Parakou, Série: Sciences Naturelles et Agronomie**, Parakou, p. 37-50, 2010.

KONICA MINOLTA. **Entendendo o espaço de cor CIElab**. Disponível em: <[http://sensing.konicaminolta.com.br/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/?utm\\_source=November%20Newsletter&utm\\_medium=Email&utm\\_campaign=LAB%20Color%20Space%20Article](http://sensing.konicaminolta.com.br/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/?utm_source=November%20Newsletter&utm_medium=Email&utm_campaign=LAB%20Color%20Space%20Article)>. Acesso em: 10 jul. 2015.

LADRACH, W. **Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos**. Maryland: Sociedad Internacional de Forestales Tropicales, 2009. 27 p.

LI, L.; GONG, M.; LI, D. Evaluation of the kinetic friction performance of modified wood decking products. **Construction and Building Materials**, New York, v. 40, p. 863-868, Mar. 2013.

LIU, Y. et al. Effect of surface roughness on near infrared models for wood density analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIO BASE MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING, 2012, Changsha. **Proceedings...** Changsha, 2012. p. 75-78.

LOPES, C. S. D. et al. Avaliação da rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus sp* submetida ao fresamento periférico. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 471-476, 2014.

- LUKMANDARU, G.; TAKAHASHI, K. Radial distribution of quinones in plantation teak (*Tectona grandis* L.f). **Annals of Forest Science**, Berlin, v. 65, n. 6, p. 708-719, Jan. 2009.
- MACEDO, R. L. G. et al. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f Teca em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 61-69, jan./abr. 2005.
- MAGOSS, E. General regularities of wood surface roughness. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, Sopron, v. 4, p. 81-93, 2008.
- MARIAN, J.; STUMBO, D.; MAXEY, C. Surface texture of wood as related to glue-joint strength. **Forest Product Journal**, Madison, v. 8, n. 12, p. 345-351, 1958.
- MARTINS, M. et al. Simulação em uso de pisos de madeira de *Eucalyptus* sp e *Corymbia maculata*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 151-156, 2013.
- MARTINS, S. A. et al. Envelhecimento artificial acelerado por radiação ultravioleta de madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 87-96, jan./mar. 2011.
- MAZET, J. F.; JANIN, G. La qualité de l'aspect des placages de chênes: mesures de couleur et critères d'appréciation des professionnels français et italiens. **Annals of Forest Science**, Berlin, v. 47, p. 255-268, 1990.
- MIRANDA, I.; SOUZA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, n. 1, p. 171-178, Jan. 2011.
- MONTEIRO, T. et al. Use of near infrared spectroscopy to distinguish carbonization processes and charcoal sources. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 381-390, jul./set. 2010.
- MORI, C. L. S. et al. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, abr./jun. 2005.
- MOURA, L. F.; HERNANDEZ, R. Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood. **Wood and Fiberscience**, Hanover, v. 37, n. 2, p. 355-36, 2005.

MOYA, R.; ARCE, V. Estudio experimental del efecto del espaciamiento sobre las propiedades físicas de peso específico básico y contracciones en plantaciones de teca (*tectonagrandis*) de 10 años. **Revista Forestal Venezolana**, Caracas, v. 47, n. 1, p. 1-24, 2003.

MOYA, R.; BERROCAL, A. L. Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectonagrandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. **Annals of Forest Science**, Berlin, v. 67, n. 109, p. 1-9, 2010.

MOYA, R.; BOND, B.; QUESADA, H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. **Wood Science and Technology**, New York, v. 48, n. 2, p. 411-433, Mar. 2014.

MOYA, R.; CALVO-ALVARADO, J. Variation of wood color parameters of *Tectonagrandis* and its relationship with physical environmental factors. **Annals of Forest Science**, Berlin, v. 69, n. 8, p. 947-959, Nov. 2012.

MOYA, R.; MARÍN, J. D. Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness. **New Forests**, Berlin, v. 42, n. 3, p. 329-345, Nov. 2011.

MOYA, R.; PEREZ, D. Processing and marketing of teakwood products from fast-grown teak plantations in Costa Rica. In: NAIR, K.; BHAT, V.; ANITHA, V. (Ed.). **Regional workshop products and marketing of teak wood products of planted forest**. Peechi: KFRI, 2007. p. 24-32.

MUÑIZ, G. I. B. et al. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, out./dez. 2012.

NASCIMENTO, J. F. do et al. Essential oil content in *Eremanthus erythropappus* wood powder can be estimated using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 23, n. 1, p. 33-39, Mar. 2015.

NCUBE, E.; MEINCKEN, M. Surface characteristics of coated soft- and hardwoods due to UV-B ageing. **Applied Surface Science**, New York, n. 256, p. 7504-7509, 2010.

NIAMKE, F. B. et al. Rapid prediction of phenolic compounds as chemical markers for the natural durability of teak (*Tectonagrandis* Linn f.) heartwood by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 22, n. 1, p. 35-43, Apr. 2014.

NIR ESPECTROSCOPY. Disponível em:  
<<https://www.bruker.com/products/infrared-near-infrared-and-raman-spectroscopy/ft-nir.html>>. Acesso em: 13 mar. 2013.

NOBUCHI, T.; JANMAHASATIEN, S.; SAKAI, M. Seasonal changes of wood formation and some characteristics of heartwood formation in teak (*Tectona grandis* L.) plantation. **Kasetsart Journal Natural Science**, Chatuchak, v. 30, p. 254-263, 1996.

NZOKOU, P.; KAMDEM, D. P. Influence of wood extractives on the photo-discoloration of wood surfaces exposed to artificial weathering. **Color Research and Applications**, Hoboken, v. 31, n. 5, p. 425-434, 2006.

OLIVEIRA, M. B. **Avaliação da qualidade de pisos comerciais confeccionados com madeiras de *Bowdichianitida* Benth (Spr.), *Dipterxyodorata* (aubl.) Willd, *Mimosa scabrella* Benth e *Tabebuia impetiginosa***. 2015. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

ORGANIZACION INTERNACIONA DE MADERAS TROPICALES. **Reseña bienal y evaluación de la situación mundial de las maderas 2013-2014**. 2014. 223 p. Disponível em: <[http://www.itto.int/es/annual\\_review/](http://www.itto.int/es/annual_review/)>. Acesso em: 10 nov. 2015.

OZGENC, O.; HIZIROGLU, S.; YILDIZ, U. Weathering properties of wood species treated with different coating applications. **BioResources**, Raleigh, v. 7, n. 4, p. 4875-4888, Aug. 2012.

PADILHA, C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* para utilização em pisos. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 7, p. 141-147, ago. 2006.

PANDEY, D.; BROWN, C. La teak: una visión global. **Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales**, Rome, v. 51, n. 2, p. 3-13, 2000.

PANDEY, K. K. A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. **Polymer Degradation and Stability**, New York, v. 87, n. 2, p. 375-379, Feb. 2005a.

PANDEY, K. K. Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. **Polymer Degradation and Stability**, New York, v. 90, n. 1, p. 9-20, Oct. 2005b.

PÁNEK, M.; REINPRECHT, L. Colour stability and surface defects of naturally aged wood treated with transparent paints for exterior construction. **Wood Research**, Bratislava, v. 59, n. 3, p. 421-430, 2014.

PANSHIN, A. J.; ZEEW, C. **Textbook of wood technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw Hill, 1970. v. 1, 705 p.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 198-219, Apr. 2003.

POPESCU, C. M.; POPESCU, M. C. A near infrared spectroscopic study of the structural modifications of lime (*Tiliacordata* Mill.) wood during hydro-thermal treatment. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, London, v. 115, p. 227-233, Nov. 2013.

POSCH, B. et al. Physical and mechanical investigations on teakwood (*Tectona grandis* L.f.) from plantations in Panama. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 62, n. 1, p. 31-35, Mar. 2004.

Q-LAB. **QUV accelerated weathering tester**. Disponível em: <<http://www.q-lab.com/pt-br/products/quv-weathering-tester/quv/>>. Acesso em: 19 out. 2015.

RAMSAY, W.; BRIGGS, D. Juvenile wood: has it come of age? In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD-WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. **Proceedings...** Madison: Forest Products Research Society, 1986. p. 5-11.

RICHTER, H. G.; LEITHOFF, H.; SONNTAG, U. Characterisation and extension of juvenile wood in plantation grown teak (*Tectona grandis* L.f) from Ghana. In: INTERNATIONAL CONFERENCE QUALITY TIMBER PRODUCTS OF TEAK FROM SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT, 1., 2003, Peechi. **Proceedings...** Kerala: Kerala Forest Research Institute, 2003. p. 266-272.

RIVERO, J.; MOYA, R. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. **Kurú Revista Forestal**, San José, v. 3, n. 9, p. 1-14, 2006.

RODRIGUES, J. et al. Prediction of wood density using near infrared-based partial least squares regression models calibrated with X-ray microdensity. **NIR News**, Sussex, v. 24, n. 2, p. 4-8, 2013.

ROSU, D. et al. FTIR and color change of the modified wood as a result of artificial light irradiation. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, New York, v. 99, n. 3, p. 144-149, June 2010.

SANTOS, I. S.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Avaliação dos pisos produzidos a partir de toras de clones de *Eucalyptus* sp. com pequenos diâmetros. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 473-478, out./dez. 2010.

SAYERLACK. **Stain impregnante premium polisten natural**. Disponível em: <<http://www.sayerlack.com.br/es/stainpolisten-natural-2/>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

SCHIMLECK, L. R. Wood properties: success in using NIR spectroscopy to estimate wood properties of *Pinus taeda* radial strips not due to autocorrelation. **NIR News**, Sussex, v. 17, n. 3, p. 13-14, 2006.

SCHIMLECK, L. R. et al. Microfibril angle prediction of *Pinus taeda* wood samples based on tangencial face NIR spectra. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 28, n. 1, p. 1-12, 2007.

SCHMINCKE, K. H. Plantaciones de teca en Costa Rica: la experiencia de la empresa Precious Woods. **Unasyuva**, Rome, n. 201, p. 1-8, 2000.

SCHWANNINGER, M. J. C.; RODRIQUES, K.; FACKLER, J. NEAR a review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 19, n. 1, p. 287-308, Nov. 2011.

SENFT, J. F.; BENDTSEN, B. A.; GALLIGAN, W. L. Weak wood. **Journal of Forestry**, Washington, v. 83, n. 8, p. 476-85, 1985.

SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE JUNIOR, F. Foto de composição e proteção de madeiras tropicais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, p. 7-13, ago./dez. 2004.

SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE JUNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, p. 17-23, 2006.

TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. **Forest Product Journal**, Peachtree Corners, v. 49, n. 5, p. 41-46, 1999.

TELLES, R. F. **Ensaio não destrutivo para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente**. 2014. 209 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TEMIZ, A. et al. Surface roughness and color characteristics of wood treated with preservatives after accelerated weathering test. **Applied Surface Science**, New York, v. 250, n. 1/4, p. 35-42, ago. 2005.

TEWARI, D. N. **A monograph on teak (*Tectona grandis*)**. Dehra Dun: International Book 1999. 235 p.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M.; OKUYAMA, T. Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of Kerala, India. **Journal of Tropical Forest Science**, Selangor Darul Ehsan, v. 18, n. 1, p. 51-54, 2006.

TOLVAJ, L. et al. Effects of air relative humidity and temperature on photodegradation processes in beech and spruce wood. **Bioresources**, Raleigh, v. 11, n. 1, p. 296-305, 2016.

TOLVAJ, L.; PERSZE, L.; ALBERT, L. Thermal degradation of wood during photodegradation. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Sopron, v. 105, n. 1, p. 90-93, Oct. 2011.

UNITED STATES FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Simulated service testing of wood and wood-base finish flooring**. Wisconsin, 1971. 22 p.

VALERO, S.; REYES, E.; GARAY, D. Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la especie *Tectonagrandis*, de 20 años de edad, proveniente de las plantaciones de la unidad experimental de la reserva forestal Ticoporo, estado barinas. **Revista Forestal Venezolana**, Caracas, v. 49, n. 1, p. 61-73, 2005.

VALVERDE, J. C.; MOYA, R. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in acacia mangium, cedrela odorata and *Tectonagrandis* wood with two coating. **Color Research and Application**, New York, v. 39, n. 5, p. 519-529, Oct. 2013.

VIANNA, L. C.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 367-376, 2010.

WEAVER, L. ***Tectona grandis* L. f. Teak**: SOITF-SM-64. New Orleans: USDA, 1993. 18 p.

WESTAD, F.; MARTENS, F. Variable selection in near infrared spectroscopy based on significance testing in partial least square regression. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 8, p. 117-124, 2000.

WILLIAM, M. R.; GANGSTAD, J. Characteristics of ten tropical hardwoods from certified forests in Bolivia: weathering characteristics and dimensional change. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 33, n. 4, p. 618-626, 2001.

WILLIAMS, P. C.; SOBERING, D. C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 1, n. 1, p. 25-33, 1993.

WILLIAMS, R. S. Weathering of wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. p. 139-185.

WILLIAMS, R. S.; FEIST, W. C. **Selection and application of exterior stains for wood**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 9 p.

YANG, Z.; LV, B.; FU, Y. The relationship between near infrared spectroscopy and surface color of eight rosewoods. **Advanced Materials Research**, Pfaffikon, n. 479/481, p. 1772-1776, 2012.

ZHANG, M.; LIU, Y.; YANG, Z. Correlation of near infrared spectroscopy measurements with the surface roughness of wood. **Bioresources**, Raleigh, v. 10, n. 4, p. 6953-6960, 2015.

ZHONG, Z. W.; HIZIROGLU, S.; CHAN, C. T. M. Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture. **Measurement**, New York, v. 46, n. 4, p. 1482-1487, May 2013.

ZOBEL, B. B.; BUIJTENEN, B. van. **Wood variation: its causes and control**. New York: Spring-Verlag, 1989. 363 p.