

SOLDAGEM DA MADEIRA

Marcos Theodoro Müller¹, Rafael Rodolfo de Melo², Diego Martins Stangerlin²,
Clovis Roberto Haselein³

Resumo: O termo “wood welding” designa o que pode ser definido como “soldagem da madeira”. Esse novo processo, que promove a união de peças de madeira sem o uso de adesivos ou qualquer outro material adicional, desperta interesse crescente no meio acadêmico, embora ainda esteja em fase laboratorial. A soldagem por fricção linear, induzida por vibração mecânica, consolida a união de superfícies planas de madeira. O fenômeno da soldagem ocorre em um intervalo de tempo inferior a 10 segundos, com a temperatura nas superfícies friccionadas alcançando 170 °C, e a conseqüente fusão da lignina e da hemicelulose, que então derretem e escoam. O processo determina o descolamento de células da madeira, levando à formação de uma rede de fibras entrelaçadas, imersa em material fundido, que, após o resfriamento, se solidifica. Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura evidenciam uma reorganização físico-química na região da junta. Essa nova composição de células/fibras descoladas das duas superfícies, entrelaçadas em rede no interior de uma matriz de material polimérico fundido, principalmente lignina, estabelece na interface de soldagem uma ligação de considerável resistência.

Palavras-chave: wood welding; tecnologia de soldagem da madeira; fusão da madeira.

WOOD WELDING

Abstract: The term "wood welding" designates what can be defined as "welding of wood surfaces". This new process, that it provides the joint of wood pieces without the use of adhesives or any other additional material, provokes growing interest in the academic environment, although it is still in laboratorial state. Linear friction welding induced by mechanical vibration yields welded joints of flat wood surfaces. The phenomenon of the welding occurs in less time than 10 seconds, with the temperature in the rubbed surfaces reaching 170 °C, and the consequent change of state of the lignin and hemicelluloses, that

¹ Engenheiro Civil, M. Sc. em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria. Rua Santos Dumont, 685, CEP 96020-380, Pelotas, RS <marcosthemuller@msn.com>.

² Engenheiro Florestal, M. Sc., Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. Caixa Postal 04357, CEP 70919-970, Brasília, DF <rrmelo2@yahoo.com.br; diego_stangerlin@yahoo.com.br>.

³ Engenheiro Florestal, Ph.D., Professor Associado do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, Bairro Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria, RS <haseleic@ccr.ufsm.br>.

then melt and flow. The process results in the detachment of wood cells, and in a formation of a fibers entanglement network immersed in a matrix of molten material which then solidifies. Scanning electron microscopy micrographs obtained shows a considerable physic-chemical reorganization in the bulk of the joint. This new composition of detachment wood cells/fibers of the two surfaces, a entanglement network immersed in a matrix of molten polymeric material, mainly melted lignin, yields in the interface of the welding a bond of considerable strength.

Keywords: wood welding joints; wood welding technology; wood fusion.

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais vantagens do uso da madeira é a relativa facilidade em seccionar-se esse material em partes menores e, posteriormente, juntá-las em novo arranjo para alguma aplicação específica.

No final da década passada (anos 90), a Escola Suíça de Engenharia para a Indústria da Madeira (SWOOD), em Biel, desenvolveu projetos com tecnologias que faziam uso da fusão de termoplásticos entre duas superfícies de madeira, como forma de efetuar o derretimento de material polimérico aderente e de produzir ligações entre as peças. No decorrer de pesquisas que tinham por objetivo otimizar as tecnologias de fusão termoplástica, em experimentos que se realizavam no laboratório da SWOOD, cientistas testaram a inserção e a fusão de material termoplástico entre duas superfícies planas de madeira. Um deles esqueceu de inserir o composto polimérico entre as peças e o teste em equipamento de fricção linear foi realizado nessas condições. Surpreendentemente, a madeira soldou. Descobriu-se, através dessa forma casual, algo até então inusitado para a madeira.

Embora a soldagem dos metais seja uma prática que remonta à Antiguidade, a soldagem da madeira realmente é um processo novo, pode-se dizer, recém descoberto. Atestou-se que é possível unir peças de madeira, sob determinadas condições, com a ligação de suas superfícies de contato pelo fenômeno físico-químico da soldagem, sem o uso de qualquer outro material adicional. Percebeu-se ainda a capacidade que a madeira apresenta para ser soldada através da utilização dos mesmos princípios fundamentais desse processo em geral, ou seja, pelo aquecimento do local da junta para permitir a fusão dos elementos, e uso de pressão para a íntima aproximação das superfícies, de forma a viabilizar as ligações físico-químicas necessárias.

O presente trabalho tem por objetivo revisar os primeiros resultados publicados na literatura a respeito da soldagem da madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tecnologias de soldagem por fricção

Segundo Gerber; Gfeller, (2000), a tecnologia de soldagem por fricção linear produz a fricção das superfícies de duas peças planas em contato por meio do deslizamento de uma sobre a outra, por meio de movimentos vibratórios lineares paralelos ao plano da junta. O aquecimento gerado nas superfícies de contato das peças é função do coeficiente de fricção do material, da pressão exercida, da área da superfície da junta, assim como da amplitude, da frequência e do tempo de vibração. O aumento da temperatura e a pressão de contato exercida na junta são os fatores principais para estabelecer a soldagem.

Já a tecnologia de soldagem por rotação, ou rotacional, que é outro processo também gerador de fricção entre as superfícies de contato de partes a serem soldadas, se diferencia fundamentalmente por aplicar-se ao caso específico da fricção de cavilhas ou tarugos introduzidos em furos feitos em uma peça plana. Nesse caso, o movimento oscilatório segue o alinhamento do eixo da máquina, ao mesmo tempo em que a cavilha cilíndrica gira, fazendo fricção contra a superfície interna do furo. Uma vez que a temperatura necessária na junta tenha sido alcançada, o movimento é interrompido e a cavilha ainda é mantida sob alguma pressão até o resfriamento do conjunto (GERBER; GFELLER, 2000).

2.2 Primeiros relatos científicos sobre a soldagem da madeira

Gfeller et al. (2004) e Pizzi et al. (2004) apresentam suas experiências e investigações sobre “wood welding” e explicam o fenômeno da soldagem com o apoio de equipamentos laboratoriais eletrônicos de última geração, caracterizando parâmetros de processo, resistências adquiridas nas juntas e conclusões sobre transformações anatômicas da madeira, bem como prováveis reações químicas envolvidas. Os trabalhos de Gfeller et al. (2004), da Escola Suíça de Engenharia para a Indústria da Madeira (SWOOD), e Pizzi et al. (2004), da Escola Nacional Superior de Tecnologia para a Indústria da Madeira – Laboratório de Estudos e Pesquisa com o Material Madeira (ENSTIB-LERMAB), Universidade de Nancy, França, foram realizados em sistema de cooperação entre as equipes e instituições. Tais estudos tratam do descobrimento da possibilidade de serem aplicadas tecnologias de soldagem já

existentes a outros materiais (metais e plásticos, por exemplo) para produzir uniões de considerável resistência entre peças de madeira, na ausência de qualquer material termoplástico ou de algum outro agente de ligação. Tratam também da otimização dessas tecnologias para alcançar ligações “madeira-madeira” com capacidade de resistência estrutural de um modo muito rápido, assim como de limites constatados para determinadas condições de uso dos elementos soldados.

Os trabalhos acima citados promoveram a soldagem de superfícies planas de madeira por fricção linear vibracional, sem qualquer adesivo. A pesquisa da equipe de Gfeller testou duas diferentes madeiras: “beech wood” (*Fagus sylvatica*), folhosa e “Norway spruce” (*Picea abies*), conífera. Já o experimento da equipe liderada por Pizzi testou somente a primeira dessas espécies. A umidade de equilíbrio das peças era de 12%. Corpos-de-prova com dimensões 150 x 20 x 15 mm foram soldados dois a dois pelo efeito do movimento linear friccional de uma superfície contra a outra, a uma frequência de 100 Hz, formando amostras de 150 x 20 x 30 mm.

A máquina de fricção descrita pelos autores, uma Branson tipo 2700, com potência de 3000 watts, normalmente usada para soldar metais por vibração, é basicamente formada por uma carcaça na qual uma mesa móvel está suspensa por molas (Figura 1). Essa parte móvel, que prende uma das peças, é colocada em vibração, como resposta à tensão das molas, por um princípio eletromagnético, enquanto a outra peça permanece presa a uma mesa fixa. A frequência pode ser 100 Hz com uma amplitude de até 4,0 mm, ou 240 Hz e uma amplitude máxima de até 1,8 mm. Os controles ajustáveis da máquina são o tempo de soldagem, a pressão, a amplitude e o tempo de pressão. Quando o estado de fusão é alcançado nas superfícies da junta, o processo vibracional interrompe-se. A pressão exercida é brevemente mantida para assegurar o contato das peças até a solidificação da ligação.

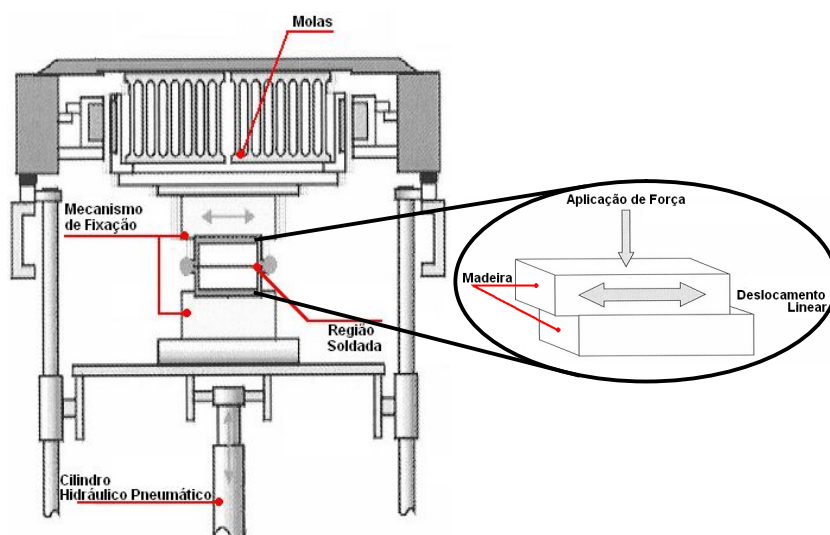


Figura 1. Diagrama esquemático da máquina de soldagem Branson de fricção mecânica e indicação da oscilação linear de fricção de duas superfícies de madeira maciça. Fonte: Gerber; Gfeller, (2000).

Figure 1. Schematic diagram of mechanical friction Branson welding machine and indication of linear oscillating friction of two solid wood surfaces. From: Gerber; Gfeller, (2000).

Os parâmetros testados em vários experimentos foram: tempo de soldagem (2 a 5 segundos), tempo sob pressão mantido após a interrupção da fricção (2 a 5 segundos), pressão exercida nas superfícies durante a fricção (0,4 a 2,3 MPa), pressão mantida após a interrupção da fricção (1,33 a 2,7 MPa) e amplitude do deslocamento de uma superfície sobre a outra (1 a 3 mm).

A frequência de soldagem foi mantida a 100 Hz, uma vez que os experimentos anteriores a altas frequências (240 Hz) mostraram que a temperatura na linha da junta alcançou valores muito altos, o que causou uma excessiva degradação de parte do material da interface. As amostras foram testadas de acordo com as especificações da norma europeia EN 205-D1.

Dos parâmetros testados nesses experimentos, os que produziram melhores resultados foram: tempo de soldagem (WT = 3 segundos), tempo sob pressão mantido após a fricção (HT = 5 segundos), pressão exercida durante a fricção (WP = 2 MPa), pressão mantida após a fricção (HP = 2,7 MPa) e amplitude da vibração (A = 3 mm).

A média das resistências à flexão estática, sob as condições do experimento e com o uso dos parâmetros anteriormente descritos, ficou entre 10 e 11 Mpa. Assim, os valores médios obtidos foram maiores do que 10 MPa, valor mínimo requerido pela norma europeia EN 205-D1, caracterizando, portanto, resistências satisfatórias para aplicações estruturais. É importante destacar que esses resultados promissores foram encontrados para a madeira de *Fagus sylvatica*, uma folhosa.

Gfeller et al. (2004) salientam que, para a madeira de *Picea abies*, conífera, os resultados não foram tão promissores quanto os encontrados para *Fagus sylvatica*. Os experimentos demonstraram que para os corpos-de-prova de *Picea abies* a soldagem também ocorreu, mas, devido ao colapso das paredes celulares, característico dessa espécie, não foram possíveis conclusões definitivas a respeito do potencial de soldagem das coníferas.

Pesquisas posteriores atestam a viabilidade da soldagem em madeira de coníferas para determinados usos. Stamm et al. (2005) verificam a resistência ao cisalhamento na junta soldada de corpos-de-prova, imediatamente após o processo da soldagem, com um tempo de 10 segundos após a solidificação, que, nesse experimento, foi realizada durante 30 segundos após o término da fricção. As tensões de cisalhamento, na direção longitudinal das amostras e paralela à das fibras da madeira, foram testadas de acordo com a norma européia EN 302-1. Foram encontradas resistências de 2,1 MPa para “spruce wood”, conífera e 3,2 MPa para “beech wood”, folhosa, em diferentes séries de testes. Com base nos resultados obtidos, os autores indicam o uso de ligações soldadas para a indústria de móveis e até mesmo para construções de madeira. Concluem, ainda, que composições multicamadas podem ser realizadas por contínuas soldagens, sem danificar as juntas já existentes.

Gfeller et al. (2004) e Pizzi et al. (2004) relatam que resultados não descritos em seus artigos mostram que as juntas soldadas obtidas, por apresentarem baixa resistência à água, não foram capazes de satisfazer as especificações para uso exterior (ZANETTI; PROPERZI, 2002). Devido a isso, tais ligações podem ser consideradas eficientes somente em aplicações para ambientes protegidos, como em móveis e marcenaria de interiores.

Gfeller et al. (2004) testam ainda a adição de água por "spray" nas superfícies a serem soldadas para avaliar a possível melhora do processo. Constatam, no entanto, que a umidade adicionada não se manteve devido às altas temperaturas alcançadas nas superfícies friccionadas. Concluem que o aumento da umidade não causou nenhum efeito. Observam também que, enquanto na linha da junta uma temperatura máxima de 170 °C foi alcançada, a temperatura na madeira, somente 1 mm distante dessa mesma linha, permaneceu igual à temperatura do ambiente (de 20 °C a 25 °C). A manutenção de uma baixa temperatura em quase todo o corpo do conjunto soldado explica o porquê de altas temperaturas alcançadas nas superfícies de contato não causarem deformações na geometria das peças de madeira.

2.3 Explicação do fenômeno

Uma vez que os experimentos comprovaram a soldagem da madeira, estabelecida por fricção vibracional mecanicamente induzida, e que as juntas constituídas apresentaram propriedades mecânicas que satisfazem as normas, o passo seguinte foi explicar o que realmente acontece na estrutura celular e molecular das superfícies soldadas da madeira, do ponto de vista anatômico e físico-químico. Segundo Gfeller et al. (2004) e Pizzi et al. (2004), a temperatura nas superfícies da junta de ligação alcança 170 °C ou mais, durante o curto

período de fricção no processo de soldagem. Essa temperatura é muito mais alta do que a temperatura de fusão da lignina e da hemicelulose, acima da qual esses materiais conhecidamente se fundem e escoam (KELLEY et al., 1987). Esses constituintes poliméricos da estrutura da madeira literalmente derretem em consequência do aquecimento, e as superfícies friccionadas começam a se decompor e a amolecer, formando uma camada viscosa na interface da união.

O derretimento ocorre principalmente na região de conexão intercelular, ou seja, na lamela média. A lamela média, mais do que qualquer outro componente anatômico da madeira, é particularmente rica em lignina. A mudança de estado físico da lignina e de algumas polioses, bem como os seus escoamentos, causa também o descolamento total ou parcial de longas células (fibras ou traqueóides) da estrutura da madeira, que se desorganizam em relação aos seus posicionamentos originais ao se emaranharem no interior de um denso composto amorfo, que recobre as superfícies de contato. Forma-se, então, na interface de soldagem, uma rede de células entrelaçadas, embebida em uma matriz de material fundido, principalmente lignina, mas também polioses, que por resfriamento se solidifica. Esses fenômenos foram observados nos trabalhos de Gfeller et al. (2004) e Pizzi et al. (2004) por microscópio eletrônico de varredura (Figuras 2 e 3).

Na Figura 2, observa-se que as células (fibras/traqueóides) não parecem estar grandemente danificadas, e que o derretimento ocorreu principalmente na região de conexão intercelular, ou lamela média.



Figura 2. Imagem obtida por microscópio eletrônico de varredura, da matriz de lignina fundida e de células de madeira nela imersas. Fonte: Pizzi et al. (2004).

Figure 2. Scanning electron microscopy image of fused lignin matrix and wood cells immersed in it. From: Pizzi et al. (2004).

Durante o período de soldagem, algumas das fibras/traqueóides descoladas da estrutura principal da madeira, as quais não estão mais presas pelo material de interconexão, são impelidas para fora da junta como excesso de material. Entretanto, na interface da junta, estabelece-se a camada de solda o que corresponde a um composto amorfo de coloração mais escura, responsável pela união físico-química das partes. Esse composto, que age como um adesivo, basicamente é formado por uma rede de células entrelaçadas imersa em uma matriz de polímeros de lignina fundida.

Na Figura 3, observa-se a junta de peças de madeira soldadas por fricção linear.

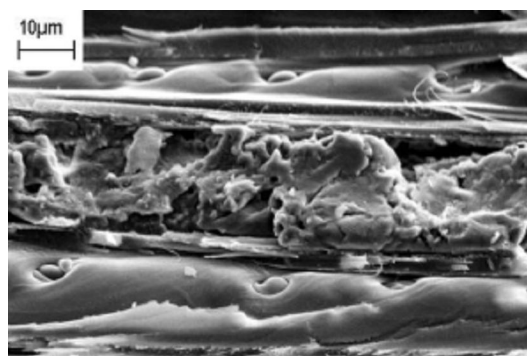


Figura 3. Imagem obtida por microscópio eletrônico de varredura, de fibras de madeira intactas e da região soldada. Fonte: INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique, France*) – (2005).

Figure 3. Scanning electron microscopy image of intact wood fibers and the welded bulk. From: INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique, France*) – (2005).

Sob o ponto de vista físico, estabelece-se a ancoragem na microestrutura anatômica após a solidificação, devido à penetração de material fundido nos espaços celulares e intercelulares, bem como pelo entrelaçamento das células na nova composição. Foi demonstrado no artigo de Pizzi et al. (2004) pela análise de secções laminares de 1,88 mm de espessura, ortogonais ao plano soldado, em testes de microdensitometria de raio-x, que houve um considerável aumento da densidade na interface soldada, limitado a uma pequena área próxima da linha de soldagem, com cerca de 0,6 mm de largura. A média da densidade das secções de *Fagus sylvatica* foi cerca de 760 kg/m³, enquanto que a densidade máxima dessa madeira na união foi muito mais alta, até cerca de 1100-1200 kg/m³.

Sob o ponto de vista químico, a análise é feita em nível polimérico ou molecular. A polimerização e as ligações “cross-linking” parecem ser as reações envolvidas (GFELLER et al., 2004). Uma vez que o material amorfo da interface é constituído por moléculas naturalmente compatíveis e propensas à polimerização, essas ligações químicas encadeadas

ocorrem de forma a dar consistência à junta. Também ocorrem reações químicas de ligações “cross-linking” da lignina e de pequenas quantidades de furfural e outros compostos furânicos derivados de reações de carboidratos, produzidas pelo aumento da temperatura.

A presença de ligações “cross-linking” foi identificada por equipamento de ressonância magnética nuclear “CP MAS ^{13}C ”. Essas reações, no entanto, contribuem relativamente pouco durante o breve período de soldagem (3 segundos). Sua contribuição aumenta, contudo, após o fim da soldagem quando, por um período de 3 a 5 segundos, as peças de madeira são mantidas sob pressão, o que contribui de forma significativa para a obtenção de uma boa ligação.

A aplicação da energia friccional modifica as superfícies da madeira de forma a derretê-las para formar uma única entidade.

Os constituintes da madeira, principalmente lignina, celulose e polioses, são polímeros assim como os termoplásticos sintéticos. A diferença é que alguns dos polímeros da madeira são decompostos termicamente e modificados por reações químicas durante o processo de soldagem, enquanto os polímeros sintéticos termoplásticos permanecem os mesmos com respeito às suas composições químicas elementares (STAMM et al., 2005).

3 CONCLUSÃO

A soldagem da madeira é uma realidade. O tema é novo, e os estudos sobre o fenômeno estão apenas começando, desenvolvendo-se em fase laboratorial. Apesar disso, tais estudos já sugerem uma ampla gama de possibilidades para aplicações práticas. Muitos avanços serão necessários, inclusive aqueles que dizem respeito a equipamentos acessíveis para realizar, de forma prática e econômica, a soldagem da madeira nos locais de trabalho. As limitações verificadas, como a baixa resistência à água e a conseqüente indicação do processo somente para uso em interiores, como acontece com os adesivos à base de PVA, poderão ser superadas com a continuidade das pesquisas.

Essa revisão restringiu-se à soldagem de superfícies planas, mas convém mencionar os excelentes resultados para a soldagem de cavilhas de madeira pelo processo de fricção rotacional. Tais resultados ampliam ainda mais as possibilidades de uso da soldagem para a formação de ligações madeira-madeira. Cabe destacar ainda, que os avanços nas análises físico-químicas do material das interfaces soldadas fornecerão melhores explicações para o fenômeno. A rapidez do processo de soldagem e a inexistência de adesivo são fatores de custo

que deverão estimular novos estudos e, dessa forma, permitir o aprimoramento das tecnologias de soldagem da madeira.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EUROPEAN NORM - EN 302-1. Adhesives for lead-bearing timber structures — Test methods — Determination of bond strength in longitudinal tensile shear strength, 2000.

EUROPEAN NORM - EN 205-D1. Determination of the tensile strength, 2003.

GERBER, C.; GFELLER, B. Joint connection with welded thermoplastic dowels & Wood Welding Technologies. World Conference on Timber Engineering. **Conference proceedings**. British Columbia, Canada, 2000.

GFELLER, B.; LEHMANN, M.; PROPERZI, M.; PICHELIN, F.; ZANETTI, M.; PIZZI, A.; DELMOTTE, L. Interior wood joints by mechanical fusion welding of wood surfaces, **Forest Products Journal**, v.54, n.7/8, p.72-79, 2004.

GLINIORZ, K.; MOHR, S.; NATTERER, J.; NAVI, P. Wood Welding. In: **Proceedings** of the First International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Lausanne, Switzerland, p.571-574, 2001.

GLINIORZ, K.; NATTERER, J. Holzschweißen – Innovative verbindungstechnologien im holzbau. In: Tagungsunterlagen, Symposium der Ligna Plus/Weltmesse für die Forst- und Holzwirtschaft in Hannover, p.9-18, 2000.

KELLEY, S.; RIALS, T.; GLASSER, W. Relaxation behavior of the amorphous components of wood. **Journal of Materials Science**, n.22, p.617-624, 1987.

PIZZI, A.; PROPERZI, M.; LEBAN, J-M.; ZANETTI, M.; PICHELIN, F. Mechanically-induced wood welding. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v.5, n.2, Concepción, Chile, 2004.

STAMM, B.; NATTERER, J.; NAVI, P. Joining wood by friction welding. **Holz als Roh – Werkstoff**, Springer-Verlag, n.63, p.313-320, 2005.

ZANETTI, M.; PROPERZI, M. **Unpublished results**. SWOOD – Swiss School of Engineering for the Wood Industry; Biel, Switzerland, 2002.