

ANALYSE DU COMPORTEMENT ELASTO-PLASTIQUE D'UN ASSEMBLAGE A BASE DE BOIS

Nabil NOUI, Ramez Saad YOUNAN, Taoufik BOUKHAROUBA

Laboratoire de Mécanique Avancée (LMA), Faculté GM & GP, USTHB, BP 32, El Alia 16111 Alger, Algérie

Reçu le 13 Juillet 2011 – Accepté le 15 Janvier 2013

Résumé

Le présent travail a pour but d'analyser le comportement à rupture par essais et le comportement élasto-plastique par simulation numérique (Ansys) d'un assemblage à base de bois broché – collé.

Trois séries d'assemblages brochés – collés ont été utilisés pour les essais à rupture : à base de hêtre (bois massif), de bois rouge et de bois blanc (bois résineux). Les résultats expérimentaux et de simulation nous ont permis :

- d'identifier et de localiser les premiers sites d'endommagement et d'amorçage,
- d'identifier les différents modes de ruptures,
- de définir le rôle de chaque élément de l'assemblage dans la résistance aux chargements appliqués.
- de comparer les résultats des essais de rupture et ceux de la simulation numérique.

Mots clés : Analyse élastoplastique ; Assemblage broché-collé ; Endommagement et rupture ; Ansys.

Abstract

The purpose of this work is to analyse the fracture behaviour by performing experimental tests and to examine the elastoplastic behaviour by numerical simulation (Ansys) of an assembly containing wood bolted–glued.

Three series of bolted–glued assemblies were used for the fracture tests: containing beech (sawn timber), red wood and whitewood (coniferous timber). The experimental and simulation results allowed us:

- to identify and locate the first sites of damage and crack initiation,
- to identify the various rupture modes,
- to define the role of each fastener in resistance to the applied loads,
- to compare the results of fracture tests and those of numerical simulation.

Key words: Elastoplastic analysis; Bolted–glued assemblage; Damage and rupture; Ansys.

البلاستيكي عن طريق

()

عن طريق الاختبارات التجريبية
يحتوي على دبابيس .

: تجريبية
النتائج التجريبية
الرقمية ب:

الرقمية .

هذا العمل هو تحليل
ممة تركيب ته ية هي

ثلاث مجموعات من هذه ركيب
الأبيض (أخشاب ذات ألياف).

- تعريف وتحديد
- تعريف مختلف أنواع الانكسار،
- تحديد عنصر من التركيب
-

. Ansys ;

؛

ب و يحتوي على

؛

الكلمات المفتاحية : تحليل

L'analyse du comportement mécanique des assemblages à base de bois a commencé au dix-septième siècle par la réalisation en laboratoire de différents types d'essais de rupture. Les premiers ont été réalisés vraisemblablement en Angleterre par Hooke (1663), et quelques années plus tard en France par Buffon (1740). Plusieurs chercheurs ont contribué plus tard à l'enrichissement des résultats des essais sur le bois tels que : Trayer (1932), Johansen (1949), Doyle & Scholten (1963), Kunesh & Johanson (1968), Cramer (1967), Yasamura *et al.* (1987), Schreyer (2002), Dodson (2003). L'évolution de la technologie notamment l'outil informatique, a donné un nouvel essor à la recherche dans le domaine des assemblages en bois. Ceci a permis aux différents chercheurs de modéliser le comportement de ce type d'assemblage, on cite : Patton-Mallory *et al.* (1997), Moses & Prion (1999), Guan & Rodd (2000), Ju & Rowlands (2001), Rahman *et al.* (1991), Dinicola & Fantle (1993), Fan & Qiu (1993), McCarthy & McCarthy, Dávila (2001), Moura *et al.* (2000) et Bozo (2002).

Une simulation numérique du comportement élasto-plastique ou plastique d'une pièce ou d'un système mécanique reste toujours dépendante des essais à rupture. On se propose dans ce travail de déterminer la vraie répartition des contraintes dans un assemblage broché-collé (à quatre broches) à base de bois. Pour répondre à cet objectif, nous avons réalisé des essais de rupture en utilisant trois essences de bois. Les résultats d'essais nous ont permis dans une seconde étape, la modélisation du comportement élasto-plastique des assemblages testés.

1. PARTIE EXPERIMENTALE

Les éprouvettes d'essais sont des assemblages fabriqués en associant à une planche en bois, une plaque métallique, quatre broches métalliques et un d'adhésif époxydique composé, de 70% de résine et 30% de durcisseur (figure 1).

Le joint de colle est considéré comme renforcement local de l'assemblage. Nous avons inséré la colle à l'intérieur des trous de 10mm de diamètre (dans le vide non occupé par les broches de 6mm de diamètre) manuellement en se servant d'une aiguille afin de bien répartir la résine entre les broches et pièces assemblées.

La viscosité de la colle facilite l'écoulement de celle-ci à l'intérieur des trous. Une fois la colle polymérisée (24 heures à température ambiante), l'assemblage est considéré près pour être testé. Les joints de colle assurent la continuité et éliminent les jeux entre le bois, les broches et le gousset.

1.1. Essais de caractérisation

En prévision de l'analyse par simulation numérique du comportement élasto-plastique de nos assemblages, nous avons jugé nécessaire de procéder à la caractérisation des éléments les constituant. Les résultats de caractérisation des différents éléments sont regroupés dans les tableaux 1, 2 et 3.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des trois essences de bois, le hêtre, le bois rouge et le bois blanc

Bois Rouge à taux d'humidité H = 10.68%					
Module de Young [MPa]			Coefficient de Poisson		
$E_L^{(*)}$	$E_T^{(\$)}$	$E_R^{(\$)}$	$\hat{\nu}_{LT}$	$\hat{\nu}_{LR}$	$\hat{\nu}_{TR}$
14 334	443	274	0.23	0.12	0.54
Hêtre à taux d'humidité H = 11.18%					
$E_L^{(*)}$	$E_T^{(\$)}$	$E_R^{(\$)}$	$\hat{\nu}_{LT}$	$\hat{\nu}_{LR}$	$\hat{\nu}_{TR}$
15 526	457	416	0.36	0.22	0.6
Bois Blanc à taux d'humidité H = 10.78%					
$E_L^{(*)}$	$E_T^{(\$)}$	$E_R^{(\$)}$	$\hat{\nu}_{LT}$	$\hat{\nu}_{LR}$	$\hat{\nu}_{TR}$
4243	379	254	0.14	0.26	0.53
(*) essais de traction normalisé(\$) essais de compression					

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier (gousset et broche)

Dénomination	Re [MPa]	Rm [MPa]	E [MPa]
Gousset	265.6	353.3	194625
Broche	258.39	444.51	207389

Tableau 3 : Propriétés mécaniques du joint de colle

Joint de colle (*)	Re [MPa]	Rr [MPa]	Gx [MPa]
Hêtre	1.5	4.843	254
Bois rouge	1.1	3.324	258
Bois blanc	0.9	3.3	192
(*) résultats obtenus sur la base des essais de cisaillement à double recouvrement			

1.2. Essais de rupture sur assemblages brochés-collés

Tous nos essais à rupture ont été conduits sur une machine de traction – compression universelle, de capacité 100kN pilotée par ordinateur. Les essais ont été effectués en utilisant le montage schématisé par la figure 1, à température ambiante et avec une vitesse de déplacement de la traverse 5 mm/mn.

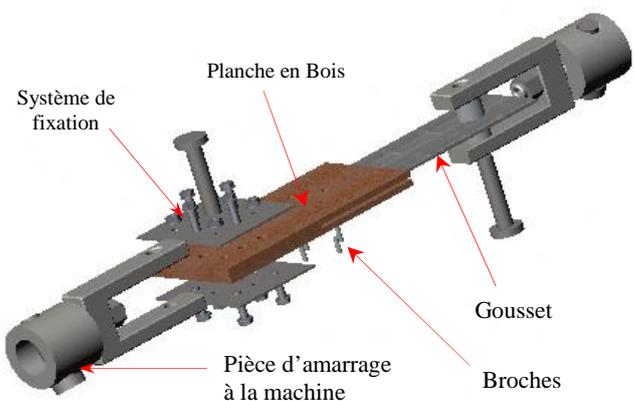


Figure 1 : Vue d'ensemble du montage et de l'éprouvette d'essais

Le but de ces essais était la détermination de la dépendance du déplacement à la charge jusqu'à rupture. Le tableau 4 et la figure 2 donnent une comparaison des résultats expérimentaux et ce, pour les différentes essences de bois utilisées. Pour chaque essence de bois une série de 04 éprouvettes a été préparée.

Tableau 4 : Raideurs des assemblages et charges maximales

Essence de bois	Raideur $K^{(*)}$ [N/mm]	Charge Maximale $P^{(*)}$ [N]
Hêtre	11520	27677
Bois Rouge	11350	18403
Bois Blanc	10517	13776

(*) Valeurs moyennes de deux essais pour chaque cas étudié

Dans ce type d'assemblage, chaque paramètre ou chaque élément joue un rôle spécifique. En premier lieu, le choix :

- de l'essence de bois et de son taux d'humidité,
- du type de la colle,
- de la nuance d'acier,
- des dimensions géométriques des éléments (planches, gousset et broches),
- du nombre de broches et leurs dispositions,

défini la rigidité et la capacité de résistance à telle ou telle charge appliquée. Le soin apporté à l'exécution de l'opération de collage (le respect des entraxes, le centrage des broches dans leurs logements, la répartition de la résine, etc.) assure la bonne répartition de la charge appliquée entre les différents éléments de l'assemblage.

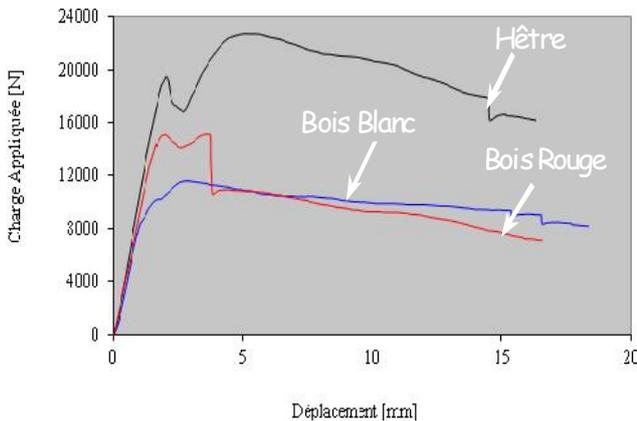


Figure 2 : Courbes charges – déplacements

Pour mieux identifier les premières zones d'endommagement, et de bien quantifier le rôle de chaque élément dans la variation de la rigidité de l'assemblage, nous avons analysé les courbes expérimentales donnant la variation du déplacement en fonction de l'évolution de la charge. Pour répondre à cela, nous avons procédé de la manière suivante :

Sur chaque élément de l'assemblage.

- suivre visuellement et simultanément le changement physique apparent de l'éprouvette d'essais (figure 3) et l'évolution de la courbe charge – déplacement obtenue en temps réel (figure 2),
- rompre complètement les éprouvettes en allant au terme de chaque essai et faire une analyse macroscopique



Figure 3 : Éprouvette rompue, cas du hêtre

Ceci nous a permis de faire le lien entre les différentes régions de la courbe charge –déplacement et les zones endommagées de l'éprouvette d'essais, dont un exemple détaillé est donné par la figure (4).

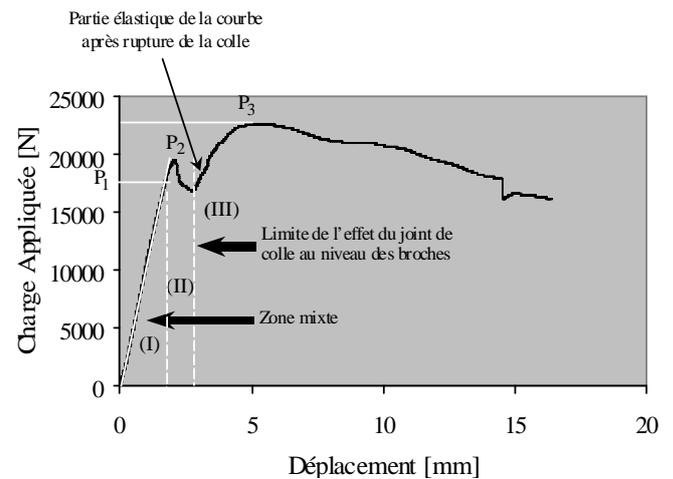


Figure 4 : Courbe Charge – Déplacement d'un assemblage en hêtre broché – collé

Toutes nos lectures confirment que la première zone endommagée est bien le joint de colle entourant les broches. L'influence du joint de colle a été quantifiée par l'analyse sur les courbes de la variation de la valeur des charges de référence, à savoir, P_1 , P_2 et P_3 (tableau 5).

Tableau 5 : Valeurs des charges de référence, déterminées sur les courbes charge – déplacement

Essence de bois	P_1 [N]	P_2 [N]	P_3 [N]
Hêtre	18094	18764	22674
Bois Rouge	14487	14767	14767
Bois Blanc	8842	10272	11592

2. ANALYSE NUMÉRIQUE

La simulation numérique est basée sur les résultats obtenus à partir des essais à rupture présentés ci-dessus. Pour cela, on a utilisé le code de calcul Ansys. Le choix du type d'élément, du type d'interface de contact, de la densité des éléments, etc., influe considérablement sur les résultats de calcul. A titre d'exemple, nous avons choisi pour nos calculs l'élément brique quadratique à 20 nœuds.

Le choix des interfaces de contact a été effectué selon les observations enregistrées durant les essais. Par exemple, on a constaté que l'interface bois – colle restait intacte même après rupture totale de l'assemblage.

Ceci peut être traduit par la commande « collage permanent » dans le code de calcul. De la même manière, on a attribué pour chaque interface de contact la commande adéquate dans le code de calcul.

Les premières données introduites sont celles des matériaux de chaque élément de l'assemblage, et durant cette opération, on définit le domaine du travail de ce matériau.

Ce domaine peut être élastique ou élasto-plastique. En plus, on considère que la rupture de l'un des éléments de l'assemblage est une rupture de l'assemblage lui-même. La figure (4) montre que l'élasticité de l'assemblage est interrompue par la rupture du joint de colle dans le domaine plastique, puis elle revient de nouveau après rupture de ce joint.

Ainsi la simulation numérique est élastique pour tous les éléments de l'assemblage, sauf pour la colle qui passe du domaine élastique au domaine élasto-plastique.

Le dispositif de fixation utilisé dans les essais a été remplacé dans la simulation numérique par une fixation sur la face inférieure de la planche en bois (figure 5).

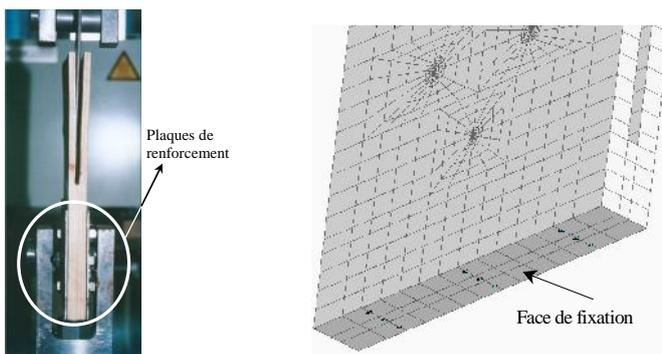


Figure 5 : Fixation de l'éprouvette d'essais en essais et en simulation numérique

La charge appliquée par la machine d'essais sur l'assemblage (ou plus précisément par l'intermédiaire de gousset) est assurée par la pige de fixation.

La charge n'est pas répartie sur la circonférence du trou logeant la pige mais seulement sur un angle représentant l'angle de contact (figure 6).

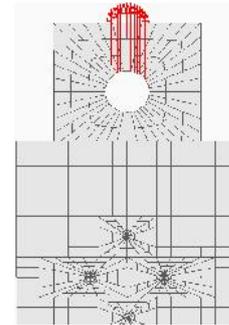


Figure 6 : Simulation de la charge appliquée

2.1. Simulation numérique dans le domaine élastique

Pour pouvoir comparer entre les assemblages à différente base de bois dans le domaine élastique, on a appliqué une charge de l'ordre de 8000N puis, la charge expérimentale P1 (tableau 5) pour ramener la colle à la limite élastique. Les résultats de ce calcul sont regroupés dans le tableau (7).

2.2. Simulation numérique dans le domaine élasto-plastique

Dans cette partie, on applique le niveau de charge P2 obtenu par essais (tableau 5), qui représente la charge à la rupture du joint de colle. Le passage de la courbe élasto-plastique de la colle en cisaillement obtenue par essais de caractérisation à une courbe $\sigma - \epsilon$ (figure 7a) est effectué à l'aide de la relation suivant :

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu)$$

Par la suite, cette dernière a été approchée par une troisième courbe élasto-plastique bilinéaire (figure 7b). La première ligne caractérise le domaine élastique de pente E, et la deuxième caractérise le domaine plastique de pente E_p. La valeur de p a été définie numériquement en chargeant notre modèle par P1 (voir tableau 5). Cette valeur représente la contrainte maximale au niveau du joint de colle enregistrée par un calcul purement élastique. Le tableau (6), donne les valeurs de p pour chaque assemblage considéré.

Les résultats de ce calcul donnant les différents déplacements globaux sont regroupés dans le tableau (7) :

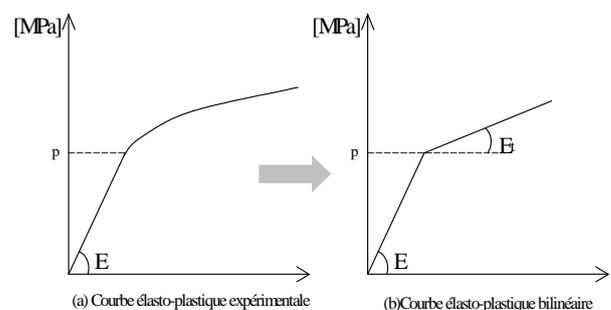


Figure 7 : Schématisation de l'approche de la courbe élasto-plastique réelle du joint de colle à une courbe élasto-plastique bilinéaire

Tableau 6 : Limite élastique des différents joints de colle à recouvrement

Contrainte	Hêtre	Bois rouge	Bois blanc
p [MPa]	11.740	9.574	6.966

2.3. Répartition des contraintes au niveau des pièces de l'assemblage

Des exemples de la répartition des contraintes de Von Mises obtenus par simulation sont donnés dans les figures (8 et 9).

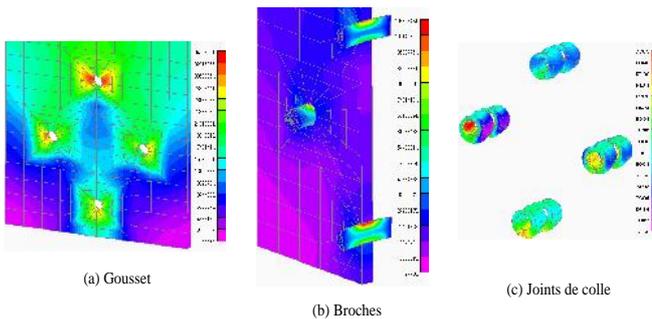


Figure 8 (a, b et c) : Répartition des contraintes de Von Mises

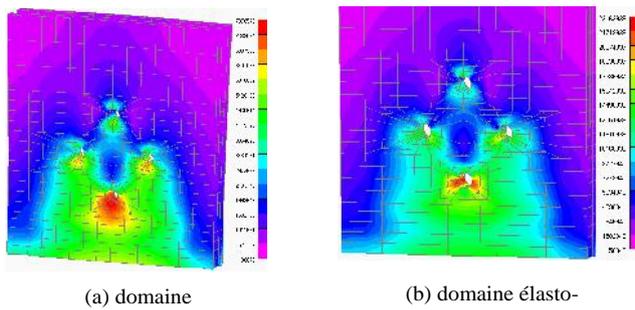


Figure 9 : Répartition des contraintes de Von Mises au niveau de la planche en bois (cas du hêtre)

Tableau 7 : Comparaison entre les déplacements globaux en (mm) de la simulation numérique et des essais

Charge appliquée [N]	Assemblage broché – collé en hêtre		Assemblage broché – collé en bois rouge		Assemblage broché – collé en bois blanc	
	Déplacement essais	Déplacement simulation	Déplacement essais	Déplacement simulation	Déplacement essais	Déplacement simulation
Domaine élastique						
8000 N	0.959	4.368	1.090	3.844	1.185	5.209
P_1 (tableau 5)	1.764	4.399	1.723	3.878	1.520	5.217
Domaine élasto-plastique						
P_2 (tableau 5)	3.225	5.160	1.787	5.095	1.845	4.766

3. DISCUSSION

La figure (10) montre la différence entre la répartition des contraintes dans le domaine élastique et le domaine élasto-plastique pour la planche en bois. On peut aussi, observer les différentes déformations de l'assemblage.

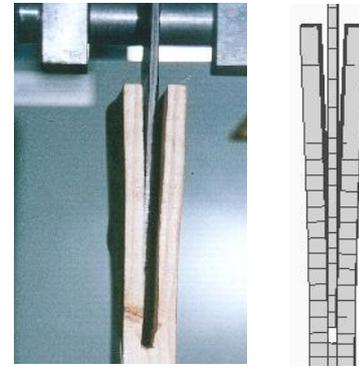


Figure 10 : Comparaison entre les déformations des essais et de la simulation numérique

La comparaison entre les résultats des essais et la simulation numérique nous a montré qu'il y a une différence notable sur les valeurs des déplacements globaux. Ceci peut être relaté par trois raisons principales :

- lorsque les essais ne sont pas effectués juste après la préparation des planches en bois, on risque d'avoir des déformations indésirables comme il a été suggéré par Mettem & Page (1992),
- le passage de la colle entre le bois et le gousset (jeu entre bois et gousset) conduit à un sur renforcement de l'assemblage. Ce qui peut expliquer en partie l'enregistrement d'un faible déplacement lors des essais,
- le contact de la colle avec d'autres parties de la planche en bois conduit au renforcement par imprégnation du bois lui même. Ceci peut entraîner localement un changement des caractéristiques mécaniques du bois.

D'autre part, la différence entre les résultats de la simulation et les essais mécaniques est relativement faible dans le domaine élasto-plastique par rapport au domaine élastique. Cela signifie que la partie de la colle non considérée par la simulation a rompu totalement ou partiellement au cours des essais (niveau de charge P_1 , figure 4 et tableau 5).

CONCLUSION

Les observations au cours et après les essais confirment que la localisation de l'amorçage de fissure est toujours au niveau de l'interface colle – acier et non colle – bois. Cela s'explique par la capacité d'adhésion et d'imprégnation de la colle côté bois en comparaison au côté acier. Les résultats obtenus montrent aussi que le renforcement :

- réduit la ductilité de l'assemblage,
- augmente dans le cas de l'utilisation du bois massif, la charge maximale, la charge de référence (changement de la pente).

D'autre part, les résultats obtenus montrent que le stade d'amorçage représente 43% de la durée de vie de la structure dans le cas le plus défavorable.

Les résultats du déplacement obtenus par simulation numérique n'étaient pas en concordance avec ceux des essais notamment dans le domaine élastique. Cette différence a été expliquée par certains effets indésirables ou incontrôlés liés à la nature du bois et de la colle.

Néanmoins, l'analyse des résultats de la simulation numérique a permis de localiser les points les plus sollicités dans chaque pièce de l'assemblage. D'autre part, les résultats montrent que les éléments constituant les assemblages à base de hêtre et à base de bois rouge se comportent presque de la même manière dans le domaine élastique.

REFERENCES

- A.M. Bozo (2002), *Spatial variation of Wood composites*, Thèse pour l'obtention du grade PhD, Washington state university.
- Buffon (1740), *Expériences sur la force du bois*, Mémoires de l'Académie des Sciences.
- Carlos G. Dávila (2001), *Mixed-Mode Decohesion Elements for Analyses of Progressive Delamination*, NASA Langley Research Center Hampton, VA University of Porto, Portugal. Paper AIAA-01-1486 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Seattle, Washington.
- C.O. Cramer (1967), *An analytical and experimental examination of wood tension joints having a large number of bolts*, University of Wisconsin. PhD Thesis.
- M.F.S.F. De Moura, J.P.M. Gonçalves (2000), A.T. Marques and P.M.S.T. De Castro, *Prediction of Compressive Strength of Carbon-Epoxy Laminates Containing Delamination by Using a Mixed-Mode Damage Model*, Composite Structures, Vol. 50, pp. 151-157.
- A.J. DiNicola and S.L. Fantle (1993), *Bearing strength of clearance fit fastener holes in toughened graphite/epoxy laminates*, Composite Materials: Testing and Design Vol. 11, ASTM STP 1206, pp. 220-237.
- A.M. Dodson (2003), *The Effects of Row Spacing and Bolt Spacing in 6-Bolt and 4-Bolt Wood-to-Steel Connections*. Washington state university.
- D.V. Doyle and J.A. Scholten (1963), *Performance of bolted joints in Douglas-fir*, U.S. Department of agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory.
- W.X. Fan and C.T. Qiu (1993), *Load Distribution of Multi-Fastener Laminated Composite Joints*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 30, No. 21, pp.3013- 3023.
- Z.W. Guan and P.D. Rodd (2000), *A Three-Dimensional Finite Element Model for locally Reinforced Timber Joints made with Hollow Dowel Fasteners*, Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 785-797.
- R. Hooke (1663), *De Potentia Restituvu*, Royal Society.
- K.W. Johansen (1949), *Theory of Timber Connections*, International Association for Bridge and Structural Engineering. Zurich, Switzerland.
- S.H. Ju and R.E. Rowlands (2001), *A Three-Dimensional Frictional Stress Analysis of Double-Shear Bolted Wood Joints*, Wood and Fiber Science, 33(4), 550-563.
- R.H. Kunesch and J.W. Johanson (1968), *Strength of multiple – bolt joints: Influence of spacing an other variable*, Forest Research Laboratory, Oregon State University.
- C.J. Mettem and A.V. Page (1992), *Load distribution in multi – fastener bolted joints in european whitewood glulam with steel sideplates*, Ahus, Sweden.
- M.A. McCarthy and C.T. McCarthy, *Finite element analysis of the effects of clearance on single shear, composite bolted joints*, Composites Research Centre Mechanical & Aeronautical Engineering Department, University of Limerick, Limerick, Rep. of Ireland.
- D.M. Moses and H.G.L. Prion (1999), *Bolted Connections in Structural Composite Lumber: Anisotropic Plasticity Model*, Proceedings, Pacific Timber Engineering Conference, Rotorua, New Zealand, 2.92-2.99.
- M. Patton-Mallory, S.M. Cramer, F.W. Smith and P.J. Pellicane (1997), *Nonlinear Material Models for Analysis of Bolted Wood Connections*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(8), 1063-1070.
- M.U. Rahman, Y.L. Chiang and R.E. Rowlands (1991), *Stress and failure analysis of double bolted joints in Douglas Fir and Stika Spruce*.
- A.C. Schreyer (2002), *Monotonic and cyclic behaviour of slender dowel – type fastener in wood – steel – wood connection*, University of British Columbia, Canada.
- G.W. Trayer (1932), *The bearing strength of wood under bolts*, U.S. Department of agriculture, Forest service, Forest Products Laboratory.
- M. Yasamura, T. Murota and H. Sakai (1987), *Ultimate properties of bolted joints in glued – laminated timber*, Dublin, Ireland.