

Tema 4. Floresta, Competitividade e Indústria

Novos métodos de protecção da madeira

Bruno Esteves¹, Helena Pereira²

¹ Centro de Estudos em Educação, Tecnologias e Saúde, ESTV, Instituto Politécnico de Viseu, Av. Coronel José Maria V. de Andrade, Campus Politécnico, 3504-510 Viseu.

Portugal

² Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Tapada da Ajuda
1349-017 Lisboa, Portugal

Tel: +351-232480645, Fax: +351-232424651, Email: bruno@demad.estv.ipv.pt

Resumo

Em Portugal, a preservação de madeiras para a Classe de risco 4 é feita através da impregnação com produtos de elevada toxicidade. O estudo de métodos alternativos de preservação é crítico para as empresas de preservação de madeira, alarmadas pelas limitações contínuas no uso dos produtos químicos. A modificação da madeira é um processo que melhora as propriedades como a resistência à biodegradação, a estabilidade dimensional, a resistência à radiação ultravioleta, entre outras, produzindo um material novo que no fim do ciclo de vida do produto não apresenta um perigo ambiental superior ao da madeira não tratada.

Existem quatro tipos de processos: a modificação térmica, química, da superfície e a impregnação. A modificação térmica é aquela que tem mais sucesso sendo o processo Thermowood o mais utilizado. De entre os outros processos comerciais a acetilação (modificação química) e a furfurilação (modificação por impregnação) também se encontram bem implantados no mercado. De momento ainda nenhum processo de modificação superficial foi industrializado devido ao elevado custo. Neste artigo é feito um resumo dos principais processos de cada tipo de modificação apresentando as melhorias em relação à madeira não tratada, as vantagens e desvantagens de cada processo e a evolução em termos comerciais.

Introdução

A modificação da madeira pretende melhorar algumas propriedades como a resistência à biodegradação e a estabilidade dimensional mas também a resistência à radiação ultravioleta, entre outras. O termo modificação da madeira é apenas aplicado quando as melhorias verificadas na madeira se mantêm ao longo do ciclo de vida do produto. Quando a madeira é tratada com biocidas como, por exemplo, o CCA, as propriedades do material também se mantêm ao longo da sua vida pelo que este tratamento poderia já ser apelidado de modificação. No entanto, este tratamento introduz na madeira, um composto de elevada toxicidade, o que vai contra o objectivo da modificação da madeira. A definição que melhor descreve este tipo de processos é dada por Hill (2006): a modificação da madeira é um processo que melhora as propriedades da madeira durante o seu ciclo de vida, produzindo um material novo que no final do ciclo de vida não apresenta um perigo ambiental superior ao da madeira não tratada. A modificação da madeira pode dividir-se em quatro tipos: modificação química, modificação térmica, modificação de superfície e modificação por impregnação, sendo que destas a modificação de superfície apenas altera as propriedades da superfície da madeira. A maioria dos métodos baseia-se na redução da acessibilidade dos grupos hidroxilo que se encontram sobretudo na celulose e hemiceluloses e que são os principais responsáveis pela higroscopicidade da madeira. Ao bloquear estes grupos, essencialmente os presentes nas hemiceluloses e que se encontram mais acessíveis, a madeira diminui a sua capacidade de absorver água, o que vai ter impacto em várias propriedades da madeira tratada.

O facto de nenhum método de modificação ter vingado no passado prendia-se com a existência em abundância de madeira de elevada qualidade e baixo custo. No entanto, nos últimos anos a produção de madeira durável tem vindo a decrescer e tem havido uma necessidade crescente de materiais sustentáveis o que, aliado ao facto de haver um aumento das restrições na utilização de produtos químicos tóxicos, potenciou o aparecimento de vários processos de modificação com grande sucesso comercial.

Modificação térmica

Os processos de modificação térmica são aqueles que mais têm evoluído em termos comerciais nos últimos anos. O sucesso deve-se provavelmente ao baixo custo de tratamento quando comparado com outras modificações que se baseiam na utilização de compostos químicos que tornam o produto final bastante mais caro.

Os processos de modificação térmica com mais sucesso são cinco: Thermowood (Finlândia), Plato (Holanda), Bois Perdure e Rectification (França) e Oil Heat Treatment

(Alemanha). Os processos desenvolvem-se normalmente em quatro fases: aquecimento, tratamento, arrefecimento e estabilização. As principais diferenças entre os diversos métodos prendem-se com o modo como é feito o aquecimento e com as condições operatórias na fase de tratamento, que ocorre a temperaturas entre os 160-260°C. As condições operatórias dos principais processos encontram-se descritas no Quadro 1.

Quadro 1. Descrição dos principais processos de modificação térmica.

Processos	Descrição
Thermowood	Aumento rápido da temperatura usando calor e vapor até 100°C seguido de um aumento mais suave até 130°C e secagem durante 1 hora. Aumento até à temperatura de tratamento (185-215°C) que se mantém durante cerca de 2-3 horas. Arrefecimento e estabilização.
Plato	Processo em 4 etapas: hidrotermólise, a temperaturas de 160-190°C em condições húmidas e com pressões acima da pressão atmosférica, secagem normal até 10% de humidade, tratamento térmico a seco a temperaturas de 170°-190°C e estabilização.
Bois Perdure	Secagem rápida com vapor e gases de combustão quentes produzidos pela subida na temperatura da madeira e re-injectados na câmara de combustão.
Retification	A madeira com humidade de 12% é tratada numa fase, a temperaturas de 200°C - 240°C com azoto, garantindo um máximo do oxigénio de 2%.
OHT	Tratamento com óleo quente (180-240°C) num recipiente fechado que limita o teor de oxigénio.

As temperaturas elevadas utilizadas na modificação térmica alteram a composição química da madeira, produzindo um novo material com propriedades melhoradas.

A diminuição da humidade de equilíbrio deve-se à menor quantidade de água absorvida pelas paredes da célula em consequência da mudança química com uma diminuição de grupos hidroxilo mas também devido à diminuição da acessibilidade por aumento da cristalinidade da celulose e aumento das ligações cruzadas na lenhina que por sua vez levam a um aumento da estabilidade dimensional (Boonstra and Tjeerdsma 2006). O tratamento melhora a durabilidade de madeira, aumentando a resistência aos fungos, excepto em contacto com o solo, e ligeiramente a insectos, mas tem pouco efeito na resistência contra térmitas. As razões apontadas para a melhoria da resistência aos fungos são sobretudo a transformação das hemiceluloses, que mudam de compostos hidrófilos e facilmente digeríveis para hidrofóbicos, e a diminuição do ponto de saturação das fibras.

O ponto fraco do tratamento é a degradação de algumas propriedades mecânicas. O efeito no MOE é pequeno mas a diminuição da tensão de rotura pode ser significativa. A madeira torna-se mais quebradiça com a deterioração das propriedades de fractura devido à perda de polissacarídeos amorfos. A degradação das hemiceluloses é referida como o factor principal para a perda da resistência mecânica, mas o aumento da cristalinidade pode ter um papel importante. A madeira transforma-se num material mais escuro, com menor molhabilidade e condutividade térmica. A absorção de colas e vernizes é mais lenta do que na

madeira não tratada. Uma revisão sobre as melhorias dos vários processos de modificação térmica foi recentemente publicada por Esteves e Pereira (2009).

Vários estudos têm sido desenvolvidos em Portugal por Esteves e colaboradores sobre o tratamento térmico de madeiras portuguesas, nomeadamente pinheiro e eucalipto. Os valores para as principais propriedades da madeira de pinheiro bravo alteradas pelo tratamento térmico encontram-se resumidos no Quadro 2.

Quadro 2. Alterações verificadas nas propriedades da madeira de pinheiro bravo tratada termicamente.

Propriedade	Alteração	Referência
Humidade de equilíbrio	Redução de cerca de 40%	Esteves et al. (2007)
Estabilidade dimensional	Melhorias de ASE até 70%	Esteves et al. (2007)
Resistência contra fungos	Melhorias até perdas de massa inferiores a 2%	Esteves (2006)
Resistência contra térmitas	Sem melhorias significativas	Esteves (2006)
MOE	Diminuição inferior a 5%	Esteves et al. (2007)
Tensão de rotura	Diminuição até 40%	Esteves et al. (2007)
Molhabilidade	Diminuição mesmo para tratamentos suaves	Esteves (2006)
Dureza	Diminuição com a severidade do tratamento até 30%	Dados não publicados.
Resistência à colagem	Diminuição com a severidade do tratamento	Dados não publicados.
Cor	Cor mais escura com o tratamento	Esteves et al. (2008)

O processo Thermowood é provavelmente o mais bem sucedido na Europa. A primeira fábrica foi criada em Mänttä (Finlândia), mas no final de 2004 havia já doze fábricas. De acordo com Boonstra (2008) produziram-se cerca de 130 800 m³ de madeira tratada termicamente em 2007, representando a madeira tratada pelo processo Thermowood mais de 50%. De acordo com a Finnish Thermowood Association (Ala-Viikari 2008), as vendas de madeira tratada por este processo aumentaram de 18 799 m³ em 2001 para 72 485 m³ em 2007. A maioria da madeira em 2007 (92%) foi vendida na Europa, sendo 19% na Finlândia e 73% noutros países europeus. Este processo foi introduzido recentemente em Quebeque, no Canadá, pela empresa Ohlin Thermo Tech (Shi et al. 2007).

A madeira produzida pelo processo Plato é comercializada pela companhia Plato International que possui uma fábrica com a capacidade de produção de 15 000 m³ localizada em Arnhem (Holanda). Em 2007, de acordo com Boonstra (2008), foram produzidos 7000 m³.

Em França, há dois processos diferentes, o processo Rectification e o Bois Perdure. O processo Rectification foi industrializado em 1997 e a madeira é vendida com a marca Retiwood, mas não existem dados sobre os volumes de madeira tratada e vendida. O processo Bois Perdure pertence à companhia PCI em 2003 abriu uma unidade em St-Ambroise

(Quebeque) e outra em Cacouna (Quebeque). Em 2005 abriu em Dolbeau (Quebeque) uma unidade pertencente à empresa Kisis Technologies.

O processo usado na Alemanha é completamente diferente porque usa o óleo a altas temperaturas. A primeira fábrica, propriedade da companhia Menz Holz, em Reulbach na Alemanha, iniciou-se em Agosto de 2000. De acordo com Boonstra (2008) existem actualmente 3 companhias na Alemanha: a Menz Holz que produziu 800 m³ em 2007, a Thermoholz que produziu 4 000 m³ e a Bad Essen (Hagensieker) que tem a capacidade de produzir 10 000 m³ da madeira tratada mas que em 2007 não estava ainda operacional. Actualmente já se encontra em funcionamento embora não existam estatísticas das quantidades comercializadas.

Modificação química

A maioria dos processos de modificação química existentes baseia-se na reacção entre os grupos hidroxilo da madeira e um reagente químico. Ao substituir alguns grupos hidroxilo da madeira por um composto hidrofóbico, a higroscopicidade diminui conduzindo a um material com propriedades melhoradas.

O principal método de modificação química já em fase comercial é a acetilação com anidrido acético. Outros anidridos de cadeia linear mais comprida também foram testados mas mostraram ser menos eficientes pois apresentavam menor reactividade, sendo esta diminuição proporcional ao aumento de massa molecular. Os anidridos cíclicos também foram testados, mas a redução da higroscopicidade é menor e causam problemas de degradação da madeira para concentrações mais elevadas. Também foram testados outros compostos mas com níveis de eficácia inferiores ou com outros problemas associados como o gás ceteno, ácidos carboxílicos, ácido clórico, isocianatos, epóxidos, aldeídos, acrilonitrila ou beta-propiolactona.

As propriedades melhoradas pela modificação química não são muito diferentes das promovidas pela modificação térmica. A humidade de equilíbrio diminui devido à substituição de alguns grupos hidroxilo pelo que a diminuição é proporcional ao grau de substituição. Em resultado da diminuição da humidade de equilíbrio a estabilidade dimensional aumenta.

A resistência contra fungos aumenta consideravelmente na madeira acetilada mesmo em contacto com o solo. Em relação à resistência contra térmitas apenas se verifica um ligeiro aumento. A madeira tratada mostra alguma resistência em relação aos xilófagos marinhos, mas é ainda susceptível ao ataque, por exemplo, de crustáceos e moluscos. Outra das grandes vantagens da madeira acetilada é a sua resistência aos raios ultravioleta.

Algumas das propriedades mecânicas também são afectadas com este tratamento. Por exemplo a resistência ao corte paralelo ao grão diminuiu e verifica-se uma diminuição ligeira no módulo de elasticidade mas nenhuma mudança na resistência ao impacto ou na rigidez. A resistência à compressão, a dureza, o stress da fibra no limite proporcional, e o trabalho ao limite proporcional aumentam. O módulo de ruptura (MOR) aumenta nas resinosas mas diminuí nas folhosas. Uma vez que a madeira acetilada é bastante mais hidrofóbica que a madeira não tratada, a resistência à colagem é afectada proporcionalmente ao teor de acetilação. O adesivo que melhor se comporta com este tipo de material é o adesivo à base de resorcinol devido a ser uma resina extremamente reactiva e com um elevado número de grupos hidroxilo Rowell (2005).

De acordo com Rowell (2005) foram feitas duas tentativas de comercialização da madeira acetilada, uma nos Estados Unidos (Koppers 1961) e uma na Rússia (Otlesnov e Nikitina 1977) mas os custos eram demasiado elevados. Recentemente, a companhia Titan Wood que foi fundada em 2003 pela Accsys Chemicals PLC iniciou a comercialização de madeira acetilada com a marca Accoya. A unidade de produção em Arnhem (Holanda) produzia cerca de 24 000 m³ de madeira tratada por ano em 2004. Em 2007, a Titan Wood fez um acordo com a empresa chinesa Diamond Wood para a produção de 500 000 m³ de madeira acetilada, acordo esse renovado e aumentado em 2009 para mais 250 000 m³ de madeira Accoya. Recentemente a Titan Wood anunciou ter assinado um acordo com a empresa italiana Safwood para a produção de Accoya na Itália, Suíça e Áustria.

Modificação por impregnação

A modificação por impregnação difere da modificação química pelo facto de não ser a ligação química com os compostos estruturais existentes nas células de madeira que promovem as melhorias das propriedades embora essa ligação possa ocorrer. O funcionamento da modificação por impregnação baseia-se na introdução de um ou vários compostos químicos na parede das células que, ao reagirem, formam um composto que bloqueia o acesso aos grupos hidroxilo, diminuindo desta forma a higroscopicidade da madeira. Existem principalmente dois mecanismos: a impregnação com um monómero e subsequente polimerização ou a introdução de um material solúvel que se torna depois insolúvel após tratamento.

Os primeiros tratamentos basearam-se na utilização de resinas como PF, MF, MMF ou UF, mas apesar de algumas melhorias o elevado preço das resinas não permitiu a industrialização destes processos. Uma das resinas que vingou e que chegou recentemente ao mercado foi a 1,3-dimetilol-4,5-dihidroxietileno-ureia (DMDHEU), vendida com a marca

Belmadur pertencente à empresa BASF. Esta resina, ao contrário das anteriores, foi criada para a indústria têxtil e embora os primeiros ensaios não tenham tido muito sucesso, ao longo do tempo foram surgindo novos métodos de cura e novos catalisadores.

O processo Indurite surgiu na Nova Zelândia numa tentativa de promover o pinho local (*Pinus radiata*), melhorando a dureza e estabilidade da madeira. Após testar vários açúcares, o processo viria a utilizar uma mistura de maltodextrina com resinas de melamina num sistema aquoso com a adição de um biocida e de um catalisador. A reacção entre a melamina e a maltodextrina produz um polímero que não é lixiviado. O processo era inicialmente propriedade da empresa Wood Hardening Technologies Limited (WHTL) mas, após várias alterações, é hoje comercializado pela Osmose, do Reino Unido.

O processo de modificação por impregnação que mais tem evoluído nos últimos anos é no entanto a furfurilação. Este processo de modificação da madeira pode ter um futuro prometededor, uma vez que o álcool furfurílico pode ser obtido através dos produtos secundários da produção do bioetanol, e o preço deste composto químico deverá baixar no futuro.

À semelhança da modificação térmica e química, a impregnação com álcool furfurílico conduz a uma diminuição da humidade de equilíbrio e a um aumento da estabilidade dimensional da madeira, sendo este aumento proporcional ao aumento de massa (WPG). Por exemplo, segundo Lande et al (2004) o ASE do *Pinus sylvestris* com WPG de 32% e de 47% era de 50% e 70%, respectivamente. O aumento do WPG acima deste nível não melhorou significativamente a estabilidade dimensional. Em relação à durabilidade a madeira furfurilada é resistente aos fungos da podridão castanha e branca mesmo para aumentos de massa baixos (aproximadamente 25%). A resistência contra térmitas depende do ganho de massa. Por exemplo Hadi et al. (2005) trataram por furfurilação madeira de *Pinus sylvestris*, *Agathis dammara* e *Paraserianthes falcataria* com três níveis diferentes, baixo (15-17%), médio (40-45%) e elevado (99-160%). Concluíram que a madeira com menor nível de protecção estava pouco protegida mas as outras eram altamente resistentes às térmitas quer de madeira seca quer húmida. A madeira furfurilada é muito resistente aos xilófagos marinhos o que não acontece com outros tipos de madeira modificada. Em relação às propriedades mecânicas, a que mais aumenta é a dureza Brinell que aumentou mais de 100% para a madeira tratada com 92% de ganho de massa (Epmeier et al. 2004). Por outro lado, a resistência ao impacto em ensaios de flexão é afectada pelo tratamento; Lande et al. (2004) relataram uma diminuição de 57% com *Pinus strobus* com aproximadamente 70% WPG e Epmeier et al. (2004) uma diminuição mais elevada (aproximadamente 75%) para 48% WPG.

A madeira tratada por este método é ligeiramente mais resistente às condições climáticas do que a não tratada.

A primeira unidade semi-industrial para produção de madeira tratada com álcool furfurílico foi criada em Porsgrunn (Noruega), mas a primeira unidade de produção à escala comercial foi construída em Herøya, em 2004, e a madeira tratada comercializada sobre a marca Kebony. No entanto, a capacidade da produção era inferior a 3 000 m³/ano. A crescente utilização da madeira furfurilada em diversos mercados europeus levou à projecção de uma nova unidade num futuro próximo, com uma capacidade de produção superior a 20 000 m³/ano.

Vários outros processos de modificação por impregnação foram testados com resultados aceitáveis, mas não foram até ao momento comercializados, como por exemplo: tratamento com soluções aquosas de ácido maleico e glicerol, anidrido maleico e poliglicerol, N-metilacrilamida ou compostos de silício. Estes últimos têm sido bastante estudados envolvendo vários compostos como silanos inorgânicos, silicatos e silicones.

Modificação da superfície

A modificação da superfície difere dos outros tipos de modificação por alterar essencialmente as propriedades da superfície da madeira, sobretudo a resistência à degradação pela luz solar e condições climáticas (*weathering*) e as condições de aderência.

Os principais métodos de modificação da superfície e as respectivas aplicações encontram-se descritos no Quadro 3, adaptado de Hill (2006). O principal problema de todos estes métodos, de acordo com Hill (2006), prende-se com o elevado custo, o que leva a pensar que nenhum método venha a ser utilizado em grande escala num futuro próximo. De entre os diversos métodos, a modificação enzimática no sentido de promover a colagem da madeira sem a utilização de resinas tem algumas potencialidades, mas apenas se o preço das resinas subir significativamente e ao mesmo tempo baixar o custo da activação enzimática.

Quadro 3. Aplicações das principais modificações de superfície.

Tipos de Modificação	Aplicações
Modificação química	Resistência ao <i>weathering</i> , compatibilização
Modificação química com reagentes bifuncionais	<i>Grafting</i> de polimeros, Autocolagem, Resistência ao <i>weathering</i>
Termoplasticização da superfície	Autocolagem
Agente de ligação	Compatibilização
Activação química	Autocolagem
Activação enzimática	Autocolagem
Descarga de plasma e de corona	Compatibilização, Resistência ao <i>weathering</i>

Conclusão

A modificação da madeira, com a comercialização de vários processos, tem provado que está aqui para ficar. As quantidades de madeira tratada têm crescido exponencialmente pelo que a madeira modificada poderá, num futuro próximo, vir a substituir a madeira tratada com biocidas. Nas utilizações mais nobres a madeira modificada apresenta já uma considerável cota do mercado principalmente nos países nórdicos.

Quadro 4. Principais vantagens e desvantagens dos vários processos de modificação.

Processos	Vantagens	Desvantagens
Modificação térmica	Não utilização de qualquer químico Preço final	Degradação das propriedades mecânicas Degrada-se em contacto com o solo. Cor castanha escura
Modificação química (Acetilação)	Resistente a fungos em contacto com o solo. Resistente aos raios ultravioleta Não atribui cor à madeira	Uso de grandes quantidades de químicos Processo mais caro
Modificação por impregnação (Furfurilação)	Resistente a fungos em contacto com o solo. Preço do composto químico menor que o da acetilação. Resistente a xilófagos marinhos. Ligeiramente resistente aos raios ultravioleta	Uso de maiores quantidades de químicos que a modificação química Cor castanha escura

A escolha do método a utilizar vai depender da utilização final a dar à madeira de acordo com as vantagens e desvantagens de cada um, as quais podemos observar no quadro 4. Por exemplo a madeira acetilada é ideal para a fabricação de aros de portas e janelas pois além da boa estabilidade dimensional é bastante resistente à radiação ultravioleta. Ao contrário a modificação térmica é melhor para utilizações sem função estrutural em que uma grande quantidade de madeira é necessária devido ao seu baixo custo quando comparada com os outros tipos de madeira modificada.

De entre os vários tipos de modificação, a térmica é aquela que tem actualmente mais sucesso sendo o processo Thermowood o mais utilizado. Dos processos de modificação química apenas a acetilação logrou atingir a comercialização. Vários processos de modificação por impregnação são comercializados, Indurite, Belmadur e Furfurilação sendo este último o que apresenta mais potencialidades no futuro. Dos processos de modificação superficial apenas a modificação enzimática apresenta algumas potencialidades no futuro.

Referências bibliográficas

Ala-Viikari (2008). “ThermoWood®: Situation report, ThermoWood® Concept,” In: 5th European TMT-Workshop, Dresden.

Boonstra, M. (2008). “A two-stage thermal modification of wood” Ph.D. Thesis in Applied Biological Sciences: Soil and Forest management. Henry Poincaré University-Nancy, France.

Boonstra, M., Tjeerdsma, B. (2006). “Chemical analysis of heat-treated softwoods,” Holz Roh-Werkst. 64, 204-211.

Epmeier, H., Westin, M., Rapp, A. (2004) “Differently modified wood: Comparison of some selected properties”, Scandinavian Journal of Forest Research, 19(suppl 5):31-37.

Esteves, B. (2006). “Melhoramento Tecnológico por Modificação Térmica de Madeiras Portuguesas”. Tese de Doutorado em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior de Agronomia.

Esteves, B., Pereira, H (2009) “Wood modification by heat treatment: a review”, BioRes. 4(1), 370-404.

Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., Pereira, H (2007) “Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood”. Wood Science and Technology.41:193-207. DOI : 10.1007/s00226-006-0099-0.

Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., 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

Hadi, Y., Westin, M., Rasyid, E. (2005) “Resistance of furfurylated wood to termite attack”, Forest Products Journal, 55 (11):85-88.

Hill, C. (2006). “Wood Modification-Chemical, Thermal and Other Processes”, Wiley Series in Renewable Resources, John Wiley & Sons, Ltd.

Koppers’ Acetylated Wood. (1961). Dimensionally stabilized wood. New Materials Technical Information No. (RDW-400) E-106.

Lande, S., Westin, M., Schneider, M. (2004). “Properties of furfurylated wood”. Scandinavian Journal of Forest Research, 19(Supp.5), 22-30.

Otlesnov, Y., Nikitina, N. (1977). “Trial operation of a commercial installation for modification of wood by acetylation”. Latvijas Lauksaimniecības Akadēmijas Raksti 130:50–53.

Rowell, R. (2005). “Chemical Modification of Wood”. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, and Department of Biological Systems Engineering, University of Wisconsin, Madison, WI

Shi, J., Kocaefe, D., Zhang J. (2007). “Mechanical behaviour of Quebecwood species heat-treated using ThermoWood process,” Holz Roh-Werkst 65, 255-259.