

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico – CDTec
Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Dissertação

**Durabilidade da madeira de quatro espécies de eucaliptos submetidas
a testes de campo**

Rafael de Avila Delucis

Pelotas, 2014

Rafael de Avila Delucis

Durabilidade da madeira de quatro espécies de eucaliptos submetidas a testes de campo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais (Área: Materiais nano estruturados).

Orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Pelotas, 2014

Rafael de Avila Delucis

Durabilidade da madeira de quatro espécies de eucaliptos submetidas a testes de campo

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 9 de dezembro de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Sérgio da Silva Cava

Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. José Jurado Egea

Doutor em Ciências Físicas pela Universidad Complutense de Madrid

Ao meu referencial no aspecto moral e na fé, meu pai Nelmar Delucis.

Agradecimentos

À Deus, pelo dom da vida e pela fonte de forças que constantemente me impulsiona ao aprimoramento de minhas potencialidades;

Ao meu pai, Nelmar Antônio, que é e sempre foi, o meu esteio em qualquer dificuldade;

Aos meus irmãos, Bruna, Davi e Diego, por seu amor e por serem a alegria de minha vida cotidiana nas ocasiões mais simples;

Em memória de minhas queridas mãe e avó, que partiram da Terra deixando muita saudade, mas ao mesmo tempo, as marcas de seu amor e sacrifício em meu favor;

Aos demais familiares próximos, meu avô, meus tios e primos, os quais sempre demonstraram muito carinho e amor para comigo;

À minha segunda família, composta pelo grupo de Emaús Santo Inácio de Loyola, e em especial, ao meu padrinho Pablo Rodrigues, pelas experiências trocadas ao longo de um ano de caminhada cristã;

Ao professor Darci Alberto Gatto, que mais do que um simples professor, ao longo dos anos de convívio tornou-se um grande amigo e uma referência pessoal de dedicação ao trabalho e à família;

Ao professor Jalel Labidi, pela oportunidade de intercâmbio em seu grupo de pesquisa, recebendo-me com muita atenção e simpatia;

Aos colegas do grupo de pesquisa Ciência da madeira, os quais pelas trocas de experiências profissionais e pessoais aportaram conhecimentos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho;

Aos colegas da Universidade do País Basco, pela amizade e atenção com que me receberam, disponibilizando-se para auxiliar-me durante todo o meu período de intercâmbio;

Aos demais amigos que intencionalmente ou não, foram muito importantes durante o meu período de mestrado.

Muito obrigado meus queridos!

“Não bastam a inteligência e os valores do intelecto, se esses valores não estiverem acompanhados da humildade e da fé. Eis o diferencial.”
(Haroldo Dutra Dias)

Resumo

DELUCIS, Rafael de Avila. **Durabilidade da madeira de quatro espécies de eucaliptos submetidas a testes de campo**. 2014. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

O presente estudo teve por objetivo caracterizar a deterioração dos lenhos juvenil e adulto de quatro espécies de eucaliptos submetidos a três diferentes testes de campo. O material de estudo consistiu de árvores adultas das espécies *Eucalyptus botryoides*, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus tereticornis*, as quais foram selecionadas ao acaso no município de Charqueadas, Rio Grande do Sul. Após a derrubada, de cada tora basal de 1,5 m de comprimento, foram seccionadas amostras com as dimensões de 1 cm x 1 cm x 20 cm (maior dimensão na direção axial), retiradas nas regiões próximas a medula e casca, afim de caracterizar os lenhos juvenil e adulto, respectivamente. Para a avaliação da durabilidade do material, foram instalados três campos de apodrecimento em distintos microclimas encontrados no município de Piratini, Rio Grande do Sul. Os ambientes de exposição foram referidos como: campo aberto, campo banhado e campo floresta. A material foi caracterizado quanto a biodeterioração por meio de parâmetros físicos (perda de massa, massa específica e teor de umidade de equilíbrio), colorimétricos (método CIEL a^*b^*), mecânicos (teste de flexão estática) e visuais (atribuição de notas em razão do estado fitossanitário). Quanto ao intemperismo natural, a superfície das amostras provenientes do campo aberto foram caracterizadas por meio de parâmetros colorimétricos (método CIEL a^*b^* e espectroscopia UV-VIS), da molhabilidade superficial (análise do ângulo de contato) e da dureza superficial (método Janka). Do ponto de vista da biodeterioração, a perda de massa foi o principal parâmetro de qualificação da madeira, não obstante, as demais técnicas de caracterização aportaram resultados adicionais interessantes. Verificou-se que as amostras testadas no campo banhado apresentaram maior nível de atividade microbiana, ocasionando maiores danos em suas propriedades. Quanto ao intemperismo natural, destaca-se a Dureza Janka como parâmetro para comparações entre diferentes espécies de madeiras e seus respectivos lenhos juvenil e adulto. O lenho adulto de todas as espécies apresentou maior durabilidade do que lenho juvenil, tanto quanto a biodeterioração, quanto ao intemperismo natural. De maneira geral, verifica-se que as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus tereticornis* apresentaram os maiores índices de resistência natural aos agentes deterioradores, portanto são indicadas para a confecção de produtos sólidos destinados ao uso externo.

Palavras-chave: Biodeterioração. Biodegradação. Fotodegradação.

Abstract

DELUCIS, Rafael de Avila. **Durability of four species eucalypts wood submitted of field tests**. 2014. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

This study aimed to characterize the deterioration of juvenile and mature of four species of eucalypts wood subjected to three different field tests. The study material consisted of adult trees of the species *Eucalyptus botryoides*, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus paniculata* and *Eucalyptus tereticornis*, which were randomly selected in the Charqueadas city, Rio Grande do Sul state. After the overthrow, from the each basal log with 1,5 m length, were cut samples with dimensions of 1 cm x 1 cm x 20 cm (larger in the axial direction) taken in the regions near the pith and bark of trees in order to characterize the selection of juvenile and mature wood, respectively. To evaluate the durability of the material, three decaying fields were installed in different microclimates in Piratini city, Rio Grande do Sul state. Exposure environments were referred to as: outdoor field, flooded field and forest field. The material was characterized as biodeterioration through physical (weight loss, specific gravity and equilibrium moisture content), colorimetric (CIEL*a*b* method), mechanical (flexural) and visual (assignment notes because of plant health) parameters. As to natural weathering, the surface of the samples from the outdoor field were characterized by means of color parameters (CIEL*a*b* method and UV-VIS spectroscopy), the surface wettability (contact angle analysis) and surface hardness (Janka method). From the point of view of biodegradation, the mass loss was the major classification parameter of wood, however, other characterization techniques contributed additional interesting results. It was found that the samples tested in the field plated had higher microbial activity, causing major damage in this properties. As to natural weathering, we highlight the Janka Hardness as a parameter for comparisons between different wood species and this juvenile and mature woods. The mature wood of all species showed greater durability than juvenile wood as much as biodeterioration, and as the natural weathering. In general, it appears that the *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus tereticornis* wood showed the highest natural indices of the spoilage agents, so they are suitable for the manufacture of solid products for external use.

Keywords: Biodeterioration. Biodegradation. Fotodegradation.

Lista de figuras

Capítulo 1. Aspectos gerais

Figura 1 – Ultraestrutura de uma fibra celulósica.	19
---	----

Capítulo 2. Seleção e preparação do material de estudo

Figura 2 – Layout das amostras distribuídas nos campos de apodrecimento.	34
---	----

Capítulo 3. Biodeterioração dos lenhos juvenil e adulto de quatro eucaliptos submetidos a três diferentes campos de apodrecimento

Figura 3.1 – Gráfico tensão versus deformação.	43
Figura 3.2 – Níveis de perda de massa, massa específica e teor de umidade de acordo com o tempo de exposição.	47
Figura 3.3 – Níveis de luminosidade (L^*) e coordenadas cromáticas verde-vermelho (a^*) e azul-amarelo (b^*) de acordo com o tempo de exposição.	51
Figura 3.4 – Níveis de cromaticidade (C^*), ângulo de tinta (h) e variação de cor (ΔE) de acordo com o tempo de exposição.	53
Figura 3.5 – Níveis de módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e Fragilidade (F) de acordo com o tempo de exposição.	57

Capítulo 4. Resistência ao intemperismo dos lenhos juvenil e adulto de quatro eucaliptos

Figura 4.1 – Fotografias da face radial das amostras de quatro eucaliptos em razão do tempo de exposição do material em campo.	69
Figura 4.2 – Fotografias da face tangencial das amostras de quatro eucaliptos em razão do tempo de exposição do material em campo.	70
Figura 4.3 – Variação da luminosidade (L^*) e da coordenada cromática verde-vermelho (a^*) em razão do tempo de exposição do material em campo.	72
Figura 4.4 – Gráficos de cromaticidade dos lenhos juvenil e adulto das amostras ensaiadas em campo.	74
Figura 4.5 – Espectros de UV-VIS organizados em razão dos lenhos juvenil e adulto	

dos quatro eucaliptos em estudo.....	76
Figura 4.6 – Cinética dos valores de ângulo de contato obtidos para a face radial das amostras de lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos.	79
Figura 4.7 – Cinética dos valores de ângulo de contato obtidos para a face tangencial das amostras de lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos.....	80
Figura 4.8 – Variação da Dureza Janka em razão do tempo de exposição do material em campo.....	82

Listas de Tabelas

Capítulo 3. Biodeterioração dos lenhos juvenil e adulto de quatro eucaliptos submetidos a três diferentes campos de apodrecimento

Tabela 3.1 - Classificação do nível de deterioração da madeira.	38
Tabela 3.2 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros físicos em função dos fatores em estudo.	44
Tabela 3.3 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros colorimétricos em função dos fatores em estudo.	49
Tabela 3.4 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros mecânicos em função dos fatores em estudo.	54
Tabela 3.5 – Valores médios das propriedades físicas de acordo com os critérios de análise visual.	59
Tabela 3.6 – Valores médios das propriedades colorimétricas de acordo com os critérios de análise visual.	60
Tabela 3.7 – Valores médios das propriedades mecânicas de acordo com os critérios de análise visual.	60

Capítulo 4. Resistência ao intemperismo dos lenhos juvenil e adulto de quatro eucaliptos

Tabela 4 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros colorimétricos da madeira submetida ao teste de intemperismo natural.	67
--	----

SUMÁRIO

1 ASPECTOS GERAIS	14
1.1 Introdução Geral	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Revisão de literatura	16
1.3.1 Madeira	16
1.3.2 Constituição química e sua relação com a estrutura anatômica da madeira.....	17
1.3.3 Lenhos juvenil e adulto.....	21
1.3.4 Degradação da madeira	23
1.3.5 Agentes bióticos	24
1.3.6 Agentes abióticos	27
1.3.7 Ensaio para a avaliação da durabilidade da madeira	28
1.3.8 Ensaio de campo	29
2 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO	32
2.1 Seleção das árvores	32
2.2 Confeção das amostras	32
2.3 Condicionamento das amostras	33
2.4 Instalação dos campos de apodrecimento	33
3 BIODETERIORAÇÃO DOS LENHOS JUVENIL E ADULTO DE QUATRO EUCALIPTOS SUBMETIDOS A TRÊS DIFERENTES CAMPOS DE APODRECIMENTO	35
3.1 Introdução	35
3.2 Material e métodos	37
3.2.1 Análise Visual	37
3.2.2 Massa específica.....	38
3.2.3 Teor de umidade	39
3.2.4 Perda de massa	39
3.2.5 Características colorimétricas	40
3.2.6 Flexão estática	41
3.2.7 Fragilidade.....	43
3.3 Resultados e discussão	44
3.3.1 Propriedades físicas	44

3.3.2 Caracterização colorimétrica	49
3.3.2 Ensaio mecânico.....	54
3.3.3 Caracterização visual da durabilidade.....	59
3.4 Conclusão	62
4 RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO NATURAL DOS LENHOS JUVENIL E ADULTO DE QUATRO EUCALIPTOS	63
4.1 Introdução.....	63
4.2 Material e métodos.....	65
4.2.1 Preparo das amostras em estudo.....	65
4.2.1 Monitoramento da cor.....	65
4.2.2 Espectroscopia UV-Vis.....	66
4.2.3 Análise do Ângulo de contato	66
4.2.4 Dureza Janka	66
4.3 Resultados e Discussão	67
4.3.1 Parâmetros colorimétricos.....	67
4.3.2 Espectroscopia UV-VIS	74
4.3.2 Ângulo de contato	78
4.3.3 Dureza Janka	81
4.4 Conclusão	84
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	88

1 ASPECTOS GERAIS

1.1 Introdução Geral

O atual cenário do mercado florestal mundial conta com um número cada vez menor de florestas adultas, em decorrência da crescente demanda por madeiras provenientes de espécies de rápido crescimento. De maneira geral, comparando-se com a cultura de espécies mais tardias, os produtores florestais brasileiros e estrangeiros têm obtido um maior rendimento financeiro, a partir da utilização de espécies que possibilitam ciclos de colheitas mais curtos. Assim, cresce a atratividade dos plantios de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*.

Além dos fatores mencionados, a madeira de eucalipto tem inúmeras outras vantagens, como por exemplo as relacionadas à seu plantio, que incluem: elevada adaptabilidade e produtividade, alta resistência a pragas e patologias, fácil hibridação, cultura de manejo consolidada, tolerância a condições de estresse; com também os aspectos positivos vinculados à sua madeira, os quais podem ser exemplificados por: elevada homogeneidade de propriedades, boas propriedades mecânicas e a possibilidade de utilização de seus óleos em indústrias alternativas (STAPE et al., 2010; BELTRAME, 2012).

Entretanto, sua acelerada atividade fisiológica dá origem a uma constituição química e estrutura anatômica que não lhe confere uma elevada resistência aos naturais agentes degradadores da madeira. Nesse contexto, sabe-se que o processo de degradação da madeira é um mecanismo bastante complexo, haja vista que até os dias de hoje não foi possível ajustar modelos matemáticos capazes de prever esse comportamento com eficácia (CARVALHO et al., 2009). Por esse motivo, diversos estudos laboratoriais vêm sendo direcionados a avaliação e ao monitoramento de propriedades tecnológicas da madeira quando sujeita a deterioração atribuída a agentes biológicos

(THYBRING, 2013; NEGRÃO et al., 2014) e não biológicos (BARRETO; PASTORE, 2009; HUANG et al., 2012a; HUANG et al., 2012b).

Contudo, embora a obtenção dos dados por esta via seja mais onerosa, os testes de campo são preferíveis, pois submetem as amostras testadas a condições mais aproximadas da realidade de sua utilização prática, contabilizando as degradações advindas de agentes bióticos e abióticos em conjunto. Nesse âmbito, diversas lacunas no conhecimento acerca desse tema têm sido exploradas em estudos atuais, como por exemplo, a variação da degradação atribuída à diferentes ambientes de exposição (VIVIAN, 2011; MATTOS, 2011), a comparação entre as degradações ocorrentes nos lenhos juvenil e adulto (CONEGLIAN, 2011; LATORRACA et al., 2011) e a utilização de técnicas analíticas de caracterização para a elucidação da degradação (YILDIZ et al., 2013; MATTOS et al., 2014a).

Portanto, acompanhando o desenvolvimento das atuais pesquisas realizadas em todo o mundo, o presente estudo teve vistas de monitorar a deterioração ocorrida nos lenhos juvenil e adulto de quatro espécies de eucaliptos proveniente de florestas de rápido crescimento submetidas a três diferentes campos de apodrecimento por meio de diversas de suas propriedades tecnológicas.

1.2 Objetivos

O presente estudo teve por objetivo a avaliação da resistência natural dos lenhos juvenil e adulto de quatro espécies de eucaliptos submetidas à três diferentes campos de apodrecimento, por meio do monitoramento de diversas de suas propriedades tecnológicas atribuídas a biodeterioração do material. Nesse sentido, elenca-se os seguintes objetivos específicos vinculados a avaliação dessa característica:

- Avaliar e comparar a resistência natural dos lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos;
- Verificar o efeito do tipo de ambiente de exposição na deterioração das amostras submetidas aos testes de campo;
- Monitorar a biodeterioração ocorrida nos lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos submetidos aos três diferentes testes de campo por meio de parâmetros visuais, físicos, colorimétricos e mecânicos;
- Verificar os parâmetros mais eficazes para o monitoramento da degradação ocasionada pelos mecanismo de biodeterioração.

Em um segundo momento, visou-se também enfocar a avaliação da superfície das amostras em estudo tendo em vista a depreciação atribuída ao mecanismo de intemperismo natural. Assim, foram propostos os seguintes objetivos pontuais:

- Monitorar a resistência ao intemperismo natural dos lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos por meio de características colorimétricas, de molhabilidade e mecânicas de sua superfície;
- Verificar os parâmetros mais eficazes para o monitoramento da degradação ocasionada pelos mecanismo de intemperismo natural.

1.3 Revisão de literatura

1.3.1 Madeira

Historicamente, a madeira tem sido um dos principais materiais utilizados em razão de algumas de suas características tidas empiricamente como positivas, incluindo: boa relação entre resistência mecânica e peso, fácil obtenção e manipulação, elevados atributos estéticos e bom isolamento térmico e elétrico. Na atualidade, outras características como seu caráter reciclável, biodegradável e

renovável tornam a madeira um material de uso estratégico na indústria, tendo em consideração os aspectos financeiro, social e ambiental.

1.3.2 Constituição química e sua relação com a estrutura anatômica da madeira

De acordo com Klock et al., (2005), a composição química elementar da madeira não apresenta grande variabilidade na comparação entre diferentes espécies e pode ser elencada em: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N). Sendo que os principais elementos constituintes - carbono e hidrogênio - apresentam teores em torno 50 e 45%, respectivamente.

Quanto a estrutura macromolecular, a madeira é composta primordialmente por celulose, hemicelulose, lignina e pequenos teores de extrativos e compostos inorgânicos (ROWELL et al., 2005). Tendo em vista diferentes gêneros de madeiras, os teores de celulose são bastante homogêneos, quando comparados aos de lignina e hemiceluloses (KLOCK et al., 2005).

Quanto à anatomia, a madeira é conhecida por sua heterogeneidade, pois é composta por um intrincado conjunto de elementos celulares, que incluem células fibrosas, parenquimáticas, vasculares, epiteliais, entre outras. Simplificadamente, a madeira pode ser entendida como um compósito natural formado por uma matriz de lignina e hemicelulose reforçada com fibras celulósicas.

a) Celulose

A celulose tem sua fórmula molecular referida na forma condensada como: $(C_6H_{10}O_5)_n$, em que que “n” trata-se do grau de polimerização; é definida por Fengel; Wegener (2003) como um homopolímero constituído por unidades de β -D-anidroglucopirranose associadas entre si por ligações β -1,4 glucosídicas. O número de polimerização da celulose em seu estado natural transita entre 9.000 e 15.000, variando de espécie para espécie florestal (ROWELL et al., 2005).

Os feixes de moléculas de celulose unem-se formando micélio, que em conjunto compõem as microfibrilas, nas quais regiões caracterizadas por sua disposição altamente linear (regiões cristalinas) são alternadas por regiões de menor grau de orientação (regiões amorfas), sendo que o grau de cristalinidade da celulose medida pela técnica de difração de raios x está entre 50 e 70% (SJOSTRÖM, 1993).

Por sua vez, como ilustra a Figura 1.1, as microfibrilas agregam-se compondo as macrofibrilas, as quais formam a parede celular das fibras celulósicas (FENGEL, WENEGER, 2003). A parede celular de uma fibra celulósica é uma estrutura de múltiplas camadas, as quais distinguem-se principalmente por sua espessura e ângulo microfibrilar (ROWELL, 2005). Tais camadas são nomeadas como: parede primária, parede secundária externa (S_1), parede secundária média (S_2) e parede secundária interna (S_3). Comparada com as demais, a camada S_2 da parede secundária é a mais espessa, e por este motivo diversas características físicas da madeira como a rigidez estrutural são atribuídas a essa camada (TABET; AZIZ, 2013).

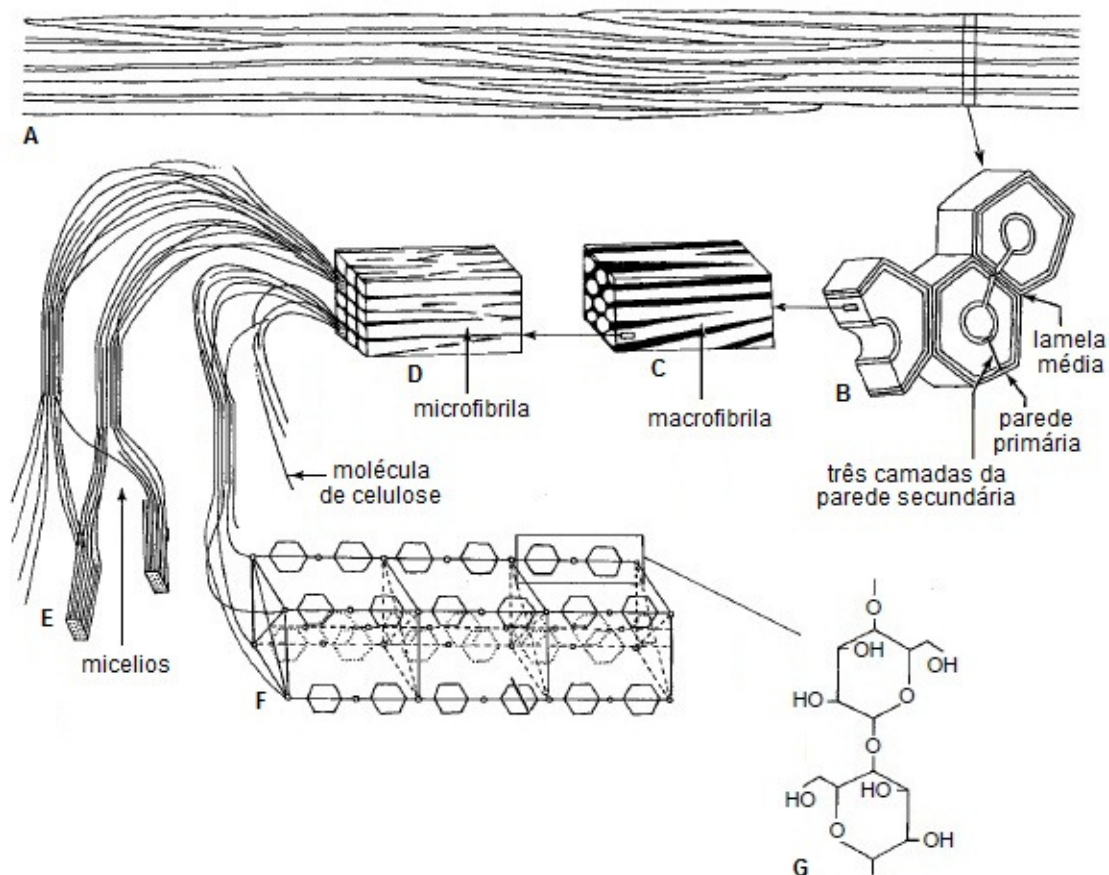


Figura 1.1 – Ultraestrutura de uma fibra celulósica. Em que: A= fibra celulósica; B= múltiplas camadas da parede celular; C= microfibrila; D= microfibrila; E= estrutura micelar; F= exemplificação das ligações intermoleculares; G= estrutura molecular da celulose.

Adaptado de Evert, (2006).

b) Lignina

A lignina é um polifenol amorfo de estrutura bastante complexa, irregular e altamente ramificada (EL MANSOURI; SALVADÓ, 2006; SILVA et al., 2009). Essa macromolécula é sintetizada por via radicalar a partir de três álcoois p-hidróxi-

cinamílicos precursores: p-cumarílico, coniferílico e sinapílico, o que confere um caráter hidrofóbico a esse polímero natural (CARVALHO et al., 2009).

No interior da madeira, a lignina é frequentemente encontrada em seus espaços intercelulares, como por exemplo, a lamela média, promovendo a ligação entre diferentes caracteres anatômicos (EVERT, 2006). Por esse motivo, a resistência mecânica da madeira é atribuída essencialmente à função da lignina (ROWELL et al., 2005).

c) Hemicelulose

Segundo Klock et al., (2005), as hemiceluloses são polímeros em que participam duas ou mais unidades de açúcares diferentes. Por definição, as hemiceluloses são polissacarídeos de estrutura complexa, formados fundamentalmente por cinco unidades básicas açúcares neutros: glucose, manose, xilose, arabinose e galactose (ROWELL, 2005). A estrutura química de uma hemicelulose tem arranjo amorfo e é constituída de uma cadeia central, na qual somam-se cadeias laterais (FENGEL, WENEGER, 2003). O caráter hidrofílico da madeira é comumente associado ao teor e constituição de suas hemiceluloses.

d) Extrativos

Até os dias de hoje, pouco foi estudado acerca da constituição química dos componentes acidentais da madeira (extrativos). Atualmente, com o advento dos temas relacionados a biorrefinaria, diversos estudos têm sido direcionados à caracterização tecnológica desses compostos, apresentando resultados incipientes (ALMEIDA et al., 2013; CHENG et al., 2013; MATTOS et al., 2014b). Sabe-se que os extrativos da madeira podem ser subdivididos em razão de sua natureza, em: fenólicos, alifáticos e terpenos. Na madeira, tais compostos

macromoleculares concentram-se principalmente em suas células parenquimáticas e canais resiníferos (FENGEL; WENEGER, 2003).

Os extrativos da madeira por seu caráter recalcitrante são associados a resistência da madeira a biodegradação (SHULTZ et al., 1995). Diversos compostos derivados desses componentes são utilizados na forma de óleos, resinas e etc., conferindo elevado valor econômico a algumas espécies florestais. Os extrativos e seus derivados são utilizados industrialmente para diversas finalidades como na produção de fragrâncias, solventes, ceras, aromas, tintas, solventes, desinfetantes, sabões, entre outros.

1.3.3 Lenhos juvenil e adulto

Durante todo o desenvolvimento de uma árvore, a formação do lenho juvenil está associada ao efeito de suas células de meristema apical. Não obstante, na medida em que se dá o crescimento em altura da árvore, sua base vai gradativamente experimentando uma diminuição do efeito dessas células, as quais progressivamente vão concentrando-se em posições axiais superiores. Esse mecanismo fisiológico acaba por ocasionar o amadurecimento do cambio vascular do indivíduo arbóreo, a partir do qual tem início a formação do lenho adulto (EVERT, 2006).

Portanto, fixando-se uma determinada posição axial, é possível entender que no sentido medula-casca (partindo-se do centro do tronco em direção à periferia), as propriedades do lenho juvenil vão gradativamente assumindo às do lenho adulto (VIDAURRE et al., 2011), sendo que a proporção entre os lenhos juvenil e adulto pode variar entre árvores de uma mesma espécie, entre espécies, bem como é condicionada a fatores como: área de plantio, herdabilidade genética, crescimento e produção hormonal, procedência da semente, condições atmosféricas e gestão silvicultural (BENDTSEN, 1978; LOO et al, 1985; ZHU et al., 2000; NUGHORO et al., 2012).

Tal como ilustra a Figura 1.2, o lenho juvenil consiste na região que delimita a medula, possui forma aproximadamente cilíndrica, diâmetro praticamente uniforme na direção axial e caracteriza-se pelo aumento ostensivo de propriedades anatómicas da madeira no sentido medula-casca (GATTO et al., 2012). Em comparação ao lenho adulto, apresenta: traqueídeos ou fibras mais curtos, lumes maiores, paredes celulares mais finas, células tangenciais menores, maior ângulo microfibrilar, menor porcentagem de lenho tardio, menor teor de celulose, maior teor de lignina, menor massa específica, maior contração longitudinal, menor resistência biológica, menor resistência e rigidez mecânica, maior formação de madeira de reação, textura mais grosseira e maior incidência grã espiralada (BENDTSEN, 1978; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989).

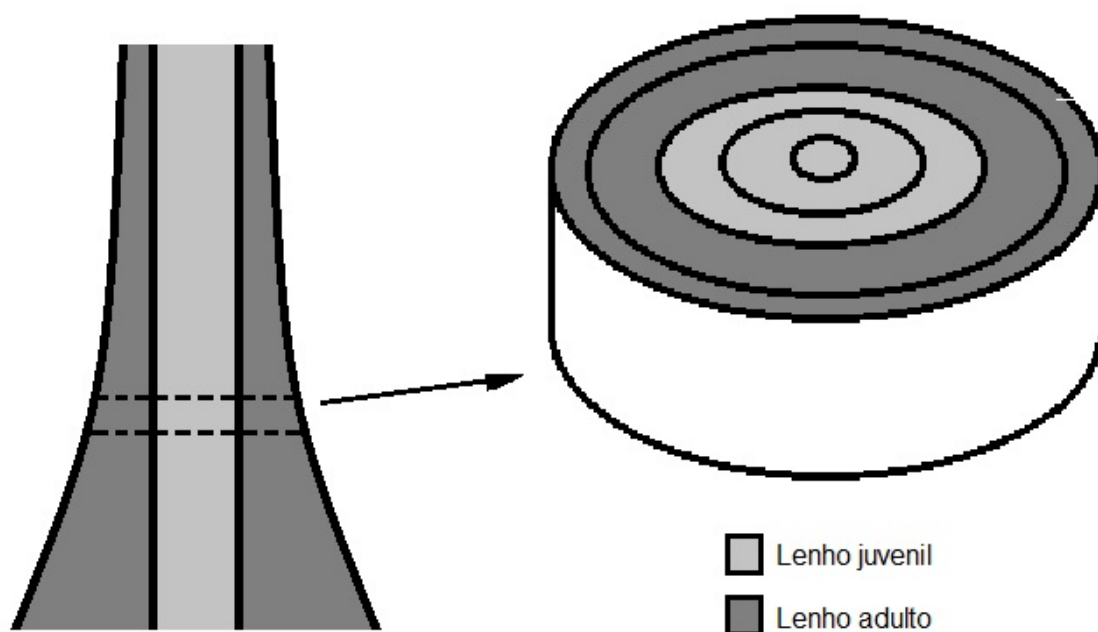


Figura 1.2 – Regiões respectivas aos lenhos juvenil e adulto.

Com base na definição das zonas respectivas aos lenhos juvenil e adulto é possível definir técnicas de manejo florestal, visando suprimir a proporção de lenho juvenil, e dessa forma, interferir positivamente em aspectos como a

incidência de defeitos de secagem, propriedades físico-mecânicas da madeira, rendimento na polpação celulósica e qualidade na produção de papel (ALTEYRAC et al., 2006; NUGHORO et al., 2012; PALERMO et al., 2013).

1.3.4 Degradação da madeira

Segundo Mendes; Alves (1998), o processo de degradação da madeira consiste nas depreciações às suas características naturais, causadas em conjunto por desgastes mecânicos, modificações físicas e o processo fisiológico de agentes xilófagos. Em seu estudo, Trevisan (2007) afirmou que os agentes degradadores da madeira podem ser divididos em razão de sua natureza, como bióticos ou abióticos, sendo que os primeiros são mais relevantes devido ao nível de desgaste que impõe ao material.

A complexidade do estudo da degradação da madeira abrange áreas distintas do conhecimento, tais como: a entomologia, a micologia, a fisiologia vegetal e a tecnologia da madeira, sendo de extrema importância o sinergismo entre elas (TREVISAN, 2007). Genericamente, a madeira pode ser considerada um material de difícil decomposição devido à sua densa estrutura anatômica e a presença de substâncias recalcitrantes em sua constituição. Dessa maneira, de modo geral, a resistência natural da madeira está associada ao seu teor de extrativos (SHULTZ et al., 1995; MATTOS et al., 2014a).

Entretanto, a degradação de uma peça de madeira não está somente condicionada à sua constituição química, de modo que diversas de suas características físicas altamente variáveis, bem como do ambiente a qual a mesma encontra-se exposta influenciam no processo de modificação cronológica de suas propriedades. Em consulta a literatura, verifica-se um destaque para algumas propriedades físicas, as quais influenciam significativamente na durabilidade da madeira: teor de umidade (THYBRING, 2013), temperatura, pH, disponibilidade de oxigênio (RABERG et al., 2005; MORESCHI, 2013). Já como fatores influentes do ponto de vista do ambiente em que a peça é destinada,

basicamente destacam-se: temperatura (AKINYELE; ADETUYI, 2005), pH e umidade relativa do ar (MORESCHI, 2013).

1.3.5 Agentes bióticos

No grupo nominado como dos agentes bióticos que depreciam a madeira encontram-se os fungos, os insetos, as bactérias e as brocas marinhas (TREVISAN, 2007). Entretanto, de acordo com Santos (1992), a infestação propiciada pelos fungos faz com que esses organismos sejam tidos como os principais agentes biológicos, pois comprometem a qualidade da madeira tendo em vista diversos fins tecnológicos pela influência em características como: resistência mecânica, inflamabilidade, massa, cor, permeabilidade e poder calorífico. Aparte disso, em seu estudo, Raberg et al., (2013) destacaram o papel dos fungos com agentes da ciclagem do carbono em diversos materiais lignocelulósicos.

O processo de biodegradação da madeira ocorrente pela ação de fungos xilófagos acontece pela secreção de múltiplas enzimas que em conjunto reagem com a parede celular da madeira (CARVALHO et al., 2009). Dessa maneira, esses organismos reconhecem os polímeros naturais da parede celular como fonte de nutrição, e alguns deles possuem sistemas enzimáticos específicos, os quais possuem a capacidade de transformar esses polímeros em unidades digeríveis (LEPAGE, 1986).

Em seu trabalho, Mendes; Alves (1988) asseveram que os requisitos necessários para o crescimento dos fungos na madeira são nutrientes, temperatura, suprimento de oxigênio, conteúdo de umidade da madeira e pH intrínsecos tanto da madeira quanto do ambiente em que a mesma está contida. Os fungos xilófagos são divididos com base nas evidências de sua infestação, como: apodrecedores, manchadores e emboloradores (STANGERLIN, 2012).

a) Fungos apodrecedores

Os fungos apodrecedores são de longe os principais fungos tidos em consideração nos estudos realizados em torno da biodegradação da madeira, devido aos danos causados na estrutura celular madeira, o que se reflete ostensivamente em sua resistência e rigidez estrutural. Os fungos apodrecedores são subdivididos em razão de sua preferência alimentar em podridão branca (*white-rot fungi*), podridão parda (*brown-rot fungi*) e podridão mole (*soft-rot fungi*) (CARVALHO et al., 2009).

a.1) Podridão parda

Preferencialmente, os fungos de podridão parda atacam os componentes da parede celular da madeira (celulose e hemiceluloses), deixando intacta a região envoltória das células onde se concentra a lignina (ROWELL, 2005). Durante o seu desenvolvimento, tais fungos causam impacto tanto na massa como no volume de amostras (RABERG et al., 2005).

De acordo com Medes; Alves (1998), as evidências de sua infestação caracterizam-se pelo marrom adquirido pela madeira deteriorada. Moreschi (2013) reportou que a madeira atacada por este tipo de fungo comumente apresenta fissuras paralelas e perpendiculares à direção da grã, devido a fragilização da lamela média das células fibrosas. Os principais fungos de podridão parda são: *Gloeophyllum trabeum*, *Antrodia serialis*, *Antrodia sinuosa*, *Antrodia vaillantii*, *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Lentinus lepidus*, *Paxillus panuoides*, *Poria* spp. e *Serpula lacrymans* (RABERG et al., 2005).

a.2) Podridão branca

Conforme Rowell (2005), os fungos de podridão branca degradam indistintamente os açúcares da madeira (celulose e hemiceluloses), como também a lignina. Segundo Raberg et al., (2005), os fungos de podridão branca

causam elevada perda de massa e propriedades mecânicas, mas pouca variação no volume. Macroscopicamente, além do branqueamento da cor da madeira, a evidência de manchas escuras circundando regiões caracterizadas pela diminuição dos níveis naturais de brilho especular é a característica da madeira deteriorada pela ação de fungos de podridão branca (MORESCHI, 2013).

Em seu estudo, Rowell (2005) classificou em três tipos a deterioração causadas por esses fungos: podridão de bolsas brancas, podridão-mosqueada e podridão branca-fibrosa. Segundo Raberg et al., (2005), as principais espécies de fungos de podridão parda são: *Trametes versicolor*, *Schizophyllum commune*, *Phlebia subseralis*, *Phlebiopsis gigantea*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Ceraceomerulius serpens* e *Bjerkanderna adusta*.

a.3) Podridão mole

À semelhança dos fungos de podridão parda, a preferência alimentar dos fungos de podridão mole ocorre pela celulose e hemicelulose (ROWELL, 2005). O ataque imposto por esse tipo de fungo é superficial, dificilmente alcançando uma penetração maior do que 2 cm (MORESCHI, 2013). Entretanto, há uma fragilização dos componente degradados, os quais permanecem sujeitos a remoção causada por desgastes mecânicos, e nesse caso, novas superfícies do substrato são expostas.

À olho nú, é possível verificar que a madeira atacada pelos fungos de podridão mole apresenta coloração escurecida e fissuras paralelas e perpendiculares à direção da grã (LELIS et al., 2001). Os fungos desse tipo mais mencionados na literatura são: *Aureobasidium pullulans*, *Phialophora hoffmanii*, *Phialophora fastigiata*, *Phoma* spp. e *Rhinocladiella atrovirens* (RABERG et al., 2005).

b) Fungos manchadores e emboloradores

A degradação causada por estes tipos de fungos é considerada como secundária dentre os agentes biológicos, pois seu ataque não afeta a estrutura celular da madeira, de modo que a integridade estrutural da peça infestada não é comprometida (MORESCHI, 2013). Superficialmente, a verificação do ataque desses dois tipos de fungos é semelhante, caracterizada pela textura pastosa, variando de coloração conforme a espécie de fungo e as condições físicas do substrato.

Segundo Moreschi (2013), madeiras naturalmente mais resistentes à biodegradação não são atacadas por estes tipos de fungos, sendo que os mesmos são visualizados principalmente em madeiras claras. Os fungos emboloradores se desenvolvem na superfície da madeira, alimentando-se dos componentes existentes nas células recém cortadas ou resíduos nutritivos depositados sobre a superfície (MENDES; ALVES, 1988). Entretanto, diferentemente dos fungos emboloradores, os fungos machadores penetram nos espaços intercelulares da madeira por meio do crescimento de suas hifas, preferencialmente na direção axial da madeira (MORESCHI, 2013).

1.3.6 Agentes abióticos

Afora a degradação oriunda dos agentes bióticos, a madeira é susceptível à agentes não biológicos ou abióticos. Conforme Colom et al., (2003), tais fatores podem ser elencados em: umidade, temperatura, radiação solar, presença de ozônio e poluição. O grau de susceptibilidade da madeira à esses agentes é conhecida como sua resistência ao intemperismo e é principalmente atribuída ao teor e constituição de sua lignina (GEORGE et al., 2005).

Genericamente, o mecanismo de degradação pode ser explicado pela combinação entre a degradação de compostos na superfície do material e a posterior retirada do material fragilizado pela ação de desgastes mecânicos. O mecanismo tem início com as reações dos grupos cromóforos da lignina que são foto-iniciadas pela ação da componente ultravioleta da luz solar, formando

radicais livres, os quais oxidam os açúcares em contato com oxigênio. Posteriormente se dá a lixiviação dos compostos degradados pela ação de chuvas e ventos, causando principalmente a descoloração (acinzentamento) da superfície da peça (AGARWAL, 1998; VALVERDE; MOYA, 2010; MATTOS et al., 2013).

Em seu estudo sobre a modificação na microestrutura da madeira quando exposta à luz ultravioleta, Kuo; Hu (1991) reportaram que a camada S₃ da parede secundária é a mais susceptível à deterioração, seguida da camada S₂. Segundo os mesmos autores, em 30 dias de exposição do material à radiação artificial, a camada S₃ foi totalmente removida, já a S₂ somente apresentou-se mais fragilizada. No entanto, antes disso (7 dias), ocorreu a depolimerização da matriz lignocelulósica.

Para Chang et al., (2010), a maioria dos compostos deteriorados em razão da luz visível e ultravioleta e posteriormente lixiviados pela ação da chuvas são oriundos da foto-oxidação dos extrativos da madeira. Contudo, os autores informaram que essa é uma lacuna da literatura em razão da falta de informações sobre o papel dos extrativos na fotoestabilização da cor da madeira quando sujeita ao intemperismo. Nesse contexto, cabe ser ressaltada a ação antioxidante reportada por alguns autores analisando os compostos extraíveis de diferentes espécies florestais (WANG et al., 2003; WANG et al., 2004), de modo que possivelmente um tratamento com esses produtos pode conferir maior estabilidade colorimétrica à madeira exposta ao intemperismo.

1.3.7 Ensaio para a avaliação da durabilidade da madeira

A durabilidade ou vida útil são termos comumente associados à degradação de uma peça de madeira, pois ao longo de seu uso em qualquer aplicação, sua durabilidade é maior na medida em que menor é sua taxa de degradação. Afim de avaliar a durabilidade da madeira, se faz necessário levar-se em consideração a finalidade para qual estima-se que o material será utilizado,

pois como já citado, o comportamento da perda de propriedades tecnológicas da madeira é altamente variável em razão de diversos fatores exógenos e endógenos ao material. Tendo em vista sua utilização prática de uma peça de madeira sólida, frequentemente é necessário o contraponto entre o tempo de vida útil do produto e seu custo financeiro.

Existem diversos procedimentos laboratoriais utilizados para a avaliação da degradação atribuída aos fungos xilófagos, os quais inclusive são normatizados tanto por entidades nacionais, quanto internacionais. Nesse contexto é possível citar que as principais normas à esse respeito são a D2017-05 proposta pela *American Society for Testing and Materials* – ASTM, (2014) e a BS EN 113 regulamentada pela *European Committee for Standardization* – CEN, (1996).

Dessa maneira, é possível inocular uma determinada espécie de fungo xilófago e acompanhar o processo de degradação por meio de técnicas de caracterização do substrato. Ainda com relação aos organismos bióticos, outros procedimentos têm vistas de contabilizar a biodeterioração atribuída a espécies específicas de insetos (principalmente cupins), como: D3345 da ASTM (2008); bem como brocas marinhas: BS EN 275 da CEN (1992).

Já com relação aos agentes deterioradores da madeira de natureza não biológica, é possível avaliar a perda de propriedades durante seu processo de ataque ao material por meio de câmaras de simulação de fenômenos climatológicos. Tais características avaliadas com o auxílio desses equipamentos são conhecidas como resistência ao intemperismo artificial (KUO; HU, 1991; HUANG et al. 2012a; HUANG et al., 2012b).

1.3.8 Ensaio de campo

Por outro lado, é possível analisar a deterioração da madeira contabilizando-se em consórcio a depreciação causada por agentes bióticos e abióticos. Tais experimentos são conhecidos como testes de campo e foram utilizados em diversos estudos antecedentes, com vistas a gerar subsídios para a

previsão da vida útil de produtos madeireiros (MATTOS, 2011; VIVIAN, 2011; STANGERLIN, 2012).

Nesses ensaios, as amostras são enterradas até a metade de seu comprimento em um ambiente ao ar livre, doravante, por meio de inspeções periódicas é possível monitorar as modificações ocorridas em razão dos agentes intempéries encontrados no ambiente de exposição (SANTINI, 1988). Assim, o mecanismo de apodrecimento da amostra acaba por se dar de maneira atípica, pois o ambiente externo varia de acordo com o ponto de referência dentro da amostra (VENMALAR et al., 2011).

Afim de explicar o condicionamento conferido à amostra em um ensaio de campo, Mendes; Alves (1988) propuseram uma analogia entre uma amostra testada em um campo de apodrecimento e um poste convencional de eletrificação. De acordo com esses autores existem pelo menos quatro situações diferentes para essa exemplificação: a) no topo do poste, onde se forma uma área de umedecimento e secagem intermitentes; b) logo acima do nível do solo, devido as condições permanentes de baixa umidade; c) na região de afloramento (linha do solo), a qual permanece em um alto nível de umidade; d) extremidade inferior, quando a base do poste atinge um lençol freático, formando uma região de elevado nível de umidade.

Outros testes de campo não convencionais expõem as amostras em prateleiras metálicas de modo que o material deixa de estar em contato com o solo. A característica avaliada por intermédio desse tipo de experimento é conhecida como a resistência da madeira ao intemperismo natural e concentra-se especialmente na avaliação de propriedades de superfície das amostras testadas. Diversas propriedades tecnológicas da madeira foram examinadas por meio de experimentos com este aspecto em diversos estudos antecedentes (BARRETO; PASTORE, 2009; MATTOS et al., 2013; TOMAK et al., 2014).

Quanto a evolução causada pelos resultados obtidos em estudos antecedentes, Raberg et al., (2013) destacaram a avaliação da atividade microbiana da madeira segundo diferentes tipos de ambientes de exposição, afim

de que a partir de parâmetros climatológicos dos campos seja possível determinar as condições ideais para a instalação de campo de apodrecimento acelerados. Certamente, a fixação de condições padronizadas para a instalação de campos de apodrecimento geraria subsídios para a obtenção de dados sobre a durabilidade da madeira com maior rapidez e confiabilidade.

2 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO

2.1 Seleção das árvores

Para o presente estudo, foram selecionadas vinte árvores das espécies *Eucalyptus botryoides*, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus tereticornis*, sendo cinco indivíduos arbóreos para cada espécie. No momento da derrubada, os plantios apresentavam aproximadamente 60 anos de idade. A procedência das árvores foi de uma floresta homogênea localizada na granja Carola, município de Charqueadas, estado do Rio Grande do Sul, a qual geograficamente localiza-se nas coordenadas 29° 57' 35" Sul e 51° 39' 15" Oeste. O material pertencia a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e foi cedido gratuitamente à Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) para fins de pesquisa científica.

Como critério de seleção, foram preteridas árvores localizadas em terreno inclinado, bem como as que apresentavam forma florestal irregular. Contudo, de modo a nortear a seleção do material por parâmetros técnicos confiáveis, foi empregado o procedimento normativo D5535-94 da *American Society of Testing and Materials* – ASTM (2010).

2.2 Confecção das amostras

De cada árvore derrubada, foi selecionada a tora basal de 1,5 m de comprimento, retiradas a uma altura do solo de 0,1 m. As toras foram transportadas à serraria da empresa e transformadas em pranchões centrais com a espessura de 8 cm. Em sequência, os pranchões foram transportados para o Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira da UFPEL, onde foram submetidos a um procedimento de secagem ao ar livre durante um período de aproximadamente três meses.

Posteriormente, foram confeccionadas amostras orientadas em relação ao eixo longitudinal dos pranchões com as dimensões de 1 cm x 1 cm x 20 cm, sendo a maior dimensão orientada para direção longitudinal das amostras. Tais amostras foram retiradas nas regiões próximas à medula e a casca dos pranchões, de modo a caracterizar os lenhos juvenil e adulto, respectivamente.

2.3 Condicionamento das amostras

Após sua confecção, as amostras foram armazenadas na câmara climática do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPEL, onde foram condicionadas ao teor de umidade de 12%, sob as condições de 65% de UR e 20 °C de temperatura, haja vista que essa é a condição padrão para avaliação de propriedades tecnológicas da madeira quando submetidas a ensaios de biodeterioração em campo (MATTOS, 2011; VIVIAN, 2011; STANGERLIN, 2012). A partir de seu condicionamento, com vistas à posterior instalação dos campos de apodrecimento, as amostras foram pré-caracterizadas por meio de medidas de sua massa por meio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g.

2.4 Instalação dos campos de apodrecimento

Os campos de apodrecimento foram instalados no 4º subdistrito do município de Piratini, estado do Rio Grande do Sul, localidade conhecida como Serra do Barroco, em que as coordenadas geográficas são de 31º 15' 45" Sul e 53º 07' 36,5" Oeste. Nos campos de apodrecimento, as amostras foram enterradas até a metade de seu comprimento e organizadas em blocos contendo quatro amostras cada. Dentro de cada bloco, as amostras permaneceram de modo que seu layout de posicionamento formasse um quadrado de lados iguais a 10 cm. Já entre blocos, foi empregada uma distância de 30 cm, conforme ilustra a Figura 2.1.

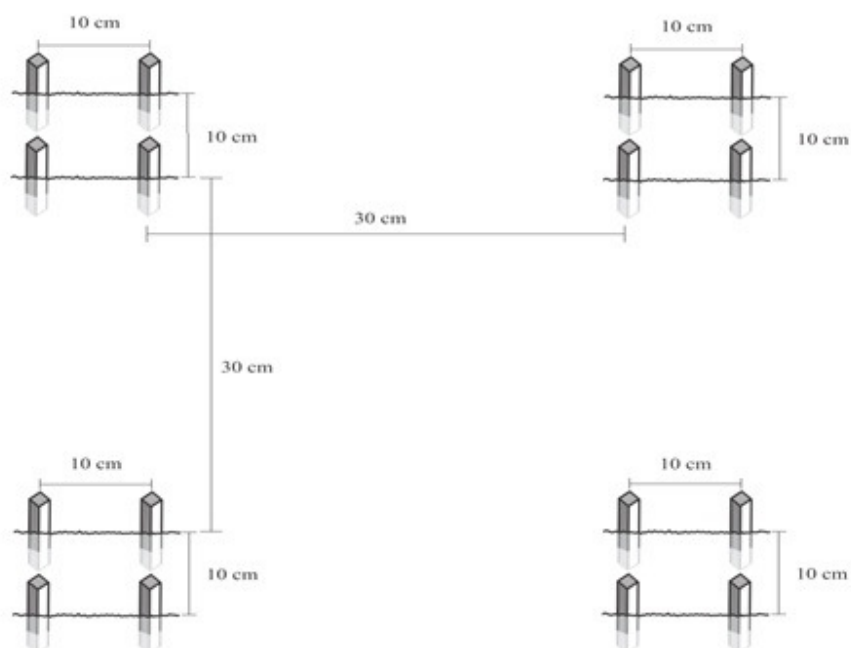


Figura 2.1 – Layout das amostras distribuídas nos campos de apodrecimento.

Adicionalmente, foram propostos três tipos de ambientes de exposição, o primeiro em uma região de campo aberto, onde as amostras permaneceram totalmente expostas aos agentes intempéries, em virtude de que o terreno apresentava vegetação quase inexistente. O segundo campo foi instalado em uma região parcialmente alagada, onde as amostras ficaram parcialmente imersas em uma lâmina de água com altura de aproximadamente 2 cm. Já o último teste de campo foi conduzido no interior de um plantio homogêneo de *Pinus elliottii*, em que durante o ensaio as árvores possuíam entre 5 e 6 anos de idade e uma altura média de aproximadamente 8 m.

Um total de 864 amostras foram submetidas aos testes de campo, sendo que outras 72 ficaram em espera durante o experimento, a fim de serem as amostras controle. A fim de monitorar o mecanismo de deterioração, três amostras de cada referência (combinação entre os fatores espécie e lenho) foram recolhidas dos campos a cada 45 dias, até um total de 540 dias, totalizando 12 coletas.

3 BIODETERIORAÇÃO DOS LENHOS JUVENIL E ADULTO DE QUATRO EUCALIPTOS SUBMETIDOS A TRÊS DIFERENTES CAMPOS DE APODRECIMENTO

3.1 Introdução

No atual cenário do desenvolvimento econômico mundial, a utilização de produtos obtidos da madeira está principalmente condicionada a seu custo financeiro. Dessa maneira, o conhecimento da durabilidade se faz importante à medida que possibilita a elaboração de um planejamento da vida útil de uma peça de madeira (BOASIAKO; ALLOTEY, 2010).

Para a determinação da durabilidade da madeira, em seu trabalho, Brischke; Rolf-Kiel (2010) ressaltaram a eficácia dos ensaios de campo, pois tais métodos submetem as amostras à condições muito aproximadas da realidade de serviço de produtos destinados ao uso externo. Segundo Little et al., (2013), a vantagem dos ensaios de campo se deve a possibilidade de contabilizar a degradação de fungos e de insetos em consórcio.

A taxa de degradação da madeira em contato com o solo é uma característica atribuída a diversos fatores, incluindo: a constituição química (LATORRACA et al., 2011) e o teor de umidade da madeira (THYBRING, 2013); características do solo como: PH, salinidade, teores de matéria orgânica e de nutrientes (BRISCHKE et al., 2014); bem como características atmosféricas como: umidade relativa do ar e temperatura (RABERG et al., 2005). Por esse motivo, a atividade microbiana em testes de campo é variável tanto entre diferentes ambientes de exposição, quanto dentro de um mesmo ambiente (BRISCHKE et al., 2014).

Um exemplo dessa variabilidade são as madeiras de espécies do gênero *Eucalyptus*, as quais mesmo sendo classificadas dentro de um mesmo gênero taxonômico apresentam níveis de durabilidade distintos. De acordo com a norma AS 5604 da Australian Standard (2003), a durabilidade das madeiras de

Eucalyptus paniculata e *Eucalyptus tereticornis* quando em contato com o solo é de mais de 25 anos. Por outro lado, para a madeira de *Eucalyptus botryoides*, segundo essa mesma norma, espera-se que sua resistência natural, permita uma utilização confiável dentro de um período entre 5 e 15 anos. Já para a madeira de lemon scented gum (*Corymbia citriodora*), a qual embora não seja uma espécie do gênero *Eucalyptus*, também é vulgarmente conhecida como um eucalipto, a norma australiana citada reporta que a expectativa para a durabilidade dessa madeira está entre 15 e 25 anos.

Para Magalhães et al., (2012), no caso da avaliação da durabilidade da madeira que provem do Brasil, ainda há o efeito de seu crescimento rápido, pois a medida em que é maior a taxa crescimento, maior também é a proporção de alburno, o qual é mais susceptível a degradação comparado ao cerne. Por esse motivo madeiras como a *Corymbia citriodora*, as quais são tradicionalmente conhecidas por apresentarem alta durabilidade, acabam por apresentar propriedades adequadas para uso somente com a aplicação de produtos preservativos.

Em seu estudo, Venmalar et al., (2011) asseveram que a durabilidade de espécies de rápido crescimento não é avaliada somente em países de clima tropical como o Brasil, mas também na Ásia, na Europa e na Oceania. Para essa avaliação, os chamados ensaios não destrutivos (END's) têm sido largamente utilizados e mencionados como uma tendência para o futuro (RABERG et al., 2005; VENALAINEN et al., 2014).

Nesse contexto, a análise visual com atribuição de notas em razão do estado fitossanitário é uma das técnicas mais empregadas no meio científico. Entretanto, já que esse critério baseia-se em uma análise decisória do experimentador, o resultado pode ser considerado subjetivo e pouco confiável, e por isso deve ser utilizada como suporte para outros dados quantitativos (RABERG et al., 2005).

Portanto, em ensaios de campo, a perda de massa percentual se trata do principal parâmetro para comparações em razão de fatores de um mesmo estudo,

bem como entre estudos distintos (CURLING et al., 2002; RABERG et al., 2005). Entretanto, Venalainen et al., (2014) propuseram críticas aos critérios tradicionais de análise, pois levam em consideração com demasiada confiabilidade a perda de massa, em detrimento de uma série de outros parâmetros mais interessantes do ponto de vista prático como a dureza e parâmetros estéticos. O presente capítulo teve por objetivo monitorar a deterioração dos lenhos juvenil e adulto de quatro eucaliptos de crescimento rápido em três ambientes de exposição distintos por meio de parâmetros físicos, colorimétricos, visuais e mecânicos.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Análise Visual

A avaliação visual foi realizada segundo o sistema de notas proposto pela norma BS EN 252 da *European committee for Standardization* (CEN, 1989). Dessa maneira, o estado fitossanitário de cada amostra foi avaliado ponderando-se principalmente, sua coloração e a presença de defeitos como rachaduras e marcas de fungos. A nomenclatura dos níveis de deterioração foi adaptada da normativa mencionada (BS EN 252), a qual originalmente está redigida na língua inglesa. Tais critérios qualitativos constam na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação do nível de deterioração da madeira.

Nota	Descrição	Definição
0	Sem ataque	Não há evidência de deterioração, descoloração, amolecimento ou enfraquecimento causado por microrganismos.
1	Ataque leve	Possibilidade de decadência, sem amolecimento significativo ou enfraquecendo até 1 mm de profundidade.
2	Ataque moderado	Evidência significativa de decadência, com áreas de decadência (amolecida ou enfraquecidos madeira) de 2 a 3 mm de profundidade.
3	Ataque severo	Fortes evidências de decadência, intenso amolecimento e enfraquecimento, típica deterioração fungica em grandes áreas de 3 a 5 mm de profundidade ou mais.
4	Falha, fratura	Amostra rompe-se após um teste de flexão.

Fonte: Adaptado da norma BS EN 252 (CEN, 1989).

3.2.2 Massa específica

A fim de verificar a exatidão de algumas variáveis como parâmetro de degradação das amostras em campo, foi avaliada a massa específica (Equação 2.1) ao teor de umidade padrão de 12%, tanto antes, como após os testes de campo.

$$\rho = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (2.1)$$

Em que: ρ = massa específica (g.cm^{-3}); $m_{12\%}$ = massa (g); $V_{12\%}$ = volume (cm^3).

Para tanto, foram utilizados paquímetro digital (resolução de 0,01 mm) e balança analítica digital (resolução de 0,01 g), para a avaliação das dimensões físicas e da massa das amostras, respectivamente.

3.2.3 Teor de umidade

Para esse ensaio, após o período de degradação em campo, cada amostra teve cortada a sua extremidade que esteve enterrada durante os testes de campo, obtendo-se de cada amostra, uma sub-amostra com as dimensões de 2 cm x 1 cm x 1 cm (maior dimensão para a direção longitudinal). Dessa maneira, cada sub-amostra foi submetida a um procedimento de secagem convencional na estufa laboratorial do curso de Engenharia Industrial Madeira da UFPEL, sob a temperatura de 103 ± 2 °C, até obtivessem massa constante. Antes e após o procedimento de secagem, foi realizada a pesagem das amostras com o auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,0001 g. Em posse desses dados, o teor de umidade à base seca foi determinado em conformidade com a equação 2.2.

$$Tu = \frac{(m_{12\%} - m_{0\%})}{m_{0\%}} \quad (2.2)$$

Em que: Tu= teor de umidade à base seca (%); $m_{12\%}$ = massa ao teor de umidade de 12% (g); $m_{0\%}$ = massa ao teor de umidade de 0% (g).

3.2.4 Perda de massa

Para tal, foram aproveitados os dados obtidos com as pesagens realizadas antes e depois dos testes de campo, considerando-se o supracitado condicionamento em termos da estabilização do teor de umidade (12%). Em posse desses dados, foi empregada a equação 2.3 para o cálculo da perda de massa porcentual das amostras ensaiadas.

$$Pm = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Em que: Pm= perda de massa (%); m_i = massa inicial (g); m_f = massa final (g).

3.2.5 Características colorimétricas

A partir da estabilização do teor de umidade de equilíbrio higroscópico em 12%, os parâmetros colorimétricos das amostras foram avaliados após os testes de campo pelo método conhecido como CIEL^{*}a^{*}b^{*}, utilizando-se um colorímetro portátil da marca Konica Minolta, modelo CR-400, com abertura de sensor de 8 mm. O aparelho foi configurado para utilização de fonte de luz (iluminante) D65 e ângulo de observação de 10°, de acordo com padrões estabelecidos pela *Commission International de L'Éclairage* (CIE).

Os ensaios colorimétricos foram realizados em triplicata nas faces radial e tangencial de cada amostra, na região das amostras que esteve na linha do solo durante o período dos testes de campo, tal zona é referida na literatura como *critical zone* (MAGALHÃES et al., 2012).

Portanto, foram determinados os parâmetros: luminosidade (L^*), coordenada verde-vermelho (a^*) e coordenada amarelo-azul (b^*). Em posse destes dados, a fim de explorar melhor as características cromáticas das amostras biodeterioradas, foram calculados os parâmetros cromaticidade (C^*) e ângulo de tinta (h), utilizando-se as equações 2.4 e 2.5, respectivamente.

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (2.4)$$

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (2.5)$$

Em que: a^* = coordenada cromática verde-vermelho; b^* = coordenada cromática azul-amarelo; C^* = cromaticidade; h = ângulo de tinta.

Por fim, comparando-se as amostras degradadas com as amostras controle, foram calculadas as variações (Δ 's) dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* , obtidas com base nas equações 2.6, 2.7 e 2.8, respectivamente. Os

resultados desses cálculos possibilitaram a obtenção da variação de cor (ΔE), a qual foi determinada pela aplicação da equação 2.9.

$$\Delta L^* = L^*_B - L^*_C \quad (2.6)$$

$$\Delta a^* = a^*_B - a^*_C \quad (2.7)$$

$$\Delta b^* = b^*_B - b^*_C \quad (2.8)$$

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (2.9)$$

Em que: ΔL^* = variação de luminosidade; L^*_B = luminosidade da amostra biodeteriorada; L^*_C = luminosidade da amostra controle; Δa^* = variação de coordenada cromática verde-vermelho; a^*_B = coordenada cromática verde-vermelho da amostra biodeteriorada; a^*_C = coordenada verde-vermelho da amostra controle; Δb^* = variação de coordenada cromática azul-amarelo; b^*_B = coordenada cromática azul-amarelo da amostra biodeteriorada; b^*_C = coordenada azul-amarelo da amostra controle; ΔE = variação de cor.

3.2.6 Flexão estática

Por meio do ensaio de flexão estática de três pontos, foram avaliados o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR). Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos, eletromecânica e informativa da marca EMIC com capacidade nominal de 300 kN. Como diretriz para os ensaios, o software do equipamento foi configurado em conformidade com as prescrições normativas do procedimento D143-94 da ASTM, (2007).

Não obstante, foram propostas adaptações a norma utilizada devido as dimensões reduzidas das amostras do presente estudo. Dessa maneira, levando em consideração os princípios físicos que tangem aos esforços mecânicos envolvidos no ensaio, foram empregados um vão entre os apoios de primeiro grau de 140 cm e uma velocidade de ensaio de 0,65 mm.min⁻¹. A partir do valor do momento de inércia das amostras ensaiadas (equação 2.10), os parâmetros

mecânicos E_m e f_m foram obtidos pelo software através das equações 2.11 e 2.12, respectivamente.

$$i = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.10)$$

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot i \cdot f} \quad (2.11)$$

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.12)$$

Em que: i = momento de inercia (m^4); b = base da amostra (m); h = altura da amostra (m); MOE = módulo de elasticidade (MPa); P = carga aplicada (N); L = vão entre os vínculos de primeiro grau (m); f = flecha máxima (m); MOR = módulo de ruptura (MPa); F = carga máxima aplicada (N).

Após os ensaios, o teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico (Equação 2.13), e os parâmetros mecânicos de resistência (E_m) e rigidez (f_m) foram corrigidos ao teor de umidade padrão (12%), utilizando-se as equações (Equações 2.14 e 2.15) previstas na Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, (1997).

$$Tu = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \cdot 100 \quad (2.13)$$

$$MOE_{12\%} = MOE_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (2.14)$$

$$MOR_{12\%} = MOR_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (2.15)$$

Em que: Tu = teor de umidade (%); m_i = massa antes do procedimento de secagem (g); m_f = massa após o procedimento de secagem (g); $MOE_{12\%}$ = módulo de elasticidade corrigido em razão do teor de umidade padrão (MPa); $MOE_{U\%}$ = módulo de elasticidade obtido pelo ensaio mecânico (MPa); $U\%$ = teor de umidade

no momento do ensaio (%); $MOR_{12\%}$ = módulo de ruptura corrigido em razão do de teor de umidade padrão (MPa); $MOR_{U\%}$ = módulo de ruptura obtido pelo ensaio mecânico (MPa)

3.2.7 Fragilidade

Após a realização dos ensaios mecânicos, os gráficos de tensão *versus* deformação foram exportados do software do equipamento e analisados conforme a metodologia descrita por Phuong et al., (2007). Assim, ponderando-se as áreas respectivas as regiões elástica e plástica dos gráficos analisados (Figura 3.1), foi calculada a Fragilidade para cada amostra por meio da Equação 2.16.

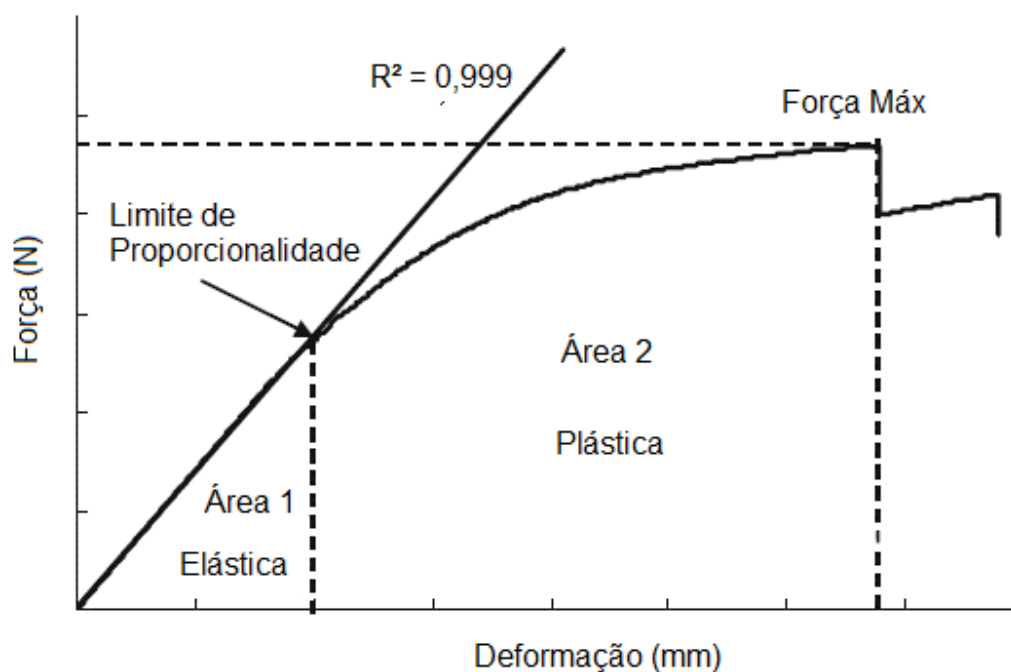


Figura 3.1 – Gráfico tensão versus deformação.

Fonte: Adaptado de Phuong et al., (2007).

$$\text{Fragilidade} = \frac{\text{Área elástica}}{(\text{Área elástica} + \text{Área plástica})} = \frac{\text{Resiliência}}{\text{Tenacidade}} \quad (2.16)$$

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Propriedades físicas

Os resultados obtidos com a ANOVA multifatorial (Tabela 3.2) dão conta de que a perda de massa foi o único parâmetro que distinguiu-se quando comparado dentro de todos os fatores propostos para o presente estudo.

Tabela 3.2 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros físicos em função dos fatores em estudo.

	Espécie	Tipo de lenho	Tipo de campo	Tempo de exposição
Pm	15,24*	11,95*	4,64*	16,87*
ρ	6,56*	39,65*	0,08 ^{NS}	1,01 ^{NS}
Tu	18,07*	12,73*	0,76 ^{NS}	43,09*

Em que: ρ = massa específica; Pm= perda de massa; Tu= teor de umidade; *= significativo a 5% de probabilidade de erro; ^{NS}= não significativo.

Os efeitos não significativos dos fatores tipo de campo e tempo de exposição no parâmetro massa específica e do fator tipo de campo dentro do parâmetro teor de umidade indicam que essas propriedades físicas não aparentam um comportamento interessante a fim de caracterizar a biodeterioração das amostras nos ensaios de campo experimentados.

Os níveis de perda de massa mostrados na Figura 3.2 dão conta de que houve uma tendência à maior degradação, quanto maior o tempo de exposição, independentemente da espécie florestal, do tipo de madeira e do tipo de ambiente

de exposição. Já para a massa específica e teor de umidade essa tendência foi inversa.

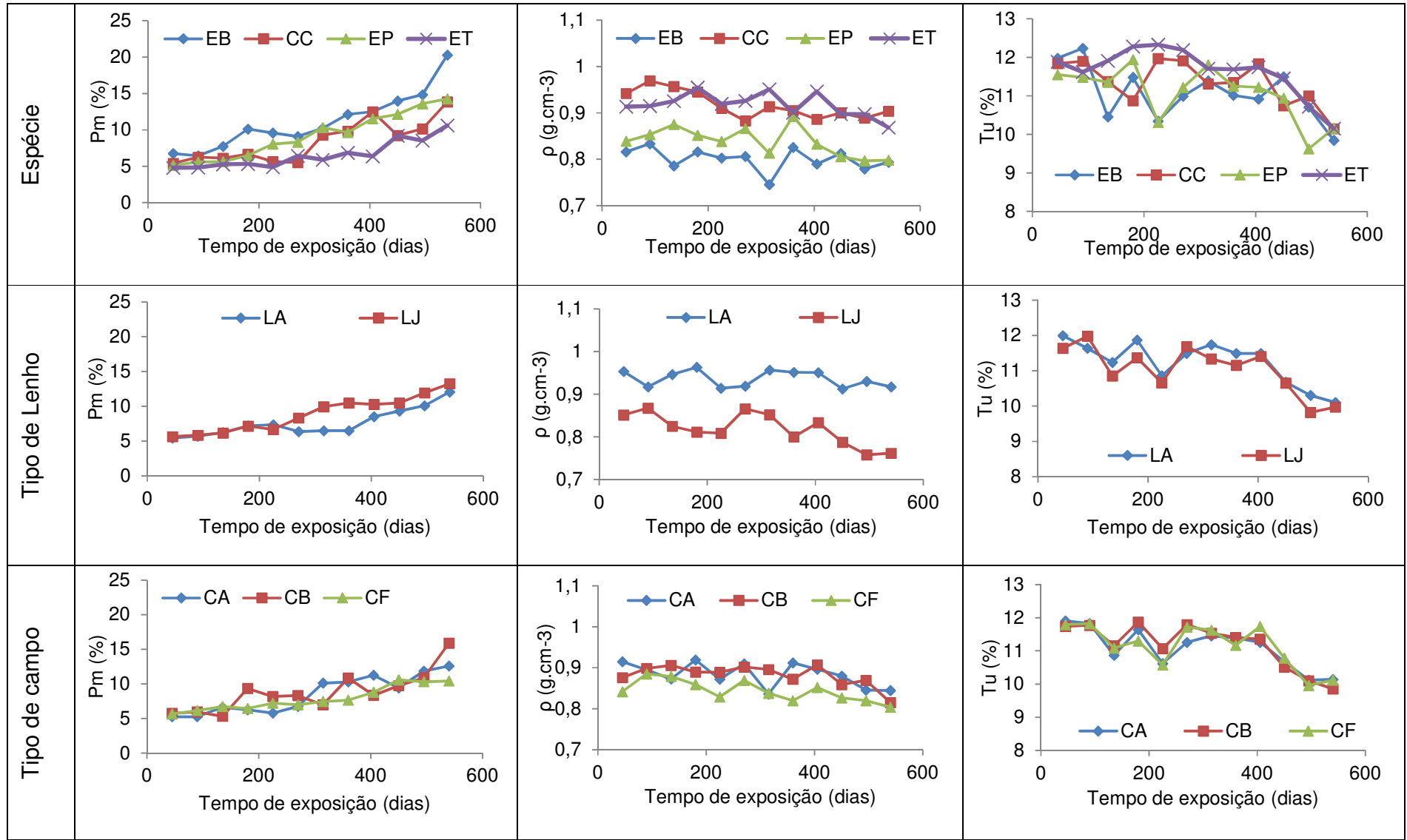


Figura 3.2 – Níveis de perda de massa, massa específica e teor de umidade de acordo com o tempo de exposição. Em que: PM= perda de massa; ρ = massa específica; Tu= teor de umidade; EB= *Eucalyptus botryoides*; CC= *Corymbia citriodora*; EP= *Eucalyptus paniculata*; ET= *Eucalyptus tereticornis*; LJ= Lenho juvenil; LA= Lenho adulto; CA= campo aberto; CB= campo banhado; CF= campo floresta.

Alguns autores reportaram que a partir de 10% de perda de massa, as amostras biodeterioradas em um ensaio de campo tem suas propriedades mecânicas quase que totalmente comprometidas (CURLING et al., 2002; VENALAINEN et al., 2014). Essa informação indica que o tempo de exposição proposto para esse experimento foi confiavelmente satisfatório, pois ao final do período de testes (540 dias) todas as combinações entre os fatores em estudo (Espécie, Tipo de Lenho, Tipo de campo) atingiram mais do que 10% de perda de massa.

Em ordem decrescente, a durabilidade das madeiras em razão da perda de massa foi *E. tereticornis*, *C. citriodora*, *E. paniculata* e *E. botryoides*. Esta ordem de durabilidade não é compatível com a durabilidade da madeira dessas espécies reportada pela norma AS 5604 da Australian Standard (2003) para as condições encontradas na Austrália. Tal discrepância de resultados pode ser atribuída aos níveis de atividade fisiológica das árvores plantadas nesses países, os quais se devem principalmente às suas condições edafoclimáticas (MARSDEN et al., 2013).

Dessa maneira, as características climatológicas brasileiras propiciam condições diferenciadas para o crescimento das árvores de eucalipto, as quais em razão do rápido crescimento produzem uma proporção maior de alburno em sua constituição, sendo que o alburno é menos durável do que o cerne (MOYA et al., 2014).

Genericamente, a madeira adulta apresentou maior durabilidade do que a madeira juvenil. Segundo Latorraca et al., (2011), embora haja uma variabilidade na constituição e quantidade dos compostos extrativos da madeira quando

comparados entre diferentes espécies florestais, a maior durabilidade do lenho adulto pode ser atribuída à presença de compostos fenólicos e flavonóides localizados próximos a parede celular que forma sua estrutura.

Dentro do fator ambiente de exposição, verifica-se que o campo banhado propiciou condições mais favoráveis à degradação das amostras, já os outros dois ambientes (campo aberto e campo floresta), quando comparados entre si, não mostraram diferenciação na comparação de seus níveis de perda de massa. Esse resultado se deve a disponibilidade de umidade encontrada no ambiente banhado, a qual potencializou a atividade fisiológica dos organismos xilófagos encontrados nesse campo, ou seja, durante os testes de campo as amostras expostas no campo banhado foram condicionadas a um teor de umidade de equilíbrio mais adequado à proliferação dos fungos xilófagos (NEGRÃO et al., 2014).

As duas madeiras mais duráveis desse estudo (*E. tereticornis* e *C. citriodora*) foram as que apresentavam os maiores valores de massa específica na condição *in natura* ($0,992 \pm 0,008 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,975 \pm 0,008 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente). Já as madeiras menos duráveis, apresentaram níveis menores de massa específica ($0,869 \pm 0,008 \text{ g.cm}^{-3}$ para *E. botryoides* e $0,916 \pm 0,008 \text{ g.cm}^{-3}$ para *E. paniculata*), no entanto também semelhantes entre si.

Entretanto, diferente do que ocorreu com a massa específica e com o teor de umidade, os níveis de perda de massa foram distintos na comparação entre *E. tereticornis* e *C. citriodora*, bem como entre *E. paniculata* e *E. botryoides*. Dessa maneira, comparando-se com o comportamento da perda de massa, observa-se que a variação da massa específica e do teor de umidade indicam que essas propriedades não podem ser tidas como parâmetros confiáveis no monitoramento da deterioração da madeira em um ensaio de campo.

Em seu estudo, Brischke et al., (2014) reportaram que o teor de umidade de equilíbrio ideal ao ataque de fungos não é o parâmetro mais indicado para previsão da degradação da madeira, pois o efeito da temperatura e da ventilação do ambiente se sobrepõem ao efeito do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (~30%). Conforme Negrão et al., (2014), a capacidade de retenção de umidade da madeira é afetada de acordo com o tipo de organismo

xilófago que causou a degradação, visto que alguns fungos preferem os açúcares da madeira, já outros preferem alimentarem-se da lignina.

3.3.2 Caracterização colorimétrica

Quanto aos parâmetros colorimétricos, verifica-se que seus valores médios independem da face anatômica, no entanto foram significativamente influenciados pelos demais fatores apresentados na Tabela 3.3. Dessa maneira, é possível descartar o fator face anatômica para uma análise mais pormenorizada das mudanças de cor em razão da biodeterioração.

Tabela 3.3 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros colorimétricos em função dos fatores em estudo.

	Espécie	Tipo de lenho	Tipo de campo	Tempo de exposição	Face anatômica
L^*	31,59*	215,50*	158,44*	13,94*	2,60 ^{NS}
a^*	37,08*	6,73*	941,57*	76,21*	0,68 ^{NS}
b^*	13,45*	32,95*	904,34*	74,96*	0,19 ^{NS}

Em que: L^* = luminosidade; a^* = coordenada cromática verde-vermelho; b^* = coordenada cromática azul-amarelo; *= significativo a 5% de probabilidade de erro; ^{NS}= não significativo.

Independentemente da espécie, do tipo de madeira e do tipo de ambiente de exposição, ao longo do período de ensaios de campo, gradativamente foram diminuindo os índices de luminosidade (L^*), bem como os dos pigmentos de amarelo e vermelho (a^* e b^*) (Figura 3.3).

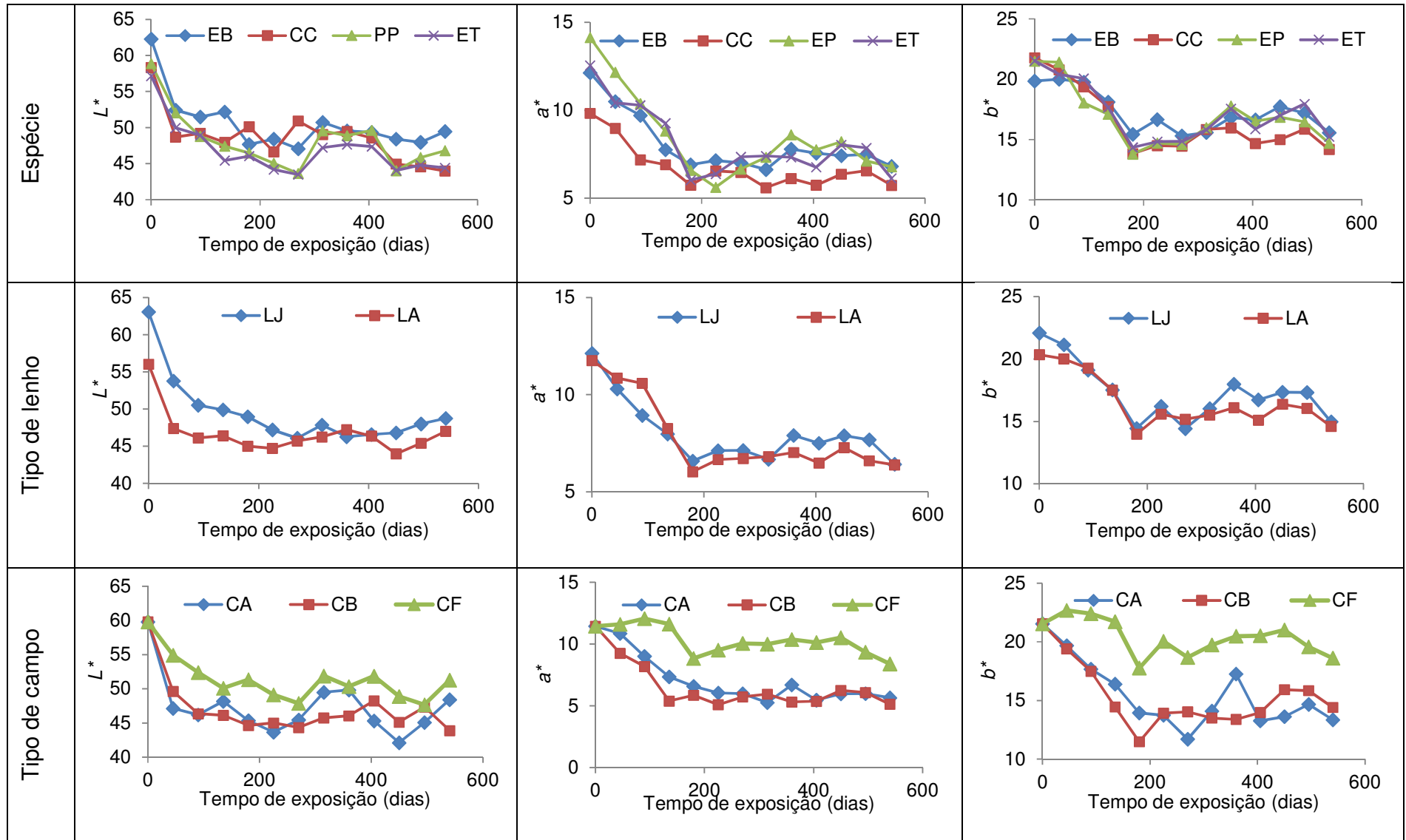


Figura 3.3 – Níveis de luminosidade (L^*) e coordenadas cromáticas verde-vermelho (a^*) e azul-amarelo (b^*) de acordo com o tempo de exposição. Em que: EB= *Eucalyptus botryoides*; CC= *Corymbia citriodora*; EP= *Eucalyptus paniculata*; ET= *Eucalyptus tereticornis*; LJ= Lenho juvenil; LA= Lenho adulto; CA= campo aberto; CB= campo banhado; CF= campo floresta.

Tais níveis de decréscimo da cor se dão até aproximadamente os 180 dias de exposição, a partir do qual se verifica uma tendência à estabilização dos níveis de cor. Esse comportamento é válido tanto para as características cromáticas mencionadas (L^* , a^* e b^*), quanto para a cromaticidade (C^*), o ângulo de tinta (h) e a variação de cor (ΔE), sendo que para h e ΔE a variação dos dados apresenta-se de maneira inversa (Figura 3.4).

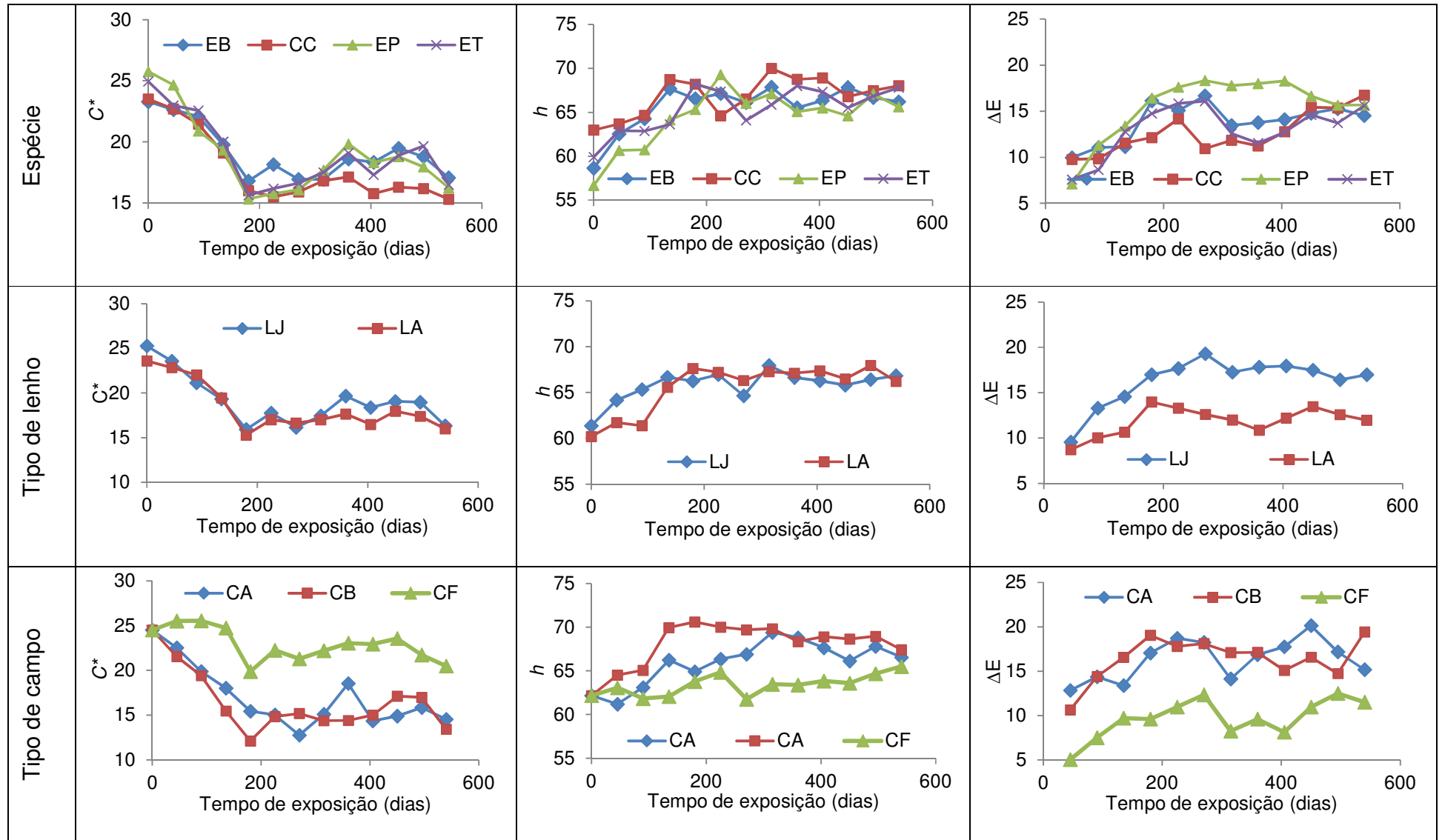


Figura 3.4 – Níveis de cromaticidade (C^*), ângulo de tinta (h) e variação de cor (ΔE) de acordo com o tempo de exposição. Em que: EB= *Eucalyptus botryoides*; CC= *Corymbia citriodora*; EP= *Eucalyptus paniculata*; ET= *Eucalyptus tereticornis*; LJ= Lenho juvenil; LA= Lenho adulto; CA= campo aberto; CB= campo banhado; CF= campo floresta.

Em análise da ΔE , verifica-se que independentemente dos fatores analisados nesse estudo (espécie, tipo de madeira e ambiente de exposição), a partir de 45 dias de exposição as amostras já apresentaram uma diferença de cor perceptível a olho nu comparando-as com as amostras controle (CUI et al., 2004).

Em sua condição *in natura*, a cor da madeira é condicionada às características de seus compostos extraíveis como ácidos graxos e esteroides, sendo que esse princípio também é válido para comparações entre cerne e alburno e lenho juvenil e adulto (PRINISHA, 2011; MOYA et al., 2012).

Em razão da exposição externa, a cor da madeira é inicialmente modificada devido aos grupos cromóforos da lignina, os quais se oxidam por absorver ondas eletromagnéticas advindas da radiação solar com comprimentos de ondas compatíveis as regiões do ultravioleta e do visível (GEORGE et al., 2005). Após, em razão dos gradientes de secagem formam-se rachaduras, as quais deixam o material mais susceptível ao ataque de agentes xilófagos (EVANS et al., 2008). Assim, inicia-se a colonização dos fungos, de modo que a variação da cor dependerá do tipo deste organismo xilófago (HERNANDEZ, 2012).

Comparada à madeira jovem, a madeira adulta apresentou maior estabilidade colorimétrica. Esse fato possivelmente se deve às reações de oxidação e despolimerização dos extrativos na formação do cerne (MOYA et al., 2012), pois no início da deterioração (até 180 dias) os níveis de ΔE respectivos a madeira jovem e adulta, apresentavam-se próximos o que indica que o conteúdo e constituição da lignina não foi o motivo dessa diferenciação de cor.

Quanto ao fator ambiente de exposição, verifica-se que o campo banhado conferiu uma diferenciação colorimétrica menor do que os outros dois ambientes, o que não é concordante com os níveis de perda de massa. Dessa maneira, é

pertinente observar que assim como para a perda de massa, a variabilidade da cor da madeira ocorre em razão do tipo de fungo xilófago que coloniza o substrato. Assim, correlações entre a perda de massa e parâmetros colorimétricos da madeira em condições reais tornam-se subjetivas à medida que não necessariamente os mesmos organismos xilófagos condicionam essas duas características.

3.3.2 Ensaio mecânicos

Os resultados obtidos por meio da ANOVA multifatorial empregada para os parâmetros mecânicos (Tabela 3.4) indicam uma semelhança nas variações verificadas nos mesmos em razão dos efeitos dos fatores propostos (Espécie, Tipo de lenho, Tipo de campo e Tempo de exposição). Assim, verifica-se que os três parâmetros mecânicos (MOE, MOR e Fragilidade) foram sensíveis aos fatores Espécie, Tipo de lenho e Tempo de exposição, entretanto não foi verificado efeito significativo do fator tipo de campo na variabilidade dos mesmos.

Tabela 3.4 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros mecânicos em função dos fatores em estudo.

	Espécie	Tipo de Lenho	Tipo de campo	Tempo de exposição
MOE	28,55**	138,38**	0,71 ^{NS}	8,58**
MOR	10,00**	23,53**	2,19 ^{NS}	7,25**
F	11,81**	20,25**	0,93 ^{NS}	7,15**

Em que: MOE= módulo de elasticidade; MOR= módulo de ruptura; F= Fragilidade;

**= significativo com 1% de probabilidade de erro; ^{NS}= não significativo.

Confrontando os parâmetros estatísticos obtidos por meio das ANOVAS multifatoriais empregadas para os parâmetros físicos e mecânicos, nota-se que a perda de massa foi o parâmetro mais sensível e eficaz para expressar a deterioração ocorrida nos testes de campo realizados, pois foi a única

propriedades capaz de diferenciar o mecanismo de depreciação das amostras ocorrente nos três diferentes ambientes de exposição. Essa afirmativa é uma ratificação de conclusões semelhantes emitidas em estudos antecedentes (CURLING et al., 2002; RABERG et al., 2005). O que não necessariamente implica que a avaliação de outras propriedades tecnológicas da madeira não possa aportar informações adicionais interessantes.

Nos moldes dos resultados evidenciados na análise dos parâmetros físicos reportada anteriormente na Figura 3.2, verifica-se na Figura 3.5 que houve uma perda gradual das propriedades mecânicas relacionadas ao teste de flexão estática, na medida em que maior foi o período de exposição do material em campo. O que comprova a íntima relação entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira durante seu processo de deterioração, embora não tenham sido identificadas as zonas descritas para os parâmetros colorimétricos, as quais foram atribuídas à fotodegradação da lignina e posteriormente a infestação de fungos xilófagos.

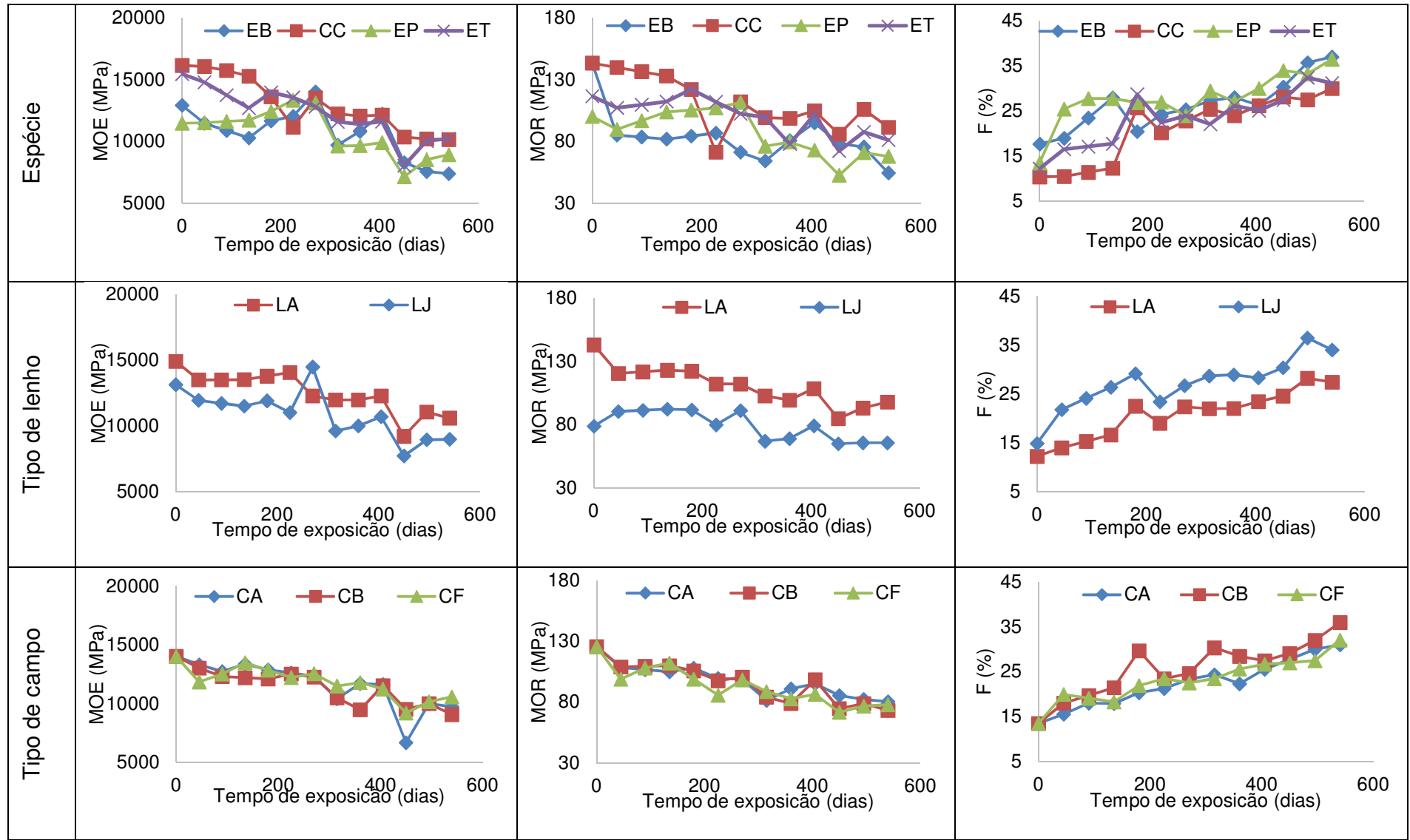


Figura 3.5 – Níveis de módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e Fragilidade (F) de acordo com o tempo de exposição. Em que: EB= *Eucalyptus botryoides*; CC= *Corymbia citriodora*; EP= *Eucalyptus paniculata*; ET= *Eucalyptus tereticornis*; LJ= Lenho juvenil; LA= Lenho adulto; CA= campo aberto; CB= campo banhado; CF= campo floresta.

Comparando-se as amostras *in natura* e as amostras coletadas ao final dos ensaios (540 dias de exposição), a análise dos declínios verificados na massa e nas propriedades mecânicas da madeira indica que para as madeiras de *E. botryoides* e *E. paniculata*, as propriedades mecânicas diminuíram por volta de o dobro comparadas à massa. Já para as madeiras de *C. citriodora* e *E. tereticornis*, na mesma comparação, os níveis das propriedades mecânicas avaliadas (MOE, MOR e Fragilidade) decaíram cerca de o triplo do que a massa dessas mesmas espécies.

Segundo Ali et al., (2011), a diminuição dos níveis de propriedades físicas e mecânicas se devem a fragilização da parede celular da madeira ocasionada pela ação de fungos xilófagos. Em seu estudo, Mattos et al., (2014a) examinando três espécies de eucaliptos de rápido crescimento submetidas a testes de campo, atribuíram a diminuição das propriedades físico-mecânicas da madeira à diminuição dos níveis de celulose e hemiceluloses.

Como já citado no item de ensaios físicos, conforme estudos anteriormente publicados, com cerca de 10% de perda de massa a madeira biodeteriorada em um ensaio de campo apresenta-se comprometida mecanicamente (CURLING et al., 2002; VENALAINEN et al., 2014). Essa afirmativa é divergente dos resultados obtidos no presente estudo, pois os níveis de propriedades mecânicas apresentados pelas madeiras de maior perda de massa (> 10%) estiveram dentro da mesma faixa evidenciada para as demais amostras em estudo (amostras com Pm <10%). De modo que independentemente do ambiente de exposição e da espécie florestal, ao final dos 540 dias de exposição, os níveis médios de MOE e MOR de todas as combinações entre os fatores em estudo estiveram acima de 7.000 e 60 MPa, respectivamente.

Na comparação entre as quatro espécies de eucaliptos, verifica-se que quando *in natura* a madeira de *C. citriodora* apresentou os maiores índices de propriedades mecânicas. Não obstante, tendo em vista uma comparação entre as amostras *in natura* e coletas após 540 dias de experimento, verifica-se que tal madeira depreciou-se mais do que a madeira de *E. tereticornis*, sendo esses decréscimos percentuais para o MOE e o MOR de 33,88 e 30,16% para *E. tereticornis* e de 37,06 e 36,17% para *C. citriodora*, respectivamente.

Tal comportamento confirma os resultados obtidos com a análise da perda de massa, ratificando a superioridade da madeira de *E. tereticornis* com relação a resistência biológica, seguida em ordem decrescente por *C. citriodora*, *E. paniculata* e *E. botryoides*.

Em análise dos resultados obtidos por Santos et al., (2014), acerca das propriedades químicas da madeira dos mesmos quatro eucaliptos utilizados no presente estudo, verifica-se que o teor de extrativos não pode explicar a maior durabilidade da madeira de *E. tereticornis* frente aos demais eucaliptos, pois tais autores reportaram um valor médio de $1,1 \pm 0,3\%$, sendo que foram obtidos níveis maiores para as madeiras de *E. paniculata* ($2,9 \pm 0,6\%$) e *C. citriodora* ($4,4 \pm 0,4\%$). Dessa maneira, possivelmente a maior durabilidade da madeira de *E. tereticornis* em detrimento dos demais eucaliptos se deva à constituição química de seus compostos extrativos e não à quantidade dos mesmos.

Quanto a comparação entre as propriedades mecânicas dos lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos em estudo, à semelhança dos resultados vistos nos parâmetros físicos das amostras, comparado ao lenho juvenil, o lenho adulto apresentou níveis maiores e cronologicamente mais estáveis de resistência (MOE) e rigidez (MOR) estrutural. A variabilidade da Fragilidade dos dois lenhos mencionados, dá conta de que comparado ao lenho juvenil, o lenho adulto apresentou maior capacidade de absorção de esforços sem deformar-se permanentemente.

Esse resultado levado ao ambiente prático da utilização da madeira de eucalipto indica que dependendo da classe de durabilidade requerida para uma determinada peça de madeira sólida destinada a um ambiente externo, se faz

necessário o emprego de ciclos de colheita mais longos, afim de serem obtidas árvores adultas, ou seja, indivíduos arbóreos que apresentem um crescimento significativo de madeira adulta em seu tronco. Outra possibilidade é a utilização de técnicas de desbaste segundo os períodos de formação de cada um dos dois lenhos, afim de suprimir ou potencializar o crescimento em um determinado período do plantio.

Conforme a literatura, de maneira geral, espécies de rápido crescimento proveniente dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* plantadas em solo brasileiro começam a formar lenho adulto em sua constituição por volta dos 20 anos de idade (LARA PALMA et al., 2010; RAMOS et al., 2011).

3.3.3 Caracterização visual da durabilidade

Comparando o critério de determinação de notas por meio de análise visual com as demais propriedades avaliadas nesse estudo, verifica-se que dentro das peculiaridades intrínsecas a cada parâmetro, os mesmos apresentaram resultados que podem ser apresentados sinergicamente com essa análise visual, exceto a massa específica (Tabela 3.5, 3.6 e 3.7).

Tabela 3.5 – Valores médios das propriedades físicas de acordo com os critérios de análise visual.

Nota	ρ	Pm	Tu
0	0,881 _(0,15) c	5,513 _(1,65) a	11,712 _(0,50) c
1	0,922 _(0,09) d	5,803 _(2,30) a	11,559 _(0,88) c
2	0,898 _(0,12) cd	7,290 _(3,49) b	11,194 _(0,92) b
3	0,811 _(0,14) b	14,031 _(9,09) c	10,580 _(1,08) a
4	0,681 _(0,16) a	29,975 _(21,33) d	10,121 _(2,15) a
Teste F	28,55**	118,75**	45,13**

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey. **= significativo a 1% de probabilidade de erro. Desvio padrão

entre parênteses. Em que: ρ = massa específica (g.cm^{-3}); P_m = perda de massa (%); T_u = teor de umidade (%).

Tabela 3.6 – Valores médios das propriedades colorimétricas de acordo com os critérios de análise visual.

Nota	L^*	a^*	b^*
0	51,211 (7,32) c	10,350 (2,54) c	19,880 (2,87) d
1	48,746 (6,52) b	8,889 (3,26) b	18,325 (4,07) c
2	47,527 (5,70) a	7,068 (2,77) a	15,964 (3,95) b
3	46,884 (5,79) a	6,925 (2,54) a	15,774 (3,88) b
4	42,888 (7,19) a	4,795 (1,45) a	11,743 (1,87) a
Teste F	21,19**	78,36**	63,27**

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey. **= significativo a 1% de probabilidade de erro. Desvio padrão entre parênteses. Em que: L^* = luminosidade; a^* = coordenada cromática verde-vermelho; b^* = coordenada cromática azul-amarelo.

Tabela 3.7 – Valores médios das propriedades mecânicas de acordo com os critérios de análise visual.

Nota	MOE	MOR	F
0	13043,8 (3527,8) a	109,559 (18,70) a	14,963 (2,93) a
1	12937,2 (3530,75) a	107,623 (17,32) ab	15,930 (7,29) a
2	11969,5 (3107,35) ab	95,933 (15,49) b	16,848 (10,45) ab
3	10989,8 (5576,83) b	79,151 (17,21) c	30,116 (22,93) b
4	5511,51 (2892,42) c	41,955 (14,31) d	40,342 (15,32) c
Teste F	9,39**	16,32**	4,40*

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey. *= significativo em 5% de probabilidade de erro; **= significativo a 1% de probabilidade de erro. Desvio padrão entre parênteses. Em que: MOE= módulo de elasticidade (MPa); MOR= módulo de elasticidade (MPa); F= Fragilidade (%).

As causas pelas quais a massa específica não se mostrou previsível pela análise visual podem ser atribuídas às mesmas explicações exploradas nesse capítulo a respeito das discordâncias evidenciadas em sua comparação com a perda de massa.

Comparando-se as amostras sem ataque (Nota 0) e com leve ataque (Nota 1), não houve diferença em termos de valores médios de perda de massa. A partir da atribuição de ataque moderado (Nota 2), os níveis de perda de massa foram aumentando significativamente, ultrapassando a faixa dos 10% a partir da atribuição de ataque severo (Nota 3). Esse resultado é concordante com autores que afirmam que o comprometimento das peças se dá à medida que os níveis de perda de massa alcançam cerca de 10% (CURLING et al., 2002; VENALAINEN et al., 2014). Entretanto, como já explorado nesse capítulo, não foi verificado comprometimento estrutural do material relacionado a essa análise.

A relação entre a análise visual e a luminosidade (L^*), bem como com a coordenada cromática verde-vermelho (a^*) se deram de maneira similar. Assim, a coloração das amostras foi escurecendo e perdendo sua tonalidade avermelhada com o aumento do grau de deterioração, até à atribuição de ataque moderado, a partir do qual, os níveis não mais diferiram estatisticamente.

Do ponto de vista da coordenada azul-amarelo (b^*), verificou-se que a coloração das amostras foi perdendo seu caráter amarelado em razão do maior grau de deterioração, com a peculiaridade de que as amostras com ataque moderado e severo não distinguiram-se significativamente. O que indica a ineficácia desse parâmetro como indicador de deterioração.

Os resultados obtidos para L^* e a^* são concordantes com os obtidos por Anti-Boasiako; Allotey (2010), que reportaram íntima relação entre a análise visual e a coloração da madeira. Conforme esses mesmos autores, a modificação da cor da madeira em ensaios de campo ocorre pela ação das chuvas, as quais lixiviam diversos compostos extraíveis da madeira. Já Raberg et al., (2005) explicaram a relação entre a cor da madeira e a análise visual pela infestação de fungos de mofo e de manchas.

Quanto aos parâmetros mecânicos, a análise visual previu com maior precisão a variabilidade do MOR, distinguindo por meio das letras de testes de media os ataques moderado, severo e fratura. Dentro dos parâmetros MOE e Fragilidade, as amostras que obtiveram nível de ataque severo não foram distinguidas das amostras que foram classificadas como ataque moderado e fratura. O que indica que o aspecto visual de uma amostra degradada em um ensaio de campo remete com maior confiabilidade a rigidez estrutural, em detrimento de sua resistência e suas características de absorção de energia mecânica.

3.4 Conclusão

- Em ordem decrescente de durabilidade as madeiras experimentadas foram *E. tereticornis*, *C. citriodora*, *E. paniculata* e *E. botryoides*.
- A madeira adulta apresentou maior durabilidade do que a madeira jovem;
- Com base na perda de massa, o campo banhado possibilitou condições ambientais mais adequadas ao ataque dos agentes xilófagos, os outros dois campos experimentados (aberto e floresta) não distinguiram entre si;
- Dentre as propriedades colorimétricas, a luminosidade (L^*) e a coordenada cromática verde-vermelho (a^*) apresentaram potencial para serem utilizadas com parâmetro de monitoramento da deterioração das madeiras em ensaios de campo;
- A perda de massa mostrou-se o parâmetro mais sensível para avaliar a degradação ocorrida no presente estudo, sendo o único parâmetro no qual foi possível verificar uma diferenciação significativa dentro do fator Tipo de campo. No entanto, as propriedades colorimétricas e mecânicas forneceram informações adicionais altamente relevantes;
- Genericamente, as perdas de propriedades mecânicas foram o dobro das perdas de massa para as madeiras de *E. botryoides* e *E. paniculata*, e o triplo para as madeiras de *C. citriodora* e *E. tereticornis*;
- Os parâmetros perda de massa, teor de umidade, L^* , a^* e MOR foram previstos satisfatoriamente pelos critérios qualitativos de análise visual.

4 RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO NATURAL DOS LENHOS JUVENIL E ADULTO DE QUATRO EUCALIPTOS

4.1 Introdução

Nas últimas décadas, um massivo plantio de diversas espécies de rápido crescimento, principalmente dos gêneros *Eucalyptus*, *Pinus*, *Acacia*, *Tectona* e *Corymbia* tem ocorrido em todo o território nacional, afim de abastecer as indústrias de produção de celulose e papel e carvão vegetal. Todavia, nesses casos a madeira é submetida à procedimentos que não condicionam o material a um elevado valor agregado, de modo que afim de ser obtido um maior rendimento financeiro seria preferível que o emprego dessa matéria prima ocorresse na confecção de produtos sólidos, como nos casos dos setores de produção de painéis e tabuas para a construção civil, esquadrias, moveis, molduras, entre outros.

Nesse contexto, a madeira destinada à confecção de peças sólidas é frequentemente destinada com base em critérios empíricos e por esse motivo, em muitos casos comporta-se inadequadamente, o que acaba por ocasionar seu envelhecimento precoce. Vinculado a isso, em diversos casos se dá a perda acelerada de algumas das principais propriedades tecnológicas desse material.

Dessa maneira, se torna imperativo o conhecimento pormenorizado das propriedades tecnológicas da madeira, afim de que sejam propostos parâmetros confiáveis para a previsão da vida útil de seus produtos.

Para os casos em que a madeira é utilizada ao ar livre, a principal causa do decaimento de suas propriedades é atribuída a degradação combinada entre agentes bióticos e abióticos. Os principais agentes não biológicos responsáveis pela degradação da madeira são: umidade, temperatura, radiação solar e teor de ozônio (COLOM et al., 2003). Quanto aos agentes bióticos, se destacam os fungos e os insetos (DEL MENEZZI et al., 2008).

Esse mecanismo de degradação é iniciado com a oxidação dos grupos cromóforos da lignina, a qual ocorre foto-iniciada pela ação dos componentes

ultravioleta e visível da luz do sol (HON, 2001; GEORGE et al., 2005). Assim, são produzidos radicais livres que gradativamente fragilizam a parede celular da madeira, terminando por fragmentar a matriz lignocelulósica (KUO; HU, 1991; EVANS et al., 2002). Essa fotodegradação gera o acúmulo de uma grande quantidade de compostos solúveis em água na superfície da madeira, formados principalmente por grupos carbonílicos e carboxílicos, os quais são lixiviados pela ação de chuvas e ventos (PANDEY, 2005; CHANG et al., 2010).

Posteriormente, esses ciclos combinados de fotodegradação e lixiviação formam novas superfícies, as quais apresentam maior susceptibilidade ao ataque de agentes xilófagos. Dessa maneira, a deterioração do material passa a ser atribuída à colonização de fungos xilófagos, variando de acordo com as condições de pH e temperatura do substrato, como também da espécie de fungo (NEGRÃO et al., 2014).

Inicialmente, a deterioração da madeira em razão do intemperismo é observada por sua descoloração (KISHINO; NAKANO, 2004b) e a formação de rachaduras (HUANG et al., 2012b). Depois da colonização dos agentes biológicos, verifica-se a perda de massa atribuída a degradação da lignina e dos açúcares da madeira (MATTOS et al., 2014a). Do ponto de vista tecnológico, a depreciação é caracterizada pelo aumento da rugosidade superficial (PLACKETT et al., 1992), diminuição da temperatura de transição vítrea (GARCIA et al., 2000), acinzentamento da cor (MATTOS et al., 2013), perda de brilho especular (HON; FIEST, 1992), diminuição de propriedades mecânicas (MATTOS et al., 2014a) e perda de rendimento à aplicação de tintas e vernizes (PASTORE et al., 2008).

Embora o mecanismo de deterioração da madeira em razão do intemperismo seja consideravelmente conhecido, ainda existem diversas lacunas nessa área do conhecimento. Além da lignina, outros compostos da madeira, como os extrativos têm um papel considerável no mecanismo de deterioração, sobretudo em razão de suas características antioxidantes (ISHIGURI et al., 2003; CHANG et al., 2010).

Esse comportamento da madeira indica a importância da avaliação da resistência ao intemperismo desse material segundo diversos fatores

potencialmente promissores como: a espécie e a idade do material, entre outros. O presente capítulo teve vistas de avaliar a resistência ao intemperismo natural dos lenhos juvenil e adulto de quatro espécies de eucaliptos expostos em testes de campo.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Preparo das amostras em estudo

Para o monitoramento da resistência da madeira ao intemperismo natural, nos moldes de trabalhos antecedentes (DEL MENEZZI et al., 2008; MATTOS et al., 2013), foi selecionada somente a região das amostras que esteve exposta à radiação solar durante os testes de campo.

Assim, após a realização dos ensaios físicos e mecânicos descritos no capítulo anterior, o material exposto ao ambiente aberto, proveniente das coletas 0, 3, 6, 9 e 12 foi separado para a avaliação de algumas de suas propriedades de superfície, sendo que tais coletas correspondem aos tempos de exposição de 0, 135, 270, 405 e 540 dias, respectivamente.

Dessa maneira, cada uma das amostras com as dimensões de 1 x 1 x 20 cm (direção radial x direção tangencial x direção longitudinal) foi seccionada radialmente a 5 cm de sua extremidade no lado que esteve posicionado fora do contato com o solo.

4.2.1 Monitoramento da cor

A partir da estabilização do teor de umidade de equilíbrio higroscópico em 12%, foram avaliados os parâmetros colorimétricos das amostras após o ensaio de campo com o auxílio do aparelho de colorimetria e das configurações de software supracitados. A caracterização colorimétrica foi realizada em triplicata nas faces radial e tangencial de cada amostra, determinando-se os parâmetros: luminosidade (L^*), coordenada verde-vermelho (a^*), coordenada azul-amarelo (b^*),

cromaticidade (C^*) e ângulo de tinta (h). Adicionalmente, foram plotados os gráficos de cromaticidade contidos no manual do equipamento de colorimetria, utilizando-se como eixos das abscissas e das ordenadas os parâmetros C^* e L^* , respectivamente (KONICA MINOLTA, 2007; MATTOS et al., 2013).

4.2.2 Espectroscopia UV-Vis

A espectroscopia UV-Vis foi empregada para a complementação da caracterização colorimétrica das amostras biodeterioradas. O ensaio foi conduzido em refletância difusa no intervalo de 200 a 800 nm com um espectrofotômetro Shimadzu UV-Vis-NIR 3600, pertencente ao Laboratório de Química Experimental da Universidade do País Basco (UPV), localizado na cidade de San Sebastian, Espanha. Para cada tratamento o ensaio foi realizado em triplicata.

4.2.3 Análise do Ângulo de contato

A molhabilidade superficial das amostras degradadas e do grupo controle foi avaliada por meio da técnica de ângulo de contato. Dessa maneira, foi utilizado um goniômetro da marca Data Physics, ajustado para a aferição das amostras segundo um alinhamento total do conjunto (amostra/equipamento). O equipamento é pertencente ao Laboratório da UPV supracitado.

No procedimento, foi disposta uma gotícula de água deionizada na superfície da amostra com volume de 10 μ l e avaliou-se a cinética da absorção da gota na superfície da amostra segundo quatro tempos distintos após o contato entre sólido e líquido (0, 5, 10 e 15 s). Foram realizadas leituras em triplicata para os planos radial e tangencial de cada amostra, sendo que o valor anotado para o ensaio foi o valor da mediana desse conjunto de dados.

4.2.4 Dureza Janka

A dureza das amostras biodegradadas e do grupo controle foi avaliada em conformidade com o método Janka na face tangencial das amostras, utilizando-se a máquina universal de ensaios mecânicos citada no capítulo anterior. Para tal, foi utilizado o procedimento D143 adaptado da ASTM (2007), em que empregou-se uma velocidade de avanço de 6 mm.s⁻¹.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Parâmetros colorimétricos

A Tabela 4.1 indica os resultados obtidos com o advento da ANOVA multifatorial empregada utilizando-se os dados de cor do material em estudo. Tais parâmetros estatísticos dão conta de que a luminosidade (L^*) e a coordenada cromática verde-vermelho (a^*) são os parâmetros colorimétricos mais sensíveis para o monitoramento da descoloração da madeira deteriorada, pois verifica-se que foram atingidos significativamente por três dos quatro fatores tidos em consideração (Espécie, Tipo de Lenho e Tempo de exposição).

Tabela 4 – Valores de F e p da ANOVA multifatorial realizada para os parâmetros colorimétricos da madeira submetida ao teste de intemperismo natural.

	Espécie	Tipo de Lenho	Tempo de exposição	Face anatômica
L^*	5,45**	55,31**	59,79**	2,49 ^{NS}
a^*	10,16**	4,03*	265,58**	0,01 ^{NS}
b^*	2,89*	0,12 ^{ns}	252,67**	2,33 ^{NS}
C^*	4,13**	0,58 ^{ns}	297,94**	1,61 ^{NS}
h	2,11 ^{ns}	3,25 ^{ns}	17,07**	2,14 ^{NS}

Em que: L^* = luminosidade; a^* = coordenada verde-vermelho; b^* = coordenada azul-amarelo; C^* = cromaticidade; h = ângulo de tinta; * = significativo com 5% de probabilidade de erro; ** = significativo com 1% de probabilidade de erro; ^{NS}= não significativo.

À semelhança dos resultados verificados no capítulo anterior no material destinado a biodeterioração, o fator face anatômica não apresentou efeito significativo na variabilidade de nenhum dos parâmetros de cor da madeira em estudo, resultado semelhante ao evidenciado em estudos antecedentes em que foi analisada a cor de outras espécies de madeiras, tanto *in natura*, como também submetidas ao intemperismo natural (MATTOS et al., 2013; DELUCIS et al., 2014). Esse mesmo comportamento (igualdade da coloração das faces radial e tangencial) é observado qualitativamente à olho nu pelas fotos das amostras, as quais constam nas figuras 4.1 e 4.2.

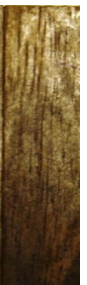
	Lenho juvenil					Lenho adulto				
	0	135	270	405	540	0	135	270	405	540
<i>Eucalyptus botryoides</i>										
<i>Corymbia citriodora</i>										
<i>Eucalyptus paniculata</i>										
<i>Eucalyptus tereticornis</i>										

Figura 4.1 – Fotografias da face radial das amostras de quatro eucaliptos em razão do tempo de exposição do material em campo.

	Madeira juvenil					Lenho adulto				
	0	135	270	405	540	0	135	270	405	540
<i>Eucalyptus botryoides</i>										
<i>Corymbia citriodora</i>										
<i>Eucalyptus paniculata</i>										
<i>Eucalyptus tereticornis</i>										

Figura 4.2 – Fotografias da face tangencial das amostras de quatro eucaliptos em razão do tempo de exposição do material em campo.

Afora a comparação entre as faces radial e tangencial, verifica-se o acinzentamento gradativo da cor das amostras em razão de quanto maior foi o tempo de exposição em campo. Embora a descoloração do material se mostre evidente com a apresentação das fotografias apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2,

nota-se que a avaliação da cor à olho nu é um critério demasiadamente subjetivo, o que impossibilita o monitoramento da resistência do material ao intemperismo tendo em vista somente este critério. Dessa maneira, assim como aconselhado no trabalho de Huang et al., (2012a), indica-se que a avaliação da cor à olho nu seja um critério adicional a outros tidos como principais.

Na comparação entre as quatro espécies de eucaliptos e de seus lenhos juvenil e adulto, a variação dos parâmetros de cor elegidos por intermédio da ANOVA multifatorial (L^* e a^*) indica um comportamento dos valores médios ao longo do período de exposição do material em campo que se mostra semelhante (Figura 4.3). Dessa maneira, nota-se que a descoloração ocorreu de maneira abrupta até aproximadamente os 225 dias de exposição, período a partir do qual os valores médios passaram a apresentar uma tendência mais constante até o fim do tempo de exposição das amostras.

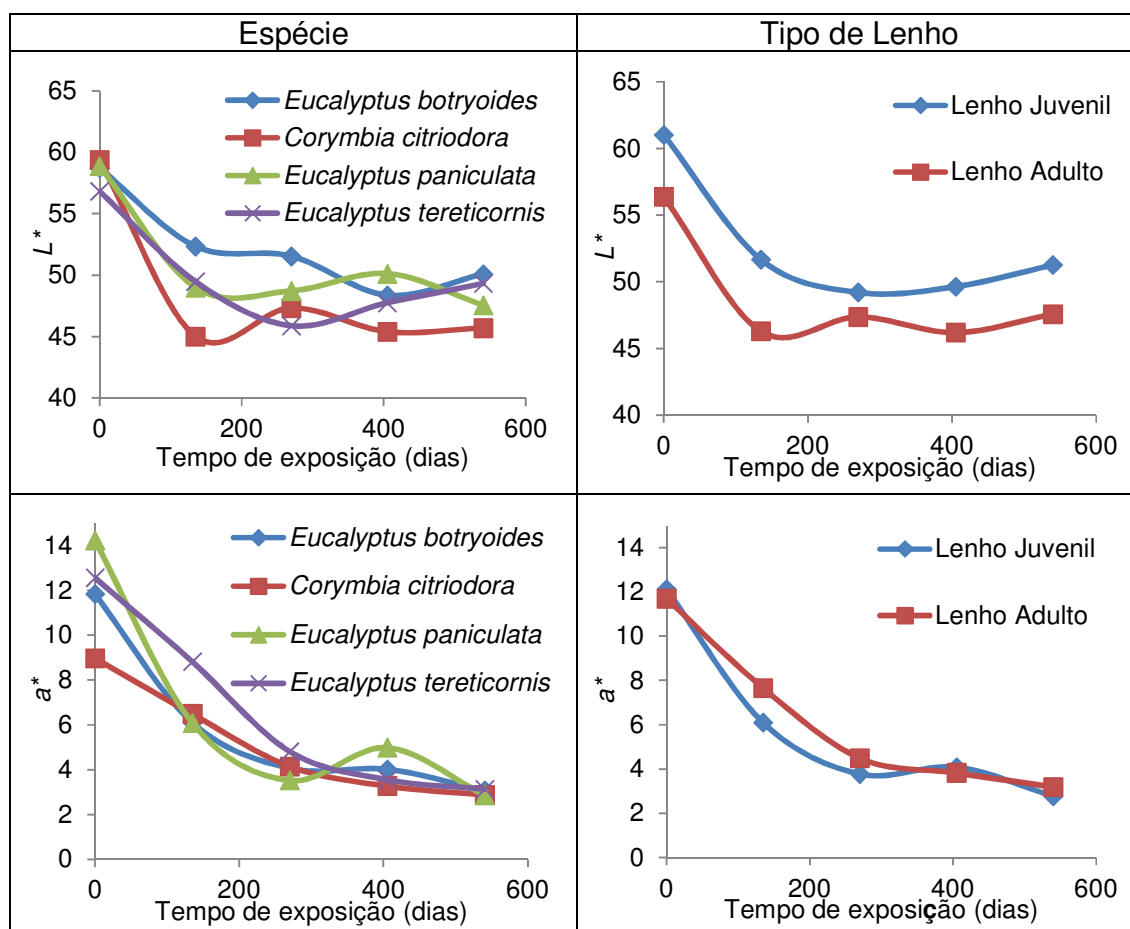


Figura 4.3 – Variação da luminosidade (L^*) e da coordenada cromática verde-vermelho (a^*) em razão do tempo de exposição do material em campo.

Assim, é possível identificar duas etapas distintas durante o processo de deterioração das amostras testadas, as quais foram segmentadas pela coleta realizada aos 225 dias de exposição. Com base na literatura é possível atribuir a primeira etapa da deterioração do material às reações de foto-oxidação e despolimerização dos grupos cromóforos da lignina e dos compostos extrativos (compostos fenólicos e terpenos), as quais se devem a absorção de raios solares compatíveis as regiões da luz visível e ultravioleta (EVANS et al., 2002; PANDEY, 2005) com a posterior lixiviação dos componentes degradados ocasionada pela ação de chuvas e ventos (SUDIYANI et al., 2003; CHANG et al., 2010).

Já a segunda etapa do processo de degradação do material (após 225 dias) pode ser atribuída a colonização do substrato pela ação de fungos xilófagos nas

novas superfícies formadas após a primeira etapa de deterioração. Dessa maneira, o decaimento das propriedades da madeira passou a ocorrer de acordo com as características físico-químicas da madeira, a espécie de fungo depreciador e as condições ambientais dos campos de apodrecimento (JEBRANE et al., 2014; NEGRÃO et al., 2014; PLASCHKIES et al., 2014). Portanto, é pertinente asseverar que afim de se obter resultados mais elucidativos à respeito do mecanismo que permeia a deterioração da madeira atribuída a um ensaio de intemperismo natural, se faz necessária a identificação e a quantificação dos agentes biológicos envolvidos neste processo.

Em seu estudo, Tolvaj; Faix, (1995) associaram o escurecimento da madeira (decréscimo de L^*) à formação de quinonas advindas da degradação da lignina. Já a diminuição dos pigmentos de vermelho (diminuição nos níveis de a^*), foi associada pelos mesmos autores às reações ocorridas nos compostos acidentais da madeira (extrativos). Reforçando as relações feitas nesse trabalho, em seu estudo a respeito da madeira fotodegradada de cedro japonês (*Cupressus japonica*), Mitsui et al., (2004) verificaram diminuição dos níveis de a^* , atribuindo-o à degradação e posterior lixiviação dos compostos extraíveis da madeira.

Na comparação entre as espécies de madeira em estudo, com base nos valores médios de L^* e a^* apresentados na Figura 4.3 não foi possível indicar maior/menor susceptibilidade/resistência atribuída a qualquer um dos quatro eucaliptos em estudo. Todavia, tendo em vista a comparação entre os lenhos juvenil e adulto isoladamente, analisando-se a variabilidade de a^* (Figura 4.3), verifica-se superioridade do lenho adulto com relação a descoloração das amostras ensaiadas. Tal comportamento foi ratificado na comparação entre os lenhos juvenil e adulto realizada por meio dos gráficos de cromaticidade (Figura 4.4).

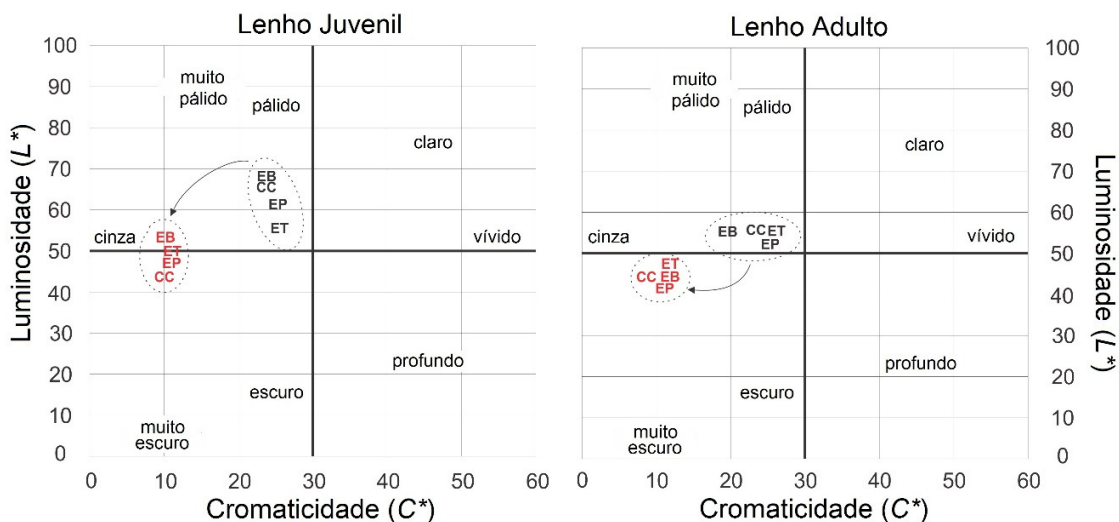


Figura 4.4 – Gráficos de cromaticidade dos lenhos juvenil e adulto das amostras ensaiadas em campo. Em que: EB= *Eucalyptus botryoides*; CC= *Corymbia citriodora*; EP= *Eucalyptus paniculata*; ET= *Eucalyptus tereticornis*.

Nos gráficos de cromaticidade propostos para os lenhos juvenil e adulto das madeiras em estudo (Figura 4.4), verifica-se que embora em ambos os lenhos tenha havido um acinzentamento da cor indicado pela diminuição conjunta dos níveis de L^* e C^* (MATTOS et al., 2013), o lenho adulto apresentou tons mais escuros, tendo em vista todas as quatro espécies desse estudo. Portanto, a maior resistência à descoloração do lenho adulto, verificada com base nas fotos das amostras (Figuras 4.1 e 4.2) e nos níveis a^* (Figura 4.3) foi ratificada pelos gráficos de cromaticidade da Figura 4.4, de modo que os tons de cinza mais escurecidos caracterizam uma menor depreciação da cor do material.

4.4.5 Espectroscopia UV-VIS

A análise dos gráficos contidos na Figura 4.5 ratifica a semelhança entre a coloração das faces radial e tangencial, pois o comportamento das séries de dados ocorre de maneira semelhante durante toda a faixa de comprimentos de onda abrangidas pelo espectro UV-VIS.

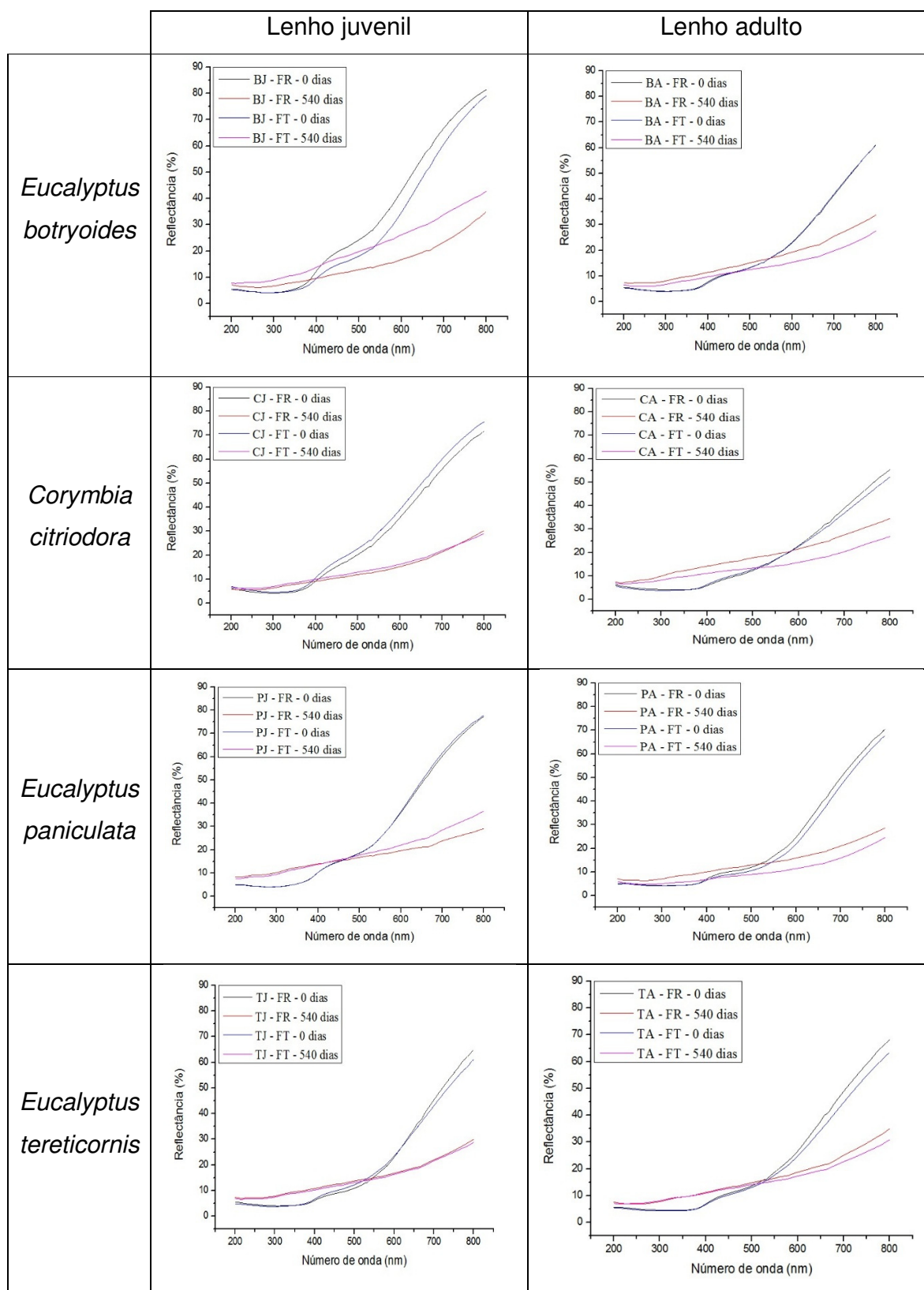


Figura 4.5 – Espectros de UV-VIS organizados em razão dos lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos em estudo. Em que: BJ= Lenho juvenil de *Eucalyptus botryoides*; BA= Lenho adulto de *Eucalyptus botryoides*; CJ= Lenho juvenil de *Corymbia citriodora*; CA= Lenho adulto de *Corymbia citriodora*; PJ= Lenho juvenil de *Eucalyptus paniculata*; PA= Lenho adulto de *Eucalyptus paniculata*; TJ= Lenho juvenil de *Eucalyptus tereticornis*; TA= Lenho adulto de *Eucalyptus tereticornis*; FR= face radial; FT= face tangencial.

Os espectros de UV-VIS claramente indicam as diferenças existentes entre os lenhos juvenil e adulto das quatro espécies de eucaliptos, as quais não são atribuídas à determinados picos isolados. Na verdade, tais diferenças caracterizaram-se pelos menores índices de Refletância obtidos para o lenho adulto, comparados aos do lenho juvenil. Portanto, esses menores níveis de Refletância são um reflexo da coloração mais escurecida do lenho adulto, comparado com o lenho juvenil.

Ainda com base na Figura 4.5, nas madeiras do gênero *Eucalyptus*, genericamente visualiza-se nos espectros de UV-VIS que as diferenças entre as madeiras *in natura* e deterioradas ocorrem em duas faixas distintas de comprimentos de onda, sendo a primeira entre 250 e 400 nm e a segunda de 550 nm em diante. Na primeira, a madeira degradada absorve menos energia, já na segunda região, evidencia-se que a deterioração modificou a madeira de modo que a mesma absorveu mais energia após a faixa de 550 nm.

Comparando essas faixas de comprimentos de onda com o conhecimento existente à respeito, verifica-se que a lignina é o componente responsável pela coloração da madeira até aproximadamente os 400 nm, sendo que seu maior pico concentra-se em 280 nm (HON, 2001). Portanto, é pertinente associar a primeira zona de diferenciação entre as madeiras *in natura* e deterioradas à degradação da lignina, que ocorre pela reação dos grupos hidroxilo fenólicos de suas cadeias laterais com a radiação solar, produzindo grupos carbonílicos e radicais fenólicos, os quais por sua vez transformam-se em estruturas quinoides via desmetilação ou por clivagem (SCHMIDT; HEITNER, 1993; HON, 2001).

Conforme Schmidt; Heitner (1995), os grupos carbonílicos aromáticos formados pela degradação da lignina são visualizados aproximadamente no pico de 330 nm, já as quinonas em 360 nm. Dessa maneira, explica-se a dificuldade na visualização desses picos, na medida em que facilmente em um ensaio, picos próximos são visualizados juntos, formando somente um pico maior.

Doravante, as estruturas quinoídes e os grupos carbonílicos formados durante o processo de degradação modificam a estrutura da madeira, escurecendo-a e conferindo um maior grau de refletância nos comprimentos de compreendidos entre 250 e 400 nm. Esses resultados indicam que a primeira faixa de diferenciação entre as madeiras deterioradas e *in natura* (entre 250 e 400nm) pode ser associada ao decréscimo dos níveis de L^* atribuídos anteriormente a esta mesma comparação.

A segunda zona de diferenciação atribuída as modificações ocasionadas pelo processo de intemperismo possivelmente se deveu as reações ocorridas em seus extrativos e pode ser associada a variabilidade evidenciada para o parâmetro colorimétrico a^* . Essa hipótese tem base em estudos incipientes, os quais atribuem o aparecimento de picos próximos a 650 nm à degradação de compostos fenólicos (YILDIZ et al., 2013). Contudo, há consenso entre os atuais estudos realizados sobre esse tema de que o papel dos extrativos durante o processo de intemperismo natural é desconhecido (CHANG et al., 2010; YILDIZ et al., 2013; TOMAK et al., 2014).

A madeira de *C. citriodora* apresentou um espectro de UV-VIS sensivelmente diferente comparado as demais espécies do gênero *Eucalyptus*. Comparando as diferenças entre as madeira *in natura* e degradadas evidenciada em seus espectros com a literatura já mencionada, é possível verificar que a diferenciação causada pelo mecanismo de degradação entre os comprimentos de onda 200 e 400 nm é atribuída à fotodegradação da lignina (HON, 2001).

De acordo com Santos et al., (2014), a lignina da madeira de *C. citriodora* diferencia-se das ligninas encontradas nas outras três espécies de *Eucalyptus* examinadas no presente estudo por sua constituição e não por seu teor. Portanto, conforme os mesmo autores, as principais diferenças estão em sua maior

quantidade de ácido vanílico e menores quantidades vanilina, siringaldeído e acetovanilina. Quanto aos composição química de seus extrativos, as quais possivelmente condicionaram os espectros de UV-VIS a partir de 400 nm, não há subsídios literários a serem explorados em maior profundidade.

4.3.2 Ângulo de contato

Os valores obtidos na avaliação da cinética da gota, informados pelo aparelho goniômetro por intermédio do ângulo de contato são informados nas Figuras 4.6 e 4.7, as quais representam as faces radial e tangencial, respectivamente. Com base na variação dos dados em função do tempo de ensaio, nota-se que independentemente dos fatores espécie e tipo de lenho, o processo de degradação do material durante os ensaios de intemperismo natural ocasionou uma diminuição do caráter hidrofóbico das amostras de madeira.

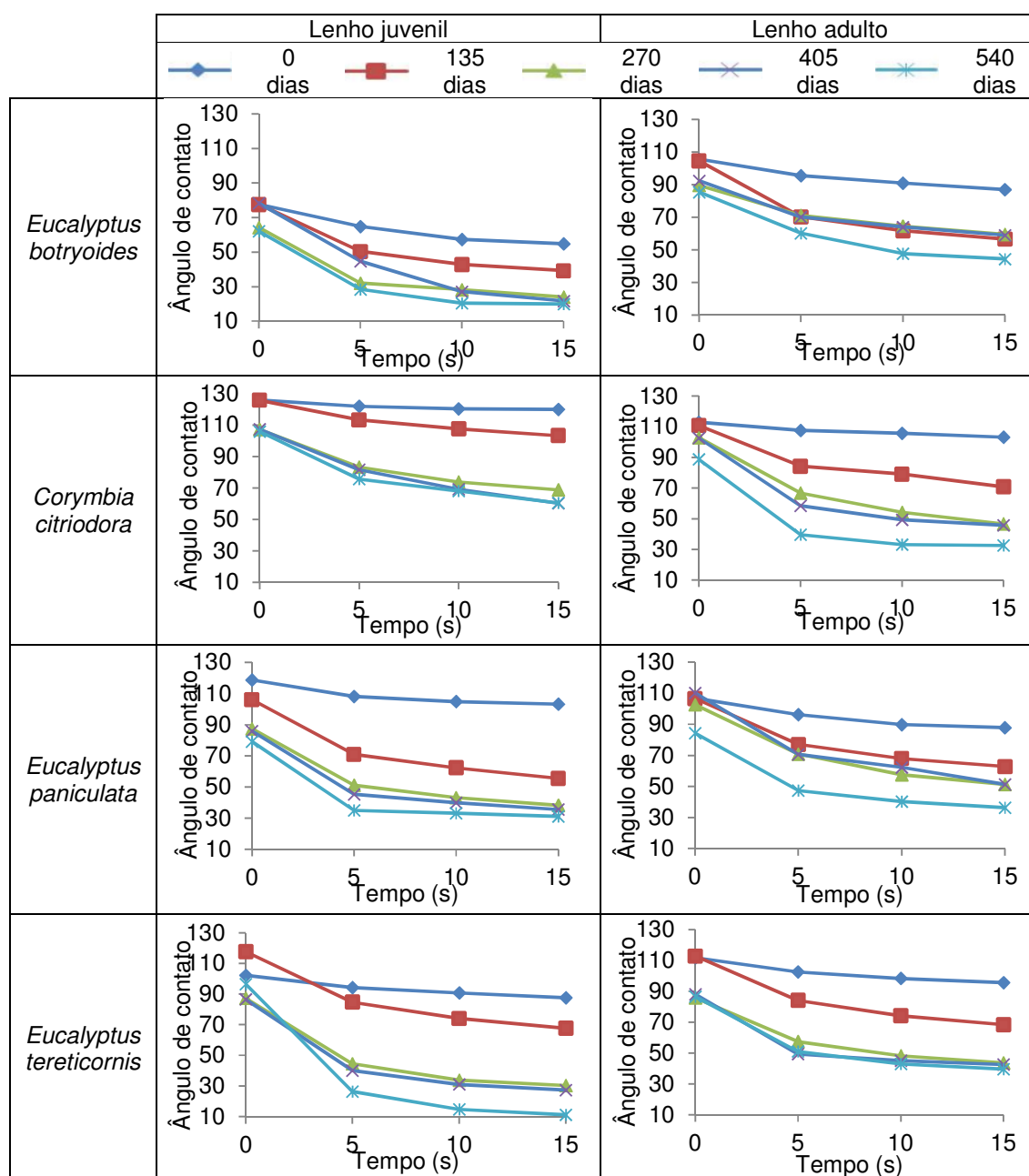


Figura 4.6 – Cinética dos valores de ângulo de contato obtidos para a face radial das amostras de lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos.

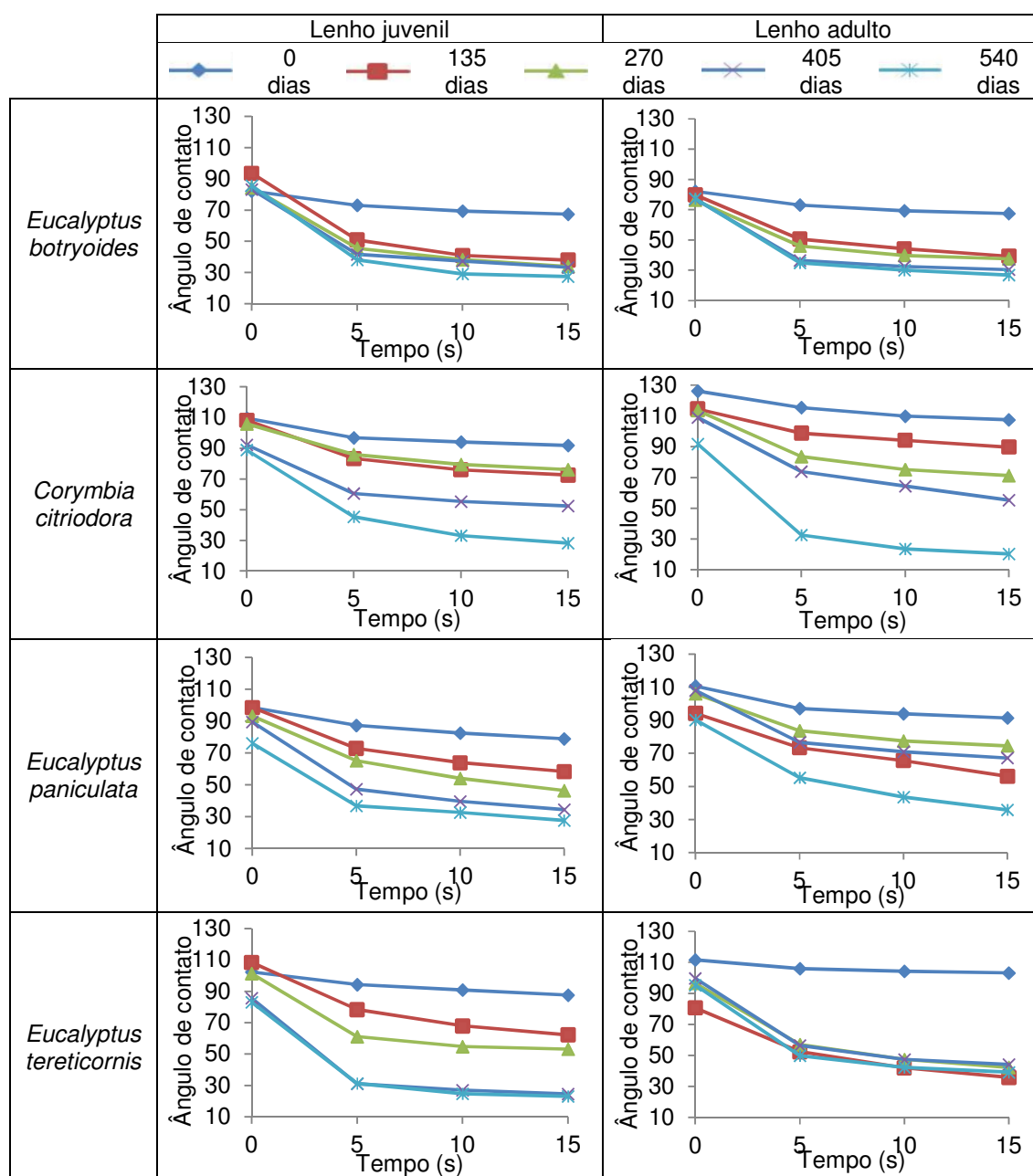


Figura 4.7 – Cinética dos valores de ângulo de contato obtidos para a face tangencial das amostras de lenhos juvenil e adulto dos quatro eucaliptos.

Os níveis de verificados nas Figuras 4.6 e 4.7 encontram-se dentro da faixa verificada em estudos antecedentes, os quais examinaram a madeira de diferentes espécies de folhosas (SUDIYANI et al., 2002; STANGERLIN, 2012). Dessa maneira, é possível notar que embora os níveis de ângulo de contato

tenham diminuído consideravelmente, a magnitude dos mesmos não saiu da faixa de sensibilidade do equipamento de medição (goniômetro).

Embora não tenha sido possível verificar diferenciação atribuída as quatro espécies de eucaliptos, nem aos lenhos juvenil e adulto, verifica-se uma diferenciação evidente entre os valores medianos atribuídos às cinco coletas de amostras durante o ensaio de campo (0, 145, 270, 405 e 540 dias). Dessa maneira, resguardando as características positivas desse ensaio, que incluem a facilidade e rapidez na coleta dos dados, o procedimento de avaliação do ângulo de contato pode ser destacado como um método eficiente para monitorar a depreciação da superfície em razão do tempo de exposição em um ensaio de intemperismo natural. Todavia, os resultados reportados não serviram como parâmetro de qualidade da superfície tendo em vista uma comparação entre diferentes espécies ou entre os lenhos juvenil e adulto de uma determinada espécie.

Em seu estudo, Huang et al. (2012b), analisando as madeiras de *Pinus banksiana*, *Populus tremuloides* e *Betula bapyrifera* submetidas à ensaios de intemperismo artificial, asseveraram com base em micrografias digitais que a molhabilidade superficial da madeira aumenta em razão da formação de rachaduras no material durante o processo de deterioração, as quais facilitam o escoamento de umidade para o interior das células da madeira. Por outro lado, segundo Kishino; Nakano (2004a), a degradação dos açúcares da madeira conduzem a formação de um grande número de hidroxilas no material, as quais conferem maior caráter hidrofóbico a sua superfície.

4.3.3 Dureza Janka

A variação dos valores médios de Dureza Janka, descritos em razão das quatro espécies de eucaliptos e dos lenhos juvenil e adulto das mesmas constam na Figura 4.8, a qual indica um comportamento semelhante ao verificado para a cor da madeira degradada, de modo a ser possível verificar as duas etapas distintas

do processo de apodrecimento do material que foram descritas anteriormente neste capítulo.

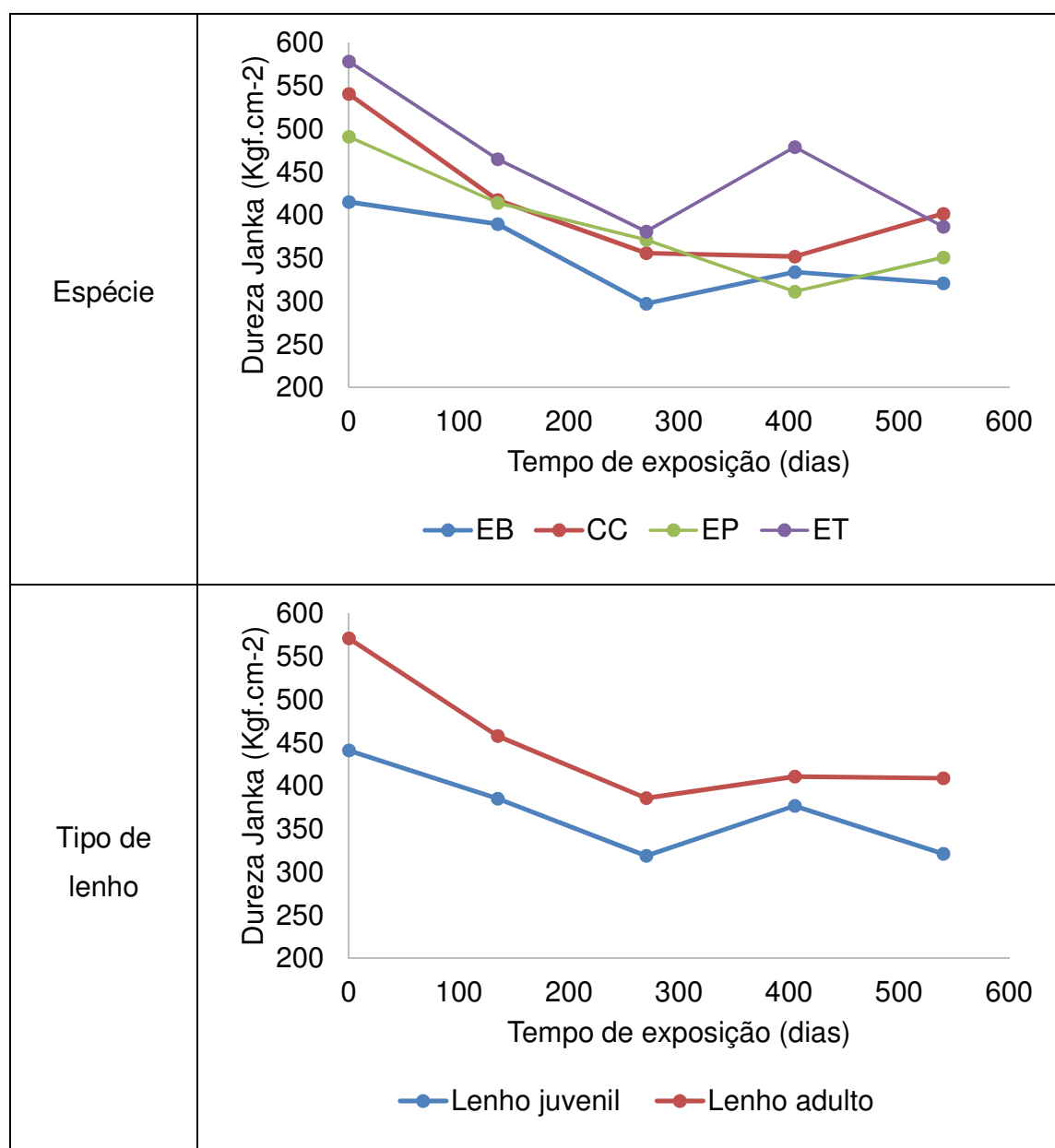


Figura 4.8 – Variação da Dureza Janka em razão do tempo de exposição do material em campo. Em que: EB= *Eucalyptus botryoides*; CC= *Corymbia citriodora*; EP= *Eucalyptus paniculata*; ET= *Eucalyptus tereticornis*.

Analogamente ao resultado verificado nos níveis de molhabilidade (ângulo de contato) das amostras, verifica-se que embora os níveis de Dureza Janka tenham apresentado uma diminuição sensível em razão do maior tempo de exposição das amostras em campo, seus valores médios estão dentro da faixa dos resultados reportados na literatura sobre o tema (GONÇALEZ et al., 2006; ARAÚJO et al., 2012). Dessa maneira, verifica-se que ainda que no presente estudo tenham sido propostas adaptações aos procedimentos normatizados de avaliação da Dureza Janka, os resultados obtidos podem ser considerados confiáveis, de modo que foram obtidos dentro do rango de sensibilidade do equipamento de teste (máquina universal de ensaios).

Na comparação entre os lenhos juvenil e adulto das quatro espécies em estudo, verifica-se que à semelhança da caracterização colorimétrica, o lenho adulto apresentou maior resistência aos intempéries naturais encontrados nos ensaios campo. Na comparação entre as espécies de madeira, verifica-se que quando *in natura* as madeiras de *E. botryoides* e *E. paniculata* apresentaram níveis de Dureza Janka semelhantes entre si, os quais se mantiveram próximos durante todo o período de testes (540 dias). Não obstante, nas madeiras mais duras do presente estudo, e mais duráveis (*C. citriodora* e *E. tereticornis*), verificou-se que quando *in natura*, a madeira de *E. tereticornis* apresentou maior Dureza Janka do que a madeira de *C. citriodora*, relação que foi invertida ao final do tempo de exposição das amostras em campo.

Esse resultado pode ser explicado pela constituição química de ambas as espécies, de modo que esse mecanismo provavelmente está vinculado à constituição da lignina de cada uma destas espécies, pois embora todos os principais componentes da madeira (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos) sejam suscetíveis a fotodegradação, a lignina é a principal responsável pela descoloração da madeira (HON, 2001; EVANS et al., 2002; ISHIGURI et al., 2003).

Segundo Pandey (2005), madeiras com maiores teores de lignina guaiacyl-syringyl (lignina típica da madeira de folhosas) tendem a apresentar maior resistência a fotodegradação em razão da menor taxa de formação de grupos

carbonílicos e carboxílicos durante a oxidação de seus grupos cromóforos. Em seu estudo que analisou um material com a mesma procedência da madeira analisada no presente estudo, Santos et al., (2014) reportaram que a lignina extraída pelo método organosolv da madeira de *C. citriodora* apresenta menor teor, maiores índices de componentes fenólicos e maior proporção S/G (razão entre ligninas siryngyl e guaiacyl-siryngyl) do que a lignina extraída pelo mesmo método da madeira de *E. tereticornis*.

Dessa maneira os estudos consultados na literatura respaldam os resultados obtidos no presente estudo com relação a Dureza Janka, indicando que embora quando *in natura* a madeira de *C. citriodora* apresente uma coloração mais clara, a mesma é mais resistente à foto-oxidação do que a madeira de *E. tereticornis* devido ao teor e a constituição de sua lignina. Assim, com base nos valores médios de Dureza Janka, a resistência à degradação das madeiras dos quatro eucaliptos ao intemperismo natural em ordem decrescente foi: *C. citriodora*, *E. tereticornis*, *E. paniculata* e *E. botryoides*.

4.4 Conclusão

- Dentre os propriedades colorimétricos, a luminosidade (L^*) e a coordenada cromática verde-vermelho (a^*) mostraram-se os parâmetros mais eficientes e sensíveis para o monitoramento da depreciação da superfície das amostras;
- O lenho adulto apresentou maior resistência à degradação do que o lenho juvenil, a qual foi caracterizada por seus tons de cinza mais escurecidos e seus níveis mais elevados de Dureza Janka;
- Nos espectros de UV-VIS, a faixa entre 200 e 400 nm foi atribuída a degradação da lignina e associada ao decréscimo de L^* , já a faixa atribuída aos comprimentos de onda maiores de 550 nm foi atribuída a degradação dos extrativos da madeira e associada a variação de a^* ;
- A técnica de ângulo de contato mostrou-se eficiente para caracterizar a madeira deteriorada em razão das coletas realizadas ao longo dos testes de campo, entretanto esses resultados não subsidiaram um parâmetro confiável para

a comparação de diferentes espécies ou diferentes de lenhos de uma determinada espécie;

- Com base na Dureza Janka, definiu-se que a resistência ao intemperismo natural das quatro espécies de eucalipto em ordem decrescente foi: *C. citriodora*, *E. tereticornis*, *E. paniculata* e *E. botryoides*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões exploradas nos capítulos anteriores dão margem para uma interpretação consorciada do mecanismo de biodeterioração e de intemperismo natural. Nesse sentido, são propostas as seguintes considerações finais:

- Embora tenham sido empregadas diferentes técnicas de caracterização para a avaliação da resistência da madeira em estudo à biodeterioração e ao intemperismo natural, conclui-se que ambas as características da madeira foram descritas de maneira satisfatória;
- As resistências naturais das madeiras dos quatro eucaliptos em estudo diferiram na comparação entre a biodeterioração e o intemperismo natural, de modo que verificou-se que o processo de depreciação da superfície destas madeiras ocorre de maneira diferente comparado ao “*bulk*” das mesmas;
- Na avaliação de ambas as características supracitadas (resistência a biodeterioração e ao intemperismo natural), o lenho adulto denotou-se mais durável em relação ao lenho juvenil. Resultado que pode ser um subsídio para a definição de técnicas silviculturais em plantios ou de desdobro primário em unidades de processamento mecânico de toras (serrarias);
- Quanto a técnica colorimétrica empregada para ambas as características da madeira, foi verificado que para a resistência ao intemperismo somente a luminosidade (L^*) e a coordenada cromática verde-vermelho (a^*) foram interessantes para a caracterização. Não obstante, para a avaliação da biodeterioração todos os parâmetros colorimétricos aportaram resultados satisfatórios;
- Como parâmetro mais confiável para o monitoramento da biodeterioração ocasionada segundo as condições desse estudo, destacou-se a perda de massa. Já quanto a deterioração superficial referida como resistência ao intemperismo natural, teve destaque a Dureza Janka;
- Com base nos altos níveis de resistência natural à biodeterioração e ao intemperismo natural, as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus*

tereticornis pode ser indicadas para a confecção de produtos sólidos destinados ao uso externo;

- Como perspectiva para futuros estudos, é pertinente sugerir que sejam avaliados em maior profundidade os organismos biológicos envolvidos no processo, por meio da identificação dos mesmo. Com relação ao intemperismo natural, sugere-se a avaliação mais aprofundada dos papéis da lignina e dos extrativos da madeira no processo de deterioração de sua superfície quando submetida ao intemperismo natural.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGARWAL, U. P. Assignment of the photoyellowing-related 1675 cm^{-1} RAMAN/IR band to p-quinones and its implications to the mechanism of color reversion in mechanical pulps. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 18, n. 4, p. 381-402, 1998.

AKINYELE, B.J.; ADETUYI, F.C. Effect of agrowastes, pH and temperature variation on the growth of *Volva-riella volvacea*. **African Journal of Biotechnology**, v.4, n.12, p.1390-1395, 2005.

ALI, A. C., UETIMANE JÚNIOR, E., RÅBERG, U., TERZIEV, N. Comparative natural durability of five wood species from Mozambique. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 65, n. 6, p. 768-776, 2011.

ALMEIDA, M. R.; FIDELIS, C. H. V.; BARATA, L. E. S.; POPPI, R. J. Classification of Amazonian rosewood essential oil by Raman spectroscopy and PLS-DA with reliability estimation. **Talanta**, v. 117, n. 0, p. 305-311, 2013.

ALTEYRAC, J.; CLOUTIER, A.; ZHANG, S. Y. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. **Wood Science and Technology**, v.40, n.2, p.124-138, 2006.

American Society for Testing and Materials ASTM. **Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties**. Philadelphia: ASTM. D 5536-94, 2010.

_____. ASTM. **Standard Test Method for Laboratory Evaluation of Wood and Other Cellulosic Materials for Resistance to Termites**. West Conshohocken: ASTM. D 3345-08, 2008.

_____. ASTM. **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. West Conshohocken: ASTM. D 143-94, 2007.

_____. ASTM. **Standard Test Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods**. West Conshohocken: ASTM. D 2017-05, 2014.

ANTWI-BOASIAKO, C.; ALLOTEY, A. The effect of stake dimension on the field performance of two hardwoods with different durability classes. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 64, n. 4, p. 267-273, 2010.

ARAUJO, S. O.; VITAL, B. R.; MENDOZA, Z. M. S. H.; VIEIRA, T. A.; CARNEIRO, A. C. O. Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 327-336, 2012.

Associação Brasileira De Normas Técnicas ABNT. **Projetos de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT. NBR 7190, 1997.

Australian Standard – AS. *AS 5604. Timber-natural Durability Ratings*. In: Annual Book of AS Standards Australia. New South Wales: AS; 2003.

BARRETO, C. C. K.; PASTORE, T. C. M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 1, p. 23-30, 2009.

BELTRAME, R. **Desempenho silvicultural e seleção de clones de *Eucalyptus* spp. para a qualidade da madeira**. 2012. 136 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**. v.28, n.10, p.61-71, 1978.

BRISCHKE, C.; RAPP, A. O.; BAYERBACH, R.; MORSING, N.; FYNHOLM, P.; WELZBACHER, C. R. Monitoring the “material climate” of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings. **Building and Environment**, v. 43, n. 10, p. 1575–1582, 2008.

BRISCHKE, C.; ROLF-KIEL, H. Durability of European oak (*Quercus* spp.) in ground contact – A case study on fence posts in service. **European Journal of Wood Products**, v. 68, n. 2, p. 129–137, 2010.

BRISCHKE, C.; MEYER, L.; OLBERDING, S. Durability of wood exposed in ground e Comparative field trials with different soil substrates. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 86, n. B, p. 108-114, 2014.

CARVALHO, W.; CANILHA, L.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2191-2195, 2009.

CHANG, T.C.; CHANG, H.T.; WU, C.L.; LIN, H.Y.; CHANG, S.T. Stabilizing effect of extractives on the photo-oxidation of *Acacia confusa* Wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 9, p. 1518-1522, 2010.

CHENG, S. S.; LIN, C. Y.; CHUNG, M. J.; LIU, Y. H.; HUANG, C. G.; CHANG, S. T. Larvicidal activities of wood and leaf essential oils and ethanolic extracts from *Cunninghamia konishii* Hayata against the dengue mosquitoes. **Industrial Crops and Products**, v. 47, n. 0, p. 310-315, 2013.

COLOM, X.; CARRILLO, F.; NOGUES, F.; GARRIGA, P. Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy. **Polymer Degradation and Stability**, v. 80, n. 3, p. 543–549, 2003.

CONEGLIAN, A. **Efeito da resistência natural e tratamentos químicos no lenho juvenil e adulto de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg. ao fungo manchador *Botryodiplodia theobromae* e cupim *Cryptotermes brevis***. 2011. 141 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

CUI, W.; KAMDEM, D. P.; RYSPTRA, T. Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. **Wood and Fiber Science**, v. 46, n. 3, p. 289-290, 2004.

CURLING, S. F.; CLAUSEN, C. A.; WINANDY, J. E. Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 49, n. 1, p. 13-19, 2002.

DEL MENEZZI, C.H.S.; SOUZA, R.Q.; THOMPSON, R.M.; TEIXEIRA, D.E.; OKINO, E.Y.A.; COSTA, A.F. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 62, n. 4, p. 448–454, 2008.

DELUCIS, R. A.; TABORDA, V. C.; CORREA, L. W.; VEGA, R. A.; GATTO, D. A. Avaliação da cor dos lenhos juvenil e adulto de cedro por meio do método CIEL a^*b^* . **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 11, n. 3, p. 251-259, 2014.

EL MANSOURI, N. E.; SALVADÓ, J. Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins. **Industrial Crops and Products**, v. 24, n. 1, p. 8–16, 2006.

European Committee for Standardization CEN. **Field Test Method for Determining the Relative Protective Effectiveness of a Wood Preservative in Ground Contact**. Brussels: CEN. BS EN 252. 1989.

_____. CEN. **Wood preservatives. Determination of the protective effectiveness against marine borers**. Brussels: CEN. BS EM 275. 1992.

EVANS, P. D.; OWEN, N. L.; SCHMID, S.; WEBSTER, R. D. Weathering and photostability of benzoylated wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 76, n. 2, p. 291–303, 2002.

EVANS, P. D.; URBAN, K.; CHOWDHURY, M. J. A. Surface checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. **Wood Science and Technology**, v. 42, n. 3, p. 251-265, 2008.

EVERT, R. F. **Esau's Plant Anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development**. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2006. 601p.

FENGEL, D.; WEGENER, G.; **Wood Chemistry, Ultrastructure and Reactions**, 1 ed, Walter de Gruyter: Berlin, 1989.

GARCIA, R.; TRIBOULOT, M.C.; MERLIN, A.; DEGLISE, X. Variation of the viscoelastic properties of wood as a surface finishes substrate. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 2, p. 99-107, 2000.

GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; TREVISAN, R.; DENARDI, L. Proportion of juvenile wood of açoitá-cavalo, pecan and London plane wood. **International Wood Products Journal**, v.4, n.1, p.33-36, 2012.

GEORGE B, SUTTIEB E, MERLIN A, DEGLISE X. Photodegradation and photostabilisation of wood – the state of the art. **Polymer Degradation and Stability**, v. 8, n. 2, p. 268-274, 2005.

GONÇALEZ, J. C.; BREDÁ, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F.; VALE, A. T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

HERNANDEZ, V. **Role of non-decay fungi on the weathering of wood**. 2012. 578 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Bio-Bio, Concepción.

HON, D.N.S. **Wood and cellulosic chemistry**; Hon, D.N.-S.; Shiraishi, N., eds.; Marcel Dekker: New York, 2001.

HON, D.N.S.; FEIST, W.C. Hydroperoxidation in photoirradiated wood surfaces. **Wood and Fiber Science**, v. 24, n. 4, p. 448-455, 1992.

HUANG, X.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y.; BOLUK, Y.; PICHETTE, A. A spectrophotometric and chemical study on color modification of heat-treated wood during artificial weathering. **Applied Surface Science**, v. 258, n. 14, p. 5360-5369, 2012a.

HUANG, X.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y.; BOLUK, Y.; PICHETTE, A. Changes in wettability of heat-treated Wood due to artificial weathering. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 6, p. 1215–1237, 2012b.

ISHIGURI, F.; MARUYAMA, S.; TAKAHASHI, K.; ABE, Z.; YOKOTA, S.; ANDOH, M.; YOSHIZAWA, N. Extractives relating to heartwood color changes in sugi (*Cryptomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **Journal of Wood Science**, v.49, n. 2, p. 135-139, 2003.

JEHRANE, M.; POCKRANDT, M.; TERZIEV, N. Natural durability of selected larch and Scots pine heartwoods in laboratory and field tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 91, n. 1, p. 88–96. 2014

KISHINO, M.; NAKANO, T. Artificial weathering of tropical woods. Part 1: Changes in wettability. **Holzforschung**, v. 58, n. 5, p. 552–557, 2004a.

KISHINO, M.; NAKANO, T. Artificial weathering of tropical woods. Part 2: Color change. **Holzforschung**, v. 58, n. 5, p. 558–565, 2004b.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; FERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Curitiba: UFPR 2005.

KONICA MINOLTA. 2007. **Precise color communication: color control from perception to instrumentation**. Japan: KonicaMinolta Sensing Inc.

KUO, M. L.; HU, N. Ultrastructural changes of photodegradation of wood surface exposed to UV. **Holzforschung**, v. 45, n. 5, p. 347–353, 2001.

LARA PALMA, H. A.; LEONELLO, E. C.; BALLARIN, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. **Cerne**, v. 16, n. suplemento, p. 141-148, 2010.

LATORRACA, J. V. F.; DÜNISCH, O.; KOCH, G. Chemical composition and natural durability of juvenile and mature heartwood of *Robinia pseudoacacia* L. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 83, n. 3, p. 1059-1068, 2011.

LELIS, A. T.; BRAZOLIN, S.; FERNANDES, J. L. G.; LOPEZ, G. A. C.; MONTEIRO, M. B. B.; ZENID, G. J. **Biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 54p. 2001.

LEPAGE, E.S., **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT. 2v, 1986.

LITTLE, N. S.; SCHULTZ, T. P.; DIEHL, S. V.; NICHOLAS, D. D.; LONDO, A. J.; MUSSER, F. R.; RIGGINS, J. J. Field Evaluations of Subterranean Termite Preference for Sap-Stain Inoculated Wood. **Journal of Insect Behavior**, v. 26, n. 5, p. 649–659, 2013.

LOO, J. A.; TAUER, C. G.; MCNEW, R. W. Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). **Silvae Genetica**, v.34, n.1, p.14-19, 1985.

MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, B. D.; MISSIO, A. L. Field testing of CCA-treated Brazilian spotted gum. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 74, n. 9, p. 124-128, 2012.

MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; LACLAUB, J.; CORBEELSE, M.; MCMURTRIEF, R. E.; STAPEG, J. L.; EPRONH, D.; LE MAIREB, G. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. 1, p. 112-128, 2013.

MATTOS, B. D. **Resistência ao apodrecimento da madeira de três espécies florestais quando submetidas a tratamentos preservativos**. 2011. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

MATTOS, B. D.; CADEMARTORI, P. H. G.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A. Colour changes of Brazilian eucalypts wood by natural weathering. **International Wood Products Journal**, v. 5, n. 1, p. 33-38, 2013.

MATTOS, B. D.; CADEMARTORI, P. H. G.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A.; MAGALHAES, W. L. E. Biodeterioration of wood from two fast-growing eucalypts exposed to field test. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 93, n. 8, p. 210–215, 2014a.

MATTOS, B. D.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A.; SERRANO, L.; LABIDI, J. Chemical characterization of wood and extractives of fast-growing *Schizolobium parahyba* and *Pinus taeda*. **Wood Material Science & Engineering**, v. , n., p., 2014b.

MENDES, A. S.; ALVES, M. V. S. A degradação da madeira e sua preservação. Brasília: IBDF. Departamento de Pesquisa. Laboratório de Produtos Florestais, 1988. 57p.

MITSUI, K.; MURATA, A.; TOLVAJ, L. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 62, n. 3, p. 164-168, 2004.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e Preservação da Madeira – Volume I**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. 2013. 49 p.

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

MOYA, R.; FALLAS, R. S.; BONILLA, P. J.; TENORIO, C. Relationship between wood color parameters measured by the cielab system and extractive and phenol content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from fast-growth plantations. **Molecules**, v. 17, n. 0, p. 3639-3652, 2012.

NEGRÃO, D. R., SILVA JÚNIOR, T. A. F.; PASSOS JR., S.; SANSÍGOLO, C. A.; MINHONI, M. T. A.; FURTADO, E. L. Biodegradation of *Eucalyptus urograndis* wood by fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 89, n. 1, p. 95-102, 2014.

NUGHORO, W. D.; MARSOEM, S. N.; YASUE, K.; FUJIWARA, T.; NAKAJIMA, T.; HAYAKAWA, M.; NAKABA, S.; YAMAGISHI, Y.; JIN, H.; KUBO, T.; FUNADA, R.

Radial variations in the anatomical characteristics and density of the wood of *Acacia mangium* of five different provenances in Indonesia. **Journal of Wood Science**, v.58, n.3, p.185–194, 2012.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; NASCIMENTO, A. M.; REZENDE, M. A. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm, **Árvore**, v.37, n.1, p. 191-200, 2013.

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

PANDEY, K. K.; VUORINEN, T. Comparative study of photodegradation of wood by a UV laser and a xenon light source. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 12, p. 2138-2146, 2008.

PASTORE, T. C. M.; OLIVEIRA, C. C. K.; RUBIM, J. C.; SANTOS, K. O. Efeito do intemperismo artificial em quatro madeiras tropicais monitorado por espectroscopia de infravermelho (DRIFT). **Química Nova**, v. 31, n. 8, p. 2071-2075, 2008.

PHUONG, L.; SHIDA, S.; SAITO, Y. Effects of heat treatment on brittleness of *Styrax tonkinensis* wood. **Journal of Wood Science**, v. 53, n. 3, p. 181-186, 2007.

PLACKETT, D. V.; DUNNINGHAM, E. A.; SINGH, A. P. Weathering of chemically modified wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 50, n. 4, p. 135-140, 1992.

PLASCHKIES, K.; JACOBS, K.; SCHEIDING, W.; MELCHER, E. Investigations on natural durability of important European wood species against wood decay fungi. Part 1: Laboratory tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 90, n. 12, p. 52–56, 2014.

PRINISHA, M. **Characterisation and quantification of wood extractives and their impact on pitch**. 2005. 198 f. Tese de Doutorado – Universidade de KwaZulu, Durban.

RÅBERG, U.; EDLUND, M.; TERZIEV, N.; LAND, C. J. Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe – an overview. **Journal of Wood Science**, v. 51, n. 5, p. 429-440, 2005.

RÅBERG, U.; TERZIEV, N.; DANIEL, G. Degradation of Scots pine and beech wood exposed in four test fields used for testing of wood preservatives. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 79, n. 4, p. 20-27, 2013.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 411-418, 2011.

ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton, London, New York, Singapore: CRC Press, 2005.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Handbook of wood chemistry and wood composites. New York: CRC Press; 2005.

SANTINI, E. J. Biodeterioração e preservação da madeira. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1988. 125 p.

SANTOS, Z. M. **Avaliação da durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill: Maiden em ensaios de laboratório**. 1992. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

SANTOS, P. S. B.; CADEMARTORI, P. H. G.; PRADO, R.; GATTO, D. A.; LABIDI, J. Composition and structure of organosolv lignins from four eucalypt species. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 4, p. 873-885, 2014.

SCHMIDT, J. A.; HEITNER, C. Light-induced yellowing of mechanical and ultra-high yield pulps. Part 2. Radical-induced cleavage of etherified guaiacylglycerol-b-arylether groups is the main degradative pathway. **Journal of Wood Chemical and Technology**, v. 13, n. 3, 1993.

SCHMIDT, J. A.; HEITNER, C. Light-induced yellowing of mechanical and ultra-high yield pulps. Part 3. Comparison of softwood TMP, softwood CTMP and aspen CTMP. **Journal of Wood Chemical and Technology**, v. 15, n. 2, p. 223–245, 1995.

SHULTZ, T. P.; HARMS, W. B.; FISCHER, T. H.; McMURTREY, K. D.; MINN, J.; NICHOLAS, D. D. Durability of angiosperm heartwood: the importance of extractives. **Holzforschung**, v. 49, n. 1, p. 29-34, 1995.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. H.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SJÖSTRÖM, F. **Wood chemistry fundamentals and application**. New York: Academic press, 1993.

STANGERLIN, D.M. **Monitoramento de propriedades de madeiras da Amazônia submetidas ao ataque de fungos apodrecedores**. 2012. 259f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. B.M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M. SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.

SUDIYANI, Y.; HORISAWA, S.; CHEN, K.; DOI, S.; IMAMURA, Y. Changes in surface properties of tropical wood species exposed to the Indonesian climate in relation to mold colonies. **Journal of Wood Science**, v. 48, n. 6, p. 542-547, 2002.

SUDIYANI, Y.; IMAMURA, Y.; DOI, S.; YAMAUCHI, S. Infrared spectroscopic investigations of weathering effects on the surface of tropical wood. **Journal of Wood Science**, v. 49, n. 1, p. 86-92, 2003.

TABET, T. A.; AZIZ, F. A. Cellulose Microfibril Angle in Wood and Its Dynamic Mechanical Significance. In: VEN, T. V. D. e GODBOUT, L. (Ed.). **Cellulose - Fundamental Aspects**: InTech, 2013. cap. 5, p.366.

THYBRING, E. E. The decay resistance of modified wood influenced by moisture exclusion and swelling reduction. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 82, n. 1, p. 87-95, 2013.

TOLVAJ, L.; FAIX, O. Artificial aging of wood monitored by DRIFT spectroscopy and CIEL **a*b** color measurements I: effect of UV light. **Holzforschung**, v. 49, n. 5, p. 397-404, 1995.

TOMAK, E. D.; USTAOMER, D.; YILDIZ, S.; PESMAN, E. Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering. **Measurement**, v. 53, n. 0, p. 30-39, 2014.

TREVISAN, H. **Degradação natural de toras e sua influência nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies florestais**. 2006. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2006.

VALVERDE, J. C.; MOYA, R. Efectos de la intemperie en el color de dos acabados aplicados en madera de *Cedrela odorata* y *Carapa guianensis*. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, v. 12, n. 3, p. 171-180, 2010.

VENÄLÄINEN, M.; PARTANEN, H.; HARJU, A. The strength loss of Scots pine timber in an accelerated soil contact test. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 86, n. B, p. 150-152, 2014.

VENMALAR, D.; NAGAVENI, H. C.; REMADEVI, O. K.; BABU, P.; VIJAYALAKSHMI, G.; SHALINI, P. Resistance of different age groups of timber of *Ailanthus* species to biodeterioration in Karnataka conditions. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 8, n. 2, p. 165-168, 2011.

VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J.T.S.; ARANTES, M.D.C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

VIVIAN, M. A. **Resistência biológica da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* em ensaios de laboratório e campo.** 2011. 105p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

WANG, S. Y.; CHANG, H. N.; LIN, K. T.; LO, C. P.; YANG, N. S.; SHYUR, L. F. Antioxidant properties and phytochemical characteristics of extracts from *Lactuca indica*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 5, p. 1506-1512, 2003.

WANG, S. Y.; WU, J. H.; CHENG, S. S.; LO, C. P.; CHANG, H. N.; SHYUR, L. F.; CHANG, S. T. Antioxidant activity of extracts from *Calocedrus formosana* leaf, bark, and heartwood. **Journal of Wood Science**, v. 50, n. 5, p. 422-426, 2004.

YILDIZ, S.; TOMAK, E. D.; YILDIZ, U. C.; USTAOMER, D. Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 8, p. 1419-1427, 2013.

ZABEL, R. A.; MORRELL, J. **Wood microbiology – decay and its prevention.** San Diego; 1992.

ZHU, J.; NAKANO, T.; HIRAKAWA, Y. Effects of radial growth rate on selected indices for juvenile and mature wood of the Japanese larch. **Journal of Wood Science**, v.46, n.6, p.417-422, 2000.

ZOBEL B. J.; VAN BUIJTENEN J. P. **Wood variation: its causes and control.** New York: Springer-Verlag, 1989. 363p.