

ESTIMATIVA DA DENSIDADE APARENTE, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA POR MEIO DO RESISTÓGRAFO

ESTIMATION OF APPARENT DENSITY COMPRESSIVE STRENGTH AND ELASTIC MODULUS OF WOOD THROUGH RESISTOGRAPH

Edgar Vladimiro Mantilla CARRASCO¹; Nara Cristina Santos PEREIRA ;
Rejane Costa ALVES³

1 Professor Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola da Engenharia, UFMG, mantilla@dess.ufmg.br

2 Graduanda em Engenharia Civil, UFMG, narasantos_eng@yahoo.com.br

3 Doutoranda em Engenharia de Estruturas, UFMG, rejanecosta@ufmg.br

RESUMO

O resistógrafo vem se tornando uma alternativa rápida e confiável de avaliação das características da madeira. O objetivo deste estudo é estimar a densidade aparente, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade paralelo às fibras em função do índice de penetração obtido, em cinco espécies de madeiras por meio de métodos de avaliação não destrutivos, com o uso de resistógrafo. Determinou-se a umidade da madeira, densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade paralela às fibras de acordo com a norma NBR7190. Determinou-se também o índice de penetração na madeira (IP) obtido a partir do resistógrafo. As madeiras utilizadas neste trabalho foram o Angelim-pedra, Cumaru, Parajú, Pinus e Sucupira, com seis repetições por madeira. Foi utilizada análise de regressão para a determinação das correlações entre o IP e as respectivas características físicas e mecânicas da madeira. Os coeficientes R² variaram de 75,66% a 86,64%. Concluiu-se que o resistógrafo é um instrumento eficiente quanto sua utilização em campo,

com significativos coeficientes de correlação e ampla faixa de aplicação.

Palavras chave: Ensaio não destrutivo, resistógrafo, características físicas e mecânicas.

Abstract

The resistograph has become a quick and reliable evaluation of the characteristics of the wood. The goal of this study is to estimate the apparent density, compressive strength and modulus of elasticity parallel to the fibers due to the penetration rate obtained in five wood species through non-destructive evaluation methods, using resistograph. The determination of the humidity of the wood, apparent density compressive strength and modulus of elasticity parallel to grain according to the standard NBR7190. We also determined the rate of penetration into the wood obtained from resistógrafo. The wood used in this work were Angelim-pedra, Cumaru, Paraju, Pinus and Sucupira, with six replicates per timber. It was used regression analysis to determine the correlations between the IP and their physical and mechanical characteristics of wood. The R² coefficients ranged from 75.66% to 86.64%. It was concluded that the resistograph is an effective instrument and its use in the field, with significant correlation coefficients and wide application range.

Keywords: Non-destructive testing, resistograph, physical and mechanical characteristics.

INTRODUÇÃO

A madeira quando utilizada como material estrutural apresenta uma relação resistência/(peso x custo) superior a todos os outros materiais. Por tratar-se de um material biológico a determinação das características físicas e mecânicas através de ensaios não destrutivos torna-se mais difícil.

A amostragem para determinação das características da madeira normalmente implica na destruição do elemento estrutural, o que impede que futuras observações

sejam efetuadas (LIMA et al., 2007). Os métodos não destrutivos vêm se tornando importante alternativa para predições das características da madeira. São utilizados para verificação de existência de descontinuidades ou defeitos nas peças, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior (ABENDI, 2011). Visando reduzir essa limitação, neste trabalho, foi utilizado o aparelho resistógrafo.

O aparelho resistógrafo tem sido muito utilizado no Brasil para a avaliação do lenho de árvores. O princípio do resistógrafo é simples. Consiste de uma broca de 3 mm de diâmetro, feita de aço, a qual é direcionada para dentro da madeira a uma determinada taxa de velocidade, dependendo da espécie de madeira, e do modelo empregado (RINN et al., 1996). Ao atravessar a madeira, a broca encontra intensidades diferentes de resistência, refletindo a condição estrutural das paredes celulares (LIMA et al., 2007). A medição fornecida pelo resistógrafo é denominada índice de penetração e é expressa em porcentagem.

A utilização do resistógrafo, na maior parte dos casos, estava restrita a determinação do estado fitossanitário da madeira. Assim o objetivo deste trabalho é determinar através do índice de penetração do resistógrafo a densidade da madeira, a resistência a compressão paralela as fibras e o módulo de elasticidade. A finalidade de utilizar-se várias espécies de madeira foi obter uma gama maior de validade das correlações obtidas.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios utilizou-se cinco espécies de madeira, especificamente, angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), cumaru (*Dipteryx odorata*), paraju (*Manilkara spp.*), pinus (*Pinus spp.*) e sucupira (*Bowdichia spp.*), com seis replicas por madeira.

2.1 Ensaios destrutivos de caracterização física e mecânica da madeira

Foram determinados para cada espécime os teores de

umidade, densidade aparente, compressão paralela às fibras e módulos de elasticidade das madeiras seguindo as prescrições da NBR 7190 e os padrões rigorosos dos requisitos e procedimentos do sistema de qualidade implantado nos laboratórios do Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e novos Materiais (CPAM3).

A umidade e a densidade aparente da madeira foram determinadas no Laboratório de Caracterização Física da Madeira (LACAF). Todos os aparelhos (paquímetros, balanças e estufas) foram calibrados por um organismo acreditado pelo INMETRO. Todo o sistema de medida é automatizado sem nenhuma interferência do operador. Para a determinação da resistência à compressão paralela, foram realizados ensaios em um corpo-de-prova (CP) extraído de cada tábua. Os CPs possuíam seção transversal nominal quadrada de lados iguais a 3,0 cm e comprimento nominal de 9,0 cm. Esses ensaios foram realizados numa máquina universal da marca EMIC com capacidade de 300 kN (Figura 1).

Figura 1 – Máquina universal com capacidade de 300 kN



O carregamento aplicado foi monotônico crescente com uma taxa de 10 MPa/min, conforme a prescrição da NBR 7190 (1997). A carga de ruptura encontrada foi empregada para a determinação do diagrama de carregamento utilizado nos ensaios de compressão paralela às fibras, visando a determinação do módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras foi determinado em um CP de cada tábua com seção transversal nominal quadrada de lados iguais a 5,0 cm e comprimento nominal de 15,0 cm, Figura 2.

Figura 2- Corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.



Estes ensaios também foram realizados na máquina universal da marca EMIC com capacidade de 300 kN. A carga foi aplicada, conforme a prescrição da NBR 7190 (1997), com dois ciclos de carga e descarga e com uma taxa de carregamento igual a 10 MPa/min, como mostra a Figura 3.

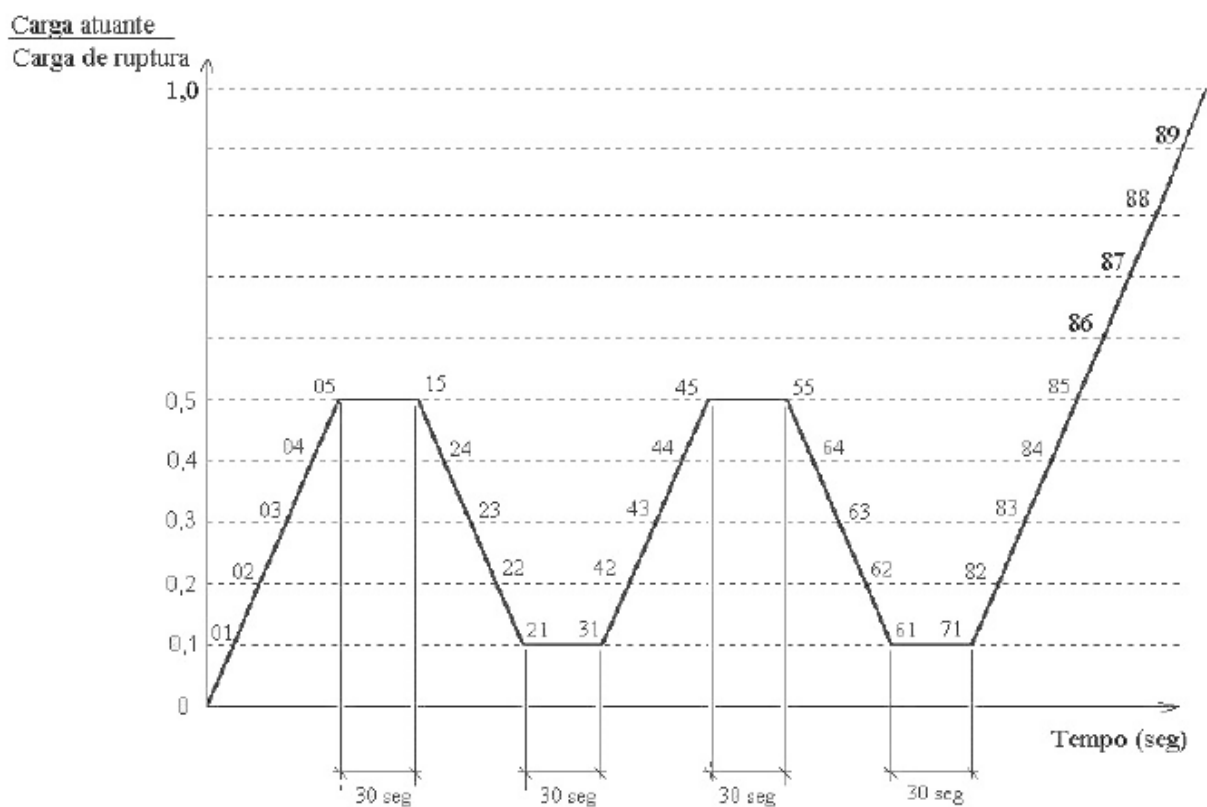


Figura 3 – Diagrama de carregamento
 Fonte: NBR-7190, 1997, p. 79.

Os deslocamentos foram medidos através de extensômetros (clip-gage) fixados em dois lados opostos do CP, conforme Figura 4.

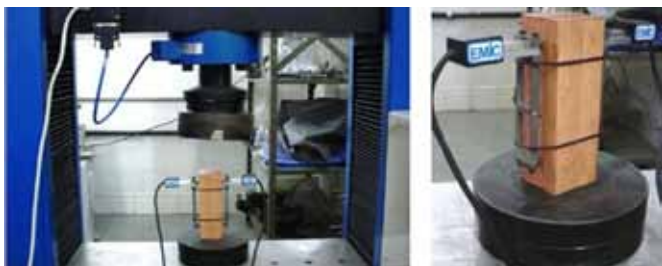


Figura 4 – Arranjo para ensaio de compressão paralela às fibras

Os deslocamentos foram medidos até 70% da carga de ruptura prevista, quando, por medida de segurança, os extensômetros foram retirados. As deformações foram determinadas dividindo-se os deslocamentos medidos pelo comprimento padrão dos extensômetros (100 mm). Quanto ao módulo de elasticidade, este foi admitido numericamente igual à inclinação da reta de regressão linear, no gráfico da tensão em função da deformação. O intervalo levado em consideração foi 10% e 50% da carga de ruptura ou da carga prevista, conforme o caso.

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

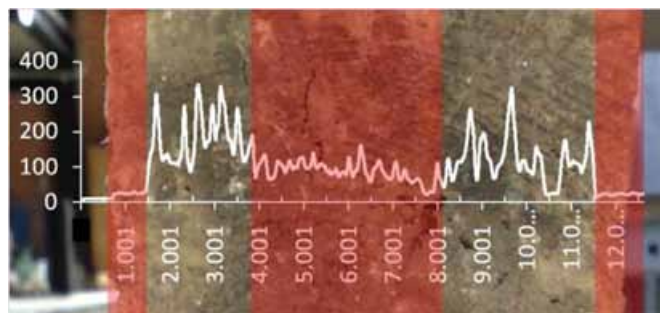
O ensaio do resistógrafo consiste na introdução de uma agulha que perfura um microfuro, a uma velocidade constante, medindo a resistência que a madeira tem à rotação e à progressiva penetração da agulha. À medida que a agulha vai penetrando ao longo da peça de madeira, o perfil é registrado em papel e gravado na memória interna do equipamento para posterior análise pelo computador. Este registro efetuado pelo resistógrafo, permite detectar zonas da madeira com variações de densidade e de resistência devido a descontinuidades físicas, podendo estas ser devido a fendas ou outras anomalias e até mesmo à degradação devido a agentes xilófagos, Valle et al (2006).

Na Figura 5, pode ser observado um exemplo da saída de dados do resistógrafo, sendo estes relativos à seção presente na mesma figura. A largura da peça examinada é de 11 cm, indicada na escala do eixo das

abscissas, enquanto o eixo das ordenadas apresenta o índice de penetração do pino quando perfurada a madeira (VALLE et al.,2006). Na faixa que está com destaque em vermelho, é possível ver que em 4 cm de penetração no interior do elemento, apresenta um índice de penetração médio de perfuração mais baixa que o restante da seção. Esta redução do índice de penetração é o parâmetro que relaciona à densidade da madeira, a resistência e módulo de elasticidade da madeira.



a – Aparelho resistógrafo



b – Seção transversal analisada

Fonte: Valle et al (2006)

Figura 5 – Aparelho resistógrafo e vista de uma seção transversal analisada

O ensaio foi realizado nos CPs prismáticas. A penetração da broca foi feita na direção do comprimento do CP, isto é, na direção paralela às fibras. O ensaio foi realizado nos 30 CPs (6 de cada as 5 espécies de madeira), obtendo-se o índice de penetração médio de cada CP.

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os valores médios de umidade das cinco espécies de madeiras. Todas foram secas e estabilizadas à umidade relativa do ar.

Tabela 1- Média do teor de umidade das cinco espécies de madeira

Espécie	Teor de umidade (%)
Angelim-pedra	11,90
Sucupira	11,40
Cumaru	11,40
Parajú	11,00
Pinus	11,10

Na tabela 2 é apresentado para cada espécie de madeira e cada CP: a densidade aparente, a resistência a compressão paralela, o módulo de elasticidade e o índice de penetração médio do resistógrafo (IP).

Tabela 2- Resultados de ensaio destrutivo e não destrutivo

Tipo de madeira	IP	Densidade (kg/m ³)	f _{co} (MPa)	E _{co} (MPa)
Angelim1	80	892	79.47	31948
Angelim2	78	891	71.81	26537
Angelim3	70	870	76.36	31697
Angelim4	56	847	77.83	31505
Angelim5	51	842	78.36	26456
Angelim6	71	839	76.85	30697
Cumaru1	69	865	103.16	41308
Cumaru2	93	874	101.15	42117
Cumaru3	84	888	100.86	41744
Cumaru4	78	878	107.76	39758
Cumaru5	67	870	108.92	37658
Cumaru6	71	869	101.16	40756
Paraju1	91	971	88.41	41992
Paraju2	90	1004	90.41	44133
Paraju3	87	1022	87.38	42928

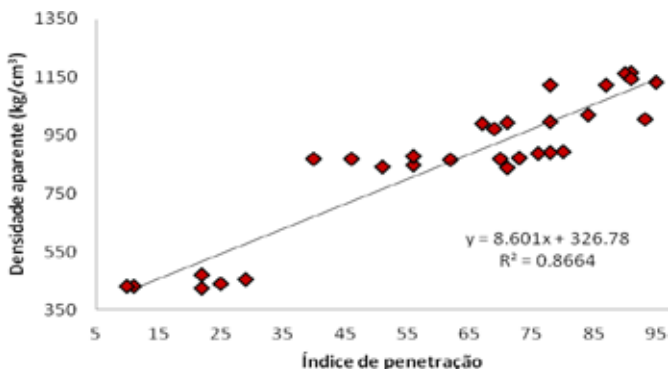
Paraju4	78	995	85.98	38718
Paraju5	95	990	87.23	39408
Paraju6	91	994	87.38	40277
Sucupira1	62	1164	86.43	38366
Sucupira2	73	1163	80.71	31040
Sucupira3	76	1123	81.53	28843
Sucupira4	56	1123	69.93	18570
Sucupira5	40	1133	56.33	20837
Sucupira6	46	1145	65.74	22397
Pinus1	11	432	37.67	16897
Pinus2	22	426	37.73	18469
Pinus3	10	431	30.88	17850
Pinus4	25	439	38.13	20020
Pinus5	29	456	47.73	21469
Pinus6	22	471	30.88	19850
Máximo		1164	108.92	44133
Mínimo		426	30.88	16897

Com estes resultados dos ensaios destrutivos e o índice de penetração médio de cada CP, foram confeccionados os seguintes gráficos: índice de penetração x densidade aparente (figura 6), índice de penetração x resistência a compressão (figura 7) e índice de penetração x módulo de elasticidade (figura 8).

Na tabela 3 é mostrado o índice de penetração médio das cinco espécies ensaiadas.

Tabela 3 – Índice de penetração média e características físicas e mecânicas médias das espécies ensaiadas
Figura 6- Relação entre densidade aparente e o índice de penetração.

Tipo de madeira	IP	Densidade (kg/m ³)	f _{co} (MPa)	E _{co} (MPa)
Angelim	67.67	864	76.78	29807
Cumaru	77.05	1027	103.84	40557
Paraju	88.67	1142	87.80	41243
Pinus	19.83	442	37.17	19093
Sucupira	58.83	874	73.45	26675



No gráfico da figura 6 pode-se observar que a correlação entre o índice de penetração e a densidade aparente é altamente significativa tendo um coeficiente de regressão $R^2 = 86,64\%$. Gouvêa et al. (2010) encontram valores de R^2 igual a 74% para madeira de clones de Eucalyptus. A correlação encontrada com uma maior significancia é devido a grande variação da densidade da madeira, de 426 kg/m³ a 1164 kg/m³. Isto indica que o aparelho resistógrafo tem uma boa precisão quanto deseja-se estimar a densidade da madeira.

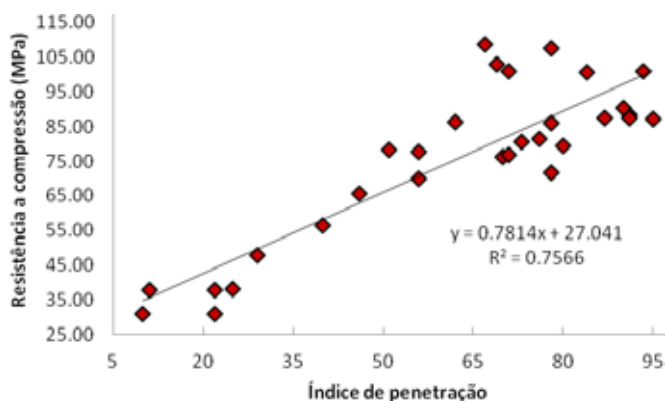


Figura 7 – Relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e o índice de penetração.

Observando-se a Figura 7, nota-se que a correlação entre o índice de penetração obtida pelo resistógrafo e a resistência à compressão paralela às fibras é altamente significativa, com um coeficiente de correlação R^2 igual a 75,66 %. É importante ressaltar que a faixa de variação das resistências da madeira é bastante ampla (30.88 MPa. a 108.92 MPa.).

Na Figura 8 é apresentado um gráfico entre o índice de

penetração do resistógrafo x o módulo de elasticidade paralelo às fibras. A correlação entre as duas variáveis mostra uma boa significância com um R^2 igual a 75,68 %. Também é importante indicar que a faixa de validade desta regressão é relativamente ampla (16897 MPa. a 44133 MPa.).

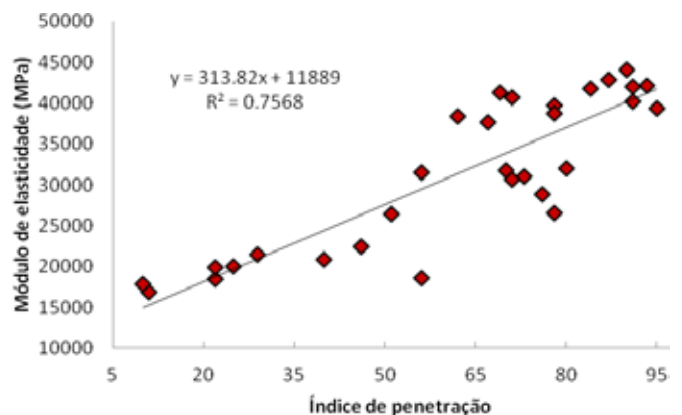


Figura 8 - Relação entre o módulo de elasticidade e o índice de penetração.

CONCLUSÕES

Com base nas condições experimentais em que este trabalho foi realizado, podem-se inferir as seguintes conclusões:

- O resistografo é um aparelho muito eficiente para estimar a densidade aparente, resistência a compressão e o módulo de elasticidade paralela às fibras da madeira.
- As equações para determinar estas características são dadas pelas equações:

$$Dap = 327 + 8,6x(IP), \quad (R^2 = 86,64\%), \quad \text{válido para } Dap \text{ (426 kg/m}^3 \text{ a 1164 kg/m}^3\text{)}.$$

$$fco = 27 + 0,78x(IP), \quad (R^2 = 75,66\%), \quad \text{válido para } fco \text{ (30.88 MPa a 108.92 MPa)}.$$

$$Eco = 11889 + 313,82x(IP), \quad (R^2 = 75,68\%), \quad \text{válido para } Eco \text{ (16897 MPa a 44133 MPa)}.$$

5. Agradecimentos

À FAPEMIG e a CAPES pela ajuda financeira na forma

de auxílio financeiro e bolsa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO –ABENDI. Disponível em: <http://www.abende.org.br/analise_vibracoes.html> Acesso em: 15 out. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7190:1997, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Projeto de Estruturas de Madeira. NBR-7190:1997. Rio de Janeiro: ABNT, 107p. 1997

CALDEIRA, B. R. P. P. Caracterização das propriedades físico-mecânicas e determinação da percentagem de cerne da madeira de *Tectona grandis*. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Dissertação (Graduação). 84p., 2004.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. *Scientia forestalis*. n. 65, p. 102-113, jun. 2004.

GOUVÊA; A. F. G.; TRUGILHO; P. F.; GOMIDE; J. L.; SILVA; J. R. M.; ANDRADE; C. R.; ALVES; I. C. N. Determinação da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 35, n. 2, p.349-358, 16 dez. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. *Madeiras Tropicais Brasileiras*. Brasília: IBAMA-LPF, 1997. 152p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Fichas de Características das Madeiras Brasileiras*. 2ª ed. São Paulo: IPT, 1989. 418p.

LIMA, J. T.; SARTÓRIO, R. C.; TRUGILHO, P. F.; CRUZ,

C. R.; VIEIRA, R. S. Sartório. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 75, p.85-93, ago. 2007.

RINN, E, SCHWEINGRUBER, E.; SCHAR, E. Resisitograph and X-ray density charts of wood: Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, vol. 4, p.303-311. 1996.

VALLE A., BRITES R.D. e LOURENÇO P.B. Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edificações antigas: caso de estudo. 10º ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA –, 10, 2006. *Anais...* São Paulo: S EBRAMEM, 2006. 1 CD-ROM.