



Raphael Simões Bacellar

**Caracterização microestrutural e mecânica de resíduos da
agroindústria.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia de materiais da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e em Processos Químicos e Metalúrgicos.

Orientador: Prof. José Roberto Moraes d'Almeida

Rio de Janeiro
Abril de 2010



Raphael Simões Bacellar

**Caracterização microestrutural e mecânica de resíduos da
agroindústria.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais e em Processos Químicos e Metalúrgicos pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio. Aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada.

Prof. José Roberto Moraes d'Almeida

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof.^a Laura Hecker De Carvalho

UFCG

Prof. Marcos Henrique De Pinho Mauricio

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico e Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de Abril de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Raphael Simões Bacellar

Graduou-se em Desenho Industrial com habilitação em projeto de produto pela PUC-Rio em 2005.

Ficha Catalográfica

Bacellar, Raphael Simões

Caracterização microestrutural e mecânica de resíduos da agroindústria / Raphael Simões Bacellar ; orientador: José Roberto Moraes d'Almeida. – 2010.

82 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Caracterização física. 3. Propriedades mecânicas. 4. Estipe da pupunha e do coqueiro. I. D'Almeida, José Roberto Moraes. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

Agradecimentos.

À minha mulher pela paciência e compreensão.

Ao meu orientador pelos conhecimentos passados.

À minha mãe e à minha sogra pelo apoio.

Aos meus filhos pela motivação inerente a sua existência e à alegria de viver contagiante.

Aos familiares e amigos e aos professores e colaboradores do DCMM.

Ao CNPq e a PUC-Rio pelo suporte financeiro.

Resumo

Bacellar, Raphael Simões; d'Almeida, José Roberto Moraes. **Caracterização microestrutural e mecânica de resíduos da agroindústria.** Rio de Janeiro, 2010. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Compósitos reforçados por fibras lignocelulósicas e, também, materiais estruturais de origem vegetal, tal como o bambu, vêm sendo cada vez mais empregados em diversos segmentos industriais, tendo em vista a crescente necessidade da sociedade de usar materiais provenientes de recursos naturais renováveis. Assim sendo, este trabalho visa analisar resíduos da agroindústria da produção sustentável de palmito e de coco, que são os caules das palmeiras *Bactris gasipaes* (pupunha) e *Cocos nucifera* (coqueiro). O objetivo em caracterizá-los é fundamentar uma via alternativa de obtenção de madeira, considerando os seguintes aspectos: a disponibilidade, a preservação do meio ambiente, o bom desempenho do material e o baixo custo. Neste trabalho foi feita a caracterização microestrutural da pupunha por microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica digital. O comportamento térmico e termomecânico da pupunha foi avaliado por termogravimetria e por análise termodinâmica mecânica. Foi avaliado ainda o comportamento mecânico em flexão, compressão e cisalhamento na linha de cola de corpos de prova usinados do estipe da pupunha, bem como se avaliou por difração de raios-X a estrutura cristalina e o grau de cristalinidade do material. Além disso, foi feita a caracterização da resistência à abrasão e avaliado o efeito do envelhecimento por absorção de água e por radiação UV nas propriedades à flexão da pupunha. Também foram avaliadas a resistência à abrasão e as propriedades mecânicas à flexão e à compressão do caule do coqueiro.

Palavras - chave

Caracterização física; Propriedades mecânicas; Estipe da pupunha e do coqueiro.

Abstract

Bacellar, Raphael Simões; d'Almeida, José Roberto Moraes (Advisor). **Microstructural and Mechanical Characterization of Agribusiness Wastes**. Rio de Janeiro, 2010. 82p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Composites reinforced by lignocellulosic fibers and structural cellulosic materials, such as bamboo, have been increasingly used in many industrial fields, owing to the growing society need to use materials from renewable resources. Therefore, this study aims to analyze two agro-wastes of the coconut and heart of palm sustainable production, which are the trunks of these palms (*Bactris gasipaes* and *Cocos nucifera*). The main objective is to establish the foundation for an alternative way of obtaining wood, considering the following aspects: availability, environmental conservation, good performance and low material cost. In this work microstructural characterization of pupunha trunk was done by scanning electron microscopy and digital optical microscopy. The thermal and the thermo mechanical behaviors were evaluated by thermogravimetric analysis and by dynamic thermo mechanics analysis. Also rated was the material mechanical behavior in bending, compressing and shearing in the glue line. The material crystal structure and the degree of crystallinity was tested by X-ray diffraction. The resistance to abrasion was checked and the effect of aging due to water absorption and UV radiation in the bending properties of pupunha. Finally we verified the abrasion resistance and mechanical properties of bending and compressing the coconut palm.

Keywords

Mechanical Properties; Physical Properties; Pupunha and Coconut Palm.

Sumário

1 Introdução.	14
1.1 Objetivo.	19
1.1.1 Caracterização mecânica da madeira da pupunha e do coqueiro.	19
1.1.1.1 Caracterização mecânica da madeira da pupunha.	19
1.1.1.2 Caracterização mecânica da madeira do coqueiro.	20
1.1.2 Caracterização térmica e termo-mecânica da madeira da pupunha.	20
1.1.3 Caracterização microestrutural da madeira da pupunha e do coqueiro.	20
2 Revisão bibliográfica.	21
2.1 Origem e distribuição geográfica da pupunha.	21
2.1.1 A pupunha no Brasil.	21
2.2 O coqueiro no Brasil.	23
2.3. Propriedades dos materiais.	23
2.3.1.1 Propriedades estruturais.	24
2.3.2 Propriedades mecânicas.	24
2.3.2.1 Resistência mecânica de madeiras usadas na indústria moveleira e de construção civil.	26
2.3.2.2 Fatores que influenciam a resistência mecânica natural da madeira.	28
2.3.2.3 Fatores que influenciam na durabilidade natural da madeira.	28
2.4 Umidade.	29

2.5 Microestrutura dos materiais lignocelulósicos.	30
3. Materiais e métodos.	36
3.1 Análise microestrutural.	36
3.2 Análise termogravimétrica(TGA).	37
3.3 Difração de raios-x (DRX).	38
3.4 Ensaio de flexão.	38
3.5 Ensaio de resistência à compressão axial.	40
3.6 Ensaio de cisalhamento na linha de cola.	41
3.7 Ensaio de abrasão.	45
3.8 Determinação do teor de umidade.	45
3.9. Determinação da densidade.	46
4 Resultados e discussão.	48
4.1 Análise microestrutural.	48
4.1.1 Composição química da pupunha.	53
4.2 Análise termogravimétrica (TGA).	54
4.3 Difração de raios-x (DRX).	55
4.4 Ensaio de flexão.	57
4.4.1 Pupunha sem tratamento.	57
4.4.2 Pupunha em imersão em água.	58
4.4.3 Pupunha envelhecida.	61
4.4.3.1 Maçaranduba.	61
4.4.4 Coqueiro.	62
4.5 Ensaio de compressão.	63
4.6 Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola.	67
4.6.1 Amostra com 3 mm de espessura.	67

4.6.2 Amostra com 10 mm de espessura.	68
4.6.3 Análise de resultados.	69
4.7 Ensaio de abrasão normal à fibra.	70
4.8 Determinação do teor de umidade.	71
4.8.1 Determinação da densidade.	72
5 Conclusões.	73
6 Referência bibliográfica.	74

Lista de figuras

Figura 1 – a,b) Plantação manejada de pupunha; c) Estipe abatido.	8
Figura 2 – O coqueiro e diversos produtos que podem ser obtidos a partir dele.	9
Figura 3 – Estrutura da fruta do Coco.	9
Figura 4 Plantação de coco no nordeste brasileiro	10
Figura 5 - Coco germinado sem interferência humana.	16
Figura 6 - Tipos de ligações que ocorrem entre grupos hidroxilas das moléculas de celulose. A – pontes de hidrogênio intramoleculares. B – pontes de hidrogênio intermoleculares.	25
Figura 7- Formação da fibra de celulose	26
Figura 8 - Ilustração de uma fibra lignocelulósica	26
Figura 9 - Absorção e dessorção de água no algodão purificado. Curva A de absorção e curva D de dessorção	28
Figura 10 - Corpo de prova posicionado para realização do ensaio de flexão	33
Figura 11 - Amostras imersas em água	33
Figura 12 - Dispositivo de discos planos usado para realização do ensaio de compressão	34
Figura 13 - Corpos de prova de coqueiro e pupunha, respectivamente, usados no ensaio de cisalhamento na linha de cola.	35

Figura 14 - Corpo de prova posicionado para realização do ensaio de cisalhamento na linha de cola na máquina de ensaio.	36
Figura 15 - Abrasimetro AP-40 utilizado.	38
Figura 16 - Corpos de prova do ensaio de abrasão.	39
Figura 17 – Microestrutura do estipe da pupunha.	41
Figura 18 – Detalhes da seção transversal do estipe da pupunha.	42
Figura 19 – Mosaico (10 x 5) das seções transversais do estipe. (a) Seção transversal do corpo de prova que apresentou o <u>menor</u> valor da tensão de ruptura em flexão; (b) Seção transversal do corpo de prova que apresentou o <u>maior</u> valor da tensão de ruptura em flexão.	43
Figura 20 – Mosaico (10 x 5) da seção transversal do estipe do coqueiro	44
Figura 21 - a) Seção da altura do peito b) Seção basal c) Análise do gradiente de concentração de fibras da seção basal.	45
Figura 22 - Rachaduras nas fibras oriundas do processo de preparação da amostra.	46
Figura 23 - Análise química qualitativa da pupunha	47
Figura 24 – Termograma típico obtido para a pupunha.	49
Figura 25 – Difractograma da pupunha	50
Figura 26 –Curva tensão-alongamento em flexão típica obtida para a pupunha.	51
Figura 27 - Curva representativa do comportamento	

da pupunha após imersão no ensaio de flexão estática.	53
Figura 28 - Influência da umidade e da densidade sobre a resistência à flexão para o jatobá.	53
Figura 29 – Comportamento em flexão da pupunha após envelhecimento.	54
Figura 30 - Curva representativa do comportamento mecânico em flexão da maçaranduba	55
Figura 31 – Típica curva tensão-alongamento em flexão obtida para o coqueiro	55
Figura 32 – Amostras de compressão após o ensaio.	57
Figura 33- Corpos de prova que não romperam na linha de cola com espessura de 3mm	60
Figura 34 -Algumas amostras de coqueiro que não romperam na linha de cola.	61

Lista de tabelas.

Tabela 1 – Valores médios de algumas madeiras	19
Tabela 2 – Propriedades em flexão da pupunha e de alguns materiais estruturais	54
Tabela 3 – Propriedades mecânicas de algumas madeira moles	58
Tabela 4 – Propriedades em compressão da pupunha	58
Tabela 5 – Classe de resistência das dicotiledôneas.	61
Tabela 6 – Classe de resistência das coníferas	61
Tabela 7 - Amostras de pupunha com 3mm de espessura (unidade - MPa)	67
Tabela 8 - Amostras de pupunha e coqueiro com espessura de 10mm (unidade MPa)	67
Tabela 9 - Reunião dos valores médios obtidos a partir dos ensaios mecânicos realizados e da literatura.	73