

# Adhesive Bonding of Structural Hardwood Elements

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Hassani, Mohammad M.

**Publication date:**

2015

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010528229>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 22900

# Adhesive Bonding of Structural Hardwood Elements

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH  
(DR. SC. ETH ZURICH)

presented by  
MOHAMMAD MASOUD HASSANI

Master of Mechanical Engineering (MEng), Iran University of  
Science and Technology

born on March 23, 1984 in Tehran (Iran)

citizen of Iran

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans J. Herrmann  
Prof. Dr. Erik Serrano

2015

# Abstract

Wood as the most important natural and renewable building material plays an important role in the construction sector. Recently, the application of engineered wood, especially in the form of adhesively bonded timbers has remarkably increased. Novel progress in plywood made of high strength and high stiffness hardwoods, like European beech, provides designers, in general, with more flexibility and efficiency by enhanced mechanical performance. Nevertheless, the higher tendency of hardwood for moisture sorption as well as for swelling and shrinkage causes significant residual stresses in glued-laminated configurations, particularly in cross-laminated ones. These moisture-induced stress fields lead to the initiation and propagation of both interfacial delamination and solid wood cracking which lessen the integrity and load-bearing capacity of such layered structural elements. Moreover, the strong hygroscopic character of hardwood basically affects all related mechanical properties resulting in degradation of material stiffness and strength over the service life. Additionally, long-term creep and mechano-sorption under changing environmental conditions cause further loss of stiffness and can amplify delamination growth over the lifetime of a timber structure.

Accordingly, the current research investigated the delamination process of adhesively bonded hardwood (European beech) elements subject to changing climatic conditions. For the study of the long-term fracture mechanical behavior of glued-laminated components under varying moisture content, the role of moisture development, time- and moisture-dependent responses are absolutely crucial. For this purpose, a 3D orthotropic hygro-elastic, plastic, visco-elastic, mechano-sorptive wood constitutive model with moisture-dependent material constants was presented in this work. Such a comprehensive material model is capable to capture the true history-dependent stress states and deformations which are essential to achieve reliable design of timber structures. Besides the solid wood substrates, the adhesive material also influences the interface performance considerably. Hence, to gain further insight into the stresses and deformations generated in the bond-line, a general hygro-elastic,

plastic, visco-elastic creep material model for adhesive was introduced as well. The associated numerical algorithms developed on the basis of additive decomposition of the total strain were formulated and implemented within the Abaqus Finite Element (FE) package. Functionality and performance of the proposed approach were evaluated by performing multiple verification simulations of wood components, under different combinations of mechanical loading and moisture variation. Moreover, the generality and efficiency of the presented approach was further demonstrated by conducting an application example of a hybrid wood element.

Following validation of the developed rheological models, damage onset and propagation in three-layered uni-directional and cross-laminated samples out of European beech due to climatic changes were studied based on a combined numerical and experimental approach. The inter- and intra-laminar damage evolution was characterized for various configurations adhesively bonded by three structural adhesive systems. Typical situations were simulated by means of comprehensive moisture-dependent non-linear rheological FE models for wood and adhesive with the capability to capture delaminations. The simulations gave insight into the role of different strain components such as visco-elastic, mechano-sorptive, plastic, and hygro-elastic deformations under changing moisture content in progressive damage and delamination.

Subsequently, the experimental observations on various configurations were evaluated after the first two moisture cycles. Afterwards, the damage evolution was characterized by typical properties common to intra- and inter-laminar fracture studies. Thereafter, FEM simulations on the macroscopic behavior of a set of experiments were verified before the models were applied to gain a deeper insight on the mechanical situations that lead to the observed damage evolution. Hence, cracks were artificially introduced in the middle lamella and then the changes in the strain fields and stresses were calculated for the onset of delamination as well as its propagation using fracture mechanics. These simulations are heavily detailed with respect to the material behavior. To be able to make more general statements on the damage evolution and scaling, a variational mechanical approach, originally developed for cross-ply laminates, was adopted to the moisture-induced damage evolution investigated in this study. As the experimental time frame was limited to two moisture cycles only, it was extended by simulations to 10 cycles (3 years) to be able to quantify the stress buildup under cyclic hygric loading resulting in hygro-fatigue.

# Sommario

Il legno è il più importante materiale naturale e rinnovabile per la costruzione, e come tale riveste un ruolo centrale nel settore edile. Recentemente, l'uso del legno lamellare, composto da strati di legname legati da un collante, è aumentato in modo considerevole, e i progressi nella costruzione di pannelli di compensato composti da legname ad alta resistenza e rigidità come il faggio, hanno reso possibili nuove soluzioni progettuali, allo stesso tempo flessibili ed efficienti. Ciò nonostante, il legno duro è caratterizzato da una elevata tendenza all'assorbimento di umidità, che può causare fratture e stati di tensione residua in pannelli lamellari, specialmente se a strati incrociati. Questi stati di tensione possono indurre l'iniziazione e la propagazione di fratture sia nelle interfacce tra le lamelle che all'interno del legno stesso, riducendo la capacità portante degli elementi strutturali di cui fanno parte. In più, le caratteristiche igroscopiche del legno duro influiscono anche su tutte le sue caratteristiche strutturali, che tendono a impoverirsi durante la vita utile delle strutture.

Questa tesi si pone in quest'ambito, e ha come obiettivo lo studio delle caratteristiche di pannelli lamellari di faggio sotto variabili condizioni ambientali. La risposta a lungo termine degli elementi strutturali in legno è strettamente dipendente dal ruolo giocato dall'influenza dell'umidità sulle caratteristiche meccaniche. Per questa ragione, un modello 3D ortotropico, visco-elastico, plastico e igroscopico per il legno legno, comprendente la variazione delle caratteristiche meccaniche con l'umidità, è stato sviluppato. Il modello è sufficientemente completo da rendere possibile la determinazione degli stati di tensione e deformazione residui, i quali sono elementi essenziali per la progettazione di strutture lignee. In aggiunta, anche il collante è stato simulato, usando per questo un modello igro-elastico, plastico, visco-elastico e di creep, rendendo possibile lo studio dello stato tensionale nelle giunture tra le lamelle. Il modello accoppiato finale è stato formulato e implementato in un algoritmo che si basa sulla decomposizione del tensore di deformazione, ed è stato risolto attraverso l'uso del codice agli elementi finiti Abaqus. Funzionalità

e performance dell'algoritmo sono state testate attraverso molteplici simulazioni di componenti lignee sotto diverse combinazioni di carico strutturale e condizioni ambientali, mentre l'affidabilità del metodo è stata provata attraverso il confronto con un esperimento su di un provino di legno ibrido.

Attraverso una combinazione di test di laboratorio e di simulazioni, l'iniziazione delle fratture e la loro propagazione in un pannello di legno a tre strati, monodirezionali e incrociati è stata studiata sotto diverse condizioni di umidità ambientale. L'evoluzione del danno su varie configurazioni è stata studiata per tre diversi sistemi di collaggio. Alcune situazioni tipiche sono state riprodotte utilizzando modelli reologici non-lineari sia per il legno che per il collante. La soluzione agli elementi finiti ha permesso di riprodurre i fenomeni di delaminazione e propagazione del danno, evidenziando il ruolo delle diverse componenti dello stato di deformazione (visco-elastica, meccanico-assorbente, plastica e idro-elastica).

Successivamente, dati sperimentali sono stati raccolti per due cicli di umidità su diverse configurazioni, e l'evoluzione del danno è stata caratterizzata tramite l'individuazione di proprietà tipiche delle fratture intra e interlaminari. Le simulazioni agli elementi finiti, validate osservando il comportamento macroscopico di un set di esperimenti, hanno permesso di comprendere più a fondo il processo meccanico alla base dello stato di danneggiamento osservato. Per riprodurre questo meccanismo, le fratture sono state iniziate forzatamente nella lamella di mezzera, mentre l'evoluzione degli stati di tensione e deformazione è stata calcolata sia per lo stato di iniziazione della delaminazione che per la sua propagazione. Le simulazioni che ne conseguono sono altamente dettagliate nel descrivere il comportamento del materiale, e permettono di giungere a conclusioni di validità generale riguardo all'evoluzione del danno dovuto all'umidità. Per questo, un approccio variazionale, originariamente proposto per pannelli laminati a strati incrociati, è stato adottato, permettendo l'estensione dei risultati sperimentali, originariamente limitati a due cicli di umidità, fino a 10 cicli, corrispondenti a tre anni. Durante questa finestra temporale, lo studio delle tensioni residue dovute al carico igroscopico ha permesso di valutare quantitativamente gli sforzi di fatica.