Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão

Victor Hugo Pereira Moutinho

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2013

Victor Hugo Pereira Moutinho
Msc. em Ciência e Tecnologia da Madeira

Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARIO TOMAZELLO FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Moutinho, Victor Hugo Pereira
Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão / Victor Hugo Pereira Moutinho.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
164 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Carvão vegetal - Propriedades mecânicas 2. Clonagem 3. Densidade da madeira 4. Eucalipto - Propriedades físicas I. Título

CDD 674.142
M934i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais e minha família

Tudo que sou, devo a vocês.

Com todo carinho

De seu filho,

irmão, sobrinho, primo, neto,

Com muito carinho;

dedico...

AGRADECIMENTOS

A quem mais posso agradecer, antes de tudo, senão ao nosso Pai? Muito obrigado pelas oportunidades oferecidas, assim como pelas adversidades impostas. Sem vossos fardos, dificilmente teria ombros fortalecidos para prosseguir pelo percurso traçado.

Agradeço também aos meus bons pais – Pedro e Angela Moutinho, Maria Andrelina e Ribamar Furtado que, para fornecer o melhor que podiam a mim e a meus irmãos, muitas vezes abdicavam tanto de si. Muito obrigado!

Aos meus irmãos, que em demasia me fornecem dor de cabeça, saudades e momentos alegres, independente onde estejam, sempre estarão em meu coração.

Aos meus tios, por muitas vezes se preocuparem conosco como se fossem pais, aos primos, por muitas vezes se fazerem como irmãos, aos meus queridos avós, pelos puxões de orelhas, conselhos e por ter me ensinado a importância de rezar.

Ao Prof. Mario Tomazello, por ter ido além da função de orientador, tornando-se um amigo. Ao Prof. Brito, pelos ensinamentos, incentivos e conselhos. Ao Dr. Osmar Águiar, detentor de grande culpa por eu chegar aqui hoje. Ao Prof. Ivaldo Jankowsky, pelo conhecimento proporcionado.

Aos colegas de laboratório, pelos bons momentos tanto de convívio *in loco* e quanto nos barzinhos, em especial ao Moisés Lobão, Matheus Chagas, Luís Zumaeta, Saly Takeshita, Vinícius Resende, Marcos "Huevon", Paula Surdi, Claudio Anholleto, Manuela Dourado, Paula Martins, Marise Suzuki, Priscilla Chiua e demais colegas.

Á Maria Bermudez; pelos cafezinhos e companheirismo.

Aos ex-pupilos e atuais amigos Fernando Andrade e Claudia Cardoso. Continuem me dando orgulho.

Ao amigo Allan Motta, pelos auxílios prestados.

À Barbara Simioni, pela amizade e preocupação.

À Letícia Krauspenhar Gervinski, pelo carinho e compreensão.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, pelas condições proporcionadas.

À Universidade Federal do Oeste do Pará

Muito Obrigado

“Até que o sol não brilhe, acendamos uma vela na escuridão”
(Platão)

SUMÁRIO

SUMÁRIO 7
RESUMO 9
ABSTRACT 11
RESUMEN 13
RESUMÉ 15
1 INTRODUÇÃO 17
2 OBJETIVOS 19
2.1 Objetivo geral 19
2.2 Objetivos específicos 19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
3.1 Importância energética da biomassa e o carvão vegetal 21
3.2 O gênero *Eucalyptus* L'Hèr e as plantações florestais com fins energéticos 22
3.3 As propriedades físicas da madeira 24
3.3.1 Relações água-madeira 24
3.3.2 A densidade da madeira 27
3.3.3 Variações da densidade em madeiras de eucalipto 29
3.5 Princípios termoquímicos da pirólise 31
4 MATERIAL E MÉTODOS 37
4.1 Caracterização do local, seleção de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* 37
4.2 Corte do tronco das árvores, amostragem e confecção dos corpos de prova do lenho 38
4.3 Determinação das propriedades físicas do lenho: umidade, densidade e retratibilidade linear e volumétrica 39
4.4 Determinação das propriedades do carvão vegetal 40
4.4.1 Carbonização e rendimento gravimétrico 40
4.4.2 Determinação da retratibilidade e densidade do carvão vegetal 41
4.4.3 Determinação da resistência mecânica do carvão vegetal 41
4.5. Análises estatísticas 43
4.5.1 Ponderação dos dados e índice de heterogeneidade 46
4.5.2 Plotagem dos gráficos de superfície 47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 49
5.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira 49

5.1.1 Propriedades físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*: análise de agrupamento e das componentes principais 52
5.2 Variação das propriedades físicas da madeira 59
5.2.1 Variação longitudinal da densidade da madeira 59
5.2.2 Variação longitudinal da retratibilidade da madeira 62
5.2.3 Variação longitudinal da umidade da madeira 64
5.2.3 Variação radial das propriedades físicas da madeira 67
5.3 Caracterização do carvão vegetal 78
5.3.1 Características gerais 78
5.3.2 Análise das componentes principais do carvão vegetal 82
5.3.2 Variação longitudinal 85
5.3.3 Variação radial 88
5.4 Correlação das propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal 94
5.5 Determinação de clones potenciais para a produção de carvão 96
6 CONCLUSÃO 97

Referências 99

ANEXOS – Relatórios dos ensaios mecânicos realizados 109

RESUMO

Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão

O presente trabalho objetivou a determinação e análise comparativa das propriedades físicas da madeira e do respectivo carvão vegetal, ao longo da direção radial e longitudinal do lenho de árvores de dez clones de alta produtividade de *Eucalyptus* e *Corymbia.* Para tanto, discos de diferentes alturas do tronco foram coletados de árvores das espécies, no município de Capelinha-MG, obtendo-se amostras para a determinação da densidade básica, contração linear e volumétrica, coeficiente de anisotropia e umidade inicial. Na sequência, os corpos de prova foram carbonizados, visando a determinação da densidade aparente, degradação linear e volumétrica, rendimento gravimétrico e resistência mecânica à compressão. Na avaliação do experimento, utilizou-se a análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado e as análises de componentes principais (ACP), dissimilaridade e multivariada (correlação canônica) na avaliação comparativa entre as propriedades físicas da madeira e do carvão. Como resultados, verificou-se uma alta heterogeneidade entre as espécies estudadas, as quais dividiram-se em 4 grupos distintos, sendo que as contrações lineares e volumétricas mostraram-se independentes da densidade e com correlações significativas entre si. Após a carbonização, o agrupamento se fez diferente ao ocorrente para madeira, sendo que a densidade aparente apresentou alta correlação para as variáveis estudadas do carvão, a exceção da degradação linear longitudinal. A relação canônica apontou relações significativas positivas com a densidade aparente do carvão e também para o módulo de elasticidade, resistência à compressão, rendimento gravimétrico, degradação linear radial axial e tangencial. As contrações lineares e volumétricas da madeira pouco contribuíram para as propriedades do carvão. Os clones pertencentes ao gênero *Corymbia* mostraram-se mais promissores à produção de carvão.

Palavras - chaves: Variação longitudinal; Variação radial; Propriedades físicas da madeira; Propriedade mecânicas do carvão

ABSTRACT

Influence of dimensional variability and density of *Eucalyptus* sp. and *Corymbia* sp. in the coal quality

This study aimed to make a comparative analysis and to determine the physical properties of wood and its charcoal along the radial and longitudinal directions of the wood of ten clones of *Eucalyptus* and *Corymbia*, of high productivity. Therefore, disks of different heights of the trunk were collected from tree species in the town of Capelinha, State of Minas Gerais - Brazil, obtaining test samples according to specific standard for determining the density, linear shrinkage and volumetric coefficient of anisotropy and initial moisture. Following, the samples were charred, aimed at determining the bulk density, volumetric and linear degradation, gravimetric yield and mechanical strength. For the evaluation of the experiment a variance analysis in a completely randomized statistical design and the principal component analysis (PCA) on comparative evaluation of the physical properties of wood was used. Multivariate dissimilarity (canonical relations) in the comparative evaluation of the physical properties of wood and charcoal was used as well. As a result, there was a high heterogeneity between the studied species, which were divided into four different groups, and also the linear and volumetric contractions were shown to be independent of density and with significant correlations with each other. After carbonization the group was different from occurring wood, where the apparent density was highly correlated to the charcoal variables, except the longitudinal linear degradation. The canonical relationship pointed to positive relationships with the bulk density of the charcoal and also the elasticity modulus, compression resistance, gravimetric yield, axial, radial and tangential linear degradation. The volumetric and linear shrinkage of wood did not significantly contribute to the properties of the charcoal. The hybrids of the genus *Corymbia* were more promising for charcoal production.

Keywords: Longitudinal variation; Radial variation; Physical properties of wood; Mechanical property of charcoal

RESUMEN

Influencia de la variabilidad dimensional, densidad de Eucalyptus sp. y Corymbia sp. sobre la calidad de carbón

Este estudio tuvo como objetivó la determinación y análisis comparativo de las propiedades físicas de la madera y del respectivo carbón vegetal de las secciones radial y longitudinal de árboles de diez clones de *Eucalyptus* y *Corymbia*, de alta productividad. Para esto, discos de diferentes alturas del tronco fueron colectados de las especies, en el municipio de Capelinha-MG, la obtención de probetas fue realizada conforme norma especifica, para la determinación de densidad básica, contracción lineal y volumétrica, coeficiente de anisotropía y humedad inicial. Seguidamente las probetas fueron calcinadas, con el objetivo de determinar la densidad aparente, degradación lineal, volumétrica, rendimiento gravimétrico y resistencia mecánica a la compresión. En la evaluación del experimento, se utilizó análisis de varianza, según delineamiento completamente al azar y análisis de componentes principales (ACP) disimilitud y análisis multivariado (relaciones canónicas) en la evaluación comparativa de las propiedades físicas de la madera y el carbón. Como resultado, se constató una alta heterogeneidad entre las especies estudiadas, las cuales se dividieron en cuatro grupos diferentes, siendo que las contracciones lineales y volumétricas se mostraron independientes de la densidad y con correlaciones significativas entre sí. Después de la carbonización, el agrupamiento se hace diferente a lo perteneciente a la madera, siendo que la densidad aparente presentó alta correlación para las variables estudiadas del carbón, excepto la degradación lineal longitudinal. La relación canónica indicó una relación significativa con la densidad aparente del carbón y también para el modulo de elasticidad, resistencia a compresión, rendimiento gravimétrico, degradación lineal radial axial y tangencial. Las contracciones lineales y volumétricas de la madera contribuyeron poco a las propiedades del carbón. Los clones pertenecientes al género *Corymbia* se mostraron más promisores a la producción de carbón.

Palabras clave: Variación longitudinal; Variación radial; Propiedades físicas de la madera; Propiedad mecánica del carbón

RESUMÉ

L'influence de la variabilité dimensionnelle et de la densité des Eucalyptus sp. et sp Corymbia. Dans la qualité du charbon.

Cette étude vise à déterminer et à faire une analyse comparative des propriétés physiques du bois et du charbon, en tenant compte les directions radiale et longitudinale du bois des arbres dix clones d'Eucaliptus e Corymbia, qui ont une productivité élevée. Pour cela, les disques de différentes hauteurs du tronc ont été collectés pour chaque espèce d'arbres dans la ville Capelinha-MG, des échantillons d'essai selon les Normes spécifiques pour la détermination de la densité, du retrait linéaire et du coefficient volumétrique d'anisotropie et de l'humidité initiale. Après, les spécimens ont été carbonisés, en cherchant à déterminer la densité apparente, la dégradation volumétrique et linéaire, le rendement gravimétrique et la résistance mécanique. Dans l'évaluation de l'expérience, nous avons utilisé l'analyse de variance, complètement aléatoire et l'analyse en composantes principales (ACP) et la dissemblance multi variée (relations canoniques) dans l'évaluation comparative des propriétés physiques du bois et du charbon. En conséquence, il y avait une grande hétérogénéité entres les espèces étudiées, qui ont été divisés en quatre groupes différents, dont les contractions linéaires et volumétriques ont été révélées indépendantes de la densité, par contre ils ont eu des corrélations significatives entre eux. Après la carbonisation, le groupe est composé d'un autre arrangement que celui du bois, et la densité apparente est fortement corrélée aux variables de charbon, à l'exception de la dégradation longitudinale linéaire. La relation canonique engendra des relations significatives avec la densité apparente du charbon ainsi que le module d'élasticité, réistance a lá compression, le rendement gravimétrique, la dégradation linéaire axial radial et tangentiel. Le retrait volumique et linéaire du bois contribuent faiblement à obtenir les propriétés du charbon. Les clones du genre Corymbia étaient les plus prometteurs pour la production de charbon.

Mots-clés: Variation longitudinale; Variation radiale; Les propriétés physiques du bois; Propriété mécanique de charbon

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 10% da energia produzida mundialmente advém da biomassa, sendo que, em países emergentes, esta é responsável por um terço da energia utilizada, enquanto que em países economicamente mais consolidados, esta contribuição geralmente fica entre 0,1 e 4% (IEA 2010; HALL *et al.,* 2005).

No Brasil, 30% do consumo por fonte da matriz energética nacional é proveniente da biomassa, onde a madeira e seus derivados correspondem a 33% deste total (MME, 2011). Ressalta-se que cerca de 32% da lenha produzida no país, aproximadamente 25 milhões de toneladas, é transformada em carvão vegetal visando, entre outros, o abastecimento energético de indústrias, o qual representa cerca de 4,7% da energia utilizada pelo setor (EPE, 2011).

Tal demanda energética acarreta no plantio de uma área aproximada de 6,5 milhões de hectares, representando cerca de 0,75% do território nacional, produzindo 162,6 milhões de metros cúbicos de madeira em tora e gerando, em média, 4 milhões de empregos diretos e indiretos (ABRAF, 2010; SBS, 2008). Deste total, em 2009, as espécies do gênero *Eucalyptus* L'Hèr. representavam 66% da área de florestas plantadas, sendo que 20% são destinados à produção de carvão vegetal (ABRAF, 2010).

Atualmente, existe a necessidade do aprimoramento de materiais genéticos de eucalipto para direcionar os programas de melhoramento genético, de manejo e nutrição florestal visando a produção de carvão vegetal. Nesse sentido, é comum encontrar trabalhos referentes a adubação, técnicas de manejo, produção de biomassa, entre outros, visando o aumento da produtividade do plantio. Contudo, pouco se encontra a respeito da qualidade da madeira produzida visando sua utilização energética, mesmo sendo o carvão vegetal uma importante fonte para a matriz energética nacional.

Outrossim, a madeira, matéria prima para o carvão vegetal, é originária de um sistema biológico complexo, tornando-se um material de grande variabilidade, com suas propriedades físicas e mecânicas variando significativamente entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e, mesmo, entre diferentes partes de uma mesma árvore, as quais justificam-se pelas diferenças anatômicas internas, mudanças sofridas pelo processo de cernificação, efeito de sítio, entre outros fatores.

Esta variabilidade interna da madeira influencia diretamente no produto obtido. No caso do carvão vegetal, diferentes partes do fuste proporcionam produtos com diferentes rendimentos gravimétricos, resistências e densidades, além de outras propriedades, como reflexo desta variabilidade.

O mapeamento das propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal no sentido base-topo e medula casca, além de fornecer uma melhor compreensão da matéria prima e do produto final, com o devido controle dos corpos de prova utilizados, poderão correlacionar-se, fornecendo dados referentes quanto às propriedades físicas que influenciam significativamente na qualidade do carvão vegetal, gerando assim subsídios para estudos futuros quanto, por exemplo, para minimizar a heterogeneidade do produto final e aumentar o rendimento gravimétrico e resistência por meio do melhoramento genético dos clones utilizados.

Pelo exposto, o presente estudo refere-se à análise das características do lenho das árvores de eucalipto visando a melhor compreensão da qualidade da madeira produzida avaliando a correlação entre as propriedades físicas da madeira, tanto no eixo radial quanto longitudinal com a qualidade do carvão produzido, na compreensão de suas propriedades referentes a densidade aparente, resistência mecânica, rendimento gravimétrico e degradações lineares e volumétricas por meio da análise de componentes principais e relações canônicas.

A Análise de Componentes Principais (PCA) é um procedimento baseado na transformação linear de um conjunto de dados em um novo sistema de coordenadas e tem como objetivo reduzir a dimensionalidade deste conjunto de dados mantendo a informação e permitindo compreender a influência que cada característica estudada exerce sobre sua semelhante, enquanto que a análise de correlação canônica fornecerá uma maneira simples de reduzir as complexidades envolvidas em relacionar dois conjuntos de variáveis (TRUGILHO *et al.*, 2003), neste caso, as propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar a variação radial e longitudinal da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* e analisar as relações existentes entre as propriedades da madeira e as do carvão vegetal.

2.2 Objetivos específicos

Determinar a variação radial e longitudinal das propriedades físicas da madeira;

Determinar a variação radial e longitudinal das propriedades do carvão vegetal;

Correlacionar as propriedades da madeira com as do carvão vegetal;

Determinar os clones potenciais de *Eucalyptus* e de *Corymbia* para a produção de carvão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Importância energética da biomassa e o carvão vegetal

Segundo Hall *et al.* (2005), a biomassa é responsável por cerca de 1/3 da energia consumida em países emergentes, chegando a 45% na Índia, 30% no Brasil e China, de 15 a 10% no México e África do Sul, enquanto que em países economicamente mais consolidados, esta contribuição geralmente fica entre 0,1 e 4%. De forma geral, cerca de 10% da energia produzida no mundo advém da biomassa, sendo que há perspectivas de que, em 2030, esta fonte de energia atinja o patamar de 18% (IEA, 2010).

Caracteriza-se como biomassa todo material orgânico, de origem biológica, sintetizados por meio da fotossíntese, a exemplo, dentre outros, os resíduos agrícolas, o esterco animal e a madeira. Para Basu (2010), a utilização da biomassa visando a obtenção de energia por meio da queima não maximiza a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera pois grandes quantidades deste material são absorvidos no decorrer do incremento da biomassa, sendo reconhecida então como um combustível limpo e renovável, desde que haja sustentabilidade em sua renovação, a exemplo do manejo de plantações florestais visando a obtenção de energia (IEA, 2007).

As tecnologias utilizadas na produção, conversão e uso final da biomassa vão das mais simples às mais sofisticadas. A lenha, por exemplo, pode ser extraída de florestas nativas ou colhida por meio de complexos sistemas em florestas energéticas, assim como sua utilização pode ir desde a queima direta em fogões de barro, comumente encontradas nas residências ribeirinhas da região amazônica, até a produção de carvão vegetal para siderurgia ou para gaseificação e formação da matéria-prima de gás para síntese orgânica ou energia.

No Brasil, cerca de 32% da lenha produzida, aproximadamente 25 milhões de toneladas, são transformadas em carvão vegetal visando, entre outros, o abastecimento energético de indústrias, o qual representa cerca de 4,5% da energia utilizada pelo setor (EPE, 2011).

Para Brito (2007), a quantidade significativa de lenha transformada em carvão vegetal ocorre, principalmente, em decorrência da alta demanda do produto pelo setor siderúrgico, pois as indústrias deste setor no Brasil utilizam, em sua maioria, o carvão vegetal como agente redutor no processo de obtenção de ferro-gusa por meio do óxido de ferro. O montante de madeira necessária para este processo advém tanto de florestas nativas quanto de plantadas, na proporção 1:1 (SBS, 2008).

Atualmente, o Brasil possui uma área aproximada de 6,5 milhões de hectares de floresta plantada, o que representa cerca de 0,75% do território nacional, produzindo 162,6

milhões de metros cúbicos de madeira em tora e gerando, em média, 4 milhões de empregos diretos e indiretos (ABRAF, 2010; SBS, 2008). Destas, em 2009, as espécies do gênero *Eucalyptus* L'Hèr. representam 66% da área de florestas plantadas, sendo que 20% desse total são destinados à produção de carvão vegetal (ABRAF, 2010).

3.2 O gênero *Eucalyptus* L'Hèr e as plantações florestais com fins energéticos

Pertencente a família das Myrtaceas Juss., o gênero *Eucalyptus* L'Hér. é uma folhosa originária da Austrália, Timor e Indonésia, possuindo mais de 700 espécies identificadas (CIB, 2008), geralmente conhecidas como eucalipto - do grego *eu* + *kalipto* = "verdadeira cobertura" - devido ao opérculo de sua flor, o qual abrange os estames durante o desenvolvimento floral e cai no decorrer do desabrochamento (DAFF, 2011; PRYOR, 1976).

De forma geral, as árvores deste gênero são consideradas lenhosas, de tronco retilíneo, com casca pulverulenta, ramagem longa e robusta, formando copa aberta ou alongada e tem uma amplitude de altura variando entre 10 e 50 metros, dependendo do tipo de floresta, solo, idades, procedências e ritmos de crescimento, possuindo, contudo, cerca de 30 a 40 espécies arbustivas (ANDRADE, 1961; LORENZI *et al*, 2003 apud LOPES, 2008; MORA; GARCIA, 2000).

As folhas de eucalipto podem ser consideradas perenes - embora algumas espécies tropicais as percam no fim da época seca -, de textura coriácea, inteiras de disposições alternas ou opostas e as vezes cruzadas com estipulas muito pequenas, além de possuírem glândulas que segregam óleo essenciais com diferentes características físico-químicas entre as espécies (BALDINI, 2008; BOTANICAL, 2011; LOPES, 2009).

O cultivo do eucalipto data do início do século XVIII, mais especificamente em países da Europa, Ásia e África, enquanto que, na América do Sul, países como Chile, Argentina e o Uruguai iniciariam plantios entre 1820 e 1860, enquanto que, no Brasil, as primeiras mudas chegaram em meados de 1865 visando ornamentação na região Sul e Sudeste do País (MORA; GARCIA, 2000). No início do século XX, o plantio de eucalipto tomou impulso devido a grande facilidade de adaptação a diferentes condições de solo e clima (BERTOLA, 2004).

Para Magalhães (2001), o plantio de florestas visando suprir demanda energéticas no Brasil advém de meados de 1890, quando a Companhia Paulista de Estradas de Ferro plantou árvores de rápido crescimento na finalidade de prover as locomotivas com madeira para a geração de vapor. A escolha do eucalipto como principal grupo de espécies utilizadas na implantação dessas florestas ocorreu devido aos seu alto índice de produtividade, grande

plasticidade ambiental, características físico-energéticas vantajosas de sua madeira, alta taxa de crescimento, fuste retilíneo, altura propícia para comercialização e propriedades tecnológicas discrepantes entre a madeira de diferentes espécies (COUTO; MÜLLER, 2008; ALZATE *et al.,* 2005; MORA; GARCIA, 2000, OLIVEIRA *et al*., 1999).

Em meados de 1980, visando melhor definir plantações florestais com fins energéticos, que almejavam maior produção de biomassa madeira por hectare em um menor espaço de tempo possível, impulsionado, principalmente, pela crise energética de 1970 e pela busca de formas alternativas viáveis de energia, pois até então predominava no país tratos como ciclos de 21 anos com 3 cortes no decorrer do ciclo (BERTOLA, 2004; MAGALHÃES, 1982).

Assim, com o posterior desenvolvimento de pesquisas em melhoramento genético, manejo do solo e de nutrição, elevou-se a média da produtividade das plantações florestais de 15 (década de 50) para 55 m³/ha/ano, além do aumento da altura das árvores que anteriormente, aos 7 anos, chegava a 18 metros enquanto que hoje atingem a média de 25 metros (QUEIROZ; BARRICHELO, 2008).

Desta forma, com o aumento na demanda por matéria prima para a produção de madeira, lenha, moirões, dormentes e, a partir de 1945, para produção de celulose, compensados e chapas, o eucalipto tornou-se a espécie mais plantada no mundo já no início do século XX (BERTOLA, 2004; SUZANO, 2006**).**

Segundo GIT (2009) a área plantada com eucalipto no mundo em 2009 chegou a 20 milhões de hectares, onde a Ásia corresponde a 40,78 %, as Américas por 36,41 %, a África 11,65 %, a Europa 6,31 % e Oceania por 4,85 %. Do total global, o Brasil corresponde a aproximadamente 20% (GIT, 2009). Segundo Dossa *et al.* (2002) apesar da grande variação de plantações entre os continentes, o eucalipto vem desempenhando uma importante função para a produção sustentada de madeira para múltiplas finalidades, reduzindo significativamente a pressão de consumo sobre as florestas naturais de todo o mundo.

Estudos referentes as correlações entre propriedades da madeira de eucalipto e o carvão vegetal produzido demonstram, entre outros, que quanto maior o teor de lignina e da densidade da madeira, maior será o rendimento gravimétrico do carvão e do carbono fixo, quando utilizada a mesma velocidade e temperatura máxima de carbonização no material (BRITO; BARRICHELLO, 1977; BOTREL *et al.*, 2007; GOMES; OLIVEIRA, 1982), enfatizando assim a importância do entendimento e controle do processo de carbonização, assim como o conhecimento da variabilidade inerente ao lenho da arvore.

3.3 As propriedades físicas da madeira

A madeira é originária de um sistema biológico complexo, tornando-se um material de extrema variabilidade, com uma ultra-estrutura e composição química, bem como suas propriedades físicas e mecânicas, variando significativamente entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e, mesmo, entre diferentes partes de uma mesma árvore (OLIVEIRA; SILVA, 2003). Tsoumis (1968) e Panshin *et a*l (1964) afirmam que estas variabilidades justificam-se pelas diferenças anatômicas internas, mudanças sofridas pelo processo de cernificação, efeito de sítio, entre outros fatores.

Segundo Trugilho *et al* (2005) estas variabilidades têm influencia decisiva sobre a sua melhor forma de utilização. Para Oliveira e Silva (2003), a magnitude destas variações pode ser influenciada pela direção estrutural e a posição dentro da árvore. Para Malan (1995), as variações no sentido radial são mais significativas do que ao longo do fuste.

3.3.1 Relações água-madeira

A qualidade dos produtos derivados da madeira está associada à qualidade da madeira utilizada para a sua produção, a qual dependerá de um conjunto de características químicas, físicas, mecânicas e anatômicas inerentes à madeira onde, ao serem adequadamente avaliadas, tornam-se parâmetros indicativos que auxiliam no emprego de determinada espécie vegetal para seu uso específico (FREDERICO, 2009).

Para Fengel e Wegner (2003a), Oliveira *et al* (2010), as alterações dimensionais da madeira se devem ao fato de as moléculas de água estarem ligadas por pontes de hidrogênio às microfibrilas dos polissacarídeos que formam a madeira, e quando estas são forçadas a saír, as forças de coesão tendem a reaproximar as microfibrilas, causando, portanto, contração da madeira como um todo. O fenômeno da expansão é o inverso, ou seja, quando a água adsorvida pela madeira, tende a penetrar entre as microfibrilas, causando, portanto, o afastamento delas e o consequente inchamento da peça de madeira como um todo.

Quanto a sua composição química, a madeira pode ser definida como um polímero biológico tri-dimensional, composto por uma rede interconectada de celulose, hemiceluloses e lignina, além de uma porção minoritária de extrativos e componentes inorgânicos (Tabela 1), estes últimos geralmente considerados componentes secundários (LEPAGE *et al.*, 1986; ROWELL *et al.*, 2005) onde, para Hori e Elbein (1985), a celulose é o mais abundante carboidrato ocorrente na natureza e o composto mais freqüente na parede celular

Para Fengel e Wagener (2003a), a celulose chega a constituir de 40 a 50% de todas as plantas. Para Rowell *et al*. (2005); Hori e Elbein (1985); Immergut (1975), a celulose pode

ser conceituada como um polímero de cadeia linear com comprimento suficiente para ser insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e álcalis diluídos, à temperatura ambiente, consistindo única e exclusivamente de unidades de β - D - 1,4 anidroglucopiranose, as quais ligam-se através dos carbonos 1- 4, possuindo uma estrutura organizada e parcialmente cristalina.

Para Saxena Junior (2005) o estado de cristalinidade das cadeias de celulose pode ser determinado pelo arranjo das moléculas de glucose na cadeia formada. Aproximadamente cerca de 40 cadeias de celulose são formadas paralelamente por meio de um complexo enzimático, denominado como Rosette terminal complex - RTC, as quais associam-se entre si imediatamente após suas respectivas síntese para formar a microfibrila (BROWN JUNIOR *et al.*, 1996). De forma mais detalhada, duas moléculas de glucose, formadas no interior dos RTCs por meio das uridina-difosfato-glucose – UDP-glucose (HORI; ELBEIN, 1985) irão ligar-se entre si através dos carbonos 1-4, onde uma das moléculas de glucose realizará um giro de 180º para poder ligar-se à molécula vizinha e desta reação resultar na liberação de uma molécula de água e na formação da celobiose, as quais ligarão entre si, formando a cadeia linear de celulose e, posteriormente, a microfibrila (DELMER; AMOR, 2005). Segundo Brown Junior *et al*. (1996) as cadeias de celulose possuem grau de polimerização entre 2000 a 25000, enquanto que o agrupamento de feixes de celulose em microfibrilas podem variar entre 36 até 1200, sendo o último encontrado somente em algas.

O processo de biossíntese da celulose está diretamente ligado à formação e angulação da microfibrila e, conseqüentemente, às diversas propriedades tecnológicas da madeira. A exemplo disto, Fengel e Wegner (2003a) demonstraram a importância dos grupos hidroxílicos existente nas moléculas de celulose devido as ligações intramoleculares entre si, aumentando a resistência da molécula, assim como as ligações intermoleculares, onde nas regiões cristalinas ocorrem a formação de ligações de hidrogênio entre outras moléculas de celulose, enquanto que, nas regiões amorfas, as hidroxilas estão livres para ligar-se, entre outros, com as hemiceluloses e as moléculas de água que, quando estas últimas são retiradas por meio da secagem, as cadeias de celulose aproximam-se entre si, resultando na contração da parede celular e, consequentemente, da madeira como um todo.

Quando uma peça de madeira é exposta em condições atmosféricas, ela tende a perder água para o meio ambiente ou absorvê-la. Segundo Galvão e Jankowsky (1985), o lenho das árvores vivas ou recentemente derrubadas apresenta alto teor de umidade (seiva mineral) preenchendo o lume dos vasos e das demais células, sendo denominada água de capilaridade ou livre. Quando toda água livre é removida da madeira, permanecendo apenas

água de impregnação, ou seja, apenas a água adsorvida na parede celular, tem-se aí o ponto de saturação das fibras – PSF, o qual está localizado entre 30-27% de umidade da madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; PANSHIN; DE ZEEUW, 1970).

Para Oliveira e Silva (2003), a contração e a expansão higroscópica da madeira são dois dos mais importantes problemas práticos que ocorrem durante a sua utilização, como consequência da mudança do teor de umidade em decorrência da magnitude das variações dimensionais dependentes de inúmeros fatores, como o teor de umidade, a direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), a posição dentro da árvore, a densidade da madeira, a temperatura, o grau de estresse de secagem causada pelo gradiente de umidade, entre outros.

Galvão e Jankowsky (1985) citam também que, devido à característica anisotrópica da madeira, as mudanças dimensionais observadas ocorrem de forma diferenciada ao longo da direção longitudinal, radial e tangencial, onde o primeiro quase não se contrai e o terceiro pode se contrair até duas vezes mais que o segundo.

Para Panshin e De Zeeuw (1970), as contrações da madeira variam de acordo com a ultra-estrutura da parede celular, ou seja, com a interação da quantidade proporcional da parede celular do material, com a média do ângulo microfibrilar nas paredes das células e com a extensão da lignificação da parede da célula.

Ocorre na madeira um último tipo de água, a qual é denominada como água de composição química. Segundo Martins (1988) e Skaar (1972), esta água encontra-se quimicamente combinada com as substâncias da parede celular, ou seja, não é realmente água até que o material seja aquecido em condições drásticas, a exemplo da carbonização, permitindo degradações térmicas dos componentes fundamentais da madeira, resultando na quebra de grupos hidroxílicos e ocasionando na formação de moléculas de água. Para Skaar (1972), a água de constituição não apresenta relação significativa entre a substância madeira e a água de impregnação, não influenciando assim nas propriedades físicas e mecânicas da madeira. Nos estudos para a produção de carvão vegetal, a água contida nos tecidos do lenho do tronco das árvores constitui-se em um importante parâmetro de análise devido ao considerável tempo de secagem da matéria-prima ao ar livre e, posteriormente, através da saída forçada da água no processo de carbonização, a qual contribui para um menor rendimento da matéria prima, pois quanto maior a umidade inicial desta, menor é a formação do resíduo carbonífero, além de aumentar o gasto energético para a produção do mesmo, pois maior da energia do sistema será direcionada para a evaporação da água (Oliveira et al., 1982).

Siau (1984) definiu a facilidade em que fluidos são transportados através de um sólido poroso, neste caso a madeira, sob a influência de um gradiente de umidade pode ser definido como permeabilidade. Segundo Brandão (1989), a permeabilidade da madeira está diretamente relacionada à sua densidade: quanto mais permeável, menor é sua densidade; sendo um fator importante na sua secagem. Isto ocorre, principalmente, devido as dimensões dos poros, sua quantidade e distribuição (ARAÚJO, 2002), que facilitam a retirada e absorção de água.

A exemplo disto, quando uma espécie apresenta raios, lumes e poros diminutos acompanhado de fibras espessas e parênquima escasso, esta possuirá uma densidade considerada alta e baixa permeabilidade devido a pequena quantidade de espaços vazios existentes, assim como pela alta proporção de parede celular. Tal informação se faz importante quando se trabalha com a retirada de água da madeira, tanto que Galvão e Jankowsky (1985) apresentam diferentes comportamentos de gradientes de secagem conforme a permeabilidade da madeira. Todavia, vale ressaltar que apesar de sua relação inversamente proporcional com a densidade, nem sempre esta se faz verdadeira.

3.3.2 A densidade da madeira

A densidade da madeira é reconhecida como um dos parâmetros mais importantes na avaliação de sua qualidade devido sua relação com diversas outras características do lenho (BURGER; RICHER, 1991; SHIMOYAMA; BARICHELLO, 1991), onde sua determinação pode ser realizada de duas diferentes formas: (i) incluindo o volume referente aos poros da madeira; (ii) subtraindo do volume total o valor referente aos espaços vazios inerentes à madeira (TRUGILHO *et al.*, 1990).

A densidade da substância madeira, também conhecida como densidade real da madeira ou densidade da parede celular, é calculada a partir da subtração do volume total, o volume referente aos espaços vazios existentes no material, deixando apenas a parede celular, demonstrando, por meio da relação da massa e volume a 0% de umidade, média próxima a 1,53 ou 1,45 g/cm³, quando imerso em a água ou em gás hélio / benzeno, respectivamente (PANSHIN; DEZEEUW, 1980).

Tal diferença ocorre devido as diferentes propriedades do fluido deslocado e a afinidade do mesmo com a celulose (SIAU, 1984). Stamm e Hansen (1937) *apud* Siau (1984) especificam isto ao citar a (i) adsorção da água e conseqüente expansão da madeira quando usada a água como fluido e (ii) a dificuldade de solventes não-polares em penetrar as microcavidades da parede celular.

Skaar (1988), após levar em consideração os trabalhos de Stamm (1964), Skaar (1972) e Siau (1984), os quais discutem os fatores que afetam a densidade da parede celular, assume o valor próximo a 1,5 g/cm³ para a densidade real da madeira. Este valor, além de possuir pouca variação entre diferentes espécies de madeira, vai de acordo com a média ponderada dos valores individuais de densidade dos componentes da parede celular, contudo, pouco ainda se sabe quanto aos valores de densidade das diferentes camadas da parede celular (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Todavia, vale ressaltar que a madeira é um material poroso e de grande variabilidade, por isso a necessidade de compreensão da proporção da substância madeira com a porosidade existente para o melhor uso do material. Quanto a terminologia, tanto Bowyer et al. (2007) como Skaar (1984) e Panshin e DeZeeuw (1980) defendem que a densidade é definida como a relação unidade de massa pelo volume da madeira na mesma condição de umidade, assim denominada como densidade aparente.

Dependendo da finalidade e da norma a ser seguida, trabalha-se com diferentes valores de umidade da madeira para a obtenção da densidade. No geral, as duas normas mais utilizadas no Brasil, NBR 7190 (ABNT, 1997) e a D143-94 (ASTM, 1994) padronizam a umidade de equilíbrio da madeira em 12% para a obtenção de valores de densidade aparente, visando simular o comportamento do material quando em equilíbrio com o ambiente, entretanto, diferentes umidades da madeira são utilizadas conforme a finalidade visada.

Bowyer *et al.* (2007) explanam que a densidade aparente saturada é usada para o cálculo de transporte da madeira, já a densidade aparente anidra é importante para trabalhar-se quimicamente com a madeira, a exemplo do processo de polpação e adição de adesivo na fabricação de painéis. Ademais, cita-se também a densidade básica.

A densidade básica é um índice que é calculado pela relação entre a massa de madeira seca e o seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras (KOLLMAN; CÔTÉ, 1968), a qual provém um interessante parâmetro para a conversão de volume verde em massa seca pois, quando em tora, a madeira é geralmente comercializada em metros cúbicos e a massa seca desta é um importante parâmetro para o planejamento e utilização na indústria (SKAAR, 1984).

Terminologicamente, não é coerente a utilização do termo “densidade básica” para o índice citado devido o seu cálculo ocorrer com unidades obtidas em diferentes teores de umidade da madeira, tanto que Panshin e DeZeeuw (1982) sugerem a adoção do termo “massa especifica” para tal índice, o qual é adotado em diversas publicações, a citar, Bowyer *et al.* (2007), Green *et al.* (1999), Simpson e TenWold (1999), Skaar (1988), entre outros.

Todavia, no Brasil, o termo “massa específica” tornou-se sinonímia para “densidade básica”, sendo este último o mais adotado entre os pesquisadores nacionais, a citar, entre outros, Alzate *et al.* (2005); Batista *et al.* (2010), Brito *et al.* (2006), Oliveira e Silva (2003), Trugilho *et al.* (2005).

A densidade básica da madeira, no melhoramento florestal, é usualmente utilizada para evidenciar o potencial de seleção das espécies enquanto que, no manejo determina o tipo de prática a ser aplicada em função do produto final. Diversos trabalhos demonstram uma tendência de queda da densidade básica para povoamentos de maior crescimento e produtividade volumétrica (BRASIL; FERREIRA, 1971; FERREIRA *et al*., 1978; FOELKEL, 2009; MIGLIORINI *et al*., 1988). Assim, torna-se importante associar os diferentes tratamentos silviculturais com a qualidade da madeira para a obtenção de um produto coerente com sua utilização final.

Silva (2011) relata que a densidade, dentre os parâmetros físicos, é a mais importante propriedade a ser analisada para a produção de pasta celulósica devido sua natureza complexa, resultante da combinação de diferentes fatores, os quais influenciam tanto no processo quanto na qualidade da polpa produzida.

Para Oliveira *et al.* (2005), quanto mais homogênea a distribuição da densidade no interior do tronco, melhor será o comportamento da madeira nas operações de processamento, refletindo também maior uniformidade nas demais propriedades tecnológicas, pois peças de madeira com menor variação de densidade são adequadas para utilizações que exigem material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físico-mecânicas.

A obtenção de uma matéria-prima mais homogênea, quando visada a produção de carvão vegetal, permitirá aumentar o rendimento do processo de carbonização, bem como melhorar significativamente a qualidade do carvão produzido, tanto que empresas estão investindo no desenvolvimento de novas tecnologias de utilização da madeira que avaliem a sua qualidade (TRUGILHO *et al.*, 2005).

Assim, na caracterização da madeira, a determinação de sua densidade e, principalmente, de sua variação dentro da árvore, tanto na direção radial, da medula para a casca, quanto no sentido base-topo, é fundamental como subsídio ao entendimento de sua qualidade (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

3.3.3 Variações da densidade em madeiras de eucalipto

Para Kolmann e Côté (1968), as variações da densidade da madeira entre as diversas espécies florestais ocorrem devido a espessura da parede celular, das dimensões das células,

das inter-relações entre esses fatores e da quantidade de extrativos e componentes inorgânicos presentes por unidade de volume. As diferenças estruturais são obtidas através da quantificação proporcional dos tipos de células (fibras, traqueídeos, vasos, canais resiníferos, raios) de suas dimensões e, especialmente, da espessura das suas paredes celulares. As variações da densidade da madeira no tronco das árvores de uma mesma espécie são ocasionadas pelo genótipo, pelo ambiente e pela interação genótipo x ambiente (TSOUMIS, 1969; PANSHIN *et al.*; 1964).

Para Panshin e De Zeeuw (1970), há três formas de variação longitudinal da densidade, onde a mesma pode decrescer uniformemente no sentido base-topo; decrescer da base até a metade da altura do tronco e a partir daí cresce até o topo; ou então crescer da base para o topo, embora desuniformemente.

Segundo Carpim e Barrichelo (1983), o primeiro padrão de comportamento, decrescente uniformemente com a altura, tem se mostrado mais freqüente para as espécies de *Pinus*. Entretanto, para as espécies comerciais do gênero *Eucalyptus*, tem sido mais comum a verificação do segundo padrão de comportamento, isto é, decrescendo até a região do DAP e crescendo a partir deste ponto, podendo ou não decrescer próximo ao topo.

Lima *et al*. (1992), estudando três espécies de *Eucalyptus sp* aos 3,5 anos, concluíram que a densidade básica da madeira do *Eucalyptus grandis* é máxima na base do tronco, decrescendo até 25% da altura total da árvore e, a partir daí, cresce até à altura máxima amostrada; sendo a posição de amostragem indicada para estimar a densidade básica média a 50% da altura total. Porém, para *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis*, cresce no sentido base-topo, com tendências a tornarem-se constantes nas posições mais elevadas; sendo a 25% a posição de amostragem indicada para estimar a densidade básica média para ambas as espécies.

Rosado (1983) mostra que em *E. alba* e *E. saligna,* com cinco e sete anos de idade, localizados em Mogi Guaçu (SP), a densidade da madeira aumentou linearmente da base para o topo da árvore, enquanto que em *E. propinqua,* com cinco anos de idade, a densidade básica cresceu até uma distância menor que a metade da árvore, diminuindo em direção ao topo. Já em *E. microcorys*, com cinco anos de idade e altura inferior a 12 metros, a densidade básica decresceu na direção axial, ao passo que nas árvores com altura superior a 12 metros aumentou até uma distância menor que a metade da altura total, decrescendo desse ponto até o topo da árvore.

Shimoyama e Barrichello (1991), estudando madeiras de espécies de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. urophylla*, todos com sete anos de idade; observaram que a densidade

decresceu da base para 25% da altura e aumentou a partir desse ponto, diminuindo novamente no topo para *E. saligna*. Enquanto que para *E. grandis*, a variação da densidade diferiu daquelas normalmente verificadas para a espécie, decrescendo da base para o topo. Já a densidade da madeira de *E. urophylla* apresentou valores alternados longitudinalmente, tendendo a aumentar.

Ferreira (1972) estudando 200 árvores de *E. grandis* nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos, concluiu que a densidade básica da madeira cresce no sentido da base para a copa da árvore sendo esta tendência comum para as classes de altura comercial estudadas e que, ao nível do DAP, cresce no sentido da medula para a casca, sendo esta tendência comum para todas as classes diametrais estudadas. Verificou-se, também, tendência para o aumento da densidade em função da idade dos talhões e existência de alta variabilidade individual na densidade básica média, dentro das classes diametrais.

Para a variação radial da densidade, segundo Panshin e De Zeewn (1970), destaca-se o crescimento da mesma, linearmente, da medula para a casca; o decréscimo da densidade nos primeiros anos e seguido do crescimento nos anos subseqüentes; crescente no início, próximo à medula, permanecendo, a seguir, mais ou menos constante ou podendo decrescer nas porções mais próximas à casca e, por fim, decrescente, linearmente, da medula para a casca.

Em estudos mais recentes, ao trabalhar com a variação da densidade radial em de *Eucalyptus grandis x urophylla* com 7 anos por meio da densitometria de raios X, Tomazello Filho *et al.* (2006) encontraram um modelo de variação constituído por valores crescentes da medula a casca, resultado condizente com aqueles encontrados por Alzate (2005) ao trabalhar com *Eucalyptus grandis* de 8 anos. Todavia, Sette Júnior (2010) e Sette Junior *et al*. (2009), ao também trabalhar com *Eucalyptus grandis* com seis anos de idade encontraram resultados discrepantes ao verificar a presença de dois comportamentos distintos, onde os maiores valores de densidade estavam na região da medula (0,80-1,10 g/cm³), seguindo-se sua redução e estabilização (0,40-0,50 g/cm³) próxima a casca; ou maiores valores na região da medula (0,50-0,65 g/cm³), redução e estabilização (0,40-0,50 g/cm³) e aumento em direção à casca (0,65-0,80 g/cm³).

3.5 Princípios termoquímicos da pirólise

A ação do calor na madeira pode provocar alterações em sua estrutura em diferentes níveis, as quais estão associadas ao fenômeno da pirólise (BRITO, 1992). Pirólise da madeira é um processo físico-químico, no qual a biomassa é aquecida em temperaturas entre 400-800ºC, em atmosfera não-oxidante, onde uma parte da biomassa será transformada em resíduo

carbonífero sólido por meio de um processo de oxidação, enquanto outra parte será oxidada e hidrolisada, dando origem a uma fração composta de gases não condensáveis e vapores orgânicos condensáveis (Tabela 1), denominados como licor pirolenhoso, composto de fenóis, carboidratos, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos (LUENGO *et al*., 2008). O comportamento da madeira ao ser carbonizada pode ser explicado por meio da resposta degradativa de seus componentes fundamentais ao calor (ROWELL; LE VANN-GREEN, 2005).

Tabela 1 - Rendimento dos produtos formados pela carbonização lenta da madeira a 500 ºC Fonte: Martins (1980) modificado

Composto formado	**% B.S.***
Carvão (80% CF)	33,0
Ácido Pirolenhoso	35,5
(Ácido Acético)	(5,0)
(Metanol)	(2,0)
(Alcatrão Solúvel)	(5,0)
(Água e outros)	(23,5)
Alcatrão Insolúvel	6,5
Gases Não Condensáveis (GNC)	25,0
Total	**100,0**

(*) % em relação ao peso inicial de madeira seca

A 100^{o}C, a madeira passa a sofrer mudanças estruturais físicas, referentes a perda de massa e volume devido à saída de suas respectivas água de capilaridade e de impregnação, (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). Todavia, segundo Gomes e Oliveira (1980) e Martins (1980), quando a madeira é submetida a esta temperatura por um tempo prolongado, ocorrem também alterações químicas devido a desidratação de grupos hidroxílicos e metoxílicos presentes nas moléculas de hemiceluloses, formando assim ácido acético, fórmico e metanos, além de água.

As fases da pirólise da madeira podem ser identificadas segundo a perda de massa, que também ocorre por influência das reações químicas verificadas na elevação da temperatura (Tabela 2), conforme os trabalhos de Brito *et al.* (2006) e Martins (1980).

Tabela 2 - Fases da pirólise da madeira. Fonte: Brito *et al.* (2006) e Martins (1980) modificado

Fase	Etapa	Temp. °C	Eliminação/ degradação	Principais produtos
1	Endotérmica	25 - 100	Água + Hidroxilas	H_2O, Ac. Acético (traços)
2	Endotérmica	100 - 250	Água + Hidroxilas	H_2O, Ac. Acético e. Fórmico, metanol, CO_2
3	Exotérmica	250 - 330	Hemicelulose	H_2O, CO_2,CO, Ac. Pirolenhoso, Alcatrão
4	Exotérmica	330 - 370	Celulose	CO_2,CO e Hidrocarbonetos
5	Exotérmica	370 -	Lignina	H_2, CO_2,CO e Hidrocarbonetos

A degradação térmica da madeira inicia-se, significativamente, em torno de 250ºC, quando a reação torna-se exotérmica e as hemiceluloses passam a ser degradadas em maior intensidade, enquanto a lignina e a celulose são degradadas parcialmente (Luengo *et al.*, 2008). Martins (1980) informa que as pentosanas e as hexosanas, principais constituintes das hemiceluloses nas folhosas e coníferas, respectivamente, quando degradadas geram alto rendimento de furfural onde, em condições mais drásticas de carbonização, passa por reações secundárias formando grande parte de ácido acético devido a hidrólise dos grupos acetila.

Para Rowell e Le Vann-Green (2005), a celulose é o componente da madeira mais estável à degradação térmica até a chegar em torno de 370ºC; quando esta se decompõe quase por completo em um curto intervalo de temperatura onde, segundo Oliveira *et al.* (1982), chega a perder cerca de 77% de sua massa (Figura 1). Até em torno de 300ºC, a degradação da celulose resume-se, segundo Fengel e Wagener (2003d) e Shafizadeh (1983), na redução do grau de polimerização devido à quebra das ligações1-4 e o surgimento de radicais livres nas moléculas de celulose em decorrência do aumento das regiões amorfas, o que acarretará na eliminação de água, formação de compostos carbonílicos, carboxílicos e de hidroperóxidos, liberação de CO e, posteriormente, CO_2 e, por fim, a produção de resíduo carbonífero. A partir de 300ºC, ocorre a ruptura das ligações glicosídicas na celulose, conforme trabalho de Gomes e Oliveira (1980), onde ocorrerá a produção de levoglucosana e levoglucosenona, entre outras substâncias, as quais passarão por reações de desidratação e eliminação, formando inúmeros compostos voláteis, entre eles, acido acético, acetona, fenóis e água.

Quanto ao rendimento de resíduo carbonífero, a celulose possui, quando submetida a uma temperatura de 300 ºC, um rendimento próximo a 35% (OLIVEIRA *et al.*, 1982); todavia, este resultado decresce vertiginosamente pouco após a temperatura alcançar o intervalo de degradação da celulose, tanto que Molton (1977), ao trabalhar com a pirólise da

celulose pura a 360 ºC, encontra 16% de resíduo carbonífero em seus resultados. Oliveira *et al* (1982), por sua vez, informa que em 600 ºC, a celulose produz cerca de 5% de resíduo carbonífero. Isto se explica, em parte, devido a produção de compostos voláteis pela celulose se fazer completa em torno de 450 ºC, ocorrendo a partir deste momento a perda de massa unicamente por parte do resíduo carbonífero formado por esta (LE VAN, 1989).

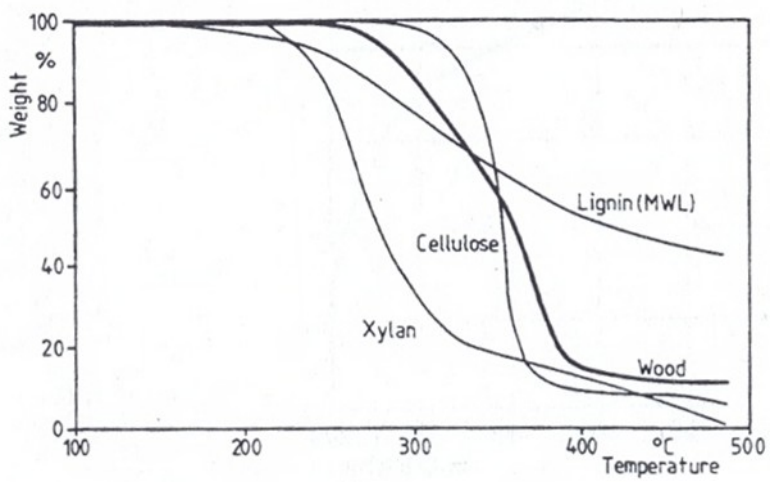

Figura 1 - Diagrama termogravimétrico da madeira de *Populus* sp. e de seus componentes
Fonte: Shafizadeh e DeGroot, 1976 *apud* Fengel e Wegener (2003d).

As hemiceluloses, por sua vez, são menos estáveis termicamente que as celuloses, formando no decorrer do processo de pirólise mais gases não combustíveis do que alcatrão e carvão, tornando-se a principal responsável pela formação de ácido acético durante o processo de carbonização da madeira devido a sua natureza amorfa (LE VAN, 1989; MARTINS, 1980).

Segundo Oliveira *et al.* (1982) e Martins (1980), a degradação térmica das hemiceluloses ocorrem, principalmente, entre 250 a 330 °C, em dois estágios distintos onde, primeiramente, a molécula se decompõe em fragmentos menores e, posteriormente, ocorre uma despolimerização das cadeias pequenas, formando unidades do monômero.

Neste processo, há grande formação de voláteis, tanto a partir do polímero como dos monômeros, pois quando submetidos a temperaturas mais elevadas, estes degradarão, decompondo-se e volatilizando, gerando uma reação endotérmica e fornecendo energia para o sistema e, consequentemente, contribuindo não tão expressivamente para formação do resíduo carbonífero, tanto que, quando em temperatura máxima de carbonização em 500 °C, o rendimento das hemiceluloses para a produção do carvão vegetal é em torno de 10% (OLIVEIRA *et al*, 1982).

Entretanto, Lv *et al.* (2010), ao trabalharem com a pirólise da hemicelulose isolada do pé de milho, verificaram que, apesar desta perder grande parte de sua massa no intervalo

de temperatura anteriormente citado, a taxa de perda de massa após 340 °C torna-se pequena até o fim do processo (Figura 2), tanto que o resíduo carbonífero existente a 700 °C, neste caso, foi de 24%, o que nos pode abrir uma nova perspectiva de discussão quanto a contribuição das hemiceluloses para a formação do carvão vegetal.

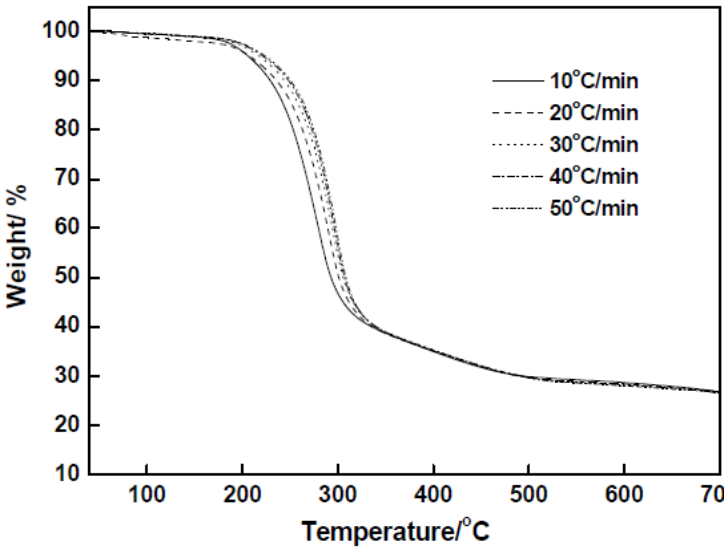

Figura 2 - Diagrama termogravimétrico da hemicelulose de pé de milho em diferentes velocidades de carbonização
Fonte: Lv et al. (2010)

Quanto a lignina, Oliveira *et al* (1982) a define como o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, devido o rendimento gravimétrico do processo de carbonização se encontrar relacionado com o conteúdo desta na madeira. Além disto, importantes características do carvão vegetal, tais como poder calorífico e teor de carbono fixo, possuem relações positivas com a proporção de lignina (BRITO; BARRICHELO; 1977b; WHITE, 1987).

Embora a lignina comece a se degradar em temperatura a partir de 150 ºC, verifica-se que, ao contrário do comportamento dos demais componente fundamentais da madeira, a sua degradação ocorre de forma mais lenta onde, em temperaturas superiores a 500 ºC, a lignina continua a perder massa sem grandes oscilações em seu comportamento (Oliveira *et al.,* 1982). Devido a sua complexa estrutura, o mecanismo de degradação térmica da lignina ainda é pouco conhecido, todavia, sabe-se que, apesar da estabilidade do composto no decorrer do processo, este possui uma queda mais acentuada em sua massa no intervalo entre 310-420ºC (SHAFIZADEH, 1983).

O rendimento da lignina para produção de carvão vegetal fica em torno de 55%, segundo Oliveira *et al.* (1982), quando submetida a temperaturas entre 450-500 ºC, a

proporção do ácido pirolenhoso proveniente da lignina, cerca de 20% do rendimento, advém da degradação do grupo siringil, existente em maioria nas folhosas, uma vez que as coníferas apenas apresentam traços deste, enquanto que o alcatrão, responsável por 13% do rendimento, tem como fonte o grupo guaiacil, com presença bastante significativa tanto em coníferas quanto em folhosas (FENGEL; WAGENER, 2003d; SHAFIZADEH, 1983).

Ao final do processo, quando a temperatura máxima de carbonização gira em torno de 400 ºC, o carvão vegetal vem a reter cerca de 57% do carbono e 11% do oxigênio inicial contido na madeira, enquanto que a fração restante é liberada na forma de gases condensáveis e não condensáveis, assumindo rendimento próximo a 35% e uma média de 82% de carbono fixo (OLIVEIRA *et al.*, 1982). Nestes, pode-se dizer que a lignina é a principal contribuidora para a formação do carvão, enquanto que a celulose e hemiceluloses formam majoritariamente gases condensáveis e não condensáveis no decorrer do processo, além substâncias voláteis que são responsáveis pela formação de chamas no processo de combustão (LE VAN, 1989; MARTINS, 1980; OLIVEIRA *et al.*, 1982; ROWELL; LE VANN-GREEN, 2005).

Quanto aos componentes minerais, Vital *et al.* (1989) informam que os componentes inorgânicos da madeira e, em maior concentração, na casca, são repassados para o carvão, sendo que, quando o carvão vegetal destina-se à produção de alguns tipos de ferro-ligas ou de carbureto de cálcio, a presença de alguns componentes minerais se faz indesejável, por exemplo, o fósforo presente no carvão geralmente incorpora-se às ligas metálicas tornando-as quebradiças, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de trincas e fissuras. Neste caso, especificamente, a casca tem sido referenciada como uma translocadora de minerais para o carvão vegetal e, apesar de representar, em média, 10 a 15% do volume total da árvore, é tratada como uma porção indesejável.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do local, seleção de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*

As plantações dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* estão localizadas nos municípios de Capelinha e de Itamarandiba, MG, região do Alto Jequitinhonha, nas coordenadas geográficas de 17o 41' 38" latitude sul, 42o 31' 07" longitude oeste e 1.070 m de altitude (Figura 3). O clima e classificado como tropical de altitude, CWA, com precipitação pluviométrica media anual de 1166 mm; temperatura media anual de 21oC e o solo classificado como latossolo vermelho distrófico típico e vermelho-amarelo distrófico típico, textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturada. A topografia plana (chapadas) e a vegetação nativa e classificada como de bioma do Cerrado. Foram selecionados clones de *E. urophylla* (clones 182, 220, 224, Flores) e de seu híbridos *E. urophylla* x *E. grandis* (clone 344), *E. grandis* x *E. urophylla* (1528), (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. Urophylla* (2034), *E. urophylla* x *E. pellita* (clone 2475), *Corymbia toreliana* x *C. citriodora* (clone 6) e de *Corymbia citriodora* x *C. toreliana* (clone 43). As arvores dos clones possuíam entre 5 e 6 anos, com espaçamento de plantio semelhantes, produzidas no Programa de Melhoramento Genético da Empresa Aperam Bioenergia Ltda. (Tabela 3).

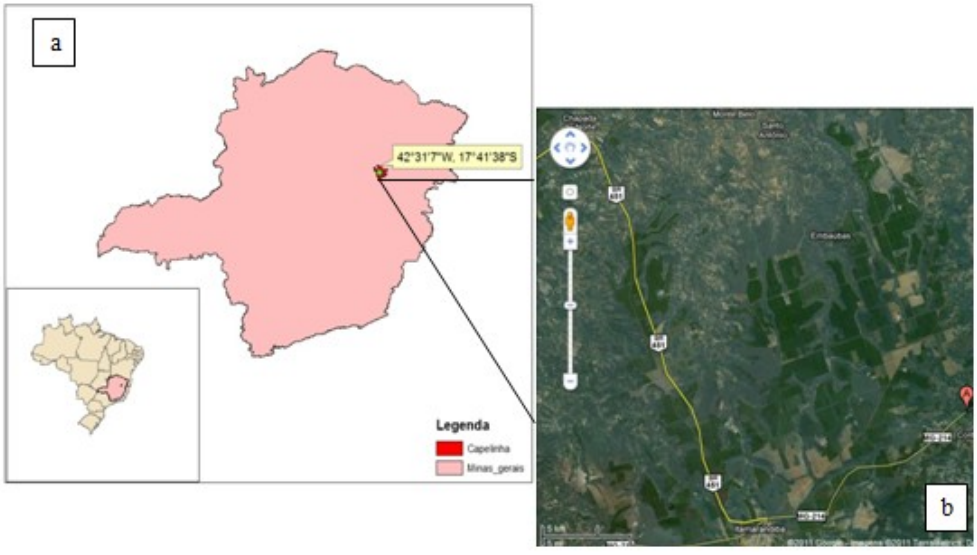

Figura 3 - Plantações dos clones de *Eucalyptus, Corymbia* no estado de Minas Gerais (a), destaque para as do município de Capelinha (b).
(Fonte: IBGE, 2007; Google Earth, 2011).

Tabela 3 - Clones de *Eucalyptus, Corymbia*: origem, identificação, idade e local de coleta

Origem	Clones	Clone (N°)	Código (g/cm³)	Idade (anos)	Denominação (local/coleta)
P.E.	*C. toreliana* x *C. citriodora*	06	1	5	São Bento (Ita)
P.E.	*C. citriodora* x *C. toreliana*	43	2	5	São Bento (Ita)
P.E.	*E.urophylla* (a)	182	4	6	São Caetano (Cap)
P.E.	*E.urophylla* (b)	220	5	6	Cruz Grande (Ita)
P.E.	*E.urophylla* (c)	224	6	6	Cruz Grande (Ita)
P.C.	*E. urophylla* x *E. grandis*	344	8	6	Cruz Grande (Ita)
P.C.	*E. grandis* x *E. urophylla*	1528	11	6	Cruz Grande (Ita)
P.C.T.	(*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*	2034	12	6	São Bento (Ita)
P.C.	*E.urophylla* x *E. pellita*	2475	15	6	São Bento (Ita)
E.P.	*E. urophylla* Flores	-	19	5	São Bento (Ita)

P.E.: polinização espontânea; P.C.: controlada; P.C.T.: controlada tricross; E.P.: espécie pura.

4.2 Corte do tronco das árvores, amostragem e confecção dos corpos de prova do lenho

Foram selecionadas e cortadas 3 arvores dos clones das espécies estudadas, no ano de 2009, em um total de 30 arvores. Após o corte das arvores foram seccionados discos do lenho (15 cm de espessura) em 6 alturas, a citar 0, DAP, 25, 50, 75 e 100% do tronco, sendo que para este ultimo o diâmetro limite foi de 6 cm com casca. Após a retirada dos discos, os mesmos foram envolvidos em filmes plásticos para a manutenção da umidade em que se encontravam.

Em condições de laboratório, os discos foram serrados à espessura nominal de 4 cm de espessura, em serra destopadeira, e demarcadas amostras diametrais (2 cm de largura) na sua seção transversal, sendo cortadas em serra circular (Figura 4). Em seguida, foram cortados os corpos de prova do lenho (2 x 2 x 4 cm, direção tangencial, radial e axial) em serra circular. Ressalta-se que a confecção e demarcação dos corpos de prova realizou-se em um curto espaço de tempo onde, em seguida, obteve-se as massas dos mesmos afim de calcular a umidade em que este encontrava-se no interior da árvore com o menor erro possível. O numero de corpos de prova do disco variou de acordo com o diâmetro do lenho ao longo da altura do tronco das arvores.

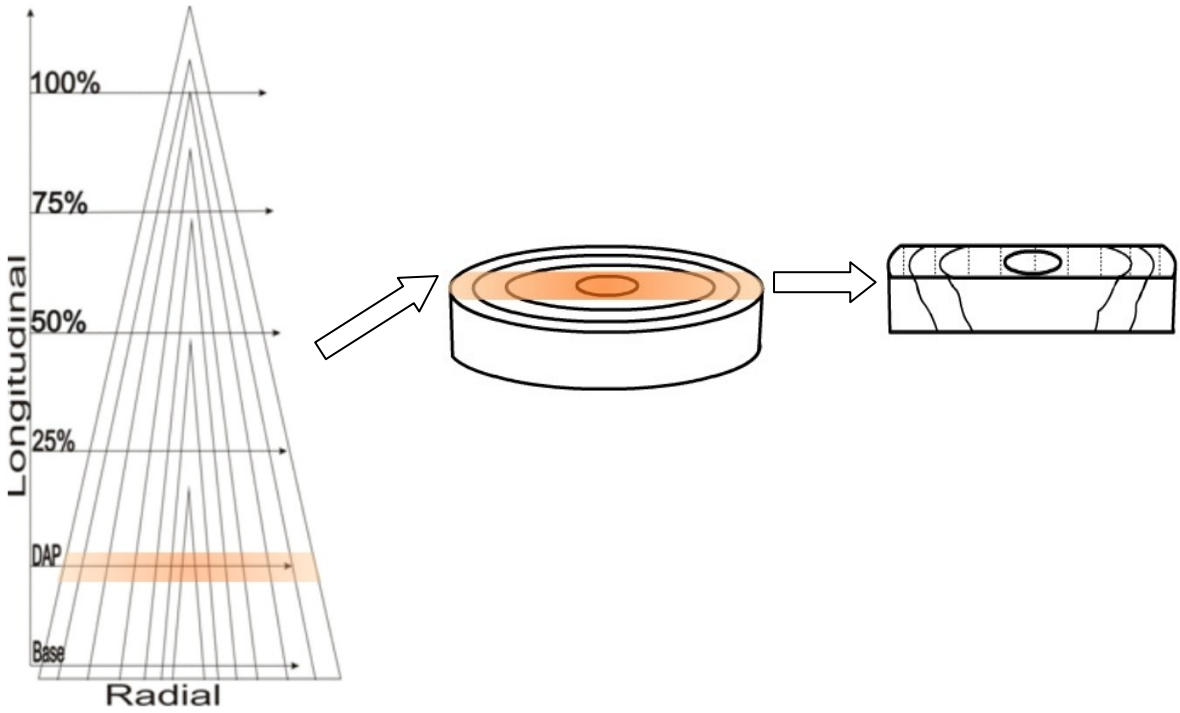

Figura 4 - Corte do tronco, amostragem e confecção dos corpos de prova do lenho das árvores de clones de *Eucalyptus, Corymbia.*

4.3 Determinação das propriedades físicas do lenho: umidade, densidade e retratibilidade linear e volumétrica

Os corpos de prova do lenho foram identificados e saturados em água em dessecador e determinado o volume (método de imersão em água); dimensões (paquímetro digital; 0,01mm resolução; ± 0,005mm precisão) e massa (balança eletrônica, 0,01 g resolução; ± 0,005 g precisão). Em seguida, os corpos de prova do lenho foram mantidos em estufa de circulação de ar forçada (100º C) até atingir 0% de umidade, para a determinação da sua (i) umidade inicial, (ii) densidade básica (Equações 1 e 2) e (iii) retratibilidade linear e volumétrica. O volume dos corpos de prova de lenho foi obtido por meio do método de imersão em mercúrio (aferição da temperatura, 10 min, para correção da densidade) (Equação 3) e diretrizes da norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$TU = \frac{Mi - Mf}{Mf} x100 \quad (1)$$

Em que:

TU – teor de umidade

Mi – massa inicial

Mf – massa final

$$Db = \frac{m_s}{V_v} x100 \quad (2)$$

Em que:

Db – densidade básica

ms – massa seca

Vv – Volume verde

$$PE_{Hg} = 13{,}6052 - (0{,}00254 * T^oC) \quad (3)$$

Onde:

PE = massa específica ou densidade (g/cm3);
T = temperatura (ºCelsius)

4.4 Determinação das propriedades do carvão vegetal

4.4.1 Carbonização e rendimento gravimétrico

Os corpos de prova do lenho - utilizados na determinação da densidade e da retratibilidade - foram remarcados com lápis, visando assegurar a identificação e as posições das mensurações com o paquímetro após o processo de carbonização. As amostras do lenho foram transferidas para bandejas de aço e dispostas na direção horizontal através de encaixe em hastes metálicas e transferidas para uma mufla de resistência elétrica (Figura 5). No processo de carbonização foi utilizado o aumento de 1° C/min, ate atingir 400ºC de temperatura, mantida por 60 min; a mufla foi mantida fechada ate o retorno à temperatura ambiente, quando os corpos de prova de carvão foram analisados. Foram determinados (i) rendimento gravimétrico em base seca do carvão e (ii) retratibilidade linear/volumétrica dos

corpos de prova de carvão para posterior comparação com os corpos de prova da madeira seca.

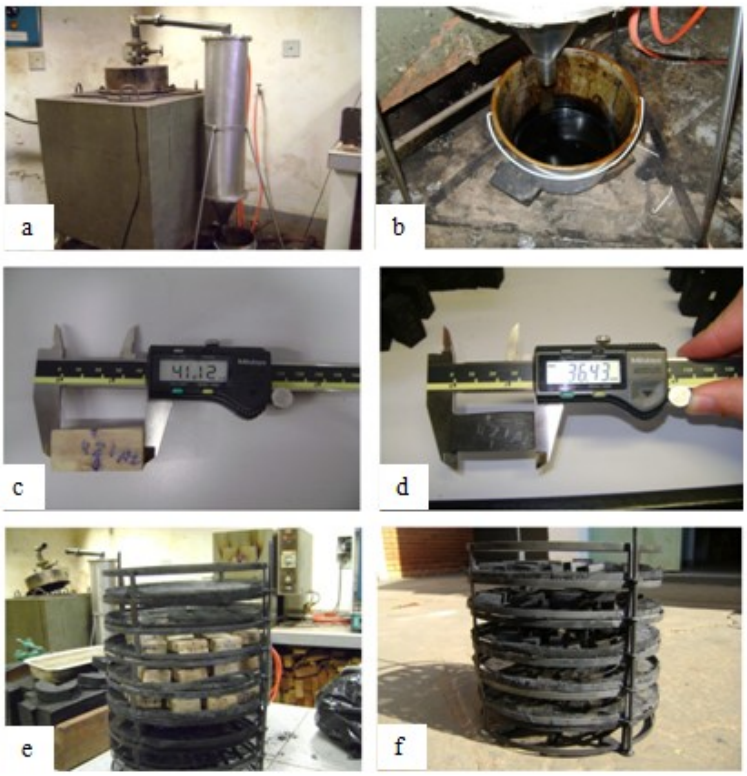

Figura 5 - Processo de carbonização dos corpos de prova do lenho das árvores de clones de *Eucalyptus, Corymbia*. (a,b) mufla de resistência elétrica e ácido pirolenhoso no seu interior; (c,d) avaliação das dimensões dos corpos de prova da madeira e do carvão; (d,e) amostras dos corpos de prova da madeira e do carvão dispostas nas bandejas de aço

4.4.2 Determinação da retratibilidade e densidade do carvão vegetal

As dimensões lineares dos corpos de prova do carvão foram determinadas nas mesmas posições aplicadas nos corpos de prova de madeira, obtendo os valores percentuais inerentes à degradação térmica após a carbonização; o volume dos corpos de prova do carvão foi obtido através do método de deslocamento em mercúrio, e a massa em balança de precisão – conforme descrito – determinando-se os valores de densidade do carvão.

4.4.3 Determinação da resistência mecânica do carvão vegetal

Os ensaios mecânicos de resistência à compressão paralela às fibras do carvão ocorram na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Campus Botucatu, mais especificamente no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Rural. Nisto, utilizou-se uma máquina de ensaio universal, modelo EMIC DL-

3000 onde, devido à ausência de norma específica que pudesse direcionar os trabalhos de ensaio mecânico em carvão vegetal, carbonizou-se amostras extras para ensaios pilotos visando compreender o comportamento do carvão e obter resultados preliminares para confecção de um script (vide abaixo) que pudesse fornecer os resultados necessários de forma consistente.

Script de ensaio

```
***Variáveis de entrada
CP -> “Amostra”, “”,  Ent, Res, Rel, Edi
L1 -> “Largura 1”, 17mm, Ent, Res, Edi
L2 -> “Largura 2”, 17mm, Ent, Res, Edi
C -> “Comprimento”, 36mm, Ent, Res, Edi
M -> “Massa”, 6,50 g, Ent, Res, Edi

*** Variáveis atribuíveis
S -> “Área”, cm², Res
Fmax. -> “Força Máxima-FM”, kN, Res, Rel
Tensão ->  “Tensão na -> Força Máxima”, MPa, Res, Rel
Def 1 -> “Def. Espec. -> Força 1”, mm/mm, Res
Def 2 -> “Def. Espec. -> Força 2”, mm/mm, Res
Def.max -> “Deformação-FM”, mm, Res, Rel
MElast -> “Módulo de -> Elasticidade”, MPa, Res, Rel
Energia -> “Energia-FM”, N.mm, Rel

*** Reta
Reta -> “”, Vis

*** Mensagens
M1 -> Início de Ensaio
M2 -> Fim de Ensaio
M3 -> Fim de Ensaio – Limite de Força Atingido

*** Eventos
@RUP -> “”, Vis
@FM -> “”, Vis
@F1 -> “”, Vis
@F2 -> “”, Vis

*** Atribuições
SIS COMPR BASE = COPIA ( C )
SIS ÁREA = ÁREA RETANG ( L1; L2 )
S = CÓPIA ( SIS ÁREA )
@F1 = @FORÇA ( 60.00 kgf )
@F2 = @FORÇA ( 120.0 kgf )
@FM = @FORÇA MAX(  )
Fmax. = FORÇA ( @FM )
Def.max = DEFORM ( @FM )
Energia = ENERGIA ( @SIS_INÍCIO; @FM )
Tensão = TENSÃO ( @FM )
Def 1 = DEF ESPEC ( @F1 )
Def 2 = DEF ESPEC ( @F2 )
Reta = RETA SECANTE ( @F1; @F2 )
MElast = MÓDULO ( RETA )

*** Comandos
SALVAR POSIÇÃO INICIAL ( )
BIP ( 0.0000 )
DISPARAR MENSAGEM ( M1; 3.000 s )
MODO AQUISIÇÃO ( 1.000 ; 100000 kgf; 10000 mm; 1.000 s)
ATIVAR LIMITE DE FORÇA ( 950.0 kgf )
ATIVAR DET COLAPSO ( 20 % )
DESCER COM VELOC CONST ( 0.2000 mm/min)
AGUARDAR_CHEGADA ( )

EM RUPTURA/COLAPSO ( )
BIP (0.0000)
DISPARAR MENSAGEM ( M2; 3.000 s )
```

PARAR ABRUPTAMENTE ( )
RETORNAR POSIÇÃO INICIAL (500.0 mm/min)
FINALIZAR ENSAIO ( )

EM LIMITE DE FORÇA ( )
BIP (0.0000)
DISPARAR MENSAGEM (M3; 10.000 s)
PARAR ABRUPTAMENTE ( )
RETORNAR POSIÇÃO INICIAL (500.0 mm/min)
FINALIZAR ENSAIO ( )

Assim, a velocidade de carga para 0,2 mm/min e inseriu-se um detector de colapso quando da perda abrupta de 20% da resistência do material, indicando a ruptura do corpo de prova e a não possibilidade de seu arranjo estrutural e finalizando o ensaio. Foram obtidos a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, onde este ultimo foi calculado por meio da reta secante do gráfico da força exercida pela deformação do material nos pontos entre 60 e 120 Kgf (Figura 6).

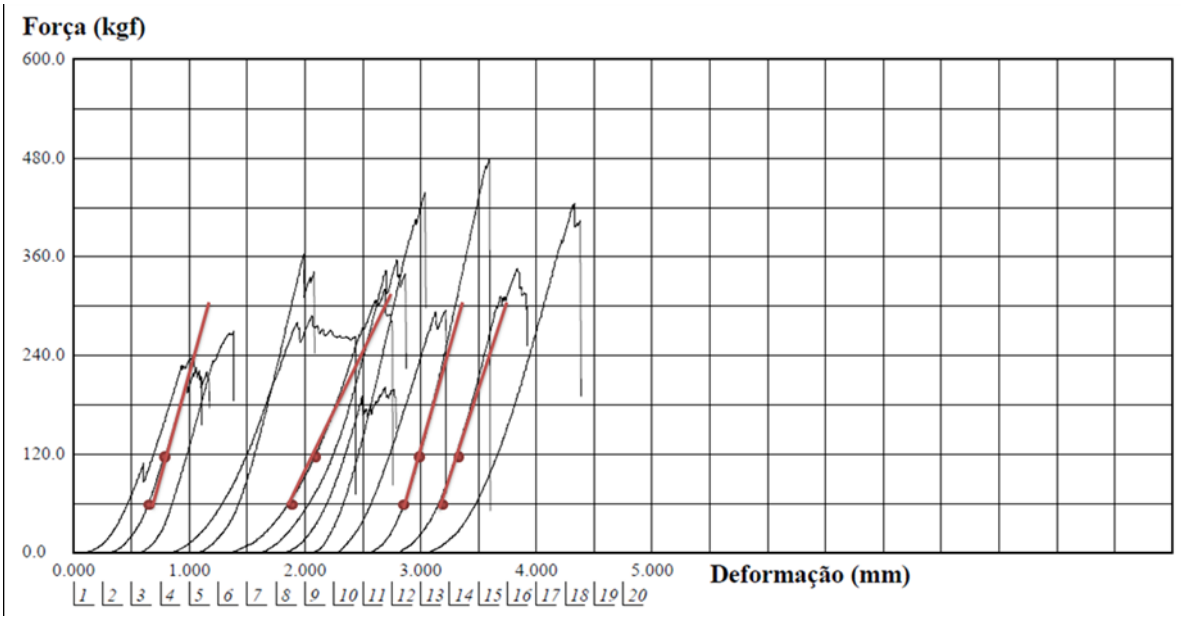

Figura 6 - Reta secante definida entre os pontos 60 e 120 kgf do gráfico Força x Deformação, para o cálculo do módulo de elasticidade do carvão vegetal.

4.5. Análises estatísticas

Na análise estatística dos resultados foi aplicada a ANOVA em delineamento inteiramente casualizado com dez tratamentos (clones), sendo representado cada um por três indivíduos (repetições). O modelo estatístico é apresentado na Equação 4 e sua estrutura no Quadro 1.

$$Y_{ij} = \mu + C_i + e_{ij} \quad (4)$$

em que:

Y_{ij} = é o valor observado no i -ésimo clone na j -ésima repetição (j = 1,..., r) ;

μ = representa a média geral associada e esta variável aleatória

C_i = é o efeito do i -ésimo clone (i = 1, 2,..., t) ;

e_{ij} = é o erro experimental associado a observação Y_{ij}

Quadro 1 - Estrutura da análise de variância das características da madeira e do carvão vegetal.

FV	GL	QM	E (QM)	F
Tratamentos	C - 1	S_1^2	$S^2 + r.S_c^2$	$S_1^2 \div S_2^2$
Erro	C (r-1)	S_2^2	S^2	
Total	C. r- 1			

C = Tratamento

r = repetição

$S_1^2 = S^2 + r.S_c^2$ = estimativa da variância do erro experimental acrescida de uma possível variância devida aos tratamentos

$S_2^2 = S^2$ = variância do erro experimental

Sc^2 = estimativa da variância de tratamento (clone)

Para o agrupamento dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* e de seus híbridos em relação às propriedades físicas e ponderadas foram aplicadas técnicas multivariadas com auxilio do software R 2.9.2. Os valores das propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal foram submetidos a análise de componentes principais (ACP) permitindo avaliar a similaridade dos indivíduos por meio de uma dispersão gráfica. Nas correlações das propriedades da madeira e do carvão para verificar as associações existentes entre estes dois grupos aplicou-se a análise multivariada de relações canônicas com o teste lambda de Wilks a 1% de significância.

No teste de correlação canônica utilizou-se as variáveis da madeira como independentes (X') e do carvão vegetal como dependentes (Y'), constituindo dois grupos distintos: X' e Y', sendo que:

$X' [x_1 x_2 ... xp]$ é o vetor de medidas de p características que constituem o grupo I (madeira), e $Y' [y_1 y_2 ... yq]$ é o vetor das medidas de q características que constituem o grupo II (carvão). Assim temos a expressão básica da correlação canônica dada por:

$X_1 + X_2 + X_3 + \ldots + Xp = Y_1 + Y_2 + Y_3 + ... + Yq.$

Em que:

$X_1 = a_1 x_1 + ... + apxp$

$Y_1 = b_1 y_1 + ... + bqyp$

Definindo os valores a' = [a_1 ... ap] e b' = [b_1 ... bq] como os vetores dos pesos das características correspondentes aos grupos 1 e 2, respectivamente. Desta forma é possível estimar as cargas canônicas, ou seja, as correlações entre as variáveis originais e suas respectivas variáveis estatísticas canônicas e as cargas canônicas cruzadas que representam a correlação entre uma variável original de um determinado grupo e a variável estatística canônica do outro grupo.

Sendo como principio da correlação canônica desenvolver uma combinação linear, em cada um dos conjuntos de variáveis (X' e Y') de modo que a associação seja maximizada, desta forma temos a primeira correlação canônica de pares canônicos X_1 e Y_1, dado por:

$$r_1 = \frac{\mathbf{Cov}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{\sqrt{V(X).V(Y)}}$$

Sendo:

$cov(X_1, Y_1) = a'S_{12}b;$

$var(X_1) = a'S_{11}a;$

$var(Y_1) = b'S_{22}b;$

S_{11}= matriz pxp de covariâncias dos caracteres do grupo 1;

S_{22} = matriz qxq de covariâncias dos caracteres do grupo 2;

S_{12} = matriz pxq de covariâncias entre os caracteres dos grupos 1 e 2.

Para o teste de significação de cada correlação canônica foi utilizada a distribuição de qui-quadrado (X^2) com p x q graus de liberdade. A fórmula para esta distribuição é:

$$\chi_2 = -[N - 1 - 0{,}5\,(p + q + 1)] \times \ln\left[\prod_{1=1}^{q}(1 - Rci^2)\right]$$

em que:

N = tamanho da amostra,

p = número de variáveis dependentes,

q = número de variáveis independentes,

R^2 = correlação canônica ao quadrado da equação a ser testada.

4.5.1 Ponderação dos dados e índice de heterogeneidade

Obtidos os valores de retratibilidade total, de umidade e de densidade dos corpos de prova de madeira e de carvão nos sentidos longitudinal-radial do tronco de cada árvore determinou-se, em seguida, a média das 3 árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* e o controle dos "outlayers", considerando a posições da amostra no tronco. Na sequência obteve-se o valor médio da propriedade mecânica do corpo de prova do lenho/carvão localizados nos raios 1 e 2 dos discos do lenho; calculou-se o valor ponderado considerando a localização/posição da área do disco de lenho para propiciar uma maior exatidão dos valores médios das propriedades físicas da madeira/carvão nas posições longitudinais do tronco. Considerou-se a amostra do lenho interna (próxima à medula) do tronco das árvores em forma de cunha ou um triângulo isósceles – pela semelhança matemática - com os corpos de prova demarcados (Figura 7).

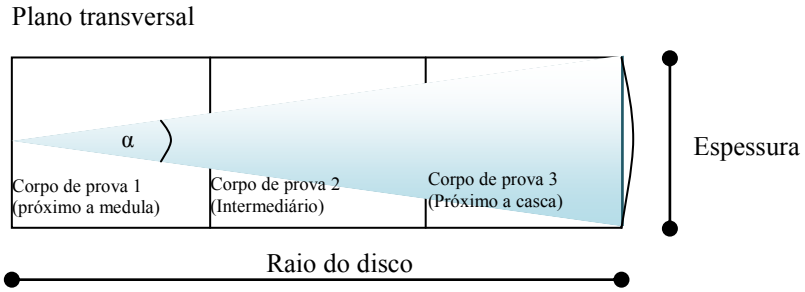

Figura 7 - Área dos 3 corpos de prova do lenho na seção transversal do disco de lenho das árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*: cálculo dos seus respectivos pesos para a determinação da ponderação

No cálculo da ponderação (peso de cada corpo de prova) trabalhou-se com a média dos raios (cateto adjacente) dos 3 discos do lenho na mesma posição radial do tronco das árvores; da mesma forma, a média dos valores do plano tangencial dos corpos de prova para a obtenção da espessura (cateto oposto) para o cálculo da tangente do triângulo e da

arctangente, determinando o ângulo α (em π radianos). Após a conversão do ângulo obteve-se a área total do triângulo e a área de cada corpo de prova (Equação 5).

$$Area_{total} = \frac{\alpha.\pi.r_{(1+2+3)}}{360} \qquad (5)$$

$$Area_{cp} = \frac{\alpha.\pi.r_{(cp)}}{360}$$

A área de cada corpo de prova foi dividida pela área total do triângulo obtendo-se o seu peso e a média ponderada da propriedade para cada disco de lenho; o valor de cada disco de lenho foi ponderado para determinar a média da árvore, segundo metodologia de Vital (1984). Esta metodologia foi adequada para o cálculo de 6 discos de lenho e para a obtenção do volume total de madeira do tronco – ao invés da fórmula de Smalian optou-se pela somatória do volume dos toretes de lenho.

O índice de heterogeneidade das propriedades do lenho/carvão das árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* foi determinado segundo Barrichelo e Brito (1984) utilizando-se de pesos diferentes conforme a posição dos discos de lenho no tronco das árvores (Equação 6).

(i) Peso 4 - diferença de densidade do lenho: base e 25% da altura do tronco;
(ii) Peso 3 - diferença de densidade do lenho: base e 50% da altura do tronco;
(iii) Peso 2 - diferença de densidade do lenho: base e 75% da altura do tronco;
(iv) Peso 1- diferença de densidade do lenho: base e 100% da altura comercial do tronco.

$$IH = [A-B]4 + ... + [A-E] + [B-C]3 + ... + [B-E] + [C-D]2 + ...[C-E] + [D-E] \qquad (6)$$

Onde:
IH = índice de heterogeneidade;
A = densidade básica do lenho dos discos da base do tronco;
B = densidade básica do lenho dos discos a 25% da altura do tronco;
C = densidade básica do lenho dos discos a 50% da altura do tronco;
D = densidade básica do lenho dos discos a 75% da altura do tronco;
E = densidade básica do lenho dos discos a 100% da altura do tronco;

4.5.2 Plotagem dos gráficos de superfície

Os gráficos de superfície foram construídos através do software livre SciLab - matriz de 5x5 - considerando as posições longitudinais (0, 25, 50, 75, 100% da altura comercial) e

radiais dos corpos de prova do lenho, obtendo-se 400 interpolações, para estimar a variabilidade interna das suas variáveis no tronco das árvores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira

A densidade básica da madeira dos clones *E. urophylla x E. grandis, E. grandis* x *E. urophylla* e *E. urophylla* (clones 224 e 182) foi de 0,435, 0,443, 0,474 e 0,490 g/cm^3, respectivamente, sendo classificados como os de menor densidade; nos clones *C. toreliana x C. citriodora* e *C. citriodora x C. toreliana* a densidade básica da madeira foi de 0,610 e 0,607 g/cm^3, respectivamente, sendo os de maior densidade; os clones de *E. urophylla* Flores, *E. urophylla* (clone 220) e (*E. camaldulensis x E. grandis*) x *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. pellita* apresentaram densidade básica da madeira intermediária, de 0,504, 0,524, 0,529 e 0,532 g/cm^3, respectivamente (Tabela 4).

O híbrido *E. urophylla x E. grandis,* assim como uma das procedências de *E. urophylla* assumiram valores médios de densidade próximos a 0,439g/cm³; enquanto *E.grandis x E. urophylla* apresentou densidade de 0,474g/cm³, sendo que tais clones podem ser classificados como de baixa densidade, segundo classificação de Melo *et al.* (1990), quanto aos demais, enquadram-se na faixa de classificação de média densidade, entre 0,500 e 0,710g/cm³, com destaque aos clones *C. toreliana x C. citriodora* e *C. citriodora x C. toreliana*, os quais demonstraram valores médios de densidade de 0,609 g/cm³, os maiores entre as espécies estudadas (Tabela 4).

A densidade básica é considerada como um dos principais parâmetros indicadores da qualidade da madeira e, desta forma, a determinação do seu valor é importante para a preconização do seu uso final. Os valores de densidade básica da madeira obtidos encontram-se compreendidos nos descritos na literatura para os clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* (MELO *et al*., 1990; OLIVEIRA *et al.*, 2010; RIBEIRO; ZANI, 1993; TRUGILHO *et al.*, 2003). Brito e Barrichelo (1980) indicam uma alta e positiva correlação entre a densidade da madeira e a do carvão, sendo característica importante na seleção de espécies para a produção de carvão vegetal, sendo que mais densa a madeira mais importante sob o ponto de vista energético.

A variabilidade da densidade básica e retratibilidade da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* foi destacada por Oliveira *et al.* (2010) para 7 híbridos de *Eucalyptus*, com 16 anos. Da mesma forma, Lobão *et al.* (1987) obtiveram para 2 espécies de eucalipto, com 7 anos, densidade básica da madeira com variação de 0,510 a 0,750g/cm³.

Tabela 4 - Caracterização geral das propriedades físicas da madeira das espécies estudadas

Espécie	Código	Densidade (g/cm³)	Contração Total (%)			Umidade inicial (%)	Coeficiente de anisotropia
			Tangencial	Radial	Volumétrica		
C. toreliana x *C. citriodora*	1	0,610	9,65	5,18	14,32	80,82	1,89
C. citriodora x *C. toreliana*	2	0,607	9,20	4,86	13,44	78,44	1,89
E.urophylla (4)	4	0,490	8,59	5,81	13,68	92,88	1,48
E.urophylla (5)	5	0,524	9,35	6,19	14,99	99,09	1,51
E.urophylla (6)	6	0,443	9,24	5,17	13,74	116,29	1,79
E. urophylla x *E. grandis*	8	0,435	9,04	5,57	14,01	91,40	1,63
E. grandis x *E. urophylla*	11	0,474	8,93	4,87	13,30	111,93	1,84
(*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*	12	0,529	10,19	5,50	15,06	110,95	1,85
E.urophylla x *E. pellita*	15	0,532	10,08	5,51	15,03	108,08	1,83
E. urophylla Flores	19	0,504	9,07	5,44	13,89	109,26	1,67

A contração linear total tangencial e radial para os indivíduos estudados se faz entre 9,04-10,19 e 4,86-6,19%, onde *E. grandis* x *E. urophylla* apresentou os menores valores de contrações lineares e volumétrica, enquanto que (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* e *E.urophylla* x *E. pellita* tenderam a apresentar as maiores contrações totais.

O valor da contração total da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* foi similar ao determinado por Batista *et al.* (2010) para a madeira de árvores de 3 espécies de eucaliptos de 11 anos de idade. Da mesma forma, foi indicado por Trugilho *et al.* (2003) para a madeira de árvores de 2 espécies de eucaliptos plantadas em diferentes espaçamentos; e menor que o obtido por Oliveira *et al* (2010) para a madeira de 6 espécies de eucaliptos de 16 anos.

O coeficiente de anisotropia encontrado para os indivíduos estudados pode ser considerado como médio, haja vista que seus respectivos valores encontram-se entre 1,51-1,89, onde os clones do gênero *Corymbia,* assim como (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. pellita* apresentaram os maiores valores encontrados, enquanto que *E.urophylla* (5) demonstrou menor heterogeneidade entre os valores de contração radial e tangencial.

Os valores do coeficiente de anisotropia da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* estudados foram menores do que o relatado - de 1,99 a 2,50 - por Batista *et al.* (2010) e Oliveira e Silva (2003) para a madeira de *E. saligna*, de 16 anos, e maior do que a faixa de 1,2 a 1,4 obtida por Rocha (2000) para a madeira de árvores de eucaliptos de 11 anos. A variação do coeficiente de anisotropia da madeira relaciona-se com a idade das árvores: o aumento da densidade da madeira com a idade é resultado da formação da madeira adulta e de fibras de parede celular mais espessa.

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985) o coeficiente de anisotropia da madeira com valor próximo a 1, indica que as contrações dos planos tangencial e radial são similares e não resultam em tensões internas e defeitos de secagem; quanto maior a diferença dos valores de contração, maior será a possibilidade da ocorrência de defeitos de secagem da madeira.

A madeira das espécies de eucaliptos é conhecida como de baixa estabilidade dimensional e que apresentam defeito de secagem. Desta forma, para a madeira das espécies de eucalipto com valor do coeficiente de anisotropia próximo ao da madeira de espécies com boa estabilidade dimensional – exemplo da madeira de *Tabebuia,* ipê - deve ser considerada outros fatores, a exemplo da permeabilidade da madeira, haja vista que, no processo de secagem, a baixa capacidade de difusão da água resultará em carvão vegetal com rachadura e quebradiço.

A umidade inicial apresentou grande variação de seus valores, estando em uma faixa de 78 a 116%, onde os clones de *Corymbia* apresentaram um menor valor de umidade inicial, enquanto que *E. urophylla* (6) obteve o maior valor para este parâmetro analisado, ressaltando que estes foram os que obtiveram maior e menor densidade básica entre os indivíduos estudados, respectivamente, onde esta tendência inversamente proporcional entre as duas propriedades se repetem para os clones estudados.

Nisto, Galvão e Jankowsky (1985) explanam que o termo água capilar refere-se à água em sua forma líquida existente nas cavidades e nas aberturas ligando as cavidades celulares da madeira. Em paralelo, Kollman e Côté (1968) elucidam que a densidade básica da madeira está ligada significativamente à proporção de parede celular em determinado volume. Assim, relacionando ambas as informações, verifica-se que, quanto menos densa é a madeira, maior será a quantidade de espaços vazios existente nesta e, consequentemente, maior será a concentração de água de capilaridade, aumentando assim a umidade inicial do material.

5.1.1 Propriedades físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*: análise de agrupamento e das componentes principais

A análise das componentes principais (ACP) demonstrou que as características físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* resumem-se em 3 componentes principais, que explicam 97,1% da variabilidade das propriedades da madeira mensuradas, com os 2 primeiros (CP1 e 2) explicando 72% da variabilidade (Figura 8).

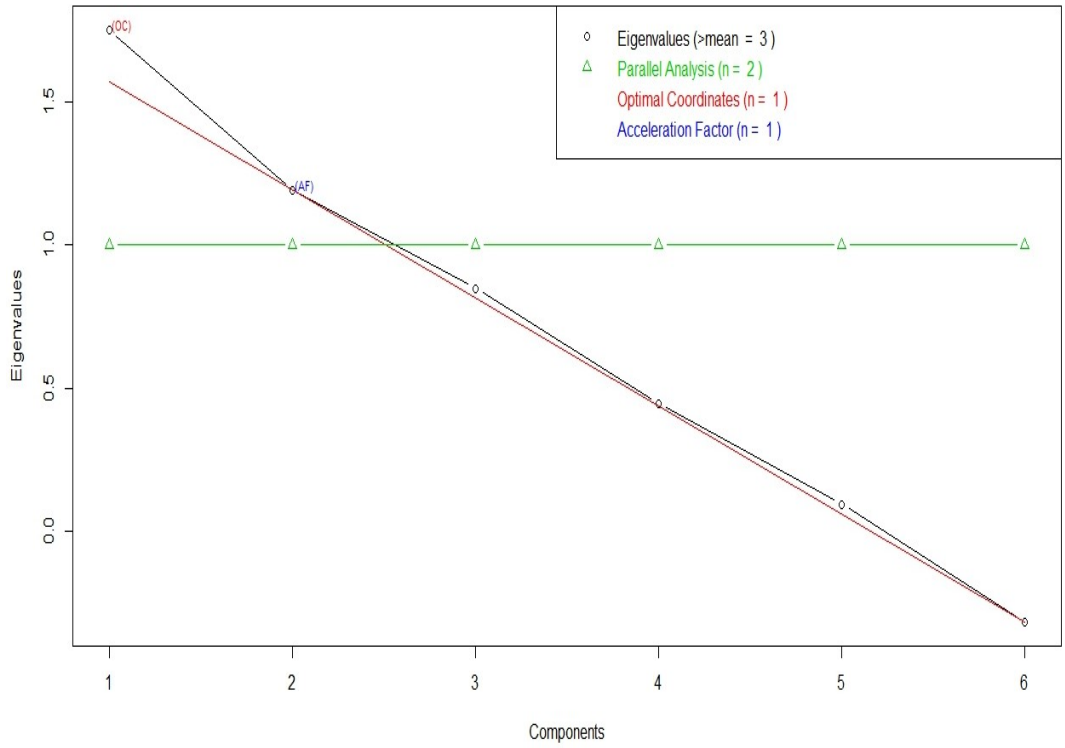

Figura 8 - Distribuição dos valores próprios e análise paralela pelos componentes principais dos parâmetros físicos da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*

A análise paralela indica que a variabilidade dimensional da madeira é explicada por 2 fatores, pelo menos, com a possibilidade de um 3º fator, uma vez que a linha tracejada da análise paralela corta a linha sólida da ACP antes de atingir o 3º componente. Isto indica uma alta correlação entre as variáveis, considerando que a ACP reúne, em ordem decrescente e excludente, as características comuns a todos os tratamentos, inferindo-se que as correlações são explicadas no máximo por 3 componentes. Na Tabela 5 é possível observar os valores de correlação entre as variáveis e os componentes principais.

Tabela 5 - Autovetores normalizados dos 3 primeiros componentes principais dos parâmetros físicos da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*

Parâmetros físicos da madeira	Autovetores Normalizados		
	CP 1	CP 2	CP 3
Densidade Básica	-0,472	0,123	0,505
Contração Tangencial	-0,236	0,637	-0,133
Contração Radial	0,535	0,292	0,339
Contração Volumétrica	0,126	0,675	0,105
Umidade Base Seca	0,255	0,154	-0,705
Coeficiente de Anisotropia	-0,596	0,121	-0,323
Variância explicada (%)	38,045	34,496	24,580
Variância acumulada (%)	38,045	72,541	97,121

Os valores de correlação entre as variáveis das propriedades físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* e os componentes principais são apresentados na Tabela 5. Para a determinação da importância das propriedades físicas da madeira foram considerados os autovetores os valores superiores a 0,70 de acordo com Jeffers (1967). No Componente Principal 1 os autovetores de maior valor, em módulo, são relacionados à densidade básica, contração radial e coeficiente de anisotropia da madeira; infere-se que a CP1 constitui-se em índice de caracterização física da madeira: quanto menor o valor da densidade básica, da contração radial e do coeficiente de anisotropia, menor será o escore calculado e, mais interessante o material sob o ponto de vista físico dependendo de sua utilização. No caso da carbonização da madeira, o menor valor do coeficiente de anisotropia pode implicar em menor quantidade de fissuras no carvão, considerando que na carbonização a madeira é inicialmente seca e, deve apresentar menor defeito quanto mais estável (Galvão e Jankowsky, 1985) produzindo um carvão mais resistente.

No entanto, a análise indica que um coeficiente de anisotropia da madeira de valor baixo implica em menor densidade da madeira e, segundo Oliveira *et al.* (1982), um carvão de menor densidade aparente. Desta forma, é interessante a seleção da madeira de clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* com menor coeficiente de anisotropia, dentre as de maior densidade.

Na CP2 os maiores autovetores relacionam-se com a contração tangencial e volumétrica da madeira e, como na CP1, quanto menor o escore calculado, menor será a

probabilidade de fissuras e de rachaduras da madeira no processo de carbonização, obtendo-se um carvão de melhor qualidade.

Na CP3 o escore calculado foi influenciado, principalmente, pela umidade da madeira, a qual auxilia na preconização da utilização do material. No processo de carbonização o excesso de umidade implica em maior gasto energético na secagem da madeira, além de diminuir a qualidade do carvão devido a maior presença de fissuras.

As principais correlações das propriedades físicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* são apresentadas com base na relação das CP 1 e 3 (Figura 9).

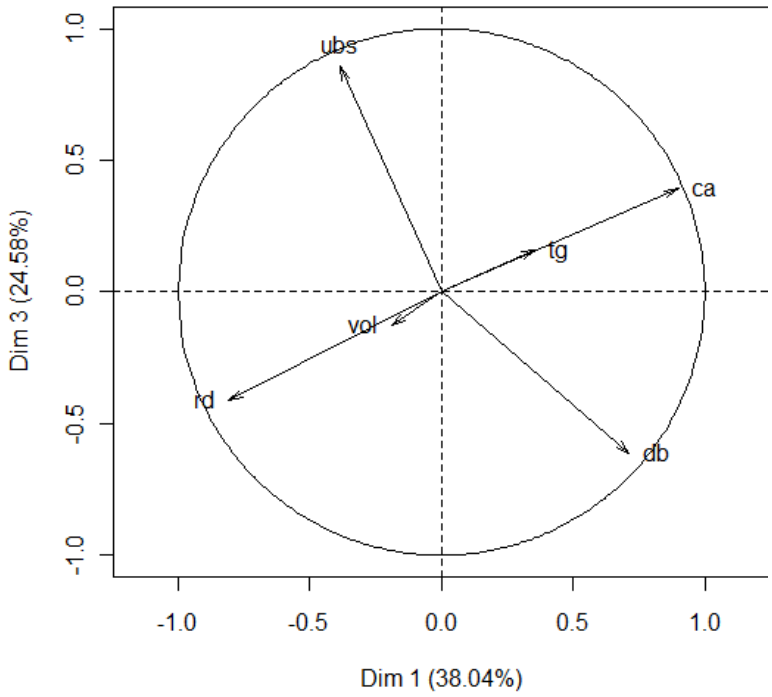

Figura 9 - Correlação dos parâmetros físicos da madeira de clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*: contração tangencial (**tg**), radial (**rd**) e volumétrica (**vol**); densidade básica (**db**); umidade inicial (**ubs**) e coeficiente de anisotropia (**ca**)

O coeficiente de anisotropia, a contração radial, a densidade básica e a umidade da madeira estão bem representados pela proximidade da circunferência unitária; o coeficiente de anisotropia e a contração radial da madeira estão correlacionados negativamente e são independentes da densidade básica e da umidade da madeira que, por sua vez, apresentam forte correlação negativa. A contração tangencial da madeira tem correlação positiva com o coeficiente de anisotropia e correlação negativa com a contração radial e volumétrica da madeira. A contração volumétrica da madeira apesar da provável correlação positiva com a densidade básica não se encontra bem delimitada com uma relação imprecisa com as demais propriedades da madeira.

Na ACP os vetores relacionados à densidade básica e a umidade da madeira são importantes para explicar as variações entre os clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*. A contração volumétrica da madeira mostrou relação com a densidade básica (KOLLMANN; COTÊ, 1968), sendo importante parâmetro da qualidade da madeira e de seus produtos, com o coeficiente de anisotropia mostrando relação significativa com a contração linear (GONÇALEZ *et al*., 2006).

O agrupamento dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* considerando as propriedades físicas da madeira é apresentado através do dendrograma de similaridade de Cluster (Figura 10), construído a partir da matriz de dados padronizados, utilizando-se a distância euclidiana quadrada como medida de similaridade entre os clones, através do Método Ward de ligação.

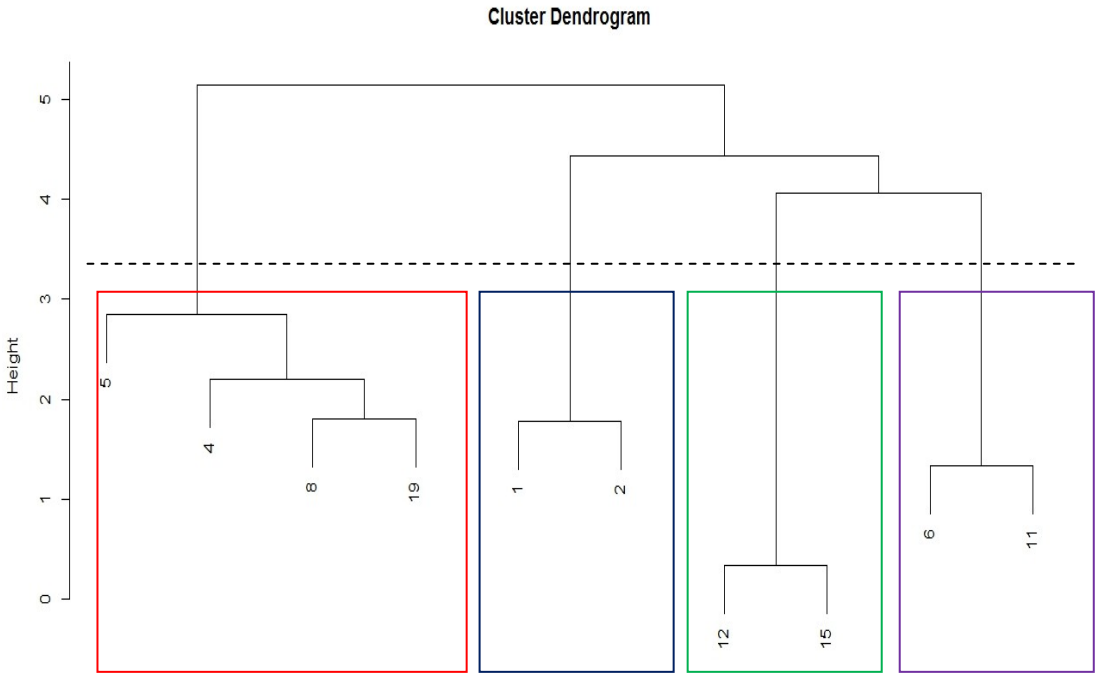

Figura 10 - Análise de agrupamento dos parâmetros físicos da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* pelo dendrograma de similaridade de Cluster

Pelo dendrograma de similaridade verifica-se uma estratificação dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* em 4 grupos fundamentados nas propriedades físicas da madeira. O dendrograma é dividido em quadrantes de influência, indicando que os clones de uma mesma zona de influencia são semelhantes entre si em relação às propriedades físicas da madeira, diferindo das zonas adjacentes; é possível visualizar uma variabilidade mínima dentro de grupos e máxima entre os grupos.

Todas as propriedades físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* apresentaram diferenças significativas à 95% de probabilidade, a exceção da contração volumétrica da madeira (Tabela 6).

Tabela 6 – Resumo da análise de variâncias das propriedades físicas dos parâmetros físicos da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* em função do agrupamento

		QM					
FV	**GL**	**DB**	**TG**	**RD**	**VOL**	**UBS**	**CA**
GRUPO	3	0,009753*	0,612405*	0,365225*	0,847238^{ns}	474,211238*	0,062812*
ERRO	6	0,000825	0,075304	0,070321	0,249654	36	0,004454
	CV%	5,60	2,94	4,90	3,53	5,98	3,84

FV: Fonte de variação; Gl: Graus de liberdade; QM: Quadrado Médio; CV: Coeficiente de variação; DB: Densidade básica; TG: Contração tangencial, RD: radial e VOL: volumétrica; UBS: Umidade base seca; CA: Coeficiente de anisotropia.

O teste de Scott-Knoot (Tabela 7) indica que no 1º grupo a madeira das árvores dos clones de *E. urophylla* (6) e de *E. grandis* x *E. urophylla* (11) apresentaram alta umidade inicial, baixa densidade básica, contração volumétrica e coeficiente de anisotropia, sendo recomendada para a confecção de móveis de baixo custo e na construção civil. O 2º grupo de árvores de (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* e de *E.urophylla* x *E. pellita* apresentou madeira com maior valor de coeficiente de anisotropia e de contração tangencial e, por correlação, mostrou baixo valor de contração radial da madeira.

O 3º grupo das árvores dos clones *E.urophylla* (4 e 5), *E. urophylla* Flores e *E. urophylla* x *E. grandis* apresentou alto valor de contração radial e baixo valor de coeficiente de anisotropia e contração tangencial da madeira; verificou-se uma subdivisão em 3 sub-grupos no 3º grupo, o que indica variações entre árvores de clones. O 4º grupo de árvores de clones de *C. citriodora* x *C. toreliana* e de *C. toreliana* x *C. citriodora* mostrou maior valor de densidade básica e baixo de umidade da madeira, além de baixa correlação com a contração volumétrica da madeira, indicando sua aplicação na produção de móveis, apesar do alto coeficiente de anisotropia (Figura 11).

Tabela 7 - Teste de comparação múltipla Scott-Knott das propriedades físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* entre os grupos formados

Grupo	DB	TG	RD	Vol	UBS	CA
1	0,455 B	9,08 B	5,02 B	13,52 A	114,11 A	1,81 A
2	0,530 B	10,10 A	5,50 A	15,04 A	109,51 A	1,84 A
3	0,485 B	9,01 B	5,75 A	14,14 A	98,15 A	1,57 B
4	0,610 A	9,42 B	5,02 B	13,88 A	79,63 B	1,89 A

DB: Densidade básica; TG: Contração tangencial, RD: radial e VOL: Contração volumétrica; UBS: Umidade base seca; CA: Coeficiente de anisotropia.

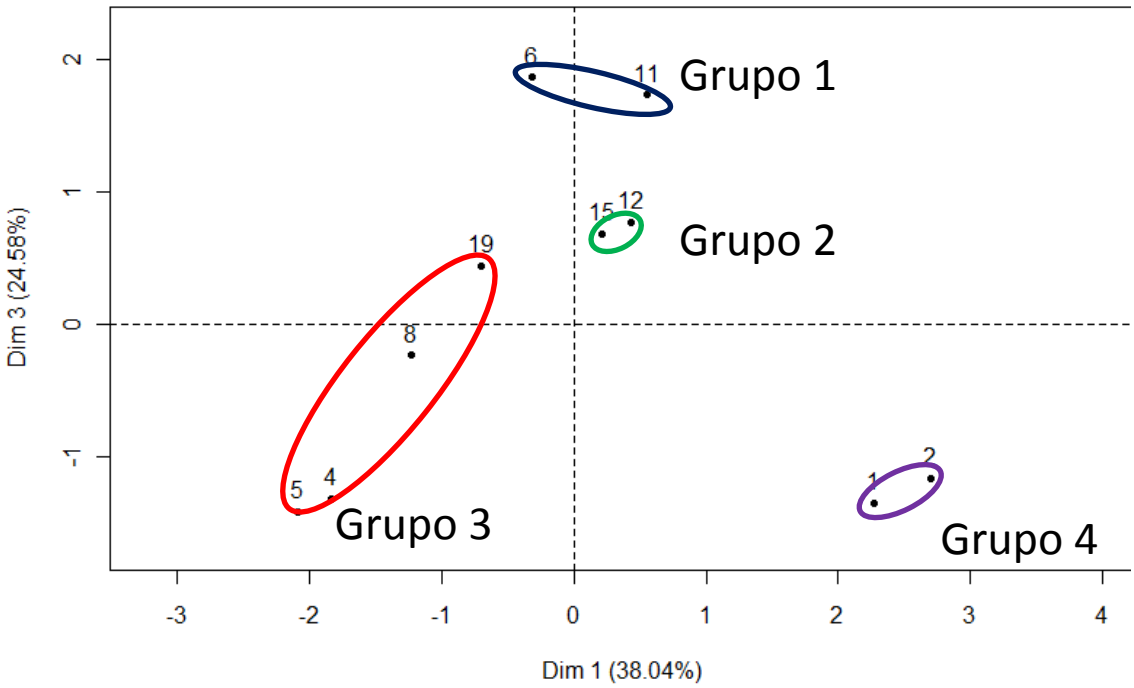

Figura 11 - Mapa de dispersão dos 4 grupos dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* por zonas de influência com base nos parâmetros físicos da madeira

A análise estatística multivariada por componentes principais das propriedades físicas da madeira dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* possibilita estabelecer, de modo geral, as que melhor se correlacionam com as variáveis dependentes, identificando sua ordem de importância. Desta forma, verifica-se forte variação entre as propriedades físicas da madeira dos clones estudados, corroborando, de modo geral, com a literatura (ALZATE, 2010; BARRICHELO; BRITO, 1984; BATISTA *et al.*, 2010; HASELEIN *et al.*, 2004; TRUGILHO *et al*., 2003).

5.2 Variação das propriedades físicas da madeira

5.2.1 Variação longitudinal da densidade da madeira

A variação da densidade básica da madeira no sentido base-topo do tronco das árvores estudadas de *Eucalyptus* e de *Corymbia* (Figura 12) permite a caracterização de três modelos de variação.

O primeiro modelo, caracterizado por um decréscimo da densidade da madeira na região da base e o DAP, seguindo-se tendência de aumento do seu valor até o topo, ocorre nas árvores dos clones de *C. toreliana* x *C. citriodora, C. citriodora* x *C. toreliana, E. urophylla* (5) e de *E. urophylla x E. grandis.* Este modelo foi descrito por inúmeros autores, como Panshin e DeZeew (1970) para várias espécies, por Pereira *et al*. (2000) para árvores de *E. urophylla,* entre outras.

No segundo modelo, verifica-se um decréscimo da densidade da madeira na região da base e o DAP, seguindo-se de uma tendência de aumento do seu valor até 75% e decréscimo até o topo, ocorrendo nas árvores de *E. urophylla* (6), *E. grandis x E. urophylla,* (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* e *E. urophylla* Flores. Esse modelo de variação foi obtido por Haselein (2004) e Pereira *et al.* (2000) para a densidade da madeira do tronco de árvores de diversas espécies de eucaliptos.

O terceiro modelo de variação é caracterizado pela diminuição do valor da densidade da madeira entre a base e o DAP, com aumento até 50% e redução até o topo do tronco das árvores de *E.urophylla* (4) e *E. urophylla* x *E. pellita*. Este modelo de variação foi relatado por Sturion *et al.* (1987) para árvores de *E. grandis.*

A literatura relata a ocorrência comum destes modelos de variação da densidade básica da madeira na direção longitudinal do tronco das árvores de eucaliptos, como Souza *et al*. (1986) ao avaliar as procedências de *E. saligna* e *E. grandis*; sendo que Alzate *et al.* (2005) mencionam, ainda, o decréscimo da densidade da madeira do DAP com aumento até o ápice e o aumento da densidade da madeira da base para o topo do tronco em árvores de *E. grandis, E. saligna,* e *E.grandis x E. urophylla*.

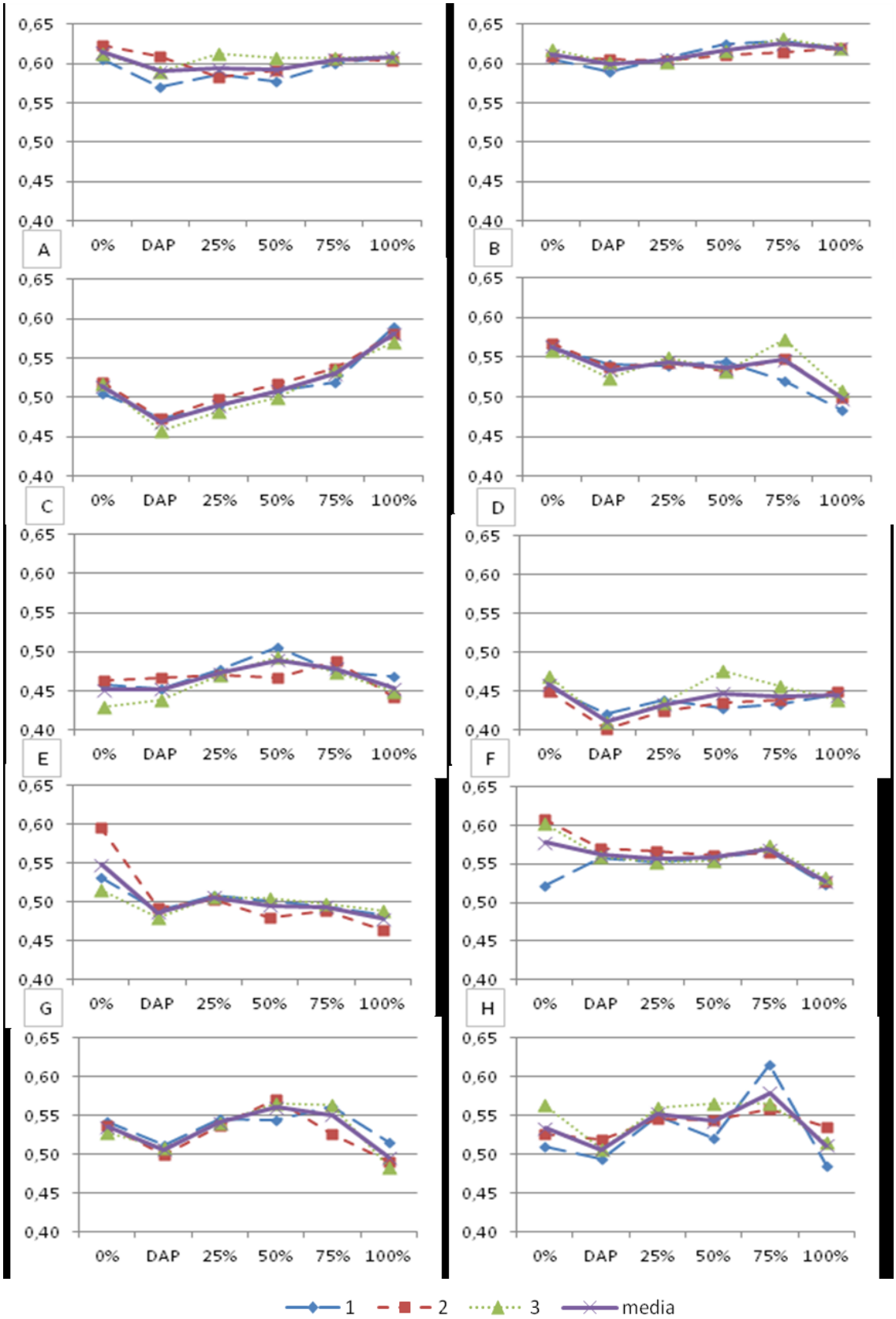

Figura 12 - Variação da densidade básica da madeira no sentido longitudinal do tronco. a - *C. toreliana* x *C. citriodora,* b- *C. citriodora* x *C. toreliana*, c- *E .urophylla* (4) , d- *E. urophylla* (5) , e- *E. urophylla* (6), f- *E. urophylla* x *E. grandis*, g- *E. grandis* x *E. urophylla*, h- (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*, i- *E. urophylla* x *E. pellita*, j- *E. urophylla* Flores

A variação da densidade da madeira descrita para o tronco das árvores das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e de *Corymbia* decorre, basicamente, da variação da estrutura anatômica da madeira, como a espessura da parede celular das células de fibras e a porcentagem do lume das células de vasos, parênquima e de fibras.

O índice de heterogeneidade (IH) da densidade básica da madeira apresentou variações entre os clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* (Figura 13) não sendo observada correlação significativa com a densidade básica: *C. toreliana* x *C. citriodora* e de *C. citriodora* x *C. toreliana* apresentaram mesma densidade básica da madeira com valor de IH de 0,36 e 0,11, respectivamente. As árvores dos clones de *C. citriodora* x *C. toreliana* foram as de menor heterogeneidade e maior valor de densidade da madeira; clones de *E. urophylla* (4) apresentaram IH mais elevado da densidade da madeira no eixo longitudinal do tronco das árvores.

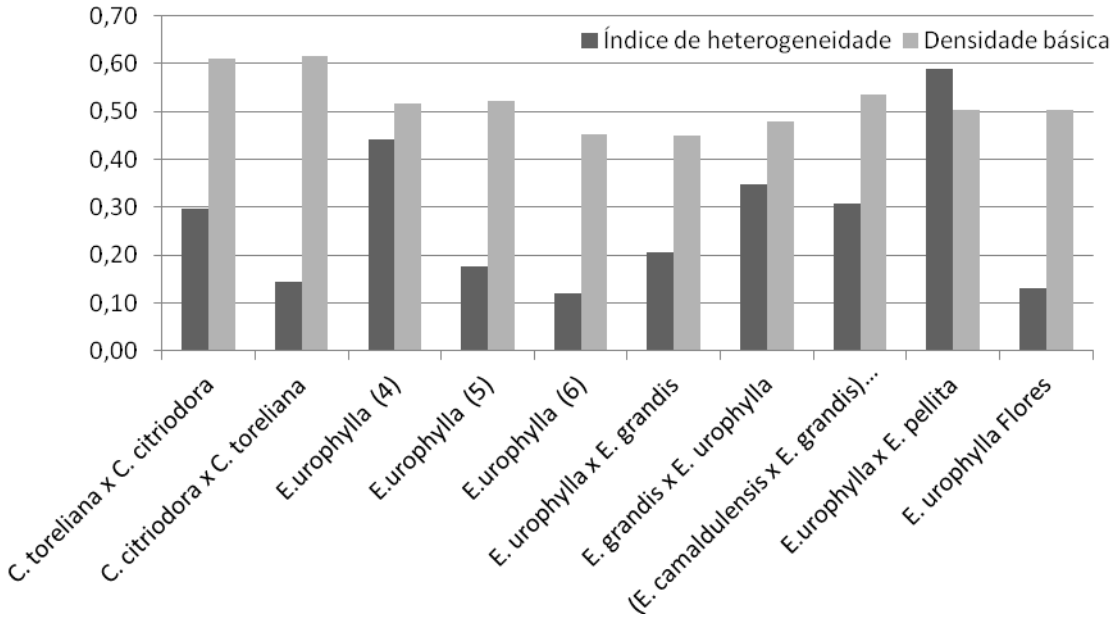

Figura 13 - Índice de heterogeneidade e densidade básica média da madeira do tronco do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia*

O IH para a densidade básica da madeira tem sido preconizado como ferramenta no melhoramento genético e no manejo florestal por Duarte (2007), que obteve valores de 0,28 e 0,48 em árvores de eucalipto, de 5 e 12 anos. Da mesma forma, Silva (2011) analisando a produtividade das árvores de espécies de eucaliptos detectou que maior taxa de crescimento representa menor IH, diferente do observado no presente trabalho

5.2.2 Variação longitudinal da retratibilidade da madeira

Verificou-se que para a maioria dos clones estudados, a contração total tende a aumentar da base em relação ao meio e decrescer desta em relação ao topo ou aumentar até 25% para posterior decréscimo, excetuando-se *E. grandis* x *E. urophylla*, e *E. urophylla* Flores (Figura 14), as quais apresentaram uma tendência decrescente para contração total da base até o topo.

Tais comportamentos corroboram com os resultados encontrados por Serpa *et al.* (2003) ao trabalharem com duas procedências de *Eucaplyptus* com mais de 40 anos, onde a contração total tende a aumentar da base em relação ao meio e decrescer desta em relação ao topo, assim como os de Lemos *et al.* (2012), ao encontrarem acréscimo entre a base e 25%, decaindo desta até o topo ao trabalhar com uma espécie de *Corymbia* com 15 anos.

Ressalta-se que o perfil apresentado pela contração volumétrica tendeu a acompanhar aquele obtido pela contração tangencial ao longo do fuste, verificando-se também certa tendência da contração volumétrica levemente inversa ao da densidade para maioria das espécies. Diversos trabalhos, como os de Kollmann e Côté (1968), Tsoumis (1991) e Vital e Trugilho (1997), entre outros, citam que, quanto maior a densidade da madeira, maior será a variação dimensional. Todavia, nem sempre isso se faz como via de regra, pois nem toda espécie com alta densidade apresenta altos valores de contração.

A exemplo disto, podemos citar madeiras de ipê (*Tabebuia* sp.) e de maçaranduba (*Manilkara* sp.), onde a primeira geralmente apresenta densidade básica próxima a 0,9 g/cm³, enquanto que a segunda fica em torno de 0,85g/cm³. Neste caso, a contração à temperatura ambiente do ipê normalmente é bem maior que a da maçaranduba - 18,4 e 13,8% respectivamente (Souza *et al.* 2002) -, demonstrado a influência de outros fatores além da densidade no comportamento dimensional da madeira.

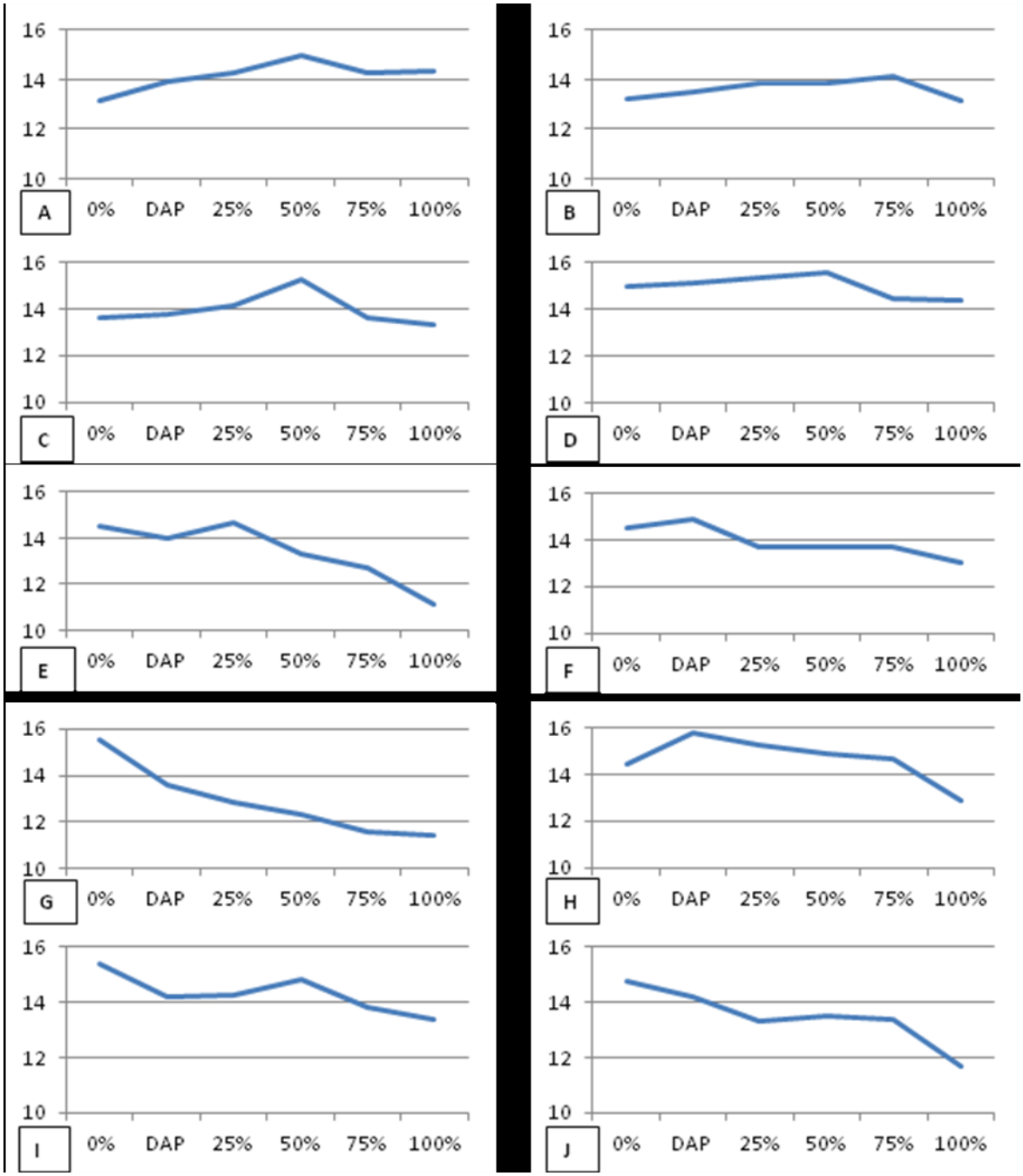

Figura 14 - Variação da contração volumétrica total da madeira na direção longitudinal do tronco. a - *C. toreliana* x *C. citriodora,* b- *C. citriodora* x *C. toreliana*, c- *E. urophylla* (4) , d- *E. urophylla* (5) , e- *E. urophylla* (6), f- *E. urophylla* x *E. grandis*, g- *E. grandis* x *E. urophylla*, h- (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*, i- *E. urophylla* x *E. pellita*, j- *E. urophylla* Flores

No caso das madeiras de eucalipto estudadas, pode-se verificar que alguns clones de maiores densidade, como *C. toreliana* x *C. citriodora* e *C. citriodora* x *C. toreliana* apresentaram a tendência de um comportamento dimensional mais estável e menores valores de contrações totais quando comparadas a espécies de menores densidade, a citar *E. urophylla* (5), *E. urophylla* (6) e *E. urophylla* Flores, ratificando assim a afirmação de Panshin e De Zeeuw (1970), ao defender que as contrações da madeira variam de acordo com a ultra-estrutura da parede celular, mais especificamente com a interação da quantidade proporcional da parede celular com a média do ângulo microfibrilar nas paredes das fibras em associação com a extensão da lignificação da parede da célula.

Verifica-se também a existência de uma tendência de uma correlação negativa entre a retratibilidade tangencial e radial (Figura 15), conforme visto sendo esta significativa nos clones *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla.* Em uma análise mais detalhada, nota-se a propensão do aumento da contração radial e a minimização da contração tangencial próxima ao topo.

5.2.3 Variação longitudinal da umidade da madeira

Para a umidade inicial da madeira, os menores valores foram encontrados, cerca de 65% em seu topo, para *C. toreliana* x *C. citriodora* e *C. citriodora* x *C. toreliana,* enquanto que os maiores valores *E. urophylla* (6), com aproximadamente 140% na base (Figura 16). Tais resultados coincidem com os maiores e menores valores de densidade obtidos respectivamente, ratificando alta correlação existente entre as propriedades, conforme verificado anteriormente na Figura 8 e coincidindo com os resultados encontrados por Oliveira *et al.* (2005)

Os clones *C. toreliana* x *C. citriodora, C. citriodora* x *C. toreliana* e (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* apresentaram pequena variação dos valores de umidade ao longo do fuste. Para Oliveira *et al.* (2005) elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem, notadamente os caracterizados por empenamentos e fendilhamentos. Considerando a utilização deste material para produção de carvão vegetal, quanto menos umidade e mais homogênea sua distribuição interna na madeira, menor seria o gasto energético na fase inicial de carbonização e maior seria a resistência do carvão produzido.

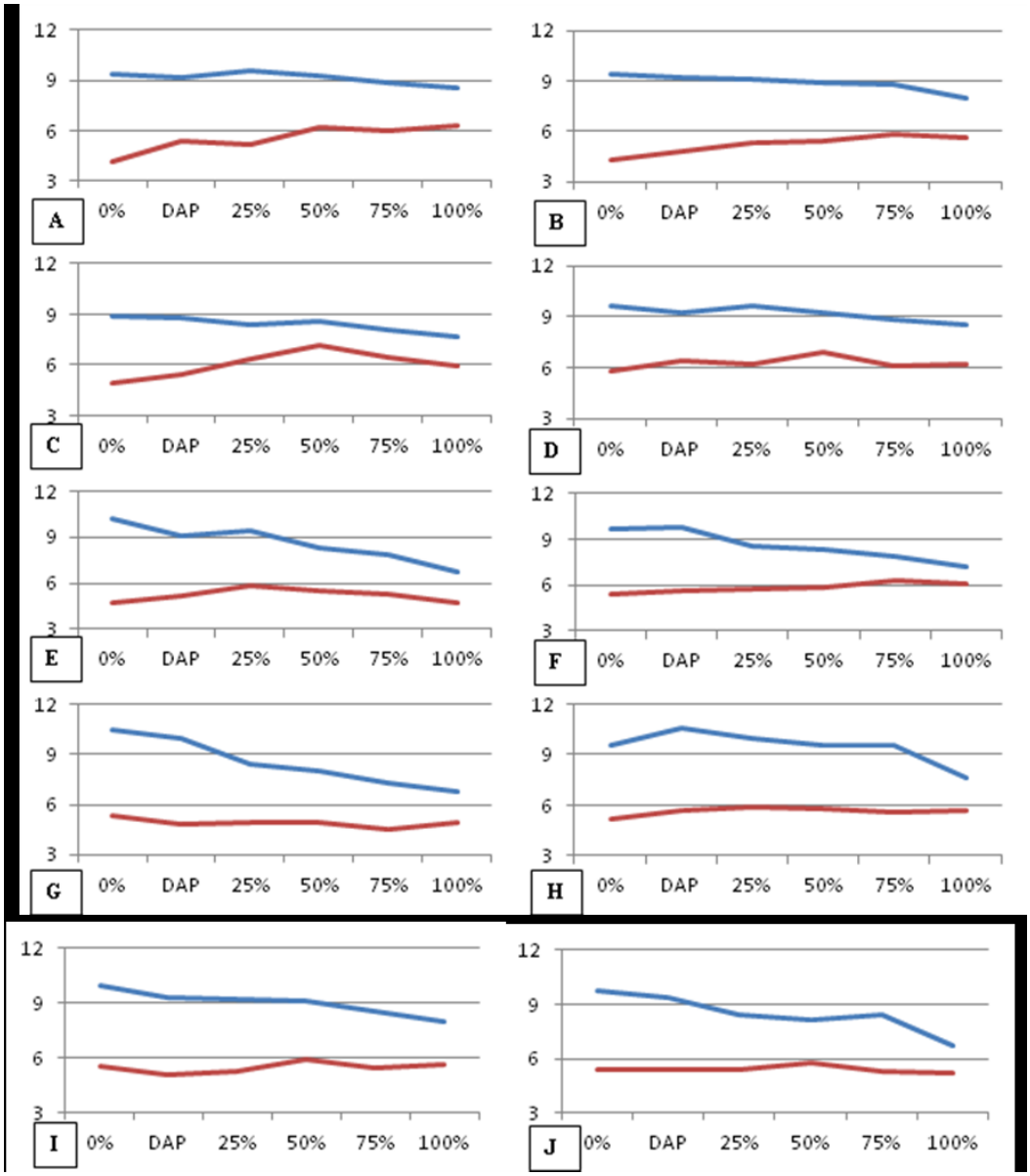

Figura 15 - Variação da contração linear da madeira, em porcentagem, na direção longitudinal do tronco. a - *C. toreliana* x *C. citriodora,* b- *C. citriodora* x *C. toreliana*, c- *E. urophylla* (4) , d- *E. urophylla* (5) , e- *E. urophylla* (6) f- *E. urophylla* x *E. grandis*, g- *E. grandis* x *E. urophylla*, h- (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*, i- *E. urophylla* x *E. pellita*, j- *E. urophylla* Flores

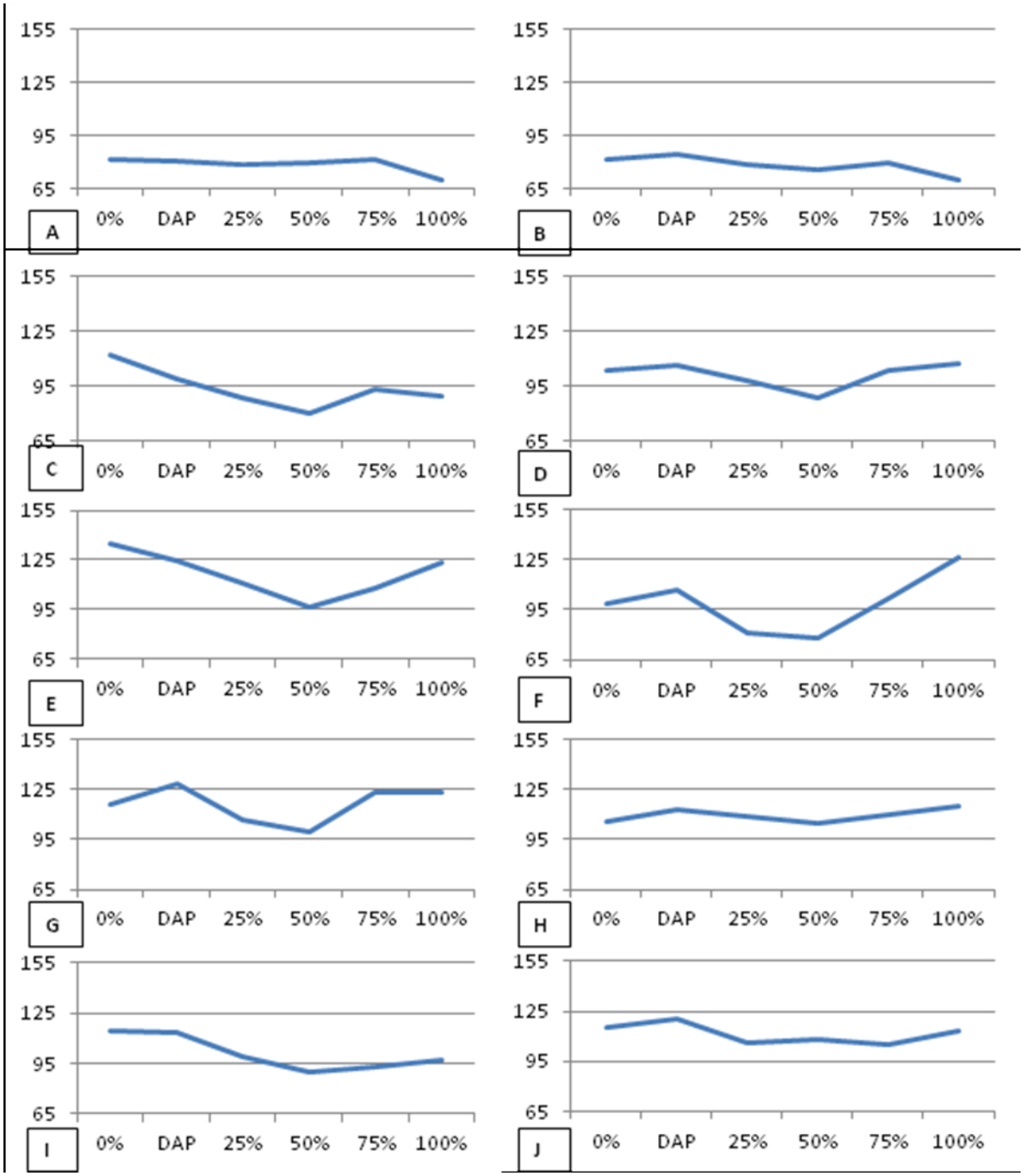

Figura 16 - Variação da umidade da madeira, em porcentagem, na direção longitudinal do tronco. a - *C. toreliana* x *C. citriodora,* b- *C. citriodora* x *C. toreliana*, c- *E. urophylla* (4) , d- *E. urophylla* (5) , e- *E.urophylla* (6), f- *E. urophylla* x *E. grandis*, g- *E. grandis* x *E. urophylla*, h- (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*, i- *E. urophylla* x *E. pellita*, j- *E. urophylla* Flores

5.2.3 Variação radial das propriedades físicas da madeira

Por meio dos resultados obtidos, verificou-se uma maior variabilidade das propriedades física da madeira no sentido medula casca do que no eixo longitudinal (Figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26). Tais resultados corroboram com Malan (1995) e Serpa *et al.* (2003) para a variação da densidade e contração total. Ressalta-se que grande parte dos trabalhos encontrados referentes às variações radiais da madeira baseiam-se somente em amostras do DAP o que, apesar de dificultar a discussão da pesquisa, ratifica a relevância desta.

Segundo Trugilho *et al.* (2005), a variação na direção radial pode ser determinada principalmente, pela presença, proporção e características físico-químicas da madeira juvenil relativa no tronco, onde o gradiente de variação da zona juvenil diminui com o passar do tempo, influenciando na forma de uso final da madeira.

Entre os clones estudados, verificou-se a tendência de crescimento da densidade no sentido medula-casca ao longo do nas avaliações do fuste, a exceção do clone *E. urophylla* x *E. grandis* e daqueles provenientes do gênero *Corymbia* K.D. Hill & L.A.S. Johnson, os quais demonstraram menor variabilidade nos dados apresentados, acarretando em certa tendência de homogeneidade dos valores obtidos.

Quanto ao comportamento inerente ao DAP, *E. urophylla* (5), *E. grandis* x *E. urophylla, E. urophylla* x *E. pellita* e *E. urophylla* Flores apresentaram comportamento semelhante, com a densidade e contração volumétrica crescendo no sentido medula-casca, corroborando os resultados de Oliveira e Silva (2003), assim com os de Serpa *et al.* (2003) para densidade e com Silva *et al*. (2006) para contração.

Os clones *C. citriodora* x *C. toreliana,* e *E. urophylla* x *E. grandis* demonstraram aumento dos valores até a posição intermediária, seguida de decréscimo nos seus respectivos valores de contração radial, enquanto que (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* apresentou certa estabilidade nos valores de seus resultados. Os demais seguiram a tendência de crescimento no sentido medula-casca, onde tal resultado também foi verificado por Silva *et al.* (2006).

A contração radial mostrou-se com pouca variação para *C. toreliana* x *C. citriodora,* enquanto que *E. urophylla* (5) e *E. urophylla* Flores apresentaram aumento dos valores até a posição intermediária seguido de decréscimo. *E. grandis* x *E. urophylla* foi a única que apresentou decréscimo da contração radial. Já os demais clones demonstraram aumento da contração no eixo radial, seguindo a tendência apresentada por Silva *et al.* (2006) e Oliveira e Silva (2003).

A umidade inicial, para todas as espécies estudadas, foi variável ao longo do eixo radial, à exceção de *C. toreliana x C. citriodora*, a qual apresentou certa homogeneidade.

A homogeneidade da madeira como matéria prima para produção de carvão vegetal, quanto à umidade inicial e a densidade básica, conforme visto para *C. toreliana x C. citriodora*, é importante para qualidade do produto final, considerando que esta permitirá um produto de característica semelhante, independente da posição do fuste utilizada, podendo torna-se atrativo para a indústria siderúrgica, conforme as características de seu carvão vegetal.

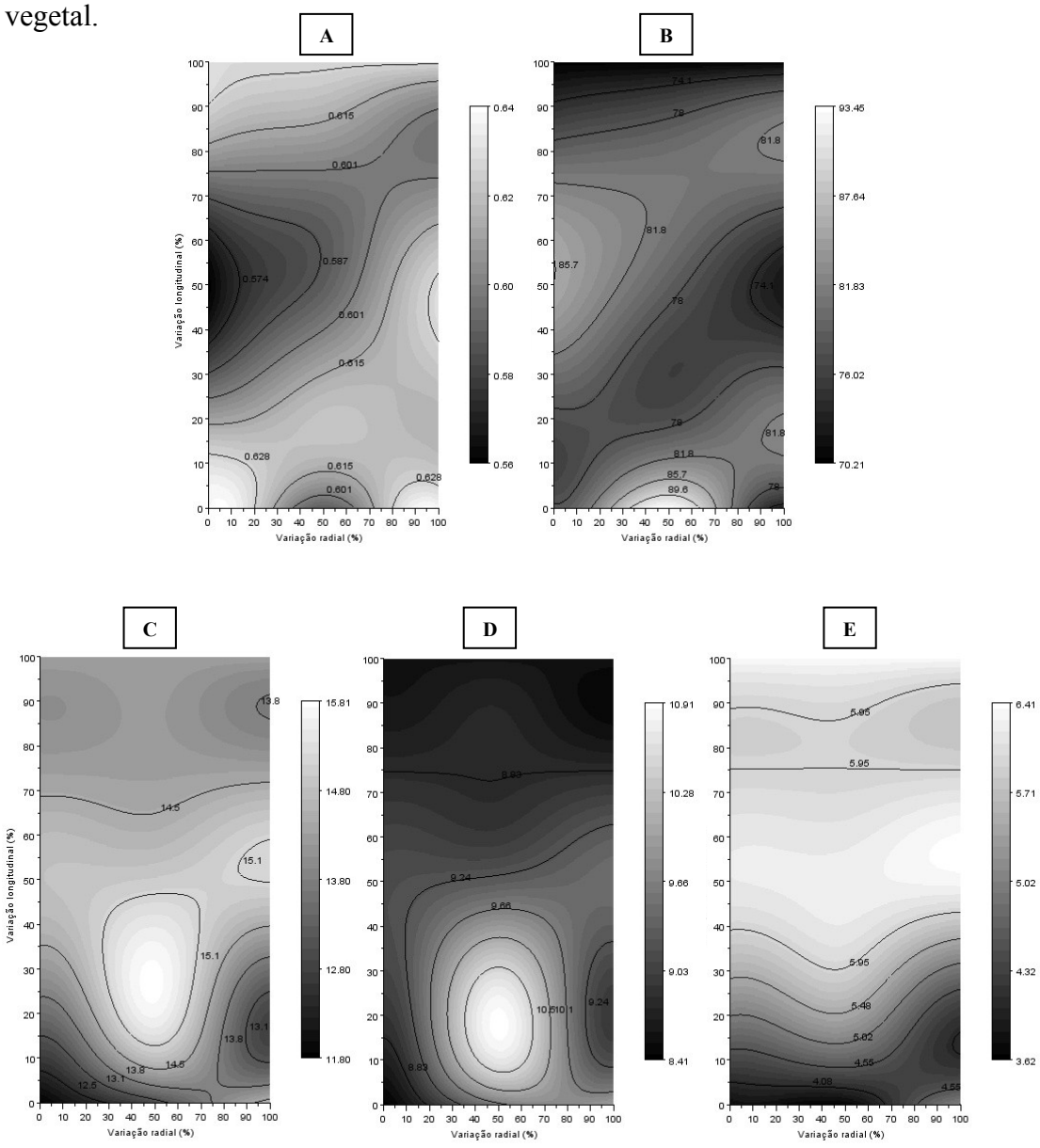

Figura 17 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *C. toreliana* x *C. citriodora*. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

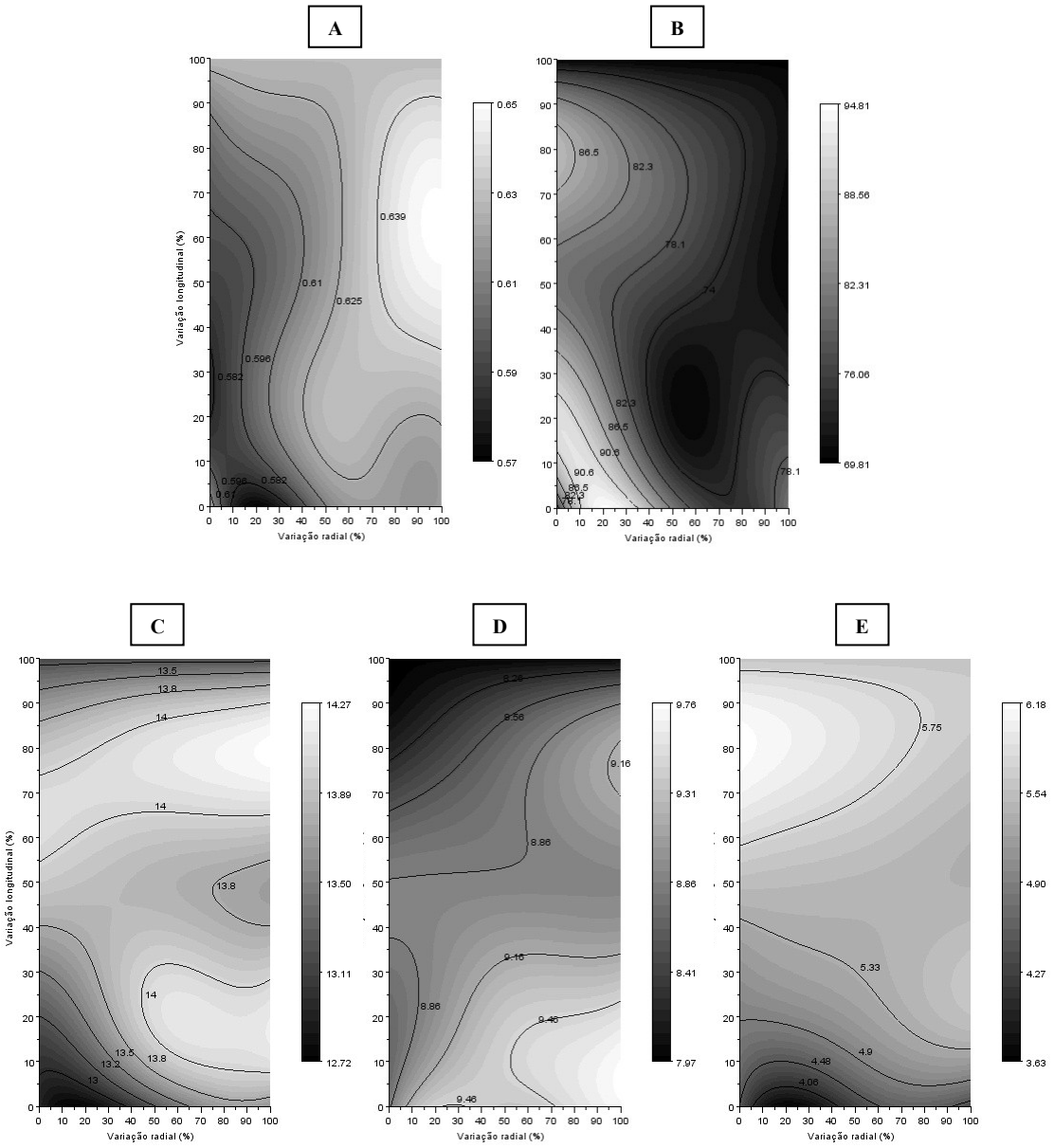

Figura 18 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *C. citriodora* x *C. toreliana*. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

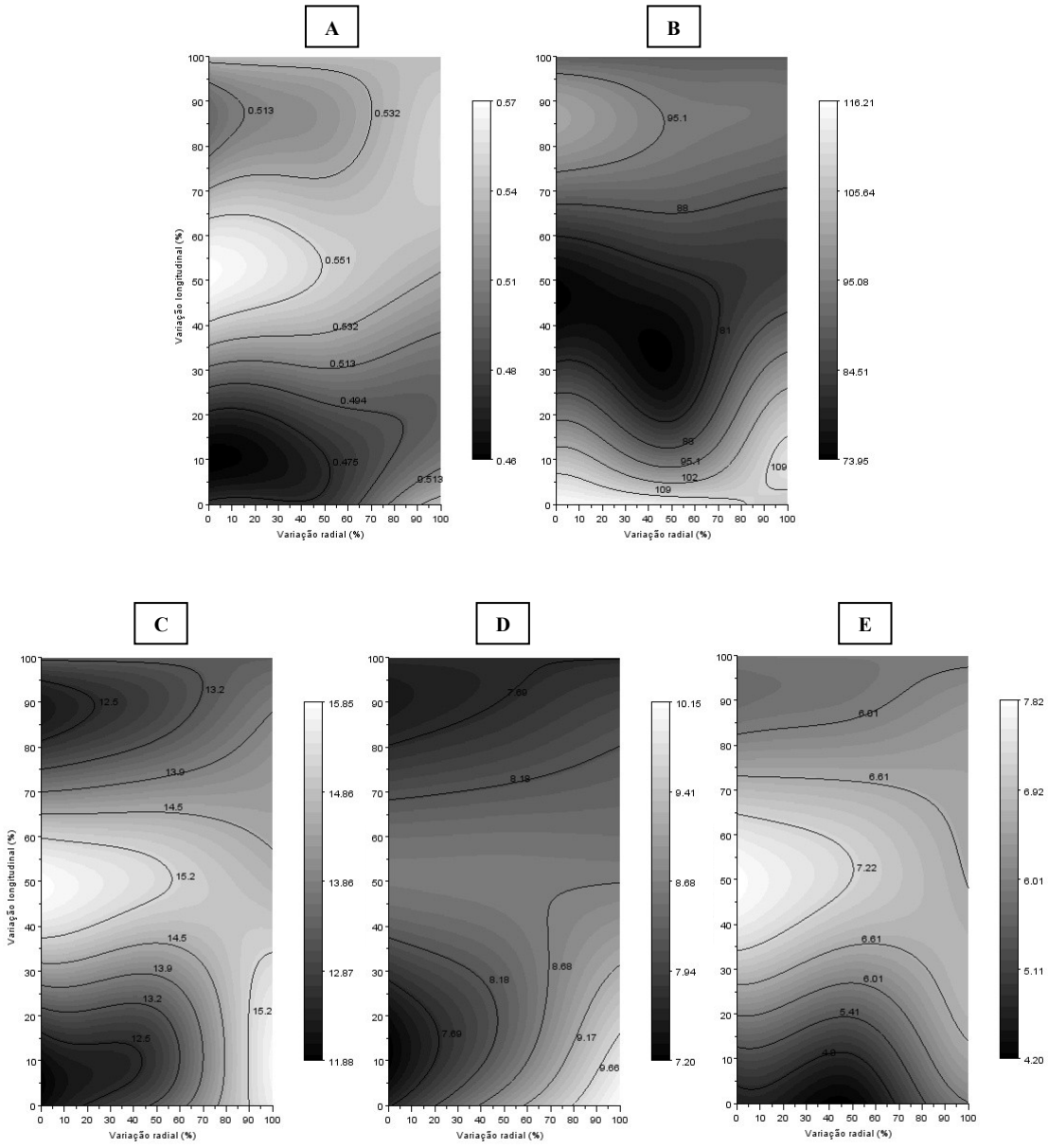

Figura 19 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E.urophylla* (4). a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

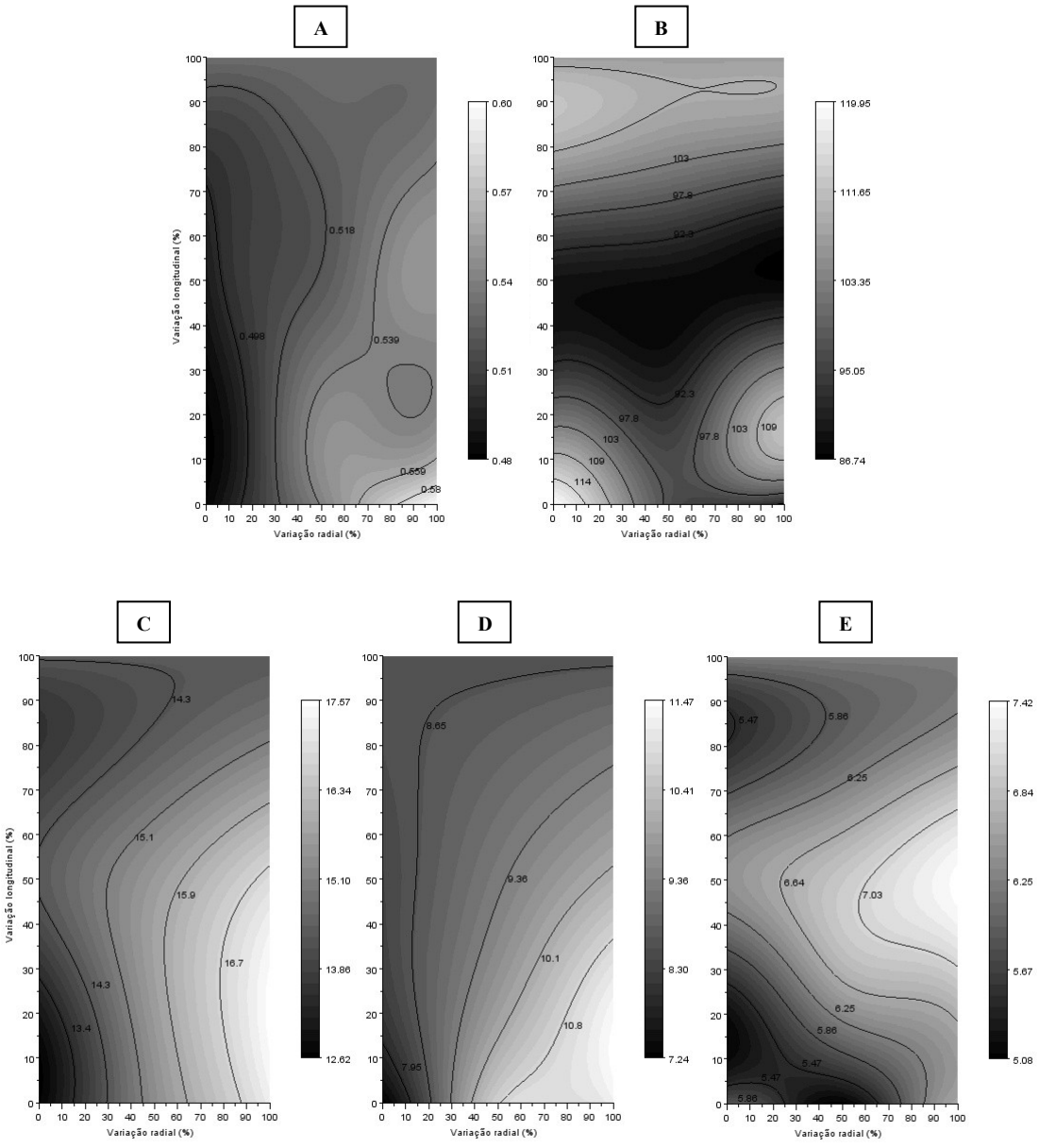

Figura 20 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E.urophylla* (5). a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

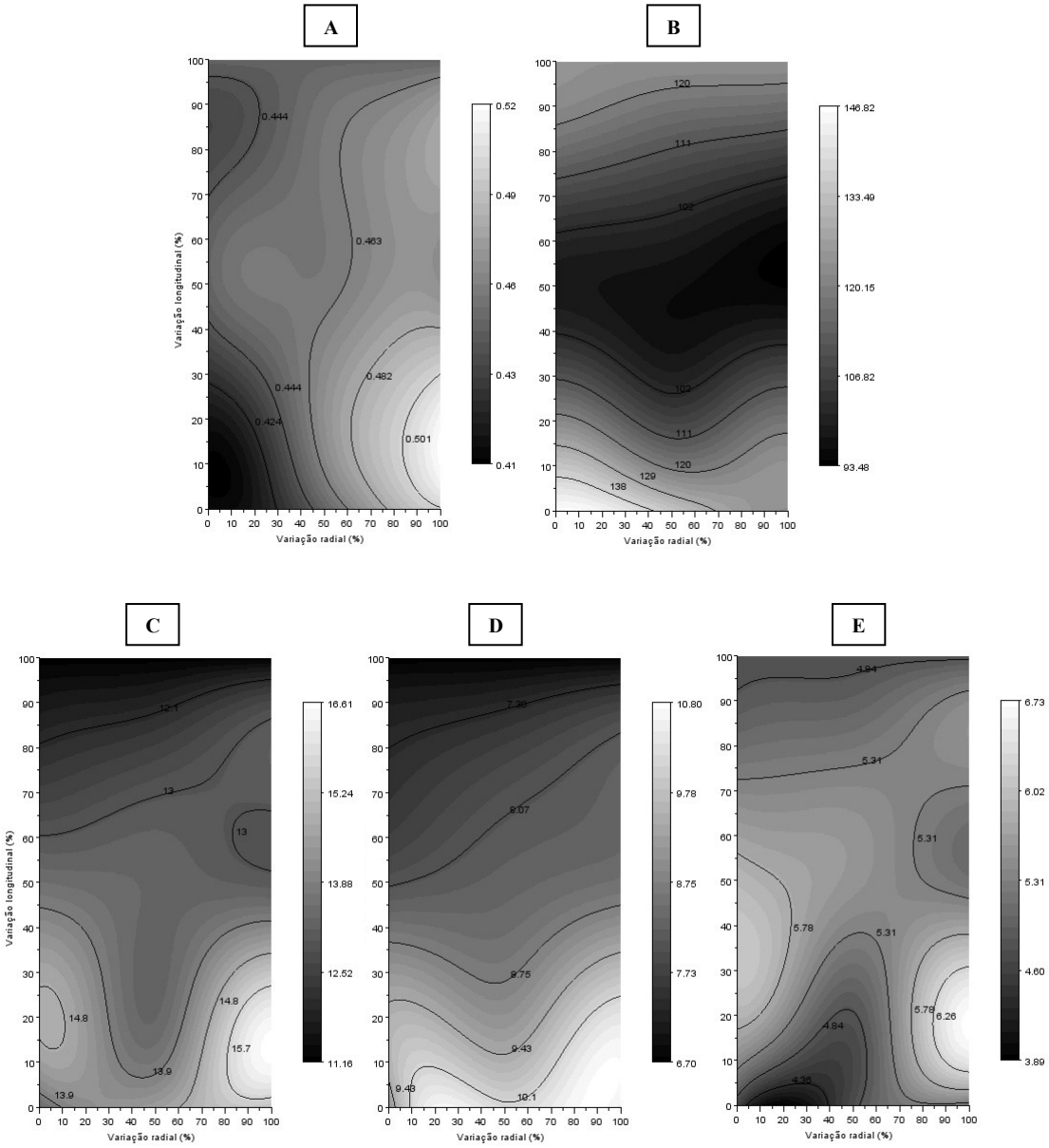

Figura 21 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E.urophylla* (6). a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

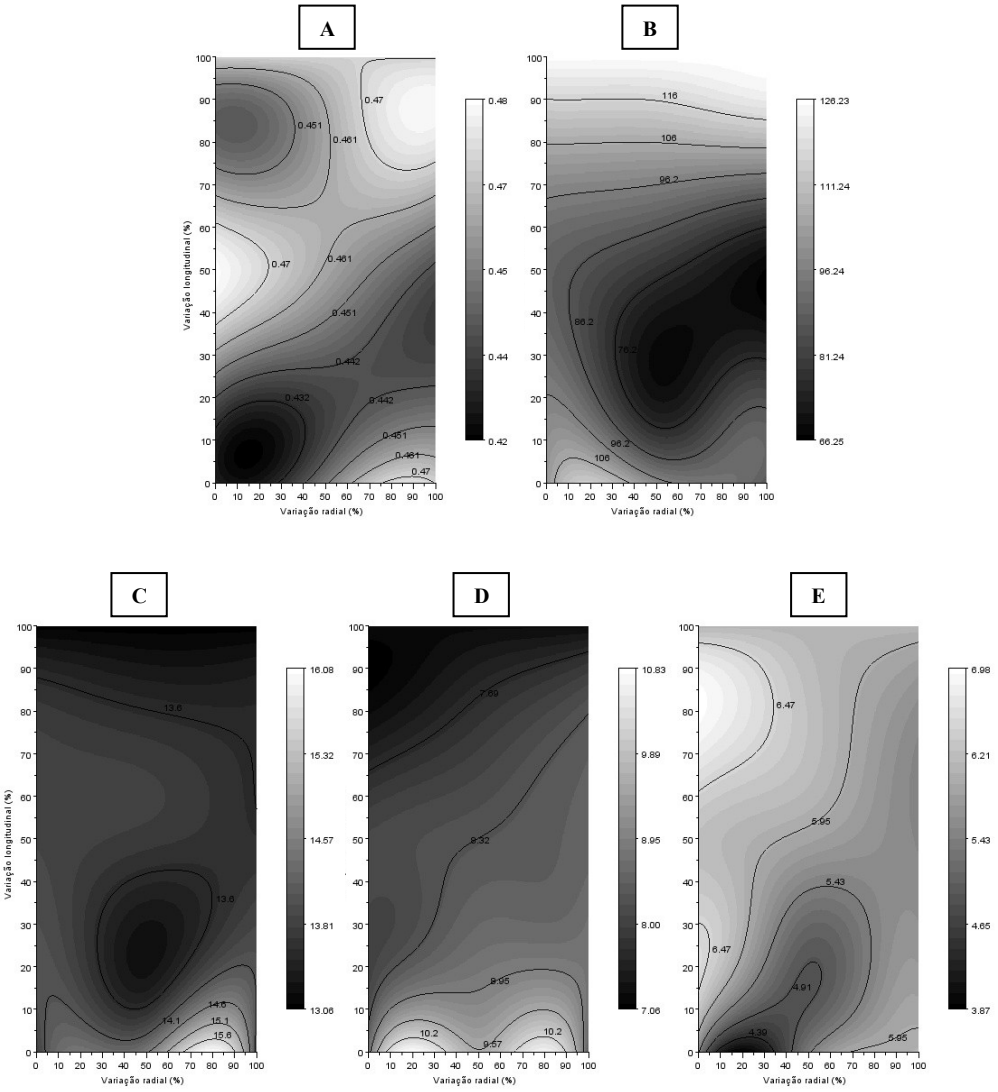

Figura 22 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E. urophylla* x *E. grandis*. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

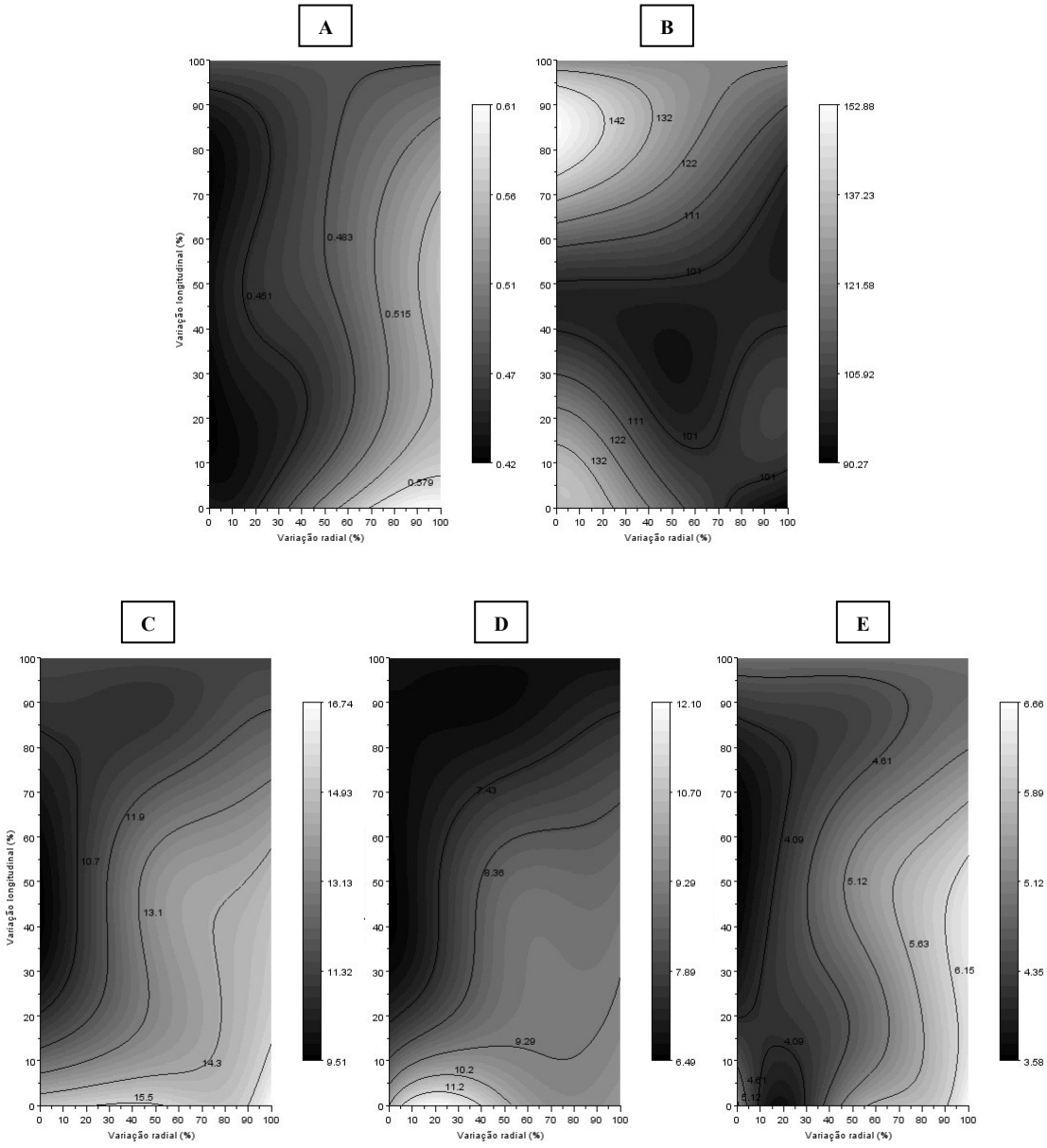

Figura 23 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E. grandis* x *E. urophylla*. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

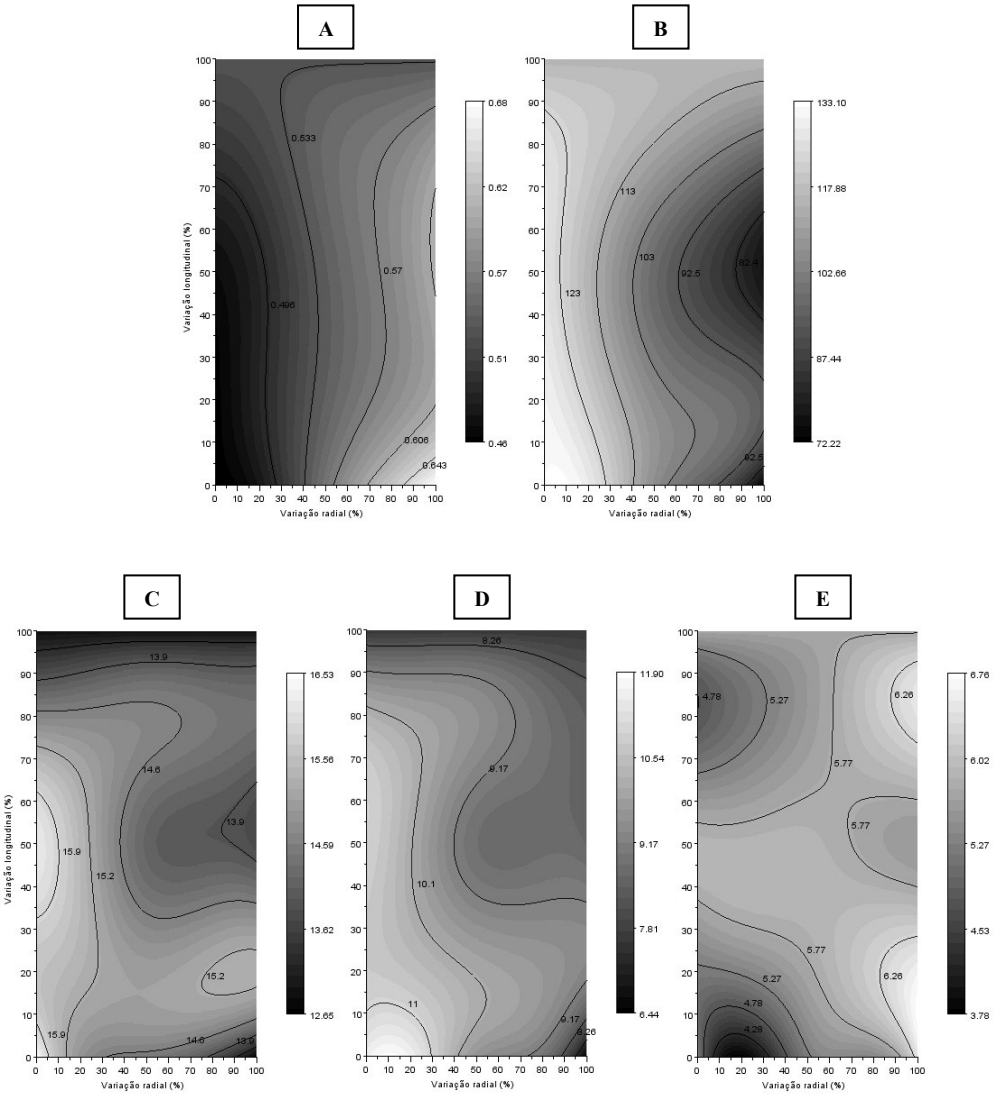

Figura 24 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

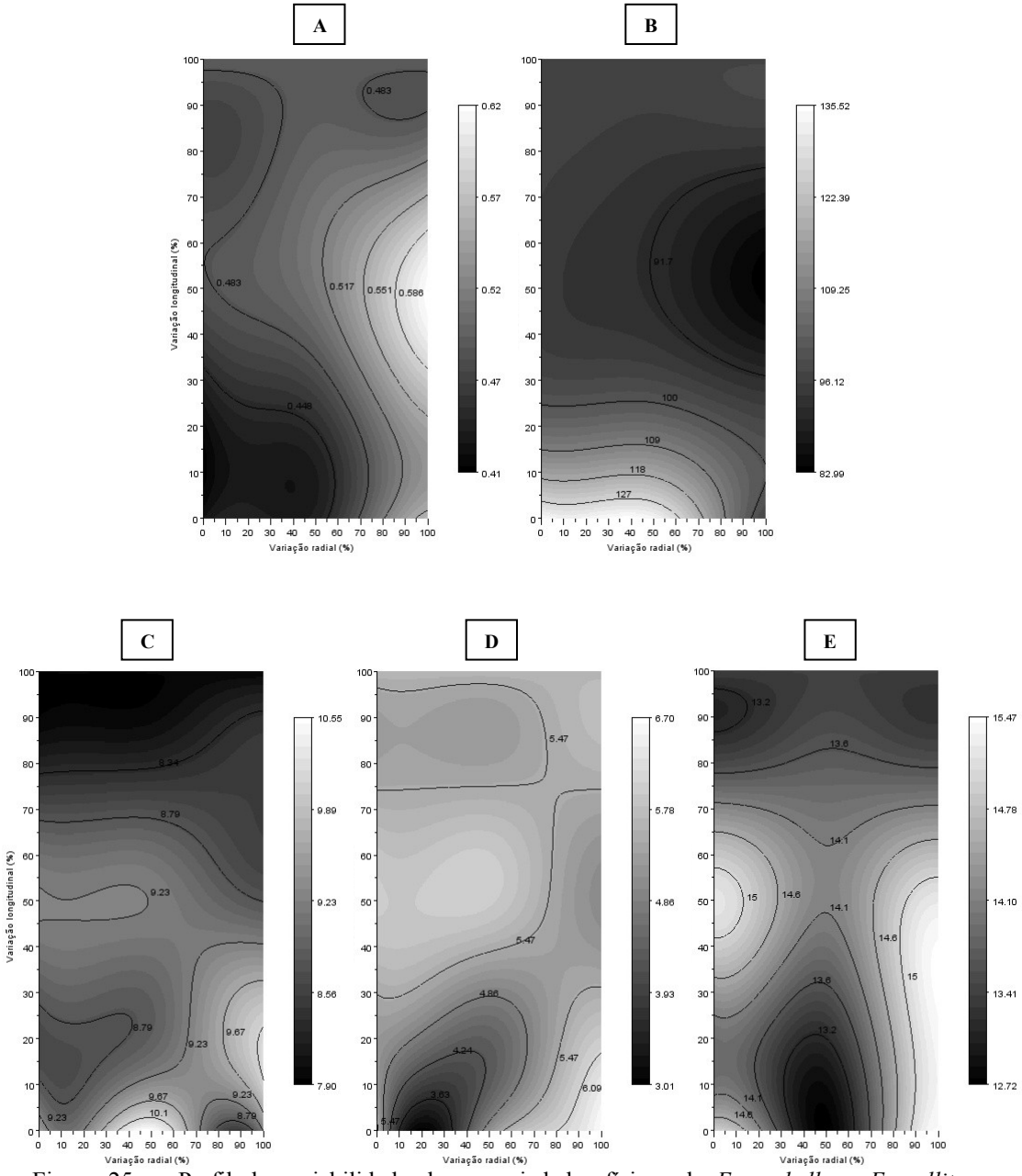

Figura 25 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E.urophylla* x *E. pellita*. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

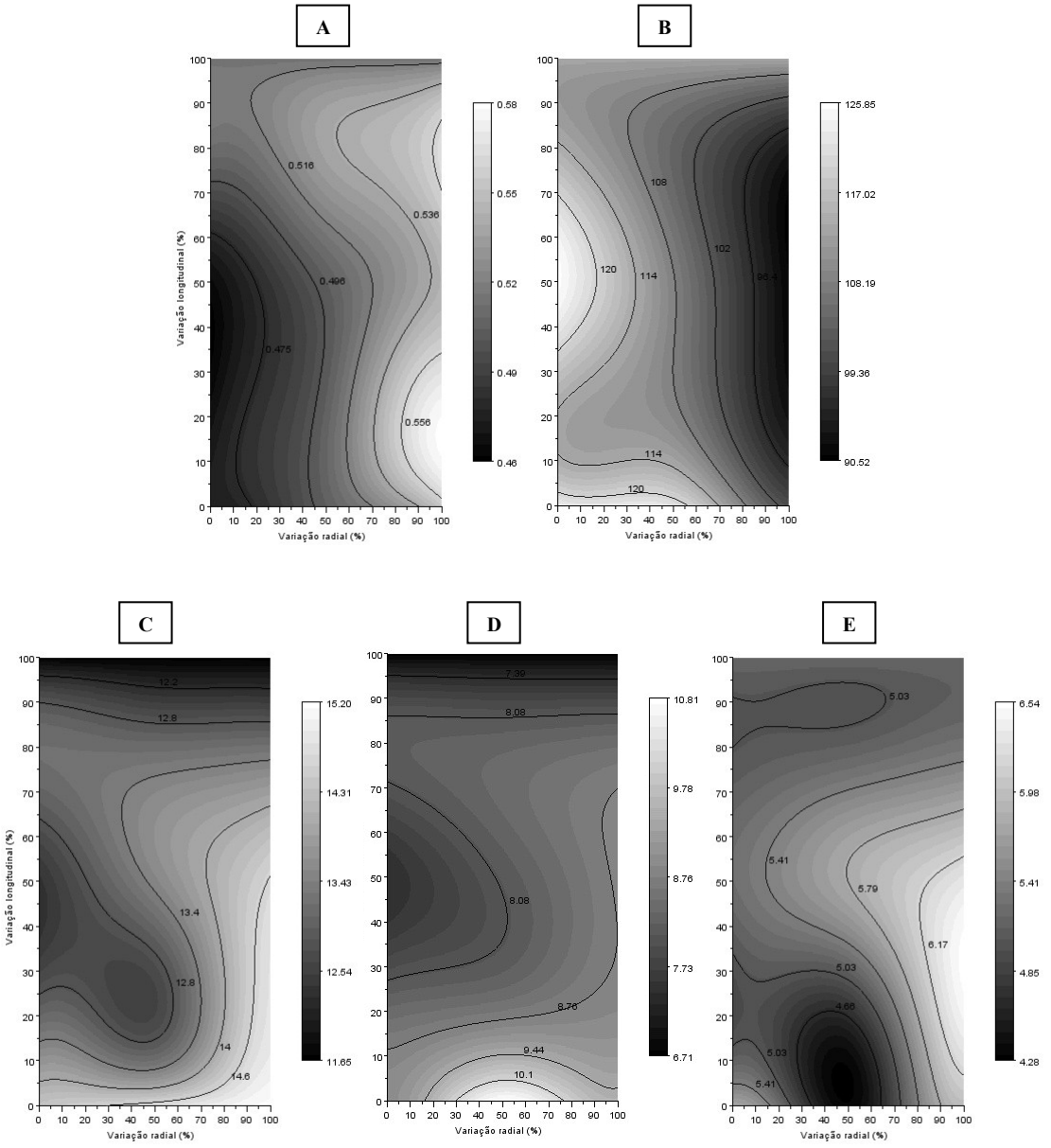

Figura 26 - Perfil da variabilidade das propriedades físicas de *E. urophylla* Flores. a- densidade básica. b- umidade inicial. c- contração volumétrica. d- contração tangencial. e- contração radial

Para *E. urophylla* (a), a densidade tende a crescer no sentido medula casca, enquanto que contração volumétrica aumenta próximo a casca, enquanto que para *E. urophylla* (c), a densidade aumenta próximo a casca e a contração volumétrica tende a crescer no sentido medula casca. Por fim, (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* foi o único dentre os estudados que apresentou uma correlação negativa significativa entre a densidade x contração volumétrica.

Importante salientar que em todos os eucaliptos estudados, houve correlações positivas significativas entre a retratibilidade tangencial e radial com a contração volumétrica. Tal resultado já era esperado devido, matematicamente, a contração volumétrica ser consequência das contrações lineares.

A contração volumétrica também correlacionou-se positivamente com a densidade em sete clones estudados, a exceção de *E. urophylla* x *E. grandis* daqueles precedentes do gênero *Corymbia* K.D. Hill e L.A.S. Verificou-se também que, para maioria dos casos, quando significativa a correlação contração volumétrica x densidade, faz-se também significativa densidade x contrações lineares, assim como, quando não há correlações significativas entre essas duas variáveis, também não se encontra correlações significativas entre a densidade e contrações lineares. Desta forma, pode supor que as correlações significativas entre as espécies estudadas para densidade x contrações lineares são reflexos indiretos das correlações positivas densidade x contração volumétrica.

5.3 Caracterização do carvão vegetal

5.3.1 Características gerais

Quanto a densidade aparente, verificou-se que os clones *C. toreliana x C. citriodora* e *C. citriodora x C. toreliana* apresentaram os maiores valores dentre as espécies estudadas, 0,47 e 0,48 g/cm³, respectivamente, enquanto que o clone *E. urophylla x E. grandis* e *E. urophylla* (7) adquiriu médias próximas a 0,31 g/cm³ (Tabela 8); repetindo o comportamento anteriormente encontrado para densidade da madeira e inferindo que, quanto maior a densidade da madeira, maior será a densidade aparente do carvão vegetal. Tal relação já havia sido relatada em trabalhos anteriores, a citar Brito e Barrichelo (1980), Sturion *et al*. (1988), Gomes e Oliveira (1980), entre outros, e auxilia a elucidar a variabilidade encontrada para os diferentes clones estudados.

Tabela 8 - Caracterização geral do carvão vegetal produzido da madeira das espécies estudadas

Espécie	Resistência à compressão (MPa)	Eslaticidade (MPa)	Degradação linear e volumétrica do corpo de prova devido a ação da temperatura (%)				Rendimento gravimétrico (%)	Densidade aparente (g/cm³)
			Tangencial	Radial	Axial	Volumétrica		
C. toreliana x *C. citriodora*	15,58	696	21,09	17,55	9,20	59,33	39,27	0,47
C. citriodora x *C. toreliana*	15,69	736	24,08	19,83	10,90	55,24	43,70	0,48
E.urophylla (4)	12,89	415	17,40	13,06	9,64	64,43	33,00	0,34
E.urophylla (5)	11,06	535	16,13	16,66	12,79	34,26	37,71	0,34
E.urophylla (6)	10,44	381	17,22	11,90	9,78	65,66	32,29	0,30
E. urophylla x *E. grandis*	11,37	399	19,55	15,96	10,88	38,80	35,06	0,31
E. grandis x *E. urophylla*	10,86	436	15,52	12,76	10,35	39,00	32,36	0,33
(*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*	8,28	316	17,14	15,04	12,03	34,51	35,65	0,35
E.urophylla x *E. pellita*	7,32	463	13,06	14,17	11,93	63,00	32,84	0,31
E. urophylla Flores	13,62	534	21,56	14,24	10,23	40,61	37,66	0,39

Para Vieira (2011), a densidade aparente é um importante quesito para utilização do carvão vegetal com fins siderúrgicos, haja vista que este reflete diretamente na utilização do volume do alto-forno, a exemplo de que, quanto menor a densidade aparente do carvão, menor será o volume útil para a produção de ferro-gusa.

Quanto à degradação térmica devido a ação da temperatura, nota-se um comportamento semelhante ao da contração da madeira quando da perda de água, onde o plano tangencial contrai-se mais que o plano radial que, por seguinte, contrai-se mais que o plano axial, a citar as médias de 19, 15 e 11% respectivamente, para as espécies estudadas. Neste ponto, vale ressaltar que o aquecimento se fez de forma semelhante no interior da mufla para todos os corpos de prova, assim como os mesmos foram dispostos de forma aleatória, o que nos permite descartar uma influência significativa do processo de carbonização e do equipamento na obtenção deste resultado.

Até o presente momento, não encontrou-se em literatura trabalho semelhante para efeito de comparação e discussão. Modelos de carbonização propostos por Kanvry e Blackshear (1970), assim como o de Schaffer (1966), ambos citados por Oliveira *et al* (1982), explanam sobre a cinética da carbonização e a resistência químico-física da madeira à ação da temperatura, todavia, não se encontra informação quanto a perda discrepante de área nos três planos da madeira.

É sabido que a contração da madeira por meio da troca de moléculas de água com ambiente ocorre, principalmente, devido a aproximação das microfibrilas de celulose. Analisando de forma mais minuciosa, percebe-se que a proporção relativa de lenho tardio em um corpo de prova confeccionado pelas normas utilizadas é maior no plano tangencial do que no plano radial, o que auxilia compreender, dentre outros fatores, a maior contração do primeiro plano citado. Assim, assume-se também que há uma maior proporção de parede celular a ser degradada e, consequentemente, uma maior perda de área.

O plano axial possui como característica alta proporção de espaços vazios, a citar vasos, lume de fibras, células de parênquima que quando comparado aos demais planos, o que minimiza a proporção parede celular-plano, assim como funcionam como escape para os gases produzidos no decorrer da degradação dos componentes da madeira. Estes gases, por muitas vezes estarem em temperatura menor que o ambiente externo (mufla), resfriam a superfície da madeira, funcionando como uma barreira física

à ação do calor, o que e pode explicar a menor perda dimensional encontrada neste eixo.

O rendimento gravimétrico da espécies trabalhadas ficou em torno de 35%, onde *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. pellita* apresentaram os menores valores de rendimento, cerca de 32%, enquanto que os clones do gênero *Corymbia* apresentaram os maiores valores de rendimento, cerca de 41%. Oliveira *et al.* (1982), ao trabalhar com a carbonização de *Eucalyptus grandis* sob temperatura máxima de 450ºC, encontraram rendimento de 32,89%, enquanto que Vella *et al.* (1989), sob mesma temperatura máxima, e velocidade de carbonização de 0,57 ºC/min obteve rendimento próximo a 33% para *E. tereticornis*. Em contrapartida, Santiago e Andrade (2010), ao carbonizar sob temperatura de 400ºC amostras de *E. urophylla* com 7 anos de idade, obtiveram rendimento de 27%. Assim, infere-se que as amostras trabalhadas possuem valores de rendimento gravimétrico semelhante ou superior àqueles encontrado em literatura.

A resistência e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão foram, em média, de 12 MPa e 490 MPa respectivamente. Vieira (2011), por sua vez, ao trabalhar com dois clones de *Eucalyptus* carbonizados a 450ºC, encontrou valores de 142 e 95 MPa para a resistência à compressão paralela às fibras, e módulo de eslasticidade de 571 e 475MPa. Todavia, o mesmo autor ao trabalhar com temperatura máxima de carbonização a 300ºC, verificou que os valores de resistência à compressão caem significativamente, a citar 8 e 7 MPa, se aproximando dos resultados obtidos neste trabalho.

Tais diferenças podem ser elucidadas pelo trabalho de Blankenhorn *et al.* (1973) que, ao trabalhar com a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade do carvão produzido em diferentes temperaturas, verificou um comportamento de queda de resistência até aproximadamente 500ºC, quando inverte-se esta tendência. O fenômeno ocorrido pode ser explicado pela instabilidade dos feixes de grafites formados entre 300 e 500ºC, assim como pela perda expressiva do hidrogênio, cruzamento dos feixes de grafites com material e pela orientação de massas de fibrilas entre a faixa de 500 a 900ºC (Blankenhorn *et al.*, 1972).

Desta forma, considerando a possibilidade de utilização do material trabalhado como fonte de energia e termo redutor para a siderurgia, faz-se interessante o estudo referente ao aumento da temperatura máxima de carbonização para o acréscimo de

resistência do carvão produzido, vista a sobrecarga que o carvão sofre quando inserido no interior do alto forno.

5.3.2 Análise das componentes principais do carvão vegetal

Pode-se observar, na Tabela 9, as variâncias explicadas e acumuladas em cada componente principal assim como suas respectivas representações gráficas (Figura 27) em função das componentes principais. Ressalta-se que a importância de analisar tanto o gráfico quanto a tabela é a noção adquirida de quantas componentes são necessárias para explicar a maioria da variância dos dados. Neste caso, utilizando três componentes principais consegue-se explicar 94% da variância dos dados originais.

Tabela 9 - Variância explicada e acumulada em cada componente principal.

Componentes Principais	Variancia explicada (%)	Variancia acumulada (%)
CP 1	61,99	61,99
CP 2	23,05	85,04
CP 3	9,19	94,23
CP 4	2,82	97,05
CP 5	1,48	98,53
CP 6	0,99	99,52
CP 7	0,45	99,97
CP 8	0,03	100,00

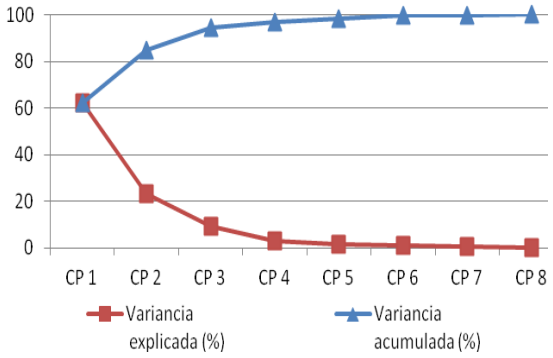

Figura 27 - Esquema gráfico das variâncias explicadas e acumuladas em função das componentes principais

Quanto aos autovetores normalizados (Tabela 10) das 3 primeiras componentes principais, os coeficientes mais elevados, acima de 0,9, referem-se ao módulo de elasticidade, degradação linear radial, rendimento gravimétrico e densidade aparente para a primeira componente, demonstrando uma forte correlação entre si. A segunda e terceira componente, por sua vez, apresentaram valores elevados para degradação linear axial e degradação em volume respectivamente, não havendo fortes correlações entre as demais propriedades. Ressalta-se que a resistência à compressão paralela às fibras do carvão mostrou-se acima de 0,6 para as duas primeiras componentes.

Tabela 10 - Autovetores normalizados das três primeiras componentes principais

Variáveis	Autovetores normalizados		
	CP 1	CP 2	CP 3
Resistência à compressão paralela às fibras do carvão	0,68	0,62	0,03
Modulo de eslasticidade	**0,94**	0,17	0,16
D.L. tangencial	0,65	0,43	-0,09
D.L. radial	**0,91**	-0,19	-0,10
D.L. axial	0,02	**-0,94**	-0,33
Degradação em volume	0,00	0,23	**0,97**
Rendimento gravimétrico	**0,93**	-0,04	-0,12
Densidade aparente	**0,92**	0,29	0,05

Quanto as suas relações de influência, pode-se afirmar que, a densidade aparente apresentou-se como um ponto de convergência da maior parte das propriedades analisadas (Figura 27a), a citar módulo de elasticidade, degradações lineares radial e tangencial, resistência à compressão paralela às fibras do carvão e rendimento gravimétrico, ressaltando que a linha deste último praticamente sobrepõe a da densidade aparente, o que infere em uma forte correlação positiva.

Em paralelo, verifica-se uma relação positiva entre o módulo de eslasticidade e a degradação linear radial, assim como entre a resistência à compressão e a degradação linear tangencial. Vale citar que as variáveis até então descritas encontram-se bem representadas no plano gráfico devido a sua aproximação do circulo unitário, ao contrário da degradação linear axial e em volume, as quais se fazem distantes quando comparadas com as demais, todavia, permite-se inferir uma relação negativa entre a degradação linear axial e a resistência à compressão / degradação linear tangencial.

Por meio da análise da distância euclidiana, foi possível verificar a presença de três grupos distintos, onde o grupo formado pelos clones 1 e 2, apresentou maior densidade aparente e melhores propriedades de resistência mecânica que os grupos II e III, formados, respectivamente, pelos clones 19,5,11,8, e 12; 15,4 e 6 (Figura 28b).

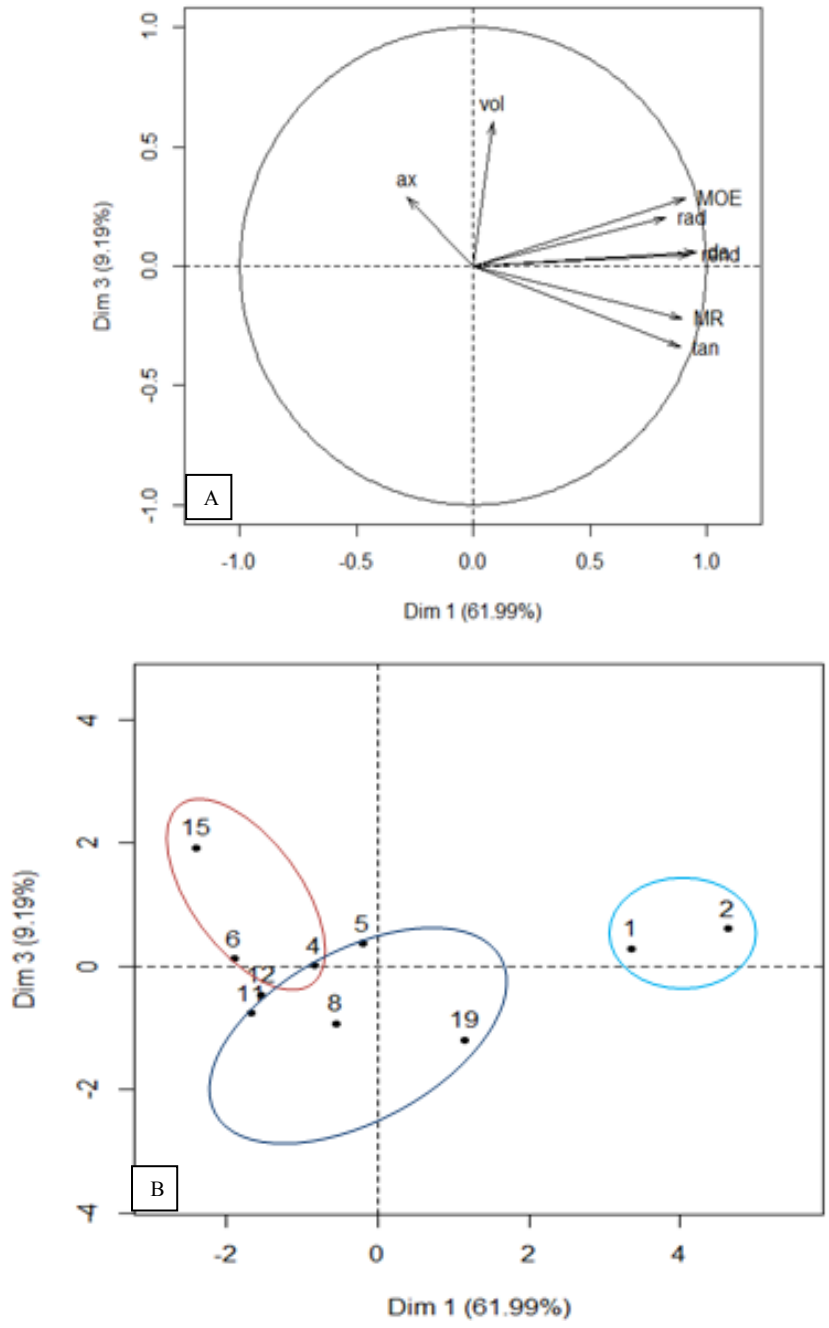

Figura 28 - Análise gráfica das propriedades do carvão dos clones estudados por meio de suas componentes principais. a - coeficientes de cada variável para as componentes 1, 2 e 3. b - clones plotados em função dos escores calculados a partir dos coeficientes das componentes 1, 2 e 3e agrupados pelo resultado do dendrograma de similaridade

5.3.2 Variação longitudinal

Verifica-se, por meio da média dos valores obtidos para os clones em estudo, a existência de variabilidade no eixo longitudinal da árvore para as propriedades do carvão vegetal produzido (Tabela 11).

Tabela 11 - Média dos valores das propriedades do carvão vegetal dos clones em estudos, inerente as suas respectivas posições ao longo do fuste

Posição (%)	RCPF* (MPa)	MOE (MPa)	Degradação linear e volumétrica (%)				Densidade aparente	R.G. (%)
			Tg	Rd	Ax	Vol		
0	10,02	451,57	15,36	13,35	10,63	32,46	0,37	53,05
DAP	11,09	465,64	16,46	14,23	10,89	34,40	0,36	52,19
25	12,75	506,94	18,72	15,84	11,19	37,71	0,37	49,96
50	12,95	509,80	21,47	15,22	9,75	35,54	0,33	40,95
75	13,29	534,40	24,25	19,25	10,87	43,59	0,38	43,64
100	14,29	585,95	26,12	22,13	12,64	46,31	0,40	45,44

*Resistência à compressão paralela às fibras do carvão

Neste contexto, a RCPF, o módulo de elasticidade, assim como as degradações lineares e volumétricas ocorridas possuem tendência de serem maiores na medida em que se aproximam do topo, enquanto que a densidade aparente apresenta certa estabilidade até 50% da altura do fuste, onde há um decréscimo significativo em todos os grupos, para posterior aumento gradativo (Figura 29).

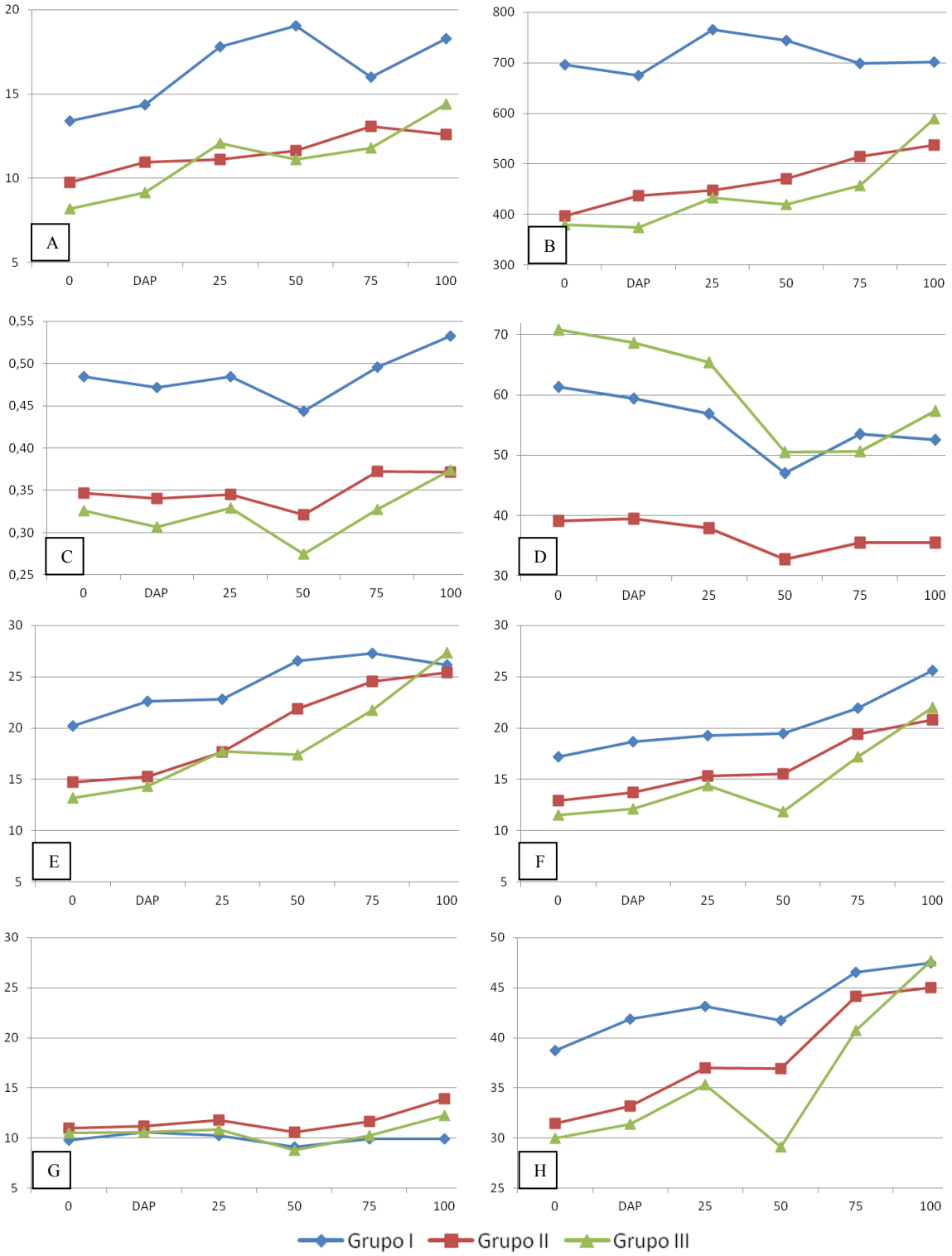

Figura 29 - Variabilidade longitudinal das propriedades do carvão vegetal produzido pelos grupos encontrados. a- resistência à compressão paralela às fibras em MPa. b- módulo de elasticidade em MPa. c- densidade aparente em g/cm³. d- rendimento gravimétrico em porcentagem. e- degradação linear tangencial. f- degradação linear radial. g- degradação linear no eixo longitudinal. h- degradação volumétrica

Tal comportamento assemelha-se ao encontrado por Severo *et al*. (2006) para a variação do teor de lignina no decorrer do fuste de *Corymbia citriodora*, onde a qual também tendeu a crescer a partir da base, ocorrendo queda logo após a metade do fuste, para posterior aumento do teor, enquanto que a holocelulose manteve-se relativamente estável, com tendência de crescimento, no decorrer de todo eixo longitudinal. Em paralelo, Vale *et al.* (2010), ao estudarem cinco espécies do cerrado brasileiro, encontraram correlações positivas entre a lignina e a densidade aparente do carvão produzido.

Diversos autores acusam a lignina como a principal contribuinte para a formação do carvão vegetal (FENGEL; WEGENER, 2003d; OLIVEIRA *et al.*, 1982; SHAFIZADEH, 1983), assim outros trabalhos proporcionam a informação que este componente químico não possui correlação significativa com a densidade da madeira (TRUGILHO *et al.*, 2001; VITAL *et al.,* 1986), o que possibilita inferir indiretamente a queda da densidade aparente no carvão na metade do fuste das espécies estudadas à uma provável menor proporção da lignina neste local, visto que o comportamento da densidade da madeira dos clones estudados diferenciam-se do comportamento encontrado para a densidade aparente, o qual influenciou nas demais propriedades do carvão vegetal, refletindo no comportamento da perda dimensional linear e volumétrica, onde apresentaram tendência de crescimento, com queda em 50%, e posterior aumento. Todavia, tal reflexo não foi visualizado nas propriedades mecânicas do carvão.

O RCPF do carvão vegetal, assim como o modulo de elasticidade se fizeram maior para o grupo I, caracterizado por possuir maior densidade dentre os grupos estudados, e confirmando a hipótese levantada por Vieira (2011), o qual cita que maiores RCPFs e de elasticidade encontrados para os diferentes clones de eucaliptos estudados ocorrem, provavelmente, a maior densidade do material trabalhado.

Verifica-se, nas propriedades mecânicas do carvão vegetal, uma nítida tendência de crescimento ao longo do fuste, apesar do decréscimo da densidade aparente anteriormente citado. Assim, apesar da resistência do carvão estar associada de maneira significativa à densidade aparente do carvão, não se pode tomar este como único parâmetro de observação. Diversos outros fatores, a exemplo da holocelulose que, segundo Severo *et al*. (2006) apresenta um tendência de crescimento no sentido base-topo, mesmo que não significativa estatísticamente, possa ajudar a compreender tal

situação, assim como pode-se questionar a influência das propriedades anatômicas no processo de carbonização, haja vista que, quanto mais próximo da base, mais cernificado será o material, apresentando menor permeabilidade do tecido quando comparado ao topo, constituído principalmente de lenho juvenil, com vasos desobstruídos e paredes celulares mais permeáveis, o que facilitaria a saída da água no processo de secagem na primeira fase da carbonização, gerando menor quantidade de microfissuras e, consequentemente, um carvão mais resistente.

O rendimento gravimétrico, por sua vez, apresentou decréscimo no decorrer do fuste e aumento na proximidade do topo e comportamento relativamente semelhante ao encontrado para a densidade aparente, a citar a queda em torno de 50% de altura para todos os grupos, tanto que houve uma correlação significativa entre ambos. Esta propriedade está estreitamente relacionada ao processo de carbonização adotado, gerando diferentes resultados conforme as combinações entre a velocidade de carbonização e a temperatura máxima adotada (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

No caso deste trabalho, considerando que o processo foi o mesmo para todas os clones e, consequentemente, para as diferentes posições adotadas, verifica-se que tal resultado é inerente às propriedades do material utilizado. Oliveira (1988) e Brito e Barrichello (1977a) encontraram relações positivas entre o rendimento gravimétrico e o teor de lignina da madeira, contudo, Trugilho *et al.* (2001), ao também trabalhar com eucalipto, não encontrou relação significativa entre as propriedades citadas. Em outra via, Vital *et al.* (1986) verifica relação significativa para a holocelulose, lignina e extrativos, enquanto que Brito e Barrichello (1977a) não encontram significância para a densidade básica da madeira.

5.3.3 Variação radial

Quanto à resistência do carvão, os grupos estudados apresentaram maiores valores da RCPF e módulo de elasticidade na parte mais externa do disco, tendendo a decrescer à medida que se aproxima da medula (Figura 30). Vieira (2011) não só encontrou valores, mas também comportamento semelhante ao investigar a resistência do carvão vegetal de eucalipto em diferentes posições radiais, carbonizados a 350ºC.

Tais resultados podem ser melhor compreendidos devido não somente a relação com a densidade aparente, mas também pela maior frequência de fissuras visíveis em corpos de prova mais próximos da medula, o que diminuía sua resistência à

compressão. Tais fissuras ocorrem, principalmente, devido ao processo de secagem ocorrente na primeira fase de carbonização, onde o tecido mais frágil existente próximo à medula acaba por romper-se ou entra em colapso devido às tensões internas existentes, gerando um carvão fragilizado mecanicamente.

Verifica-se que, para todos os grupos, um aumento da densidade aparente conforme o aumento da distância da medula, enquanto que o rendimento gravimétrico assumiu comportamento contrário (Figura 31). Tais resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Trugilho *et al.* (2005), ao trabalharem com a variação radial das propriedades do carvão de seis clones de eucalipto com 7 anos de idade, sob tratamento de carbonização semelhante ao adotado neste trabalho. O comportamento diferenciado da análise de componentes principais deste trabalho, ratificado pelos resultados obtidos pela variação longitudinal das propriedades do carvão vegetal, com a variabilidade radial pode ser compreendida pela ponderação dos dados.

Referente à perda dimensional devido à ação da temperatura (Figuras 32 e 33), quanto mais próximo o corpo de prova da medula, maior se fez a degradação do material, minimizando esta com a proximidade da casca e assumindo tendência semelhante a da densidade, a exceção da degradação linear no eixo longitudinal, que aparentou relativa homogeneidade em seus resultados, o que ratifica as correlações das demais perdas dimensionais com a densidade aparente, assim como a associação de fatores externo para a compreensão da degradação axial, anteriormente expostos.

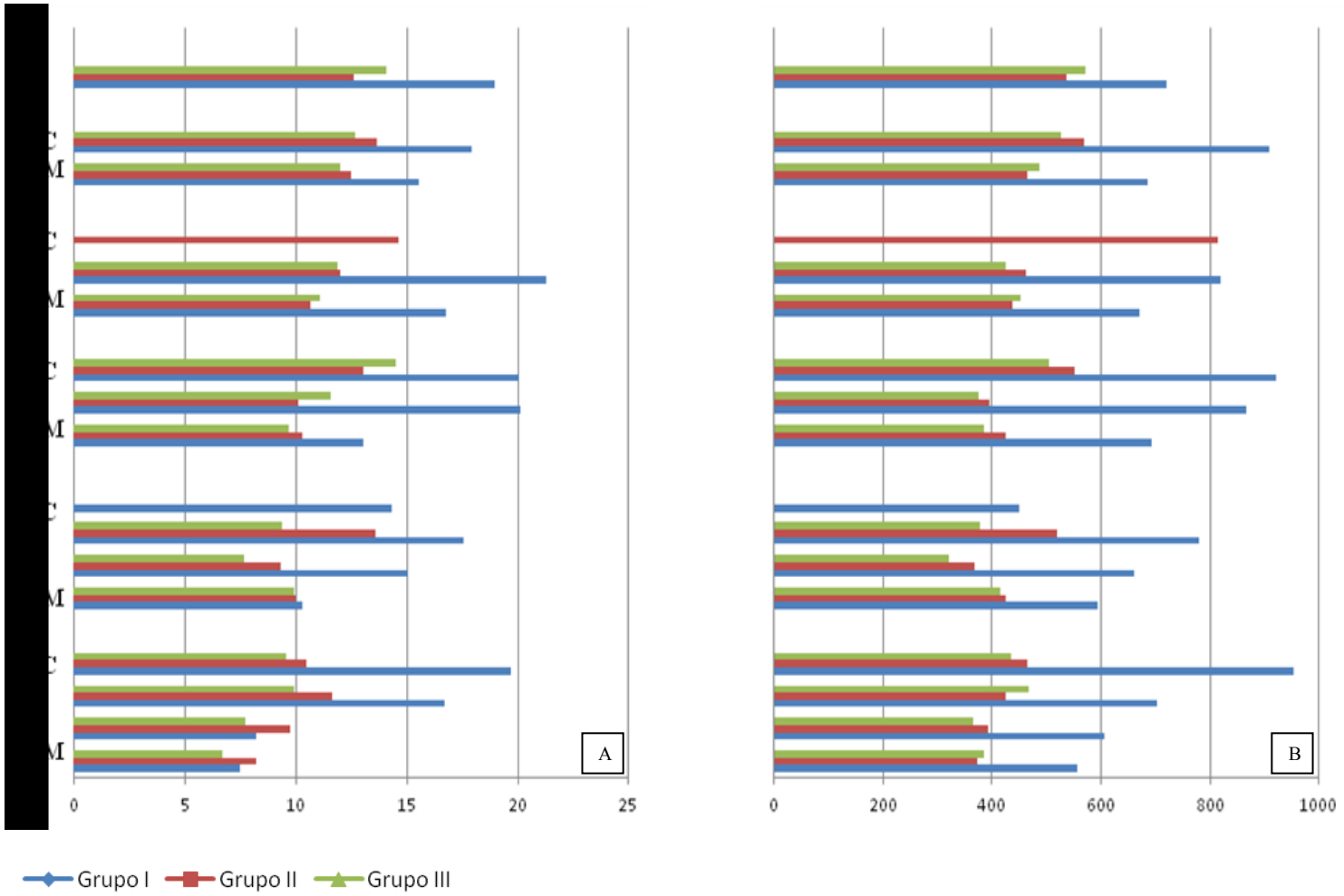

Figura 30 - Variação radial das propriedades do carvão vegetal produzido pelos grupos encontrados
a- RCPF em MPa. b- módulo de elasticidade em MPa

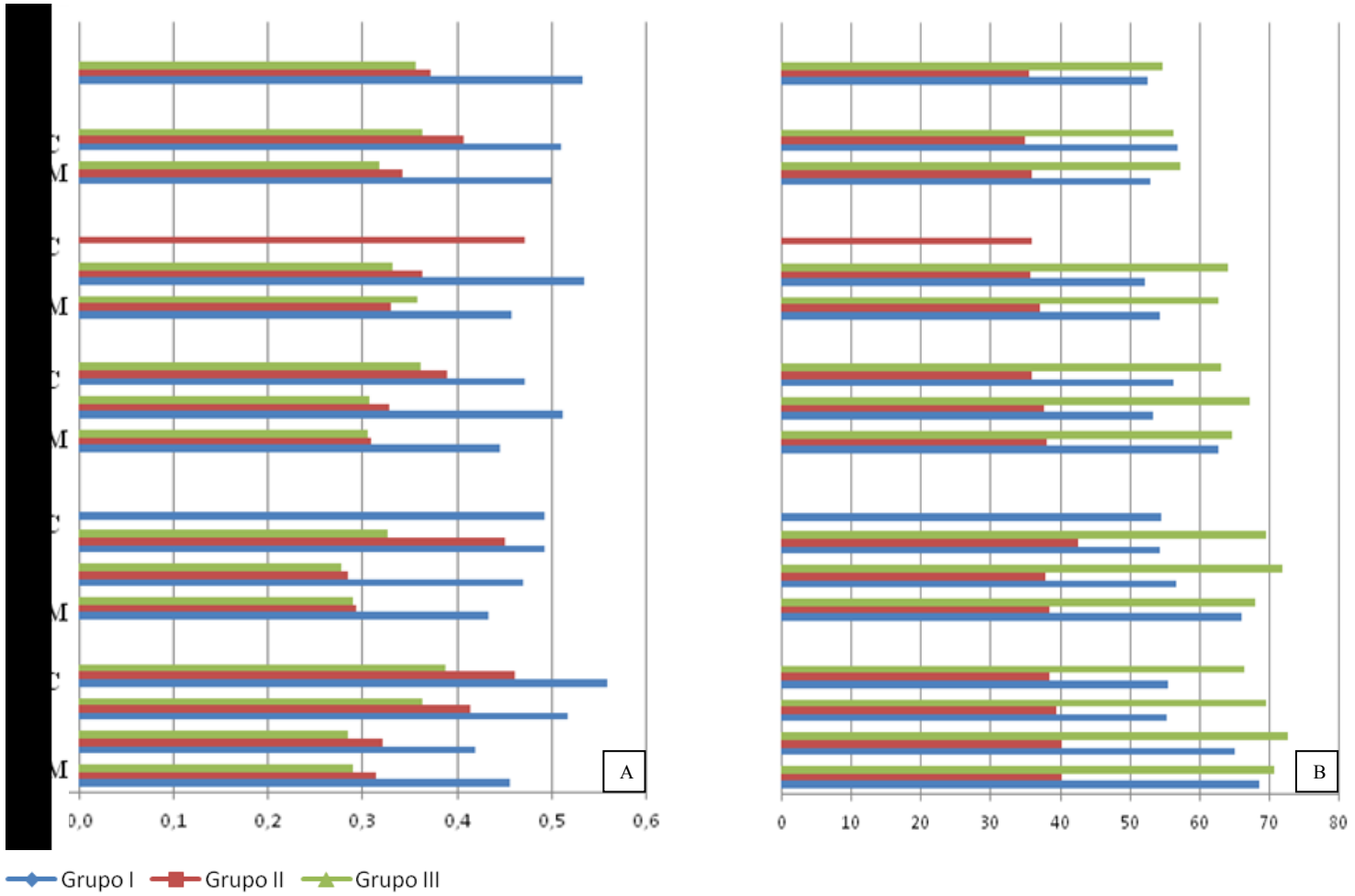

Figura 31 - Variação radial das propriedades do carvão vegetal produzido pelos grupos encontrados
a- densidade aparente em g/cm³. b- rendimento gravimétrico em porcentagem

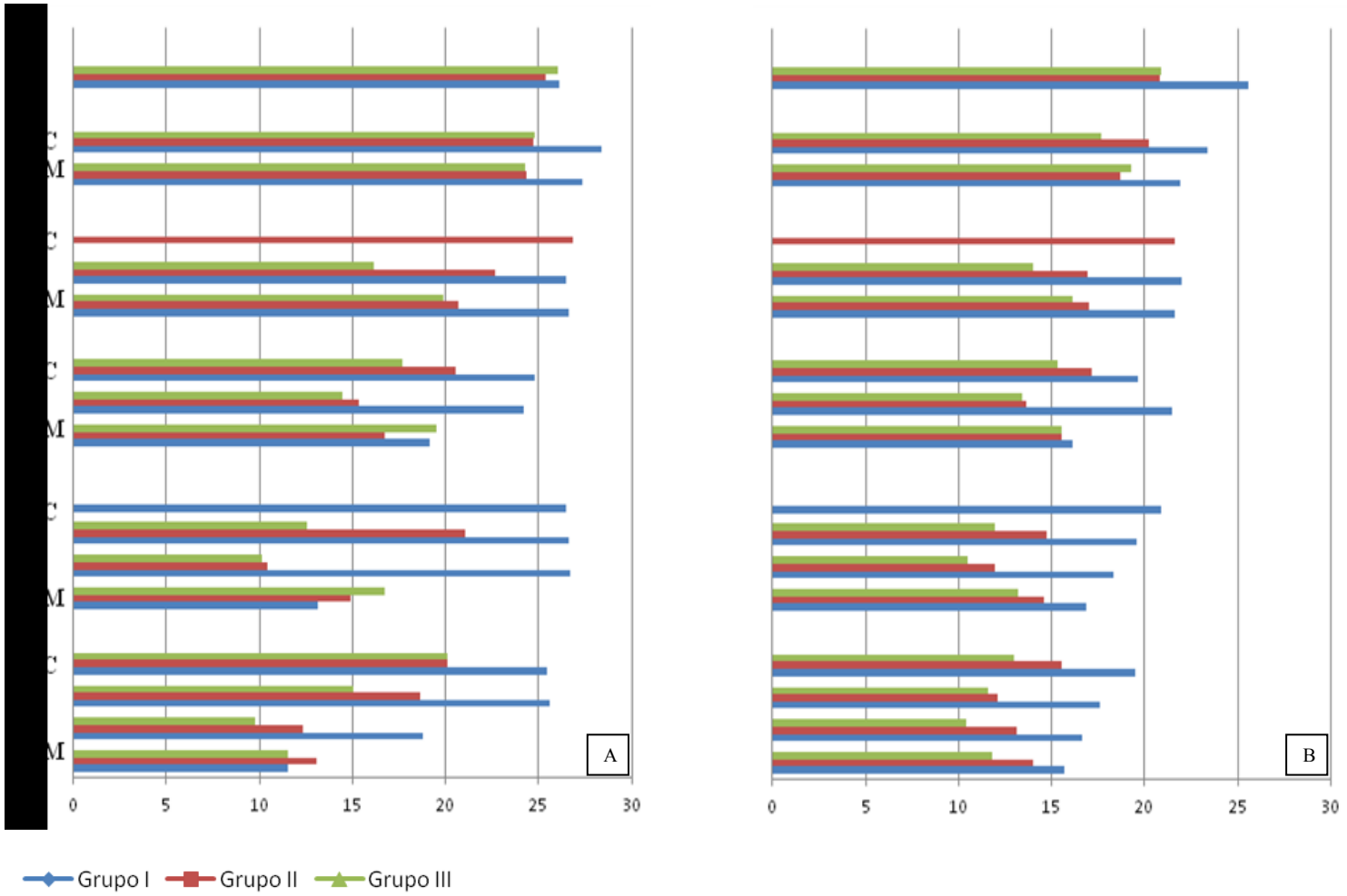

Figura 32 - Variação radial das propriedades do carvão vegetal produzido pelos grupos encontrados
a- degradação linear tangencial. b- degradação linear radial

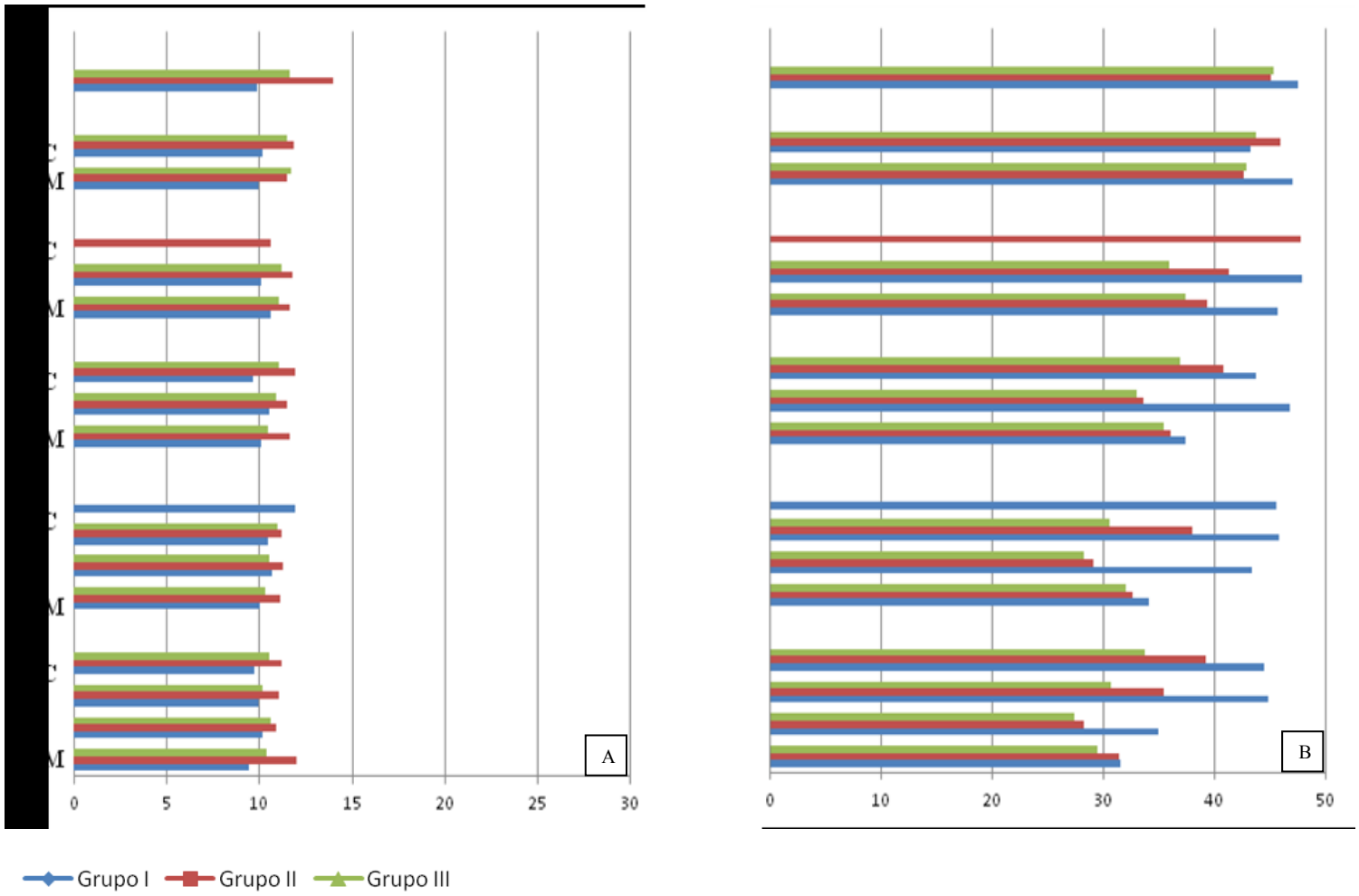

Figura 33 - Variação radial das propriedades do carvão vegetal produzido pelos grupos encontrados
a- degradação linear no eixo longitudinal. b- degradação volumétrica

5.4 Correlação das propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal

Verifica-se que, dos seis pares canônicos realizados, apenas um par teve significância por meio do teste de Wilks (Tabela 12).

Tabela 12 - Correlação canônica entre as propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal produzido e teste de Wilks a 1% de significância para os pares canônicos obtidos

Matriz	Variáveis	Pares Canônicos					
		1	2	3	4	5	6
Madeira	Contração Tangencial	0,130	0,598	-0,027	0,671	-0,415	0,043
	Contração Radial	-0,399	-0,158	-0,484	0,605	0,411	-0,216
	Contração Volumétrica	-0,191	0,444	-0,282	0,823	0,065	-0,076
	Densidade Básica	0,956	0,106	-0,268	0,000	0,007	-0,044
	Umidade inicial	-0,811	0,391	-0,131	-0,290	-0,289	-0,070
	Coeficiente de Anisotropia	0,438	0,468	0,375	-0,130	-0,600	0,266
Carvão	RCPF	0,612	-0,524	-0,055	-0,156	-0,014	-0,028
	Modulo de Elasticidade	0,823	-0,150	-0,057	-0,115	0,108	0,032
	Degradação linear tangencial	0,600	-0,362	0,140	-0,062	-0,122	-0,056
	Degradação linear radial	0,758	-0,148	0,079	0,205	0,017	0,032
	Degradação linear axial	-0,082	0,251	-0,187	0,342	0,058	0,037
	Degradação em volume	0,217	0,016	0,094	-0,172	0,232	-0,015
	Rendimento gravimétrico	0,725	-0,136	-0,076	0,111	-0,056	0,024
	Densidade Aparente	0,902	-0,101	-0,085	-0,082	-0,062	-0,030
Wilks	Correlação canônica	0,96	0,78	0,69	0,48	0,43	0,24
	Valor de p	0,000	0,129	0,403	0,737	0,681	0,740
	Significancia	*	ns	ns	ns	ns	ns

*Resistência à compressão paralela às fibras do carvão

Para Trugilho *et al.* (2003), a análise de correlação canônica fornece uma maneira simples de reduzir as complexidades envolvidas em relacionar dois conjuntos de variáveis, onde a problemática principal se encontra na técnica que refere-se à interpretação das soluções canônicas devido a alta heterogeneidade das variáveis.

Por meio dos resultados obtidos, infere-se que a densidade básica da madeira possui relações significativas positivas com a densidade aparente do carvão, havendo relações também para o módulo de elasticidade, RCPF, rendimento gravimétrico, degradação linear radial axial e tangencial.

A densidade da madeira é a resultante de uma somatória de parâmetros, os quais envolvem desde a ultra-estrutura da parede celular até a composição química e variação dos elementos anatômicos do lenho, gerando uma resultante complexa, mas de alta serventia para avaliação de produtos advindos da madeira.

Considerando que o processo de carbonização envolve diretamente a estrutura anatômica, a qual interfere na resistência do carvão mecânica do carvão devido ao processo de secagem, a composição química, onde os componentes fundamentais e ocasionais da madeira contribuem diferentemente na formação do carvão vegetal, entre outros fatores, se faz então compreensível a influência significativa da densidade nas diferentes propriedades do carvão vegetal.

A relação positiva e significativa entre a densidade da madeira e densidade aparente do carvão vegetal já havia sido relatadas por Brito e Barrichelo (1980), Oliveira (1988), Oliveira *et al.* (1982), Trugilho *et al.* (1997), Vale *et al.* (2010), Vale e Nogueira (2001) entre outros pesquisadores. Isto se explica pelo fato de que, quanto maior a densidade da madeira, maior a massa deste material em diferentes componentes fundamentais, a citar a lignina, o que auxilia na formação de uma maior quantidade de resíduo carbonífero em um mesmo volume, quando comparado a uma madeira de menor densidade.

O rendimento gravimétrico se fez positivo com a densidade da madeira, o que contraria os resultados encontrados Brito e Barrichelo (1980), Trugilho et al (1997), Vale *et al*. (2010),Vale e Nogueira (2001). Entretanto, todos os trabalho citados tiveram diferença metodológica que elucidam a discrepância de resultados. Enquanto Vale e equipe utilizavam material se oriundo do cerrado e de diâmetro pequeno, cerca de 16cm a 30cm do solo, Brito e Barrichelo limitavam-se a discos no DAP. Trugilho e equipe, por sua vez, apesar do grande número amostral e da retirada de amostras em diferentes alturas, não apresentou a ponderação dos valores em seu trabalho, assim como os demais autores. Assim, o fator ponderação adicionado neste trabalho pode ter auxiliado uma nova interpretação estatística dos dados obtidos. Ressalta-se que este resultado corrobora com aquele encontrado por Oliveira (1988).

A RCPF e o módulo de elasticidade apresentaram relações positivas com a densidade da madeira, contudo, não encontrou-se literatura referente para efeito de comparação. Sabe-se que, quanto maior a densidade da madeira, por via de regra, maior será a resistência do material, resultando em comportamento semelhante no carvão estudado. Viera (2011) verificou a tendência de que, quanto maior a densidade da madeira, maior seria a resistência mecânica do carvão vegetal, todavia, o autor não realizou análise estatística para verificar a significância desta tendência.

Quesitos como contrações lineares e volumétricas da madeira pouco contribuíram para as propriedades do carvão apresentado, assim como o coeficiente de anisotropia não se fez tão significativo, Talvez isto possa ser explicado pelo processo de carbonização em sí, uma vez que, independente da forma que as microfibrilas de celulose se rearranjem no interior

da madeira, esta será degradada em diferentes outros componentes devido a ação da temperatura. As contrações e o coeficiente de anisotropia fazem-se importantes no decorrer do processo de secagem da madeira, principalmente quanto à formação de rachaduras, as quais são prejudiciais para a resistência mecânica do material.

A umidade inicial da madeira, por sua vez, devido a alta correlação negativa existente desta com a densidade, obteve uma relação negativa com as características desejáveis ao carvão vegetal.

5.5 Determinação de clones potenciais para a produção de carvão

De acordo com análise de correlação canônica, deve-se selecionar indivíduos com madeiras de alta densidade básica, para que se obtenha um carvão de maior resistência mecânica, rendimento gravimétrico e densidade aparente. Dentre os clones trabalhados, os que obtiveram melhores resultados foram *C. toreliana* x *C. citriodora* e *C. citriodora* x *C. toreliana*, onde o primeiro apresentou características mais homogêneas da madeira, o que implica em um carvão também mais homogêneo em suas propriedades.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho, visando determinar a variação radial e longitudinal da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* e suas respectivas correlações permitem concluir:

- A retratibilidade da madeira dos clones estudados não possuem correlação significativa com a densidade;

- O índice de heterogeneidade independe da densidade do material;

- A resistência à compressão paralela às fibras do carvão e o módulo de elasticidade do carvão vegetal aumentam no sentido base-topo e medula-casca;

- As degradações lineares e volumétricas, a exceção da linear longitudinal, aumentam no sentido base-topo;

- Quanto maior a densidade aparente do carvão vegetal, maior será a resistência à compressão paralela às fibras do carvão, módulo de elasticidade e rendimento gravimétrico;

- A correlação canônica demonstrou que a densidade da madeira é a propriedade física que possui maior correlação com as propriedades do carvão vegetal;

- O clone *C. toreliana* x *C. citriodora* apresentou as melhores características para a produção de carvão vegetal.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de janeiro: ABNT. 1997. 107 p.

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatítico ABRAF:** Ano base 2009. Brasília: ABRAF, 2010. 140p.

ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucaliptus grandis*.** 2010. 133p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ALZATE, S.B.A.; TOMAZELLO, M.; PIEDADE, S.M.S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis x urophylla.* **Scientia Forestalis,** Piracicaba, n.68, p.87-95, 2005.

ANDRADE, E.N. **O eucalipto**. 2.ed. Jundiaí: Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 667p.

ARAÚJO, H.J.B. **Agrupamento de madeiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas.** 2002. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D143-94**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelpia, USA, 1994.

BALDINI, K.B.L. **Etnoconhecimento como ferramenta para a conservação dos recursos naturais no Parque Nacional do Itatiaia.** 2008. 180p. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.Variabilidade longitudinal da madeira de *Eucalyptus grandis.* In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABCTP. 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1984. p.403-409.

BASU, P. Introduction**.** In: _____ **Biomass gasefication and pyrolisis.** New York: Elsevier, 2010. p.1-25.

BATISTA, D.C.; KLITZKE, R.J.; SANTOS, C.V.T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *eucalyptus.* **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.4, p.665-674, 2010.

BERTOLA, A. **Eucalipto:** verdades e mentiras. 2004. Disponível em: <http://www.celuloseonline.com.br>. Acesso em: 23 jul. 2011.

BLANKENHORN, P.R.; JENKINS, G.M.; KLINE, D.E. Dynamic mechanical properties and microstructure of some carbonized hardwoods. **Wood and fiber.** Lawrence. v.4, n.3, p.212-224. 1972.

BLANKENHORN, P.R.; KLINE, D.E.; BEALL, F.C. Dynamic mechanical BEHAVIOR OF Black Cherry (*Prunus seronita* Ehrh). **Carbon,** Elmsford. v.11, n.4, p.603-611, 1973.

BOTANICAL. **A Modern Herbal:** Eucalyptus. Disponível em: <http://www.botanical.com/botanical/mgmh/e/eucaly14.html>. Acesso em: 23 jun. 2011.

BOTREL, M.C.G; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. **Revista Árvore,** Viçosa, v.31, p.391-398, 2007.

BRANDÃO, A.O. **Determinação de metodologia para a identificação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1989.

BRASIL, M.A.A.; FERREIRA, M. Variação da madeira de *E. alba* Reinw, *E. saligna* Smith, *E. grandis* Hill ex Maiden aos cincos anos de idade, função do local e do espaçamento. **IPEF,** Piracicaba, n.23, 1971. p.129-149.

BRITO, J.O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados,** São Paulo, v.21, n.59, p.1-9. 2007.

BRITO, J.O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise**. 1992. 81p.Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura de "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: II. densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF,** Piracicaba, n.20, p.101-113, 1980.

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 lignna da madeira de Eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n.14, p.9-20, 1977a.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente a carbonização. **Circular técnica IPEF,** Piracicaba, n. 28, 1977b. 4p.

BRITO, J.O; GARCIA, J.N. BORTOLETTO JUNIOR.; G. PESSOA, A.M.C, SILVA, P.H.M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Cerne,** Lavras, v.12, n.2, p.182-188, 2006.

BROWN JUNIOR. M.; SAXENA, I.M. KRYSTYNA, K. Cellulose biosynthesis in higher plants. **Trends in Plant Science,** London**,** v**.**1, n. 5, p. 149-156, 1996.

BOWYER, J.L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J.G. **Forest products and wood science:** an introduction**. Iowa:** Blackwell Publishing, 2007. 558p.

BURGER, M.L.; RICTHER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo. Ed. Nobel, 1991. 151p.

CARPIM, M.A.;BARRICHELO, L.E.G. Variabilidade da densidade de madeira de *Eucalyptus* spp. In: **III Congresso latino-americano de celulose e papel.** São Paulo:ABCP, 1983. p.127-137.

CIB - CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA - CIB. **Guia do eucalipto**. CIB, 2008. 20p. Disponível em: <www.cib.org.br> . Último acesso em: 23 Jul. 2011

COSTA, V.E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *eucalyptus grandis x e. urophylla.*** 2006. 99p. Tese (Doutorado em Ciências Agronômicas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2006.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D. Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S; GÓMES, E.O. **Biomassa para energia.** Campinas: Editora Unicamp, 2008. p.93-111.

DAFF - DEPARTAMENT OF AGRICULTURE, FISHERIES AND FORESTRY. **Australian Forest Profiles:** Eucalypts. Disponível em: <http://www.daff.gov.au/brs/publications/series/forest-profiles/australian_forest_profiles_eucalypts>. Acesso em: 23 de jul. 2011.

DELMER, D.P.; AMOR, Y. Cellulose biosynthesis. **The Plant Cell,** São Carlos, v.7, n.7, p.987-100, 1995.

DOSSA, D.; SILCA, H.D.; BELLOTE, A.F.J.; RODIGHERI, H.R.. Produção e Rentabilidade do Eucaliptos em Empresas Florestais. **Comunicado Técnico Embrapa**, Colombo, n.83,4p. ,2002.

DUARTE, F.A. **Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica kraft.** 2002. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço energético anual 2011:** ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 267p.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Cellulose. In: _____. **Wood – chemistry, ultrastructure, reactions.** Berlin: Kessel Verlag, 2003a. p.67–105.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Influence of temperature. In: _____. **Wood – chemistry, ultrastructure, reactions.** Berlin: Kessel Verlag. 2003b. p.319–344.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. **IPEF,** Piracicaba, v.4, p.65-89, 1972.

FERREIRA, C.A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M.A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. em função da idade e qualidade do local. **Boletim informativo do IPEF,** Piracicaba, v.6, n.20, p.b1-b19, 1978.

FOELKEL, C.E.B. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para fabricação de papel. **Eucaluptus Online Book & Newsletter,** São Paulo, ABTCP, 2009. Disponível em: < http://www.eucalyptus.com.br >. Acesso em: 17 out. 2011.

FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de Eucalipto nas propriedades do carvão vegetal.** 2009. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

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

GIT. **Global *Eucalyptus* map 2009.** Lugo: GIT Forestry Consulting's, 2009.

GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W.R. (Org.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.27-41, 1980.

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

GREEN, D.W.; WINANDY, J.E.; KRETSCHMANN, D.E. Mechanical proprieties of Wood. In: DIETENBERGER, M.A (Ed.). **Wood Handbook Wood as an Engineering Material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. p.4-1–4-45.

HALL, D.O.; HOUSE, J.I.; SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In: ROSILLO–CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** Campinas: UNICAMP, 2005. p.25-67.

HASELEIN, C.R.; LOPES, M.C. SANTINI, E.J.; LONGHI, S.J.; ROSSO, S. FERNANDES, D.L.G.; MENEZES, L.F. Technological characteristics of wood of selected trees of *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.14, n.2, p.145-155, 2004.

HORI, H.; ELBEIN, A.D. The biosyntheis of plant cell wall polysaccharides. In: HIGUSHI, T. (Ed.). **Biosyntheis and biodegradation of wood cell components.** London: Academic Press., 1985. p.109-140

IMMERGUT, E.H. Cellulose. In: BROWNING, B.L**. The chemistry of wood.** New York: Robert E. Krieger Publishing, 1975. p.103–190.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics.** Paris: IEA, 2010. 78p.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Biomass for power generation and CHP. In: **_____ Energy technology essentials.** Paria: IEA, 2007. p.4.

JEFFERS, J.N. Two case studies in the application of principal component analysis. **Applied Statistics**, London, v.16, p. 225-236, 1967.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology**: Solid wood. New York : Springer Verlag, 1968. v.1 592p.

LE VAN, S.L. Thermal Degradation. In: ARNO, P. (Ed.). **Concise Encyclopedia of wood & wood based material**P. New York : Pergamon Press, 1989. p.271-273.

LEMOS, A.L.F.; GRACIA, R.A.; LOPES, J.O.; CARVALHO, A.M.; LATORRACA, J.V. F. Madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill ; L.A.S. Johnson sob Aspectos Físicos e Anatômicos como Fatores Qualitativos. **Floresta e ambiente,** Rio de Janeiro, v**.**19, n.1, p.1-8, 2012

LEPAGE, E.S.; OLIVEIRA, A.M.F.; LELIS, A.T.; LOPEZ, G.A.C.; CHIMELLO, J.P.; OLIVEIRA, L.C.S.; CAÑEDO, M.D.; CAVALCANTE, M.S.; IELO, P.K.Y.; ZANOTTO, P.A. MILANO, S. **Manual de preservação de madeiras.** 2ed. São Paulo: IPT, 1986. 708p.

LIMA, J.T.; ROSADO, S.C.S.; OLIVEIRA, A.D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis, Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. **Ciência e Prática,** Lavras, v.16, n.1, p.123-127, 1992.

LOPES, E.F. Produção de eucalipto e a problemática que a monocultura da espécie tem provocado no Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS DA UNAERP**,** 7., 2009, Guarujá. **Anais...** Guarujá: UNAERP, 2009.

LOPES, J.L. **Qualidade de mudas clonais do híbrido de *Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla*, submetidas a diferentes regimes hídricos**. 2008. 181p. Tese (Doutorado em Ciencias Agronomicas) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",, Botucatu, 2008.

LORENZI, H.; SOUZA, H.M.; TORRES, M.A.V.; BACHER, L.B. **Árvores Exóticas no Brasil**: madeiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Platarum, 2003. 352p.

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. Pirólise e torrefação da biomassa. In CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S; GÓMES, E.O. **Biomassa para energia.** Campinas: Editora Unicamp, 2008. p.340-418.

LV, G.; WU, S.; LOU, R. Kinect study of the thermal decomposition of hemicellulose isolated from corn stalk. **BioResources.**, Raleigh, v.2, n.5, . p.1281-1291.2010

MAGALHÃES, J.R. A energia que vem da floresta. In: MELLO, M. G. (Org.)**. Biomassa:** Energia que vem dos trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte: Labmidia, 2001. p.145-161.

MAGALHÃES, J.R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: PENEDO, W.R. (Org.). **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982. p.56-66.

MALAN, F.S. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. p.1-19.

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada.** Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. PENEDO, W.R (Ed.). In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.9-26, 1980. p.9-26.

MELO, J.E.; CORADIN, V.T.R; MENDES, J.C. Classes de densidades para madeiras amazônicas. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1990. v.3 p.695–699.

MIGLIORINI, A.J.; BARRICHELO, L.E.G.; KAGEYAMA, P.Y.; CAMARGO, F.R.A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes níveis de floresta. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 21., 1988, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1988. p.17-23.

MOLTON, P.M.; DEMMLTT, T.F. **Reaction mechanisms in cellulose pyrolysis:** a literature review. Richland, WA: Batteile Paclflc Northwest Laboratories, 1977. 90p. (Report No. BNWL-2297)

MORA, A.L.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil.** São Paulo: SBS, 2000. 112p.

MOUTINHO, V.H.P. **Caracterização das madeiras conhecidas na Amazônia brasileira como matá-matá (lecythidaceae fam. A. Rich.).** 2008. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

OLIVEIRA, E. **Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden).** 1988. 47p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

OLIVEIRA, J.T.S.; SILVA, J.C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, J.B.; FILHO, A.V.; MENDES, M.G. GOMES, P.A. Produção de carvão vegetal – aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R. (Org.). **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p.27-41.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, J.W.; FILHO, M.T. Caracterização da Madeira de Sete Espécies de Eucaliptos para a construção civil: 1- Avaliações dendometricas das Árvores. **Scientia Forestalis,** Piracicaba,n. 56, p.113-124, 1999.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore,** Viçosa, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO, M.; FIEDLER, N.C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore, Viçosa,** v.34, n.5, p.929-936, 2010.

PANSHIN, A. J.; de ZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 4th ed. New York: Mc Graw Hill, 1980. 722p.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970. 705 p.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C.; BROWN; H. P. **Textbook of wood technology.** Structure, identification. uses and properties of the commercial woods of the United States. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book, 1964. v.2.

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.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p.

PRYOR, L.D. **Biology of Eucaliptos.** Canberra: Edward Arnold, 1976. 78p.

QUEIROZ, L.R. de S.; BARRICHELO, L.E.G. **A celulose** de **eucalipto**; uma **oportunidade brasileira**. Vinhedo – RS: Editora Avisbrasilis. 2008. 149p

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: Editora IBAMA, 2002. 14p.

RIBEIRO, F.A.; ZANI, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, Piracicaba, n.46, p.76-85, 1993.

ROCHA, M.P. ***Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden e *Eucapyptus dunii* Maiden como fontes de matéria prima para serraria**. 2000. 186p. Tese (Doutorado em ciências florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROSADO, S.C.S.; BRUNE, A.; LUCIA, R.M.D. Estimativa de correlação entre indivíduos, em diferentes idades, para o caráter densidade básica da madeira. **Revista Árvore**,Viçosa, v.7, n.1, p.23-29, 1983.

ROWELL, R.M; LeVAN-GREEN. Thermal proprieties. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.** Boca Raton: CRC Press, 2005. p.122–138.

ROWELL, R.M; PETTERSEN, R.; HAN, J.D.; ROWELL, J.S.; TSHABALALA, M.A. Chemistry of cell wall. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.** Boca Raton: CRC Press, 2005. p.37–74.

SANTIAGO, A.R.; ANDRADE, A.M. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de Eucalipto. **Ciência Florestal,** Santa Maria, v.15, n.1, p.1-7. 2010.

SAXENA, I.M.; JR. M.B. Cellulose biosynthesis: Current views and envolving concepts. **Annals of Botany,** Oxford, v.96, n.1, p. 9-21, 2005.

SETTE JUNIOR. C.R. **Aplicação de postássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** 2010. 153p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SETTE JUNIOR, C.R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C.T.S; CHAGAS, M.P.; LACLAU, J.P. Efeito de postássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden aos 24 meses de idade. **Revista Floresta,** Curitiba, v.39, n.3, p. 535-546, 2009.

SERPA, P.N.; VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M.; PIMENTA, A.S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis,Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore,** Viçosa**, v**.27, n.5, p.723-733, 2003.

SEVERO, E.T.D.; CALONEGO, F.W.; SANSÍGOLO, C.A. Composição química da madeira de *Eucalyptus citriodora* em função das direcções estruturais. **Silva Lusitana,** Lisboa, v.14, n.1, p.113-126, 2006.

SHAFIZADEH, F. The chemistry of pyrolysis and combustion. In: ROWELL, R. (Ed.). **The chemistry of solid wood**. Washington: American Chemical Society, 1983. p.489-530.

SHAFIZADEH, V.; DEGROOT, W.F. Combustion characteristics of cellulosics fuels. In: SHAFIZADEH, V.; SARKANEN, K.V.; TILLMAN, D.A. **Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins.** New York: Academic Press, 1976. p.1-17

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Influência anatômica e química sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p.23-35.

SIAU, J.F. **Transport processes in wood.** New York: Springer-Verlag, 1984. 245p.

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S.; XAVIER, B.A. e CASTRO, V.R. Variação da retrabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Revista Árvore,** Viçosa, v.30, n.5, p.803-810, 2006.

SILVA, M.G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada.** 2011. 95p**.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SIMPSON, W.; TENWOLD, A. Physical Properties and Moisture Relations of Wood. In: DIETENBERGER, M. A (Ed.). **Wood Handbook Wood as an Engineering Material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. p.3-1;3-25.

SKAAR, C. **Wood-Water Relations**. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 283p.

SKAAR, C. Wood water relationships. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **The chemistry of solid wood.** Washington: American Chemistry Society, 1984. p. 127-172.

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

SBS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos de números do Brasil florestal.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2008. 92p

SOUZA, V.R.; CARPIM, M.A.; BARICHELO, L.E.G. Densidade básica entre procedências, classes de ciâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna.* **IPEF,** Piracicaba, n.33, p.65-72, 1986.

SOUZA, M. H.; MAGLIANO, M. M.; CAMARGOS, J. A. A.; SOUZA, M. R. **Madeiras tropicais brasileiras**. 2ª Edição. Brasília, DF: IBAMA, 2002. 152 p

STAMM, A.J. **Wood and cellulosic science.** New York: Rolland, 1964. 549p.

STAMM, A.J.; HANSEN, L.A. The bonding force of cellulosic materials for water (from specific volume and thermal data). **Journal of Physical Chemistry,** New York**,** v.41, p.1007-1016, 1937.

STURION, J.A.; PEREIRA, J.C.D.; ALBINO, J.C.; MORITA, M. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.14, p.28-38, 1987.

STURION, J.A.; PEREIRA, J.C.D.; CHEMIN, M.S. Qualidade da madeira de *eucalyptus vimanalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.16, p.55-59, 1988.

SUZANO. **Eucaliptocultura e preservação ambiental**. 2006. Disponível em:<http://www.suzano.com.br/portal/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=402880911A6E3FC5011A6E8B0D06232F>. Acesso em: 23 jul. 2011.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T. MORI, F.A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna.* **Cerne,** Lavras, v.9, n.1, p.66-80, 2003.

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

TRUGILHO, P.F.; SILVA, D.A.; FRAZÃO, F.J.L.; MATOS, J.L.M. de. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. **Acta Amazonica,** Manaus, v.20, n.4, p.307-319, 1990.

TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R. MORI, F.A.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M.; MENDES, L.F. de B. 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, 2005.

TRUGILHO, P.F.; VITAL, B.R.; REGAZZI, A.J.; GOMIDE, J.L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore,** Viçosa, v.21, n.2, p.259-267, 1997.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood:** structure, properties and utilization. New York: Van Nastrnd Reinold, 1991. 494p.

TSOUMIS, G. Chemical composion and ultrastructure of wood. In: _____ **Wood as raw material.** London: Pergamon Press, 1969. p.60-94.

TSOUMIS, G. **Wood as raw material**: Source, structure, chemical composition, growth, degradation, and identification. Oxford: Pergamon Press, 1968. 276p.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla.*** 2006. 135p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

VALE, A.T.; NOGUEIRA, M. Carbonização de madeiras do cerrado e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v.25, n.2, p.271-276, 2001.

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

VELLA, M.M.C.F.; VALENTE, O.F.; VITAL, B.R.; LELLES, J.G. de. Influência da velocidade de carbonização da madeira. **IPEF**, Piracicaba, n.41/42, p.64-76, 1989.

VIEIRA. R.S. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão produzidos entre 350ºC e 900ºC.** 2011. 80p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

VITAL, B.R. Método de determinação da densidade da madeira. **Boletim Técnico Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, v.1, p.1-21, 1984.

VITAL, B.R.; TRUGILHO, P.F. Variação dimensional e uso da madeira de *Eucalyptus*. **Informe Agropecuário**, Cidade Nova, v.18, n.186, p.57-61, 1997.

VITAL, B.R.; ANDRADE, A.M.; VALENTE, O.F.; CAMPOS, J.C.C. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF,** Piracicaba, n.41/42, p.44–49, 1989.

VITAL, B.R.; JESUS, R.M.; VALENTE, O.F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v.10, n.2, p.151-160, 1986

WHITE, R.H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. **Wood fiber an science,** Madison, v.19, n.4, p.446-452, 1987.

ANEXOS – Relatórios dos ensaios mecânicos realizados

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **27/01/2012** Hora: **09:45:55** Trabalho nº **0353**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **27/01/2012** Hora: **13:18:19** Trabalho nº **0354**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **27/01/2012** Hora: **16:22:57** Trabalho nº **0355**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **27/01/2012** Hora: **17:56:20** Trabalho nº **0356**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **27/01/2012** Hora: **19:45:46** Trabalho nº **0357**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **27/01/2012** Hora: **21:53:36** Trabalho nº **0358**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **09/02/2012** Hora: **17:05:46** Trabalho n° **0411**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **10/02/2012** Hora: **09:21:24** Trabalho nº **0412**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **28/01/2012** Hora: **16:46:30** Trabalho nº **0361**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **28/01/2012** Hora: **19:04:49** Trabalho nº **0363**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **28/01/2012** Hora: **11:58:24** Trabalho nº **0359**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **28/01/2012** Hora: **14:32:49** Trabalho nº **0360**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **29/01/2012** Hora: **12:06:00** Trabalho nº **0364**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **29/01/2012** Hora: **14:33:01** Trabalho nº **0365**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **29/01/2012** Hora: **18:04:09** Trabalho nº **0366**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **29/01/2012** Hora: **20:03:48** Trabalho nº **0367**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **08:40:02** Trabalho nº **0368**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **11:25:01** Trabalho nº **0369**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **22:59:32** Trabalho nº **0374**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2012** Hora: **08:59:37** Trabalho nº **0375**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **17:46:36** Trabalho nº **0372**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **19:20:26** Trabalho nº **0373**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **14:27:53** Trabalho nº **0370**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **30/01/2012** Hora: **16:07:14** Trabalho nº **0371**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2012** Hora: **13:47:59** Trabalho nº **0376**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2012** Hora: **17:08:03** Trabalho nº **0377**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **01/02/2012** Hora: **10:20:41** Trabalho nº **0378**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **01/02/2012** Hora: **15:43:45** Trabalho nº **0379**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **02/02/2012** Hora: **08:11:40** Trabalho nº **0380**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **02/02/2012** Hora: **10:18:49** Trabalho nº **0381**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **04/02/2012** Hora: **11:38:11** Trabalho nº **0386**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **04/02/2012** Hora: **14:34:12** Trabalho nº **0387**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **03/02/2012** Hora: **20:48:51** Trabalho nº **0384**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **04/02/2012** Hora: **09:32:10** Trabalho n° **0385**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **03/02/2012** Hora: **12:25:43** Trabalho nº **0382**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **03/02/2012** Hora: **16:03:11** Trabalho nº **0383**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **05/02/2012** Hora: **17:19:10** Trabalho nº **0394**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **05/02/2012** Hora: **21:25:43** Trabalho nº **0395**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **05/02/2012** Hora: **12:19:37** Trabalho nº **0392**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **05/02/2012** Hora: **14:42:54** Trabalho nº **0393**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **04/02/2012** Hora: **18:14:29** Trabalho nº **0389**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **04/02/2012** Hora: **20:14:21** Trabalho nº **0390**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **09/02/2012** Hora: **08:18:16** Trabalho nº **0409**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **09/02/2012** Hora: **13:45:03** Trabalho nº **0410**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **08/02/2012** Hora: **09:49:15** Trabalho nº **0407**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **08/02/2012** Hora: **15:57:37** Trabalho nº **0408**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **07/02/2012** Hora: **16:00:03** Trabalho nº **0405**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **07/02/2012** Hora: **18:20:52** Trabalho nº **0406**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **07/02/2012** Hora: **10:13:54** Trabalho nº **0403**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **07/02/2012** Hora: **12:57:30** Trabalho nº **0404**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **06/02/2012** Hora: **08:42:22** Trabalho nº **0396**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **06/02/2012** Hora: **10:45:00** Trabalho nº **0397**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **06/02/2012** Hora: **12:48:54** Trabalho nº **0398**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **06/02/2012** Hora: **14:46:51** Trabalho nº **0399**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>

FCA-UNESP

Laboratório de Ensaio de Materiais

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **06/02/2012** Hora: **16:56:52** Trabalho nº **0400**

Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Carvão - ensaio final - ESALQ**

Ident. Amostra: >>>>