

**CASSIANA ALVES FERREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA, SECAGEM  
E CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA DE CLONES  
DE *Eucalyptus* E ESPÉCIES DO CERRADO**

**LAVRAS-MG  
2012**

**CASSIANA ALVES FERREIRA**

**“CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA, SECAGEM  
E CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA DE CLONES DE *Eucalyptus* E DE  
ESPÉCIES DO CERRADO”**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Alfredo Napoli

Co-orientadores

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Dr. Fábio Akira Mori

**LAVRAS- MG  
2012**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Ferreira, Cassiana Alves.

Caracterização anatômica, secagem e carbonização da madeira de clones de *Eucalyptus* e de espécies do Cerrado / Cassiana Alves Ferreira. – Lavras : UFLA, 2012.

89 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Alfredo Napoli.

Bibliografia.

1. Carvão. 2. Anatomia da madeira. 3. Variação dimensional. 4. Contração. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

**CASSIANA ALVES FERREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA, SECAGEM  
E CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA DE CLONES DE *Eucalyptus* E DE  
ESPÉCIES DO CERRADO**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de fevereiro de 2012.

Dr. Paulo Fernando Trugilho UFLA

Dr. Mário Tomazello Filho ESALQ

Dr. Alfredo Napoli

Orientador

**LAVRAS – MG  
2012**

*A minha mãe Maria Ofélia,  
Ao meu pai José Eduardo (in memoriam) e  
Aos Tios e Tias que fizeram desse sonho realidade.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus acima de tudo, obrigado pela dádiva que é viver.

A minha mãe por me ensinar os mistérios e a realidade da vida.

Aos meus familiares tios e tias que fizeram desse sonho realidade, em especial a tia Nora, tia Vanda, tio Tonho, tio Regi e ao meu Avô Ismael.

Ao meu lindo afilhado Pedro Antônio, meu eterno amor.

A Thianne, Sandra, Janine e Carlos pelas risadas, amizade, força e momentos de alegria.

A Universidade Federal de Lavras e o Departamento de Ciências e Tecnologia da Madeira.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais pela concessão da bolsa de estudos.

Aos Laboratórios de Anatomia da Madeira, Tecnologia, Painéis, Usinagem, Biomateriais, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e os demais laboratórios da Universidade Federal de Lavras pelo apoio na realização desse Trabalho.

Ao Professor Alfredo Napoli pela orientação, amizade e conhecimentos transmitidos.

Aos Professores Paulo Fernando Trugilho e Fábio Akira Mori pelos conselhos, sugestões durante o desenvolvimento.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia da Madeira pelo conhecimento e ajuda durante o trabalho.

Aos amigos que participaram ativamente desse trabalho, Claudia Urbinati, Simonne Sampaio, Jonnys Castro, Alessandra Fonseca e Caroline Junqueira. Aos amigos e colegas de laboratório pelas horas descontraídas e pelospapos de ciência que nos renderam grandes ideias.

A todos que fazem parte desse trabalho, meu muito obrigado!!!

## RESUMO

A variação dimensional da madeira é motivo de discussão entre pesquisadores, visto que esse fenômeno afeta diretamente o seu uso. Para a siderurgia, por exemplo, é necessário que o carvão vegetal apresente entre outras propriedades, resistência mecânica elevada e granulometria adequada. Sabe-se que a anatomia da madeira afeta diretamente os fenômenos de secagem (permeabilidade da madeira, frequência de vasos, tiloses etc) e carbonização (proporção e dimensão dos tecidos, especialmente as fibras). O presente trabalho teve como objetivo caracterizar anatomicamente algumas espécies do cerrado e dois clones de *Eucalyptus*, observar e mensurar o comportamento da madeira durante as curvas de desumidificação e absorção e; carbonizar as mesmas amostras que sofreram secagem, mensurando o rendimento e o comportamento do carvão em relação às contrações tangencial, radial e longitudinal. Os resultados anatômicos foram bastante semelhantes, não havendo discrepância nos valores quantitativos dos elementos anatômicos tanto para espécies do cerrado como para os clones de *Eucalyptus* com exceção da frequência de vasos, largura e altura dos raios. As contrações da madeira foram bastante acentuadas apresentando correlações com a densidade e o rendimento em carvão foi influenciado provavelmente pelos compostos químicos da madeira. Os resultados mostram que a presença de contrações acima do ponto de saturação das fibras indica a presença de colapso nas células e como consequências rachaduras e fendilhamento no carvão.

Palavras-chave: Anatomia da Madeira, Cerrado, carvão, *Eucalyptus*, Contração.

## ABSTRACT

The dimensional changes of wood are a matter of debate among researchers, since this phenomenon directly affects the wood uses. For the steel industry, for example, it is necessary that charcoal present among others proprieties a high mechanical strength and adequate size. It is known that the wood anatomy directly affects these two phenomena, both drying (wood permeability, vessel frequency and tyloses etc.) as for carbonization (proportion and dimensions of tissue, especially the fibers). The present research aimed to characterize anatomically some species of the Brazilian Cerrado and *Eucalyptus* clones, observe and measure behavior of the wood during desorption and absorption curves, and carbonize, the same samples that were drying, measuring the yield and behavior of the charcoal in relation to the shrinkage tangential, radial and longitudinal. Anatomical results were very similar, there is no discrepancy in the quantitative values of the anatomical elements, both for species from Cerrado as for *Eucalyptus* clones with exception of vessel frequency, width and height of the rays. The shrinkage of wood were quite marked timber showing correlation with the density and the charcoal yield was likely influenced by the wood chemical compositions. The results showed that the presence of wood shrinkage above fiber saturation point indicates the presence of collapsed cells and as direct consequences cracks and splitting on charcoal.

Keywords: Anatomy Wood, Cerrado, Charcoal, *Eucalyptus*, Shrinkage.

## LISTA DE FIGURAS E TABELA

Figura 1	Curvas de desorção e absorção em relação às contrações tangenciais e radiais em <i>Fagus sylvatica</i> , Híbrido de <i>Tremula x Populus alba</i> (clone INRA 717-IB4) e <i>Picea abies</i> . ....	19
Figura 2	Visualização do colapso das células da madeira de tensão de <i>Eucalyptus</i> (a) visão global, deformação dos vasos; (b) aproximando, mostra fibras gelatinosas e células de parênquima. ....	20
Figura 3	Contração acima do ponto de saturação das fibras na madeira de <i>Eucalyptus gundal</i> e <i>Picea abies</i> mediante as curvas de secagem e as contrações tangenciais e longitudinais durante a remoção da água: (A) madeira normal de Spruce, (B) madeira normal de <i>Eucalyptus</i> e (C) madeira de tração de <i>Eucalyptus</i> . ....	21
Figura 4	Subdivisão dos discos para as respectivas análises de anatomia, secagem e carbonização. ....	34
Figura 5	Valores médios de densidade básica para espécies do Cerrado e clones de <i>Eucalyptus</i> . ....	41
Figura 6	Caracteres anatômicos de <i>Casearia sylvestris</i> . (a) corte transversal (seta indica camadas de crescimento), (b) corte tangencial, (c) corte radial e (d) elementos celulares dissociados fibras e vasos (setas). ....	44
Figura 7	Caracteres anatômicos de <i>Guazuma ulmifolia</i> . (a) Corte transversal, (b) corte radial (seta 1 e 2 indicam respectivamente placa de perfuração simples e cristais em câmaras fibrosas, (c) corte tangencial e (d) corte radial (cristais em câmaras fibrosas ). ....	46

Figura 8	Apresenta caracteres anatômicos de <i>Luehea divaricata</i> . (a) Corte transversal, (b) corte radial, (c) tangencial (seta 1 e 2 indicam respectivamente raios agregados e vasos), (d) seta indicando elemento de vasos.....	48
Figura 9	Caracteres anatômicos de <i>Rapanea ferruginea</i> . (a) Corte transversal, (b) corte radial, (c) tangencial (seta indica células envolventes nos raios), (d) setas 1,2 e 3 indica elementos vaso, células de parênquima e fibra.....	50
Figura 10	Caracteres anatômicos de <i>Trema micrantha</i> . (a) Corte transversal, (b) corte radial, (c) tangencial e (d) elementos celulares dissociados (seta indica apêndice dos vasos).....	52
Figura 11	Caracteres anatômicos de <i>Eucalyptus urophylla</i> . (a) Corte transversal, (b) corte radial (seta indica placa de perfuração simples), (c) tangencial e (d) elementos celulares dissociados (elemento de vaso).....	54
Figura 12	Características anatômicas do híbrido de <i>E. urophylla x E. camaldulensis</i> . (A) Plano transversal, (B) radial, (C) tangencial e (D) elementos celulares dissociados (seta indicando elemento de vaso).....	56
Figura 13	Apresenta gráfico com a Umidade Saturada experimental (base seca) e teórica das espécies do cerrado e clones de <i>Eucalyptus</i> .....	65
Figura 14	Evolução das contrações tangenciais (T), radiais (R) e longitudinais (L) das espécies do cerrado. (a) região abaixo do PSF (-d – dessorção; -a – absorção), (b) região acima do PSF (-d – dessorção; -a – absorção).....	70

Figura 15	Evolução das contrações tangenciais (T), radiais (R) e longitudinais (L) das espécies do cerrado. (a) região abaixo do PSF (-d – dessecção; -a – absorção), (b) região acima do PSF (-d – dessecção; -a – absorção).....	71
Figura 16	Evolução das contrações tangenciais (T), radiais (R) e longitudinais (L) dos clones de <i>Eucalyptus</i> . (a) região abaixo do PSF (-d – dessecção; -a – absorção), (b) região acima do PSF (-d – dessecção; -a – absorção).....	72
Figura 17	Gráfico com valores médios de rendimentos em carvão obtidos através da carbonização dos corpos de prova das espécies do cerrado e clones de <i>Eucalyptus</i> . ....	74
Figura 18	Apresenta gráfico com valores médios de contração tangencial do carvão final das espécies do Cerrado e <i>Eucalyptus</i> . ....	75
Figura 19	Apresenta severas rachaduras no corpo de prova do clone <i>E. urophylla</i> . Em (A) corpo de prova antes da carbonização e (B) após a carbonização. Barras de 0,5cm.....	76
Figura 20	Apresenta gráfico com valores médios de contração radial do carvão final das espécies do Cerrado e <i>Eucalyptus</i> . ....	77
Figura 21	Apresenta gráfico com valores médios de contração longitudinal do carvão final das espécies do Cerrado e <i>Eucalyptus</i> . ....	78
Figura 22	Apresenta imagem de microscopia eletrônica de varredura (plano tangencial) da espécie do Cerrado <i>R. ferruginea</i> . Barra de 200µm.....	79

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
2.1	Anatomia da madeira .....	16
2.2	Secagem da madeira .....	17
2.3	Processo de pirólise da madeira.....	23
2.3.1	Efeito da temperatura final de carbonização .....	24
2.3.2	Efeito da taxa de aquecimento de pirólise sobre o rendimento em carvão .....	25
2.4	Carvão vegetal.....	26
2.5	Florestas energéticas: <i>Eucalyptus</i> .....	28
2.6	Cerrado brasileiro.....	29
2.6.1	Espécies nativas do cerrado potenciais para geração de energia.....	29
2.6.1.1	<i>Casearia sylvestris</i> SW. (Salicaceae).....	29
2.6.1.2	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam. (Malvaceae).....	30
2.6.1.3	<i>Luehea divaricata</i> Martius e Zuccarini (Crassulaceae) .....	30
2.6.1.4	<i>Rapanea ferruginea</i> (Ruiz e Pavon) Mez. (Primulaceae) .....	31
2.6.1.5	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blum. (Ulmaceae).....	31
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3.1	Material de estudo .....	33
3.2	Amostragem e retirada dos corpos de prova para anatomia, secagem e carbonização.....	33
3.3	Densidade básica da madeira.....	34
3.4	Análises anatômicas.....	34
3.4.1	Preparo das lâminas permanentes .....	35
3.5	Secagem da madeira .....	36

3.5.1	Determinação do teor de umidade.....	36
3.6	Contração durante a secagem da madeira .....	38
3.7	Carbonização das amostras de madeira .....	38
3.8	Microscopia de luz refletida e microscopia eletrônica de varredura.....	39
3.9	Delineamento experimental e análises dos dados.....	40
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
4.1	Densidade básica da madeira.....	41
4.2	Anatomia das espécies do cerrado e clones de <i>eucalyptus</i> .....	43
4.2.1	<i>Casearia sylvestris</i> Swartz.(Salicaceae).....	43
4.2.1.1	Descrição microscópica .....	43
4.2.2	<i>Gazuma ulmifolia</i> Lam. (Malvaceae).....	45
4.2.2.1	Descrição microscópica .....	45
4.2.3	<i>Luehea divaricata</i> Mart. (Crassulaceae).....	46
4.2.3.1	Descrição microscópica .....	46
4.3.4	<i>Rapanea ferruginea</i> (Ruiz & Pavon) Mez. (Primulaceae) .....	48
4.3.4.1	Descrição microscópica .....	48
4.3.5	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blum. (Ulmaceae).....	50
4.3.5.1	Descrição microscópica .....	50
4.2.6	<i>Eucalyptus urophylla</i> Blake (Myrtaceae) .....	52
4.2.6.1	Descrição microscópica .....	52
4.2.7	<i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (Myrtaceae) .....	54
4.2.7.1	Descrição microscópica .....	54
4.3	Análises anatômicas comparativas entre as espécies do cerrado e clones de <i>Eucalyptus</i> .....	56
4.3.1	Comprimento de fibras .....	57
4.3.2	Espessura da parede da fibra .....	58

4.3.3	Comprimento de vasos .....	59
4.3.4	Diâmetro dos elementos de vasos .....	60
4.3.5	Diâmetro das pontoações.....	61
4.3.6	Frequência de vasos .....	61
4.3.7	Raios por mm Linear .....	62
4.3.8	Largura dos raios (em números de células).....	63
4.3.9	Altura dos raios (em número de células) .....	63
4.4	Secagem .....	64
4.4.1	Variação dimensional .....	66
4.5	Carbonização.....	72
4.5.1	Rendimento em carvão .....	73
4.5.2	Contração do carvão.....	74
5	CONCLUSÃO .....	80
	REFERÊNCIAS.....	82

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de carvão vegetal do mundo. A principal fonte de matéria prima para esse carvão é oriunda de florestas energéticas de *Eucalyptus*. As madeiras provenientes dessas florestas possuem características fundamentais para a produção de carvão de boa qualidade, como incremento volumétrico, teor de lignina, densidade elevada, etc.

Segundo Lin (2006) a escolha apropriada de clones e híbridos, obtidos através de tecnologias que visam otimizar a produção e melhorar a qualidade do material, representam um importante mercado no Brasil, sendo que esse material apresenta características importantes para a indústria siderúrgica, como elevada pureza e reatividade, o que lhe confere um bom preço como redutor metalúrgico.

No entanto processos que antecedem a carbonização são essenciais para a qualidade do carvão vegetal produzido, como por exemplo, a secagem da madeira destinada a conversão energética. Poucos estudos visam o aperfeiçoamento da secagem da madeira para fins energéticos. Entretanto, características anatômicas da madeira, especialmente as quantitativas são responsáveis sob o ponto de vista da transferência térmica e de massa, pela liberação de água durante a secagem e dos gases de pirólise durante a carbonização. Estes fenômenos têm impacto na estrutura do carvão (granulometria e resistência mecânica) e na sua qualidade química (carbono fixo).

O comportamento da estrutura da madeira durante a secagem pela contração volumétrica e da estrutura do carvão durante a carbonização é de extrema importância para que este chegue a um produto final de boa qualidade. A complexidade desses dois fenômenos, aliado a componentes celulares de difícil entendimento estão diretamente ligados ao efeito da anatomia da madeira na qualidade final do carvão, como por exemplo, na ocorrência do fendilhamento (COTTA, 1996; RAAD, 2000; RAAD et al, 2006).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar anatomicamente as espécies do Cerrado e os clones de *Eucalyptus*, observar o comportamento das espécies mediante as curvas de dessecção e absorção durante a secagem da madeira, verificando assim a ocorrência de colapso, bem como as consequências dessa secagem no carvão final produzido.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar anatomicamente as espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus*;
- b) Avaliar as curvas de dessecção e absorção durante a secagem com efeitos na madeira e conseqüentemente no carvão final produzido;
- c) Verificar a ocorrência de colapso na madeira;
- d) Observar através de técnicas de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura as características microscópicas da madeira e do carvão final.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Anatomia da madeira**

O estudo anatômico da madeira é de grande valor para a identificação de espécies florestais, especialmente quando os indivíduos são desprovidos de órgãos reprodutivos, possibilitando, assim, que espécimes estéreis até o nível família ou gênero sejam identificados. De forma que o trabalho botânico é facilitado e pode ser importante na confirmação de adulterações, substituições e fraudes (MATCALF & CHALK, 1983).

Estudos utilizando a anatomia da madeira como forma de identificação de carvão ainda é pouco difundido no Brasil. A caracterização anatômica de carvões visa à confecção de bancos de dados e chaves de identificação através de análises anatômicas de lenhos carbonizados (GONÇALVES e SCHEEL-YBERT, 2003; SCHEEL-YBERT et al., 2006).

Paula (2003), trabalhando com anatomia da madeira de espécies amazônicas para fins energéticos ressalta que, os parâmetros importantes para determinar o potencial energético de uma espécie são comprimento, espessura e a fração parede das fibras que estima percentualmente a espessura da parede celular. Ainda segundo este autor a fração parede das células parenquimatosas e dos elementos de vaso é sempre muito baixa em relação ao espaço ocupado por cada célula. Portanto, madeiras ricas em vasos e em células parenquimatosas não devem ser utilizadas para gerar energia. Ao contrário, madeiras ricas em fibras de alta fração parede (a partir de 60%) são de boa qualidade para gerar energia (etanol, coque metalúrgico, carvão e lenha).

Oliveira et al. (2006) citam que, para a produção de carvão vegetal é importante que a madeira apresente elevada densidade, com a consequente

presença de fibras com elevada fração de parede e baixa proporção de tecidos parenquimáticos e vasos.

Gonçalves et al., (2009) propôs o direcionamento da antracologia, ciência ainda pouco difundida no Brasil, como ferramenta útil para identificação e consequentemente fiscalização e controle do carvão vegetal.

Gonçalves et al., (2010) trabalhando com a identificação do lenho e do carvão de dez espécies do Cerrado Paulista, concluíram que os caracteres anatômicos da madeira se mantiveram no carvão final, tanto no se refere a organização celular quanto ao formato e dimensões das fibras e ainda células do parênquima axial e radial. Estes autores ressaltam ainda que: (i) há uma redução significativa do diâmetro dos vasos; (ii) a frequência dos raios aumentou na maioria dos indivíduos, sendo que a largura variou bastante, reduziu ou expandiu; (iii) indivíduos com raios mais largos apresentaram maior contração se comparado a indivíduos com raios mais estreitos. Permitindo assim que os autores concluíssem que a baixa variação dos parâmetros analisados do lenho e do carvão possibilitam a identificação taxonômica das espécies.

## **2.2 Secagem da madeira**

As árvores recém abatidas quando expostas ao meio, inicialmente perdem a água localizada nos espaços vazios, como o lume das células e os espaços intercelulares, esta água é chamada de água livre ou de capilaridade. Há ainda, a água retida nas paredes celulares, chamada de água de adesão e, por conseguinte, a água de constituição química que está intimamente ligada à parede celular constituindo a madeira.

A umidade correspondente à chamada água de adesão, corresponde ao “Ponto de Saturação das Fibras” (PSF), que pode variar de 20% a 30% devido aos diferentes tipos de madeira e sua constituição química (PANSKIN, 1964). Abaixo

desse ponto a madeira sofre suas maiores deformações, denominadas de contração e inchamento. Sabe-se ainda que, as condições ambientais afetam a umidade de equilíbrio da madeira (UE), a partir desse ponto a madeira diminui sua troca de umidade com o meio.

A secagem é uma fase de importante nos processos tecnológicos da madeira, pois proporciona entre outros, uma melhoria das características, como trabalhabilidade, redução da variação dimensional e ainda reduz o ataque de agentes xilófagos. Melhora ainda a resistência elétrica da madeira, que é inversamente proporcional ao teor de umidade, sendo que de 30% a 0% de umidade a resistência elétrica chega a aumentar um milhão de vezes (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985; TSOUMIS, 1991; SIAU, 1971).

A secagem pode ser efetuada ao ar livre ou artificialmente (em estufas), com temperatura, circulação de ar e umidade controlada. Esta, com maior custo ao processo, através de programas de secagem adequados, permitindo que a madeira chegue a valores de umidade pré-determinados mais rapidamente do que a secagem ao ar livre. O estudo da secagem exige o conhecimento da física, química, termodinâmica e ainda anatomia da madeira. A complexidade da composição e estrutura da madeira, suas peculiaridades celulares e ainda consequentes alterações de propriedades (anisotropia e higroscopicidade, fatores inerentes a todo o material lenhoso) determinam dificuldades acrescidas e específicas no estudo da circulação de fluidos e da secagem da madeira (SIAU, 1971; SKAAR, 1984; GALVÃO e JANKOWSKY, 1985; ZOBEL & VAN BUIJTENEN, 1989; LEWIN e GOLDSTEIN, 1991).

Almeida et al., (2008), ressaltam que o estudo das contrações na dessorção seguido de absorção indica também há uma variação no comportamento da madeira em relação à água, conforme observado na Figura 1. No entanto os diferentes valores de contrações nos sentidos tangencial, radial e longitudinal podem ser fatores agravantes para a qualidade da madeira destinados

a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico, pela presença de colapso na madeira seca, com consequências negativas para a resistência mecânica e distribuição granulométrica. Ressaltam ainda que o efeito negativo da pressão da água modifica os tecidos saturados, especialmente os raios, modificando o formato da célula, produzindo colapso intenso, induzindo a variação dimensional, especialmente na direção tangencial.

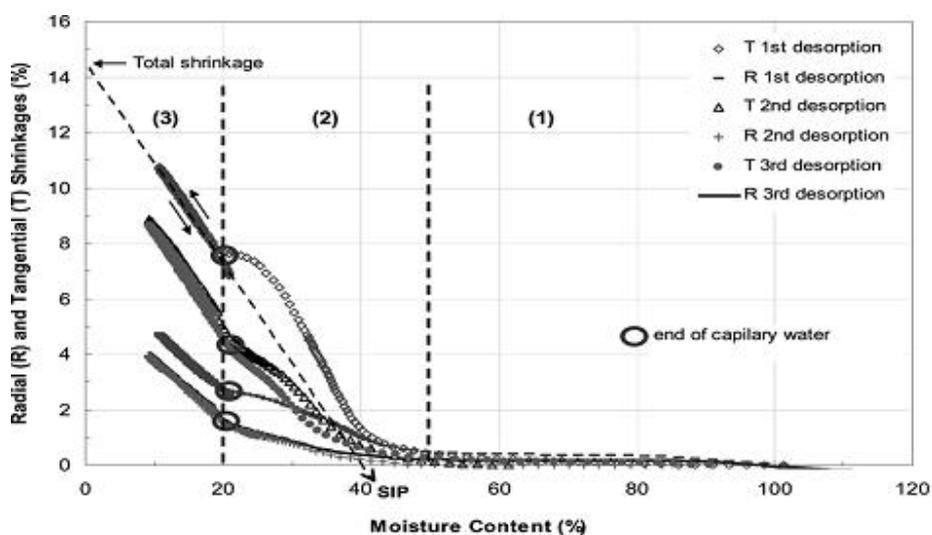


Figura 1 Curvas de desorção e absorção em relação às contrações tangenciais e radiais em *Fagus sylvatica*, Hibrido de *Tremula x Populus alba* (clone INRA 717-IB4) e *Picea abies*.

Fonte: Almeida et al. (2008).

Dentre as deformações que ocorrem acima do ponto de saturação das fibras PSF (30%), está o colapso das células da madeira. Segundo Obataya et al., (2005) o colapso é o resultado da competição entre a ação de capilaridade (força de secagem) e o resistência mecânica da parede das células (força de resistência). Parâmetros esses que, influenciam no comportamento viscoelástico das células, caracterizado por ondulações na superfície da peça de madeira, como observado na Figura 2. De forma geral os fatores que afetam o colapso na madeira são:

pequeno diâmetro dos capilares, altas temperaturas no início da secagem, baixa densidade da madeira, alta tensão superficial do líquido que é removido da madeira e a presença de bolhas de ar na água capilar diminuindo a possibilidade de colapso.

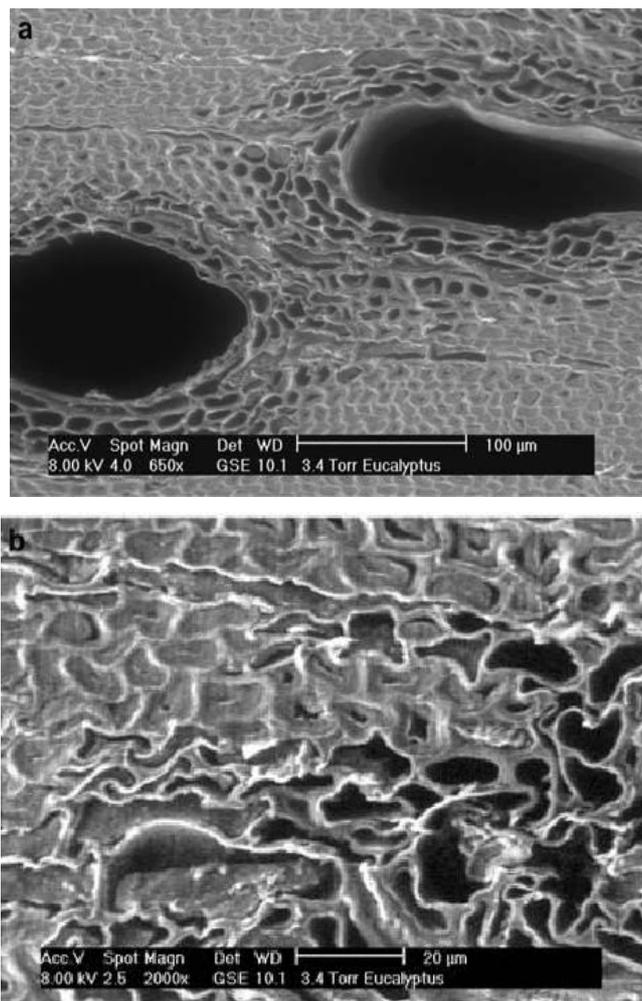


Figura 2 Visualização do colapso das células da madeira de tensão de *Eucalyptus* (a) visão global, deformação dos vasos; (b) aproximando, mostra fibras gelatinosas e células de parênquima.

Fonte: Perré et al. (2007).

A determinação do colapso das células pode ser feita de forma visual e também através de mensurações da evolução da contração em diferentes umidades durante a secagem. Segundo Perré et al., (2007) a presença de contração acima do PSF (30% de umidade da madeira) indica a presença de colapso. As curvas obtidas por estes autores durante a secagem da madeira de *Eucalyptus gundal* e *Picea abies*, mostradas na Figura 3, indicam que a contração tangencial, radial e longitudinal é afetada pela presença de colapso desde o início da secagem, quando a madeira está saturada.

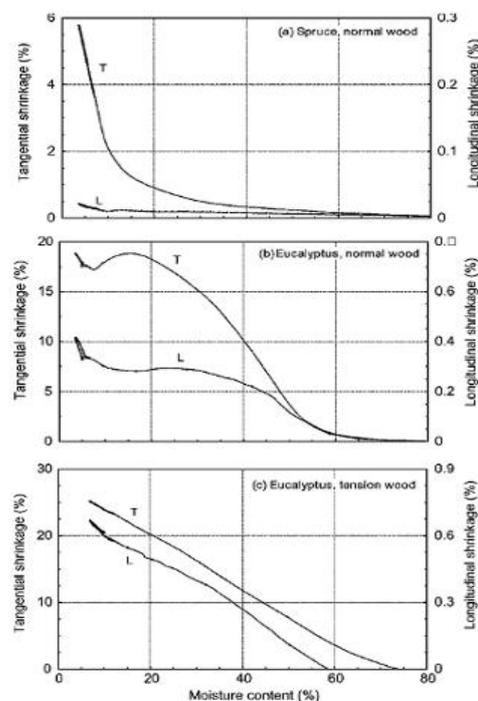


Figura 3 Contração acima do ponto de saturação das fibras na madeira de *Eucalyptus gundal* e *Picea abies* mediante as curvas de secagem e as contrações tangenciais e longitudinais durante a remoção da água: (A) madeira normal de Spruce, (B) madeira normal de *Eucalyptus* e (C) madeira de tração de *Eucalyptus*.

Fonte: Perré et al. (2007).

Conforme a Figura 3, a madeira de Spruce tem o que os autores chamam de contração modelo, sendo que as maiores contrações, no caso tangencial, começam em torno de 30% de umidade da madeira. Já no caso da madeira normal de *Eucalyptus*, as contrações tangenciais e longitudinais começam em torno de 50% de umidade da madeira, indicando a forte presença de colapso. No entanto na madeira de tração de *Eucalyptus* apresenta forte contração linear anterior ao PSF, chegando a valores aproximados de 25% e 0,8% respectivamente tangencial e longitudinal.

Sabe-se, portanto, que a anatomia da madeira possui impacto fundamental na secagem, afetando principalmente sua permeabilidade. Uma vez que fatores anatômicos como tiloses, frequência e distribuição dos vasos, aspiração do torus, entre outras propriedades influenciam a permeabilidade da madeira, afetando assim a secagem (BURGER & RICHER, 1991).

A umidade da madeira influencia fortemente o controle da carbonização, pois pode afetar o poder calorífico da madeira, o tempo de carbonização, a friabilidade e o rendimento gravimétrico do carvão. A umidade elevada na região central da madeira dará origem a um carvão fendilhado, com maior predisposição a geração de finos, ocasionado pelo aumento da pressão do vapor durante a carbonização. Um teor de umidade variável pode ainda, dificultar o controle do processo de carbonização, havendo a necessidade de constantes reajustes no sistema (LADEIRA, 1992 *apud* COTTA, 1996; CARNEIRO, 2007 *apud* REZENDE, 2009).

Vianna et al., (2006) afirmam que a energia para aquecer e evaporar a umidade da madeira é alta. Essa energia é gerada pela queima de parte da madeira a ser carbonizada e quanto maior a umidade, maior será a energia necessária para a secagem e menor o rendimento da carbonização.

Valente & Lelles (1986) afirmam que a produção de carvão com madeira úmida gera um carvão quebradiço, elevando a quantidade de finos durante o manuseio e transporte do carvão.

Segundo Tarkon (1978), quando uma peça de madeira é seca, o alburno seca mais rapidamente e a umidade do cerne é retirada com dificuldade devido a menor permeabilidade. Nessas condições, a pressão de vapor dos gases aumenta no interior das células, podendo ocorrer ruptura celular das fibras com o desenvolvimento das trincas.

Numazawa (2001) ressalta que a presença de maior umidade impede o sobreaquecimento e diminui a taxa de aquecimento.

Mendes et al. (1982), trabalhando com diferentes teores de umidade e mesmas condições de carbonização para *Eucalyptus grandis* mostram que quanto maior o teor de umidade da madeira maior foi a quantidade de finos gerados.

### **2.3 Processo de pirólise da madeira**

O processo de pirólise é conhecido como a decomposição térmica de materiais orgânicos, como madeira na ausência ou presença controlada de oxigênio. Resultando em uma fração sólida (carvão vegetal), além dos gases condensáveis (líquido pirolenhoso) e não condensáveis. Durante esse processo os componentes químicos e anatômicos são modificados, levando a liberação de gases, vapor d'água, líquidos orgânicos, formação da fração líquida (alcatrão) e sólida (carvão).

Os voláteis (co produtos) podem ser recuperados por condensação, dando origem a um líquido chamado de alcatrão da madeira. Esse alcatrão pode ser separado por decantação para originar uma fração líquida (ácido pirolenhoso) e uma fração oleosa insolúvel que corresponde respectivamente, a 35% e 7% da massa inicial da madeira (ANTAL e GRONOLI, 2003).

A carbonização envolve, portanto, fenômenos demasiadamente complexos que originam um elevado número de compostos. O processo de pirólise pode ser refinado em etapas de acordo com a temperatura, reação predominante e produtos formados. Estas etapas podem ocorrer de modo simultâneo durante a carbonização (CAMPOS, 2008).

### **2.3.1 Efeito da temperatura final de carbonização**

Sabe-se que a temperatura final de carbonização aumenta a concentração de carbono fixo no carvão vegetal. Este parâmetro desempenha um papel fundamental nas diversas reações durante o processo de carbonização, levando à geração de produtos com características físicas e químicas diferentes. As curvas termogravimétricas têm mostrado que quando o objetivo é a produção de carvão vegetal, o processo de pirólise não deve ser conduzido acima de 450 °C. Quanto maior o controle da temperatura no interior do forno, maior será a homogeneidade do carvão produzido (GOMEZ et al., 2000; TRUGILHO e SILVA, 2001).

São muitas as reações químicas que ocorrem durante o processo de pirólise e os fenômenos de reação estão estreitamente relacionados com a temperatura à qual a biomassa é submetida. O aumento na temperatura final de pirólise causa uma diminuição no rendimento final de sólido produzido (carvão), aumento nos produtos gasosos e aumento da concentração de carbono fixo da concentração sólida (GOMES e OLIVEIRA, 1980; SYRED et al., 2006).

A temperatura final de carbonização é, portanto, uma das variáveis responsáveis pela qualidade final do carvão vegetal. Ela desempenha um papel fundamental nas diversas reações durante o processo de carbonização, levando à geração de produtos com características físicas e químicas diferentes (TRUGILHO e SILVA, 2001).

Kwon et al., (2009) trabalhando com a carbonização em diferentes temperaturas da madeira de *Quercus variabilis* ressaltam que o volume e a massa das amostras de madeiras decrescem com o aumento da temperatura de carbonização. Ressaltando ainda que, o colapso intenso dos vasos na direção tangencial é acima de 350°C.

### **2.3.2 Efeito da taxa de aquecimento de pirólise sobre o rendimento em carvão**

Milosavljevic et al., (1996), estima que uma “linha” divisória entre taxas de aquecimento baixas e elevadas como sendo 10°C.min<sup>-1</sup>. Estes autores conduziram experimentos termogravimétricos com taxas de aquecimento variando de 0,1 a 60 °C.min<sup>-1</sup> e concluíram que não existem evidências térmicas de grandes alterações nos mecanismos de pirólise a altas ou baixas taxas de aquecimento. Os autores realizaram experimentos com recipientes abertos e tampados, e constataram que baixas taxas de aquecimento combinadas a limitações no escape dos voláteis, garantem aumentos significativos no rendimento em carvão. Infelizmente, esse tipo de experimento não permite controlar a pressão de pirólise (recipiente tampado) em equipamento termogravimétrico.

A relação da taxa de aquecimento e rendimento em carvão é um pouco controversa. Segundo Antal e Grønli (2003), estudos realizados com pequenas amostras de biomassa por termogravimetria, onde os vapores são rapidamente removidos do ambiente contendo a amostra, indicaram que baixas taxas de aquecimento têm pouco ou nenhum efeito no rendimento. Antal et al., (2000), acreditam que experimentos que indicam o aumento do rendimento em carvão com a redução da taxa de aquecimento, são devidos ao tempo de retenção dos gases e a ocorrência de reações secundárias.

O resultado de baixa influência da taxa de aquecimento nas faixas estudadas sobre o comportamento térmico dos materiais analisados é interessante do ponto de vista econômico, pois o tempo de carbonização pode ser reduzido em processos industriais, tipicamente de oitos dias (CAMPOS, 2008).

#### **2.4 Carvão vegetal**

O carvão vegetal é uma fonte secundária de energia produzida a partir da pirólise (ou carbonização) da madeira, em temperaturas acima de 270 °C, na ausência ou presença de quantidades controladas de oxigênio atmosférico. Este, possui quatro principais funções no processo siderúrgico: (i) agente redutor nas reações termoquímicas com o minério de ferro, (ii) fornecendo energia para liquefazê-lo, (iii) sustentação do colchão de minério e, (iv) permite a entrada do ar e circulação dos gases. Para cada tonelada de aço produzida, são consumidos três metros cúbicos de carvão vegetal (COTTA, 1996; RAAD, 2000; TRUGILHO e SILVA, 2001; ANTAL e GRONLI, 2003; SYRED et al., 2006; TRUGILHO, 2006).

Em relação à perda de massa, a produção de carvão pode ser dividida em duas etapas essenciais que são de secagem e a pirólise. Cada etapa envolve o fenômeno da transferência de calor e de massa, reações químicas e mudanças das estruturas anatômicas da madeira e do carvão. O lenho submetido à carbonização sofre alterações diversas: (a) coloração - escurecimento do lenho, que ao final do processo se torna negro; (b) propriedades físicas – perdas consideráveis de massa, contração, possíveis distorções anatômicas resultantes da carbonização e perdas de muitas substâncias voláteis; (c) propriedades químicas – conversões contínuas e graduais dos três principais componentes químicos do lenho (celulose, hemiceluloses e lignina), formando um produto novo, rico em carbono e

quimicamente distinto (HAGGE et al., 2002; HASS et al., 2009; PARK et al., 2010).

As hemiceluloses e celulose se decompõem quase completamente em temperaturas próximas 250°C e 300°C, respectivamente. A Lignina é mais estável e se decompõe gradualmente entre 250 e 600°C. Essa decomposição lenta da lignina é geralmente responsável pelo rendimento e pela resistência mecânica do carvão. A estrutura do carvão resultante apresenta características pouco aromáticas, que dependem das condições do processamento e do histórico térmico da madeira. Um aumento da temperatura e do tempo de permanência a altas temperaturas podem mudar ou melhorar a estrutura anatômica do carvão. Alguns estudos têm demonstrado que o aumento da temperatura de pirólise leva primeiramente a uma perda das propriedades mecânicas do carvão a uma temperatura de 550°C, seguido de um aumento significativo das propriedades mecânicas nos níveis de temperaturas a 700-900° C (MENDES et al., 1982; RAAD et al., 2006; BOURKE et al., 2007; KWON et al., 2009).

A densidade da madeira também afeta a qualidade final do carvão vegetal. Segundo Trugilho (2006), existe uma relação direta ou proporcional entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Portanto, quanto maior densidade básica da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal.

Oliveira (1988) ressalta que o acréscimo na porcentagem de material volátil ocasiona a redução no poder calorífico.

Segundo Pereira (2000), um carvão vegetal de boa qualidade deve ter um teor de minerais inferiores a 3%.

Jara (1989) define o poder calorífico da madeira como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira, dado em cal/g ou kcal/kg. Há dois tipos de poder calorífico o superior e inferior. O poder calorífico superior é obtido através de equipamentos chamados

de calorímetro que mede a máxima quantidade de energia que um combustível pode liberar, pois aqui o calor latente do vapor d'água não é perdido. Já o poder calorífico inferior não leva em consideração o calor latente do vapor d' água. O poder calorífico da madeira pode variar de 3.000 a 5400 kcal/kg dependendo da espécie (TRUGILHO, 2006).

Segundo Cunha et al., (1989) o poder calorífico da madeira é diretamente proporcional ao teor de lignina e extrativos.

Satanoka (1963) citado por Brito e Barrichelo (1977), afirma que madeiras com maior teor em lignina resultam em carvão com maior poder calorífico.

Segundo Raad (2004), existem vantagens econômicas e ambientais para a utilização do carvão vegetal como termo redutor, dentre elas (a) a biomassa florestal é a mais limpa e eficiente para se estocar carbono e concentrar energia, (b) as plantações florestais podem apresentar espécies de rápido crescimento que são sequestradoras de carbono altamente eficientes, liberando oxigênio para a atmosfera.

## **2.5 Florestas energéticas: *Eucalyptus***

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceas, é nativo da Austrália, cobrindo cerca de 90% da área do país, formando densas florestas nativas. Além do elevado número de espécies, existe um número muito grande de variedades e híbridos. O gênero *Eucalyptus* é um dos mais plantados em todo o mundo, com mais de setecentas espécies destinadas a diversos usos nos setores industriais madeireiros. Foi considerado em 2006, como sendo importante para a economia de mais de cem países, com uma área plantada com mais de dezenove milhões de hectares em todo o mundo. O gênero *Eucalyptus* é estratégico para o setor industrial brasileiro, pois é matéria-prima para a produção de celulose, carvão, lenha, postes, dormentes, painéis, madeira serrada e móveis. Entre os aspectos

mais relevantes da espécie estão rápido crescimento em ciclo de curta rotação, alta produtividade florestal, expansão e direcionamento de novos investimentos por parte de empresas de segmentos que utilizam sua madeira como matéria prima em processos industriais (ABRAF, 2010).

## **2.6 Cerrado brasileiro**

O Cerrado é a segunda maior formação vegetal do Brasil, ocupando originalmente cerca de dois milhões de hectares, o equivalente a 24% do território nacional. Abrange o Distrito Federal e mais dez estados: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Maranhão, Bahia, Piauí, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. O bioma Cerrado faz limite com mais quatro outros biomas brasileiros: Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal. Caracterizado por apresentar cobertura florestal composta por árvores pequenas e retorcidas, o cerrado possui grande diversidade de espécies vegetais. Estima-se que existam aproximadamente 10 mil espécies vegetais neste bioma, podendo apresentar desde formações campestres bem abertos até formações densas de florestas, como o cerradão. Além da grande diversidade de espécies vegetais, o cerrado possui alta diversidade de solo e de fauna. Por essas razões é considerado um dos biomas mais ricos, mas também um dos mais ameaçados do mundo (MEYERS et al., 2000; BRASIL, 2010).

### **2.6.1 Espécies nativas do cerrado potenciais para geração de energia**

#### **2.6.1.1 *Casearia sylvestris* SW. (Salicaceae)**

Popularmente conhecida como pau-de-lagarto a *Casearia sylvestris* é uma espécie pioneira, perenifólia, heliófila, pertencente à família Salicaceae. O

gênero *Casearia* possui em todo o mundo cerca de 180 espécies. Pode atingir 20m de altura e diâmetro de 40 cm quando adulta. Possui tronco reto a tortuoso e folhas simples. Produz madeira moderadamente pesada, com densidade de 0,84 g/cm<sup>3</sup>, dura e de baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos. A madeira é utilizada na construção civil, tabuas de assoalhos, tacos, marcenaria e carpintaria, lenha (CARVALHO, 1994; LORENZI, 2000).

#### **2.6.1.2 *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae)**

A *Guazuma ulmifolia* é conhecida como mutamba, pertence à família Malvaceae, é uma espécie pioneira, perenifólia, semidecídua e heliófita. Pode chegar a um porte de até 30m de altura e 60cm de diâmetro quando adulta, podendo atingir uma produção volumétrica estimada de até 31 m<sup>3</sup>/ha/ano aos 8 anos de idade. Possui tronco reto a levemente tortuoso e folhas simples alterna. Ocorre desde a Amazônia até o Paraná. Sua madeira é moderadamente densa, com densidade de 0,50 g/cm<sup>3</sup> a 0,68g/cm<sup>3</sup>. Sendo empregada na confecção de tonéis, construções internas, caixotaria, carvão e pasta celulósica, ainda devido ao seu rápido crescimento é bastante utilizada na recuperação de áreas degradadas (LORENZI, 2000 ; CARVALHO, 2007).

#### **2.6.1.3 *Luehea divaricata* Martius e Zuccarini (Crassulaceae)**

Conhecida popularmente como Açoita-cavalo a *Luehea divaricata* é uma espécie heliófila, pertencente à família Crassulaceae. Apresenta árvore caducifólia, com porte de 5 m a 15 m de altura e 20 cm a 50 cm de diâmetro a altura do peito, mas podem atingir até 30 m de altura e 100 cm de diâmetro. Possui tronco tortuoso e folhas simples e alternas. É uma espécie pioneira de rápido crescimento, podendo atingir até 3,5 m aos 2 anos de idade. No Brasil

ocorre no Sul da Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul. Açoita-cavalo possui madeira moderadamente pesada, com densidade de  $0,64 \text{ g/cm}^3$ , textura média, grã direta, resistente, flexível e de baixa resistência ao ataque xilófago. Sua madeira é empregada na confecção de móveis curvados, na construção civil, caixotaria, coronha de armas (CARVALHO, 1994; LORENZI, 2000).

#### **2.6.1.4 *Rapanea ferruginea* (Ruiz e Pavon) Mez. (Primulaceae)**

Conhecida popularmente por capororoca e canela-azeitona a *Rapanea ferruginea* é uma espécie pioneira, perenifolia, heliófila, seletiva higrófila, pertencente à família Primulaceae. Apresenta porte de 5 m a 10 m de altura e de 20 cm a 30 cm de diâmetro, podendo atingir até 20 m de altura e 60 cm de diâmetro. Sendo encontrada em vários estados como Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Apresenta madeira moderadamente densa, com densidade de  $0,50 \text{ g/cm}^3$  a  $0,60 \text{ g/cm}^3$  empregada em construções internas, confecção de móveis, lenha e carvão (LORENZI, 2000).

#### **2.6.1.5 *Trema micrantha* (L.) Blum. (Ulmaceae)**

*Trema micrantha* é popularmente conhecida como pau-de-pólvora, é uma espécie pioneira, perenifolia ou semidecídua, heliófila, pertencente à família Ulmaceae. Possui porte de 4 m a 15 m de altura e de 10 cm a 25 cm de diâmetro, podendo atingir 20 m de altura e 70 cm de diâmetro. Ocorre nos Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul até o Rio Grande do Sul. A madeira é leve, possuindo densidade básica média de  $0,40 \text{ g/cm}^3$ , sendo

empregada na confecção de caixotes, na fabricação de pólvora e lenha (CARVALHO, 1994; LORENZI, 2000).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material de estudo

As cinco espécies nativas do Cerrado utilizadas foram: *Luehea divaricata*, *Casearia sylvestris*, *Guazuma ulmifolia*, *Rapanea ferruginea* e *Trema micrantha*. Estas espécies foram escolhidas por apresentarem histórico na utilização como lenha e carvão, e também por serem espécies pioneiras de rápido crescimento, bem como características anatômicas, físicas e químicas distintas. As espécies do cerrado foram coletadas na Fazenda Campo Lindo, localizada no acesso Br 265, quilômetro 324 sentido São João Del Rei estrada Cachoeira do Pilão, na Cidade de Itumirim- MG.

Além das espécies nativas do cerrado, foram utilizados nesse estudo dois clones de *Eucalyptus* obtidos de plantios comerciais já destinados a produção energética. Um dos clones é da espécie *Eucalyptus urophylla* e o outro o híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* com idade de 7 anos e diâmetro variando de 16,23 a 17,37cm a 1,3m (DAP). Plantados em talhões adjacentes com espaçamento de 3x3m, em terreno com topografia plana, na região de Paraopeba, estado de Minas Gerais.

#### 3.2 Amostragem e retirada dos corpos de prova para anatomia, secagem e carbonização

Para cada espécie do Cerrado foram amostradas quatro árvores, retirando se um disco de 5 cm da base. O disco por sua vez, foi seccionado em cunhas de opostas conforme a Figura 4. Posteriormente essas cunhas foram subdivididas em duas cunhas de aproximadamente de 2,5cm, considerando as perdas do corte. A cunha superior foi utilizada para a caracterização anatômica e a inferior para as

análises de secagem e carbonização. Um cubo nas dimensões aproximadas de 2x2x2cm foi retirado da madeira próximo a casca, objetivando a madeira mais adulta.

Da mesma forma, para as espécies de *Eucalyptus* porém foram utilizadas no presente trabalho apenas uma cunha para secagem e carbonização.

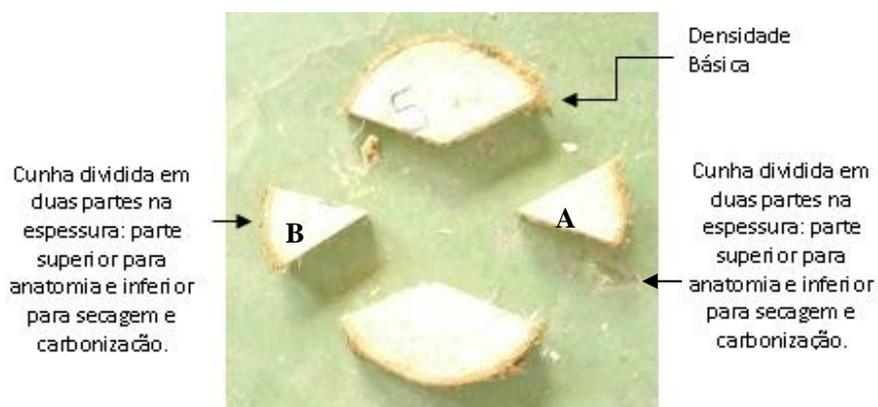


Figura 4 Subdivisão dos discos para as respectivas análises de anatomia, secagem e carbonização.

### 3.3 Densidade básica da madeira

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

### 3.4 Análises anatômicas

A caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus* e das espécies do cerrado foi executada no Laboratório de Anatomia da Madeira na Universidade Federal de Lavras – MG, no Departamento de Ciências Florestais, seguindo a

Norma para descrição Anatômica do Comitê IAWA (1989). Seguindo adaptações feitas por Coradin e Muniz (1992).

A visualização e caracterização qualitativa do carvão procederam se no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura na Universidade Federal de Lavras – MG.

#### **3.4.1 Preparo das lâminas permanentes**

Os 48 corpos de prova para caracterização anatômica foram submetidos a saturação em água e os cortes histológicos foram obtidos com o auxílio de um micrótomo de deslize, os cortes histológicos micrométricos, com espessura de 16 a 25  $\mu\text{m}$ . Primeiramente os cortes foram clarificados com uma solução de hipoclorito de sódio comercial (20%); em seguida os cortes foram imersos em série alcoólica: álcool 20% (5min.), coloração com safranina hidro - alcoolica (5 min.), álcool 50% (5 min.), álcool 70% (5 min), álcool absoluto (5 min.), álcool-acetato 1:1 (5 min.) e acetato (5 min.). Após a coloração e desidratação, os cortes serão montados em lâmina e lamínula em Enterlan.

#### **3.4.2 Preparo do material macerado**

Para a obtenção do material macerado, foi utilizado o método de Franklin (1945). Pequenas amostras longitudinais de madeira foram colocadas em uma mistura de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio na proporção de 1:1 e levadas à estufa, a 105° C, por 24 horas ou mais, dependendo da dureza de cada espécie. Em seguida, o material dissociado foi lavado em água corrente e corado com safranina hidro-alcoolica. Para observação dos elementos celulares dissociados, serão confeccionadas lâminas temporárias, misturando-se uma pequena quantidade de macerado em gotas de glicerina entre lâmina e lamínula.

### **3.5 Secagem da madeira**

Para a secagem (curvas de dessecção e absorção) foram utilizados 48 corpos de prova, condicionados em estufa umidificadora HotPack com circulação de ar constante e umidade relativa e temperatura controlados, observando as condições de funcionamento da estufa.

#### **3.5.1 Determinação do teor de umidade**

As 48 amostras foram depois saturadas em água corrente durante 20 dias em dissecador sem sílica gel, sob vácuos diários. Sua massa aferida a cada 24 horas até massa constante para determinação da massa saturada. Em seguida as amostras saturadas foram colocadas novamente na estufa de umidificação Hotpac com Umidade relativa no interior da estufa 90% e temperatura estável a 30°C , para determinação da contração presente acima do PSF. Ao final as amostras foram levadas a estufa convencional durante 48 horas a  $\pm 103^{\circ}\text{C}$ , para obtenção de sua massa absolutamente seca.

A obtenção das curvas de contração durante um ciclo secagem se deu da seguinte forma:

- a) 1º etapa: dessecção: sendo que a temperatura permanece constante a 30°C e a umidade descesse 10% a cada 24 horas, uma vez que a massa permaneça constante começando a 90% até 40% de umidade relativa do ar de acordo com as condições estabelecidas pela estufa umidificadora. As dimensões iniciais de cada amostra foram mensuradas nas direções tangencial, radial e longitudinal, assim como sua massa foi obtida.

- b) 2º etapa: absorção: temperatura constante em 30°C e umidade relativa do ar aumentando 10% a cada 24 horas de 40% até 90% de umidade relativa do ar, sendo que suas dimensões tangencial, radial e longitudinal foram periodicamente mensuradas e sua massa obtida, assim como na 1º etapa. Para mensurações das dimensões e aferimento da massa das amostras, foram utilizados paquímetro digital com 0,01mm de precisão e balança analítica com 10<sup>-1</sup>g de precisão.

Para determinação do teor de umidade em base seca, foi utilizada a seguinte equação:

$$U = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

onde:

U = umidade base seca (%)

m(t) = massa da amostra no tempo t (g),

m<sub>s</sub> = massa da amostra seca a ±105°C (g).

Ainda para a obtenção do máximo teor de umidade teórico foi utilizada a equação 2:

$$MTU = \frac{D_r - D_b}{D_r \times D_b} \times 100 \quad (2)$$

onde:

MTU = máximo teor de umidade (%)

$D_r$  = densidade da parede celular ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$D_b$  = densidade básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Segundo Kellog e Wangaard (1969), citados por Skaar (1972), a densidade da parede celular é de aproximadamente  $1,54 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

### 3.6 Contração durante a secagem da madeira

Os corpos de prova foram submetidos à secagem na câmara umidificadora e suas dimensões e massa aferidas a cada  $\pm 24$  horas, até valores de massa constantes. Após as curvas de desorção e absorção as amostras foram levadas a estufa convencional a  $103 \pm$  até massa constante (massa absolutamente seca) e suas dimensões mensuradas para obtenção da contração total da madeira de acordo com a equação 3:

$$c = \frac{d_v - d_i}{d_v} \times 100 \quad (3)$$

onde:

C = contração tangencial, radial e longitudinal (%),

$D_i$  = dimensão tangencial, radial e longitudinal com umidade  $i$  (mm),

$D_v$  = dimensão tangencial, radial e longitudinal da madeira saturada (mm).

### 3.7 Carbonização das amostras de madeira

Posteriormente a secagem, as amostras foram carbonizadas (todas de uma só vez) em forno do tipo mufla a uma taxa de aquecimento de  $1,67^\circ\text{C}/\text{minuto}$ , até a temperatura final de  $450^\circ\text{C}$  e permaneceram nesta temperatura por 30 minutos.

A temperatura inicial foi de 100 °C com tempo total de carbonização foi, portanto, de 4 horas.

Após a carbonização as amostras de carvão seco foram pesadas para obtenção do rendimento gravimétrico do carvão conforme a equação 4, e suas dimensões mensuradas, para os cálculos de contrações finais do carvão. As dimensões do carvão foram mensuradas em paquímetro digital e a massa aferida em balança analítica com 0,01mm e 10<sup>-1</sup>g de precisão, respectivamente, da mesma forma as mensuração e pesagens da madeira.

$$RGC = \frac{MCS}{MMS} \times 100 \quad (4)$$

onde:

RGC = rendimento gravimétrico do carvão (%)

MCS = massa do carvão seco (g),

MMS = massa da madeira seca (g).

### **3.8 Microscopia de luz refletida e microscopia eletrônica de varredura**

Posteriormente a secagem e a carbonização foram realizadas as análises visuais das amostras da madeira e do carvão. As amostras de madeira foram observadas em microscópio de luz refletida e as amostras do carvão submetidas análises visuais, microscopia de luz refletida e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para observações anatômicas como destruição das células de parênquima axial e radial, distorção da parede dos vasos, presença de rachaduras e fendas. A partir dessas imagens, uma descrição macroscópica qualitativa desses carvões foi definida.

### **3.9 Delineamento experimental e análises dos dados**

O delineamento foi inteiramente casualizado, composto por sete tratamentos (espécies e clones), sendo quatro indivíduos para cada tratamento e duas cunhas por indivíduo, totalizando dezesseis repetições por espécie do cerrado e oito para as espécies de *Eucalyptus*.

Para análises e tabulação dos resultados dos caracteres anatômicos, densidade básica, secagem da madeira e rendimento gravimétrico do carvão, utilizou-se o Software Excel (com valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão, erro padrão e coeficiente de variação).

As espécies e clones foram comparados por estatística descritiva e qualitativa através de imagens obtidas em microscópio de luz óptica e microscópico eletrônico de varredura no caso do carvão.

As espécies foram submetidas ao teste Tukey de comparação de médias a 95% de probabilidade para densidade básica da madeira, máximo teor de umidade saturada, rendimento gravimétrico e contrações do carvão. O software estatístico utilizado foi o R versão 2.13.0.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade básica da madeira

Os valores de densidade básica das espécies estudadas variou de 0,356g/cm<sup>3</sup> para *T. micrantha* que apresentou a menor densidade básica a 0,649g/cm<sup>3</sup> para *C. sylvestris* que apresentou maior densidade básica da madeira.

Os valores médios da densidade básica seguido de comparação múltipla das espécies estão relacionados na Figura 5. O *Forest Products Laboratory* (1955) classifica as madeiras quanto à densidade básica em: leve (0,30-0,36 g/cm<sup>3</sup>), moderadamente pesada (0,42-0,50 g/cm<sup>3</sup>), pesada ou densa (0,50-0,60 g/cm<sup>3</sup>) e muito pesada (0,60-0,72 g/cm<sup>3</sup>). Pela classificação pode se observar que *C. sylvestris* e *G. ulmifolia* são consideradas madeiras muito pesadas ou densas, *R. ferruginea*, clone de *E. urophylla* x *E. camaldulensis* e *E. urophylla* são pesadas ou densas, *L. divaricata* é considerada moderadamente pesada e enquanto a *T. micrantha* é considerada leve.

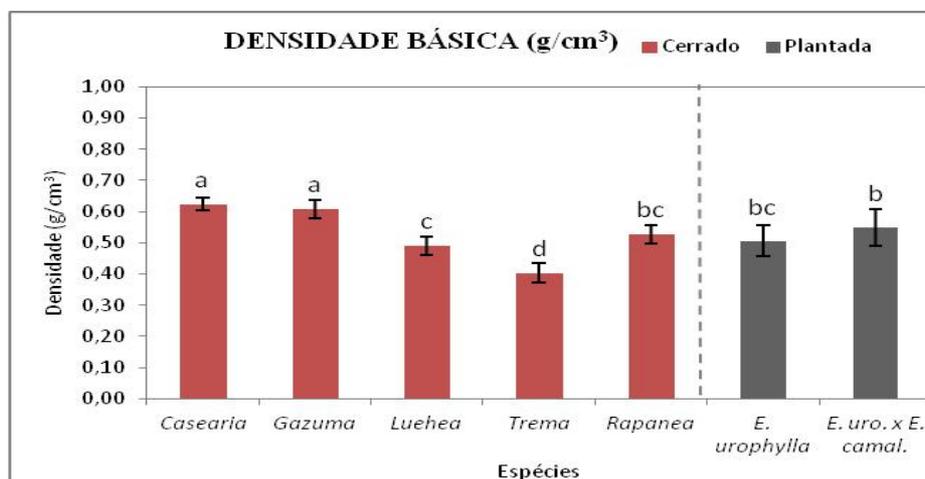


Figura 5 Valores médios de densidade básica para espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus*.

Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. O coeficiente de variação igual a 6,83% mostra que os dados são confiáveis.

Vale et al. (2002), estudando a qualidade das madeiras do cerrado para fins energéticos, encontrou variação da densidade básica da madeira de 0,20 g/cm<sup>3</sup> a 0,78 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados obtidos nesse trabalho se encaixam nos resultados encontrados por esses autores.

Brito e Barrichello (1977), estudando *Eucalyptus grandis* com sete anos e *Eucalyptus urophylla* com seis anos, encontraram valores médio de 0,56 g/cm<sup>3</sup> e 0,51 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Os resultados obtidos para *E. urophylla* foram de 0,494g/ cm<sup>3</sup>, menor do que o encontrado por esses autores.

Quinhones (2011) estudando os clones de *E.urophylla* e o híbrido *E. camaldulensis x E. urophylla* encontrou valores de densidade básica de 0,480g/cm<sup>3</sup> e 0,560 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, conforme os resultados obtidos nesse trabalho, *E. urophylla* obteve menor densidade básica se comparado com o híbrido de *E. urophylla x E.camaldulensis*.

A densidade básica da madeira está intimamente relacionada com os elementos anatômicos, espessura da parede e comprimentos das fibras, proporção de vasos e células parenquimáticas. A espécie com a maior densidade básica foi *C. sylvestris*, que também obteve maior frequência de vasos por mm<sup>2</sup>, com média de 61, porém o diâmetro desses vasos foram os menores encontrados nesse estudo, com valores médios de 83,27µm. Já a espécie que obteve maior valor médio para espessura da parede foi *R. ferruginea* com 5,97 µm e com densidade média de 0,523 g/cm<sup>3</sup>.

Panshin e Zeeuw (1964) afirmam que as variações na densidade resultam das dimensões das células e da interação com a quantidade de componentes passíveis de extração por unidade de volume das madeiras. Estes autores ressaltam ainda que há uma variação no sentido medula-casca e base-topo.

A densidade da madeira varia dentro da mesma espécie, entre limites mais ou menos próximos, sendo influenciada por fatores ambientais como fertilidade do solo e disponibilidade de água, o que pode fornecer maior ou menor volume ao material, lhe conferindo maior ou menor espessura das paredes dos elementos celulares.

## **4.2 Anatomia das espécies do cerrado e clones de *eucalyptus***

### **4.2.1 *Casearia sylvestris* Swartz.(Salicaceae)**

#### **4.2.1.1 Descrição microscópica**

- a) Camadas de crescimento delimitadas por zonas estreitas de fibras achatadas radialmente.
- b) Vasos com porosidade em difusa, em arranjo radial, predominante múltiplos, podendo ocorrer solitários; muito numerosos podendo ocorrer de 76-105 por mm<sup>2</sup> (média de 96); vasos grandes com comprimento variando de 505-778µm (média de 637µm); diâmetro tangencial dos elementos pequenos de 46–101µm (média de 78µm); com contorno circular, placas de perfuração simples; apêndices presentes em uma das extremidades, raramente em ambas; vasos desobstruídos; pontoações intervasculares alternas com diâmetro de 0,43-3,39µm (média 2,7µm); pontoações raio-vasculares com aréolas distintas; semelhantes às intervasculares em tamanho e forma, no raio da célula.
- c) Fibras não septadas, curtas com comprimento de 1087-1342µm (média de 1184µm); espessura da parede de 2,7-6,9µm (média de 4,3µm);

- d) Parênquima axial indistintos sob lente, paratraqueal escasso;
- e) Raios multisseriados, heterogêneos, com duas classes distintas, comumente pequenas podendo ocorrer raios fusionados muito grandes com até 63 células de altura; De 3 a 5 células de largura, raios agregados presentes; altura em numero de células 15-21 (média 17), não estratificados, corpo dos raios constituídos por células procumbentes com células marginais quadradas e/ou eretas; raios por mm linear de 11-19 (média 15). Cortes anatômicos e os elementos dissociados são apresentados na Figura 6.

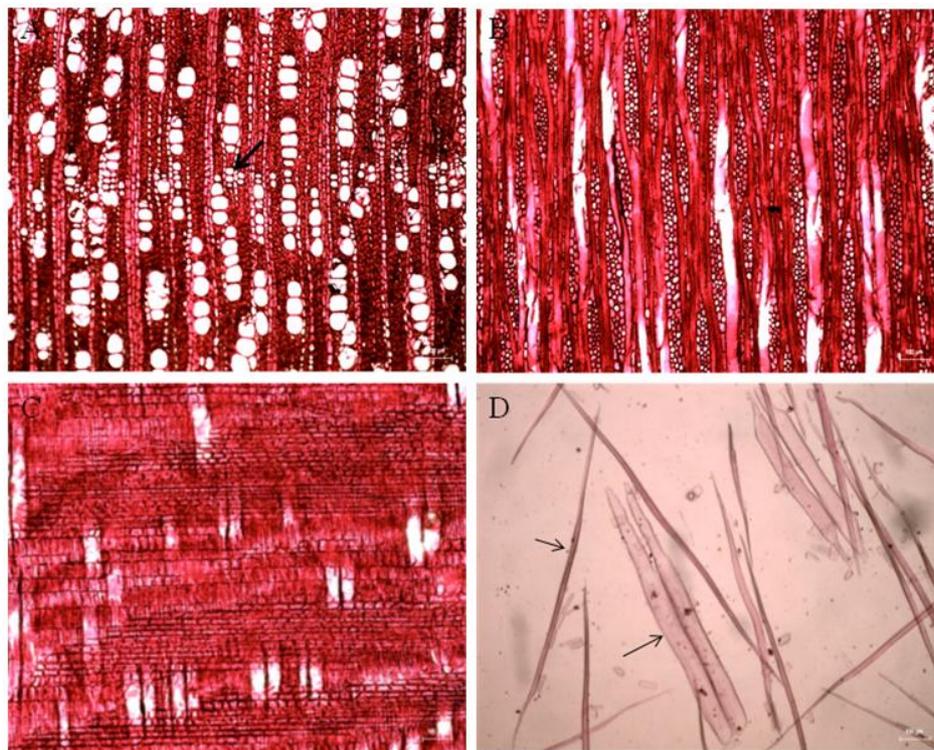


Figura 6 Caracteres anatômicos de *Casearia sylvestris*. (a) corte transversal (seta indica camadas de crescimento), (b) corte tangencial, (c) corte radial e (d) elementos celulares dissociados fibras e vasos (setas).

## 4.2.2 *Gazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae)

### 4.2.2.1 Descrição microscópica

- a) Camadas de crescimento distintas pela porosidade em anel semi poroso;
- b) Vasos com arranjo indefinidos, predominantemente solitários, podendo ocorrer múltiplos 2 a 7 nas limitações dos anéis; numerosos podendo ocorrer de 15 a 27 por  $\text{mm}^2$  (média de 21); pequenos com comprimento variando de 231-319 $\mu\text{m}$  (média de 282 $\mu\text{m}$ ); diâmetro tangencial dos elementos de vasos de pequenos a médios de 68-120 $\mu\text{m}$  (médias de 92 $\mu\text{m}$ ); formato angular, placas de perfuração simples; vasos desobstruídos; pontuações intervasculares alternas com diâmetro de 3,67-5,06 $\mu\text{m}$  (média 4,30 $\mu\text{m}$ ); pontoações rádio-vasculares com aréolas distintas, semelhantes às intervasculares em tamanho e forma, no raio da célula;
- c) Fibras não septadas, curtas com comprimento de 1194-1516 $\mu\text{m}$  (média de 1331 $\mu\text{m}$ ); espessura da parede de 3,81-4,85 $\mu\text{m}$  (média de 4,4 $\mu\text{m}$ );
- d) Parênquima axial paratraqueal escasso, podendo ocorrer difuso em agregados;
- e) Raios multisseriados, heterogêneos, largura de 5-8 células e altura em número de células 20-28 (média 23), não estratificados, raios agregados presentes, Células Tilosas presentes, corpo do raio constituído por células procumbentes com uma fila de células marginais quadradas e/ou eretas; muito poucos a poucos raios por mm linear de 11-13 (média 12). Cristais presentes em câmaras nas

fibras. Cortes anatômicos e os elementos celulares são mostrados na Figura 7 a seguir:

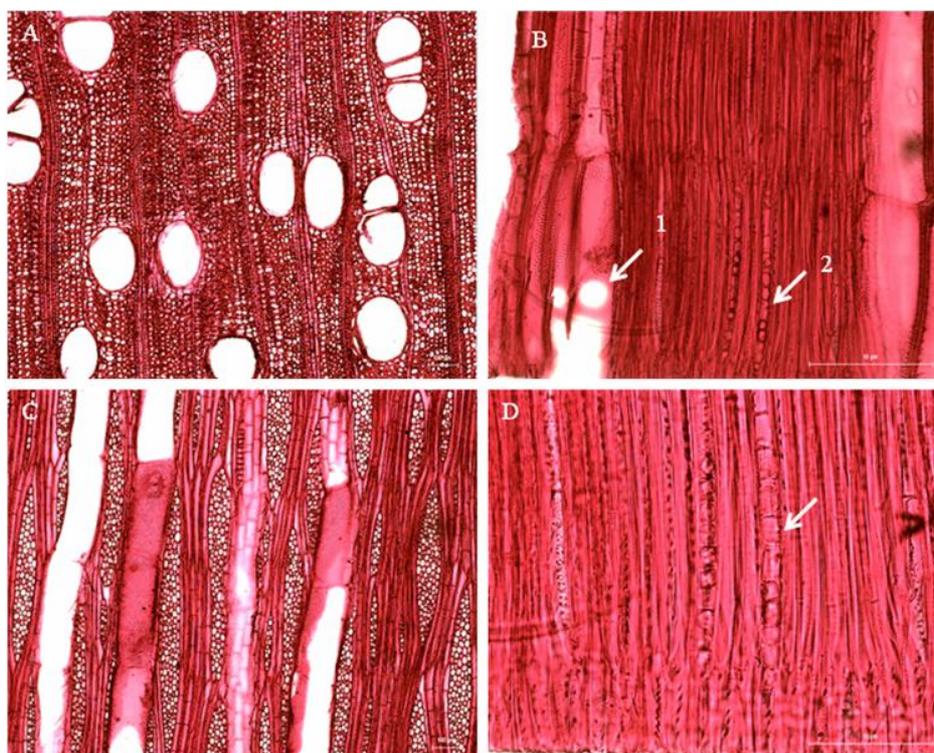


Figura 7 Caracteres anatômicos de *Guazuma ulmifolia*. (a) Corte transversal, (b) corte radial (seta 1 e 2 indicam respectivamente placa de perfuração simples e cristais em câmaras fibrosas, (c) corte tangencial e (d) corte radial (cristais em câmaras fibrosas).

#### 4.2.3 *Luehea divaricata* Mart. (Crassulaceae)

##### 4.2.3.1 Descrição microscópica

- a) Camadas de crescimento indistintas;
- b) Vasos com porosidade difusa, em arranjo indefinido, solitários e múltiplos 2-3, podendo ocorrer múltiplos de até 5; vasos, pouco

numerosos podendo ocorrer de 11-18 por  $\text{mm}^2$  (média de 15); diâmetro tangencial pequeno de 84-116 $\mu\text{m}$  (média de 101 $\mu\text{m}$ ); formato arredondado, com comprimento variando de 273-320 $\mu\text{m}$  (média de 303 $\mu\text{m}$ ); placas de perfuração simples; vasos desobstruídos, pontuações intervasculares alternas com diâmetro 3,06-5,78 $\mu\text{m}$  (média de 4,63 $\mu\text{m}$ ); pontuações raio-vasculares semelhantes as intervasculares em tamanho e forma;

- c) Fibras não septadas, curtas com comprimento de 1206-1534 $\mu\text{m}$  (média de 1387 $\mu\text{m}$ ); espessura da parede 2,40-4,70 $\mu\text{m}$  (média de 4,04 $\mu\text{m}$ ).
- d) Parênquima axial difuso em agregados;
- e) Raios duas classes distintas de raios, unisseriados e multisseriados, não estratificados, largura em numero de células de 2-7 células; altura em número de células 17-28 (média 23), corpo do raio constituído por células procumbentes com uma fila de células marginais quadradas e/ou eretas; raios numerosos por mm linear de 7-11 (média de 9). Os caracteres anatômicos de *Luhea divaricata* são evidenciados na Figura 8. Os valores quantitativos encontrados nesse trabalho são semelhantes aos encontrados por Gatto et al. (2008), que estudaram segregação do lenho juvenil e adulto utilizando parâmetros anatômicos como comprimento e espessura da parede das fibras.

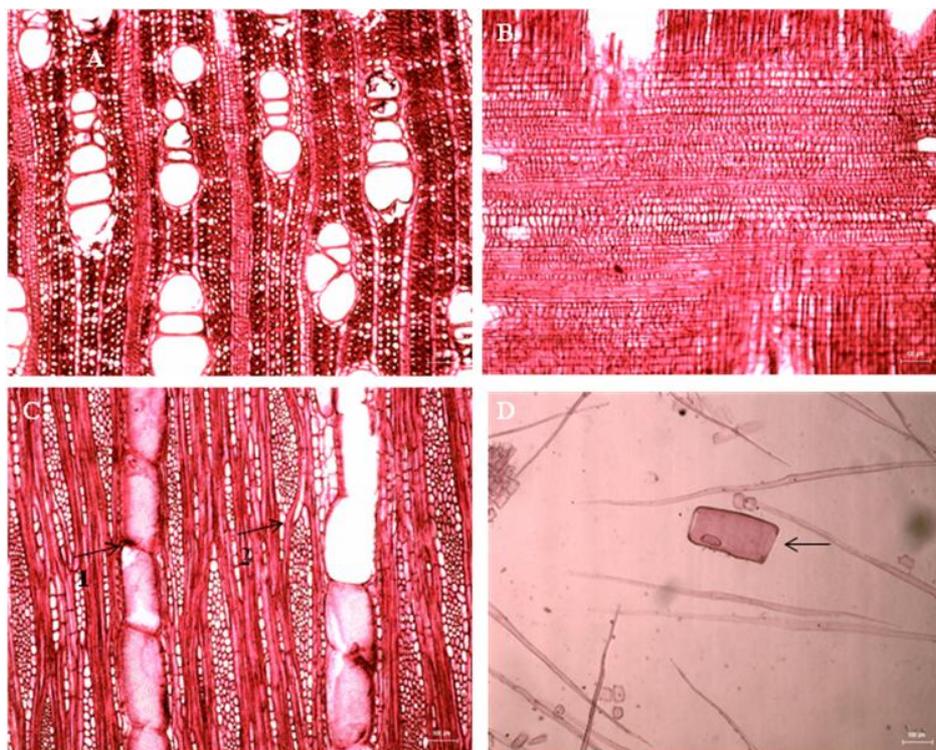


Figura 8 Apresenta caracteres anatômicos de *Luehea divaricata*. (a) Corte transversal, (b) corte radial, (c) tangencial (seta 1 e 2 indicam respectivamente raios agregados e vasos), (d) seta indicando elemento de vasos.

#### 4.3.4 *Rapanea ferruginea* (Ruiz & Pavon) Mez. (Primulaceae)

##### 4.3.4.1 Descrição microscópica

- a) Camadas de crescimento indistintas;
- b) Vasos com porosidade difusa, em arranjo tendendo ao radial, predominante múltiplos de 3 a 7, raramente solitários; muito numerosos podendo ocorrer de 31-54 por  $\text{mm}^2$  (média de 41); comprimento variando de 270-405 $\mu\text{m}$  (média de 341 $\mu\text{m}$ ); diâmetro

dos elementos de vasos pequenos de 67–89 $\mu\text{m}$  (média de 79 $\mu\text{m}$ ); com contorno arredondado, placas de perfuração simples; apêndices presentes em uma das extremidades, raramente em ambas; vasos desobstruídos; pontoações intervasculares areoladas alternas com formato hexagonal, diâmetro de 4,24-5,09 $\mu\text{m}$  (média 4,7 $\mu\text{m}$ ); pontoações raio-vasculares com aréolas distintas; semelhantes às intervasculares em tamanho e forma, no raio da célula;

- c) Fibras libriformes, não septadas, curtas com comprimento de 657-893 $\mu\text{m}$  (média 780 $\mu\text{m}$ ); espessura da parede de 5,23-6,96 $\mu\text{m}$  (média 6 $\mu\text{m}$ );
- d) Parênquima axial paratraqueal vasicêntrico escasso;
- e) Raios multisseriados, heterogêneos, com células envolventes, podendo ocorrer raios agregados, extremamente grandes no número de células na altura (>100 células), assim como largura de 10-21 células (média de 16); raios não estratificados com o corpo do raio constituído por células procumbentes e eretas, muito poucos a poucos com raios por mm linear de 2-7 (média de 4). As características de *Rapanea ferruginea* são mostradas a seguir na Figura 9. Os valores quantitativos encontrados nesse trabalho são semelhantes aos encontrados por Pinheiro et al., (1993), que estudou onze caracteres quantitativos da madeira de *Rapanea ferruginea*.

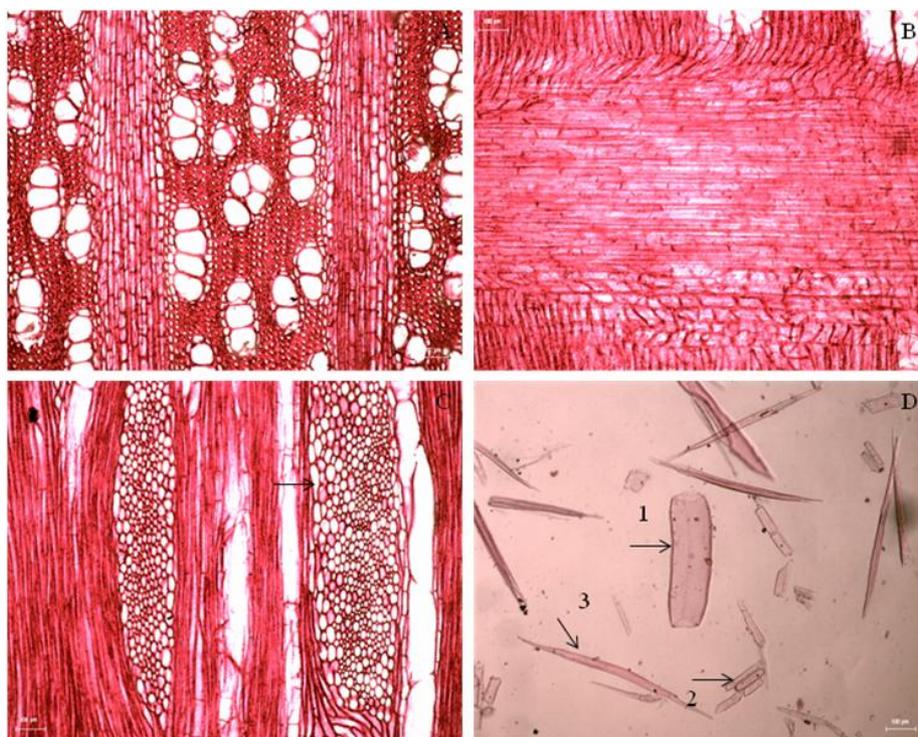


Figura 9 Caracteres anatômicos de *Rapanea ferruginea*. (a) Corte transversal, (b) corte radial, (c) tangencial (seta indica células envolvidas nos raios), (d) setas 1,2 e 3 indica elementos vaso, células de parênquima e fibra.

#### 4.3.5 *Trema micrantha* (L.) Blum. (Ulmaceae)

##### 4.3.5.1 Descrição microscópica

- a) Camadas de crescimento indistintas;
- b) Vasos com porosidade difusa, em arranjo indefinido, múltiplos de 3 a 7 podendo ocorrer solitários, numerosos podendo ocorrer de 9-13 por  $\text{mm}^2$  (média de 11); diâmetro médio de 104-147 $\mu\text{m}$  (média de 128 $\mu\text{m}$ ); com formato arredondado, comprimento de 271-349 $\mu\text{m}$  (média de 315 $\mu\text{m}$ ), apêndices presentes em uma das extremidades

raramente nas duas; placa de perfuração simples; vasos desobstruídos; pontuação inter-vasculares alternas pequenas, diâmetro tangencial das pontuações de 3,73-6,56 $\mu\text{m}$  (média 4,71 $\mu\text{m}$ ); pontuações raio-vascular semelhantes às intervasculares em tamanho;

- c) Fibras não septadas, curtas com comprimento de 723-921 $\mu\text{m}$  (média de 821,52 $\mu\text{m}$ ); Espessura da parede variando em 2,97-3,70 $\mu\text{m}$  (média de 3,48 $\mu\text{m}$ );
- d) Parênquima axial paratraqueal escasso;
- e) Raios multisseriados, heterogêneos, com largura de 2-5 células e altura em número de células 12-14 (média 13 células), não estratificados, corpo do raio constituído por células procumbentes com uma fila de células marginais quadradas e/ou eretas; ocorrendo de 9-11 (média de 10) raios por mm linear. Os caracteres de *Trema micrantha* são mostrados a seguir na Figura 10.

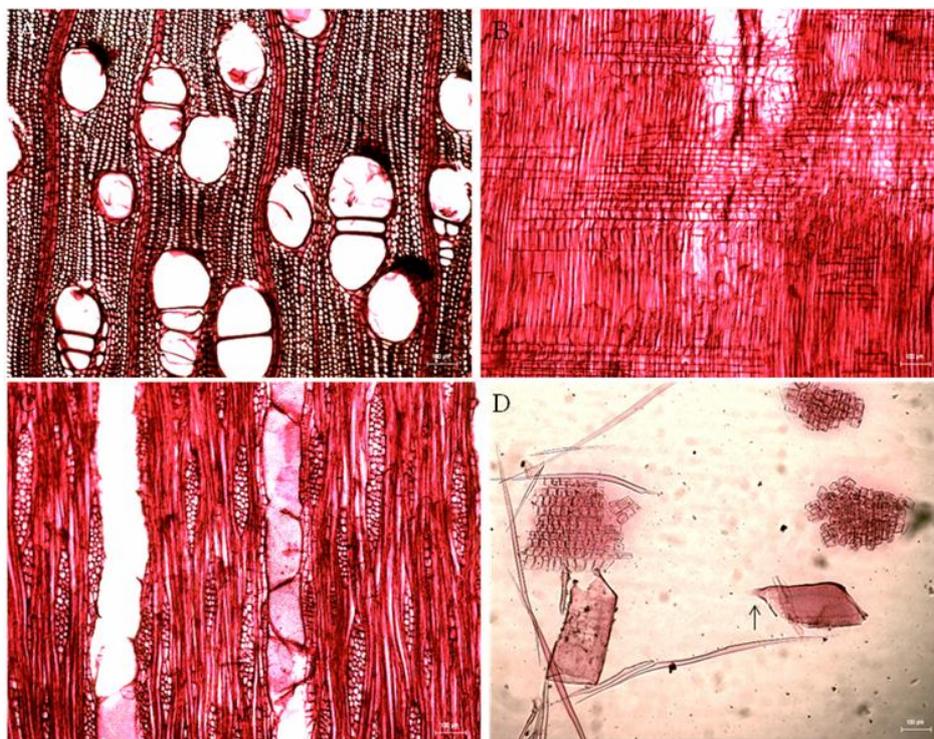


Figura 10 Caracteres anatômicos de *Trema micrantha*. (a) Corte transversal, (b) corte radial, (c) tangencial e (d) elementos celulares dissociados (seta indica apêndice dos vasos).

#### 4.2.6 *Eucalyptus urophylla* Blake (Myrtaceae)

##### 4.2.6.1 Descrição microscópica

- a) Camadas de crescimento distintas, delimitadas por linhas fibrosas;
- b) Vasos com porosidade difusa, em arranjo indefinido, em sua maioria solitários 79%, podendo ocorrer múltiplos de 2 a 4; numerosos podendo ocorrer de 14-17 por  $\text{mm}^2$  (média de 16); diâmetro de 86-126 $\mu\text{m}$  (média de 107 $\mu\text{m}$ ), com formato arredondado; comprimento de 318-657 $\mu\text{m}$  (média de 442 $\mu\text{m}$ ), com contorno circular, placas de

perfuração simples; apêndices presentes em uma das extremidades, raramente em ambas; desobstruídos; pontoações intervasculares alternas com diâmetro de 3,27-4,61 $\mu\text{m}$  (média 4,02 $\mu\text{m}$ ); pontoações raio-vasculares com aréolas distintas; semelhantes às intervasculares em tamanho e forma, no raio da célula;

- c) Fibras septadas, curtas com comprimento de 836-1184 $\mu\text{m}$  (média de 982); espessura da parede de 2,82-4,33 $\mu\text{m}$  (média de 3,47 $\mu\text{m}$ );
- d) Parênquima axial paratraqueal vasicêntrico;
- e) Raios multisseriados, largura de 1-2 células, altura em número de células 6-13 (média 11), não estratificados, corpo do raio constituído por células procumbentes com uma fila de células marginais quadradas e/ou eretas; raios muito frequentes de 16-18 (média de 17). Os caracteres do clone *E. urophylla* são mostrados a seguir na Figura 11.

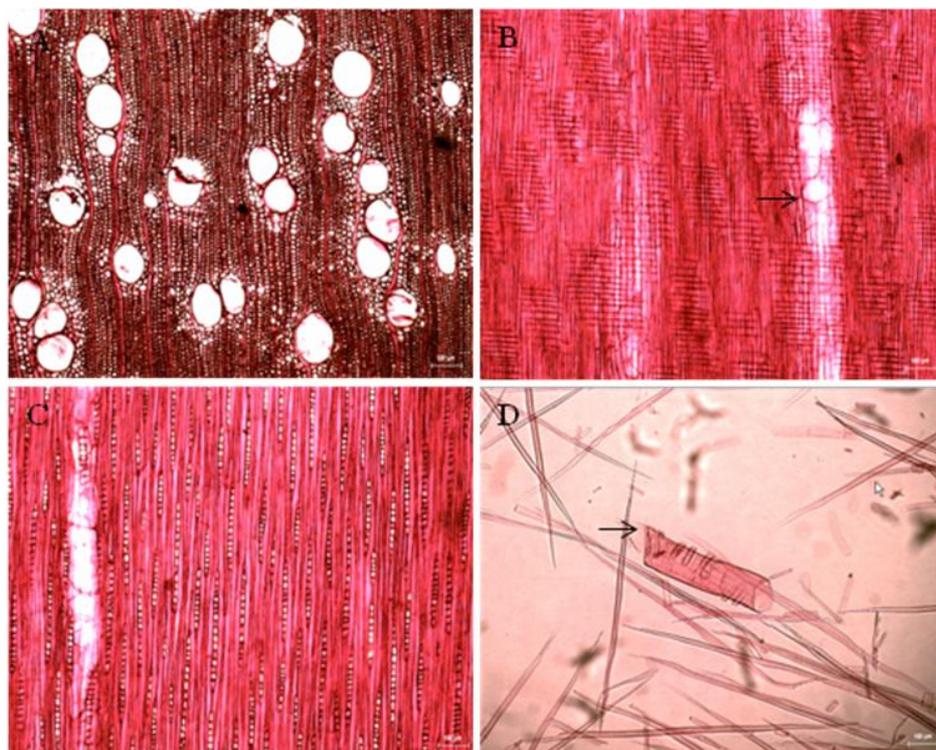


Figura 11 Caracteres anômicos de *Eucalyptus urophylla*. (a) Corte transversal, (b) corte radial (seta indica placa de perfuração simples), (c) tangencial e (d) elementos celulares dissociados (elemento de vaso).

#### 4.2.7 *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* (Myrtaceae)

##### 4.2.7.1 Descrição microscópica

- a) Camadas de crescimento distinto, delimitado por zonas fibrosas;
- b) Vasos com porosidade difusa, em arranjo indefinido, predominante solitários (75%), podendo ocorrer múltiplos de 2 a 5, muito numerosos podendo ocorrer de 9-17 vasos por  $\text{mm}^2$  (média de 13); comprimento variando de 233-473 $\mu\text{m}$  (média de 233 $\mu\text{m}$ ); diâmetro

pequeno de 81-156 $\mu\text{m}$  (média de 114 $\mu\text{m}$ ); com contorno circular, placas de perfuração simples; apêndices presentes em uma das extremidades, raramente em ambas; vasos desobstruídos; pontuações intervasculares alternas com diâmetro de 3,44-7,73 (média 5,25 $\mu\text{m}$ ); pontuações raio vasculares com aréolas distintas; semelhantes às intervasculares em tamanho e forma, no raio da célula;

- c) Fibras libriformes não septadas, curtas com comprimento de 692-1160 $\mu\text{m}$  (média 876 $\mu\text{m}$ ); espessura da parede de 2,20-4,11 $\mu\text{m}$  (média 3,35 $\mu\text{m}$ );
- d) Parênquima axial paratraqueal aliforme podendo ser confluyente;
- e) Raios em sua maioria unisseriados, podendo ocorrer multisseriados, largura de 2-6 células, altura em número de células 6-14 (média 11), não estratificados, corpo do raio constituído por células procumbentes com uma fila de células marginais quadradas e/ou eretas; raios numerosos por mm linear de 13-23 (média 17). A figura 12 mostra as características anatômicas da madeira do clone híbrido de *E. urophylla* x *E. camaldulensis*.

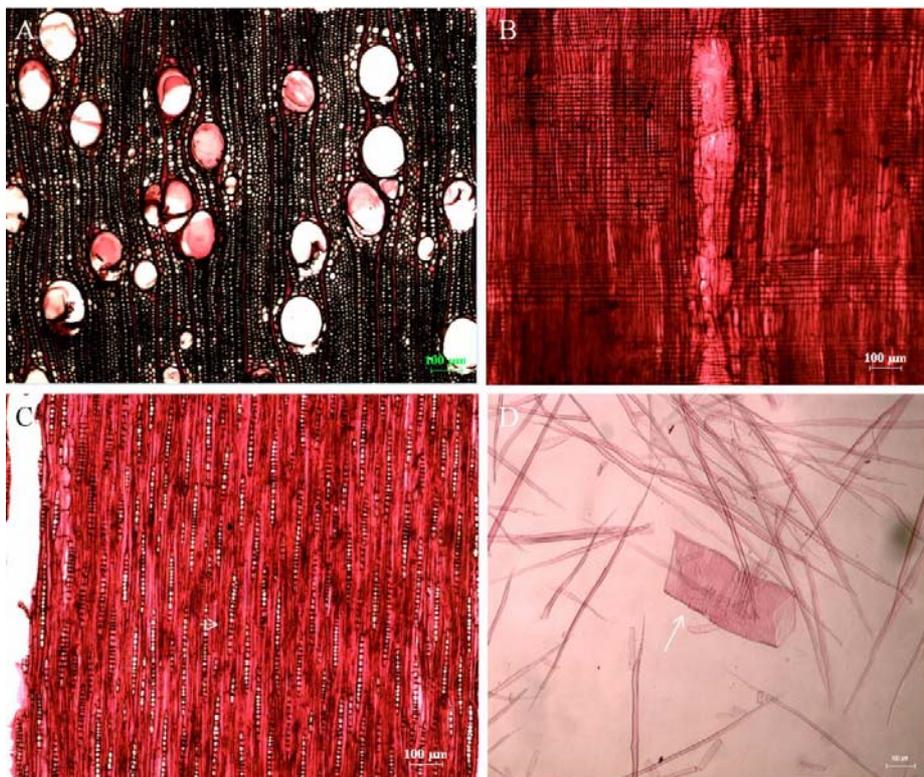


Figura 12 Características anatômicas do híbrido de *E. urophylla* x *E. camaldulensis*. (A) Plano transversal, (B) radial, (C) tangencial e (D) elementos celulares dissociados (seta indicando elemento de vaso).

#### 4.3 Análises anatômicas comparativas entre as espécies do cerrado e clones de *Eucalyptus*

A anatomia da madeira possivelmente está relacionada aos fenômenos de transferência de massa durante a secagem e conseqüentemente durante a carbonização. No processo de secagem, fatores anatômicos como frequência de vasos por mm<sup>2</sup>, diâmetro dos capilares, pontoações, presença de tilos etc, são diretamente relacionados à permeabilidade da madeira, bem como durante a

carbonização, onde os mesmos fatores estão relacionados à liberação dos gases de pirólise, afetando diretamente a estrutura física do carvão.

Os principais caracteres anatômicos quantitativos das espécies do cerrado clones de *Eucalyptus* estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 Apresenta caracteres anatômicos quantitativos das espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus*

<b>Espécies</b>	LF ( $\mu\text{m}$ )	e( $\mu\text{m}$ )	LV ( $\mu\text{m}$ )	DV ( $\mu\text{m}$ )	Fr. V ( $\text{mm}^2$ )	Dpont. ( $\mu\text{m}$ )	R/mm	LR	hR
<i>Casearia sylvestris</i>	1184	4,36	<b>637</b>	<b>79</b>	<b>96</b>	<b>2,66</b>	13	4	17
<i>Guazuma ulmifolia</i>	1331	4,40	<b>283</b>	92	21	4,30	12	6	23
<i>Luehea divaricata</i>	<b>1387</b>	4,04	303	100	15	4,63	10	5	23
<i>Rapanea ferruginea</i>	<b>780</b>	<b>5,97</b>	340	<b>79</b>	41	4,68	<b>4</b>	<b>16</b>	<b>105</b>
<i>Trema micrantha</i>	821	3,49	315	<b>128</b>	<b>11</b>	4,71	10	4	13
<i>E. urophylla x E. camaldulensis</i>	876	<b>3,35</b>	334	114	13	<b>5,25</b>	<b>17</b>	<b>2</b>	<b>11</b>
<i>E. urophylla</i>	982	3,47	442	107	15	4,02	16	<b>2</b>	<b>11</b>

LF = comprimento de fibras; e = espessura da parede das fibras; LV = comprimento de vasos; DV = diâmetro dos vasos; Fr. V( $\text{mm}^2$ ) = frequência de vasos por  $\text{mm}^2$ ; Dpont. = diâmetro das pontoações; R/mm = raios por mm linear; LR = largura dos raios e hR = altura dos raios.

#### 4.3.1 Comprimento de fibras

De acordo com a Tabela 1 a espécie *L. divaricata* obteve o maior valor médio para comprimento de fibras (1387 $\mu\text{m}$ ) das espécies em estudo, enquanto que *R. ferruginea* obteve o menor valor médio (780 $\mu\text{m}$ ). Já para os clones de *Eucalyptus* os valores encontrados para o comprimento de fibras foram de 982 $\mu\text{m}$  e 876 $\mu\text{m}$ , respectivamente *E. urophylla* e *E. urophylla x E. camaldulensis*. Evangelista et al., (2010) trabalhando com *Eucalyptus camaldulensis* (10 anos) e *Eucalyptus urophylla* (6 e 8 anos), encontraram valores médios para comprimento

de fibras da ordem de 970 $\mu\text{m}$ , 920 $\mu\text{m}$  e 950 $\mu\text{m}$ , respectivamente. Os valores para o clone *E. urophylla* (chegando a 900  $\mu\text{m}$ ) são semelhantes aos encontrados por estes autores, porém menores. Se o objetivo da comparação for diferentes espécies dentro do gênero *Eucalyptus*, o clone de *E. urophylla* x *E. camaldulensis* obteve valores inferiores aos encontrados no referido trabalho. Esse fato pode ser explicado pela diferença de procedências ou material genético.

Gatto et al. (2008) estudando lenho juvenil e adulto de *L. divaricata* provenientes do nordeste do estado do Rio Grande do Sul, obtiveram resultados semelhantes aos encontrados nesse trabalho. Esses autores ressaltaram também que o comprimento das fibras aumenta nos primeiros 20-30 anos de vida da árvore, a partir dessa idade, o comprimento das fibras se estabiliza até ao redor de 45 anos, oscilando e diminuindo levemente. Esses autores comentam que a variação radial do comprimento da fibra é grande, variando de extremamente curto (>750 $\mu\text{m}$ ) nos primeiros anéis de crescimento (lenho juvenil) a extremamente longos (>2000 $\mu\text{m}$ ) no lenho adulto.

#### **4.3.2 Espessura da parede da fibra**

Os valores médios obtidos pelas espécies estudadas em relação ao parâmetro espessura da parede das fibras são apresentados na Tabela 1 e discutidos a seguir. O maior valor médio obtido pertence a espécie *R. ferruginea*, com valor de 5,97 $\mu\text{m}$  e os menores valores foram obtidos pelos clones de *Eucalyptus*, com espessura da parede em média de 3,35 $\mu\text{m}$  para *E. urophylla* x *E. camaldulensis* e 3,47  $\mu\text{m}$  para *E. urophylla*.

Paula et al (2000) trabalhando com a anatomia das espécies do cerrado do estado de São Paulo, ressaltam que visando a produção de carvão vegetal é importante que a madeira apresente alta densidade e conseqüentemente presença de fibras com elevada fração parede e baixas proporções de tecidos

parenquimatosos e vasos. Estes parâmetros estão relacionados com a produção de carvão de alta qualidade em termos energéticos e rendimento do carvão, uma vez que a parede das células parenquimáticas são frágeis se comparadas as paredes das fibras, podendo ser ponto falho tanto na secagem como na carbinização.

Evangelista et al., (2010) trabalhando com variação anatomica de *E.urophylla* (6 e 8 anos) e *E. camaldulensis* (10 anos), encontraram valores médios de espessura da parede de 3,9  $\mu\text{m}$  e 4,3 $\mu\text{m}$  e 3,8 $\mu\text{m}$  respectivamente. Estudos na literatura demostram que a idade das árvores exerce influencia nas dimensões das células. No presente trabalho não foi realizada a variação radial, o que poderia confirmar essa suposição.

#### 4.3.3 Comprimento de vasos

O comprimento dos elementos de vasos está associado diretamente com a permeabilidade e a eficiência da condução de líquidos pelo xilema secundário. Segundo Burger e Richter (1991), além do comprimento de vasos, as placas de perfuração e as pontuação são responsáveis pela eficiência da condução de líquidos. Trabalhos sobre tendências ecológicas afirmam que elementos de vasos com o diâmetro maior, menor comprimento e a ausência de apêndices são melhores adaptadas ou evoluídas.

A espécie *C. sylvestris* obteve o maior valor médio para comprimento de vasos (636 $\mu\text{m}$ ) de todas as espécies estudadas, clones de *Eucalyptus* e espécies do Cerrado, enquanto que a espécies *G. ulmifolia* obteve o menor valor médio (283 $\mu\text{m}$ ). Em relação aos clones de *Eucalyptus*, o clone *E. urophylla* obteve maior valor para comprimento de vasos em relação ao *E. urophylla* x *E. camaldulensis*, com valores de 441 $\mu\text{m}$  e 334 $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Rocha et al., (2004) trabalhando com variação dos elementos anatômicos da madeira de *E. grandis* encontraram valores superiores aos encontrados nesse

trabalho para comprimento de vasos igual a 500 $\mu\text{m}$  a 0% da altura comercial da árvore. Esse resultado pode ser explicado por se tratar de espécies diferentes, tendo em comum apenas o gênero *Eucalyptus*.

#### 4.3.4 Diâmetro dos elementos de vasos

O diâmetro dos elementos de vasos assim como seu comprimento, diâmetro das pontuações, a presença ou não de torus aspirados, etc são de extrema importância para a permeabilidade da madeira, sendo canais facilitadores da movimentação de água e gases no lenho. A tabela 1 apresenta a comparação entre as espécies do Cerrado e os clones de *Eucalyptus* para diâmetro dos elementos de vasos.

Através dos dados obtidos, observa-se que espécie *T. micrantha* apresentou o maior diâmetro dos elementos de vasos em relação a todas as espécies estudadas 128 $\mu\text{m}$ , enquanto que *R. ferruginea* apresentou o menor diâmetro 79 $\mu\text{m}$ . *T. micrantha* destacou se também como a espécie de menor densidade básica 0,40 g/cm<sup>3</sup> e ainda o maior conteúdo de umidade de saturação igual a 204%, conforme as Figuras 5 e 13. Sabe que há uma correlação negativa entre o diâmetro dos vasos e a densidade, este sendo responsável por um maior espaço vazio no interior da madeira.

Maiores diâmetros tangenciais dos elementos de vasos normalmente estão associados a menores frequências de vasos por mm<sup>2</sup> segundo Vital e Della Lucia (1987). Trabalhos sobre tendências evolutivas consideram que a planta compensa sua menor frequência de vasos com maiores diâmetros dos capilares.

Segundo Evangelista et al., (2010) o diâmetro do lúmen dos vasos a 0% da altura comercial da árvore de *E. urophylla* (6 anos), *E. urophylla* (8 anos) e *E. camaldulensis* (10 anos) são respectivamente 89 $\mu\text{m}$ , 86 $\mu\text{m}$  e 95 $\mu\text{m}$ . Os resultados obtidos nesse trabalho são superiores aos encontrados por esses autores.

Provavelmente por se tratar de clones com características aprimoradas e procedências diferentes.

#### **4.3.5 Diâmetro das pontoações**

O diâmetro das pontoações é de primeira importância na difusão da água de adesão que está no interior da parede celular, uma vez que a secagem ocorre de fora para dentro em uma peça de madeira.

A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos do diâmetro das pontoações das espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus*. Observou-se que o clone *E. urophylla* x *E. camaldulensis* obteve maior valor médio de diâmetro de pontoação, com aproximadamente 5,25µm, enquanto que *C. sylvestris* obteve os menores valores com aproximadamente 2,7µm.

Segundo Garbe (2008) o fluxo capilar é maior no sentido longitudinal que no sentido transversal, possuindo este último um menor número de pontoações e possível de substâncias que possam obstruir a livre passagem da água.

Stamm (1964) aponta que a existência de bolhas de ar no interior das células, o aumento do diâmetro das pontoações e o aumento da temperatura favorecem o movimento de água livre.

Em madeiras pouco permeáveis e mais densas, onde o processo de secagem ocorre basicamente por difusão, esta é influenciada pelo diâmetro das pontoações e espessura da parede das células.

#### **4.3.6 Freqüência de vasos**

A freqüência de vasos por mm<sup>2</sup> é o grande responsável pela permeabilidade das árvores. Os resultados obtidos nesse trabalho pelas espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus* estão apresentados na Tabela 1.

Os maiores valores médios foram obtidos pelas espécies do cerrado *C. sylvestris* com valor médio 96 de vasos por  $\text{mm}^2$ . Observando a Figura 6, podemos observar que essa espécie compensa o diâmetro de seus vasos com o número de vasos por  $\text{mm}^2$ . Trabalhos sobre tendências ecológicas mostram que as características de xeromorfismo (comuns em espécies do Cerrado) são indicadas pela presença de alta frequência de vasos por  $\text{mm}^2$ , vasos mais estreitos e curtos, tipo de placa de perfuração, presença de traqueídes vasicêntricas ou vasculares, ocorrência de espessamento espiralado nas paredes dos elementos de vasos, pontuações intervasculares pequenas e presença de camadas de crescimento bem definidas (GONÇALVES et al.,2010).

Já em relação aos clones de *Eucalyptus*, o clone de *E.urophylla* obteve valores médios maiores em relação ao clone de *E. urophylla* x *E. camaldulensis* sendo 15 e 13 respectivamente. Esses valores são superiores aos encontrados por Evangelista et al. (2011), que estudando a anatomia de *Eucalyptus urophylla* (6 e 8) e *Eucalyptus camaldulensis* (10 anos) encontraram valores de 10, 11 e 10,4, respectivamente.

#### **4.3.7 Raios por mm Linear**

Os valores médios obtidos de raios por mm linear são encontrados na Tabela 1. Os raios são estruturas celulares compostas por células de parênquima radial, que possuem paredes delgadas e que além de armazenar, promovem o transporte radial de substâncias. Os valores médios para a frequência de raios por milímetro linear obtidos nesse trabalho mostram que o clone de *E.urophylla* x *E.camaldulensis* obteve o maior valor se comparado com as demais espécies, 17 raios por mm linear. Seguido do clone *E. urophylla* que obteve 16 raios por mm linear. Os menores valores encontrados foram da espécie *R. feruginea*, totalizando 4 raios por mm linear. É importante ressaltar que os raios de *R.*

*ferruginea* são extremamente largos e numerosos em altura, sendo característica de primeira grandeza na identificação da espécie.

Durante a secagem por possuírem paredes mais frágeis, os raios são pontos fracos na estrutura da madeira, onde ocorrem frequentemente severas rachaduras. Segundo Galvão & Jankowsky (1985) as células dos raios contraem-se menos na direção radial, impedindo que a contração seja superior a tangencial.

#### **4.3.8 Largura dos raios (em números de células)**

Além de serem de primeira importância no transporte de substâncias, os raios conferem ainda desenhos ornamentais às madeiras, tornando-as extremamente belas. Na Tabela 1, encontra-se os valores médios para largura dos raios das espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus*.

A espécie *R. ferruginea* obteve o maior valor de largura dos raios (16 células de largura) em relação às demais espécies, sendo esses raios extremamente bem contrastados, tornando-se um caractere importante na identificação da espécie. Quanto aos clones de *Eucalyptus*, estes obtiveram o mesmo valor de largura dos raios, sendo estes, em sua maioria unisseriados.

Pinheiro et al. (1993), trabalhando com caracterização anatômica de *R. ferruginea*, encontrou valores médios inferiores aos encontrados nesse trabalho, 164µm e 10 células de largura.

#### **4.3.9 Altura dos raios (em número de células)**

A altura dos raios em número de células em relação às espécies de Cerrado e clones de *Eucalyptus* são apresentadas na Tabela 1.

A espécie *R. ferruginea* obteve o maior valor em altura dos raios em número de células. Os raios dessa espécie são bastante contrastados na face

radial, bem visível ao olho nu, tanto na madeira como no carvão, como se observa na Figura 9.

Pinheiro et al. (1993) trabalhando com a caracterização da espécie *R. ferruginea* para o uso tecnológico, encontraram valores de altura dos raios para essa espécie da ordem de 55 células de altura e 25mm em média. Os valores encontrados nesse trabalho são superiores aos encontrados por esses autores. Esse fato pode ter ocorrido devido à diferença de sítios das espécies entre outros tratamentos silviculturais.

Durante a secagem a madeira dessa espécie apresentou apenas variação dimensional, não apresentando, portanto, rachaduras anteriores à carbonização.

#### **4.4 Secagem**

Na Figura 13 são apresentados os valores de teor de umidade da madeira saturadas, obtidos experimentalmente e a estimativa do máximo teor de umidade de acordo com as Equações 2 e 3.

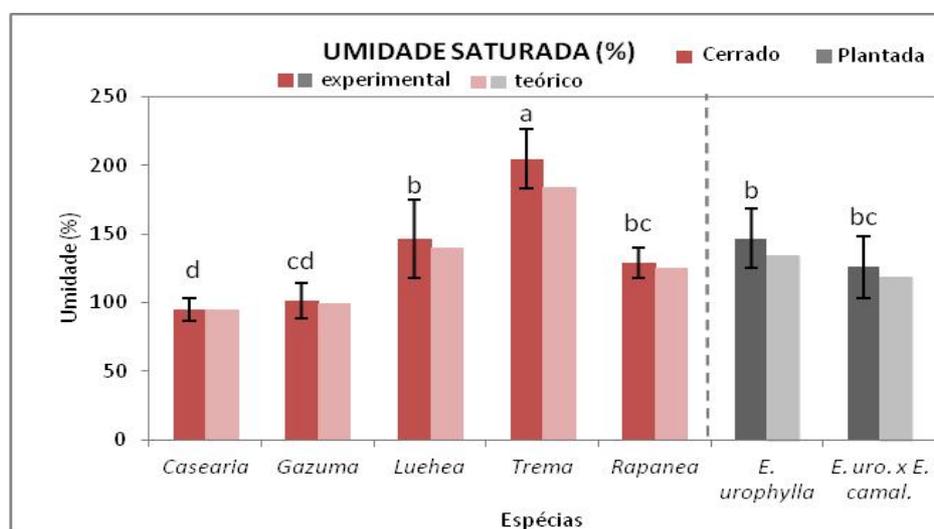


Figura 13 Apresenta gráfico com a Umidade Saturada experimental (base seca) e teórica das espécies do cerrado e clones de *Eucalyptus*.

Valores médios de teor de umidade saturada experimental seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

De acordo com a Figura 13, o máximo teor de umidade obtidos neste trabalho foi de 95% para *C. sylvestris* e 184% para *T. micrantha*, que obtiveram respectivamente o menor e maior teor de umidade.

O teor máximo de umidade da madeira é atingido quando o lúmen da célula, a parede celular e os espaços intercelulares estão completamente saturados ou cheios de água. De modo que, a quantidade máxima de água que a madeira pode conter depende diretamente do volume e dos espaços não ocupados pela parede celular e por extrativos.

Segundo Panshin e De Zeewn (1964), os máximos teores de umidade encontrados para as madeiras comerciais dos Estados Unidos variam de 60% para folhosas e 200% para coníferas. A menor umidade de saturação para Pau ferro (*Krugiodendron ferreum*) que tem massa específica de aproximadamente 1,18 g/cm<sup>3</sup> é de 26%. Em contra partida, madeiras mais leves como o Pau balsa

(*Ochroma lagopus*) com massa específica de  $0,20\text{g/cm}^3$  pode conter mais de 400% de umidade de saturação.

O mesmo ocorreu nesse trabalho onde a menor umidade de saturação foi obtida por *C. sylvestris*, que obteve a maior densidade  $0,62\text{g/cm}^3$ , enquanto que a maior umidade de saturação foi obtida pela espécie de menor densidade *T. micrantha*, com  $0,40\text{g/cm}^3$ .

A quantidade e a natureza dos extrativos presentes na madeira podem influenciar no máximo teor de umidade.

#### 4.4.1 Variação dimensional

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam os gráficos da variação dimensional obtida pelas espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus* nos sentidos tangencial, radial e longitudinal. As curvas de dessecção e absorção (abaixo do PSF) e a contração acima do PSF chamada de colapso. De forma geral as contrações tangenciais são maiores que as radiais. As radiais são ainda maiores que as longitudinais para todas as espécies.

O PSF no presente estudo foi estipulado de acordo com a literatura entre 25% e 32% de umidade, observando as diferentes características das espécies, seguidas de consecutivas mensurações das dimensões e aferindo os valores de umidade correspondente a cada ciclo.

De acordo com os gráficos 14, 15 e 16 (coluna A) contendo os valores médios para contração das madeiras estudadas, a espécie *C. sylvestris* obteve o maior valor de contração tangencial, tanto para dessecção como para absorção abaixo do PSF com valores 10,44%. Enquanto que o menor valor foi obtido por *T. micrantha*, com contração tangencial (dessecção e absorção) de 6,75% em base seca. Essas espécies também obtiveram os maiores valores de densidade básica e máximo teor de umidade de saturação, sendo que *C. sylvestris* obteve a maior

densidade básica ( $0,62\text{g/cm}^3$ ) e o MTU de 94,78%. Já a espécie que apresentou menor valor médio para densidade básica ( $0,40\text{g/cm}^3$ ) *T. micrantha* obteve o menor valor de contração tangencial e o maior valor de MTU igual a 204%.

Segundo Tsoumis (1991) a contração e o inchamento ocorrem em magnitudes superiores em madeiras de maior massa específica. Este fato ocorre devido a presença de maior quantidade de massa lenhosa efetiva por volume de madeira, ou seja, menos espaços vazios e maior espessura das paredes celulares. Isto ocorre por que paredes celulares mais espessas e densas apresentam maior capacidade de conter umidade em suas paredes.

Já na variação radial *R. ferruginea* obteve o menor valor médio de contração e inchamento igual a 3,47% , enquanto que o maior valor foi obtido por espécie *C. sylvestris* igual a 6,06%.

Galvão e Jankowsky (1985) ressaltam que a variação dimensional existente entre as direções tangenciais e radiais são influenciadas entre outros fatores pelos raios, maior numero de pontoações na face radial e alternância entre o lenho tardio e o inicial.

Já Tsoumis (1991) resalta que essas diferenças encontradas entre os sentidos radiais e tangenciais são devidos, em parte pela presença dos raios, que por sua orientação, exercem a função de restrição, quando a contração e ao inchamento radial. Esse efeito restritivo dos raios é atribuído à direção microfibrilar das paredes parenquimáticas que, em sua grande maioria, são paralelas ao comprimento das células. Essas considerações podem explicar o menor valor de contração e inchamento radial obtido pela espécie *R. ferruginea*, pois a referida espécie possui o maior raios em altura e largura em números de células.

A presença de pontoações predominantemente na face tangencial das células da madeira pode causar um desvio significativo das microfibrilas de celulose que circundam as pontoações. Este desvio das microfibrilas pode

impedir que a contração linear no sentido radial de forma significativa. Maior espessura da lamela média e da parede primária na face radial das células; a lamela média contendo elevado teor de pectina (substância altamente higroscópica), aumentando assim a contração ou inchamento no sentido tangencial;

Quanto à contração e o inchamento longitudinal, alguns estudiosos ressaltam que ela é tão pequena que pode ser desconsiderada. A espécie *T. micrantha*, com densidade de  $0,40\text{g/cm}^3$ , obteve o maior valor de contração e inchamento longitudinal, 2,24%. Enquanto que o clone híbrido de *E. urophylla e camaldulensis*, densidade de  $0,54\text{g/cm}^3$ , obteve o menor valor de contração e inchamento longitudinal igual a 1,19%. Tsoumis (1991) resalta que a pequena contração axial da madeira é devido ao ângulo microfibrilar quase que paralelo da camada  $S_2$ , em relação ao eixo longitudinal. Ou seja, se o ângulo fosse zero, seria correspondente a um paralelo entre o ângulo microfibrilar e o sentido longitudinal, proporcionando uma anulação da contração axial.

Perré et al., (2007) estudando a retração em madeira normal e de tensão de *Eucalyptus* e Spruce. Observaram que Spruce apresenta as curvas ideais de secagem demonstrando pequenas deformações (em torno de 6% na tangencial) a teores de umidade relativamente pequenos, em torno de 5 a 10% de umidade. Demonstrando os diferentes comportamentos das madeiras em relação à umidade e a anisotropia acima e abaixo do PSF. A madeira normal de *Eucalyptus* apresenta o que se pode chamar de contração modelo, apresentando uma contração tangencial a 15% de umidade com valores que se aproximam de 18 a 20%. Já a madeira de reação apresenta uma contração tangencial linear, podendo chegar a valores de contração superiores a 26% para tangencial e 0,8% longitudinal.

As Figuras 14,15 e 16 (coluna B), apresentam o comportamento das madeiras estudadas em relação à movimentação dimensional acima do PSF. O

ponto de saturação das fibras segundo Galvão e Jankowsky (1985), é quando a parede das fibras se encontra saturada de moléculas de água, chamada de água de adesão ou higroscópica, variando de 25% a 32% de umidade. A faixa de teor de umidade estimada para determinar o ponto de saturação das fibras de cada espécie madeireira é de 25% a 32%. No entanto, a presença dessa movimentação ainda não caracteriza a presença de colapso. A presença de colapso na madeira é caracterizada pela contração irregular e anormal da madeira, devido ao achatamento e esmagamento das paredes celulares (PANSHIN e DE ZEEUW, 1964). Este comportamento nas madeiras é irreversível, sendo prejudicial a uma secagem eficiente, resultando em rachaduras, elevações e depressões.

Os clones de *Eucalyptus* e a espécie do Cerrado *T. micrantha* obtiveram maiores valores de contração acima do PSF e ainda consequentes rachaduras.

As espécies do cerrado não apresentaram valores acentuados de contração acima do PSF, salvo *T. micrantha* que obteve o maior valor de MTU(%) e suas contrações severas começam em torno de 124% de umidade da madeira e demonstraram posteriores rachaduras na madeira e no carvão seguindo a direção dos raios.

Segundo Burger e Richter (1991) A fragilidade do tecido parenquimático dos raios é bem ilustrada pelas frequentes rachaduras radiais que surgem no tronco como resultado das tensões internas de secagem.

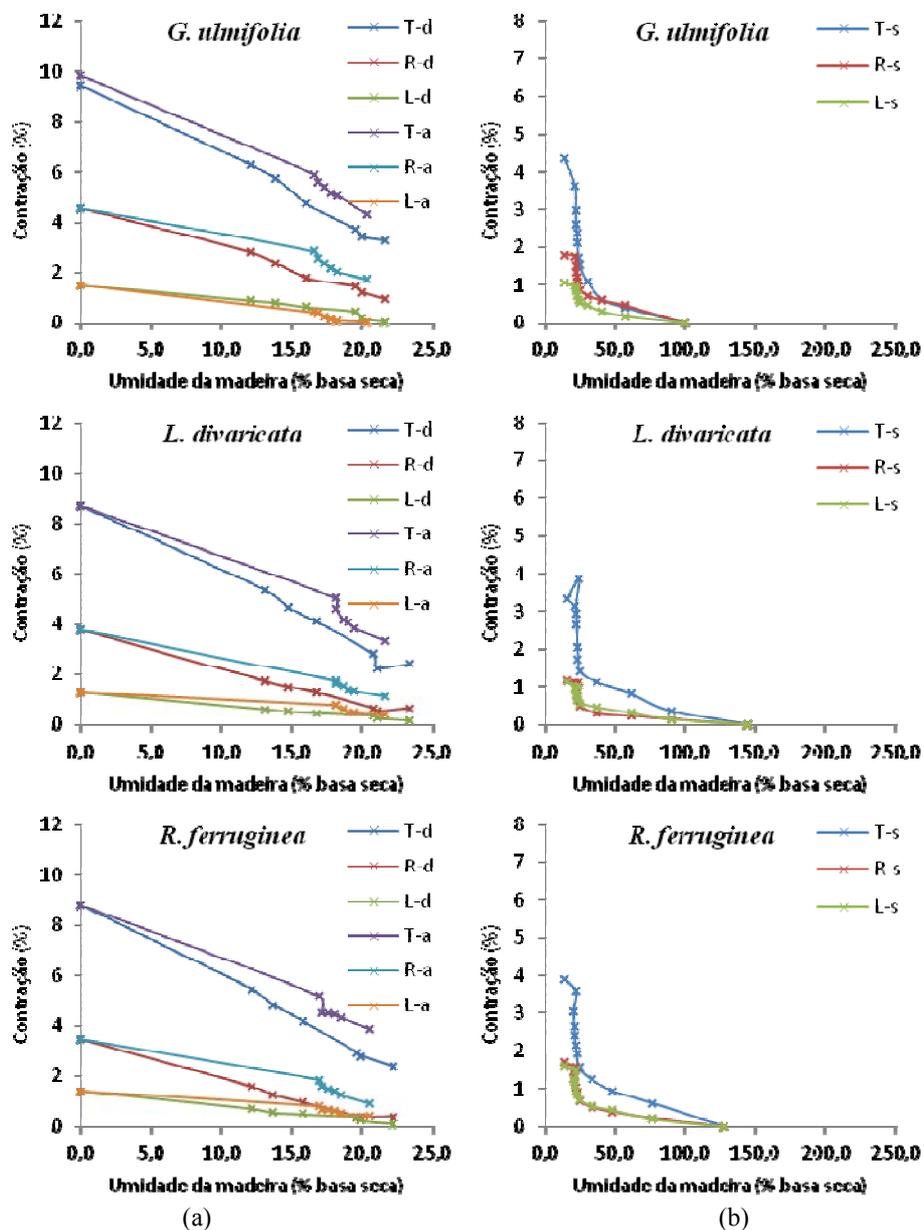


Figura 14 Evolução das contrações tangenciais (T), radiais (R) e longitudinais (L) das espécies do cerrado. (a) região abaixo do PSF (-d – dessecção; -a – absorção), (b) região acima do PSF (-d – dessecção; -a – absorção).

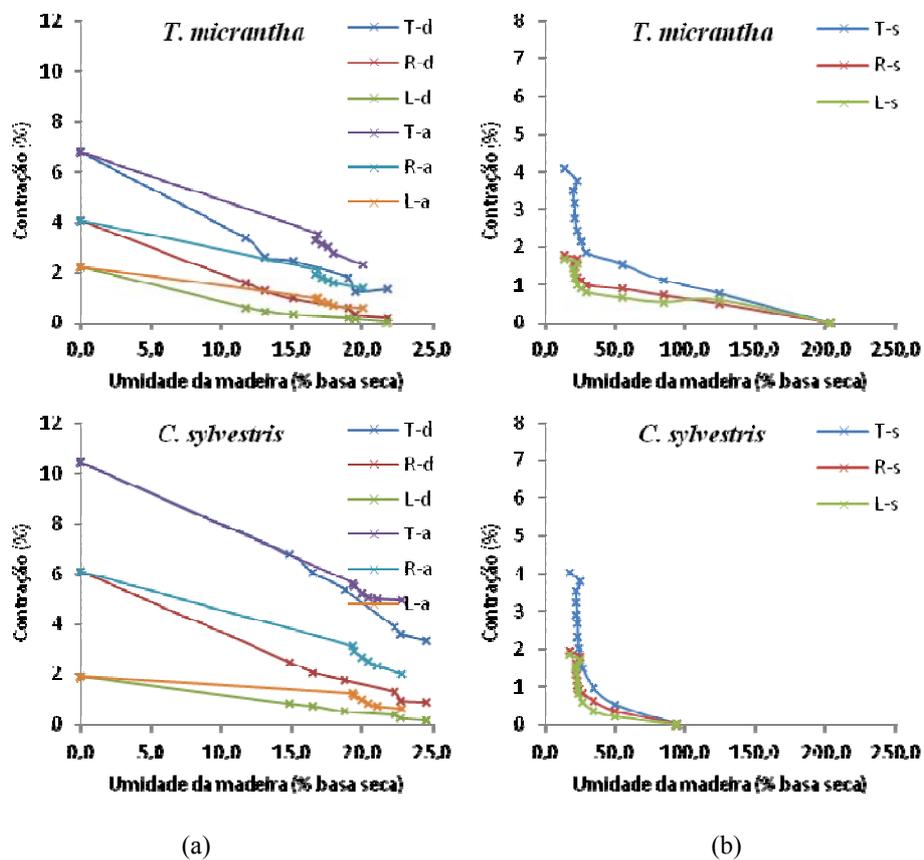


Figura 15 Evolução das contrações tangenciais (T), radiais (R) e longitudinais (L) das espécies do cerrado. (a) região abaixo do PSF (-d – desorção; -a – absorção), (b) região acima do PSF (-d – desorção; -a – absorção).

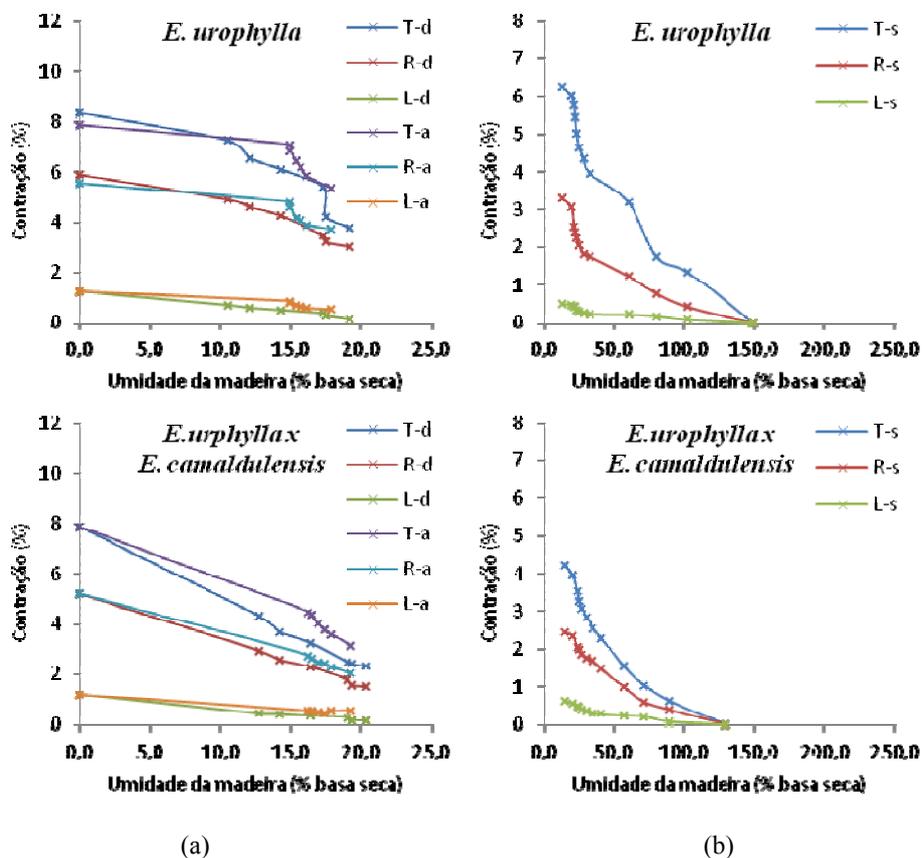


Figura 16 Evolução das contrações tangenciais (T), radiais (R) e longitudinais (L) dos clones de *Eucalyptus*. (a) região abaixo do PSF (-d – dessorção; -a – absorção), (b) região acima do PSF (-d – dessorção; -a – absorção).

#### 4.5 Carbonização

As 48 amostras do Cerrado e clones de *Eucalyptus* foram carbonizadas posteriormente a secagem, e suas dimensões e massa secas relacionadas com a massa e dimensões secas do carvão.

Houve grande variação dimensional após a carbonização sendo que a espécie do Cerrado *T. micrantha* teve uma grande rachadura na estrutura final do carvão, devido à presença de rachaduras na estrutura da madeira durante a secagem. O clone *E. urophylla* teve uma expansão devido à complexidade de suas rachaduras e das forças internas da madeira, como tensões de crescimento que fizeram com que este rachasse e expandisse. O clone *E. urophylla* obteve ainda os maiores valores de contração acima do ponto de saturação das fibras em relação as demais espécies do Cerrado e o clone de *E. urophylla x E. camaldulensis*, acreditasse que possa ser em consequência do colapso das células dessa madeira durante a secagem.

#### **4.5.1 Rendimento em carvão**

Os rendimentos em carvão obtidos pelas espécies tiveram variação de 34,18% para o clone *E. urophylla* e 40,12% para *E. urophylla x E. camaldulensis*. A Figura 17 apresenta valores médios de rendimento em carvão para as espécies do Cerrado e clones de *Eucalyptus*.

Quinhones (2010) trabalhando com o clone *E. urophylla* e o clone híbrido de *E. urophylla x E. camaldulensis* encontraram valores médios de rendimento em carvão da ordem de 33,6% e 35,5% a temperatura final da ordem de 450°C.

Costa (2010) trabalhando com as mesmas espécies do Cerrado utilizadas neste estudo encontrou valores médios de perda de massa em experimentos de termogravimetria utilizando temperatura de 200-380°C da ordem de 45,16% a 68,18%, sendo que *L. divaricata* obteve a menor perda de massa e *R. ferruginea* obteve a maior. Enquanto que posteriores temperaturas da ordem de 380-500°C, a espécie *L. divaricata* foi a que mais perdeu massa valores médios de 26,80% e *G. ulmifolia* obteve o menor valor de perda de massa, igual a 4,68%.

O Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC (1980), a partir de avaliação de diversas madeiras, entre elas *Eucalyptus*, observou se que o rendimento da carbonização foi 37,8% na temperatura de 400°C e 31% na temperatura 500°C. Portanto as espécies do Cerrado, bem como os clones de *Eucalyptus* revelaram se de boa qualidade, quanto ao parâmetro rendimento em carvão.

Valores médios seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

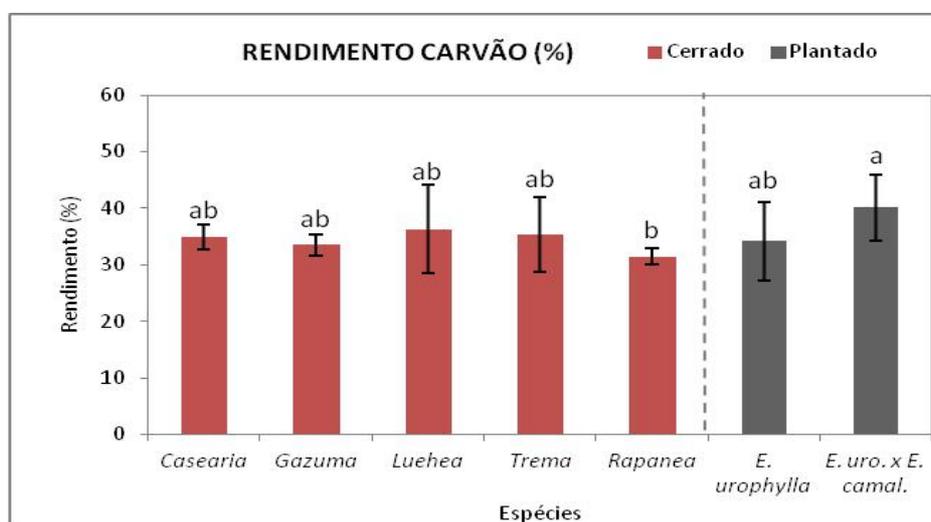


Figura 17 Gráfico com valores médios de rendimentos em carvão obtidos através da carbonização dos corpos de prova das espécies do cerrado e clones de *Eucalyptus*.

#### 4.5.2 Contração do carvão

As Figuras 18, 20 e 21 a seguir apresentam gráficos com os valores médios de contrações finais nos sentidos tangenciais, radiais e longitudinais, obtidos a partir dos mesmos 48 corpos de prova submetidos à secagem e posteriormente a carbonização a temperatura final de 450°C.

Os momentos que antecedem o início da carbonização são decisivos para a estrutura do carvão, sendo que a carbonização, assim como a secagem começa de fora para dentro, dificultando a saída da água e gases de pirólise por esses caminhos já carbonizados, com o aumento da temperatura, a vazão dos gases e vapor d'água procuram caminhos para sair, como consequência a pressão desses gases aliados a fragilidade das estruturas celulares como a ocorrência de colapso e outras formas de obstrução, podem explicar a presença de rachaduras, fendas e estufamento no carvão.

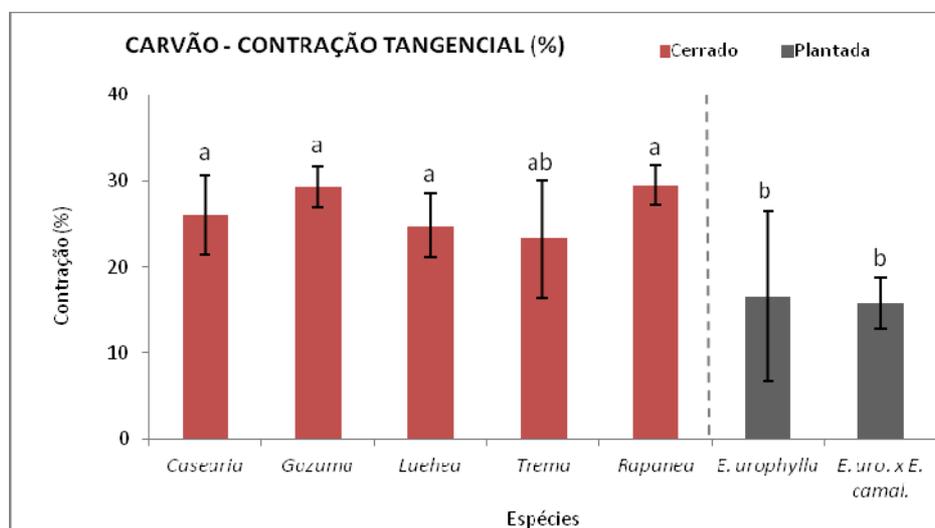


Figura 18 Apresenta gráfico com valores médios de contração tangencial do carvão final das espécies do Cerrado e *Eucalyptus*.

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

O maior valor médio de contração tangencial após a carbonização foi obtido pela espécie do Cerrado *R. ferruginea* com 29,54%. Enquanto que o menor valor médio foi obtido pelo clone de *E. urophylla x E. camaldulensis* com 15,81%. O maior resultado obtido pela espécie *R. ferruginea* provavelmente

devido a seus caracteres anatômicos, como espessura da parede, largura e espessura dos raios, características marcantes preservados na espécie mesmo após a carbonização.

Quanto aos clones de *Eucalyptus*, ambos os clones sofreram rachaduras durante a secagem, o que provocaram fendilhamento severos após a carbonização. No caso mais específico do clone *E. urophylla* a pressão dos gases internos aliados as tensões provenientes da madeira de *Eucalyptus* provocaram o rompimento dos tecidos, fazendo com que os corpos de prova se expandissem de dentro para fora, como mostra a Figura 19.

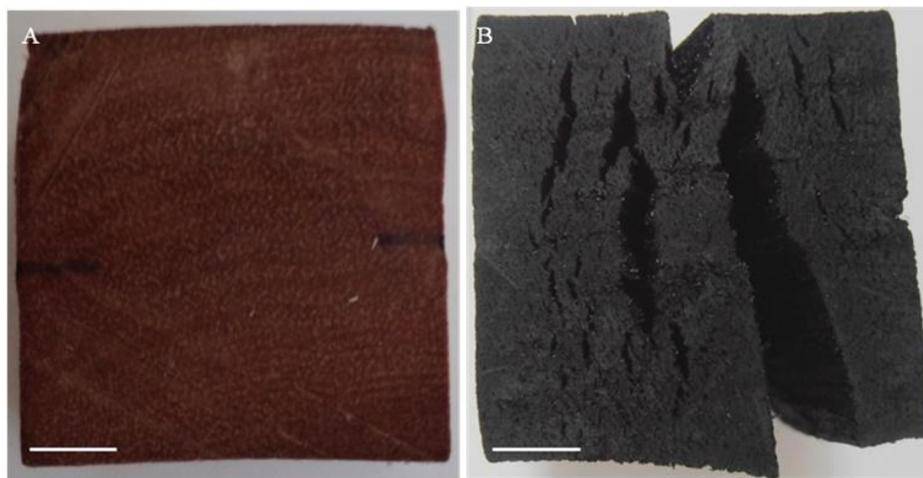


Figura 19 Apresenta severas rachaduras no corpo de prova do clone *E. urophylla*. Em (A) corpo de prova antes da carbonização e (B) após a carbonização. Barras de 0,5cm.

Gonçalves et al., (2010) estudando anatomia comparada da madeira após a carbonização ressaltam ainda que: (a) há uma redução significativa do diâmetro dos vasos; (b) a frequência dos raios aumentou na maioria dos indivíduos, sendo que a largura variou bastante, reduziu ou expandiu; (c) indivíduos com raios mais largos apresentaram maior contração se comparado a indivíduos com raios mais estreitos. Permitindo assim que os autores concluíssem que a baixa variação dos

parâmetros analisados do lenho e do carvão possibilitam a identificação taxonômica das espécies.

As contrações no clone de *E.urophylla* provocaram uma expansão e fendilhamento em 100% dos corpos de prova deste clone, sendo que os valores de contrações podem ter sido mascarados pela expansão e rachaduras desses corpos de prova. As rachaduras foram observadas também em menor quantidade no clone *E. urophylla x E. camaldulensis*, e nas espécies do Cerrado *C. sylvestris* e *T. micrantha*.

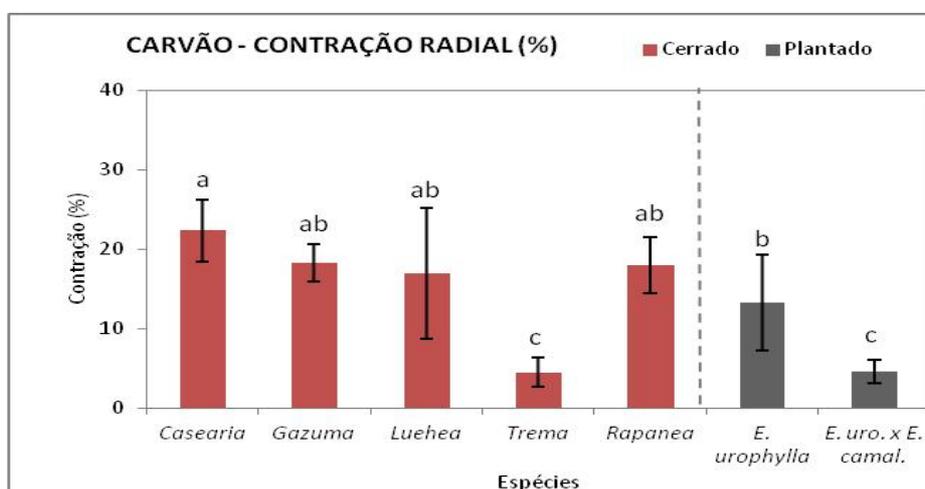


Figura 20 Apresenta gráfico com valores médios de contração radial do carvão final das espécies do Cerrado e *Eucalyptus*.

De acordo com a Figura 20 a espécie que obteve maior valor de contração radial foi à espécie do Cerrado *C. sylvestris* com valor médio de 22,35%. Em contra partida a espécie com menor valor de contração radial foi à espécie *T. micrantha*, valor médio de 4,53%.

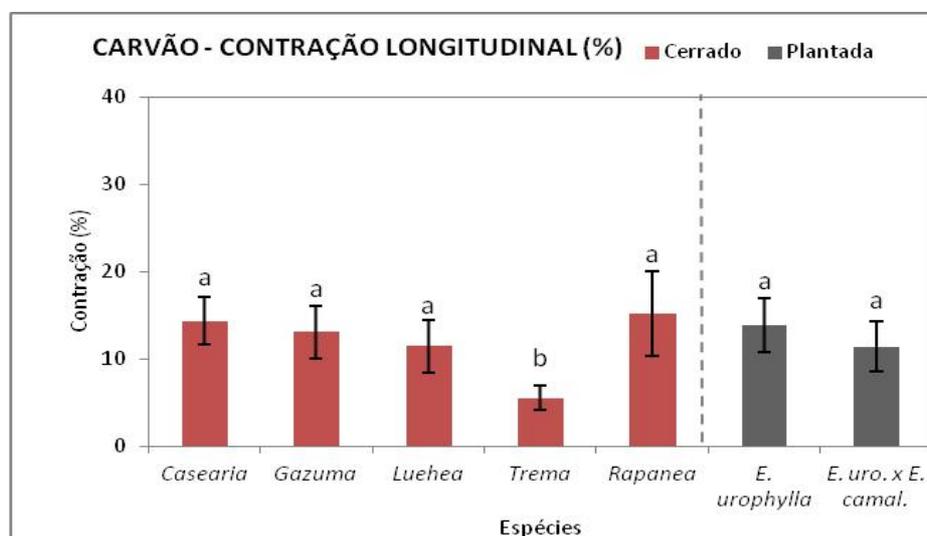


Figura 21 Apresenta gráfico com valores médios de contração longitudinal do carvão final das espécies do Cerrado e *Eucalyptus*.

Em relação às contrações longitudinais do carvão a espécie *R. ferruginea* obteve o maior valor médio, igual a 15,17%, enquanto que a espécie *T. micrantha* obteve o menor valor, 5,54%.

Assim como na secagem da madeira as espécies do Cerrado e os clones de *Eucalyptus* sofrem maiores reduções em suas dimensões nas direções tangenciais, seguidos pelas reduções radiais e por fim as longitudinais.

Visando avaliar a qualidade do carvão de *Quercus Alba* L., McGinnes et al. (1971) analisaram amostras carbonizadas em temperaturas de 270 a 400°C e obtiveram valores de perda de massa equivalente a 34,5 a 41%; 25,65% de contração tangencial, 15,45% de contração radial e 11,43% de contração longitudinal.

Já Kwon et al. (2009), avaliando mudanças estruturais na madeira de *Quercus variabilis* ao ser carbonizada em diferentes temperaturas, ressaltam que a contração dos vasos é intensa na seção tangencial, acima de 350°C de

temperatura de carbonização. As observações em microscópio eletrônico de varredura sugerem que, ocorra um rearranjo na parede das fibras e que as células de parênquima são distintas e visíveis até 300°C, sugerindo que estas células não são tão frágeis assim, como se observa na Figura 22 de *R. ferruginea*, sua estrutura anatômica permanece intacta, sofrendo pequenas rachaduras nas limitações do raios após carbonização a 450°C.

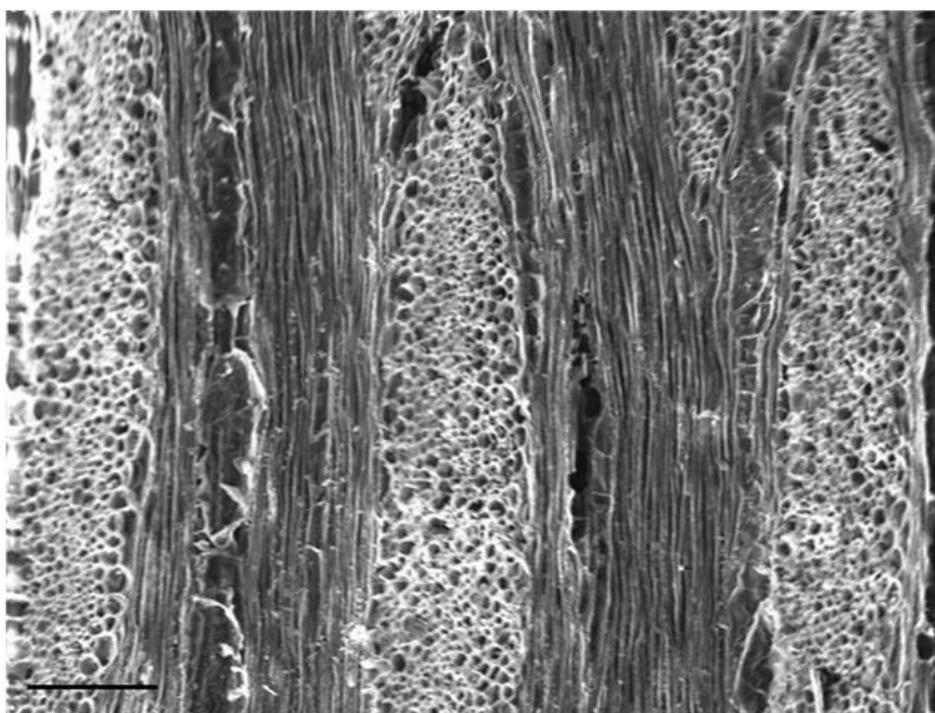


Figura 22 Apresenta imagem de microscopia eletrônica de varredura (plano tangencial) da espécie do Cerrado *R. ferruginea*. Barra de 200µm.

Kim e Hanna (2006) trabalhando com variações dimensionais de *Quercus variabilis* após a carbonização notaram que a contração foi de 26%, 15% e 11% nas direções tangenciais, radial e longitudinal respectivamente. Assim sendo, os resultados obtidos nesse estudo são semelhantes aos encontrados por estes autores, mesmo se tratando de espécie e sítios distintos.

## 5 CONCLUSÃO

Devido à falta de trabalhos descrevendo as características anatômicas das espécies do Cerrado, este estudo servirá como base para posteriores estudos tecnológicos para determinar usos apropriados.

O estudo anatômico detalhado comprovou que não houve grandes variações para os elementos anatômicos, exceto *R. ferruginea* que possui o maior número de células tanto para largura como para altura dos raios e ainda *C. sylvestris* que possui um alto número de vasos por  $\text{mm}^2$ , entre as espécies estudadas.

Houve uma variação expressiva da densidade básica das espécies estudadas (0,4 - 0,6  $\text{g/cm}^3$ ), o que permitiu um estudo bastante amplo para características anatômicas, variação dimensional da madeira e ainda rendimento em carvão.

A espécie com maior densidade básica *C. sylvestris* apresentou maior valor de contração tangencial e ainda menor teor de umidade de saturação, enquanto que a espécie com menor densidade básica, *T. micrantha* apresentou menor valor de contração tangencial e maior teor de umidade de saturação, mostrando que a massa específica é ainda o principal fator determinante do uso da madeira.

O estudo das curvas de absorção e dessorção acima e abaixo do PSF apresentaram grandes contrações acima do PSF para madeira de *Eucalyptus*, mostrando que quando a finalidade é a produção de carvão vegetal, uma secagem mais lenta e bem elaborada, com programas adequados pode influenciar a granulometria do carvão final. Evitando assim que, a madeira se torne fendilhada e quebradiça.

Por outro lado o estudo da contração radial, tangencial e longitudinal durante a secagem indicou de forma bem clara a presença de colapso nas células

da madeira de *Eucalyptus*, o que não aconteceu para a maioria das espécies do cerrado estudadas, exceto por *T. micrantha* que apresentou contração significativa acima do PSF e rachaduras severas após a carbonização.

A contração máxima obtida com a umidade a 0% indica, como sugerido pela literatura, um alto valor para contração no sentido tangencial, seguido pelo radial e longitudinal, como observado em diversos trabalhos.

Em relação à carbonização, as contrações do carvão seguem as mesmas leis que regem as contrações na madeira, tangencial>radial>longitudinal. É preciso dizer que as diferenças de contrações radiais e longitudinais são bem menores que as diferenças de contrações sofridas pela madeira durante a secagem.

Por fim o estudo das rachaduras indica que o clone *E. urophylla* e o clone híbrido de *E. urophylla* e *E. camaldulensis* apresentaram as maiores rachaduras, seguido por *T. micrantha*. As propriedades anatômicas similares e a presença de colapso sugere que este último fenômeno poderia explicar a presença de rachaduras, no entanto, é recomendado a realização de mais estudo que possam comprovar essas teorias.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.; ASSOR, C. ; PERRE, P. The Dynamic of Shrinkage/Moisture Content Behavior Determination During of Microsamples for Different Kinds of Wood. **Drying Technology**. 26:9, 1118-1124. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ANTAL, M.J.; ALLEN, S.G.; DAÍ, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M.S.; GRØNLI, M. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v.39, p.4024-4031, 2000.

ANTAL, M.J.; GRØNLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v.42, p.1619-1640, 2003.

BOURKE J., MANLEY-HARRIS M., FUSHIMI C., DOWAKI K., NUNOURA T. And ANTAL M.J. Jr. **Do All Carbonized Charcoals Have the Same Chemical Structure? 2. A Model of the Chemical Structure of Carbonized Charcoal**. *Industrial and Engineering Chemistry. Research*. 2007, 46, 5954-5967.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Informe nacional sobre áreas protegidas**. Brasília, 2007. 12 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2009**: ano base 2008. Rio de Janeiro, 2009.276p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2010. 59 p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto. **IPEF**, n. 14, p.9-20, 1977.

BRITO, J. O.; CINTRA, T. C. Madeira para Energia no Brasil : Realidade, Visão Estratégica e Demandas de Ações. **Biomassa & Energia**. v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004.

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

CAMPOS, A.C.M **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 111 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.<sup>1</sup>

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ; Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 39 p.

\_\_\_\_\_. **Mutambo *Guazuma ulmifolia***. Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, 2007. 16 p. (Circular Técnica, 138).

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980. 155p. (Série de Publicações Técnicas, 1).

CORADIN, V.T.R; MUNIZ, G.I.B. Normas de Procedimentos em Estudo de Anatomia da Madeira: Angiospermas e Gimnospermas. **IBAMA**, Brasília, 1992, 19p.

COSTA, T.G.**Propriedades da Madeira de Espécies do Cerrado Mineiro e sua Potencialidade para Geração de Energia**. Dissertação 75p. (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2011.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. 1996. 35p. Monografia – Universidade Federal de Viçosa – MG.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1989. v. 2, p. 93-121.

EVANGELISTA, W.V. et al. Caracterização anatômica quantitativa da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Scientia Forestalis**, v.38, n. 86, p. 273-284, jun.2010.

FRANKLIN, G.L. Preparation of thin sections of synthetic resin and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v.155, n.3924, p.5, 1945.

GARBE, E.A. Gradiente **de umidade e tensões na madeira: relação água-madeira**. Curitiba: UFPR, 2008. 15p.

GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.; BULIGON, E.A.; CALEGARI, L.; STANGERLIN, D.M.; OLIVEIRA, L. DA S.; SANTINI, E.J. **Estimativa da idade de segregação do lenho juvenil e adulto por meio de parâmetros anatômicos para madeira de *Luehea divaricata* Mart.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 18, n.4, p. 535-540, out.-dez., 2008.

GÓMEZ, E.O.; SEYE, O.; CORTEZ, L.A.B. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. In: AGRENER-3º Encontro de Energia no Meio Rural, 2000, Campinas, SP. **AGRENER-3º Encontro de Energia no Meio Rural. Campinas, SP : BICCA Produções, 2000.**

GONÇALVES, T.A.P.; SCHEEL-YBERT, R. Estudos anatômicos de madeiras carbonizadas da coleção de referência antracológica do setor de Paleobotânica e Paleopalynologia do DGP/MN: Anacardiaceae, Annonaceae, Aquifoliaceae, Apocynaceae, Araliaceae e Compositae. In: JORNADA GIULIO MASSARANI DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA ARTÍSTICA E CULTURAL DA UFRJ, 28, 2006, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. p.14.

GONÇALVES, T.A.P.; MARCATI, C.R.; SCHEEL-YBERT, R. Contribuição da Antracologia para a fiscalização de carvão vegetal oriundo de biomas brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, 1., 2009, Belo Horizonte. **Meio Digital...** Colombo: EMBRAPA Florestas, 2009. 1 CD-ROM.

GONÇALVES, T.A.P. **Anatomia do Lenho e do Carvão de espécies arbóreas do Cerrado no Estado de São Paulo**. 2010. 113p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp - Botucatu-SP.

HAGGE M. J., BRYDEN K.M., **Modeling the impact of shrinkage on the pyrolysis of dry biomass**. Chemical Engineering Science 57 (2002) 2811 – 2823

HASS, T. J., NIMLOS M.R. and DONOHUE B. S. **Real-Time and Post-reaction Microscopic Structural Analysis of Biomass Undergoing Pyrolysis**. Energy & Fuels 2009, 23, 3810–3817

IAWA Bulletin. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin, Utrecht**, v.10(3), p.221-359, 1989.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: IPT, 1989. 6 p.

JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. M. **Secagem Racional da Madeira**. Editora Nobel S.A., São Paulo, 1985.

KIM N. H.; HANNA, R.B. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperature. **Wood Sci Technol**. 40(5): 392-401.

KWON, S. M.; KIM, N. H.; CHA, D. S.; A investigation on the transition characteristics of the wood cells walls during carbonization. **Wood Sci Technol**. v. 43, 487-498. 2009.

LEWIS, M.; GOLDSTEIN, I.S. Wood Struture and Composition. **Marcel Dekker**, New York, 1991. 488p

LIN, J-C.M. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. **Fuel Processing Technology**, v.87, p.487-495, 2006.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**. 3 ed. Nova Odessa: Plantarum, 2000. 352p.

MCGINNES, E.A.J.; KANDEEL, S.A.; SZOPA,P.S. Some structure changes observed in transformation of wood into charcoal. **Wood Fiber**, 1971, p.77-83.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem da madeira serrada de Pinus**. 2007.155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MENDES M.G., GOMES P.A. and DE OLIVEIRA J.B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. Produção e utilização do carvão vegetal** ISSN-0100-9540, Belo Horizonte 1982.

METCALFE,C.R. & CHALK,L. **Anatomy of the Dicotyledons**. Oxford : Clarendon, v.2, 2 ed. 1983.

MEYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6701, p. 853-858, Feb. 2000.

MILOSAVLJEVIC, I.; OJA, V.; SUUBERG, E.M. Thermal effects in cellulose pyrolysis: relationship to char formation processes. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.35, p.635-662, 1996.

NUMAZAWA, S. Influência da pressão sobre o rendimento da pirolise da madeira. In. Workshop Meio Ambiente : Conservação e Desenvolvimento Sustentável de Áreas Florestais, 1., 2001, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte : UEMG,2001.1 CD-ROM.

NUMAZAWA, S. **Contribution a l'étude de la pyrolyse lente sous pression du bois**: détermination des paramètres optimums du procédé et des caractéristiques des produits obtenus. 2000. 204 p. Tese (Docteur de Génie de Procédés Industriels), Université de Technologie de Compiègne, Compiègne.

OBATAYA, E. ; GRIL, J. ; PERRÉ, P. Shrinkage of cane (*Arundo donax*) II. Effect of drying condition on the intensity of cell collapse. **The Japan Wood Research Society**. v. 51, p. 130-135, 2005.

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B.R.V.; PIMENTA, A.S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A.C.O.; Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n.2, p. 311-318, 2006.

PANSHIN, A. J, ZEEWN,C. **Textbook of wood technology**. New York: MacGraw-Hill Book Company, 1964, vol.1, 643 p.

PARK W.C. Won Chan Park, ATREVA A., BAUM H.R. **Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis**. *Combustion and Flame* 157 (2010) 481–494.

PAULA, J. E. Caracterização Anatômica de madeiras nativas do cerrado com vistas à produção de energia. **Cerne**, v. 5,p. 26-40, 1999.

PAULA, J. E.; SILVA JÚNIOR, F. G.; SILVA, A. P.P. Caracterização anatômica de madeiras nativas de matas ciliares do Centro-Oeste Brasileiro. **Scientia Forestalis**, n. 58,p. 73-89, 2000.

PAULA, J.E. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas a produção de energia e papel. **Acta Botânica**, v.33,p.242-262, 2003.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J. A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da Madeira de Algumas Espécies de Eucalipto Plantadas no Brasil**. Embrapa Florestas, n. 38, 113p. 2000.

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

PINHEIRO, A. L.; CARMO, A.P.T. Contribuição ao estudo tecnológico da Canela-azeitona, *Rapanea ferruginea* (Ruiz e Pav.) Mez, uma espécie pioneira. I características anatômicas da madeira. **Ciências Florestais** - Santa Maria, v.3, n.1,p. 121-145, 1993.

QUINHONES, R. **Relações entre as Características da Madeira de *Eucalyptus sp.* e as do Carvão Produzido a Diferentes Temperaturas finais de Carbonização**. Tese. 2011. 75p. (Doutorado em Ciências e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras – Lavras/MG

RADD, T. J. **Instrumentação dos Fornos Industriais da V&M Florestal 2000**. In: Melhoria Contínua da Carbonização da Madeira. Seminário Interno Vallourec & Mannesmann Tubes. Paraopeba – MG. 32p.

RAAD, T.J. **Drying process simulation and *Eucalyptus ssp* carbonization**. 2004. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RAAD, T.J.; PINHEIRO, P.C.C.; YOSHIDA, M.I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp*. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.93-106, 2006.

REZENDE, R. N. **Secagem de Toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão**. 2009. 178p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG.

ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO,H.T.Z. **Variação das Dimensões dos Elementos Anatômicos da Madeira de Árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos Sete Anos**. Revista Instituto Florestal, São Paulo, v. 16, n. 1, p.43-55, jun. 2004.

SCHEEL-YBERT, R. et al. Coleções de referencia e bancos de estruturas vegetais: subsídios para estudos paleoecológicos e paleoetnobotânicos. **Arquivos do Museu Nacional**, Rio de Janeiro, v. 64, p. 255-266, 2006.

SIAU, J.F. Flow in wood. Syracuse: Syracuse University, 245p., 1971.

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

SKAAR, C. Wood-Water Relationships. In **The Chemistry of solid wood**. Ed. Rowell, R.M. Advances in Chemistry Series 207, American Chemical Society, Washington, 1984, p. 127-174.

STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald, 1964. 549p.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A.J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, v.85, p.1566-1578, 2006.

TARKOW, H. **Propriety of charcoal**. Belo Horizonte: FLORASA, 1978.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, proprieties, utilization**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991.494p.

TRUGILHO, P.F; LIMA, J.T.; AKIRA, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v.7, n.2, p.104-114, 2001

TRUGILHO P.F., MOREIRA DA SILVA J.R., AKIRA MORI F., LIMA J.T., MARIN MENDES L., DE BARROS MENDES L.F. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, abr./jun. 2005.

TRUGILHO, P. F. **Carbonização da Madeira e Controle de Qualidade do Carvão Vegetal**. Universidade Federal de Lavras. Departamento de Ciências Florestais. Apostila, p.41, 2006.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, jan./mar. 2002.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M.A.E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n. 1, p.137-145, jan.-mar.,2010.

VALENTE, A. F.; LELLES, J.G. Carbonização da madeira de *Eucalyptus*.  
**Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.141, p.74-79, set. 1986.

VIANNA, E.; REZENDE, M.E.A.; PINHEIRO, P.C. da C.; SAMPAIO, R.S. **A produção de carvão vegetal**: Teoria e prática. Belo Horizonte: [s.n.], 2006. 103 p.

VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R. M. Effect of tree spacing on Wood production and Wood quality of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* at 52 months.  
**Revista Árvore**, Viçosa, v.11, p.132-145, 1987.

ZOBEL, B.J. ; VAN BUIJTENEN, J.P. Wood Variation – Its Causes and Control.  
**Springer in wood Science**. Ed. Timell, T.E., Springer Verlag, 1989, 363p.