



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia (FT)

Departamento de Engenharia Florestal (EFL)

USO DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA EM VIGOTAS DE ANGELIM VERMELHO

(Dinizia excelsa Ducke)

Caio Felipe Araújo Morais De Almeida

07/30734

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Trabalho final de graduação submetido ao departamento
de Engenharia Florestal da Faculdade de Tecnologia
para a obtenção do grau de Engenheiro Florestal.

Brasília – Dezembro – 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**USO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS EM VIGOTAS
DE ANGELIM VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke)**

CAIO FELIPE ARAÚJO MORAIS DE ALMEIDA

07/30734

**TRABALHO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE BRASÍLIA, COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO FLORESTAL.**

Aprovado por:

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi – EFL/UnB

Avaliador Interno: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale – EFL/UnB

Avaliador Externo: Prof. MSc. Ricardo Faustino Teles - IFB

AGRADECIMENTOS

- Antes de tudo é fundamental agradecer a Deus, pode parecer um clichê, mas não é.
- Gostaria de agradecer aos meus familiares, em especial minha mãe, Jaci de Araújo Morais, meu ‘pai’, Sérgio Corrêa Gama, e meus irmãos, Gustavo de Araújo Morais Gama e Deborah de Araújo Morais Gama, pela simples presença todos os dias durante essa graduação, sou eternamente grato.
- Ao professor e orientador, Dr. Cláudio Henrique Del Menezzi, por acreditar em mim, mesmo buscando uma ‘idéia’ de pré projeto no penúltimo semestre, foi pouco tempo, mas pude contar com confiança, empenho e atenção sempre.
- Aos amigos Thyago Carvalho, Rafael Costa, Alexandre Dídimo, Gustavo Shiba e Romero Gomes por me ajudarem bastante nos ensaios das vigotas, sem vocês eu estaria com algum problema de coluna, certamente.
- Acho que devo agradecer aos meus ídolos também, trilha sonora de tantas horas ‘monografando’, um agradecimento especial ao Zakk Wylde, Andy Timmons, Joe Satriani, John Petrucci, Steve Vai, Paul Gilbert, Philip Sayce, Scott Henderson e Stevie Ray Vaughan (*in memoriam*).
- Falando em ídolos, gostaria de agradecer também ao meu amigo, Rafa Dornelles, que sempre soube me aconselhar como ‘relaxar tocando um blues’ sempre que a ‘energia estava baixa’, muito obrigado!
- À Universidade de Brasília, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal, professores, funcionários e pessoas envolvidas em todos esses anos especiais, tenho a certeza que estão felizes em ‘se livrar’ de mim.
- Por último e não menos importante, ao meu pai, Roberto Alves de Almeida (*in memoriam*). Tenho a certeza de que está comigo, agora e sempre.

Aos meus pais,

Jaci de Araújo Moraes

Roberto Alves de Almeida

Sérgio Corrêa Gama

Dedico

“Nada é verdadeiro, tudo é permitido...”

(Ezio Auditore)

RESUMO

USO DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA EM VIGOTAS DE ANGELIM VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke)

Autor: Caio Felipe Araújo Morais de Almeida

Orientador: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Brasília, Dezembro de 2011.

Este trabalho buscou comparar a precisão dos métodos não destrutivos vibração transversal e ultrassom diante do ensaio estático, considerado o mais preciso por se aproximar de ensaios laboratoriais. A partir dos módulos de elasticidade: estático (E_m), da vibração transversal (E_{dvt}) e ultrassom (C_{LL}), além das flechas atuantes (δ), frequências naturais de vibração (f_r), densidade aparente (ρ) e velocidade de propagação da onda (V_{LL}), a partir de cinquenta vigotas de *Dinizia excelsa* Ducke em uma madeira no Distrito Federal, foram utilizadas para obtenção de regressões lineares e estatística descritiva. A análise destes dados permitiu verificar que o E_{dvt} se apresentou mais preciso que o C_{LL} , provável que por causa das condições de armazenamento e a época do ano em que foram realizados os ensaios, em condição de umidade elevada. O método de vibração transversal é o mais recomendado para o uso em *Dinizia excelsa* Ducke, sendo observados também bons resultados de rigidez para a espécie estudada.

Palavras chave: Análise não destrutiva, ultrassom, vibração transversal, módulo de elasticidade, *Dinizia excelsa* Ducke.

ABSTRACT

USE OF NDT IN BEAMS OF ‘RED ANGELIM’ (*Dinizia excelsa* Ducke)

Autor: Caio Felipe Araújo Morais de Almeida

Orientador: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Brasília, December of 2011.

This work reached to compare the precision of the non-destructive testing transverse vibration and ultrasound with the static test, considered the most accurate for being closer to lab tests. From the modulus of elasticity: static (E_m), transverse vibration (E_{dvt}) and ultrasound (C_{LL}), plus the deflection (δ), frequencies of vibration (f_T), specific gravity (ρ) and speed of propagation (V_{LL}) obtained with the testing of fifty beams of *Dinizia excelsa* Ducke on a lumber yard in Distrito Federal, were generated linear regressions and descriptive statistics. The analysis of these data allowed the conclusion that the E_{dvt} has shown more precise than the C_{LL} , probably because of the storage conditions of the beams and the period of the year when the tests occurred, a wet and rainy period. The transversal vibration method is the most recommended for *Dinizia excelsa* Ducke on lumber yards, and good stiffness results were also observed on the studied species.

Keywords: Non-destructive testing, ultrasound, transverse vibration, modulus of elasticity, *Dinizia excelsa* Ducke.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. VALORES OBTIDOS PELA LITERATURA	7
3.2. ANGELIM VERMELHO (<i>Dinizia excelsa</i> Ducke)	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	10
4.1. MATERIAL LENHOSO	10
4.2. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA	10
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5.1. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA	15
5.2. RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS E VARIÁVEIS	18
6. CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
APÊNDICE	27
A. DADOS	28
B. ANÁLISE ESTATÍSTICA	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas (IBAMA,1997).	9
Tabela 2 – Estatística descritiva dos módulos de elasticidade não destrutivos e parâmetros físicos. (N=50 vigotas)	15
Tabela 3 - Correlação de Pearson (r) entre as variáveis da avaliação não destrutiva, (*) significativa a 5%, (**) significativa a 1% ou não significativa (^{ns}).	16
Tabela 4 – Dados das vigotas analisadas pelos métodos não destrutivos.	28
Tabela 5 – Análise de regressão entre E_m e E_{dvt}	30
Tabela 6 – Análise de regressão entre E_m e C_{LL}	31
Tabela 7 – Análise de regressão entre E_m e δ	31
Tabela 8 – Análise de regressão entre E_m e V_{LL}	31
Tabela 9 – Análise de regressão entre E_m e fr	32
Tabela 10 – Análise de regressão entre E_m e ρ	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Árvore e corte tangencial de <i>Dinizia excelsa</i> Ducke.....	8
Figura 2 – Aparelho Metriguard E-Computer.....	11
Figura 3 – Aparelho de ultrassom Uslab.....	12
Figura 4 – Relógio comparador em uso durante a avaliação pelo método estático.....	13
Figura 5 – Número de vigotas e frequência acumulada por classe de rigidez, conforme os métodos não destrutivos: ensaio estático, vibração transversal e ultrassom, respectivamente. ..	17
Figura 6 – Análise de regressão para $E_m \times E_{dvt}$, significativa a 1% e R^2 de 0,72.	19
Figura 7 – Análise de regressão para $E_m \times C_{LL}$, significativa a 1% e R^2 de 0,72.	19
Figura 8 – Análise de regressão para $E_m \times \delta$ e $E_m \times V_{LL}$, ambas significativas a 1% e R^2 de 0,48 e 0,37, respectivamente. Observa-se uma dispersão mais uniforme em $E_m \times V_{LL}$, enquanto em $E_m \times \delta$ os valores dispersam mais quando δ abaixo de 0,8.....	21
Figura 9 – Análise de regressão para $E_m \times fr$ e $E_m \times \rho$, significativas a 5% de probabilidade e R^2 de 0,09 e 0,08, respectivamente. A dispersão dos dados é mais uniforme em $E_m \times fr$, enquanto em $E_m \times \rho$ há uma concentração dos dados entre $0,95 < \rho < 1,00$, faixa de densidade comum a espécie estudada.	22

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ρ – densidade aparente

C_{LL} – constante dinâmica na direção longitudinal do material

E_{dvt} – módulo de elasticidade pela vibração transversal

E_m – módulo de elasticidade pelo método estático

f_r – frequência natural de vibração

g – aceleração da gravidade

I – momento de inércia

L – vão livre

PA – peso da amostra

P – carga aplicada

V_{LL} – velocidade de propagação da onda ultrassônica no sentido longitudinal

δ – flecha aplicada

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a madeira serrada ainda é o principal produto de madeira empregado na construção civil, enquanto que em países desenvolvidos os painéis têm participação significativa, sendo que em pesquisas feitas junto a empresas da construção civil se constata que a qualidade das peças de madeira é um dos principais problemas enfrentados no suprimento de madeira serrada.

Visando atender ao rascunho da proposta de revisão da norma NBR 7190 (2010), específica para o cálculo de estruturas de madeira, os lotes de madeira podem ser vendidos já classificados quanto à sua qualidade e propriedades mecânicas. Porém esta é uma prática inexistente no Brasil, o que pode acarretar no desperdício de madeira, uma vez que peças superdimensionadas estão sendo utilizadas diariamente para as mais diversas finalidades.

O simples fato de classificar os lotes direto nas madeiras permite o uso de um coeficiente de modificação, segundo a NBR 7190 (1997), que possui valor máximo de 1 conferido a peças de primeira categoria e de 0,8 para peças de segunda categoria ou coníferas (K_{mod3}). Desta maneira os valores de resistências de cálculos são superiores, sendo calculadas estruturas que demandem menor quantidade de madeira, porém com a mesma segurança de cálculo.

Tal rascunho que está sob avaliação prevê novos valores de K_{mod3} para madeiras classificadas que são, em sua grande maioria, superiores, demonstrando a confiabilidade dos métodos de classificação de madeira, principalmente os métodos não destrutivos, cujos valores de K_{mod3} estarão bem próximos da madeira classificada por métodos mecânicos.

Assim, os métodos de classificação não destrutiva podem agregar valor ao produto de maneira simples e rápida, além de fornecer maior segurança no uso das peças de madeira em estruturas. Uma maneira de facilitar a classificação das peças em

uma madeireira ou um pátio de serraria é a partir do uso de equações ajustadas com base nas espécies de interesse e as condições de armazenamento. Porém, para isso, são necessárias equações e modelos precisos para repassar ao consumidor final um produto de qualidade e resistência conhecida, para que o uso racional da madeira sólida seja realizado de vez no país e as normas na construção de estruturas de madeira possam ser aplicadas, conforme o rascunho que logo estará em vigor.

Segundo TARGA et al. (2005), as primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que detenham a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns países como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também já se destacam nesse cenário.

CANDIAN (2007) comenta que há um atraso no Brasil em relação à tecnologia empregada para a classificação de madeira, que deixa de ser realizada, na maioria das vezes, por falta de procedimentos corretos. Já NOGUEIRA (2007) diz que o Brasil não pratica a classificação dos materiais à base de madeira, em geral. Frisa que tal afirmação é particularmente verdadeira para o caso da madeira serrada. Em outros segmentos de mercado, em que o país ocupa posição de destaque como fornecedor internacional, tem-se visto forçado a estabelecer padrões mínimos de qualidade e a atingir marcas de conformidade, para continuidade dos fornecimentos.

OBJETIVO GERAL

Comparar os métodos não destrutivos, vibração transversal e ultrassom, na análise de um lote de vigotas de *Dinizia excelsa* Ducke diretamente no pátio, prontas para a comercialização.

2. HIPÓTESE

O uso de técnicas não destrutivas é confiável na classificação de lotes de madeiras estruturais, existindo um método capaz de explicar a variação do módulo de elasticidade (E_m) em madeiras estruturais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desempenho da madeira é um fator relativo, seja para a fabricação de compensados, na produção de celulose e papel, ou após desdobro em serrarias; a madeira é julgada pela sua qualidade em função do uso a que foi destinada. A qualidade por sua vez é avaliada por parâmetros como densidade, comprimento de fibra, ângulo das fibrilas, que afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira (JANKOWSKY, 1979). Assim, não existe madeira que possa ser considerada inútil, apenas é necessário adequar seu desempenho a uma finalidade compatível.

A ocorrência de defeitos em madeira compromete o seu uso como matéria prima nas suas diversas aplicações e finalidades. Os vários tipos de defeitos podem ter origem natural ou surgir tanto no tratamento e manejo silvicultural quanto nos processos de corte, secagem e usinagem, seja por negligência, descuido, ou até deficiência tecnológica. Alguns defeitos, como encanoamento, encurvamento, colapso, rachaduras superficiais e rachaduras de topo, são visíveis do exterior, sendo a separação de peças com tais defeitos simples. Outros tipos, no entanto, ocorrem no interior da árvore ou da peça de madeira e podem ser visualizados apenas com o uso de técnicas não destrutivas (QUOIRIN, 2004).

Em relação às propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais, atualmente as principais pesquisas em desenvolvimento na área da madeira e os principais documentos normativos nacionais e internacionais utilizam valores de resistência, determinados por meio de ensaios em corpos de prova de pequenas dimensões, caracterizando a análise destrutiva. Tais avaliações, apesar de serem de execução mais simples e de exigirem um recurso financeiro menor, principalmente em relação a equipamento de ensaio e material, não retratam a realidade das propriedades mecânicas do material conforme FIORELLI et al. (2009). Pelo fato de não retratarem a realidade é exercida uma margem de segurança, visando obter valores que após correção possam ser utilizados no cálculo de estruturas de madeira sem que haja preocupação com a resistência das mesmas.

Carrasco et al. (2008) fizeram uma discussão sobre a quantidade de normas e procuram definir valores sobre a incerteza nas medições durante os ensaios, visto que madeira é um material heterogêneo com variações tanto em função de sua genética quanto ao sítio em que se encontra, assim é difícil atribuir valores e caracterizar com certeza uma madeira com base em valores de ensaios.

Tal heterogeneidade faz com que a madeira apresente grande variabilidade de suas propriedades, penalizando-a quando submetida à competição com outros materiais estruturais que possuem propriedades mecânicas mais uniformes, como aço ou concreto. Desta maneira, a classificação da madeira através do conhecimento das características de cada peça a ser usada, empregando-se testes não destrutivos, pode ser útil para reverter esta situação. Peças de qualidade superior poderiam ser escolhidas para uso crítico, enquanto as de baixa qualidade poderiam ser usadas em pontos menos exigentes quanto a resistência e rigidez das peças. Assim, a avaliação não destrutiva de materiais é, a ciência que identifica propriedades físicas ou mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar sua capacidade de uso (CALIL JÚNIOR & MINÁ, 2003).

Diversos métodos podem ser empregados na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira, e muitos outros continuam sendo estudados e/ou descobertos. A avaliação não destrutiva tornou-se, nos últimos anos, uma importante ferramenta na inferência de propriedades físicas e mecânicas da madeira, devido, principalmente, ao relativo baixo custo dos equipamentos, rapidez e praticidade dos testes. A técnica do ultrassom, por exemplo, permite maior controle das fontes emissoras de pulsos, sobretudo no que diz respeito às frequências das emissões. Além disso, parece ser mais promissora, na medida em que a extensão à indústria - objetivo maior de um trabalho científico-investigativo - se daria de forma mais imediata e direta, conforme mostram os exemplos internacionais (BALLARIN et al., 2005).

O ultrassom é uma técnica que se baseia no princípio de aplicação de ondas inaudíveis pelo homem (acima de 20 kHz, aproximadamente), em madeiras para a determinação de suas constantes elásticas. Assim, a onda ultrassônica é emitida em determinada direção e ao encontrar um obstáculo à sua livre propagação, é refletida por ele, voltando ao aparelho emissor, ou então percorre o material e é captada por um

receptor. Conhecendo-se a velocidade e propagação e a densidade do material é possível calcular sua constante elástica (DEL MENEZZI et al., 2010).

Porém há outras técnicas não destrutivas que podemos considerar concorrentes do ultrassom. Uma delas é a vibração transversal e TARGA et al.(2005) abordam esta como uma técnica que tem se destacado entre as empregadas em testes não destrutivos, sobretudo pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático teórico. Além disso, a dificuldade de mensuração das altas frequências observadas em outros métodos não destrutivos faz com que o método da ressonância se torne ainda mais interessante.

Outro método não destrutivo que se baseia na propagação de ondas acústicas é o de ondas de tensão (*stress wave*), cujo princípio se baseia na mensuração do tempo de passagem de uma onda entre sua fonte geradora da tensão (pêndulo) e a receptora da onda (DEL MENEZZI et al., 2007), por se basear em velocidade de propagação e densidade do material, este método se assemelha ao princípio do ultrassom.

Há ainda o uso de raio x na análise de defeitos não visíveis superficialmente e também a vibração longitudinal, que tem sido utilizada no exterior na avaliação de madeira em pé inclusive, mas uma técnica não destrutiva que possui uma precisão mais próxima dos ensaios destrutivos laboratoriais é o ensaio de flexão estática segundo a ASTM D 4761. Tal ensaio permite avaliar o módulo de elasticidade de uma peça de madeira a partir de um objeto cuja carga seja conhecida e a obtenção da flecha que tal carga proporciona à peça de madeira.

Segundo MINÁ et al. (2004), o comportamento elástico da madeira é avaliado por meio de doze constantes, sendo nove delas independentes: três módulos de Young, três módulos de elasticidade transversais e seis coeficientes de Poisson. O módulo de Young é o principal parâmetro elástico, sendo que apresenta maior número de trabalhos científicos desenvolvidos a seu respeito.

3.1. VALORES OBTIDOS PELA LITERATURA

MINÁ (2004) ainda montou um quadro com o resumo de pesquisas que correlacionaram módulos obtidos em flexão estática e ultrassom. Tal quadro demonstra coeficientes de determinação/correlação obtidos por diferentes autores com diferentes espécies entre 1999 e 2003, e é notável que a aplicação do ultrassom é satisfatória em alguns casos, uma vez que os valores oscilaram bastante, um exemplo são valores de R^2 que chegaram a 0,89 e outro que ficou em 0,14.

CANDIAN (2007) verificou coeficientes de determinação $R^2 = 0,65$, $R^2 = 0,76$, $R^2 = 0,66$ e $R^2 = 0,88$, para *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*, respectivamente. Tais valores correlacionaram os módulos de elasticidade do ultrassom (C_{LL}) com os resultados do ensaio estático (E_m). Já para a vibração transversal (E_{dvt}) os valores foram: $R^2 = 0,75$, $R^2 = 0,80$, $R^2 = 0,93$ e $R^2 = 0,89$, tais valores foram maiores que os obtidos pelo ultrassom.

Ainda de acordo com a autora, os valores de R^2 encontrados na literatura, para o ultrassom, estão entre 0,57 e 0,89. Já para a vibração transversal, os valores de R^2 oscilam entre 0,53 e 0,99.

DEL MENEZZI et al. (2010) encontraram valores de R^2 mais baixos com o uso de ondas de tensão (*stress wave*) e avaliação destrutiva, flexão estática segundo a ASTM D143-94, nas madeiras amazônicas: Pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum* (Engl)) e Freijó (*Cordia goeldiana* Huber). Os valores de R^2 foram de 0,53 para o Pau-marfim, e de 0,43 para o Freijó.

GONÇALEZ et al. (2001) fizeram uso do ultrassom em espécies tropicais também, comparando seu módulo de elasticidade com o módulos estático obtido a partir de ensaio de flexão estática, encontrando valores de R^2 de 0,84, 0,67, 0,71 e 0,68 para *Vataireopsis speciosa* (Fava Amargosa), *Cariniana micrantha* (Jequitibá Rosa), *Rauwolfia paraensis* (Peroba d'Água) e *Aspidosperma macrocarpum* (Peroba Mico).

Já PIRES et al. (2011) analisaram um lote misto com oito espécies de madeiras tropicais com ultrassom, vibração transversal e *stress wave*, obtendo valores de R² de 0,66 para ultrassom, 0,54 para vibração transversal e 0,66 para *stress wave*.

3.2. ANGELIM VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke)

Dinizia excelsa Ducke, também conhecida popularmente como Angelim Vermelho no Pará e Angelim Pedra em Manaus, possui posição taxonômica incerta, sendo incluída na tribo *Mimosae*, subfamília *Mimosoideae*, família Leguminosae. Possui ocorrência na região amazônica, em especial nos estados do Amazonas, Pará, Rondônia, Amapá, Acre e Roraima (EMBRAPA, 2004).

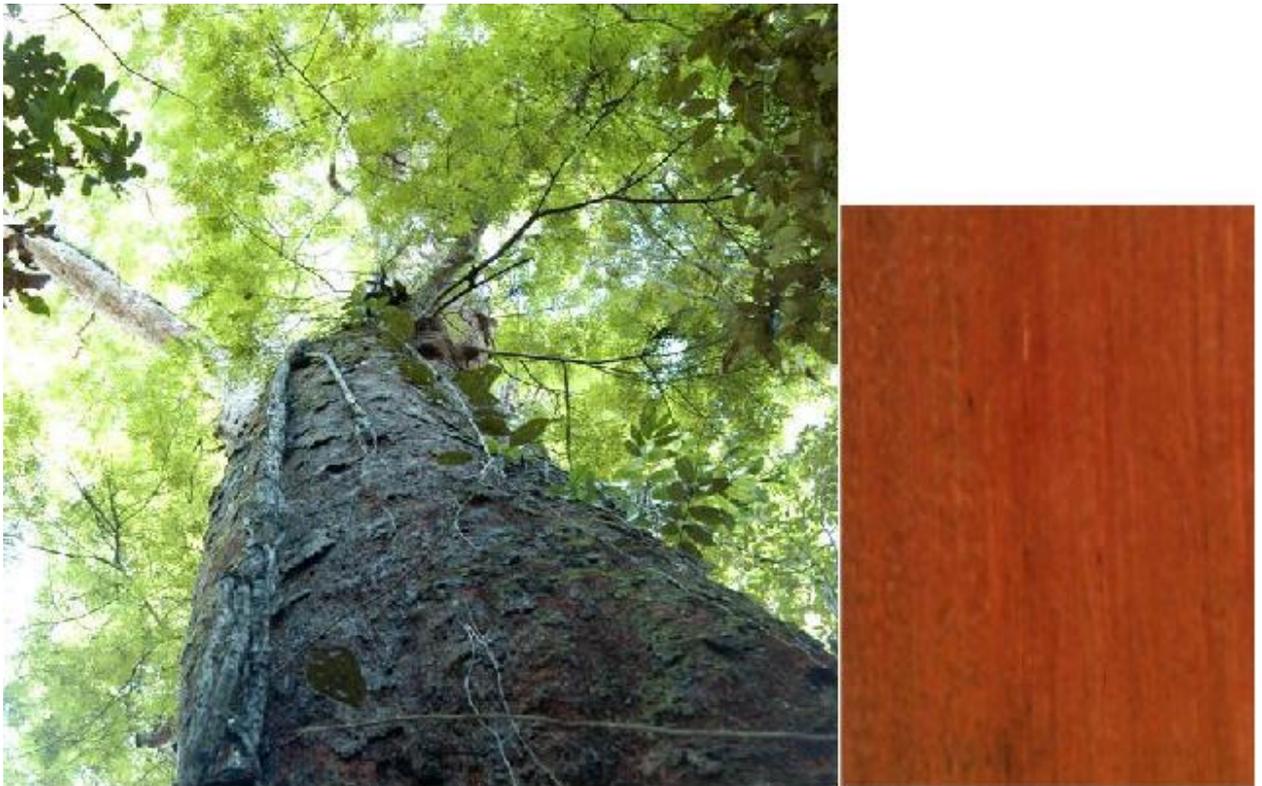


Figura 1 - Árvore e corte tangencial de *Dinizia excelsa* Ducke.

Dinizia excelsa Ducke possui cerne marrom avermelhado, claro; alburno cinza-avermelhado; brilho moderado; cheiro desagradável e fraco; muito pesada (0,95- 1,00 g/cm³), trabalhabilidade difícil porém, com acabamento excelente; grã revessa; textura média; resistente em contato com o solo (IBAMA, 1997).

Abaixo segue a Tabela 1 com as propriedades mecânicas do Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas (IBAMA,1997).

PROPRIEDADES MECÂNICAS						
Condição	Flexão Estática		Compressão		Dureza Janka	
	Módulo de Ruptura (kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidade (1.000kgf/cm ²)	Paralelas às Fibras	Perpendicular às Fibras	Paralelas às Fibras (kgf)	Transversal às Fibras (kgf)
			Resistência à Ruptura (kgf/cm ²)	Resistência no Limite Proporcional (kgf/cm ²)		
Verde	1220	153	615	105	1019	1108
Seca	1600	173	873	151	1460	1381

Condição	Tração	Fendilhamento	Cisalhamento
	Perpendicular às Fibras Resistência à Ruptura (kgf/cm ²)	Resistência à Ruptura(kgf/cm)	Resistência à Ruptura(kgf/cm)
Verde	53	75	134
Seca	39	67	180

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAL LENHOSO

Foram utilizadas nos ensaios 50 vigotas de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) que estavam no estoque de uma madeireira no Distrito Federal (DF). As peças estavam estocadas ao ar livre, em forma de pilhas entabecadas. As vigotas possuíam a dimensão aproximada de 3050 mm x 105 mm x 50 mm. Parte do material utilizado como tabique, feito com restos do processamento das vigotas, foi retirado para identificação macroscópica. Para a mensuração das dimensões foi utilizada uma trena comum, graduada em centímetros, com precisão de 0,1 cm.

4.2. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

Para a avaliação das vigotas foram utilizados três métodos não destrutivos: método da vibração transversal, método do ultrassom e método de flexão estática, o último segundo a norma ASTM D 4761 (2002). Os resultados do ensaio estático foram dados como padrão para os demais por se aproximar de ensaios laboratoriais. As vigotas também foram analisadas pelos três métodos em sequência, visando tanto uma melhor logística quanto as mesmas condições de ensaio para os três métodos.

O ensaio de vibração transversal foi o primeiro a ser realizado, uma vez que sua estrutura com tripés metálicos serve de base para os demais métodos. O equipamento utilizado foi o *Transverse Vibration E – Computer* modelo E 340 da Metriguard (Figura 2). Os dados obtidos pelo sistema foram: módulo de elasticidade (E_{dvt} , GPa), frequência natural de vibração (f_r , Hz), densidade aparente (ρ , g/cm³) e peso da amostra (PA, N). Para a calibragem do aparelho foi utilizada uma barra de alumínio com módulo de elasticidade conhecido.



Figura 2 – Aparelho Metriguard E-Computer.

Após verificar o funcionamento do aparelho e seu software, as vigotas foram posicionadas sobre os tripés, em um vão (L) de 2950 mm, vibrando a partir de um impacto não quantificado no centro do vão, a razão percentual entre L e comprimento total foi de 96%, aproximadamente, e a razão entre L e espessura da peça foi de 59 vezes. Os módulos de elasticidade da vibração transversal (E_{dvt}) foram validados pela Equação 1, onde os valores médios de dez leituras de todas as variáveis em cada vigota foram utilizados no cálculo, e os resultados desta validação foram utilizados neste trabalho.

$$E_{dvt} = \frac{fr^2 \cdot PA \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

E_{dvt} = módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal, N/mm²;
 fr = frequência de vibração, Hz;
 g = aceleração da gravidade (9870 mm/s²);
 I = momento de inércia, mm⁴;
 L = vão livre, mm;
 PA = peso da amostra, N.

O método do ultrassom forneceu a constante dinâmica na direção longitudinal do material (C_{LL}) a partir da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica na direção longitudinal (V_{LL}), a uma frequência de 45 kHz, tal frequência permitiu a passagem de mais de 25 ciclos completos de ondas pelas vigotas, obtida a partir de transdutores de face plana posicionados nas extremidades das vigotas. Para o ideal acoplamento dos transdutores foi utilizado gel condutor Mercur. O aparelho utilizado foi da Uslab v. 1.09 (Figura 3). Os dados de V_{LL} e densidade aparente (ρ), o último já obtido pela vibração transversal, foram colocados na Equação 2 para a obtenção do C_{LL} .

$$C_{LL} = V_{LL} \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

C_{LL} = constante dinâmica na direção longitudinal, N/mm²;

ρ = densidade aparente, kg/m³;

V_{LL} = velocidade de propagação da onda, (m/s);



Figura 3 – Aparelho de ultrassom Uslab.

O módulo de elasticidade pelo método estático (E_m) foi calculado a partir da flecha (δ) obtida no sentido de menor inércia (flatwise) e carregamento central. Para a classificação das vigotas foram utilizados os tripés metálicos do equipamento de vibração transversal, um vão já estabelecido de 2950 mm. O relógio comparador

utilizado foi da marca Starret (Figura 4), modelo 3600M-5 e precisão de 0,01 mm, sendo este posicionado no centro da peça, conforme indicação da norma. Uma pré carga de 19,6 N (2 kg) foi utilizada para acomodar a peça, então foi adicionada uma carga (P) de 29,41 N (3 kg) e aferida a flecha induzida por ele. As cargas aplicadas foram calibradas anteriormente, com uso de balança com precisão de 0,1 kg. A Equação 3 determinou do E_m .

$$E_m = \frac{P.L^3}{48.\delta.I} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

E_m = módulo de elasticidade estático, N/mm²;
P = carga aplicada, N;
L = vão livre, mm;
 δ = flecha atuante, mm;
I = momento de inércia, mm⁴.



Figura 4 – Relógio comparador em uso durante a avaliação pelo método estático.

4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram avaliados por estatística descritiva e regressão linear. Primeiramente foram submetidos à estatística descritiva e extraídos os dados de correlação entre E_m , E_{dvt} , C_{LL} , δ , v , fr e ρ . Com os dados em mãos foram realizadas regressões lineares ($y = a + bx$) para verificar as interações entre: $E_m \times E_{dvt}$, $E_m \times C_{LL}$, $E_m \times \delta$, $E_m \times V_{LL}$, $E_m \times fr$ e $E_m \times \rho$. Para isso, os dados foram tabulados com auxílio do software Microsoft Excel e nele realizadas as análises estatísticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

Observa-se pelas Tabelas 2 e 4 que existem dois grupos de variáveis quando verificadas com base em seus coeficientes de variação (CV). Para E_m , E_{dvt} , C_{LL} e δ tem-se CV mais elevados, entre 15 – 20%. As demais variáveis: ρ , fr e V_{LL} possuem CV entre 3,5 – 7,5%. Com a existência desses grupos de variáveis distinguíveis com base no CV é esperada a baixa correlação entre dados de variabilidade elevada com dados de baixa variabilidade, algo notado nos valores de correlação de Pearson (r) (Tabela 3).

Os dados também estão de acordo com os de Nogueira (2007), que ao ensaiar a madeira de *Eucalyptus sp.* por meio de ensaios não destrutivos (vibração transversal, ondas de tensão e ultrassom) também obteve valores médios de E_{dvt} inferiores ao de C_{LL} . Os valores encontrados pelo autor foram de 14429 e 16807 MPa respectivamente, assim como CV para fr e V_{LL} baixos, 7,09 e 6,35%, e CV mais elevados para E_{dvt} e C_{LL} , 16,37 e 12,97%.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos módulos de elasticidade não destrutivos e parâmetros físicos. (N=50 vigotas)

	Ensaio Estático	Vibração Transversal			Ultrassom		
		E_m (N/mm ²)	ρ (g/cm ³)	fr (Hz)	E_{dvt} (N/mm ²)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (N/mm ²)
Média	0,76	19508,11	0,97	10,90	17409,34	5150,24	23918,63
Máximo	1,04	27759,31	1,06	12,23	26564,91	5977,17	32193,30
Mínimo	0,53	10872,13	0,86	9,66	11144,45	4544,63	17885,79
Desvio Padrão	0,11	3889,60	0,03	0,57	2750,54	383,01	3666,87
CV (%)	14,81%	19,94%	3,58%	5,22%	15,80%	7,44%	15,33%

A Tabela 3 mostra a existência de uma alta correlação (0,850) entre o E_m e o E_{dvt} , além de outras correlações entre a fr e δ , cujo valor foi de -0,723. Como se sabe, δ é fundamental para o estabelecimento do E_m , cuja correlação é obviamente alta também (-0,700). O E_m não apresentou correlação tão alta, em comparação a E_{dvt} , com o C_{LL} (0,637), as possíveis causas serão abordadas mais a frente.

Tabela 3 - Correlação de Pearson (r) entre as variáveis da avaliação não destrutiva, (*) significativa a 5%, (**) significativa a 1% ou não significativa (^{ns}).

	E_m	E_{dvt}	C_{LL}	δ	V_{LL}	fr	ρ
E_m	1						
E_{dvt}	0,850(**)	1					
C_{LL}	0,637(**)	0,514(**)	1				
δ	-0,700(**)	-0,398(**)	-0,506(**)	1			
V_{LL}	0,612(**)	0,459(**)	0,971(**)	-0,494(**)	1		
fr	0,314(*)	0,325(*)	0,269(^{ns})	-0,723(**)	0,257(^{ns})	1	
ρ	0,294(*)	0,404(**)	0,223(^{ns})	-0,062(^{ns})	0,008(^{ns})	-0,062(^{ns})	1

Tais valores estão de acordo também aos obtidos por TELES et al. (2011), cuja correlação entre E_m e E_{dvt} foi de 0,973 e a correlação entre δ e fr foi de -0,761.

Algo que não ficou de acordo, em sua totalidade, com o obtido por TELES et al. (2011) é o histograma dos dados de E_m , E_{dvt} e C_{LL} , no caso de TELES et al. foram comparados dados entre *stress wave* ao invés de ultrassom. Na Figura 5 é perceptível que o histograma de E_{dvt} possui a curva de frequência acumulada em um formato mais semelhante ao de *half-bell* e uma distribuição de dados também semelhante a uma curva normal, o que enfatiza a tendência à normalidade destes dados. Os dados de E_m não apresentaram uma tendência como E_{dvt} , mas não foram como os dados do ultrassom, que por sua vez, não apontaram uma tendência evidente, além de seus dados possuírem valores maiores (classes deslocadas à direita no eixo x) em relação aos demais métodos.

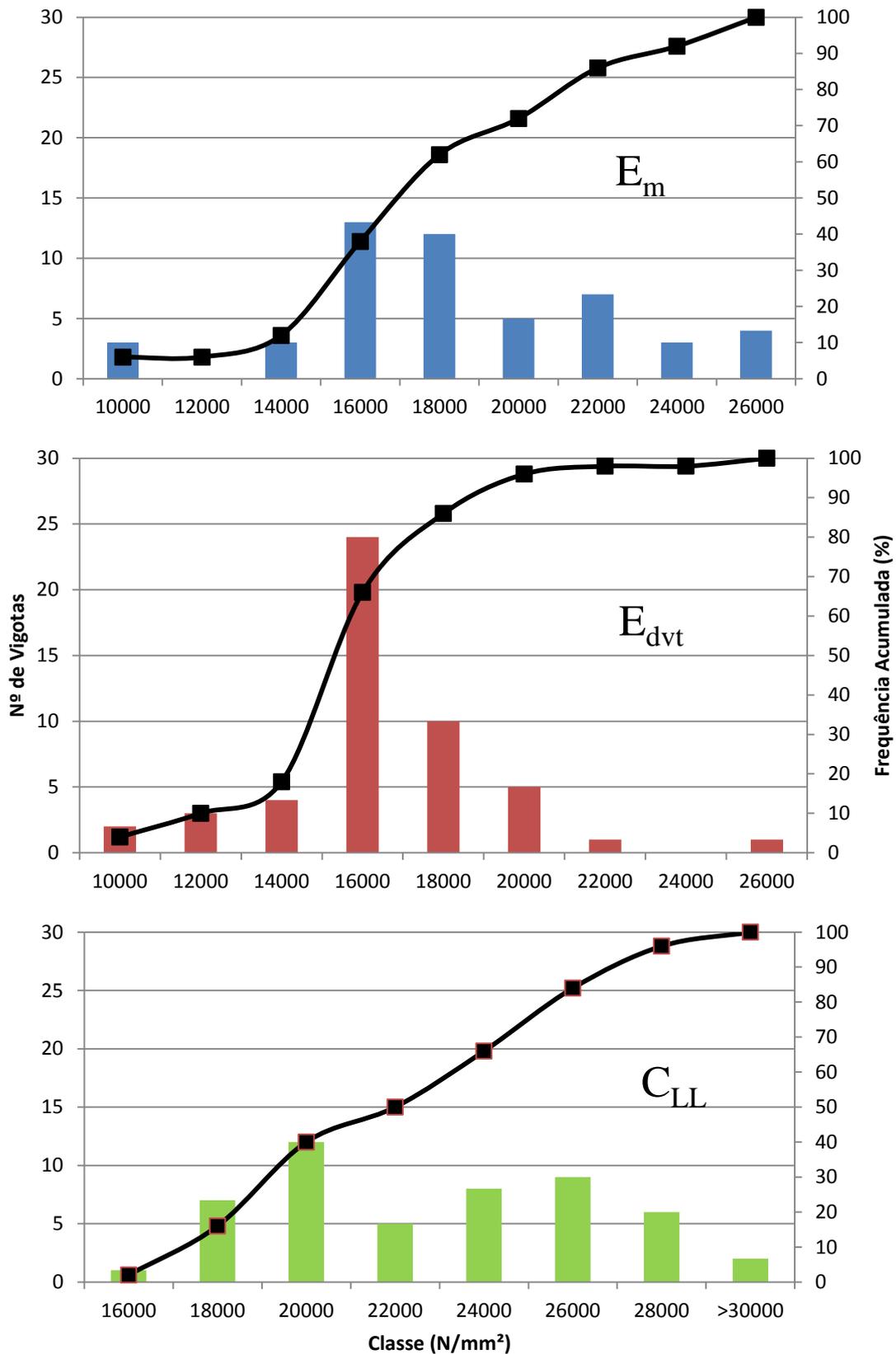


Figura 5 – Número de vigotas e frequência acumulada por classe de rigidez, conforme os métodos não destrutivos: ensaio estático, vibração transversal e ultrassom, respectivamente.

5.2. RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS E VARIÁVEIS

As primeiras relações avaliadas foram entre E_m e E_{dvt} , e entre o E_m e C_{LL} , conforme Figuras 6 e 7. Era esperado conforme CANDIAN (2007) que o coeficiente de determinação (R^2) da equação relacionando E_m x E_{dvt} fosse superior ao da equação relacionando E_m x C_{LL} , porém a diferença foi superior à encontrada por PIRES et al. (2011) e a própria CANDIAN (2007).

Uma das possíveis explicações para o baixo R^2 da C_{LL} é a baixa dispersão dos valores ρ , sendo esta variável ligada diretamente com o teor de umidade nas vigotas e o teor de umidade ligado ao armazenamento das vigotas, ao ar livre. Somando-se a este fator o período dos ensaios, setembro e outubro (notadamente início do período chuvoso no Distrito Federal) é dedutível que a umidade influenciou nos resultados do ultrassom.

Por se tratar de um método com uma equação dotada de menos variáveis, principalmente comparada à vibração transversal (5 variáveis), onde velocidade de propagação (V_{LL}) e densidade aparente (ρ) oscilam, o método do ultrassom se torna menos indicado para a classificação de lotes de madeira com poucos cuidados no armazenamento, algo comum nas madeireiras do Distrito Federal.

O R^2 da equação entre E_m x E_{dvt} demonstra boa confiabilidade (0,72). Além disso, todas as análises, realizadas a 95% de significância, obtiveram valores de F superiores ao valor tabelado, demonstrando validade estatística dos dados, conforme as Tabelas 5 a 10.

Provavelmente a umidade afetou também os dados de vibração transversal e o método estático, mas suas equações, com maior número de variáveis, mitigaram os efeitos da umidade, uma vez que ela afeta a vibração transversal no PA e o método estático na δ , sendo no caso da flecha atuante menos perceptível, uma vez que a peça tem que estar bastante úmida para uma queda significativa em sua flecha atuante.

Em especial, as equações das relações entre $E_m \times E_{dvt}$ e $E_m \times C_{LL}$ possuem significância suficiente para um teste a 99% de significância.

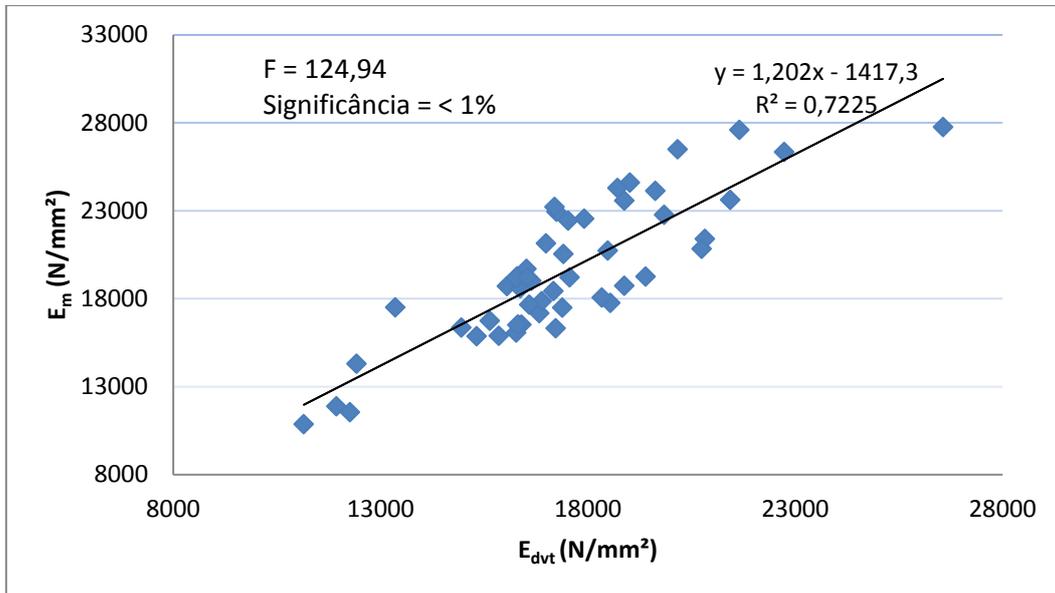


Figura 6 – Análise de regressão para $E_m \times E_{dvt}$, significativa a 1% e R^2 de 0,72.

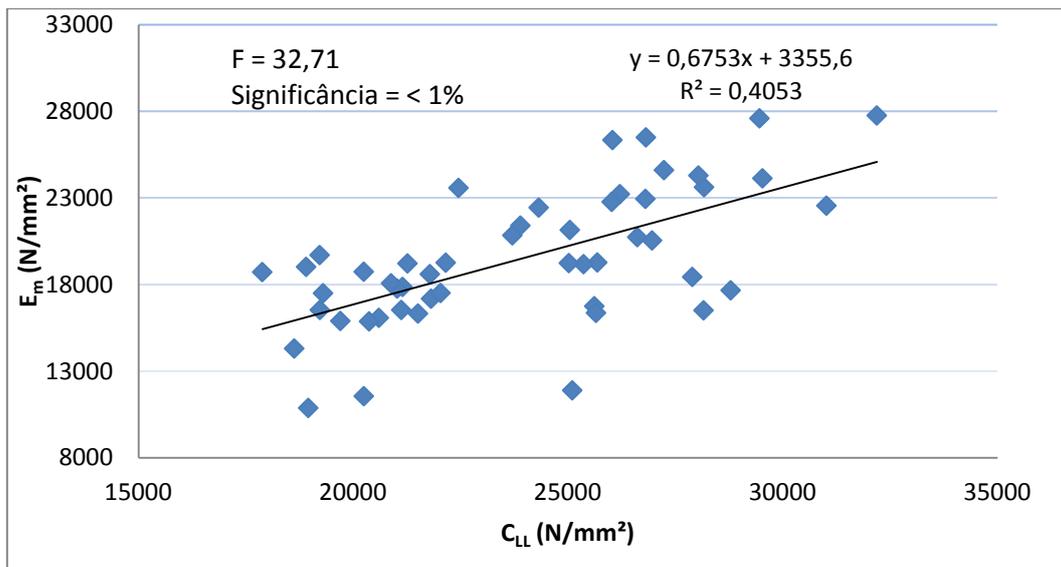


Figura 7 – Análise de regressão para $E_m \times C_{LL}$, significativa a 1% e R^2 de 0,72.

TARGA et al. (2005) encontraram valores semelhantes de R^2 em estudos com *Eucalyptus saligna* (0,76), *Eucalyptus grandis* (0,87) e *Eucalyptus citriodora* (0,87), também comparando E_m com E_{dvt} .

Já STANGERLIN et al. (2008) obtiveram resultados melhores com o ultrassom, porém seu experimento teve maior controle desde a colheita e processamento até o acondicionamento dos corpos de prova. Os valores de R^2 para *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, oscilaram entre 0,676 e 0,928. Outro fator importante é que o E_m obtido pelos autores foi com o uso de método destrutivo, no caso se tratou de ensaios de compressão paralela às fibras.

Buscando variáveis de obtenção mais simples, porém com boa confiabilidade e significância para serem aplicadas em equações ajustadas, foram realizadas outras regressões entre E_m e as demais variáveis (δ , V_{LL} , f_r e ρ), observar as Figuras 8 e 9. Tendo em mente que a logística para a aplicação de ensaios não destrutivos é complexa, requer vários aparelhos e a obtenção de dados que nem sempre são de fácil obtenção, conforme as dimensões da peça. É neste sentido, de simplificar o trabalho e melhorar a logística, que estas regressões foram realizadas.

Por esta ótica foi notado que V_{LL} ajustado em um modelo explicou melhor E_m do que f_r , obviamente δ devia apresentar maior R^2 por ser o fator de maior correlação com E_m entre as demais variáveis.

As dispersões possuíram uma distribuição relativamente homogênea ao longo da linha de tendência dos dados, porém a regressão E_m x ρ possuiu uma faixa de dispersão concentrada entre 0,975 e 1,000 g/cm³. Como além da V_{LL} é utilizada ρ no cálculo de C_{LL} , acredita-se que C_{LL} se torne mais susceptível a distorções causadas pela umidade nas vigotas. Além disso, a existência de qualquer defeito no interior da peça, rachaduras de topo ou qualquer tipo de torcimento alteram V_{LL} também, porém a influência destes erros deve ser menor, uma vez que o CV de V_{LL} foi inferior a 10%.

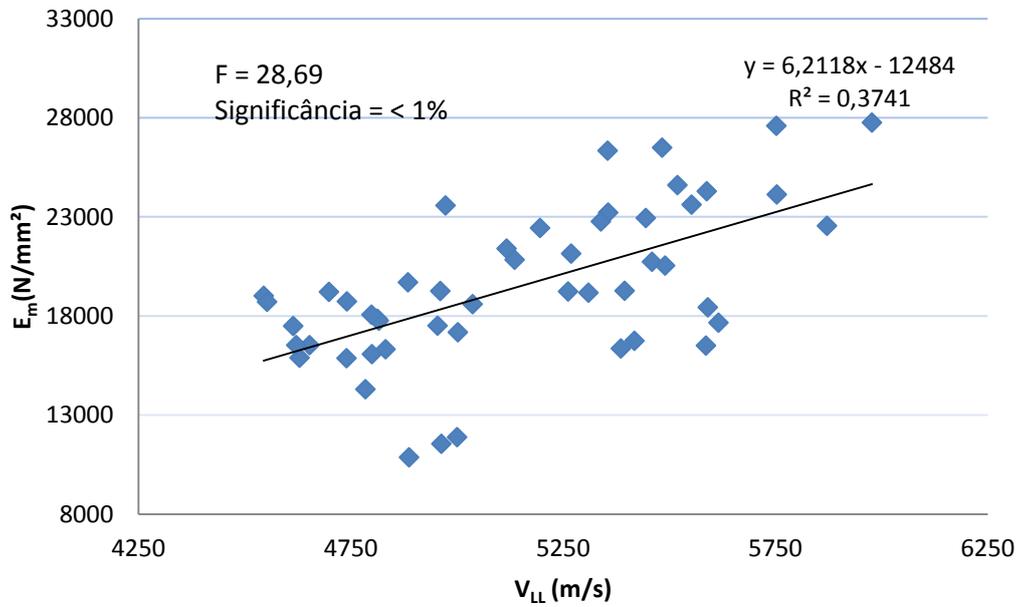
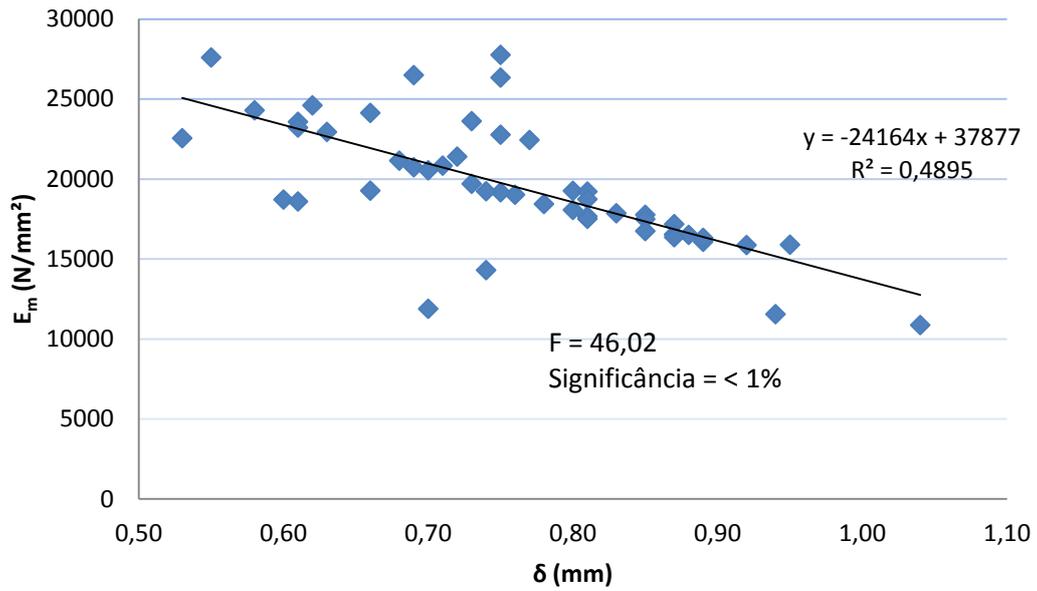


Figura 8 – Análise de regressão para $E_m \times \delta$ e $E_m \times V_{LL}$, ambas significativas a 1% e R^2 de 0,48 e 0,37, respectivamente. Observa-se uma dispersão mais uniforme em $E_m \times V_{LL}$, enquanto em $E_m \times \delta$ os valores dispersam mais quando δ abaixo de 0,8.

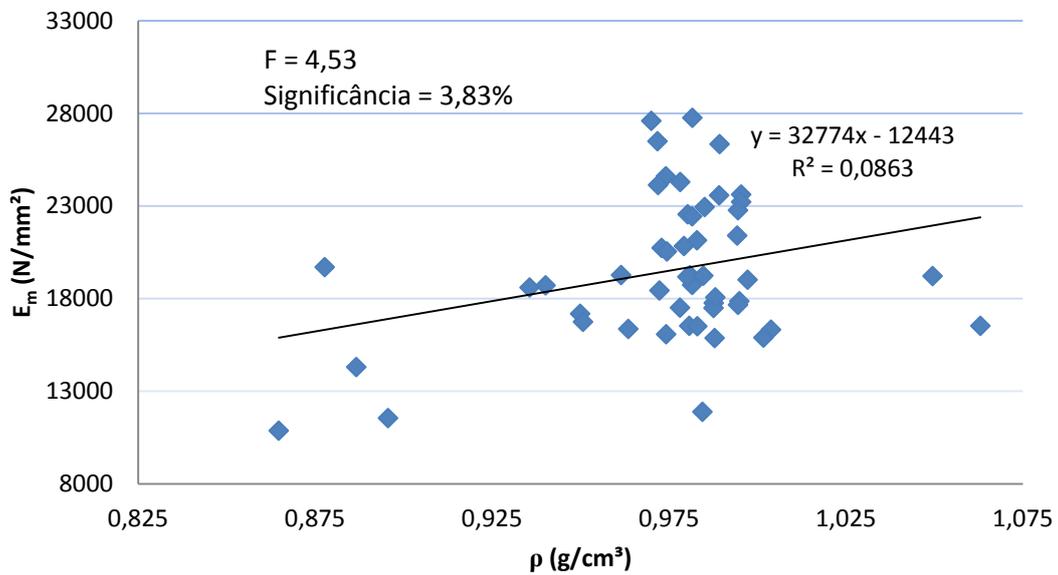
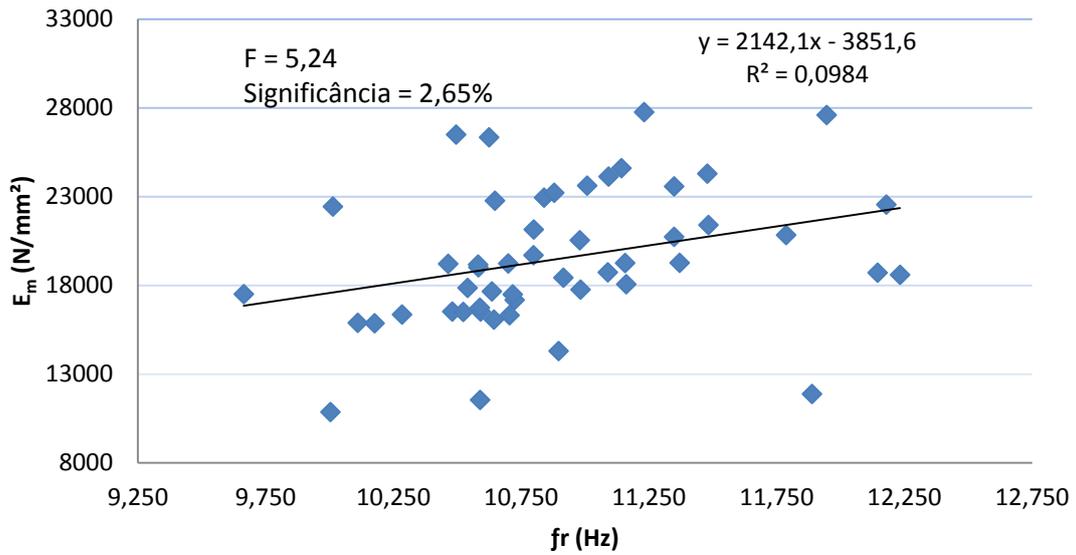


Figura 9 – Análise de regressão para E_m x fr e E_m x ρ , significativas a 5% de probabilidade e R^2 de 0,09 e 0,08, respectivamente. A dispersão dos dados é mais uniforme em E_m x fr , enquanto em E_m x ρ há uma concentração dos dados entre $0,95 < \rho < 1,00$, faixa de densidade comum a espécie estudada.

6. CONCLUSÕES

- Observou-se a eficiência do método de vibração transversal na estimativa do módulo de elasticidade estático (E_m), com valor de coeficiente de determinação (R^2) considerado confiável, independente das condições dos ensaios. O método de ultrassom não apresentou valores tão elevados, porém também foi significativo estatisticamente, além de apresentar uma logística melhor (principalmente por se tratar de um aparelho portátil, e este modelo dotado de bateria interna).
- Com base nas condições as quais são expostas a maioria das peças estruturais de madeira em seu armazenamento nas madeireiras do Distrito Federal, o método da vibração transversal é o mais recomendado para a classificação dos lotes de *Dinizia excelsa* Ducke.
- *Dinizia excelsa* Ducke apresentou bons valores de rigidez, se mostrando competente para uso estrutural, destinação dada à ela atualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**. Rio de Janeiro, Agosto – 1997. (Norma Brasileira NBR 7190).

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA (PROJETO DE REVISÃO)**. Rio de Janeiro, Agosto – 2010. (NBR 7190)

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4761: STANDARD TEST METHODS FOR MECHANICAL PROPERTIES OF LUMBER AND WOOD-BASE STRUCTURAL MATERIAL**. Philadelphia (2002).

BALLARIN, A. W., NOGUEIRA, M. **DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA DE *Pinus taeda* POR ULTRA-SOM**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.1, p.19-28, jan./abr. 2005.

CALIL JÚNIOR, C., MINÁ, A. J. S. **VIBRAÇÃO TRANSVERSAL: UM MÉTODO EFICIENTE PARA CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande – PB, v.7, n.2, p.335-338, 2003.

CANDIAN, M. **ESTUDO DA CLASSIFICAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PEÇAS SERRADAS DE ESPÉCIES CULTIVADAS NO BRASIL PARA USO EM ESTRUTURAS**. Dissertação de Mestrado em Eng. Civil, UFSC, São Carlos, São Paul, 2007.

CARRACO, E. V. M.; CARVALHO, E. P.; OLIVEIRA, A. L. C. **DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS**. R. Árvore, Viçosa-MG, v.32, n.1, p.119-127, 2008.

DEL MENEZZI, C. H. S., TOMASELLI, I., SOUZA, M. R. **AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PAINÉIS OSB MODIFICADOS TERMICAMENTE: PARTE 1- EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO.** Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 76, p. 67-75, dez., 2007.

DEL MENEZZI, C. H. S., SILVEIRA, R. S., SOUZA, M. R. **ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DE SEIS ESPÉCIES DE MADEIRAS AMAZÔNICAS POR MEIO DA TÉCNICA NÃO-DESTRUTIVA DE ONDAS DE TENSÃO.** Acta Amazonica, Vol. 40(2) 2010: 325 – 332.

EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. **ESPÉCIES ARBÓREAS DA AMAZÔNIA NO. 6: ANGELIM-VERMELHO, *Dinizia excelsa*.** 2004.

FIGLIOLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. **PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS COM DIMENSÕES ESTRUTURAIS DE *Pinus spp*: CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO VISUAL.** R. Árvore, Viçosa-MG, v.33, n.4, p.741-750, 2009.

GONÇALEZ J.C., VALE, A. T., COSTA, A.F. **ESTIMATIVAS DAS CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA POR MEIO DE ONDAS ULTRASONORAS (ULTRA-SOM).** Cerne, v. 7, p. 81-92, Lavras, MG, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **MADEIRAS TROPICAIS BRASILEIRAS.** Brasília: IBAMA – LPF, 1997, 152 p.

JANKOWSKY, I. P. **CIRCULAR TÉCNICA Nº 81 IPEF.** Dezembro/1979.

MINÁ, A. J. S., OLIVEIRA, F. G. R., CALIL JR, C., DIAS, A. A., SALES, A. **AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE POSTES DE MADEIRA POR MEIO DE ULTRA-SOM.** Scientia Florestalis, n. 65, p. 188-196, jun/2004.

NOGUEIRA, M. **CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS DE MADEIRA SERRADA DE DIMENSÕES ESTRUTURAIS DE *Eucalyptus sp*. COM USO DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS.** Tese de Doutorado em Agronomia, UNESP, Botucatu, São Paulo, 2007.

PIRES, F. A. C., DEL MENEZZI, C. H. S., DE SOUZA, M. R. **GRADING STRUCTURAL TROPICAL LUMBER USING STRESS WAVE, TRANSVERSE VIBRATION AND ULTRASONIC METHOD.** Wood NDT – 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sopron, Hungary, September/2011.

QUOIRIN, N. S. R. **DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM MADEIRA POR TOMOGRAFIA DE RAIOS X TESE (MESTRADO).** UFP, Paraná, 2004.

STANGERLIN, D. M., CALEGARI, L., SANTINI, E. J., DOMINGUES, J. M. X., GATTO, D. A., MELO, R. R. **DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MADEIRAS POR MEIO DE MÉTODOS DESTRUTIVO E NÃO-DESTRUTIVO.** Revista Brasileira de Ciências Agrárias, vol. 3, núm. 2, abril - junho, pp. 145-150 Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2008.

TARGA, L. A., BALLARIN, A. W., BIAGGIONI, M. A. M. **AValiação DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA COM USO DE MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.2, p.291-299, maio/ago. 2005.

TELES, R. F., DEL MENEZZI, C. S., SOUZA, F., SOUZA, M. R. **NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF A TROPICAL HARDWOOD: INTERRELATIONSHIP BETWEEN METHODS AND PHYSICAL-ACOUSTICAL VARIABLES.** Ciência da Madeira, Pelotas, v. 02, n. 01, p. 01-14, Maio, 2011.

APÊNDICE

A.DADOS

Tabela 4 – Dados das vigotas analisadas pelos métodos não destrutivos.

Amostra	Ensaio Estático		Vibração Transversal			Ultrassom				
	Em (N/mm ²)	δ (mm)	ρ (g/cm ³)	PA (N)	f_r (Hz)	Edvt (N/mm ²)	Edus (N/mm ²)	V_{LL} (m/s)	I (mm ⁴)	L (mm)
1	11889,40	0,70	0,98	150,93	11,89	11933,03	25103,39	5000,00	1890000,00	2950,00
2	16076,87	0,89	0,97	149,33	10,64	16269,00	20600,36	4799,47	1093750,00	2945,00
3	21402,37	0,72	0,99	152,44	11,48	20819,34	23895,66	5116,67	1041666,67	2970,00
4	17180,97	0,87	0,95	145,62	10,72	16826,57	21815,98	5001,83	1041666,67	2940,00
5	19262,13	0,80	0,98	150,39	11,16	19390,14	22157,60	4960,50	1041666,67	2970,00
6	19217,14	0,81	1,05	153,25	10,46	17557,54	21266,89	4698,31	1041666,67	2980,00
7	17861,03	0,83	0,99	152,53	10,54	16885,91	21152,19	4812,50	1093750,00	2980,00
8	14306,35	0,74	0,89	146,99	10,90	12419,07	18629,44	4784,21	1455781,25	2930,00
9	10872,13	1,04	0,86	146,54	10,00	11144,45	18956,64	4886,84	1455781,25	2995,00
10	19700,58	0,73	0,88	146,54	10,80	16517,28	19221,95	4884,34	1093750,00	2950,00
11	11553,20	0,94	0,90	149,77	10,59	12259,11	20250,75	4963,00	1455781,25	2955,00
12	15871,65	0,92	0,99	150,68	10,18	15314,88	20372,87	4739,69	1093750,00	2965,00
13	16323,78	0,89	1,00	153,92	10,70	17222,50	21511,91	4831,58	1093750,00	2960,00
14	16530,37	0,87	1,06	154,43	10,48	16396,81	21122,88	4652,54	1093750,00	2950,00
15	15895,25	0,95	1,00	152,77	10,11	15849,86	19703,90	4629,01	1041666,67	2950,00
16	17765,28	0,85	0,99	151,44	10,98	18539,05	21026,85	4815,79	1041666,67	2950,00
17	23576,10	0,61	0,99	151,63	11,35	18876,90	22455,11	4972,83	1093750,00	2950,00
18	18737,53	0,81	0,98	150,47	11,09	18875,91	20249,09	4740,52	1041666,67	2955,00

19	19019,30	0,76	1,00	152,88	10,58	16634,14	18907,23	4544,63	1093750,00	2955,00
20	16530,37	0,87	0,98	150,49	10,59	16318,21	19226,46	4621,21	1093750,00	2950,00
21	17495,66	0,85	0,99	151,40	10,72	17381,55	19300,65	4614,02	1041666,67	2935,00
22	20838,65	0,71	0,98	150,12	11,79	20741,87	23708,58	5135,59	1041666,67	2930,00
23	18717,06	0,60	0,94	144,11	12,15	16046,47	17885,79	4552,41	1386458,33	2940,00
24	18598,73	0,61	0,94	143,43	12,23	16368,65	21788,19	5036,70	1386458,33	2950,00
25	18068,34	0,80	0,99	151,48	11,16	18334,27	20885,18	4798,43	1093750,00	2955,00
26	24604,16	0,62	0,97	149,33	11,14	19010,54	27237,95	5519,04	1041666,67	2960,00
27	27759,31	0,75	0,98	150,49	11,23	26564,91	32193,30	5977,17	759375,00	2955,00
28	20736,84	0,69	0,97	149,18	11,35	18477,61	26617,49	5459,16	1093750,00	2945,00
29	22943,92	0,63	0,99	151,03	10,84	17241,53	26806,30	5444,55	1093750,00	2955,00
30	23619,11	0,73	1,00	152,60	11,01	21431,46	28170,94	5552,42	921600,00	2960,00
31	23218,29	0,61	1,00	152,60	10,88	17194,38	26211,92	5355,88	1093750,00	2935,00
32	22551,96	0,53	0,98	150,28	12,18	17909,78	31020,33	5871,24	1302673,75	2940,00
33	16509,28	0,88	0,98	150,71	10,52	16297,69	28159,62	5586,21	1093750,00	2960,00
34	27595,28	0,55	0,97	148,73	11,95	21651,47	29462,03	5752,09	1041666,67	2955,00
35	16747,84	0,85	0,95	145,72	10,59	15632,15	25617,23	5417,82	1093750,00	2940,00
36	17664,71	0,81	0,99	152,46	10,64	16585,04	28791,48	5615,78	1093750,00	2945,00
37	18437,72	0,78	0,97	149,06	10,92	17167,39	27897,24	5590,63	1093750,00	2950,00
38	24131,31	0,66	0,97	149,00	11,09	19625,04	29531,02	5753,16	967680,00	2930,00
39	19272,93	0,66	0,96	147,40	11,37	16293,11	25686,40	5394,69	1230320,00	2945,00
40	20544,89	0,70	0,97	149,38	10,98	17407,51	26960,54	5490,00	1093750,00	2950,00
41	19175,23	0,75	0,98	150,27	10,58	16263,78	25366,32	5309,48	1093750,00	2950,00
42	16362,83	0,87	0,96	147,71	10,28	14946,67	25656,40	5385,83	1093750,00	2940,00
43	19237,38	0,74	0,98	150,96	10,70	16535,60	25024,69	5261,54	1093750,00	2940,00
44	24294,65	0,58	0,98	149,95	11,48	18712,71	28040,30	5588,11	1093750,00	2930,00
45	26495,07	0,69	0,97	148,96	10,50	20162,20	26817,91	5482,97	851690,00	2940,00
46	22441,09	0,77	0,98	150,47	10,01	17522,30	24321,86	5195,45	908451,25	2948,00

47	17511,71	0,81	0,98	149,96	9,66	13353,56	22036,57	4954,05	1114583,33	2955,00
48	21149,15	0,68	0,98	150,69	10,80	16988,19	25047,12	5268,71	1093750,00	2950,00
49	26340,37	0,75	0,99	151,67	10,62	22732,79	26039,32	5354,65	812531,25	2970,00
50	22770,31	0,75	0,99	152,44	10,65	19837,07	26021,78	5338,83	925755,08	2955,00
Média	19508,11	0,76	0,97	150,09	10,90	17409,34	23918,63	5150,24	1108790,07	2951,26
Desvpad	3889,60	0,11	0,03	2,40	0,57	2750,54	3666,87	383,01	182801,60	13,29
CV (%)	19,94%	14,81%	3,58%	1,60%	5,22%	15,80%	15,33%	7,44%	16,49%	0,45%
Máx	27759,31	1,04	1,06	154,43	12,23	26564,91	32193,30	5977,17	1890000,00	2995,00
Min	10872,13	0,53	0,86	143,43	9,66	11144,45	17885,79	4544,63	759375,00	2930,00
Max -										
Med	8251,20	0,28	0,09	4,34	1,33	9155,57	8274,67	826,93	781209,93	43,74
Med - Min	8635,98	0,23	0,11	6,66	1,24	6264,89	6032,84	605,61	349415,07	21,26

B. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 5 – Análise de regressão entre E_m e E_{dvt} .

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	535570337,3	535570337,3	124,9455933	5,83897E-15
Resíduo	48	205748562,4	4286428,383		
Total	49	741318899,7			

Tabela 6 – Análise de regressão entre E_m e C_{LL} .

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	300464986,4	300464986,4	32,71450908	6,70133E-07
Resíduo	48	440853913,3	9184456,526		
Total	49	741318899,7			

Tabela 7 – Análise de regressão entre E_m e δ .

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	362879547,2	362879547,2	46,02644559	1,57515E-08
Resíduo	48	378439352,5	7884153,177		
Total	49	741318899,7			

Tabela 8 – Análise de regressão entre E_m e V_{LL} .

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	277357268,1	277357268,1	28,69450395	2,36849E-06
Resíduo	48	463961631,6	9665867,325		
Total	49	741318899,7			

Tabela 9 – Análise de regressão entre E_m e fr .

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	72967790,66	72967790,66	5,240440099	0,02650853
Resíduo	48	668351109	13923981,44		
Total	49	741318899,7			

Tabela 10 – Análise de regressão entre E_m e ρ .

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	63981565,86	63981565,86	4,534099935	0,038382365
Resíduo	48	677337333,8	14111194,45		
Total	49	741318899,7			