

COLAGEM E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE PINHEIRO TRATADA TERMICAMENTE

B. Esteves¹, H. Pereira²

¹Centro de Estudos em Educação, Tecnologias e Saúde (CI&DETS). Departamento de Engenharia de Madeiras, Escola Superior de Tecnologia. Instituto Politécnico de Viseu.

²Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.



RESUMO

*O tratamento térmico da madeira de pinheiro (*Pinus pinaster*) foi feito na ausência de oxigénio numa autoclave com uma mistura de ar sobreaquecido e saturado durante 2-12 horas à temperatura de 200 °C. Determinou-se a resistência à colagem, a molhabilidade e a dureza, o módulo de elasticidade e a tensão de rotura por flexão estática, a humidade de equilíbrio e a estabilidade dimensional. Verificou-se que a resistência à colagem diminuiu com a intensidade do tratamento térmico. Observou-se uma diminuição da molhabilidade da superfície da madeira o que contribuiu para uma diminuição da resistência à colagem. O MOE praticamente não foi afectado enquanto a tensão de rotura diminuiu atingindo cerca de menos 30%. A dureza da madeira tratada diminuiu quer na secção tangencial, quer na radial atingindo uma redução máxima de cerca de 30%. A humidade de equilíbrio diminuiu e a estabilidade dimensional aumentou com o tratamento térmico.*

1- INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos apresentados como tratamento térmico para melhorar as propriedades da madeira foram feitos por Stamm et al. (1946), mas este processo apelidado de *Staybwood* acabou por não ter sucesso comercial. Mais recentemente, a escassez de madeiras de qualidade e as preocupações ambientais incentivaram a procura de métodos ambientalmente benignos que atribuíssem um maior valor acrescentado à madeira, nomeadamente através do aumento da durabilidade e da estabilidade dimensional. O tratamento térmico da madeira surgiu como resposta a estas preocupações.

Este tratamento permite diminuir a humidade de equilíbrio da madeira (Jämsä and

Viitaniemi 2001; Metsä-Kortelainen et al 2006; Esteves et al 2007a, 2007b), melhorar a estabilidade dimensional (Kollmann and Sneider 1963; Viitaniemi et al 1997; Esteves et al 2007a, 2007b) e a resistência a vários tipos de biodegradação (Kim et al 1998; Hakkou et al 2006; Esteves et al 2006). As alterações cromáticas resultantes deste tipo de tratamento (Mitsui et al 2001; Esteves et al 2008) podem também ser uma vantagem para espécies com tonalidades menos apelativas. No entanto, os tratamentos térmicos podem provocar perda de resistência mecânica (Kim et al 1998; Kubojima et al 2000; Esteves et al 2007a, 2007b), o que inviabiliza algumas utilizações, nomeadamente como material estrutural.

A madeira tratada termicamente tem diversas aplicações, principalmente em ambientes exteriores ou húmidos, das quais se destacam: pavimentos, fachadas, equipamentos de lazer e parques infantis, cercaduras, barreiras sonoras, saunas, etc. Na Europa, existem já vários processos para tratamentos térmicos de madeira, alguns em fase de instalação e outros já em plena produção, que utilizam diversas espécies, com condições operatórias que dependem da espécie e da utilização final do produto. Todos os processos tratam madeira serrada a temperaturas entre 160°C e 260°C. As diferenças entre eles consistem nas condições operatórias, tais como a presença de oxigénio ou azoto, vapor, processos húmidos ou secos, uso de óleos, etc. Uma descrição dos principais processos e propriedades pode ser encontrada em Esteves et al (2009).

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Tratamento

Uma placa de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton) com 2 metros de comprimento, 20 mm de espessura e cerca de 300 mm de largura foi cortada de uma árvore e seca ao ar até um teor de humidade de equilíbrio de aproximadamente 10%. As amostras para os ensaios mecânicos e para a determinação da estabilidade dimensional foram cortadas da placa e acondicionadas a 20°C e 65% de humidade relativa durante um período de três semanas. Após a determinação da humidade de equilíbrio procedeu-se ao tratamento térmico da madeira. O tratamento foi feito na ausência de oxigénio numa autoclave com uma mistura de ar sobreaquecido e saturado durante 2, 4, 6, 8 e 12 horas, à temperatura de 200 °C.

2.2 - Humidade de equilíbrio e estabilidade dimensional

Para a determinação da humidade de equilíbrio e da estabilidade dimensional utilizaram-se três amostras cúbicas com dimensões de 20 x 20 x 20 mm³ para cada tratamento e três amostras de madeira não tratada. As amostras foram colocadas numa

estufa a 20°C com humidade relativa de, sucessivamente, 35%, 65% e 85%. As amostras permaneceram pelo menos três semanas em cada humidade relativa. Fim do este período mediu-se a massa e as dimensões das amostras nas direcções radial, tangencial e transversal. Determinou-se a humidade de equilíbrio e a estabilidade dimensional das amostras tratadas que foi calculada como Anti Shrinking Efficiency (ASE) que dá uma percentagem de aumento de estabilidade em relação à madeira não tratada de acordo com a fórmula seguinte para 35% de humidade relativa.

$$ASE_{35} (\%) = \left(\frac{S_{nt} - S_t}{S_{nt}} \right) \times 100$$

onde S_{nt} e S_t representam a variação dimensional entre 35% e 0% de humidade relativa para a madeira não tratada (nt) e tratada (t). A variação dimensional é determinada pela fórmula

$$S(\%) = \left(\frac{L_{35\%} - L_{0\%}}{L_{35\%}} \right) \times 100$$

com L representando a dimensão da peça ASE35, ASE65 e ASE85 correspondem, respectivamente, à estabilidade a 35%, 65% e 85% de humidade relativa.

2.3 - MOE e tensão de rotura

O módulo de elasticidade aparente (MOE) e a tensão de rotura por flexão estática foram determinados com amostras de 340x20x20 mm³ (axial x radial x tangencial) por um ensaio a três pontos numa máquina de ensaios Servosys ME-405/5. As medições do MOE foram feitas usando uma velocidade constante de 0,3 mm/min e para a tensão de rotura a velocidade foi estimada de modo a causar a rotura em cerca de 3 min. As duas propriedades foram determinadas de acordo com NP-619 com:

$$MOE(N/mm^2) = \frac{\Delta F \times L^3}{\Delta x \times 4 \times b \times h^3} \times 9.8$$

$$\text{Tensão de rotura (MPa)} = \frac{3F \times L}{2 \times b \times h^{10/6}} \times 9.8$$

onde F é a carga de rotura medida em N, $\frac{\Delta F}{\Delta x}$ o declive da zona elástica em N/mm, L o comprimento do braço, h a altura e b a largura, todos expressos, em mm.

2.4 - Densidade

Quatro amostras cúbicas com dimensões de aproximadamente $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$, de madeira tratada e não tratada foram acondicionadas à temperatura de 20°C e humidade relativa de 65% durante 4 semanas. A densidade da madeira a 65% de humidade relativa foi determinada pela medição das dimensões e da massa das amostras.

2.5 - Dureza

A dureza foi determinada de acordo com a norma ISO 3350 (1975), com pequenas alterações. A força medida foi a necessária para penetrar uma esfera de aço de 11,28 mm em madeira até um quarto do seu diâmetro (2,82 mm), em vez da metade como mencionado na norma devido à madeira de pinheiro não tratada ser demasiado branda.

2.6 - Resistência à colagem

A resistência à colagem com colas de acetato polivinílico (PVA) determinou-se para a madeira não tratada e tratada de acordo com a norma 13354 DS/CEN/TS.

2.7 - Molhabilidade

Determinou-se a molhabilidade da madeira com e sem tratamento pelo método do ângulo de contacto usando um goniómetro. Cortaram-se amostras com cerca de 5 mm de espessura das secções radial e tangencial. Colocou-se uma gota de 10 μl sobre a superfície do provete e determinou-se o ângulo θ entre a superfície da amostra de madeira e o líquido 10 s após a adição da gota.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 apresentam-se os valores da humidade de equilíbrio da madeira sem tratamento e da madeira tratada para as humidades relativas de 35%, 65% e 85%.

Verificou-se que, como esperado, a humidade de equilíbrio diminuiu com o aumento do tempo de tratamento. A maior diminuição ocorreu logo ao fim de duas horas de tratamento. Por exemplo, para 35% de humidade relativa a humidade de equilíbrio diminuiu de 8,3% para 5,9% correspondendo a uma diminuição de 29%. Com o aumento da duração do tratamento, a humidade de equilíbrio foi diminuindo, atingindo um valor mínimo para tratamentos entre 8 e 12 horas.

Tabela 1 – Variação da humidade de equilíbrio com o tratamento térmico

Tempo (h)	H(%)		
	35%	65%	85%
0	8.3	12.6	18.4
2	5.9	9.5	15.1
4	5.7	9.3	14.9
6	5.4	8.8	14.4
8	5.2	8.3	13.3
12	5.2	8.4	13.4

À medida que diminuiu a humidade de equilíbrio, aumentou a estabilidade dimensional, como mostram os resultados da Tabela 2. Mesmo com apenas 2 horas de tratamento, o ASE35 foi superior a 60% quer na direcção radial, quer na tangencial. O ASE65 e ASE85 apresentaram valores inferiores, de aproximadamente 40% e 20%, respectivamente. Os valores de ASE são maiores na direcção tangencial do que na direcção radial, na grande maioria dos casos, correspondendo a um maior aumento da estabilidade dimensional naquela direcção. No entanto há que ter em conta que os inchamentos são maiores na direcção tangencial, para madeira sem e com tratamento térmico. Resultados semelhantes foram obtidos por Tjeerdsma et al. (1998) para a madeira de faia, videiro, espruce, pinho casquinha e pinho de Monterey. A estabilidade dimensional e a proximidade entre a retracção radial e tangencial são propriedades importantes para a utilização de madeiras no exterior. Uma vez que as melhorias na estabilidade dimensional foram superiores na direcção tangencial, as retracções nas direcções radial e tangencial aproximaram-se, ou seja diminui esta

anisotropia, o que constitui uma vantagem para a utilização de madeiras no exterior.

Tabela 2 – Variação da estabilidade dimensional (ASE) com o tratamento térmico

Tempo (h)	ASE(%)					
	Radial			Tangencial		
	35%	65%	85%	35%	65%	85%
2	62	42	24	65	38	15
4	65	47	35	75	47	31
6	65	51	39	74	53	36
8	67	53	30	67	53	32
12	73	55	38	80	62	44

A resistência mecânica da madeira diminui devido ao tratamento térmico. No entanto, o módulo de elasticidade não variou significativamente mesmo para a madeira tratada durante 12h a 200°C (Fig. 1).

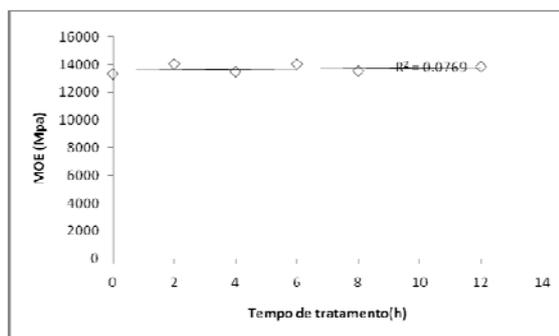


Fig. 1 – Variação do MOE com o tempo de tratamento térmico.

Ensaio realizados por Esteves et al (2007a) mostraram que o MOE apenas diminui nos tratamentos mais severos, pelo que só se verificaria uma diminuição no valor do MOE se se prosseguisse o tratamento por mais tempo ou a uma temperatura mais elevada.

A tensão de rotura por flexão estática diminuiu com o aumento da severidade do tratamento, como pode observar-se na Figura 2. Por regressão linear obteve-se um coeficiente de correlação de 0,59 e verifica-se que a diminuição da tensão de rotura é mais pronunciada para perdas de massa até cerca de 3%. A tensão de rotura diminuiu dos 157 MPa iniciais para cerca de 126 MPa ao fim de 12 horas de tratamento, o que representa uma diminuição de cerca de 19,5%.

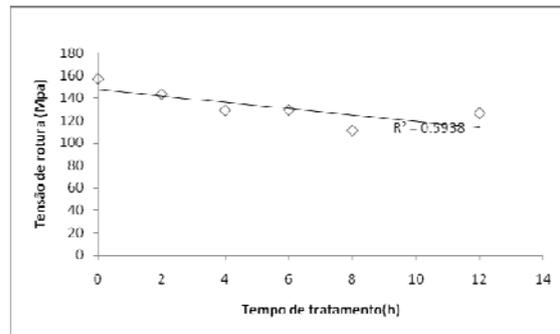


Fig. 2 – Variação da tensão de rotura com o tratamento.

A densidade da madeira diminuiu ligeiramente com o tratamento térmico mas as diferenças foram muito pequenas, passando de 0,60 para 0,55 após 8 horas de tratamento, o que representa uma diminuição de apenas cerca de 9% (Tabela 3).

Tabela 3 – Variação da densidade com o tratamento térmico.

Tempo de tratamento (h)	Densidade
0	0.60
2	0.57
4	0.56
6	0.56
8	0.55
12	0.55

Nos ensaios de resistência à colagem verificou-se que a falha se deu na junta da cola e não na madeira (Figura 3). Deste modo, a diminuição da resistência mecânica não terá tido uma influência directa na resistência à colagem.

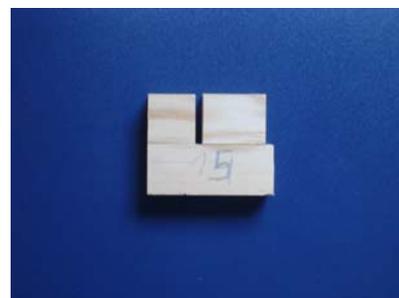


Fig. 3 – Provete usado para a determinação da resistência à colagem

A resistência à colagem diminuiu com o aumento da severidade do tratamento, partindo dos cerca de 250 N e reduzindo para cerca de 100 N o que corresponde a

uma diminuição de 60% da resistência à colagem. Através de uma regressão linear entre a resistência à colagem e o tempo de tratamento obteve-se um coeficiente de correlação de 0,61. Verifica-se, no entanto, por análise da Figura 4, que há um maior decréscimo nas primeiras horas do tratamento e que a partir de um dado momento a resistência à colagem parece manter-se entre os 100-150 N.

Nem todos os autores são unânimes em relação à menor resistência à colagem das madeiras tratadas termicamente. Por exemplo, Pincelli et al (2002) fizeram ensaios com três colas diferentes, polivinílica, ureia-formaldeído e fenol-resorcinol em madeira tratada a temperaturas entre 120-180 °C e concluíram não haver diferenças significativas entre a madeira tratada e não tratada. Estes autores afirmam que os provetes não cederam na linha de cola, mas sim na madeira, pelo que a degradação térmica terá, eventualmente, sido demasiado elevada.

Contrariamente, Bengtsson et al (2003) referem que as colas polivinílicas apresetam uma percentagem de delaminação que as torna desadequadas para a madeira tratada.

Fazendo uma regressão linear entre a resistência à colagem e a perda de massa (Fig. 5) devida ao tratamento térmico, verifica-se que se obtêm um coeficiente de correlação de 0,81.

Ainda assim, e apesar do valor elevado do R^2 , a diminuição da resistência à colagem parece ser maior para perdas de massa abaixo dos 2-3%. Uma das razões poderá ser devido à diminuição da molhabilidade da superfície da madeira.

De facto, verifica-se que mesmo para tratamentos mais suaves com perdas de massa inferiores a 3% há uma grande diminuição da molhabilidade da superfície, como se vê na Figura 6, onde o ângulo de contacto aumenta de cerca de 35° para aproximadamente 70° para perdas de massa de 1%. Estes resultados estão de acordo com a grande diminuição verificada na humidade de equilíbrio da madeira tratada durante apenas duas horas. Como a madeira ficou mais hidrófoba, era de esperar que a molhabilidade diminuísse. A molhabilidade será, portanto, um factor importante na diminuição

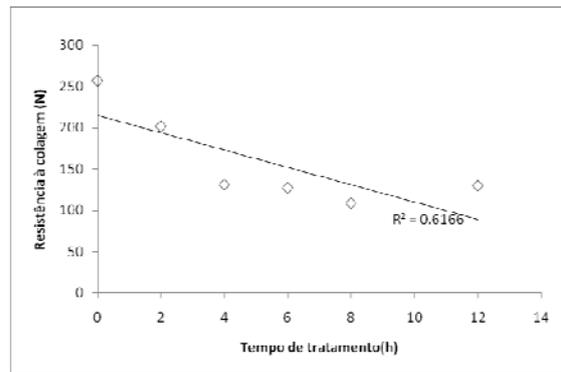


Fig. 4 Variação da resistência à colagem ao longo do tratamento.

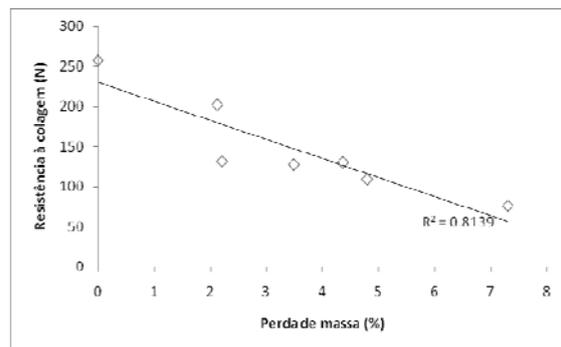


Fig. 5 – Variação da resistência à colagem com a perda de massa.

ção da resistência à colagem para tratamentos mais suaves. À medida que a severidade do tratamento aumenta, outros factores deverão contribuir para a diminuição da resistência à colagem. Não se verificou grande diferença na molhabilidade das superfícies tangencial e radial.

A dureza da madeira também é afectada pelo tratamento térmico. Verificou-se que a dureza diminuiu com o aumento da severidade do tratamento, passando dos cerca de 4600 N para cerca de 3100 N (Fig. 7).

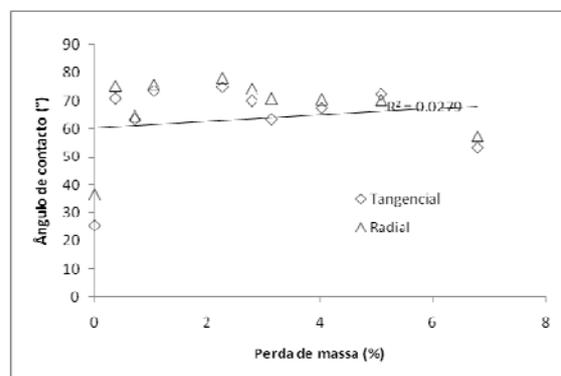


Fig. 6 – Variação do ângulo de contacto com a perda de massa.

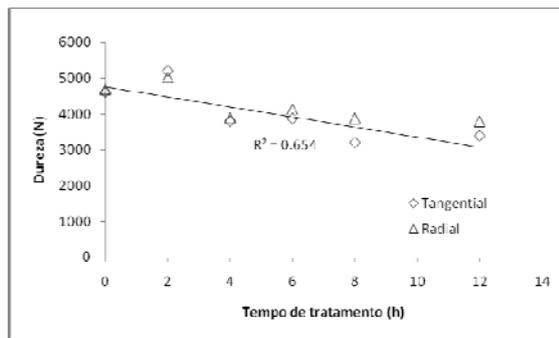


Fig. 7 – Variação da dureza ao longo do tratamento.

À semelhança da resistência à colagem, a dureza diminuiu mais nas primeiras 4 horas do tratamento, estabilizando em seguida num valor próximo de 3100 N. Apesar disso, através de uma regressão linear foi possível obter coeficientes de correlação de cerca de 0,6 quer para a secção tangencial, quer para a radial. Analisando a variação da dureza em relação à perda de massa devido ao tratamento térmico, verificou-se que a diminuição era maior para perdas de massa menores e que para perdas de massa superiores a 3% a continuação do tratamento não conduziu a uma maior diminuição da dureza (Fig. 8).

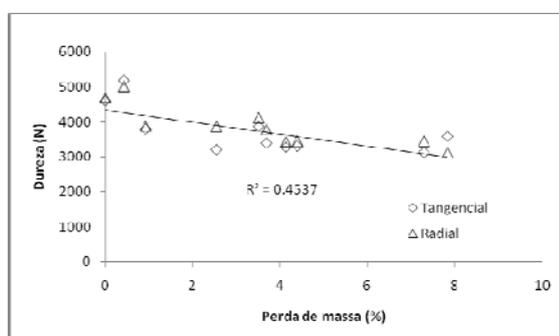


Fig. 8 – Variação da dureza com a perda de massa.

4 - CONCLUSÃO

O tratamento térmico afecta consideravelmente as propriedades da madeira. A humidade de equilíbrio, a molhabilidade, a dureza, a densidade, a resistência à colagem e a tensão de rotura diminuem com o aumento da severidade do tratamento. A estabilidade dimensional aumenta enquanto o MOE não sofre grandes alterações. A resistência à colagem é, provavelmente, influenciada pela

diminuição da molhabilidade da madeira, sobretudo no início do tratamento.

5 - REFERÊNCIAS

- Bengtsson, C. Jermer, J. e Clang, A. 2003. "Glulam of Heat-treated Wood – Delamination Test," In: Abstracts of the First European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium.
- Esteves, B. Domingos, I., Pereira, H. 2007b. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C, *Forest Products Journal*, 57 (1/2), 47-52
- Esteves, B. Velez Marques, A. Domingos, I. e Pereira, H. 2008 Heat induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*. 42(5) 369-384. DOI : 10.1007/s00226-007-0157-2
- Esteves, B. Domingos, I. Velez Marques, A. Nunes, L. e Pereira, H. 2006. Variation of Dimensional Stability and Durability of Eucalypt Wood by Heat Treatment. *ECOWOOD 2006, 2nd International Conference on Environmentally compatible Forest Products*. Fernando Pessoa University, Oporto, Portugal, 185-194.
- Esteves, B. e Pereira, H. 2009. Wood modification by heat treatment: a review, *BioRes*. 4(1), 370-404.
- Esteves, B. Velez Marques, A. Domingos, I. e Pereira, H. 2007a. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood, *Wood Sci Technol* 41: 193-207 DOI : 10 1007/s00226-006-0099-0.
- Hakkou, M. Pétrissans, M. Gérardin, P. E Zou-lalian, A. 2006. Investigation of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood, *Polym Degrad Stab* 91: 393-397
- Jämsä, S. e Viitaniemi, P. 2001. Heat treatment of wood – Better durability without chemicals, *Proceedings of special seminar held in Antibes, France*
- Kim, G. Yun, K. e Kim, J. 1998. Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood, *Material und Organismen* 32 (2): 101-108
- Kollmann, F. e Schneider, A. 1963. On the sorption behaviour of heat stabilized wood, *Holz Roh-Werkst* 21 (3): 77-85

- Kubojima, Y. Okano, T. e Ohta, M. 2000. Bending strength of heat-treated wood, *Journal of Wood Science* 46: 8-15
- Metsä-Kortelainen, S. Antikainen, T. e Viitaniemi, P. 2006. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C, *Holz Roh-Werkst*, Online first. DOI: 10.1007/s00107-005-0063-y
- Mitsui, K. Takada, H. Sugiyama, M. e Hasegawa, R. 2001. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 1 Effect of treatment conditions on the change in colour, *Holzforschung*, 55: 601-605
- Pincelli, A. Brito, J. e Corrente, J. 2002. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*, *Sci Forest* 61: 122-132
- Tjeerdsma, B. Boonstra e M. Militz, H. 1998. Thermal modification of nondurable wood species: improved properties of thermally treated wood, International Research Group on Wood Preservation, document N° IRG/WP 98-40124.
- Viitaniemi, P. Jämsä, S. e Viitanen, H. 1997. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products, United States Patent N° 5678324 (US005678324)