



**POLIANE PEREIRA DE SOUZA**

**Avaliação e modelagem de colapso em madeiras de *Eucalyptus grandis*.**

**LAVRAS – MG**

**2018**

**POLIANE PEREIRA DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO E MODELAGEM DE COLAPSO EM  
MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis***

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

Dr. Natalino Calegario

Orientador

Dr. José Tarcísio Lima

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2018**

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

Souza, Poliane Pereira de.

Avaliação e modelagem de colapso em madeiras de *Eucalyptus grandis* / Poliane Pereira de Souza. - 2018.

59 p. : il.

Orientador(a): Natalino Calegario.

Coorientador(a): José Tarcísio Lima.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Secagem. 2. Defeitos de secagem. 3. Colapso. I. Calegario, Natalino. II. Lima, José Tarcísio. III. Título.

**POLIANE PEREIRA DE SOUZA**

**Avaliação e modelagem de colapso em madeiras de *Eucalyptus grandis*.**

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

APROVADA em 28 de fevereiro de 2018

Dr. Natalino Calegario

Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca

Dra. Claudineia Olimpia Assis

Orientador : Natalino Calegario

**LAVRAS – MG**

**2018**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela infinita bondade e predileção que dedicou a mim durante toda a vida!

Àqueles que abdicaram de tantos sonhos em favor dos meus, Luzia e Antônio Roque, exemplos de determinação, força, coragem e muita luta. Sonhamos juntos, realizaremos juntos!

A Suze, pelo apoio constante, por me ensinar tanto com seu jeito sereno e iluminado, me sinto honrada pela benção de ser sua irmã!

Ao professor Natalino Calegario, meu orientador, pela parceria, alegria e por sempre acreditar na minha capacidade.

Ao professor José Tarcísio Lima pelos conselhos, o carinho e atenção que sempre dedicou a mim, serei eternamente grata!

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, todos os professores, que com muita competência me deram grandes exemplos. Todos os técnicos, em especial a Raisa, que sempre disposta e com a sua alegria faz toda a diferença por onde passa. A todos os colegas que tive oportunidade de conhecer, contem comigo!!

A Fapemig pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos familiares, que rezam e torcem pelas minhas vitórias.

Agradeço de forma especial aos amigos, tanto aqueles que eu trouxe da Bahia, quanto aqueles que conquistei em Lavras. Deus sabe o quanto estávamos predestinados a esse encontro, agradeço cada gesto de carinho e cada palavra de incentivo.

Às meninas da salinha da CTM e a todos os orientados do Calegario, que sempre foram grandes parceiros e muito queridos.

Anna Carolina de Almeida Andrade e Livia Ribeiro Costa, pela ajuda nos tensos dias e noites de secagem, não esquecerei esse apoio. Agradeço Wendell Souza, Rodrigo Simetti e Renato, pois sem a ajuda vocês eu não teria conseguido concluir.

Às minhas parceiras de Republica e, principalmente, amigas queridas, Preta e Carol, quanta alegria conviver com vocês, essa parceria vai longe!!

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho.

Muito obrigada!

*“Mas é preciso ter manha  
é preciso ter graça  
É preciso ter sonho, sempre  
Quem traz na pele essa marca  
Possui a estranha mania  
De ter fé na vida...”.*

*(Milton Nascimento e Fernando Brant)*

## RESUMO

A secagem da madeira é uma etapa fundamental para a sua utilização em diversas finalidades. Porém, a secagem é um processo difícil para algumas espécies, como é o caso do *Eucalyptus grandis*. Defeitos oriundos da secagem da madeira são comuns nesta espécie. O colapso é um dos principais defeitos que ocorrem durante a secagem. Informações detalhadas sobre este defeito são escassas na literatura atual. Portanto, justifica-se a realização de trabalhos sobre o colapso, visto que se trata de um defeito com ampla ocorrência e que deprecia a qualidade da madeira. O trabalho está dividido em capítulos, visando explorar o máximo de informações sobre o defeito em questão. O capítulo I apresenta uma breve discussão teórica sobre as principais características do colapso. Esse capítulo aborda também os principais temas relacionados à ocorrência dele: movimentação de água na madeira, secagem, defeitos, permeabilidade. Capítulo II compreende a caracterização física e anatômica da madeira, a avaliação de índice de colapso e suas correlações. As características anatômicas apresentaram valores dentro de intervalos característicos da espécie. Comprimento de fibra e espessura de parede apresentaram tendência crescente da medula à casca. O índice de colapso foi considerado forte para as árvores estudadas e apresentou fraca correlação com densidade básica, largura da fibra e comprimento de vaso. Capítulo III propõe a realização da modelagem do colapso, bem como, obter a curva da umidade em função do tempo de secagem e curva de colapso, ambos durante a saída de água livre da madeira. A partir de um modelo logístico com quatro parâmetros, foi possível estimar a perda de área por colapso e o ponto crítico de deformação para cada posição. As amostras que apresentaram maiores deformações em decorrência de colapso foram aquelas mais próximas da medula das árvores. O ponto crítico de colapso na madeira do *Eucalyptus grandis* foi aos 225 minutos, apontando para o cuidado que deve existir nas primeiras horas da secagem para esta espécie.

**Palavras-chave:** Secagem. Defeitos de secagem. Água livre.

## ABSTRACT

Wood drying is a fundamental step for its use in various purposes, however, drying is a difficult process for some species such as *Eucalyptus grandis*. The defects from wood drying are common in this species with collapse as one of the major defects occurring during drying. Detailed information about this defect are scarce in the current literature. Therefore, it is justified to carry study collapse, since it is a defect with a large occurrence and that depreciates wood quality. This study is divided into chapters to explore as much information as possible about the defect in question. Chapter I presents a brief theoretical discussion about the main characteristics of the collapse. This chapter also discusses the main themes related to its occurrence: water movement in wood, drying, defects, permeability. Chapter II includes the physical and anatomical characterization of wood, the evaluation of collapse index and its correlations. The anatomical characteristics presented values within intervals characteristic of the species. The collapse index was considered strong for the studied trees and showed poor correlation with basic density, fiber width and vessel length. Chapter III proposes the collapse modeling as well as to obtain the curve of the humidity as a function of the time of drying and collapse curve, both during the exit of free water of the wood. From a logistic model with four parameters, estimation of area loss was possible by collapse and the critical point of deformation for each position. The samples that presented greater deformations due to collapse were those closer to the marrow of the trees. The critical point of collapse in the wood of *Eucalyptus grandis* was at 225 minutes, witch points to the need for caution that must exist in the first hours of drying for this species.

**key words:** Drying. Drying defects. Free water.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: Revisão geral .....</b>	<b>110</b>
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Movimentação de água na madeira .....	13
2.2 Secagem da madeira de <i>Eucalyptus</i> .....	13
2.3 Modelagem.....	14
2.4 Defeitos de secagem da madeira .....	14
2.4.1 Colapso.....	15
2.4.1.1 Anatomia da madeira .....	16
2.4.1.2 Densidade básica .....	16
2.4.1.3 Umidade .....	17
2.4.1.4 Permeabilidade .....	17
<b>REFERÊNCIAS. ....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO II: Caracterização física e anatômica da madeira associadas à ocorrência de colapso em <i>Eucalyptus grandis</i> .....</b>	<b>21</b>
1. INTRODUÇÃO .....	24
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	25
2.1 Obtenção do material .....	25
2.2 Caracterização anatômica.....	26
2.3 Densidade básica da madeira .....	27
2.4 Secagem drástica da madeira .....	27
3. Análise Estatística.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1 Caracterização anatômica.....	28
4.1.2 Comprimento de fibra .....	28
4.1.3 Diâmetro de lume .....	31
4.1.4 Largura de fibra.....	32
4.1.5 Espessura de Parede celular .....	33
4.1.6 Comprimento e diâmetro de vasos .....	34
4.2 Densidade.....	34
4.3 Secagem Drástica .....	35
4.3.1 Índice de colapso.....	35
4.3.2 Correlação do índice de colapso com características analisadas.....	35
5. Conclusão .....	36

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO III: Taxas, curvas e modelagem de colapso em madeiras de <i>Eucalyptus grandis</i> ....</b>	<b>40</b>
1. INTRODUÇÃO .....	43
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	44
2.1 Coleta de dados .....	44
2.2 Umidade .....	44
2.3 Volume .....	45
2.4 Taxa de colapso e determinação da curva de colapso .....	45
3. Análises Estatística .....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1 Umidade .....	45
4.3 Taxa de saída de água livre .....	46
4.4 Taxa de colapso .....	47
4.5 Modelagem de colapso em <i>Eucalyptus grandis</i> .....	49
5. CONCLUSÃO .....	556
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>

## **CAPÍTULO 1: REVISÃO GERAL**

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material biológico, higroscópico, anisotrópico e heterogêneo. Isso significa que em sua complexidade apresenta ampla variação estrutural, comportamento diferente em cada eixo de orientação, e uma relação direta com a umidade ambiental. As características apresentadas pela madeira despertam o interesse para diversas finalidades. Dentre elas a produção de móveis, lenha, carvão vegetal, obtenção de energia, e para a construção civil.

A alta demanda de produtos madeireiros levou a uma exploração florestal em larga escala, o que ampliou a supressão de vegetação nativa brasileira. O investimento em florestas plantadas pode minimizar este problema e garantir uma produção madeireira de alta qualidade. Dentre as espécies que se destacam na produção madeireira, muitas pertencem ao gênero *Eucalyptus*, o qual possui uma alta plasticidade, adaptabilidade, rápido crescimento e está sendo alvo de muitas pesquisas de melhoramento genético.

Embora o *Eucalyptus* possua tamanha importância, a sua madeira apresenta características que dificultam seu processamento. As principais limitações são tensões de crescimento, nós, madeira juvenil e defeitos durante a secagem. A secagem é um processo de destaque na obtenção de produtos a base de madeira. Entretanto, durante a saída de água, diversas tensões ocorrem podendo provocar defeitos como rachaduras, empenamentos, encruamento e o colapso.

O colapso é um dos defeitos que ocorre com alta frequência durante a secagem. É causado por tensões capilares no decorrer da saída de água livre da madeira (SIAU, 1971).

Investimentos em pesquisas acerca da secagem da madeira são necessários para minimizar os defeitos por meio de técnicas corretas e condições adequadas. É desejável que a madeira, após a secagem, esteja com o mínimo de defeitos possível. O aprofundamento do conhecimento sobre o colapso configura-se como um tema importante para pesquisa, pois, o colapso é um dos principais defeitos que ocorrem durante a secagem.

Justifica-se a realização deste trabalho, visto que este defeito possui ampla ocorrência e deprecia a qualidade da madeira. Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão de literatura abordando temas relacionados ao defeito de secagem colapso, e apresentar os estudos que tem sido feito sobre esse tema, visando ampliar os conhecimentos acerca deste defeito.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1 Movimentação de água na madeira

Segundo Siau (1971), existem dois tipos principais de água em células da madeira: água livre, que existe dentro do lume das fibras e entre fibras; e a água de adsorção. A movimentação da água na madeira apresenta-se de maneira complexa, ocorrendo variações na forma como o movimento acontece. O movimento de água na madeira ocorre tanto no sentido longitudinal como no transversal, das zonas de maior umidade para zonas de menor umidade.

Segundo Kollmann e côté (1968), existindo um menisco equilibrado e um desequilibrado num tubo capilar, as diferenças de tensão causam o movimento da água livre. Pelo fato da umidade externa geralmente ser menor que internamente, o deslocamento de água ocorre da parte interior da madeira, para a parte externa, gerando uma atração capilar na água livre.

O movimento de fluidos pode ser dividido em: capilaridade, ou fluxo de massa sob gradiente de pressão capilar, e difusão (SIAU,1971). O colapso induzido pelo capilar ocorre antes do ponto de saturação das fibras. Neste momento, uma interface pode se formar no interior do lume, enquanto a parede da célula ainda está saturada.

### 2.1 Secagem da madeira de *Eucalyptus*

A secagem define-se como um balanço que ocorre entre a transferência de calor da corrente de ar para a superfície da madeira e a passagem de umidade da superfície da madeira para a corrente de ar (HART, 1966). Durante a secagem da madeira, a parte externa deve estar mais seca que o interior da madeira, pois a água se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade.

O *Eucalyptus grandis* é uma das espécies mais plantadas no país e apresenta grande potencial produtivo, sua madeira é amplamente utilizada nos segmentos de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerados, lenha, móveis e serraria (SOARES et al., 2003). No entanto, a secagem de madeira de *Eucalyptus*, de um modo geral, é considerada uma secagem difícil e complexa, pois esse gênero é caracterizado por uma baixa permeabilidade, a líquidos e a gases, o que gera gradiente de umidade acentuado, elevadas contrações, maior suscetibilidade ao colapso (BARBOSA et al., 2005; SEVERO, 2000).

A secagem do *Eucalyptus* deve ser conduzida cuidadosamente, pois, durante o processo pode ocorrer o aparecimento de defeitos que geram perdas consideráveis de matéria-prima e, conseqüentemente, perdas econômicas.

A anatomia da madeira exerce influencia na sua secagem, afetando, sobretudo, a permeabilidade. Tendo em vista que fatores anatômicos como tiloses, frequência e distribuição dos vasos, entre outras propriedades afetam a permeabilidade da madeira, e conseqüentemente, afetam a qualidade da secagem (BURGER & RICHER, 1991).

Os defeitos mais recorrentes durante a secagem podem ser agrupados em quatro categorias: Colapso, rachaduras, endurecimento superficial e empenamentos. O colapso é um dos principais defeitos que ocorrem durante a secagem da madeira e reduz a qualidade da madeira (SEVERO, 2000).

A secagem promove uma alta tensão hidrostática no lume da célula e, quando esta tensão excede o limite de proporcionalidade em contração perpendicular, ocorre uma contração abrupta nas paredes celulares gerando o colapso (YANG et al., 2014b). Esse defeito ocorre geralmente em madeiras pouco permeáveis (BARBOSA et al., 2005).

## 2.2 Modelagem

Os modelos utilizados para representar relações, buscando estimar com precisão as variáveis de interesse, são obtidos, normalmente, por técnicas de regressão. Ao analisar a tendência dos dados, pode-se escolher uma relação funcional que os represente, para melhorar a precisão dos modelos, novas variáveis podem ser adicionadas.

Um modelo mecanicista foi utilizado por Plumb et al. (1985) para relacionar as propriedades capilares porosas da madeira com parâmetros geométricos e de permeabilidade conhecidos. Os resultados gerados a partir do modelo, quando comparados com os dados experimentais, demonstram que o modelo conseguia prever razoavelmente bem as taxas de secagem e as distribuições de umidade, porém, eram necessários dados de permeabilidade precisos. Se os valores de permeabilidade estiverem errados, ou se o transporte capilar for negligenciado, as taxas de secagem previstas pelo modelo não serão representativas.

## 2.3 Defeitos de secagem da madeira

Os defeitos oriundos da secagem diminuem a qualidade final de produtos. A secagem da madeira pode proporcionar uma série de defeitos, dentre eles, destaca-se as rachaduras, endurecimento superficial, empenamentos e colapso (SEVERO, 2000). Dentre eles, o colapso é um defeito que sua ocorrência se destaca.

### 2.3.1 Colapso

A madeira de eucalipto é altamente propensa ao desenvolvimento de colapso, sendo, inclusive, considerado um dos principais defeitos de sua secagem (SANTINI; TOMASELLI, 1980). O colapso é uma forma de encolhimento que ocorre na madeira durante a secagem acima do ponto de saturação de fibra e que se manifesta por uma flambagem ou aplanamento das células da madeira (CHAFE, 1988).

Colapso refere-se a um fenômeno frequentemente observado na secagem de madeira verde, especialmente no cerne de determinadas espécies, onde as cavidades celulares são distorcidas. Ele difere do encolhimento normal, pois no encolhimento, à medida que a umidade sai da madeira a organização das células se dá em conjunto, enquanto em colapso, células são distorcidas, causando o defeito (TIEMANN, 1941).

O colapso ocorre antes que a contração normal tenha iniciado. Diferente de outros defeitos, ele se apresenta antes mesmo que toda água livre tenha saído das células. A secagem promove uma alta tensão hidrostática no lume da célula e, quando esta tensão excede o limite de proporcionalidade em contração perpendicular, ocorre uma contração abrupta nas paredes celulares (YANG et al., 2014b). Esse defeito ocorre geralmente em madeiras pouco permeáveis (BARBOSA et al., 2005).

O colapso pode ser avaliado de forma visual e também com o auxílio de mensurações, o que possibilita conhecer a evolução da contração em diferentes umidades durante a secagem. Perré et al. (2007) afirmam que a ocorrência de contração, acima do ponto de saturação das fibras, indica a presença de colapso.

Como a incidência desse defeito está relacionada à saída de água livre da madeira, portanto, abaixo do PSF não há a ocorrência de colapso. O colapso ocorre devido a rápida remoção de água capilar a altas temperaturas no início da secagem, associado ao endurecimento superficial e a formação de rachaduras (SEVERO, 2000).

Diferente de outros defeitos, ele se apresenta antes mesmo que toda água livre tenha saído das células. É possível realizar uma recuperação de células colapsadas, dependendo da intensidade de ocorrência (YANG et al., 2014a). Um tipo de colapso peculiar que ocorre em

algumas madeiras aparece como uma série de “favos de mel” (Figura 1), em anéis anuais ocasionais, mas ao contrário do comum, este não é recuperável (TIEMANN, 1941).

Figura 1: “Favos de mel” exemplo de colapso não recuperável.



Fonte: da autora (2018)

O colapso é basicamente ocasionado por forças geradas durante a movimentação da água capilar, as quais deformam as células. Alguns fatores exercem influência sobre a ocorrência do colapso, o diâmetro dos capilares, as temperaturas no início da secagem, a densidade da madeira a permeabilidade da madeira além da tensão superficial do líquido que é removido desta madeira, pontoações e tilose (KLITZE, 2007).

Embora nem todo corpo poroso é permeável, a porosidade influencia na permeabilidade (SIAU, 1971). O motivo do colapso na madeira é resultado das ações do interior do estresse de compressão durante a secagem da madeira e a menor permeabilidade causa maior tensão capilar e diferença de pressão de vapor (MIAO et al. 2010).

#### 2.3.1.1 Anatomia da madeira

A anatomia da madeira como presença de tiloses, frequência de vasos, diâmetro de vasos, são alguns fatores que podem influenciar na saída de água da madeira. Monteiro (2014) avaliando o efeito da anatomia no fluxo de água na madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* observou que o diâmetro e o comprimento dos vasos afetam a taxa de fluxo de água livre na madeira, enquanto que a frequência de vasos influencia na taxa de fluxo de água adsorvida.

#### 2.3.1.2 Densidade básica



A densidade básica da madeira é definida como a relação da massa absolutamente seca e o volume verde de uma amostra (PANSWIN E DE ZEEUW, 1980). Refere-se diretamente a quantidade de material lenhoso por unidade de área (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968).

Kollmann e Côté (1968) afirmam que as variações na densidade da madeira são o resultado das diferenças anatômicas, especialmente da espessura das paredes celulares. Uma vez que apresenta forte correlação com as demais propriedades, a densidade básica é considerada a propriedade física de maior importância.

#### 2.3.1.3 Umidade

Durante o processo de secagem, a umidade é um fator fundamental, pois a secagem visa retirar a água da madeira, conduzindo-a em uma umidade atual para uma umidade de equilíbrio desejada, com a menor ocorrência de defeitos possível e os menores custos. Skaar (1972) considera uma variação de 28% a 32% para a umidade no ponto de saturação das fibras e valor médio de 30%.

#### 2.3.1.4 Permeabilidade

A permeabilidade se trata da medida da facilidade com que os fluidos, submetidos a influência de um gradiente de pressão, são transportados num sólido poroso (SIAU, 1971). Ainda de acordo com Siau (1971), para definir a permeabilidade da madeira deve-se levar em consideração três princípios básicos da Lei de Darcy:

- a) O movimento do líquido deve ser constante e sob pressão constante, ter duração prolongada;
- b) O movimento deve ser proporcional à pressão;
- c) A inversão da direção do fluxo não deve causar efeitos no movimento.

A permeabilidade influencia em variados processos para o uso comercial da madeira e é importante para impregnação, secagem, polpação, colagem etc. Uma madeira mais permeável, conseqüentemente, pode ser tratada ou seca com mais facilidade (TARMIAN; PERRÉ, 2009). Segundo Siau (1971), o fluxo da água no sentido longitudinal é mais proeminente, pois o diâmetro dos vasos são maiores comparados ao tamanho das pontuações. Segundo Rezende (2014), não apenas fatores internos à madeira afetam o fluxo e a permeabilidade, sendo o tipo de fluido utilizado no ensaio um fator relevante para analisar a permeabilidade do material.

Segundo Burger e Richter (1991) durante a formação de cerne, células são preenchidas com óleos, substâncias fenólicas alteram a cor dessa madeira e também a sua permeabilidade. A permeabilidade existe quando os espaços vazios estão conectados por aberturas, a madeira assume uma estrutura de célula fechada quando há obstrução ou depósito de extrativos, podendo apresentar fluxos muito baixos ou ausentes. (TARMIAN; PERRÉ, 2009).

Segundo Lepaege et al. (1986) o diâmetro dos vasos, sua frequência e distribuição; o tipo de pontuações, número e diâmetro das mesmas, afetam a permeabilidade da madeira. O mesmo autor afirma que vasos que apresentam formação de tilos, que são expansões de células parenquimáticas adjacentes, podem obstruir a passagem de fluidos tornando a madeira menos permeável. Segundo Burger e Richter (1991) A tilose reduz de forma significativa a permeabilidade da madeira com relação aos fluídos.

Existem diferenças entre a permeabilidade no cerne e no alburno. O cerne apresenta baixa ou nenhuma atividade condutora, pela presença de pontuações obstruídas, extrativos e pode apresentar tilos (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Silva et al. (2010) trabalhando com permeabilidade de *Eucalyptus grandis* encontrou resultados onde o fluxo no cerne apresentou-se 28 vezes inferior ao fluxo do alburno. Segundo Kollmann e Côté (1968) e Siau (1971), a medição da permeabilidade gasosa é mais simples quando comparada a líquidos, devido à eliminação de problemas associados com forças capilares.

Trabalhos que veem abordando sobre a ocorrência de colapso, geralmente se referem a qualidade de secagem da madeira de maneira geral, como Batista et al.(2015), Akbari et. al (2015), Ananías et al. (2014). Diante dos temas sob investigação a cerca do defeito colapso na secagem de madeiras, apresentados nesta revisão, fica evidenciada a importância de realizar trabalhos sobre o colapso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI A., HILL R.J., VAN DE VEN T.G.M. An elastocapillary model of wood-fibre collapse. **Proc. R. Soc. A.** London. 471: 20150184. 2015.

ANANIAS, R. et al. Collapse of Eucalyptus nitens wood after drying depending on the radial location within the Stem. **Drying Technology**, New York, Vol.32(14), pp.1699-1705, Oct. 2014.

BARBOSA, C.G. et al. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones híbridos de *Eucalyptus spp.* **CERNE. LAVRAS.** v.11, n.1, p.40-48, jan/jun. 2005.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de clones de três espécies de eucalyptus sp. **Ciência Florestal.** vol.25, n.3, pp.711-719. 2015.

BURGER, L. M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da Madeira.** Nobel, p. 153, v.1, 1991.

CHAFE, S. C. The distribution and interrelationship of collapse, volumetric shrinkage, moisture content and density in trees of Eucalyptus regnans F. Muell. **Wood Science and Technology.** 19:329-345, 1985.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo: Nobel, 111 p. 1985.

HART, C. A. **The drying of wood.** Raleigh: North Carolina Agriculture Extension Service. 1966. 24 p.

KLITZKE, R.J. Secagem da madeira. In: OLIVEIRA, J.T.S.; FIEDLER, N.C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro.** Jerônimo Monteiro: Suprema. p.271-342, 2007.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

LEPAGE, E. S. et al. **Manual de preservação de madeiras.** São Paulo, IPT. 2. Ed. 708p. 1986.

MIAO P. et al. Effect of the permeability of Eucalyptus urophylla × E.grandis wood on collapse in drying. **Journal of Nanjing Forestry University.** v.05, 2010.

MONTEIRO, T. C. **Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de Eucalyptus e Corymbia.** 2014. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 4 ed. New York: McGraw Hill, 1980. 722 p.

PERRÉ, P. Experimental device for the accurate determination of Wood-water relations on micro-samples. **Holzforshung.** Berlin, v.61, p. 419-429, 2007.

PLUMB, O A.; SPOLEK, A. e LMSTCAL, B. A. Heat and mass transfer in wood during drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Great Britain, Vol. 28, No. 9, pp. 1669-1678, 1985.

REZENDE, R. N. **Fluxo de ar e água nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii***. 2014. 98 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

REZENDE, R. N. et al. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**. Lavras. Vol.21(1), pp.37-43, 2015.

SANTINI, E. J.; TOMASELLI, I. **Colapso na madeira de algumas espécies brasileiras**. Série Técnica. Curitiba. n.3, p. 1-21, 1980.

SEVERO, E.T.D. QUALIDADE DA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA DE *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.1, p.109-124, 2000.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1971. 131 p.

SILVA, J. C. et al. Permeability measurements of brazilian *Eucalyptus*. **Materials Research**. Pittsburgh. v. 13, n. 3, p. 281-286. 2010.

SOARES, T.S.; CARVALHO, R.M.M.A.; VALE, A.B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, v.27, n.5, p.689-694, 2003.

TIEMANN, H. D. Collapse in wood as shown by the microscope. **Journal of forestry**, v. 39, n 3, pg 271–282, 1941.

TARMIAN, A.; PERRÉ, P. Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. **Holzforschung**. v.63, n.3, pg.352-356 · May 2009.

YANG, L. et al. The Study on Cell Collapse and Recovery of *Eucalyptus urophylla* during Drying. **Bioresources**, Carolina do Norte. Vol.9(2), pp.2584-2592, 2014a.

YANG, L. et al. Effect of Drying Conditions on the Collapse-prone Wood of *Eucalyptus urophylla*. **Bioresources**, Carolina do Norte. Vol.9(4), pp.7288-7298, 2014b.

**CAPÍTULO II: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E ANATÔMICA DA MADEIRA DE**  
***Eucalyptus grandis* ASSOCIADAS À OCORRÊNCIA DE COLAPSO**

## RESUMO

A secagem da madeira é uma etapa de destaque no processo de obtenção de produtos madeireiros, porém essa etapa necessita de uma atenção especial e a utilização de técnicas corretas em condições adequadas que possam minimizar os defeitos oriundos da saída de água da madeira e as tensões que se formam neste processo. O colapso é um defeito causado por tensões capilares no decorrer da saída de água livre da madeira, é um dos defeitos que ocorrem com frequência, e prejudica a qualidade da madeira. Esse defeito acontece geralmente em madeira pouco permeável e está associado à composição anatômica, longos períodos de secagem, alta tensão superficial do líquido obstrução por extrativos e porosidade da madeira. O objetivo deste trabalho foi realizar a avaliação do índice de colapso em *Eucalyptus grandis*, bem como identificar a correlação de propriedades físicas e anatômicas com o colapso. Para este trabalho duas árvores foram abatidas e desdobradas para utilização do pranchão central, deste obtidas as tábuas, das quais foram retiradas amostras para caracterização anatômica, densidade da madeira e secagem, as amostras para secagem foram induzidos ao colapso através de secagem drástica a 100° C. Foram realizadas análises de regressão linear para as características anatômicas individualmente, num delineamento inteiramente casualizado. Obtidas as densidades e calculado índice de colapso. Posteriormente, cada uma das características avaliadas foi correlacionada com o índice de colapso utilizando correlação linear de Pearson. As características anatômicas apresentaram valores dentro de intervalos característicos da espécie. Comprimento de fibra e espessura de parede apresentaram tendência crescente da medula à casca. O índice de colapso foi considerado forte para as árvores estudadas e apresentou fraca correlação com densidade básica, largura da fibra e comprimento de vaso.

**Palavras-chave:** Secagem. Defeito de secagem. Permeabilidade.

## ABSTRACT

Wood drying is a prominent step in the process of obtaining wood products, but it requires special attention and the use of correct techniques, in suitable conditions, that can minimize the defects coming from water exit of wood and tensions that are formed in this process. Collapse is a defect caused by capillary stresses during the exit of free water from wood, been one of the defects that occur frequently, damaging the quality of wood. This defect generally occurs in low permeability wood and it is related with anatomical composition, long periods of drying, high surface tension of the liquid, extractive obstruction and wood porosity. The objective of this paper was to perform a collapse index evaluation, as well as to identify the correlation of physical and anatomical properties with collapse. For this study, two trees were harvested and sawn for use of the central plank, from which the planks were obtained, in which specimens were sampled for anatomical characterization, wood density and drying process. The samples used for the drying process were induced to collapse by drastic drying at 100° C. Linear regression analyzes were performed for the anatomical characteristics individually, in a completely randomized design. Obtained the densities and calculated collapse index. Subsequently, each of the evaluated characteristics was correlated with the collapse index using Pearson's linear correlation. The anatomical characteristics are within characteristic intervals of the species. Fiber length and wall thickness presented the increasing tendency of marrow to bark. The collapse index was considered important for the children studied and was introduced with the basic measurement, fiber width and vessel length.

**Keywords:** Drying. Drying defect. Permeability.

## 1. INTRODUÇÃO

As folhosas apresentam constituição anatômica ou microestrutura, heterogênea e complexa, sendo necessário estudar e levar em consideração cada característica individual entre as espécies, dentro da mesma espécie e, inclusive, dentro de cada indivíduo.

É importante realizar a caracterização anatômica em trabalhos a cerca da secagem de madeiras, características como espessura de parede celular, frequência e diâmetro de vasos, presença de tilos e obstruções, podem influenciar no desempenho da secagem. Monteiro (2014) estudou a influência da anatomia no fluxo de água, encontrou efeito positivo do comprimento e diâmetro de vaso em relação ao fluxo de água livre. Comprimento de fibra apresentou relação diretamente proporcional à saída da água livre e largura da fibra também apresentou correlação positiva, no mesmo trabalho, o diâmetro do lume não apresentou ajustes para a movimentação de água livre.

A densidade da madeira é um forte indicador de qualidade e está associada à proporção de vasos, às dimensões das células – tais como comprimento, largura e diâmetro de lume – e, principalmente, a espessura de parede das fibras, as quais são afetadas pelas condições externas (PANSHI; DE ZEEUW, 1980) Os mesmos autores afirmam que densidade básica apresenta aumento no sentido medula-casca. Cruz, Lima e Muniz (2003) trabalhando com madeiras do gênero *Eucalyptus* também relataram essa tendência crescente.

Segundo Chafe (1985) embora o colapso possa ocorrer no alburno e no cerne, geralmente, ele ocorre na madeira de cerne. A extensão do colapso em as árvores de *Eucalyptus regnans* se mostrou fortemente dependente do teor de umidade e da densidade básica e da inter-relação entre os dois, no trabalho deste mesmo autor.

A qualidade da secagem de uma madeira está associada a permeabilidade dela. Sendo mais difícil uma secagem de madeiras pouco permeáveis, que é o caso do *Eucalyptus grandis*. Galvão e Jankowsky (1985) afirmam que o cerne apresenta baixa ou nenhuma atividade condutora, pela presença de pontuações obstruídas, extrativos e pode apresentar tilos. Silva et al. (2010) trabalhando com permeabilidade de *Eucalyptus grandis* encontrou resultados em que o fluxo no cerne apresentou-se 28 vezes inferior ao fluxo do alburno.

Miao et al. (2010) mediu a permeabilidade ao gás da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, realizando testes em várias condições de secagem e foi analisado o efeito da permeabilidade sobre o colapso. Os resultados do teste identificaram mudança no comportamento do colapso na transição do alburno para o cerne e a permeabilidade do alburno foi maior do que a do cerne.



Acredita-se que o colapso é influenciado por fatores como a densidade da madeira, sua permeabilidade e composição anatômica. Definir tal correlação seria de grande auxílio para aprofundar o conhecimento sobre este defeito. O objetivo deste trabalho foi avaliar características físicas e anatômicas do *Eucalyptus grandis*, realizar avaliação da ocorrência de colapso em madeiras da espécie *E. grandis* e correlacionar propriedades físicas e anatômicas com o índice de colapso apresentado na secagem da madeira desta espécie.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção do material

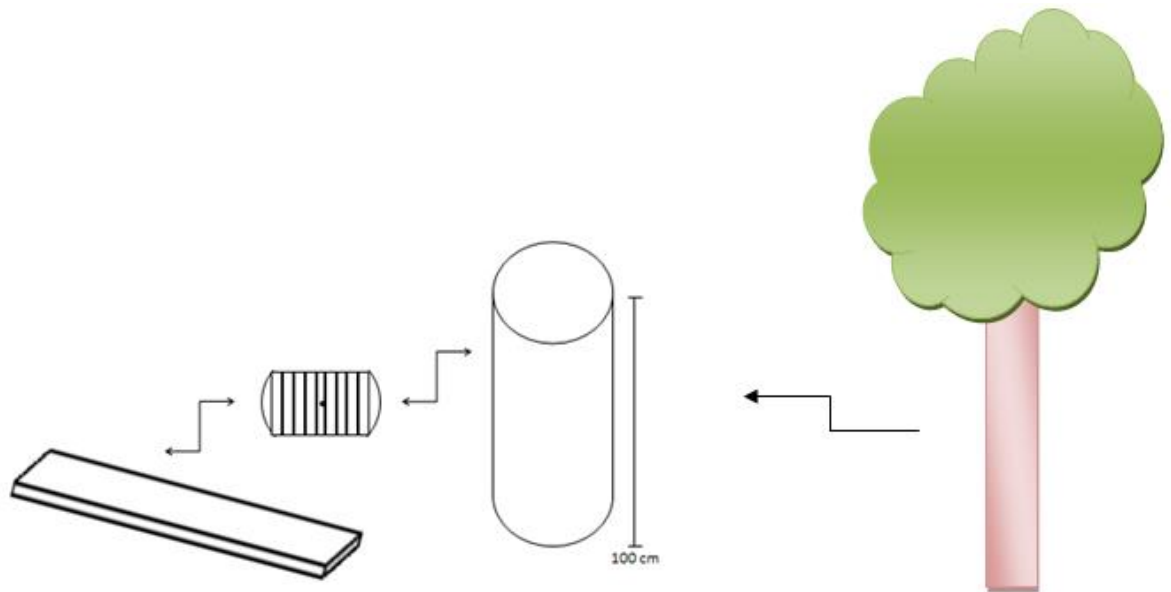
Para a realização do trabalho foram abatidas duas árvores de *Eucalyptus grandis* provenientes de plantio experimental pertencente à Universidade Federal de Lavras (UFLA), no espaçamento de 3,0 x 2,0 m, com idade de 22 anos. As árvores apresentavam diâmetro à altura de 1,30 m (DAP) de 32,48 cm e 44,90 cm e altura igual a 29,6 m e 34,5 m, respectivamente. De cada árvore retirou-se uma tora da base e uma a 3 metros de altura. Cada tora com 100 centímetros de comprimento. As toras foram enviadas à Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira, do Departamento de Ciências Florestais da UFLA, onde foram desdobradas para a obtenção do pranchão. O pranchão central das toras foi utilizado para obtenção de tábuas. A partir delas foram retirados os corpos-de-prova para as análises.

Tabela 1: Caracterização das árvores estudadas

Árvore	DAP (cm)	Altura (m)
1	32,48	29,6
2	44,9	34,5

DAP: Diâmetro a altura do peito ( 1,30 m)

Figura 2: Esquema de retirada das tábuas para obtenção das amostras



Da autora (2018)

## 2.2 Caracterização anatômica

As amostras foram saturadas, e posteriormente, no Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPA, com auxílio de estilete, foram retirados fragmentos da madeira para o preparo do macerado. Foram colocados em frascos de vidro e cobertos com solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio, na proporção de 1:1 (FRANKLIN, 1945). Os frascos lacrados foram colocados em estufa a 60°C por 12 horas para maceração. Após a completa maceração, foram realizadas 30 medições para cada característica anatômica de fibra, 20 medições para vasos. Os vasos foram quantificados quanto frequência (número/mm<sup>2</sup>), ao comprimento (µm) e ao diâmetro (µm). As características de fibras obtidas foram: comprimento das fibras (mm), largura da fibra (µm), diâmetro do lume (µm) e calculada a espessura da parede celular de acordo com a Equação 1. Para tais medições foi utilizado microscópio de luz polarizada.

$$EP = \frac{LF-DL}{2}$$

Equação 1

Em que:

EP = espessura da parede celular,  $\mu\text{m}$ ;

LF = largura da fibra,  $\mu\text{m}$ ;

DL = diâmetro do lume da fibra,  $\mu\text{m}$ .

Os mesmos corpos-de-prova utilizados para fornecer o material para o macerado foram utilizados para confecção das lâminas. Os cortes histológicos, obtidos com o auxílio de micrótomo, com aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . A partir das lâminas permanentes foram determinados o diâmetro e frequência dos vasos por milímetro quadrado.

A descrição microscópica das lâminas obedecerá às orientações propostas pela IAWA COMMITTEE (1989).

### 2.3 Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi feita de acordo com o método de imersão descrito na norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

### 2.4 Secagem drástica da madeira

Os corpos de prova para realização do ensaio de colapso foram confeccionados no Laboratório de Usinagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras. A dimensão dos corpos-de-prova destinados à secagem foi de 20,0 x 10,0 x 2,0 cm. As amostras foram condicionadas em estufa com circulação de ar constante e temperatura, controladas, observando as condições de funcionamento da estufa.

A secagem drástica consiste numa metodologia que associa a intensidade de defeitos, tempo e velocidade de secagem, em amostras de pequenas dimensões, ao comportamento de tábuas numa secagem convencional. (CINIGLIO, 1988; TEREZAWA, 1965). Brandão (1989) testou a viabilidade da utilização desta metodologia em pequenas amostras submetidas a 100° C e concluiu que a metodologia era eficiente para prever o comportamento da madeira, sujeitada a secagem convencional.

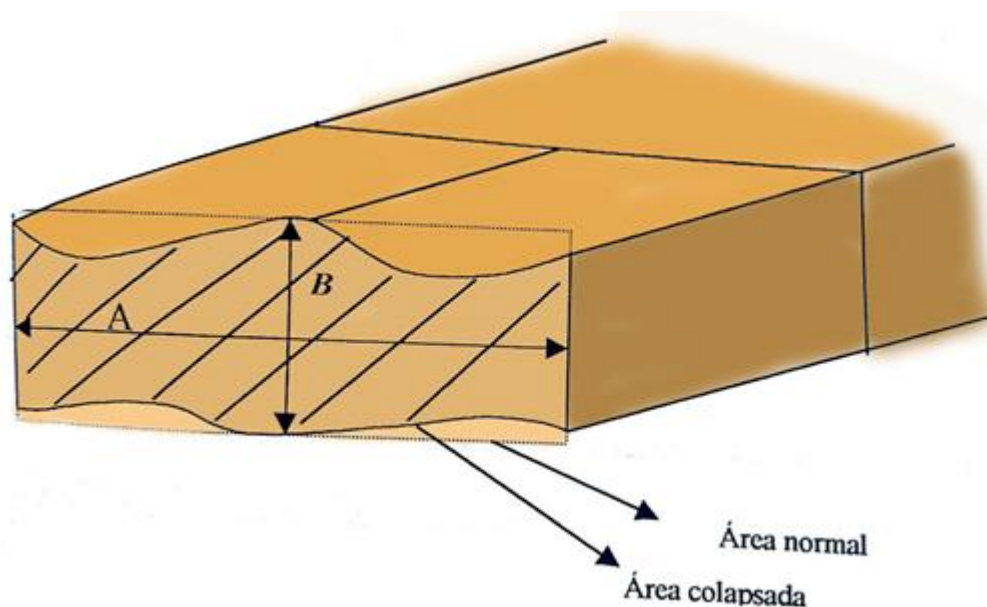
Tendo em vista a eficácia da secagem drástica para análise de defeitos oriundos da secagem, e sendo a proposta do trabalho avaliar o defeito de colapso na secagem do

*Eucalyptus grandis*, as amostras foram submetidas à temperatura de 100° C. O monitoramento da secagem foi realizado por meio de pesagens periódicas das amostras.

Para avaliação do colapso o monitoramento da saída de água livre foi realizado até a umidade de 30%, que foi considerada como a umidade no ponto de saturação das fibras (PSF). Skaar (1972) considera uma variação de 28% a 32% para o PSF e valor médio de 30%.

O índice de colapso representa o quanto a área colapsada se aproxima da área normal do corpo de prova, sendo que, quanto mais próximo os valores, menor é a deformação na madeira, ocasionada pelo colapso. Para avaliação do colapso, foi realizado o dimensionamento da área dos topos das amostras a cada trinta minutos, a área foi mensurada através de análise de imagem com auxílio do software Image J. A área do topo colapsada foi digitalizada individualmente e utilizada a média, a área de topo normal foi obtida através do produto das dimensões de largura e espessura dos corpos de prova, após o cálculo de área ser realizado, utilizou-se a metodologia de acordo com Barbosa (2003) para calcular o Índice de colapso (Equação 4).

Figura 3: Esquema representativo da forma de avaliação do colapso.



$$IC = \frac{AC}{AN}$$

Equação 2

Em que:

IC = Índice de Colapso, adimensional;

AC = Área do corpo de prova com colapso, cm<sup>2</sup>;

AN = A x B = Área normal do corpo de prova, cm<sup>2</sup>.

Considerou-se colapso leve para índices acima de 0,95; colapso médio para índices entre 0,90 e 0,95 e colapso forte para índices menores que 0,90.

### **3. ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Realizou-se análise de regressão para as características em função da posição radial de amostragem para tora de cada árvore. As regressões foram feitas em cada tora e de cada lado da medula de maneira independente, num delineamento inteiramente casualizado, também foram realizadas análise de variância.

Para a verificação das relações entre as propriedades físicas e anatômicas com o índice de colapso, uma análise de correlação linear de Pearson foi realizada. A classificação do coeficiente de correlação (r) baseou-se no critério de Callegari- Jacques (2003) que considera, em módulo, as seguintes condições: fraca correlação (baixa) para  $0 < r < 0,30$ ; moderada correlação para  $0,30 \leq r < 0,60$ ; correlação alta (forte) para  $0,60 \leq r < 0,9$ ; correlação muito forte para  $r \geq 0,90$  e correlação perfeita para  $r = 1,00$ .

Para as análises foi utilizado o programa R versão 3.3.2, pacotes agricolae e Hmisc.

### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **4.1 Caracterização anatômica**

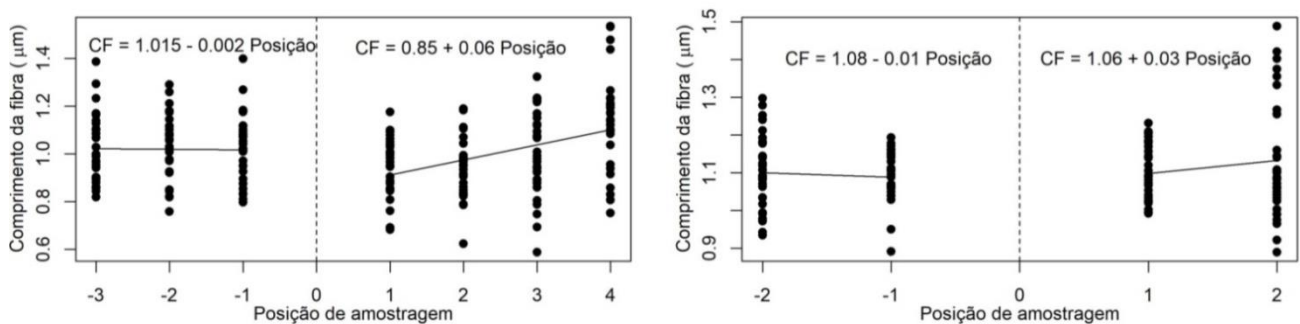
A caracterização anatômica foi realizada para cada árvore, tora e lado da medula, por meio de análise de regressão linear, estão representados nos gráficos os resultados, sendo que o ponto zero de cada gráfico simboliza a medula, e a tendência exposta no gráfico representa o sentido medula-casca.

##### **4.1.2 Comprimento de fibra**

A árvore A apresentou valores entre 0,947 mm e 1,132 mm para comprimento de fibra. Os maiores valores de comprimento de fibra foram encontrados a 3 m de altura para esta árvore (Figura 4).

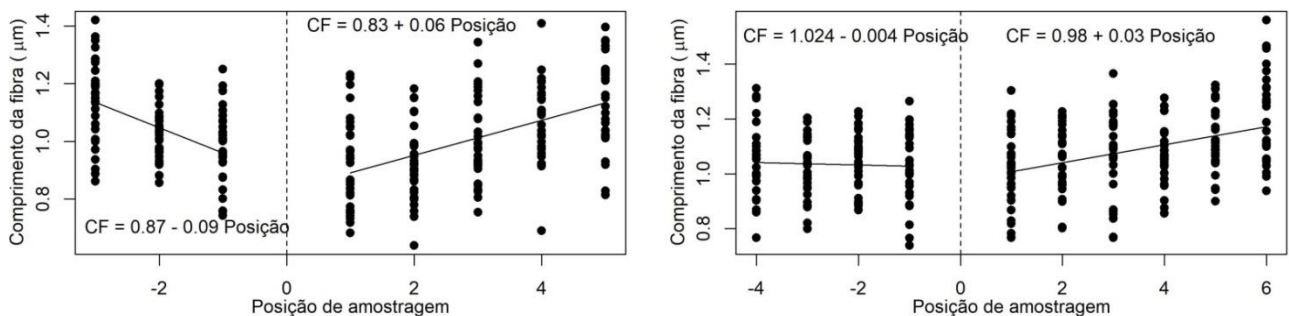
O comprimento mínimo e máximo encontrados na árvore B foram 0,917 mm e 1,197 mm, respectivamente. A figura 5 apresenta a tendência das médias encontradas para esta árvore. Apresentaram uma tendência crescente do comprimento das fibras no sentido medula-casca. Silva et al. (2007) avaliando a influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis*, perceberam que as características anatômicas avaliadas mostraram-se positivamente correlacionados com a posição radial no sentido medula-casca. Ramos (2011) encontrou valores de comprimento de fibras e espessura de parede menores na região próxima a medula, que aumentaram na direção da casca. Cruz (2000) e Silva et al. (2005) também encontraram variação com tendência crescente para comprimento de fibras e espessura de parede, da medula para a casca. Esse resultado está de acordo com os resultados encontrados por Cruz (2000), Silva et al. (2005) e Ramos et al. (2011).

Figura 4: Variação radial do comprimento de fibra na árvore A, a esquerda tora da base, a direita tora a 3 m.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 5: Variação radial de comprimento de fibra na árvore B.



Fonte: Da autora (2018)

Segundo Tomazello Filho (1985) *Eucalyptus grandis* apresentam fibras libriformes e fibrotraqueídeos; com comprimento predominante de fibras curtas variando de 0,89 a 1,52 mm; quanto a largura, são estreitas, variando de 17,0 a 33,5  $\mu\text{m}$ ; espessura de parede média variando de 5,0 a 6,0  $\mu\text{m}$ ; e diâmetro do lúmen variando de 7,0 a 23,5  $\mu\text{m}$ . Alzate (2004) ao avaliar o clone de *Eucalyptus grandis* com idade de 8 anos, relatou que a média do comprimento das fibras analisadas foi de 1.030,00  $\mu\text{m}$ . Belini et al. (2008) caracterizou o *Eucalyptus grandis* com os seguintes valores médios de estruturas anatômicas; comprimento de fibra 1005,3  $\mu\text{m}$ , largura de fibra 19,76  $\mu\text{m}$ , diâmetro de lume 11,88  $\mu\text{m}$  e espessura de parede de 3,94  $\mu\text{m}$ . Frequência de vasos média 11,8  $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$  e diâmetro de vaso, 105,4  $\mu\text{m}$ .

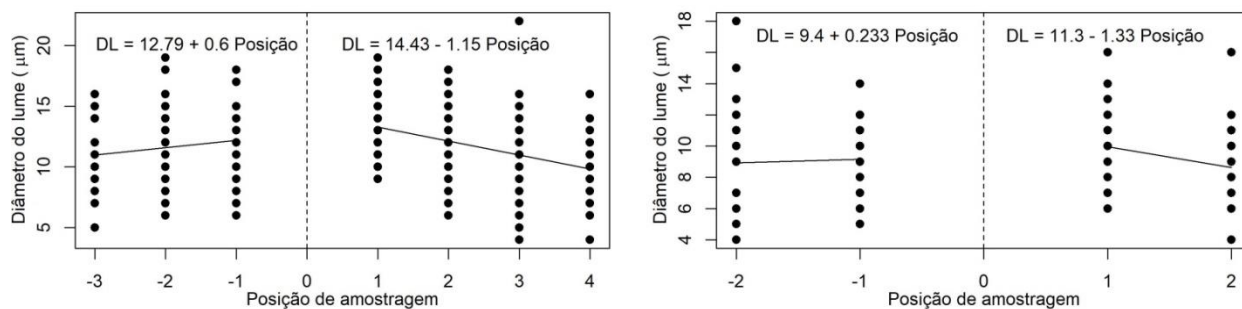
Os valores obtidos neste trabalho estão de acordo com aqueles encontrados por Alzate (2004) e estão dentro do intervalo caracterizado por Tomazello Filho (1985). Outros autores, como Barrichelo e Brito (1976), ao analisarem as características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis* com idade de 5 anos, relataram o comprimento de fibras com média de 1.030,00  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.3 Diâmetro de lume

Os valores observados para a característica diâmetro do lume na árvore A foram 8,63  $\mu\text{m}$  e 13,10  $\mu\text{m}$ , valor mínimo e máximo, respectivamente (Figura 6). A árvore B apresentou valores médios de diâmetro de lume entre 7,73  $\mu\text{m}$  e 12,27  $\mu\text{m}$ , o que está apresentado na Figura 7.

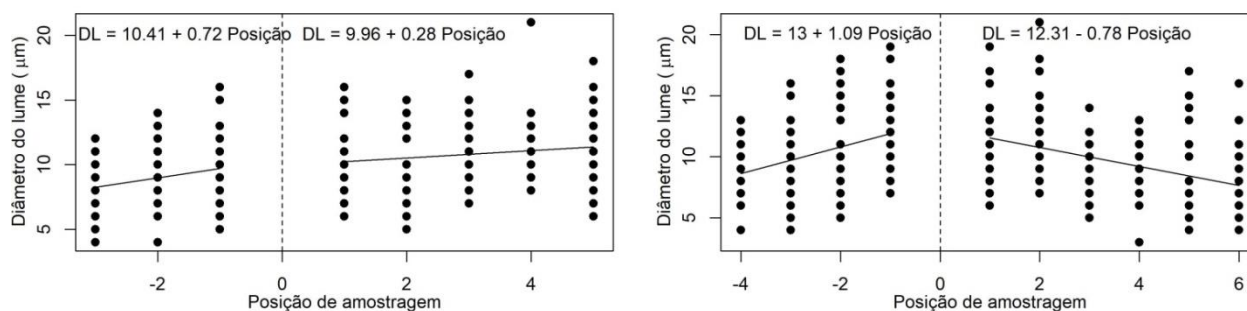
Os valores obtidos estão de acordo com o intervalo apresentado por Tomazello Filho (1985), e em torno da média apresentada por Belini et al. (2008). Barrichelo e Brito (1976) obtiveram valores de diâmetro de lume de 9,58; 12,20; e 10,30  $\mu\text{m}$ , respectivamente, nas madeiras de *Eucalyptus grandis* entre 8-10 anos.

Figura 6: Variação radial de diâmetro de lume na árvore A.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 7: Variação radial de diâmetro de lume na árvore B.



Fonte: Da autora (2018)

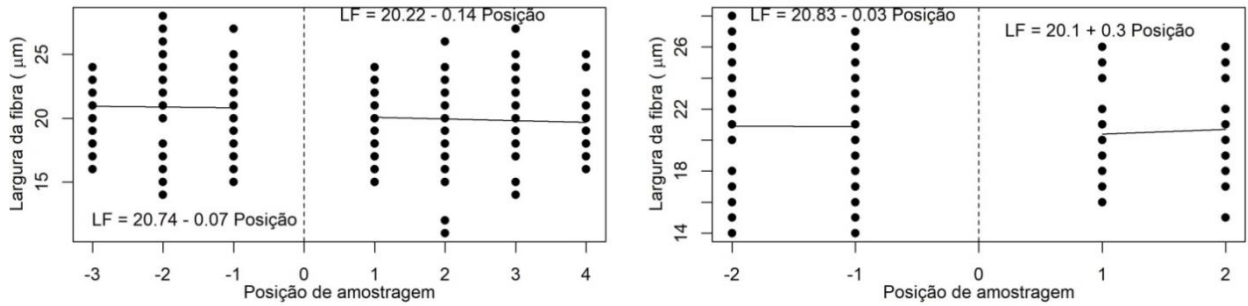
#### 4.1.4 Largura de fibra

A largura de fibra não apresentou diferença significativa entre suas posições. Os valores médios obtidos para largura de fibra foram de 19,43 a 20,93  $\mu\text{m}$  para a árvore A e 18,30 a 21,20  $\mu\text{m}$  Arvore B. Pode-se observar na Figura 8 que a árvore um não apresentou variação radial nesta característica. Já a árvore B, mostrou uma leve tendência crescente da medula à casca (Figura 9).

Os valores estão dentro do intervalo apresentado por Tomazello Filho (1985) e próximos aos dados médios obtidos por Belini (2008) na caracterização de *Eucalyptus grandis*. Alzate (2004) também encontrou valores de largura de fibras de 20,99  $\mu\text{m}$  e Barrichelo e Brito (1976) apresentaram valor de 20,50  $\mu\text{m}$  para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

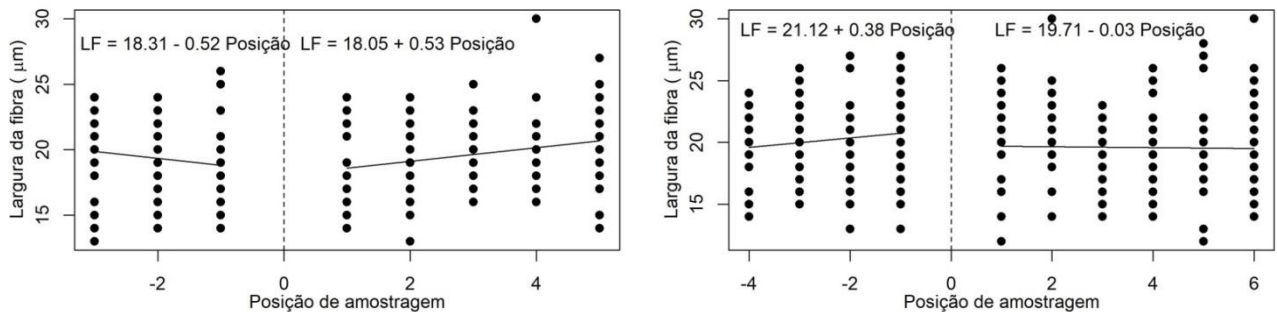


Figura 8: Variação radial de largura de fibra na árvore A.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 9: Variação radial de Largura de fibra na árvore B.

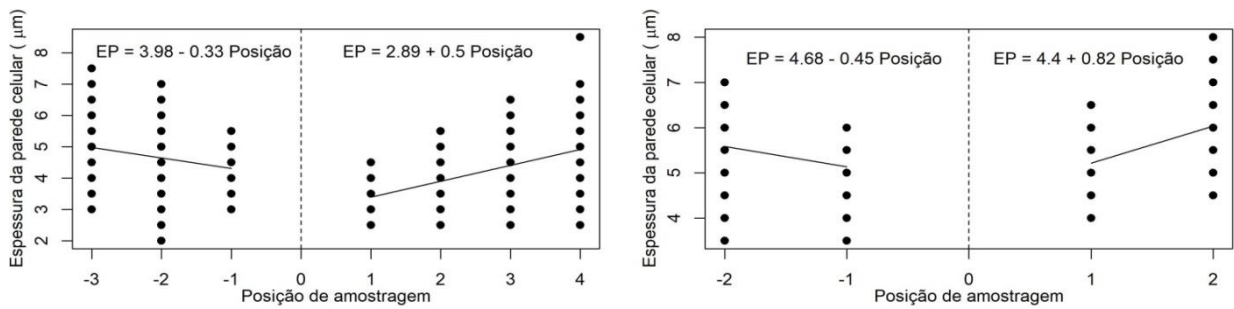


Fonte: Da autora (2018)

#### 4.1.5 Espessura de Parede celular

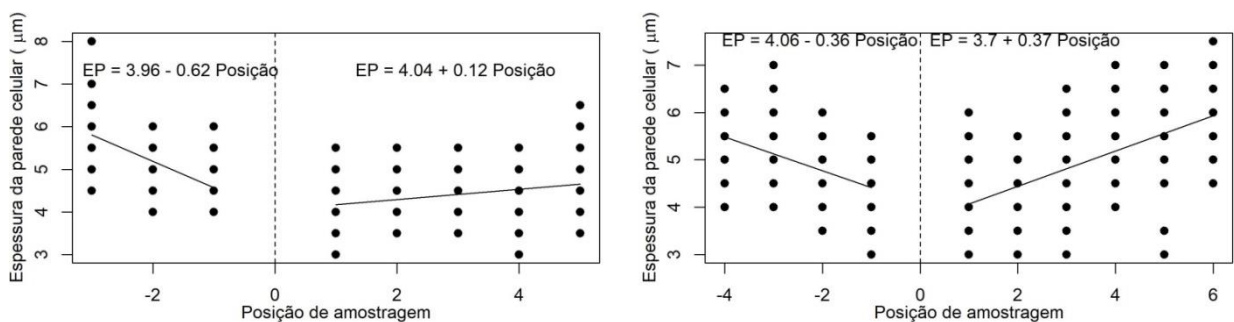
Os valores médios encontrados para a árvore A foram de 3,60 a 6,03 µm (Figura 10). Para árvore B observou-se um intervalo de 4,20 a 5,98 µm (Figura 11). Os valores médios inferiores encontrados neste trabalho estão abaixo do caracterizado por Tomazello Filho (1985), mas estão de acordo com os valores médios encontrados por Belini (2008). As médias superiores encontradas neste trabalho estão de acordo com os valores apresentados por Tomazello Filho (1985).

Figura 10: Variação radial da espessura de parede na árvore A.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 11: Variação radial de espessura de parede na árvore B.



Fonte: Da autora (2018)

Os dados de espessura de parede deste trabalho apresentam, de maneira geral, variação crescente da medula para a casca. Esses resultados estão em conformidade com Cruz (2000), Silva et al. (2005) e Ramos (2011).

#### 4.1.6 Comprimento e diâmetro de vasos

A árvore A apresentou diâmetro de vaso médio de 173,9  $\mu\text{m}$  enquanto a árvore B 191,05  $\mu\text{m}$ . Valores maiores que aqueles encontrados no trabalho de Belini et al. (2008) que encontraram diâmetro de vaso, 105,4  $\mu\text{m}$ . Para *Eucalyptus grandis*. O comprimento de vaso médio da árvore A foi de 429,84  $\mu\text{m}$ , já para árvore B 440,71  $\mu\text{m}$ , menores que os valores apresentados por Rocha et al. (2004) que encontraram comprimento de vasos com entre 569,07 e 604,99 em variação radial, para *Eucalyptus grandis* aos 7 anos.

#### 4.2 Densidade

As médias de densidade básica apresentadas por árvore foi de 0,510 g/cm<sup>3</sup> para a árvore A e 0,546 g/cm<sup>3</sup> para a árvore B. Houve tendência crescente no sentido medula-casca, assim como foi relatado por Panshin & de Zeeuw (1980) e por Cruz, Lima e Muniz (2003).

As densidades encontradas estão coerentes com a literatura, embora os valores encontrados para a densidade básica foram menores que os obtidos por Ciniglio (1998), para madeira de *E. grandis* com idade de 18 anos cuja densidade foi de 0,570 g/cm<sup>3</sup>. Rezende (2014) encontrou densidade de *Eucalyptus grandis* de 0,590 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3 Secagem Drástica

#### 4.3.2 Índice de colapso

O índice de colapso médio apresentado pela árvore A foi de 0,79. A árvore B apresentou um índice médio de 0,81, ambos considerados colapso forte de acordo com a classificação de Barbosa (2003).

Barbosa (2003) encontrou índice de colapso classificado como forte para *Eucalyptus grandis* e Rezende (2014) trabalhando com *E. grandis* e *E. dunnii* encontrou índice de colapso de 0,85 para *Eucalyptus grandis* e 0,81 para *E. dunnii*.

#### 4.3.3 Correlação do índice de colapso com características analisadas

Segundo o critério de Callegari- Jacques (2003) o índice de colapso apresentou uma fraca correlação linear com a densidade da madeira, embora tenha apresentado uma correlação positiva (Tabela 2). O comportamento foi semelhante para comprimento de vaso ( $\mu\text{m}$ ), ambos apresentaram  $r = 0,15$  (Tabela 2). A largura de fibra também apresentou fraca correlação com o índice de colapso,  $r = -0,006$ .

Os resultados para espessura de parede, comprimento de fibra e diâmetro de lume se encaixam como moderada correlação, pois apresentaram valores de  $r = 0,43$ ,  $0,33$  e  $-0,44$ , respectivamente (Tabela 2).

Uma das causas para a o diâmetro de lume ser a característica que apresentou maior correlação com o índice de colapso, pode ser a localização da água livre, que se encontra nos

espaços porosos e no interior do lume, durante a secagem, forças são exercidas para a retirada desta água e a partir dessa tensão gera o colapso. Segundo Yang et al., 2014b, A secagem promove uma alta tensão hidrostática no lume da célula e, é quando esta tensão excede o limite de proporcionalidade em contração perpendicular, ocorre uma contração abrupta nas paredes celulares.

Os resultados para comprimento de fibra estão de acordo com a relação diretamente proporcional encontrada por Monteiro (2014), já os resultados para diâmetro de lume diferiram, assim como, para comprimento de vasos.

Tabela 2: Correlação do índice de colapso e características anatômicas e física.

Correlações	
Características	Colapso
Diâmetro do lume	-0.44
Espessura de Parede	0.43
Comprimento de fibra	0.33
Densidade básica	0.15
Comprimento de vaso	0.15
Largura de fibras	-0.006

Fonte: Da autora (2018)

O índice de colapso apresentou fracas correlações com densidade básica, largura da fibra e comprimento de vaso, podendo concluir que essas características possuem pouca influência na ocorrência de colapso na madeira de *Eucalyptus grandis*. Diferente do que foi observado neste trabalho, Chafe (1985) afirma que o colapso se relacionou significativamente com a densidade básica numa correlação negativa.

## 5. CONCLUSÃO

As características anatômicas apresentaram valores dentro de intervalos característicos da espécie, presentes na literatura, sendo observada uma tendência crescente da medula à casca, para comprimento de fibra e espessura de parede.

O índice de colapso foi considerado forte para as duas árvores estudadas e apresentou fraca correlação com densidade básica, largura da fibra e comprimento de vaso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. Saligna* e *E. Grandis x urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BARAÚNA, E. E. P. **Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**. 2010. 69 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- BARBOSA, C. G. **Incidência dos defeitos de secagem como índice de qualidade e de seleção genética para madeira de *Eucalyptus***. 2003. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- BARBOSA, C.G. et al. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones híbridos de *Eucalyptus spp.* **Cerne**, Lavras, v.11,n.1, p.40-48, jan/jun. 2005.
- BARRICHELO, L.E.G. & BRITO, J.O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel. Brasília/DF, PRODEPEF, 1976. 145p. (Série de Divulgação nº 13).
- BARAÚNA, E. E. P. **Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**. 2010. 69p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- BELINI, U.L. et al. Caracterização da estrutura anatômica, densidad básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção da painéis mdf. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.32, n.4, p. 707-713, jul/ago. 2008.
- BRANDÃO, A.T. de O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100p. Dissertação ( Mestrado em Ciências Florestais) – Escola superior de agricultura “ Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H.G., **Anatomia da Madeira**. Nobel, p. 153, v.1, 1991.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.
- CHAFE, S. C. The distribution and interrelationship of collapse, volumetric shrinkage, moisture content and density in trees of *Eucalyptus regnans* F. Muell. **Wood Science and Technology** 19:329-345, 1985.
- CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de e. *Grandis* e e. *Urophylla***. Piracicaba, 1998. 69p. Tese (mestrado) - escola superior de agricultura luiz de queiroz, universidade de São Paulo, 1998.

CRUZ, C. R. **Caracterização da madeira de clones de Eucalyptus para a utilização na indústria madeireira**. 2000. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

CRUZ, C.R; LIMA, J.T; MUNIZ, G.I.B. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2003.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

MIAO P. et al. Effect of the permeability of *Eucalyptus urophylla* × *E.grandis* wood on collapse in drying. **Journal of Nanjing Forestry University**, v.05, n. 5, p. 83-86, 2010.

MONTEIRO, T. C. **Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de Eucalyptus e Corymbia**. 2014. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed. New York: McGraw Hill, 1980. 722 p.

RAMOS, L. M. A. et al. 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**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 411-418, dez. 2011.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M.; DE RAMOS E PAULA, L. E. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de eucalyptus grandis. **Cerne**, Lavras, Vol.21(1), pp.37-43, 2015.

ROCHA, F. T.; FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. do. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**. São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jun. 2004.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1971. 131 p.

SILVA, J.R.M. et al. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.479-487, 2005.

SILVA, R. M. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, M. R. et al. Permeability measurements of brazilian eucalyptus. **Materials Research**, v. 13, n. 3, p. 281-286, 2010.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.

TARMIAN, A.; PERRÉ, P. Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. **Holzforschung**, vol.63 n.3 pg.352-356 · May 2009.

TEREZAWA, S. Methods for easy determination of kiln dryings schedules of wood. **Wood Industry**, Croatia, v. 20, n. 5, p. 1-8, 1965.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. **IPEF**, ESALQ-USP Departamento de silvicultura, n.30 p. 45-54 ago. 1985.

**CAPÍTULO III: MODELAGEM DE COLAPSO EM MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis***



## RESUMO

O colapso é ocasionado por forças geradas durante a movimentação da água livre na madeira. Tensões que se formam na saída de água deformam as células. É um defeito que ocorre com alta frequência e reduz a qualidade da madeira. Por tanto é necessário investir em pesquisas a cerca deste problema. O objetivo deste trabalho foi modelar o colapso para madeira de *Eucalyptus grandis*. Foram utilizadas duas árvores, retiradas amostras de posições radiais e longitudinais em cada árvore. A dimensão dos corpos-de-prova foi de 20,0 x 10,0 x 2,0 cm. As amostras foram submetidas a secagem drástica. A secagem foi monitorada com pesagens a cada 30 min., também nestes intervalos, foram obtidas imagens, até o ponto de saturação das fibras. As avaliações das imagens foram realizadas com auxílio do software Image J. Para analisar os dados deste trabalho optou-se por um modelo logístico. Os ajustes e aplicação do modelo foram realizados utilizando o software R. A partir de um modelo com quatro parâmetros, foi possível estimar a perda de área por colapso e o ponto crítico de deformação para cada posição. As amostras que apresentaram maiores deformações em decorrência de colapso foram aquelas mais próximas da medula das árvores. O ponto crítico de colapso na madeira do *Eucalyptus grandis* foi aos 225 minutos, apontando para o cuidado que deve existir nas primeiras horas da secagem para esta espécie. Por se tratar de um problema recorrente durante a secagem, este modelo é uma ferramenta que poderá auxiliar empresas e outros estudos na busca de reduzir tais danos. Entretanto, estudos complementares sobre a anatomia e resistência a tensões de secagem na região de medula mostram-se relevantes para uma abordagem mais profunda.

**Palavras chave:** Água livre. Secagem. Defeito de secagem.

## ABSTRACT

The collapse is caused by forces generated during the movement of the free water in the wood. Tensions that form at the outlet of water deform the cells. It is a defect that occurs with high frequency and reduces the quality of the wood. Therefore it is necessary to invest in research about this problem. The objective of this work was to model the collapse of *Eucalyptus grandis* wood. Two trees were used; samples were taken of radial and longitudinal positions in each tree. The size of the specimens was 20.0 x 10.0 x 2.0 cm. The samples were subjected to drastic drying. Drying was monitored with weighing every 30 min., Also at these intervals, images were obtained up to the saturation point of the fibers. The image evaluations were performed with the help of the Image J. software. To analyze the data of this work, a logistic model was chosen. The adjustments and application of the model were performed using software R. From a model with four parameters, it was possible to estimate the loss of area by collapse and the critical point of deformation for each position. The samples that presented greater deformations due to collapse were those closer to the marrow of the trees. The critical point of collapse in the wood of *Eucalyptus grandis* was at 225 minutes, pointing to the care that must exist in the first hours of drying for this species. Because it is a recurring problem during drying, this model is a tool that can help companies and other studies in the quest to reduce such damages. However, complementary studies on anatomy and resistance to drying stresses in the bone marrow region are relevant for a deeper approach.

**Keywords:** Free water. Drying. Drying defect.

## 1. INTRODUÇÃO

O colapso ocorre com intensidades diferentes em cada espécie, por tanto, a taxa de colapso e a tendência da curva de colapso pode variar entre elas, para a obtenção de previsões precisas, deve-se estudar cada espécie de interesse separadamente.

A umidade é um fator fundamental durante a secagem, visa retirar a água da madeira, conduzindo-a da umidade atual à umidade desejada. Skaar (1972) considera que há relação entre o fluxo de umidade na madeira e a temperatura, e, com a elevação da temperatura, maiores são a agitação molecular e a evaporação da umidade superficial. Monteiro (2014), trabalhando com taxas de secagem, encontrou uma relação entre taxa de fluxo de água livre e Taxa de fluxo de água de adsorção de 8,2 vezes maior na saída de água livre.

Barbosa et al. (2005) estudaram 10 clones de *Eucalyptus* e obtiveram taxa de secagem média de 0,0337 g/cm<sup>2</sup>.h para as condições de verde a 30%. Klitzke e Batista (2010) trabalhando com diferentes espécies de *Eucalyptus*, concluiu que a taxa de *Eucalyptus saligna* na fase capilar foi superior ao *Eucalyptus grandis*, com 0,0332 g/cm<sup>2</sup>.h contra 0,0313 g/cm<sup>2</sup>.h.

A modelagem na ciência e tecnologia da madeira é uma importante área de estudo, pois garante representar diferentes relações de interesse e a aplicação de modelos abrange as diversas linhas de pesquisa. Bouriaud (2003) utilizou um modelo linear com efeitos mistos para análise da densidade da madeira, levando em consideração a variabilidade entre os componentes dentro da árvore e entre árvores, este modelo também foi utilizado para análises de cronologia de anéis por Ryan et al. (1993). Bufalino et al. (2012) utilizando modelos lineares simples entre a razão de compactação e as propriedades físicas e mecânicas em painéis aglomerados de cedro australiano, concluíram que 86% da variabilidade do módulo de ruptura foi explicada pela razão de compactação.

Os modelos utilizados para representar relações, buscando estimar com precisão as variáveis de interesse, são obtidos, normalmente, por técnicas de regressão. Ao analisar a tendência dos dados, pode-se escolher uma relação funcional que os represente, para melhorar a precisão dos modelos, novas variáveis podem ser adicionadas.

Diante da grande demanda do mercado e as possibilidades de aplicação da madeira em diversos processos do setor florestal, é fundamental conhecer e aprimorar técnicas de secagem da madeira de *E. grandis*. O estudo das taxas de saída de água, do colapso e a modelagem deste, é importante para aprofundar o conhecimento a cerca da ocorrência desse defeito e tentar prever da melhor forma possível o seu comportamento para essa espécie, desta forma, o objetivo deste trabalho será calcular as taxas referentes a saída de água e de

colapso, traçar as curvas de colapso, volume e umidade desta madeira em função do tempo, e modelar o colapso para madeira de *Eucalyptus grandis*.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Coleta de dados

As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas partir de tábuas do pranchão central de duas árvores de *Eucalyptus grandis*, provenientes de plantio experimental pertencente à Universidade Federal de Lavras (UFLA), no espaçamento de 3,0 x 2,0 m, com idade de 22 anos. A dimensão dos corpos-de-prova destinados à secagem foi de 20,0 x 10,0 x 2,0 cm. As amostras foram condicionadas em estufa com circulação de ar constante e temperatura controlada a 100°C. A secagem foi monitorada com pesagens a cada 30 min., também nestes intervalos, foram obtidas imagens dos topos das amostras para acompanhar o desempenho da secagem desta madeira, até o ponto de saturação das fibras.

### 2.2 Umidade

A umidade de cada corpo de prova foi determinada conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) no laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira na UFLA. Para obtenção dos dados para curva de umidade foi utilizada a Equação 3, utilizando a massa úmida obtida a cada 30 minutos de secagem na estufa :

$$U = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

U= Umidade (%);

Mu = Massa úmida (g);

Ms= Massa seca (g).

### 2.3 Volume

Para a determinação do volume, foi utilizada a área média, para cada corpo de prova, obtida através de análise de imagem no software Image J, multiplicada pelo comprimento do corpo de prova (Equação 4).

$$V = A_c * \text{comprimento} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

V= volume, cm<sup>3</sup>;

A<sub>c</sub>= área colapsada, cm<sup>2</sup>;

Comprimento da amostra, cm.

### 2.4 Taxa de colapso e determinação da curva de colapso

Para determinação da curva de colapso, foi calculada a taxa de colapso a cada 30 min. por meio da Equação 5:

$$T_c = \frac{\delta \text{Área}}{\delta t} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

T<sub>c</sub>= taxa de colapso (cm<sup>2</sup>/min);

δ Área= Variação de área antes e após secagem (cm<sup>2</sup>);

δt= Variação de tempo (min) em que ocorreu δ Área.

A perda de massa também foi acompanhada por pesagens periódicas até que o teor de umidade se encontrasse próximo ao ponto de saturação das fibras (PSF – aproximadamente 30% de umidade). As amostras foram saturadas e levadas a estufa, desta forma foi possível calcular também a taxa de saída de água livre (g/cm<sup>2</sup>.min), da umidade inicial até o PSF. Para este cálculo, será utilizada a Equação 6:

$$T_s = \frac{\delta \text{Mágua}}{\delta t} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

Ts= taxa de saída de água livre (g/min);

$\delta$  mágua = Variação da massa de água (g);

$\delta t$ = variação de tempo (min) em que ocorreu  $\delta$  mágua.

### **3. ANÁLISES ESTATÍSTICA**

Neste trabalho foi utilizado um delineamento em blocos casualizados com parcelas subdividida no tempo. Cada árvore foi considerada um bloco, cada tora uma parcela e dividida em dois lados e subdividida no tempo, sendo avaliadas de zero a 750 minutos.

Para esta análise foram utilizadas as médias por tempo, e feito teste de médias para observar a significância entre os tratamentos. A partir das médias obtidas, no tempo, foi traçado o comportamento da secagem de água livre para esta espécie. Para as análises foi utilizado o programa R versão 3.3.2, pacotes agricolae e Hmisc.

### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

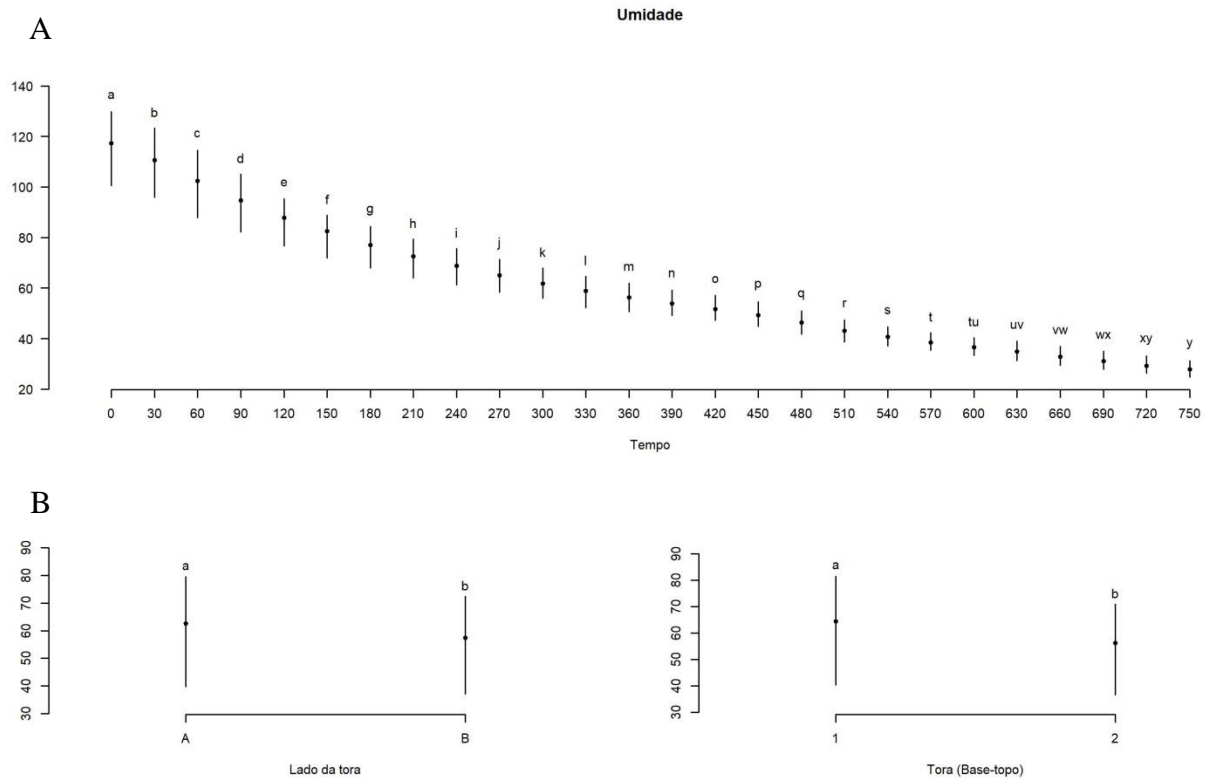
#### **4.1 Umidade**

A umidade reduziu diferindo estatisticamente até o 570' de secagem, a partir do 600' as médias não apresentaram diferença estatística entre um tratamento e o subsequente ( Figura 12a). Em apêndice está apresentada uma tabela com as médias para esses dados.

Outra questão que pode ser observada na Figura, é que o lado da tora foi significativo e a posição da tora, base ou topo, também apresentaram diferença significativa, sendo que as maiores umidades encontram-se na tora da base.

As altas temperaturas iniciais da secagem levaram a ocorrência dessa rápida perda de água pelas amostras, confirmando a relação exposta por Skaar (1972). Por se tratar da água existente de forma livre no interior das células e espaços porosos da madeira, esse comportamento na sua curva de umidade é coerente, e condiz com os resultados obtidos por Monteiro (2014).

Figura 12: Umidade em função do tempo (Curva de secagem).

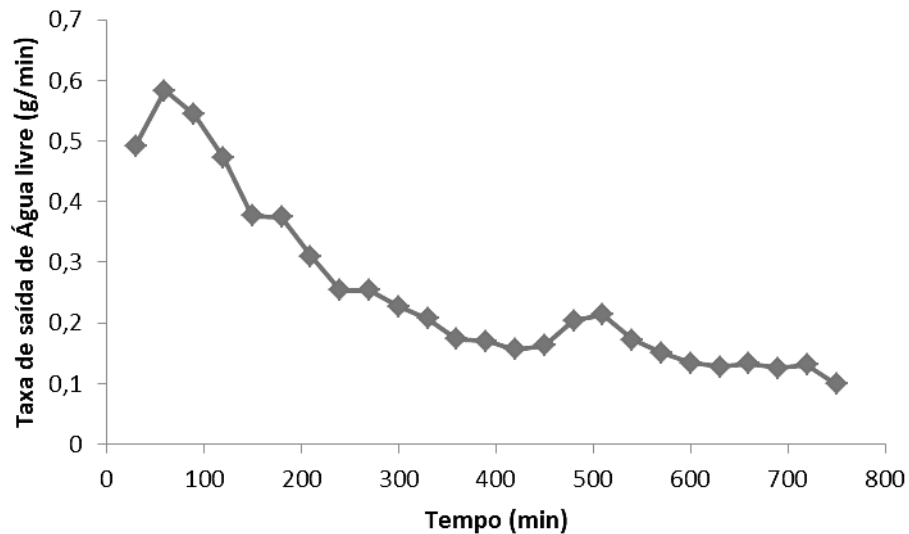


Fonte: Da autora (2018)

#### 4.2 Taxa de saída de água livre

A taxa de secagem de água livre, neste trabalho, apresentou o mesmo comportamento que foi relatado por Santos; Jankowsky e Andrade (2003) avaliando a curva de secagem para a madeira de *Eucalyptus grandis*, encontraram o comportamento característico do material madeira, com a taxa de secagem decrescendo com o tempo, ou seja, à medida que diminui a umidade.

Figura 13: Curva da taxa de saída de água livre.



Fonte: Da autora (2018)

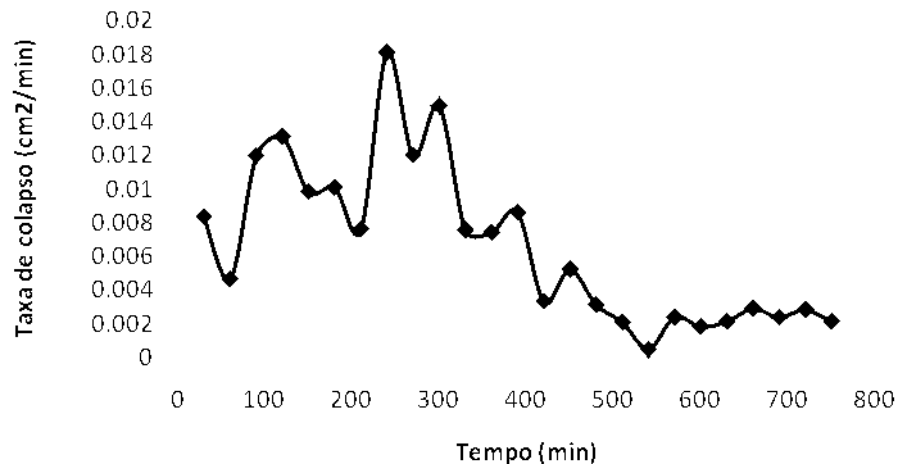
A baixa permeabilidade da madeira de eucalipto é tida como a principal responsável pela dificuldade da secagem (SANTOS; JANKOWSKY e ANDRADE, 2003) e influencia no comportamento da curva que não apresenta região ou fase em que a taxa de secagem é constante, mesmo estando acima do PSF. Os mesmos autores acreditam que em espécies do gênero *Eucalyptus* esse movimento da saída de água sofre restrições pelas características anatômicas da espécie.

#### 4.3 Taxa de colapso

Realizou-se a curva da taxa de ocorrência do colapso na madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a secagem drástica a 100°C, o que foi possível perceber do comportamento desta curva é, principalmente, sua tendência de maiores taxas e variações no início da secagem, e a redução destas variações, quanto mais próximo do PSF (Figura 14).



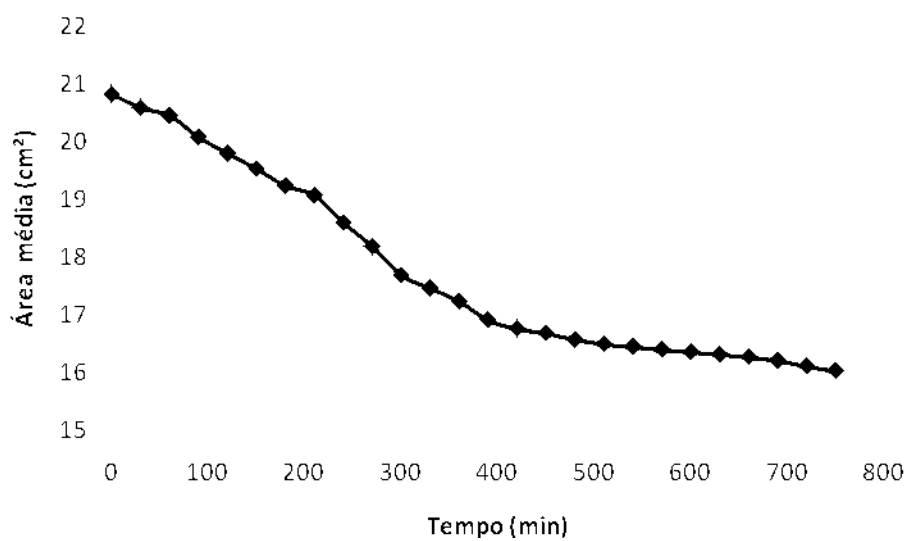
Figura 14: Curva da taxa de colapso.



Fonte: Da autora (2018)

A taxa de colapso está diretamente relacionada à perda de área acima do PSF. Uma observação importante é que esta relação de área x tempo é um sigmoide (Figura 15). Por isto o gráfico de taxa de colapso tem um pico no ponto de maior taxa, coincidindo com o ponto de inflexão do sigmoide, aproximadamente entre 200' e 360' (Figura 14 e 15).

Figura 15: Curva de perda de área por colapso.



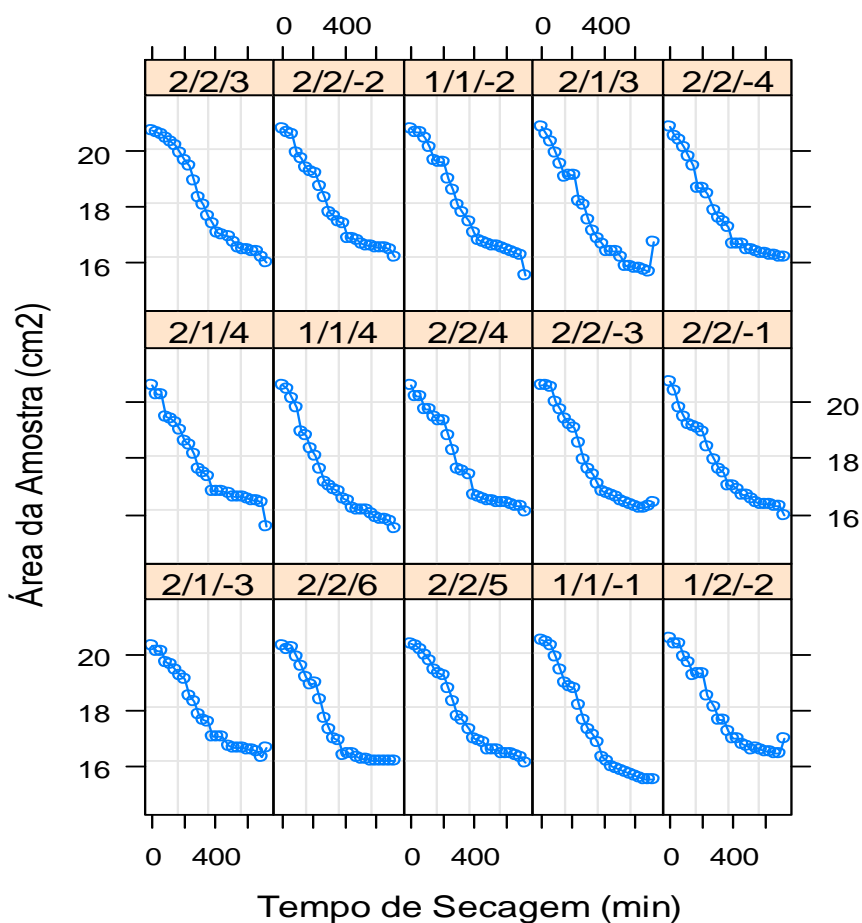
Fonte: Da autora (2018)

Segundo Santos; Jankowsky e Andrade (2003) Uma madeira de *Eucalyptus grandis*, com teor de umidade acima do PSF, quando submetida à secagem em estufa convencional acima do PSF, deverá ter como característica uma secagem lenta, pois a tentativa de acelerar o processo poderá acarretar numa maior ocorrência de defeitos.

#### Modelagem de colapso em *Eucalyptus grandis*

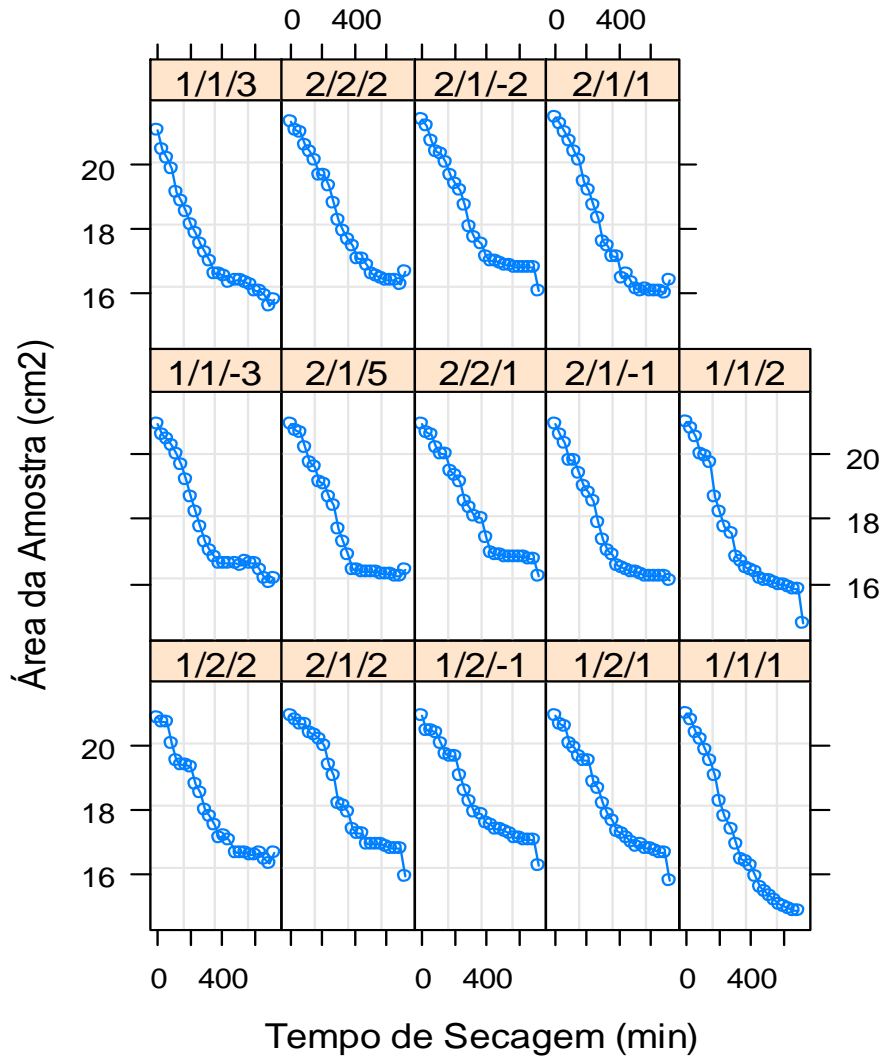
A perda de água nas amostras foram avaliadas individualmente. Foi observado o comportamento delas e, diante disto, as amostras que apresentaram menores deformações por colapso estão representadas na figura 16, enquanto, aquelas amostras que tiveram maior perda de área por colapso estão representadas na figura 17. A maioria das amostras que apresentaram maior ocorrência de colapso, são aquelas mais próximas a medula. Chafe (1986) garante que existe diferença entre as posições radiais e que o colapso aumenta proporcionalmente ao aumento da umidade verde e à redução da densidade básica.

Figura 16: Amostras com menor perda de área por colapso.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 17: Amostras com maior perda de área devido a ocorrência de colapso.



Fonte: Da autora (2018).

Para analisar os dados deste trabalho optou-se por um modelo logístico. O modelo Logístico possui uma configuração sigmoideal, que se mostrou adequada para os dados analisados, pois, esse comportamento, fez com que os dados fossem devidamente contemplados pela curva. Segundo Calegario et al. (2005), este modelo é caracterizado por apresentar parâmetros interpretáveis, como assíntota, ponto de inflexão e escala, e possibilitam estimativas confiáveis para valores fora do conjunto. Os ajustes e aplicação dos modelos foram analisados utilizando o software R.

Utilizando o modelo Logístico (Equações 7 a 10) com quatro parâmetros (Figura 18) foi possível estimar a perda de área por colapso, estes parâmetros se mostraram significativos e com baixa correlação entre si (Tabelas 3 e 4). Para cada posição amostrada foram definidos os parâmetros, que estão apresentados na tabela (5).

$$\frac{dW}{dt} = k'W(Wt - W) \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

$dW$  = Variação de área com colapso ( $\text{cm}^2$ );

$dt$  = Variação de tempo (min)

$k'$  = constante

Utilizando a constante  $\mu$ , definida pela equação 2:

$$\mu = k'Wt \quad \text{Equação 8}$$

De maneira que, substituindo a constante na equação, ela é representada da seguinte forma:

$$\frac{dW}{dt} = \mu W \left(1 - \frac{W}{Wt}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Para a obtenção da área estimada foi utilizada a equação 4.

$$\text{Área estimada} = \varphi1 + \frac{\varphi2 - \varphi1}{1 + e\left(\frac{\varphi3 - t}{\varphi4}\right)} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

$\varphi1$ : assíntota superior;

$\varphi2$ : assíntota inferior;

$\varphi3$ : ponto de inflexão e

$\varphi4$ : parâmetro de escala, representa a distância no eixo entre o ponto de inflexão e o ponto em que a resposta é aproximadamente 0,75  $\varphi1$ .

$$\text{Área estimada} = 21,24 + \frac{16,19 - 21,24}{1 + e^{\left(\frac{225,1136 - t}{97,5171}\right)}}$$

Equação 11

Sendo 225,1136 o ponto de inflexão encontrado para a curva de área estimada (equação 11) considera-se este o ponto crítico de colapso na madeira do *Eucalyptus grandis* estudada. Este tempo deve ser levado em consideração para realização da secagem. Algumas medidas como, baixas temperaturas iniciais na secagem, realizar o programa de secagem mais adequado, pré secagem, além de pré-vaporização inicial, podem colaborar para redução desse ponto crítico e, desta maneira, suavizar o colapso. Segundo Severo (2000) a pré-vaporização melhora a permeabilidade da madeira. Recomenda-se para madeiras de *Eucalyptus*, por ser uma madeira susceptível a defeitos como rachaduras e colapso, temperaturas iniciais de secagem baixas.

Realizando programa de secagem para dez clones de *Eucalyptus*, Barbosa (2005) chegou a conclusão que o programa deve ser baseado numa temperatura inicial igual a 40°C, pela alta susceptibilidade ao colapso que as espécies deste gênero geralmente apresentam. Calonego et al. (2006) observaram que não houve colapso em tábuas pré vaporizadas, indicando que a ausência de colapso está relacionada com a aplicação da vaporização na madeira. Vermaas (1995) recomendam para a madeira de *Eucalyptus*, iniciar sempre a secagem com temperatura inferior a 45°C.

Tabela 3: Parâmetros do modelo, todos os parâmetros foram significativos.

	<b>Parâmetros</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>GL</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor de P</b>
A	21,2417	0,099153	692	214,2308	<. 0001
B	16,1992	0,072207	692	224,3446	<. 0001
C	225,1136	6,732153	692	33,4386	<. 0001
D	97,5181	3,183832	692	30,6292	<. 0001

Sendo: GL= Grau de liberdade.

Tabela 4 : Correlações entre os parâmetros.

	Desvio Padrão	Correlação		
		A	B	C
A	0,4569657			
B	0,3786568	-0,44		
C	33,6229454	-0,706	0,442	
D	13,5677486	0,626	-0,27	-0,553
Residuo	0,1695938			

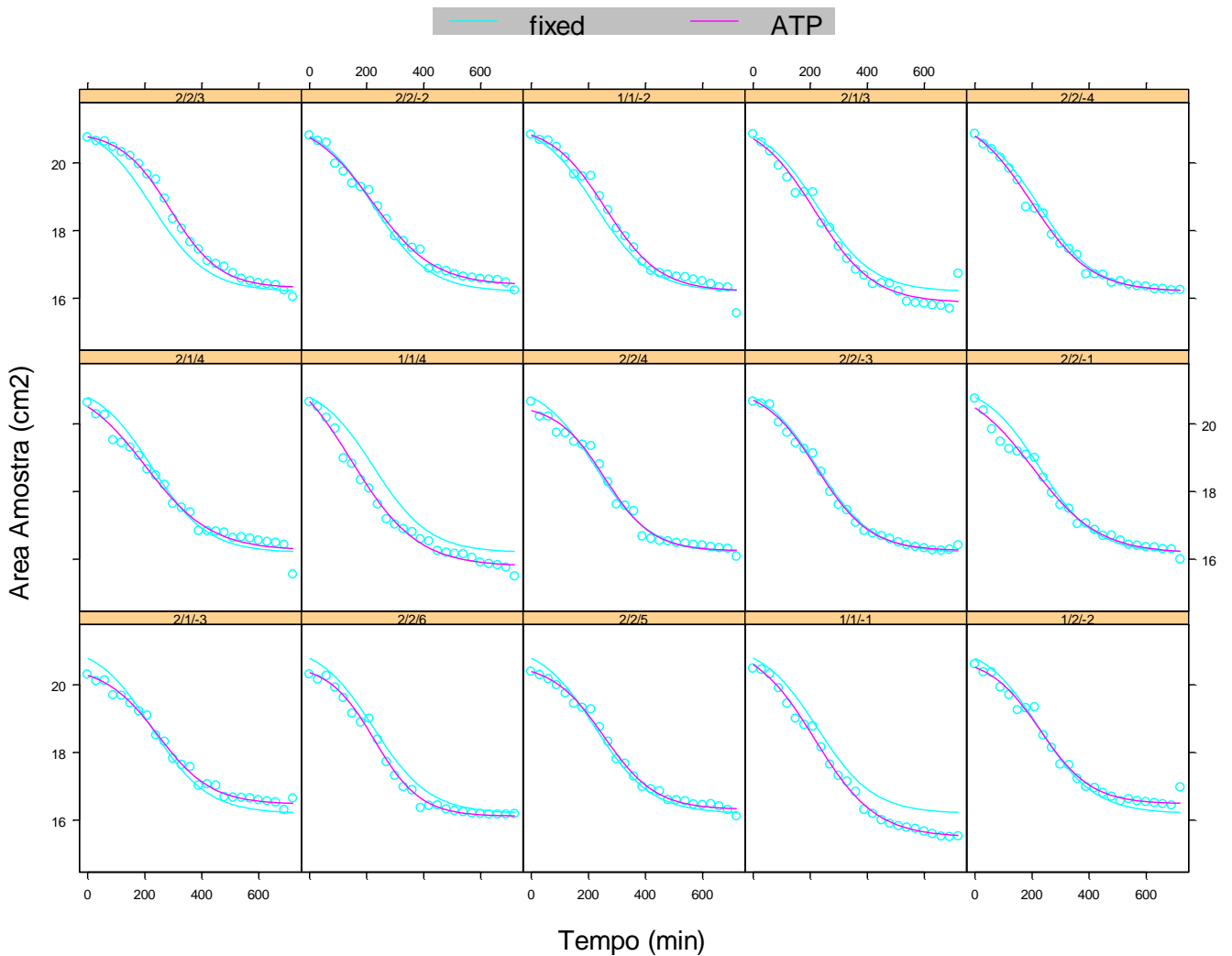
Tabela 5: Parâmetros para cada amostra

ATP	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$
2,1,-3	20,54577903	16,4718976	246,5437438	93,36761
2,2,6	20,60940651	16,11887525	227,8686904	80,47939
2,2,5	20,63276503	16,31667909	254,54526	90,264972
1,1,-1	21,25748367	15,50152427	216,8638891	106,517242
1,2,-2	20,82447742	16,48425765	228,6766063	89,172164
2,1,4	21,23518213	16,25864464	202,8080163	115,220324
1,1,4	22,02316315	15,79285113	147,3334489	115,438652
2,2,4	20,5845951	16,24921308	255,8454283	83,648944
2,2,-3	21,10313244	16,25190789	223,0092479	93,283069
2,2,-1	21,21602617	16,1796074	202,4617767	115,579694
2,2,3	20,9255575	16,30672067	290,3266119	86,610614
2,2,-2	21,31921633	16,38485149	219,4914738	108,029063
1,1,-2	21,12190743	16,20911618	259,5580454	95,123037
2,1,3	21,29412786	15,87180782	216,687789	102,198521
2,2,4	21,47608034	16,2034532	197,672551	103,859112
1,2,2	21,32226196	16,41725257	222,4557639	106,479579
2,1,2	20,98611283	16,61649008	280,7166426	80,953465
1,2,-1	21,07455354	16,88031401	240,2608278	101,117403
1,2,1	21,22460672	16,46420157	241,6377534	108,440127
1,1,1	21,74438737	14,93063343	213,2416493	103,977475
1,1,-3	21,19585716	16,33617466	205,9480454	78,823028
2,1,5	21,14817055	16,17843982	227,5035577	84,413879
2,2,1	21,13685312	16,57743974	250,7595852	98,944795
2,1,-1	21,25852772	16,12188014	207,2619459	92,119222
1,1,2	21,73800411	15,73562764	188,1084921	93,36307
1,1,3	22,13732317	15,93696879	148,5013554	115,275936
2,2,2	21,53646362	16,34466804	253,943962	98,796551
2,1,-2	21,52082146	16,59290357	232,6981625	93,797546
2,1,1	21,82515658	16,04239855	225,5640779	92,734007

Sendo: ATP: Árvore, Tora e Posição radial;  $\phi 1$ ,  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ ,  $\phi 4$ : parâmetros da equação.

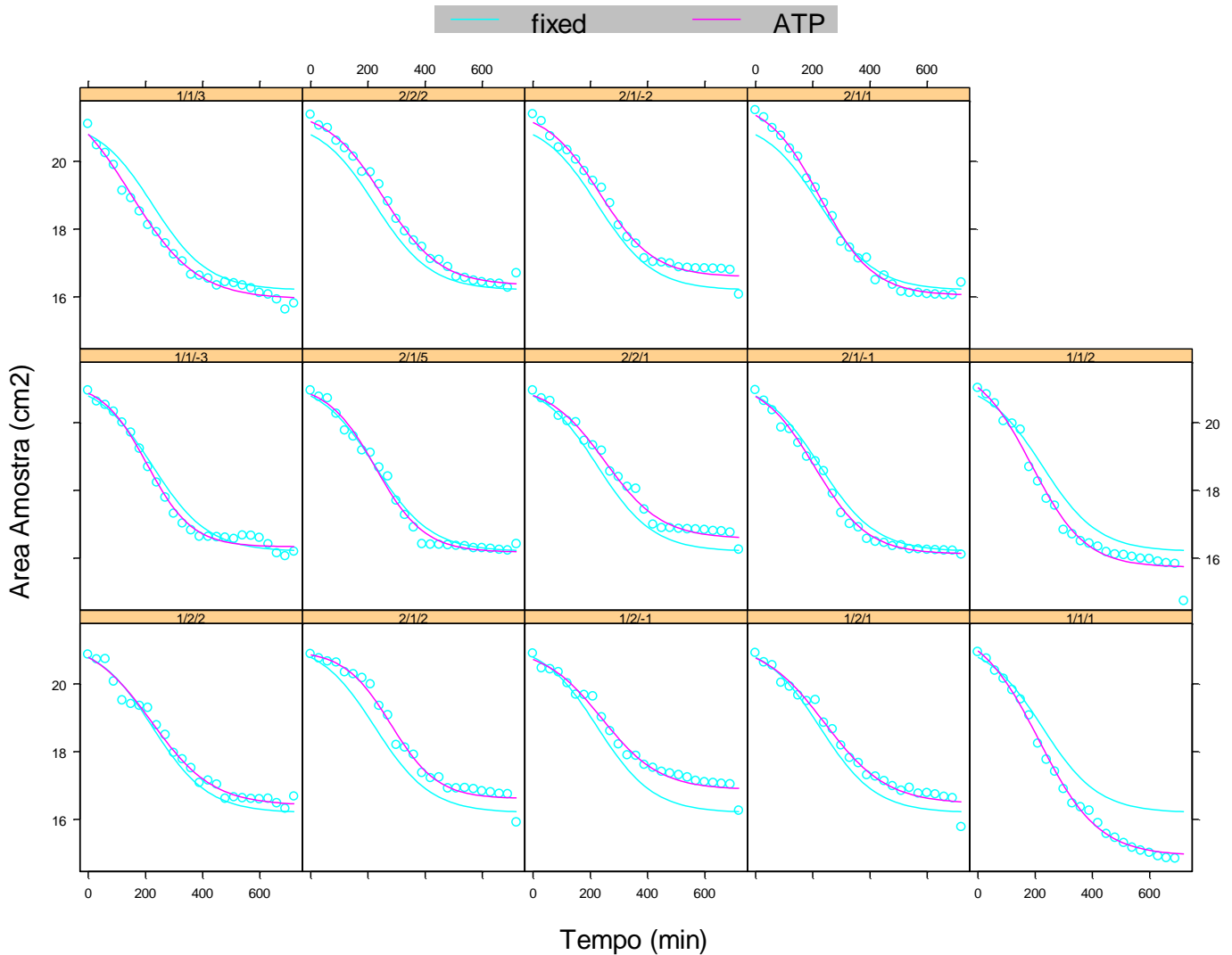
Os ajustes foram realizados para cada amostra, e quando comparadas, observou-se que algumas posições apresentaram uma curva mais próxima àquela estimada pelo modelo (Figura 19), enquanto outras posições se mostraram mais distantes (Figura 20). A amostra de medula, da tora da base, da árvore 1 ( amostra 1,1,1) foi aquela que apresentou a curva mais distante da estimada pela equação, com uma maior perda de área devido a ocorrência de colapso. As amostras mais próximas a medula, de maneira geral, apresentaram uma curva mais distante do modelo, e uma amplitude maior de deformação.

Figura 19: Curvas de perda de área por colapso observada (pontos) e ajustada pelo modelo.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 20: Curvas de perda de área por colapso observada (pontos) e ajustada pelo modelo



Fonte: Da autora (2018)

## 5. CONCLUSÃO

Foi possível obter um modelo que fez com que os dados fossem devidamente contemplados na curva. O modelo logístico foi utilizado para ajuste dos dados, sendo possível encontrar o tempo crítico médio de ocorrência do colapso para essas árvores; sendo este em 225,11 minutos de secagem. Entretanto, ainda é necessário investir na realização de trabalhos mais aprofundados avaliando a relação água-madeira, bem como modelar o comportamento da sua secagem.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: PROJETOS DE ESTRUTURAS DE MADEIRA - RIO DE JANEIRO, 1997. 107P

BARBOSA, C. G. **Incidência dos defeitos de secagem como índice de qualidade e de seleção genética para madeira de Eucalyptus**. 2003. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

BARBOSA, C.G. et al. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones híbridos de *Eucalyptus spp.* **Cerne**. Lavras, v.11,n.1, p.40-48, jan/jun. 2005.

BOURIAUD, O. et al. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. **Trees**, V 18, n 3, pg 264–276. 2004.

BUFALINO, L. et al. Modelagem de propriedades físicas e mecânicas em painéis aglomerados de cedro australiano. **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v. 19, n. 2, p. 243-249, 2012.

CALEGARIO N. et al. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal *Eucalyptus* plantation case study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.204, n.1, p. 11-21, jan. 2005.

CALONEGO F. W. et al. Qualidade da secagem de eucalyptus grandis mediante vaporização simultânea em toros e em madeira serrada. **Silva Lusitana** 14(2): 169 - 180, 2006.

CHAFE, S.C. Radial variation of collapse, volumetric shrinkage, moisture content and density in *Eucalyptus regnans* F. Muell. **Wood Science and Technology**, 20, 253–262, 1986.

KLITZKE, RJ; BATISTA, DC. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2010.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

MONTEIRO, T. C. **Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de Eucalyptus e Corymbia**. 2014. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

RYAN DAJ, MCLAUGHLIN DL, GORDON AM. Interpretation of sugar maple (*Acer saccharum*) ring chronologies from central and southern Ontario using a mixed linear model. **Canadian Journal of Forest Research**. 24:568–575, 1993.

SANTOS, GRV; JANKOWSKY, IP; ANDRADE, A. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2003.

SEVERO, E.T.D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal** 10 (1) : 109-124, 2000.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.

VERMAAS, H.F. Drying eucalypts for quality: Material characteristics, pré-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. **Suid-Afrikaanse bosboutydskrif** (174) : 41-49, 1995.