

ForestValue

hardwood_joint

Essais de cisaillement

Rapport d'exécution

Thibault BENISTAND

2021



Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunit plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui est le coordinateur du projet, le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus (Suède), l'Institute of Timber Engineering and Wood Technology de l'Université de technologie de Graz (Autriche) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine (France). La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillus dans le secteur européen du bâtiment, ceci en développant des technologies d'assemblages communes, économiques, fiables et innovantes. Afin d'atteindre cet objectif, des études mécaniques et thermiques sont menées sur trois essences de bois de feuillus : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre. Ce document présente une partie de la participation française à ce projet et concerne la caractérisation de propriétés mécaniques de certaines essences de bois manquantes et qui sont nécessaires au projet, tel que le cisaillement longitudinal et le cisaillement roulant.

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'organisme France Bois Forêt (FBF) et le Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) participent au financement de la partie française du projet hardwood_joint. De même, deux industriels français accompagnent ce projet, la société SIMONIN et la société Würth France.

Sommaire

1	Bibliographie	1
1.1	Cisaillement longitudinal	1
1.2	Cisaillement roulant.....	3
2	Protocole d'essais	5
2.1	Normes	5
2.2	Montage	5
2.3	Sections, matériaux et dimensions	7
2.4	Dispositifs de mesure.....	7
2.5	Données d'essais complémentaires.....	7
2.6	Cycle de chargement	7
2.7	Méthode d'analyse des essais expérimentaux.....	8
2.8	Analyse statistique des données expérimentales	8
3	Résultats expérimentaux	11
4	Relation entre les propriétés	13
4.1	Résistance en fonction de la masse volumique dans le bouleau	13
4.2	Résistance en fonction de la masse volumique dans le chêne.....	13
5	Références.....	14

1 Bibliographie

Pour comparer les résistances des assemblages par rainure avec la contrainte de cisaillement du matériau bois, une étude bibliographique doit être réalisée pour déterminer les essences devant être caractérisées en cisaillement par une campagne d'essai. Pour rappel, le projet `hardwood_joint` se base sur les essences feuillues suivantes :

- Bouleau
- Hêtre
- LVL Hêtre
- Chêne

1.1 Cisaillement longitudinal

En 2011 [1] et 2018 [2] AICHER et All ont réalisé des essais de cisaillement sur du bois lamellé-collé composé de bois feuillus et tropicaux. Les essais de 2011 donnent une résistance en cisaillement de 6,3 MPa (COV 22 %) dans le cas où la rupture en cisaillement est obtenue par la flexion d'une poutre recomposée (ASTM D3737). Les essais de 2018 réalisés selon l'annexe D de la norme sur la fabrication du bois lamellé collé (EN 14080 [3]) donnent des valeurs moyennes de cisaillement du bois de 19,1 MPa pour le hêtre et 14,7 MPa pour le chêne. Sur l'intégralité de leurs essais, du fait d'un coefficient de corrélation faible ($R^2 = 0,25$), les auteurs ne proposent pas d'équation liant la résistance en cisaillement et la masse volumique.

VAN DE KUILEN et All [4] ont réalisé des essais de cisaillement selon la norme EN408 [5] sur des bois résineux, feuillus et tropicaux. Les ruptures dans les plans de collages observées lors des essais préliminaires sur les bois feuillus et les bois tropicaux les ont amenés à modifier les préconisations de la norme pour pouvoir réaliser les essais de cisaillement. Les essais montrent que la résistance en cisaillement est fortement impactée par l'anatomie du bois et donc son essence. Selon ce principe, le hêtre et le chêne ont des masses volumiques similaires, mais les rayons ligneux de taille importante du chêne constituent une faiblesse vis-à-vis du cisaillement expliquant les résistances moindres de cette essence. Finalement, à partir des résultats expérimentaux ils proposent une modification importante de l'EN 338 avec un gain minimal de 50 % de résistance en cisaillement (Table 1-1).

Table 1-1 Proposition de modification des résistances en cisaillement de l'EN 338 - Tab 7 de VAN DE KUILEN & All [64].

Classe	D18	D24	D27	D30	D3	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620	660	700	750	800	850	900
$f_{v,k}$ EN 338	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	5	5	5	5
$f_{v,k}$ Proposé	5,5	5,6	5,9	6,1	6,2	6,4	6,7	7,1	7,5	7,9	8,3	8,8	9,2	9,6

En reprenant les essais de VAN DE KUILEN et All [4] et en complétant ceux-ci par des essais réalisés sur du frêne, KO-VRYGA et All [6], n'aboutissent pas à une corrélation entre la masse volumique et la résistance en cisaillement (voir Figure 1-1) suffisamment robuste selon eux ($R^2 < 0,5$). Sur le même principe que la DIN 1052, ils proposent une résistance en cisaillement indépendante de la classe de résistance avec $f_{v,k} = 7,5 \text{ MPa}$ pour leur système de classe de résistance en traction.

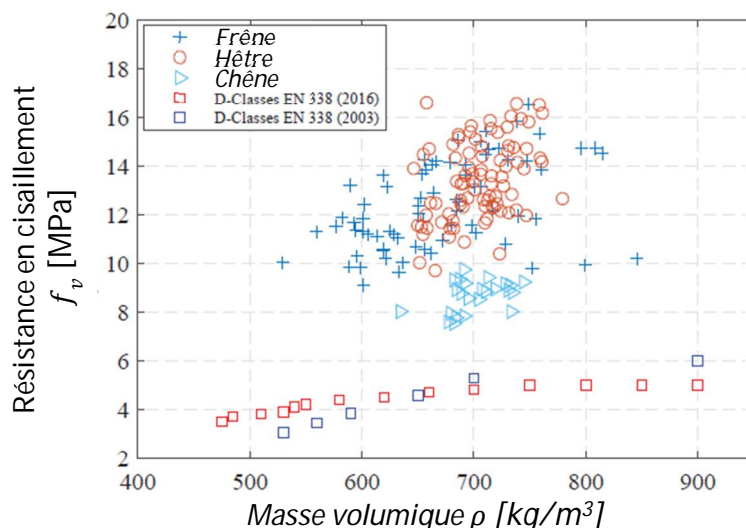


Figure 1-1 Corrélation entre résistance en flexion et en traction pour du frêne - Fig 13 de KOVRYGA & All [6].

En reprenant le même principe d'essais que KOVRYGA et All [6], BENISTAND [7] a testé d'autres essences de bois feuillus permettant de valider la proposition de modification de l'EN 338 proposée initialement par VAN DE KUILEN et All.

Dans la base de données interne du projet hordwood_joint établie par VEDOVELLI, des essais réalisés pour le lamelliste SCHILLER sur du chêne viennent compléter la connaissance des bois feuillus en cisaillement. Des essais réalisés au TUG sur du CLT de bouleau donnent la résistance du bouleau en cisaillement, mais il ne nous est pas possible d'avoir accès au document de référence.

Pour le LVL de hêtre, le fabricant POLLMEIER donne la résistance caractéristique en cisaillement ainsi que le module de cisaillement.

L'ensemble des données d'essais sont données dans les Table 1-2 et Table 1-3. Cette étude bibliographique montre une méconnaissance des propriétés du bouleau en cisaillement longitudinal qui feront l'objet d'une campagne de test par le LERMAB. Les essais se baseront sur les protocoles utilisés par VAN DE KUILEN et All [4], KOVRYGA et All [6] et BENISTAND [7].

Table 1-2 Tableau de synthèse des résistances en cisaillement longitudinal (Hêtre et LVL de Hêtre).

REF	VAN DE KUILEN et All [4]	AICHER et All [1]	AICHER et All [2]	KOVRYGA et All [6]	BENISTAND [7]		POLLMEIER
Essence	HETRE	HETRE	HETRE	HETRE	HETRE		LVL HETRE Q
$f_{v,mean}$	13,4	6,2675	19,1		12,38		11,27
COV	12 %	22 %	13 %		11 %		
$f_{v,k}$			14,6	10,7	10,19		7,8
$G_{m,mean}$					589		820
COV					22 %		
$G_{m,k}$					363		
ρ_{mean}	705	692	742		711		800
COV	4 %	1 %	7 %		6 %		
ρ_k			652		639		730

Table 1-3 Tableau de synthèse des résistances en cisaillement longitudinal (Chêne et CLT de Bouleau).

REF	VAN DE KUI- LEN et All [4]	AICHER et All [1]	KOVRYGA et All [6]	BENISTAND [7]	KIT [8]	KIT [8]		TUG [9]
Essence	CHENE	CHENE	CHENE	CHENE	CHENE	CHENE		BOULEAU CLT
$f_{v,mean}$	8,7	14,7		9,4	7,39	6,81		8,27
COV	7 %	14 %	7 %	18 %	14 %	10 %		22,4 %
$f_{v,k}$		11,2	7,5	6,62	5,36	5,61		5,35
$G_{m,mean}$				727				
COV				18				
$E_{m,k}$				498				
ρ_{mean}	701	752		703	701	678		598
COV	4 %	7 %		9 %	2 %	2 %		4,3 %
ρ_k		670		587	631	611		545

1.2 Cisaillement roulant

La propriété de cisaillement roulant est principalement utilisée dans la justification des panneaux CLT. Elle est également introduite dans les propriétés des bois lamellé-collé de l'EN 14080. Néanmoins, il n'existe pas dans l'EN 408 [5] de protocole d'essais propre à cette propriété mécanique.

Un des documents de référence au sujet du cisaillement roulant est le rapport de master de EHRHART [10] qui a réalisé une grande campagne d'essais de caractérisation mécanique de cette propriété sur les bois feuillus et résineux. Les essais complémentaires sur les essences n'ayant pas été caractérisées seront réalisés selon son protocole. Pour tester les résistances en cisaillement roulant du bouleau et du hêtre, les éprouvettes sont collées sur des tôles métalliques comme illustré sur la Figure 1-2 et Figure 1-3. Ces deux figures montrent les trois grandes familles de ruptures possibles en cisaillement roulant : une rupture à 45°, une rupture dans le plan de collage et une rupture suivant les cernes. Selon les analyses de EHRHART, le mode de débit des éprouvettes a un impact certain sur le mode de rupture en cisaillement roulant.

Avant de réaliser ces essais, EHRHART a réalisé un modèle MEF afin de vérifier que la distribution de contrainte était quasiment uniforme entre la plaque de chargement et l'éprouvette. Pour les éprouvettes en bois résineux, la plaque de chargement est remplacée par un élément bois feuillus (bien souvent du hêtre). Il est important de noter que bien souvent une partie de la rupture en cisaillement se produit au niveau de l'interface bois métal. Cella est probablement lié, selon lui, à la présence de contrainte de traction transversale qui s'exerce dans cette zone.

Les valeurs de résistance et de module en cisaillement roulant de ces essais sont donnés dans la Table 1-4.

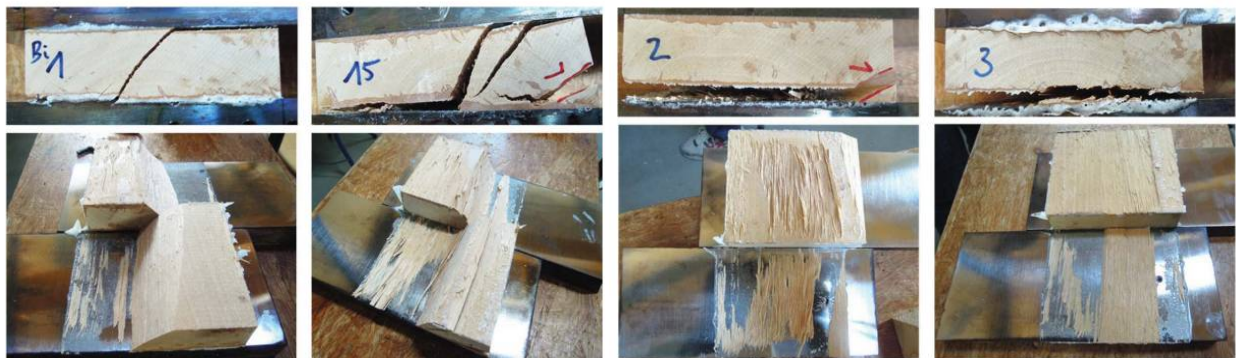


Figure 1-2 Rupture à 45°(gauche) et dans le plan de collage (droite) en cisaillement roulant dans du bouleau – Figure 3-11 et 3-12 de EHRHART [10].



Figure 1-3 Rupture selon les cernes en cisaillement roulant dans du hêtre – Figure 3-17 de EHRHART [10].

Dans la base de données de VEDOVELLI, les essais de cisaillement roulant sur du hêtre massif réalisés par HÜTTER [11] au KIT sont renseignés. Entre les essais de EHRHART [10] et les essais de HÜTTER, il y a 25 % de différence en résistance caractéristique et quasiment 50 % en module. Comme la masse volumique des essais de HÜTTER n'est pas renseignée dans la base de donnée, il ne sera retenu que les résultats des essais de EHRHART.

Pour le LVL de hêtre à plis croisés, la base de données de VEDOVELLI cite un rapport d'essais interne au TUG réalisé pour POLLMEIER [12]. Il est à noter que les résistances caractéristiques en cisaillement roulant du LVL sont proches des résistances en cisaillement à plat. Il se peut que dans cette configuration, ce soit le cisaillement roulant qui pilote la résistance de l'éprouvette.

Table 1-4 Tableau de synthèse des résistances en cisaillement roulant (Bouleau, Hêtre et LVL de Hêtre).

REF	EHRHART [10]		EHRHART [10]	HÜTTER [11]		POLLMEIER [12]	TUM [12]	TUM [12]
Essence	BOULEAU		HETRE	HETRE		LVL HETRE Q	LVL HETRE Q	LVL HETRE Q
$f_{v,mean}$	3,45		5,37	7,36		-	4,68	3,61
COV	10 %		9 %	12,5 %		-	15,5 %	3,2 %
$f_{v,k}$	2,91		4,64	5,82		-	3,54	3,29
$G_{m,mean}$	188		357	241		430	(Flat)	(Roll)
COV	19 %		12 %	17 %		(Flat)	-	
$E_{m,k}$	135		293	167			-	
ρ_{mean}	612		720	-		800	-	-
COV	6 %		4 %	-			-	-
ρ_k	557		676	-		730	-	-

L'étude bibliographique démontre qu'il existe peu de résultats d'essais pour le cisaillement roulant sur les essences concernées par le projet hardwood_joint. Le protocole mis en place par EHRHART semble être la meilleure solution pour quantifier la résistance et le module d'élasticité du chêne pour lequel il n'a été trouvé aucune donnée.

Entre la résistance au cisaillement longitudinal moyenne et la résistance au cisaillement roulant il existe un ratio de 2,321 pour le hêtre (BENISTAND / EHRHART) et 2,397 pour le bouleau (KIT [CLT] – EHRHART). Le ratio est moins important entre les valeurs caractéristiques avec respectivement 2,19 pour le hêtre et 1,84 pour le bouleau.

Pour le LVL de hêtre, si le cisaillement roulant sert de référence, le ratio entre les deux résistances moyenne est de 3,12 et 2,37 en valeurs caractéristique. En considérant le cisaillement à plat, ces ratios sont de 2,41 pour les moyennes et 2,20 pour les caractéristiques.

2 Protocole d'essais

Le protocole suivant décrit l'ensemble des principes mis en place pour réaliser les essais de cisaillement selon les deux directions, longitudinal et roulant, pour les différentes essences.

2.1 Normes

Les essais de cisaillement, ainsi que la détermination des propriétés physiques associées, sont encadrés par le corpus réglementaire suivant :

EN 408 [5] : Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

EN 384 [13] : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de masse volumique.

EN 13183-1 [14] : Détermination par la méthode de dessiccation de la teneur en humidité des pièces de bois sciées.

EN 14358 [15] : Détermination des valeurs caractéristiques.

2.2 Montage

Les essais de cisaillement longitudinaux devraient être réalisés en suivant les préconisations de l'EN 408 [5] comme illustré en Figure 2-1. Les essais préliminaires avec les tôles métalliques et une colle bi-composante EPONAL TH 316 de marque BOSTIK montrent une rupture systématique dans le plan de collage (photo supérieure droite de la figure).

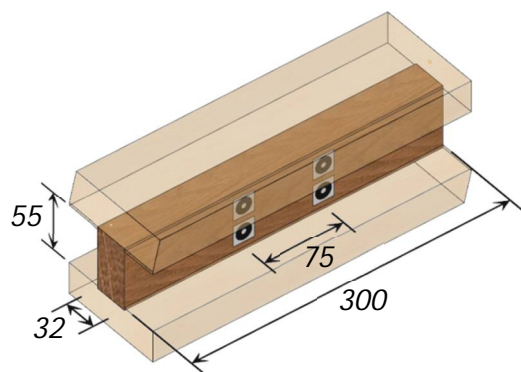
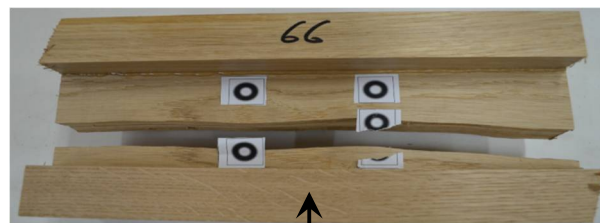
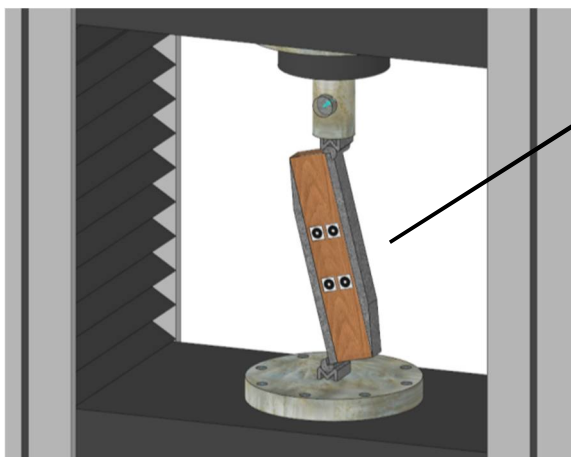
Pour y remédier, il a été décidé de remplacer les semelles métalliques par des lames de bois rainurées afin de centrer convenablement l'éprouvette, augmenter la surface de collage et d'assurer le maintien lors du collage. Avec cette adaptation, aucune rupture dans les joints de collage n'a été observée lors d'essais préliminaires. La hauteur des éprouvettes a été augmentée à 60 mm et les profondeurs des rainures fixées à 2,5 mm pour garder une hauteur fixe de 55 mm, comme imposé par l'EN 408. L'angle de 14° imposé par l'EN 408 a été respecté avec cette géométrie d'éprouvette.

Le module de cisaillement a été mesuré lors des essais préliminaires afin de le comparer aux valeurs bibliographiques. Il est calculé à partir de la distorsion entre les cibles positionnées directement sur l'éprouvette pour lesquelles le déplacement est mesuré par acquisition vidéo. La résistance en cisaillement étant le seul résultat important pour le projet hardwood_joint, les cibles ne seront pas utilisées dans cette campagne d'essai.

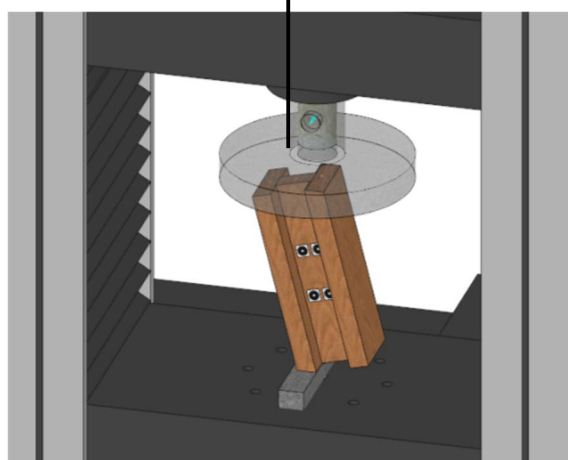
Pour les essais de cisaillement roulant, le montage se base sur les conclusions des essais de EHRART et l'utilisation de plaque de chargement en LVL de hêtre de type S à la place des tôles métalliques. Cette configuration doit néanmoins être validée par une campagne d'essais complémentaire.

Il est décidé de tester une éprouvette de 120 mm de côté et 45 mm d'épaisseur pour se rapprocher du volume de bois sollicité dans les assemblages rainurés.

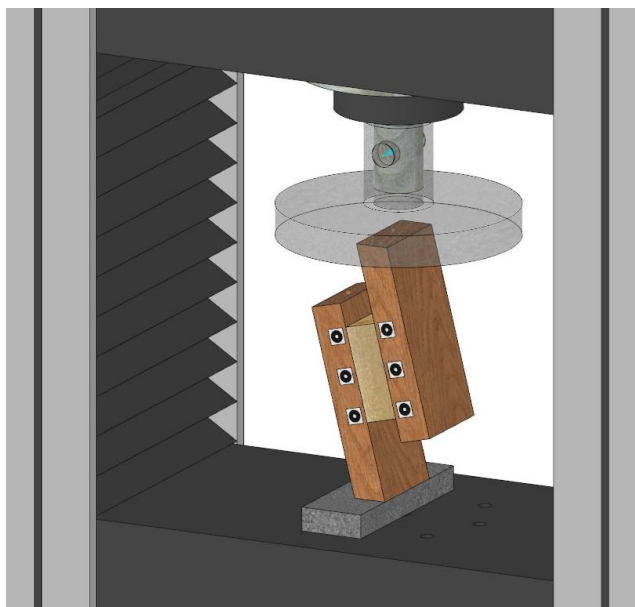
Montage EN 408



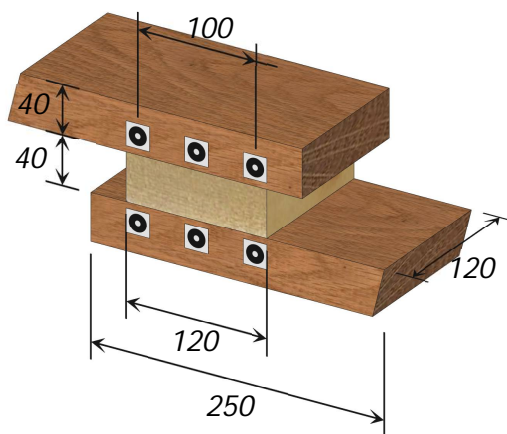
Dimensions des éprouvettes



Montage modifié



Montage cisaillement roulant



Dimensions des éprouvettes

Figure 2-1 Montage de cisaillement sur la machine d'essais universelle.

2.3 Sections, matériaux et dimensions

Les dimensions des éprouvettes sont fixées à partir des exigences de l'EN 408 et des éléments présentés en bibliographie.

Le bouleau sera testé en cisaillement longitudinal et le chêne en cisaillement roulant afin de compléter la base de données bibliographique.

Avant usinage, les bois sont conditionnés durant une période suffisamment longue (3 semaines au minimum) à une température de 20°C et une humidité relative de 65 % pour tendre vers une teneur en eau des bois aux alentours de 12 %. La teneur en eau est régulièrement vérifiée à l'aide d'un humidimètre à pointe.

Il sera réalisé 15 essais pour chaque configuration d'essais.

2.4 Dispositifs de mesure

Les essais sont réalisés sur une machine d'essais universelle (ZWICK Z250). La mesure des efforts au niveau du point de chargement se fait au moyen d'une cellule de force de 250 kN avec une précision de (± 0.01 kN) en adéquation avec les spécifications fixées par la norme.

2.5 Données d'essais complémentaires

Avant les essais, les dimensions de l'éprouvette sont contrôlées à partir d'une moyenne de deux mesures de toutes les dimensions prises à chaque extrémité avec un pied à coulisse numérique GARANT DC2.

La masse des échantillons est mesurée juste avant collage des éprouvettes. Cette masse, combinée aux dimensions, permet de calculer la masse volumique globale de l'éprouvette.

La teneur en eau des bois est mesurée par méthode dessicative selon la norme NF EN 13183-1 [14]. Après essais, une partie de l'éprouvette est prélevée pour être séchée sous une ambiance de 103 ± 2 °C. La stabilisation est atteinte lorsque la différence de masse entre deux pesées est inférieure à 0,1 % (précision de 0,01 g), avec une durée minimale de séchage de 7 jours.

2.6 Cycle de chargement

Pour les deux configurations d'essais de cisaillement, la vitesse de chargement ainsi que le cycle de chargement seront déterminées suivant les recommandations de la norme EN 408 [5], soit un effort maximal de rupture qui doit être atteint en 300 ± 120 s.

L'effort estimé est dans un premier temps tiré de la bibliographie puis corrigé à la suite des essais préliminaires. La contrainte estimée du bouleau est basée sur les essais réalisés par le KIT sur du CLT de la même essence. Pour le chêne, le cisaillement roulant est estimé à partir de la résistance longitudinale des essais de BENISTAND [7] et du ratio de 2,1 trouvé entre le cisaillement roulant et longitudinal pour les autres essences (Hêtre et LVL de Hêtre).

Les résistances estimées et vitesses de chargements sont calculées dans la Table 2-1.

Table 2-1 Charges estimées moyennes à rupture selon bibliographie.

Matériaux	Section résistante [mm ²]	Contrainte estimée [MPa]	Force estimée [kN]	Vitesse [kN/s]
Bouleau	32x300	8,3	80	0,267
Chêne	120x120	4,3	62	0,206

2.7 Méthode d'analyse des essais expérimentaux

2.7.1 Exploitation des essais

En cas de rupture au niveau du plan de collage (comme illustré sur la Figure 2-2), si la surface dépasse les 20 % de la zone de collage, alors l'éprouvette n'est pas retenue pour l'étude statistique.

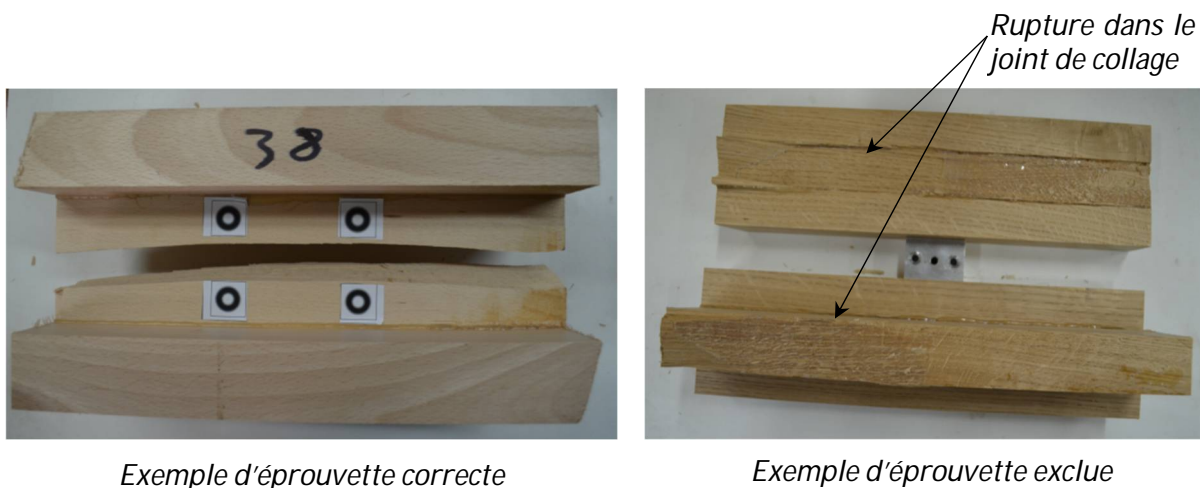


Figure 2-2 Comportement expérimental en cisaillement.

La résistance a été estimée à partir de la relation :

$$f_v = \frac{F_{max} \cos 14^\circ}{l b} \quad (2-1)$$

Avec

f_v La contrainte de rupture en cisaillement [MPa].

F_{max} L'effort mesuré à rupture [N].

$b h$ La section cisailée [mm²], soit 32x300 mm² en cisaillement longitudinal et 120x120 mm² en cisaillement roulant.

2.7.2 Correction des résultats en fonction de la teneur en eau

Conformément à l'EN 384 [13], il convient de corriger la masse volumique pour la ramener à une teneur en eau de référence de 12 % :

$$\rho = \rho(u) [1 - 0,005 (u - u_{ref})] \quad \text{pour } 8\% < u < 18\% \quad \text{avec } u_{ref} = 12\% \quad (2-2)$$

2.8 Analyse statistique des données expérimentales

L'expression des valeurs caractéristiques au fractile de 5 % et des valeurs moyennes caractéristiques est réalisée en suivant les prescriptions données par l'EN384 (§5.5.1) qui demande d'utiliser les méthodes de calcul définies dans l'EN 14358 [15], méthodes explicitées dans la suite du texte. Ces valeurs doivent, conformément aux prescriptions de l'EN 1990, être exprimées avec un niveau de confiance de 75 %.

Les masses volumiques moyennes et les portances locales moyennes sont exprimées dans le tableau de synthèse de résultats comme des moyennes caractéristiques. Les autres valeurs moyennes du tableau restent des moyennes arithmétiques.

En fonction du nombre d'essais et de la distribution des résultats, la norme offre deux possibilités pour le calcul des valeurs caractéristiques au fractile de 5 % : La méthode paramétrique et la méthode non paramétrique.

2.8.1 Valeur caractéristique - méthode non paramétrique

Cette méthode ne s'applique que si le nombre d'éprouvette est supérieure à 40, la méthodologie est alors la suivante :

- Classement des essais selon un ordre croissant et extraction de la valeur correspondant à 5 % de la fréquence d'apparition : $y_{0,5}$
- Détermination du facteur donnant la limite inférieure de tolérance à 5 % avec un niveau de confiance de 75 % : $k_{0,5,0,75} = (0,49 n + 17)/(0,28 n + 7,1)$
- Calcul de la valeur caractéristique à partir de l'équation : $m_k = y_{0,5} \left(1 - \frac{k_{0,5,0,75} V}{\sqrt{n}} \right)$ avec V le coefficient de variation.

2.8.2 Valeur caractéristique - méthode paramétrique

Dans le cadre de campagnes d'essais comportant moins de 40 échantillons, ou dès lors que la distribution des propriétés mesurées suit un modèle de distribution statistique normale ou log normale, il convient de déterminer les valeurs caractéristiques à partir de modèles paramétrés. La norme indique qu'en général, les mesures de résistances suivent une distribution selon une loi Log-Normale alors que pour les masses volumiques et les modules d'élasticité, la distribution des données est définie comme étant normale. Néanmoins, le choix de l'une des deux distributions sera justifié à partir du résultat d'un test de la normalité des données expérimentales (test de Shapiro).

Dans le cas de la distribution Normale ou Log-normale, il faut déterminer le facteur donnant la limite inférieure de tolérance à p% avec un niveau de confiance de $\alpha\%$: $k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}}$

Avec $k_\alpha(n)$ le fractile d'ordre $\alpha\%$ selon une distribution t non centrée avec n-1 degrés de liberté et un paramètre de non centralité $\lambda = u_{1-p} \sqrt{n}$. Et u_{1-p} le fractile d'ordre (1-p) de la fonction de distribution normale. Ces paramètres sont définis à partir du logiciel statistique R développé par CRAN.

Par exemple, le coefficient k_s d'une valeur caractéristique à 5 % avec un niveau de confiance de 75 % pour 10 essais est calculé tel que :

$$\text{Loi normale } u_{1-5\%} : u_{95\%} = 1,644854$$

$$\lambda = 1,644854 \sqrt{10} = 5,201484$$

$$\text{La loi t excentré de } \lambda : k_{75\%}(10) = 6,652381$$

$$k_s(10) = \frac{k_\alpha(10)}{\sqrt{10}} = \frac{6,652381}{\sqrt{10}} = 2,103668$$

Ce qui donne le même résultat que celui tabulé dans tableau 1 de l'EN 14358.

Dans le cas de la distribution Log-normale, la méthode de détermination de la valeur caractéristique est la suivante :

- Détermination de la valeur moyenne : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum \ln m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max \left[0,05 ; \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln m_i - \bar{y})^2} \right]$
- Calcul de la valeur caractéristique à 5 % à partir de l'équation : $m_k = e^{(\bar{y} - k_s(n) s_y)}$

Dans le cas de la distribution normale, la méthode de de détermination de la valeur caractéristique est la suivante :

- Détermination de la valeur moyenne : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max \left[0,05 \bar{y} ; \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (m_i - \bar{y})^2} \right]$
- Calcule de la valeur caractéristique à 5 % à partir de l'équation : $m_k = \bar{y} - k_s(n) s_y$

2.8.3 Valeur moyenne caractéristique

Détermination de la valeur moyenne : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum m_i$

Détermination de l'écart-type : $s_y = \max \left[0,05 \bar{y} ; \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (m_i - \bar{y})^2} \right]$

Définition du facteur permettant de trouver la valeur caractéristique moyenne avec un niveau de confiance de 75 % :

$$k_s(n) = \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}}$$

Avec $t_{\alpha, n-1}$ fractile d'ordre $\alpha\%$ selon une distribution centré avec n-1 degrés de libertés.

Ce paramètre est défini à partir du logiciel statistique R développé par CRAN.

Par exemple pour un niveau de confiance α de 75 % et 10 échantillons on trouve :

$$t_{75\%, 10-1} = 0,7027221 \text{ soit } k_s(n) = \frac{0,7027221}{\sqrt{10}} = 0,2222203$$

Soit le même résultat que dans le tableau 2 de l'EN 14358

La valeur caractéristique moyenne est obtenue par l'équation : $m_{mean} = \bar{y} - k_s(n) s_y$

3 Résultats expérimentaux

Contrairement à ce qui a été observé lors des essais expérimentaux, pour le cisaillement longitudinal, une grande partie des ruptures se sont produites dans les plans de collage (cf Figure 3-1). En respectant l'exclusion des essais en cas d'une rupture de 20 % dans le plan de collage, cela revient à exclure la moitié des essais (8 exclues sur 17 éprouvettes), les résultats sont présentés dans la Table 3-1. Néanmoins, un test de Wilcoxon-Mann-Whitney montre que le lot d'éprouvette conforme et le lot d'éprouvette exclue sont statistiquement similaires (p-value de 0,82 pour la masse volumique et 0,28 pour la résistance). C'est pour cela que les éprouvettes normalement exclues par l'EN 408 sont tout de même conservées dans l'analyse statistique présentée dans la Table 3-2. Les valeurs de ruptures mesurées sont supérieures de 10 % à celles de la bibliographie pour une masse volumique 10 % plus faible.

Pour le cisaillement roulant dans le chêne, la résistance est assez proche de celle estimée par la bibliographie. Moins d'éprouvettes cassent dans le joint de colle et selon la même approche que pour le cisaillement longitudinal, il est statistiquement admis que les résistances des éprouvettes « normalement » exclues sont similaires aux résistances des éprouvettes valides (p-value de 0,51). Les mêmes typologies de ruptures que celles trouvées en bibliographies ont été observées lors de la campagne expérimentale. Comme il fallait s'y attendre, la rupture en cisaillement roulant se produit quasiment systématiquement dans la zone initiale poreuse (voir Figure 3-2)

Table 3-1 Résultats expérimentaux avec exclusion.

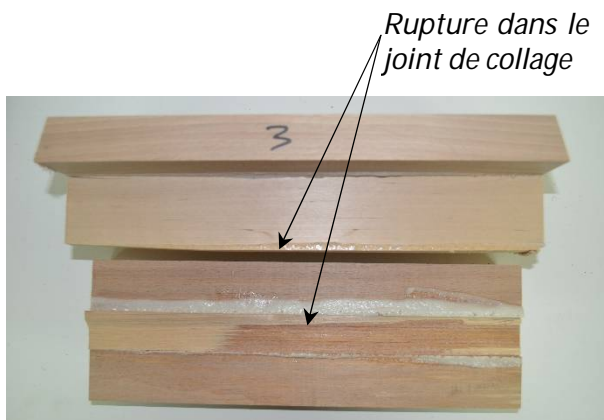
	n	ρ_{mean} [Kg/m ³]	ρ_k [Kg/m ³]	ρ_{COV} [%]	τ_{mean} [MPa]	τ_k [MPa]	τ_{COV} [MPa]	n_{valid}
Bouleau – Cisaillement longitudinal	17	573	543	2,92	9,24	8,18	6,51	9
Chêne – Cisaillement roulant	15	679	611	5,44	4,61	3,95	8,13	10

Table 3-2 Résultats expérimentaux sans exclusion.

	n	ρ_{mean} [Kg/m ³]	ρ_k [Kg/m ³]	ρ_{COV} [%]	τ_{mean} [MPa]	τ_k [MPa]	τ_{COV} [MPa]
Bouleau – Cisaillement longitudinal	17	573	543	2,92	9,40	8,58	4,72
Chêne – Cisaillement roulant	15	679	611	5,44	4,52	3,75	9,64



Exemple d'éprouvette valide



Exemple d'éprouvette exclue

Figure 3-1 Exemples de ruptures des éprouvettes de cisaillement longitudinal dans le bouleau.



Rupture à 45°



Rupture dans le joint de collage



Rupture selon zone initiale poreuse



Rupture en coin

Figure 3-2 Typologies de rupture des éprouvettes de cisaillement roulant dans le chêne.

4 Relation entre les propriétés

4.1 Résistance en fonction de la masse volumique dans le bouleau

Selon la Figure 4-1 et comme l'avait montré BENISTAND [7], pour les feuillus, la relation entre la masse volumique et la résistance en cisaillement n'est pas significative. Néanmoins, la faible variabilité des masses volumiques (moins de 3 %) peut expliquer ce manque de corrélation entre les propriétés. Il est important de noter que les 17 échantillons ont été prélevés dans 9 planches différentes pour normalement s'affranchir de ce phénomène. En ne conservant que les éprouvettes qui ont cassé dans le bois, voir graphique 'Validate' de la Figure 4-1, la relation entre masse s'améliore mais n'est toujours pas significative (R^2 de 0,1).

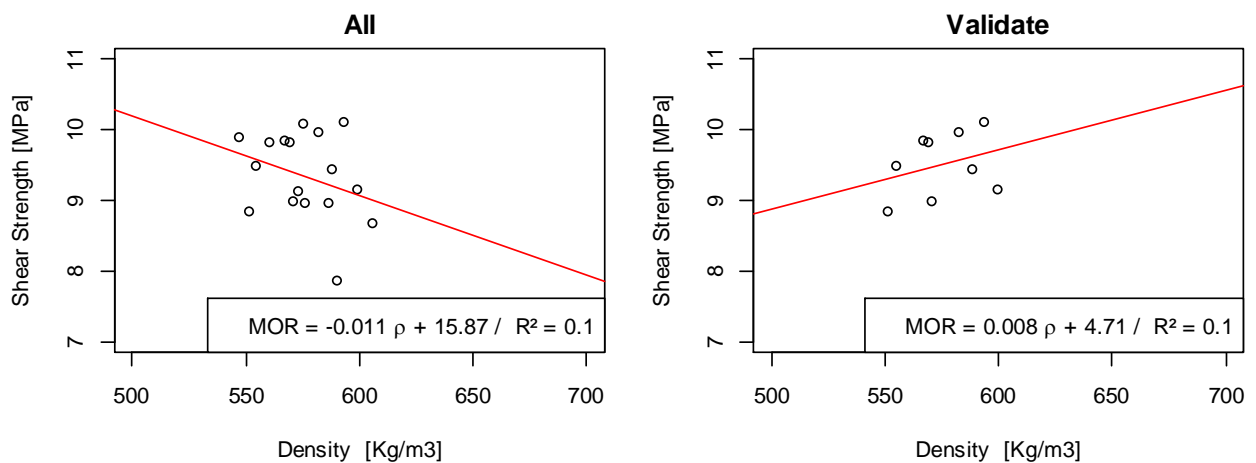


Figure 4-1 Résistance en cisaillement longitudinal en fonction de la masse volumique dans le bouleau.

4.2 Résistance en fonction de la masse volumique dans le chêne

Selon la Figure 4-2 la relation entre la résistance au cisaillement roulant et la masse volumique est significative au regard des éprouvettes qui ont cassé exclusivement dans le bois (graphique 'Validate'). Entre les deux analyses, comme celle qui ne s'intéresse qu'aux éprouvettes valides donne des prédictions de résistance plus faible, il est préférable d'utiliser cette dernière pour prédire la résistance en cisaillement roulant, soit :

$$f_{v,r,mean} = 0,007 \times \rho_{mean} - 0,41$$

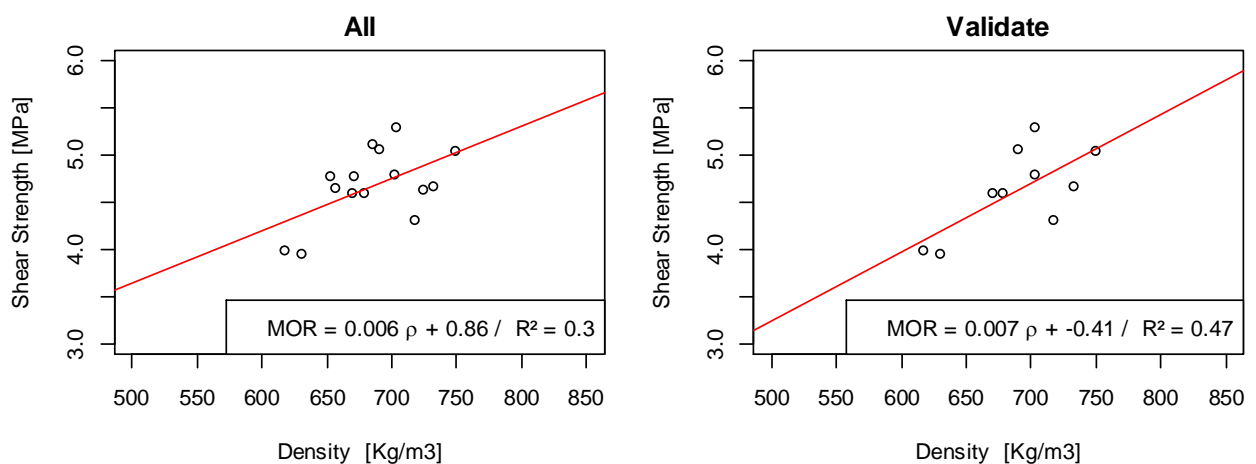


Figure 4-2 Résistance en cisaillement roulant en fonction de la masse volumique dans le chêne.

5 Références

- [1] S. AICHER et D. OHNESORGE, *Shear strength of glued laminated timber made from*, Eur. J. Wood Prod. Vol 69, 2011.
- [2] J. AICHER, Z. AHMAD et M. HIRSCH, *Bondline shear strength and wood failure of European*, Eur. J. Wood Prod. Vol 76, 2018.
- [3] CEN, *EN 14080 : Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*, 2013.
- [4] J. W. G. VAN DE KUILLEN, W. GARD, G. RAVENSHORST, V. ANTONELLI et A. KOVRYGA, *INTER 50-06-1 : Shear strength values for soft- and hardwoods*, 2017.
- [5] CEN, *EN 408 : Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*, 2013.
- [6] A. KOVRYGA, P. STAPEL et J. W. G. VAN DE KUILLEN, *Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech*, Wood Material Science & Engineering, 2019.
- [7] T. BENISTAND, *Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5 (Theses)*, Université de Lorraine, 2019.
- [8] KIT, *Pruefbericht_Schiller_ABZ_Eiche-BSH_9022199000-1_Re2012.08.21.pdf*, VEDOVELLI Database, 2012.
- [9] TUG, *Pruefbericht_PB12-112-6-01 TUG (page 92-93)*, VEDOVELLI Database.
- [10] T. EHRHART, *Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettsperrholz" (master thesis) 2014*, TUG, 2014.
- [11] V. HUTTER, *Bestimmung der Rollschubfestigkeit und-steifigkeit von Furnierschichtholz aus Laubholz (Bachelor thesis)*, KIT, 2017.
- [12] TUM, *PB_11513_FSH_Buche_Erw_Pollmeier_TUM.pdf-1*, VEDOVELLI Database.
- [13] CEN, *EN 384 : Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*, 2018.
- [14] CEN, *EN 13183-1 : Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1 : Determination by oven dry method*, 2002.
- [15] CEN, *EN 14358 : Timber structures - Calculation and verification of characteristic values*, 2016.

Embedding strength prediction for European Hardwood species

Thibault Benistand, ENSTIB/LERMAB, University of Lorraine, France

Laurent Bleron, ENSTIB/LERMAB, University of Lorraine, France

Jean-François Bocquet, ENSTIB/LERMAB, University of Lorraine, France

Keywords: embedment tests, hardwood, Eurocode

1 Introduction

In Europe, the number of buildings made with timber is increasing. Builders mainly use solid timber, glulam, CLT and LVL from softwoods. In order to ease the tensions over softwood resources (such as drought and insects) and to keep maintaining sustainable exploitation of forests, designers will have to reintroduce hardwoods into buildings. In Europe, the species with the highest potential for this usage are beech, ash, oak, birch and poplar. While some studies have made it possible to validate or modify the estimation of mechanical properties for these species (e.g., Kovriga et al., 2019), a great deal of research remains to be carried out on the justification of the joints. Regarding the difficulties of using nails in hardwood, this study will be focused only on fasteners such as bolts and dowels.

2 Embedding strength in hardwood

In Eurocode 5 (EN 1995-1-1), the estimation of dowel-type fastener strength capacity is still based on the limit analysis theory proposed by Johansen (1949). The calculation is based on the geometric parameters of the connection (thickness and dowel diameter), the yield moment of the fastener $M_{y,Rk}$ and the timber properties: the embedding strength $f_{h,\alpha,k}$.

Equation (1) of Eurocode 5 is based on several studies (Whale and Smith, 1986; Ehlbeck and Werner, 1992) and allows the estimation of the characteristic embedding strength. Ehlbeck and Werner carried out embedment tests in different hardwood and tropical wood species. They showed that the embedding strength for these species was 10% higher than the strength measured for softwoods. Despite these conclusions, only the equation determined for softwoods was retained in the writing of the European calculation standard (1).

$$f_{h,0,k} = 0.082 (1 - 0.01 \times d) \rho_k \quad (1)$$

Larsen (1973) showed that the embedding strength of fasteners with a diameter greater than 8mm depended on the angle between the force and the grain direction. This variation can be described using the Hankinson approach (2). This formula introduces the corrective coefficient k_{90} which corresponds to the ratio between the embedding strength parallel and perpendicular to the grain. In EN 1995-1-1, a corrective factor specific to hardwoods is proposed. This equation was established from the tests of Ehlbeck and Werner (1992) by dividing the embedment equation at 0° proposed in the Eurocode by the characteristic experimental embedding strength obtained for beech and azobe.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (2)$$

with $k_{90} = 1.3 + 0.01d$ for softwood and $k_{90} = 0.9 + 0.01d$ for hardwood

Since Ehlbeck and Werner's 1992 study, further studies have been proposed to characterise the embedding strength of hardwoods. These include :

- Sandhaas and al. (2013), who proposed to simplify the calculation code using a formula without integrating the diameter effect.
- Kobel and Frangi (2014), who proposed specific embedment values for beech LVL.

In 2008, Hubner et al. (2008) planned to predict embedding strength with a mathematical form in power law, in accordance with a proposal from Blass and Uibel (2007). This equation was proposed in the draft of EN 1995-1-1 (2019-09-21).

$$f_{h,0,k} = 0.015 \rho^{1.19} d^{-0.179} \quad (3)$$

Franke and Magniere (2014) studied the embedding strength for softwood and hardwood depending on the angle between the load and the grain direction. For each angle direction between the load and the grain (0° , 25° , 55° and 90°) and for each diameter (6, 12, 20 and 30 mm) they conducted 10 tests on beech and spruce. They confirmed the validity of the Hankinson equation for softwoods, and proposed a new equation (4) for hardwoods with a variation on the trigonometric coefficients. This relationship was based on mean values and needed to be studied with characteristic values in order to be used in design standards.

Schweigler et al. (2018) summarised the different behaviour laws that existing for softwood embedding strength variations in function of the angle between force and grain.

$$f_{h,\alpha,mean} = \frac{f_{h,0}}{k_{90} \cdot \sin^{1.2} \alpha + \cos^{1.5} \alpha} \quad (4)$$

Numerous studies point out the impact of the roughness of fasteners on the value of the embedding strength parallel to the grain. For softwood, Rodd (1973) and Bleron (2000) found a 47% increase in embedding strength due to the use of knurl fasteners compared to smooth fasteners. Hohenwarter (2014) present tests conducted by Spork in 2007 in spruce with a diameter of 20mm. He confirmed the influence of the roughness on the embedding strength. His results indicated an increase of 16% of embedding strength between knurl fasteners and electrogalvanised fasteners. They also showed a diminution of 6% between smooth and electrogalvanised dowels. As such, the impact of the roughness of rods is of such importance that this parameter cannot be chosen randomly. In order to obtain precise embedding strength equations and a better competitiveness of hardwood species in timber buildings, it appears essential to perform tests with a roughness similar to dowels used in timber construction.

As is the case with all mechanical properties of wood, embedment strength is impacted by variations in moisture content. Hubner et al. (2008) studied the impact of moisture content on the embedding strength of ash and proposed a factor of correction of 3% per percent of moisture content for embedding strength parallel to the grain, and 4% per percent of moisture content for embedding strength perpendicular to the grain. Sandhass et al. (2013) used the same correction for embedding strength as that described in EN 384 for the compression parallel to the grain (3% per percent of moisture content).

A review of the literature regarding embedment strength shows that it is necessary to improve the reliability of prediction of this property. It also shows that the domain of prediction must be extended to the species most likely to be used. As a result, this study will focus on two main hardwood species that are widespread in Europe (beech and oak) and two fast-growing species (poplar and birch). In order to use test results in the BOF (Beam On Foundation) modelling approach, embedding strength displacement evolution will be analysed according the method proposed by Schweigler et al. (2019).

3 Materials and method

3.1 Test setup

When it was possible, the embedment strength tests were carried out according to the directives of EN 383 (2007).

The tests were carried out on a universal testing machine with a capacity of 250 kN. Figure 1 shows the principle of the test setup used for executing the embedding strength tests in the two main directions (0° and 90°). The test setup included two lateral steel jaws which embedded the rod to limit its deformations under bending.

A stack of grinded metal plates and linear needle bearings allowed for free horizontal movement of the sample. This was essential to correctly measure the vertical load applied on the sample when there was an angle between the direction of loading and the grain.

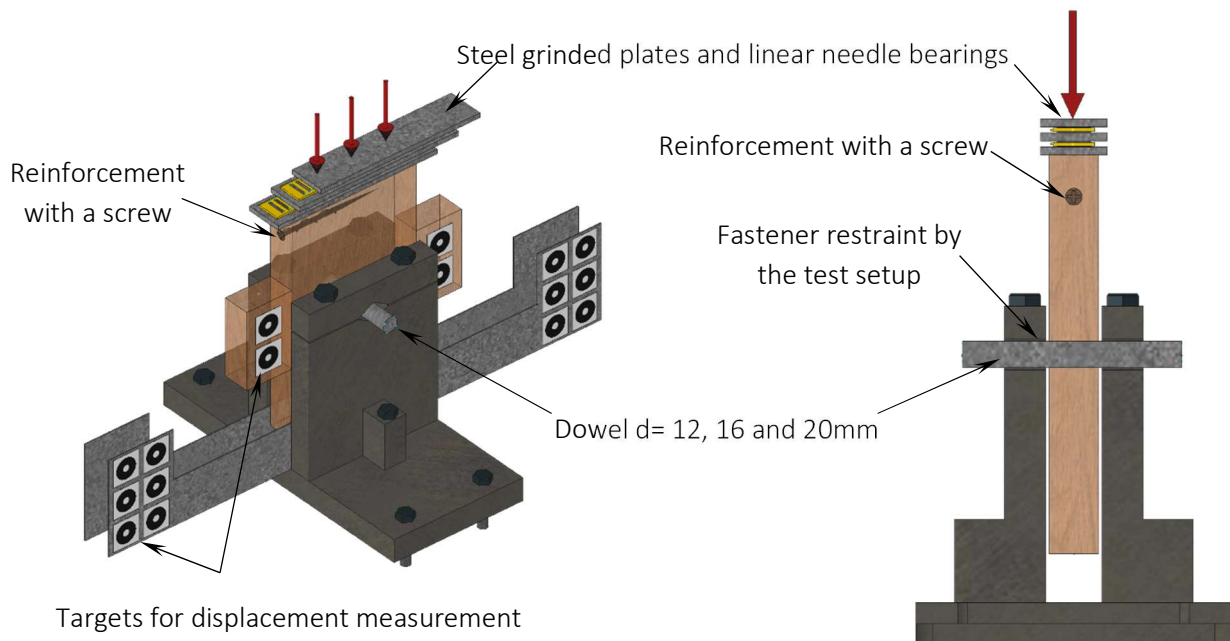


Figure 1: Test setup for embedding strength test (angle of 0° and 90° between force and grain).

In order to provide embedment properties for finite element models (such as beam on foundation), the densification phase after the plastic threshold needed to be as long as possible. To limit the opening of cracks due to transversal tension in the sample at 0° and 30° , it was reinforced with a screw.

In order to be as close as possible to real-world application, the rods used for the tests were similar to those often installed in timber buildings. The use of galvanised steel provided realistic roughness between the dowel and the timber. Considering the high embedding strength that can be achieved with hard wood, and to maintain a thickness sufficiently large for the sample, a high-quality steel was chosen (steel class 8.8).

For loading angles other than 0° and 90° , the recommendations concerning the dimensions and the protocol for loading the samples found in EN 383 (2007) had to be adapted as shown in Figure 2. The same loading setup was used, but the sample dimensions were enlarged by gluing with a polyurethane adhesive (KLEIBERIT 510 polyurethane). To conduct the analysis after testing, only the density where the rod was inserted was retained. It was measured before bonding.

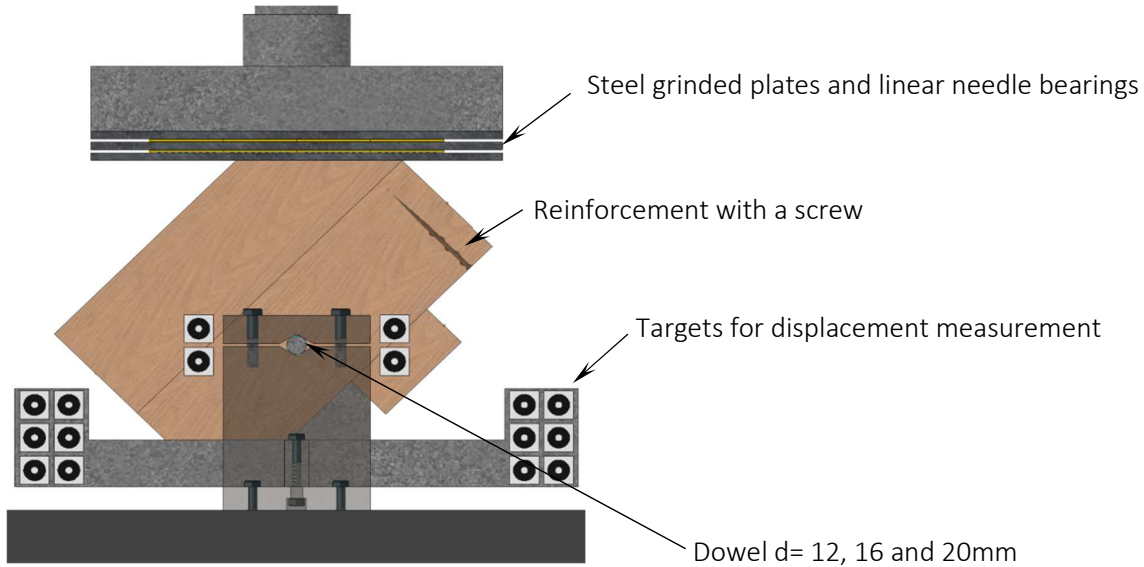


Figure 2: Experimental setup for tests with an angle between the direction of loading and the grain.

3.2 Samples

The dimensions of the sample were fixed according to EN 383 (2007), as shown in Figure 3. The minimum dimensions l_1 and a_1 are shown in Table 1. At a 45° angle, the distances were determined by linear interpolation. According to the norm, the thickness of the test samples should be between $1.5d$ and $4d$. To conform to this criterion, a thickness of 30 mm was used for a rod with a diameter of 12 mm. A thickness of 35 mm was used for rods with a diameter between 16 mm and 20 mm.

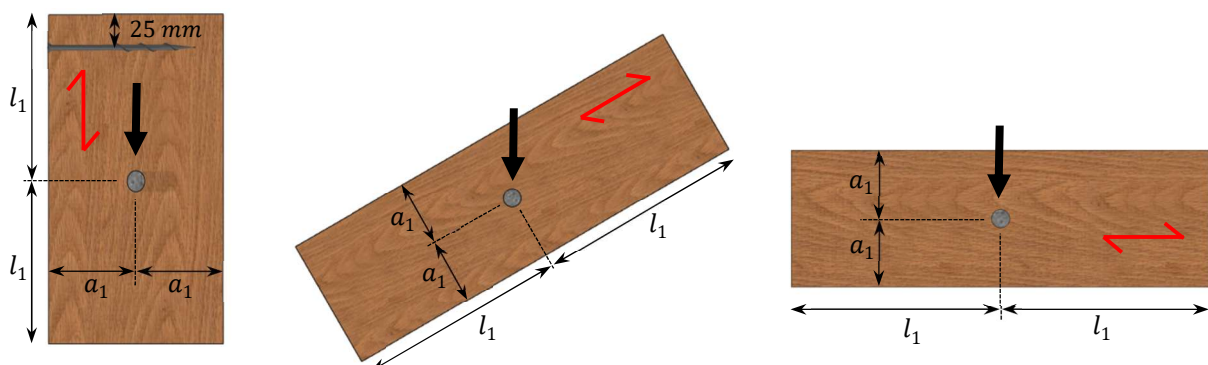


Figure 3: Sizes of specimen according EN 383 (2007). (Note: schema with angle does not exist in EN 383).

Table 1: Size of specimen according to Table 1 in EN 383 (2007).

Angles [°]	0	30	60	90
l_1	7.d	11.5 d	15.7 d	20.d
a_1	3.d	3.7 d	4.5 d	5.d

Before machining the samples, the boards were conditioned for three weeks at a temperature of 20°C and a relative humidity of 65% to tend towards a humidity of the woods around 12%. After the test, the moisture content was measured using a drying method according to NF EN 13183-1 (2002).

3.3 Data analysis

The test curves f_h (embedment displacement) were analysed according to the method developed by Schweigler et al. (2019) to extract the different stiffnesses and the embedment strength. All these results are available on DIVA (<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-87945>).

In accordance with EN 384 (2018), the density for all interpretations was corrected to indicate a reference moisture content of 12%, as follows:

$$\rho = \rho(u)[1 - 0,005(u - u_{ref})] \text{ for } 8\% < u < 18\% \text{ with } u_{ref} = 12\% \quad (5)$$

Despite an undeniable impact of moisture content on embedding strength, the regulation does not impose to correct the values obtained by taking care of it. However, following the example of Sandhaas et al. (2013), the values obtained were corrected using the formula proposed for axial compression as presented in EN 384, namely:

$$F_{c,0} = F_{c,0}(u)[1 - 0,03(u - u_{ref})] \text{ for } 8\% < u < 18\% \text{ with } u_{ref} = 12\% \quad (6)$$

The tests conducted by Hubner et al. (2008) showed that the embedding strength perpendicular to the grain decreased by 3% per percent of moisture content. For this reason, a global criterion of correction for the embedment according to any angle between the effort and the grain of the wood was considered, as follows:

$$f_{h,\alpha} = f_{h,\alpha}(u)[1 - 0,03(u - u_{ref})] \text{ for } 8\% < u < 18\% \text{ with } u_{ref} = 12\% \quad (7)$$

The characteristic values at the fifth percentile and the characteristic mean values were expressed by following the prescriptions given by EN 384 (2018) (§5.5.1) which requires the use of the calculation methods defined in EN 14358 (2016). These values must be expressed in accordance with the requirements of EN 1990 with a confidence level of $\alpha = 75\%$.

The average densities and the average local embedding strength are expressed in Table 6 as characteristic averages. The other mean values in the table are arithmetic means.

In order to propose equations for structural design, the embedment strength mean equation as a function of diameter and density was estimated for each angle and each species. These mean equations were then transformed into a characteristic equation according to the method used by Ehlbeck and Werner (1992) and Hubner et al. (2008). The factor γ was calculated according to equation (8) to adjust the curve of the linear regression as a function of the coefficient of variation of the density and the embedding strength. The characteristic equation is obtained by multiplying the mean equation by the correction coefficient γ , as follows:

$$\gamma = \frac{x(P = 0.05|N(\mu; COV_{fh}))}{x(P = 0.05|N(\mu; COV_{\rho}))} \quad (8)$$

4 Test results

The tests results presented in Table 6 (see appendix) were consistent with the results presented in the literature review. Density COV varied from 4% to 9% and embedment strength COV varied between 8% and 14%. Despite similar densities between beech and oak, tests show significant differences on the embedding strength capacity depending on the species; the beech was, on average, 16% stronger than oak.

5 Discussion

5.1 Embedding strength parallel to the grain

For dowels with a diameter of 12 mm and 16 mm, the data analysis shows a correlation coefficient of between 0.28 and 0.73 for the embedment strength parallel to the grain and the density (Table 3). For dowels with a diameter of 20 mm, this correlation coefficient remains high for beech ($R^2 = 0.59$), but decreases for birch ($R^2 = 0.33$), oak ($R^2 = 0.23$) and poplar ($R^2 = 0.13$). The data also show that the embedment strength can be plotted as a function of density for each rod size. Therefore, it is possible to define a relationship of the type $f_h / \rho = f(d)$ (Figure 4).

Table 2. R^2 coefficient for relation between embedment strength and density for each species and each diameter

	Poplar	Birch	Beech	Oak
D12	0.28	0.38	0.70	0.70
D16	0.64	0.55	0.73	0.57
D20	0.13	0.34	0.60	0.24

The average equation of embedding strength for each species is shown on Figure 5 in comparison with the equations presented in CIB 25-7-2, which was used as a basis for EN 1995-1-1 (2004). With the exception of poplar and birch, the average equations obtained by the tests are higher. This suggests that the code and its equation (1) tend to underestimate the embedding strength of hardwoods.

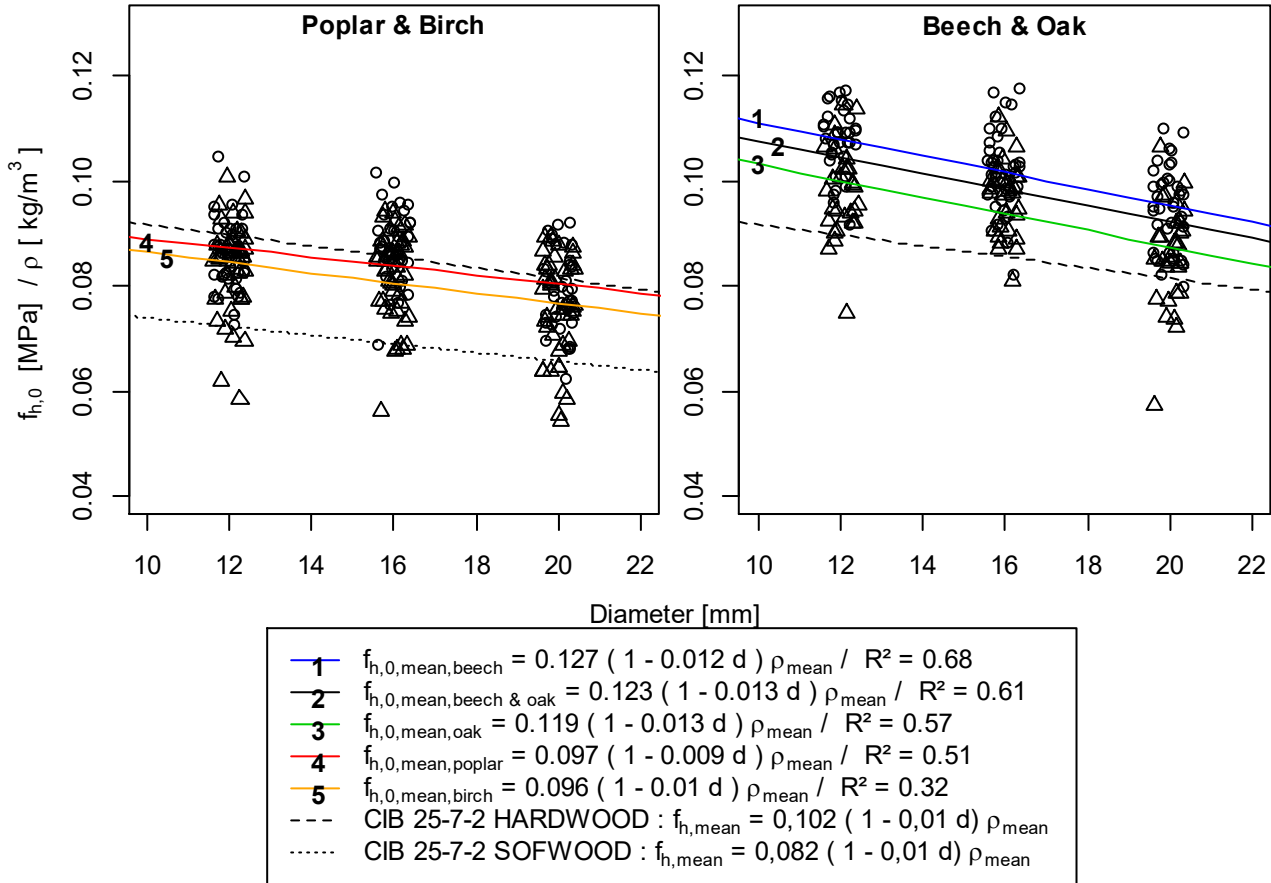


Figure 4: Embedding strength parallel to the grain as a function of diameter and density. The variation of the diameter is due to an artificial jitter to make the curve easier to read.

The difference between Ehlbeck and Werner's (1992) proposal (CIB 25-7-2) and the beech test results is between 18% and 20%. This gap could be explained in part by the natural variability linked to the growth of the trees, but the main reason for this disparity comes from the difference in roughness between the smooth rod used in the 1992 study and the galvanised rods used in the current study.

Table 3 shows the conversion of the average equations into a characteristic equation using the method explained in the previous section. The equations proposed for poplar and birch are quite close to each other and are clearly lower than the equations obtained for beech and oak. The hypothesis, made in France, that poplar behaves like a coniferous species is thus verified. Birch can also be considered as a softwood when estimating its embedding strength.

Table 3: Characteristic relationships of the embedding strength parallel to the grain.

Species	$f_{h,0,mean} =$	γ	$f_{h,0,k} =$
Poplar	$0.097(1 - 0.009 d) \rho_{mean}$	0.930	$0.091(1 - 0.009 d) \rho_k$
Birch	$0.096(1 - 0.010 d) \rho_{mean}$	0.849	$0.082(1 - 0.010 d) \rho_k$
Beech	$0.127(1 - 0.012 d) \rho_{mean}$	0.869	$0.111(1 - 0.012 d) \rho_k$
Oak	$0.119(1 - 0.013 d) \rho_{mean}$	0.857	$0.103(1 - 0.013 d) \rho_k$

Extracting a characteristic equation from the cumulative average results of all species would make no sense because the density differences between poplar and other hardwood species are significant. The coefficients of variation of 17% on the density and 27% on the embedment would lead to the expression a characteristic equation equivalent to the current equation of the Eurocode (1). This solution does not give an optimal report on the performances of hardwood species.

For oak and beech, a new embedment strength equation (9) should be proposed. This equation is obtained by setting a COV of 15% for embedment (14.2% in reality) and a COV of 6.5% for density, as follows:

$$f_{h,0,k} = 0.104 (1 - 0.013 d) \rho_k \quad (9)$$

Compared to the current equation of the Eurocode (1), this new mathematical relationship allows an average gain of 22% of embedding strength for organs with a diameter of between 12 mm and 20 mm. This new equation overestimates the embedding strength for oak to a maximum of 3.6% and underestimates the strength for beech by an average of 9.7%. By using the same COV for the density as that proposed in EN 384 (COV = 10%) and the COV generally used for strength (20%), it is possible to estimate equation (10), which never underestimates the embedding strength compared to all the results of the study:

$$f_{h,0,k} = 0.099 (1 - 0.013 d) \rho_k \quad (10)$$

Following the work of Hubner et al. (2008), it is possible to express a general average and characteristic equation to estimate the embedment strength as a function of density and diameter for all species. The transformation between mean and characteristic equations is made by considering a COV of 10% for the density and 20% for the embedment strength, as follows:

$$f_{h,mean} = 0,00504 \cdot \rho_{mean}^{1,529} \cdot d^{-0,195} \quad (11)$$

$$f_{h,k} = 0,00459 \cdot \rho_k^{1,529} \cdot d^{-0,195} \quad (12)$$

As shown in Figure 5, this new equation underestimates the characteristic embedment strength for birch by 10% for the diameter 20mm, but gives safe results for the other three species. The equation proposed by Hubner et al. (2008) corrects this problem but significantly underestimates the strength for beech and oak.

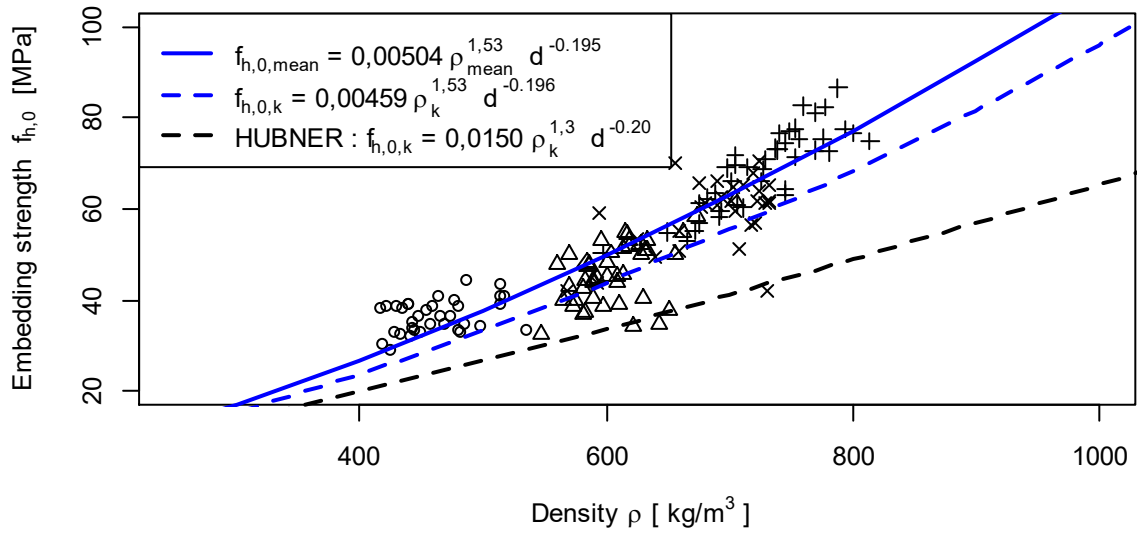


Figure 5: Embedding strength parallel to the grain as a function of density for a diameter of 20 mm.

5.2 Embedding strength perpendicular to the grain

Figure 8 shows that the embedment strength perpendicular to the grain is largely dependent on the timber species. The tests allowing the writing of Eurocodes (CIB 25-7-2) were carried out with beech timber. The results of this proposal to forecast embedment strength are comparable to those obtained in this experimental study. As indicated in the literature review, the roughness of the dowel has no effect on the embedment strength perpendicular to the grain. The small difference observed can be explained by natural variability linked to wood growth.

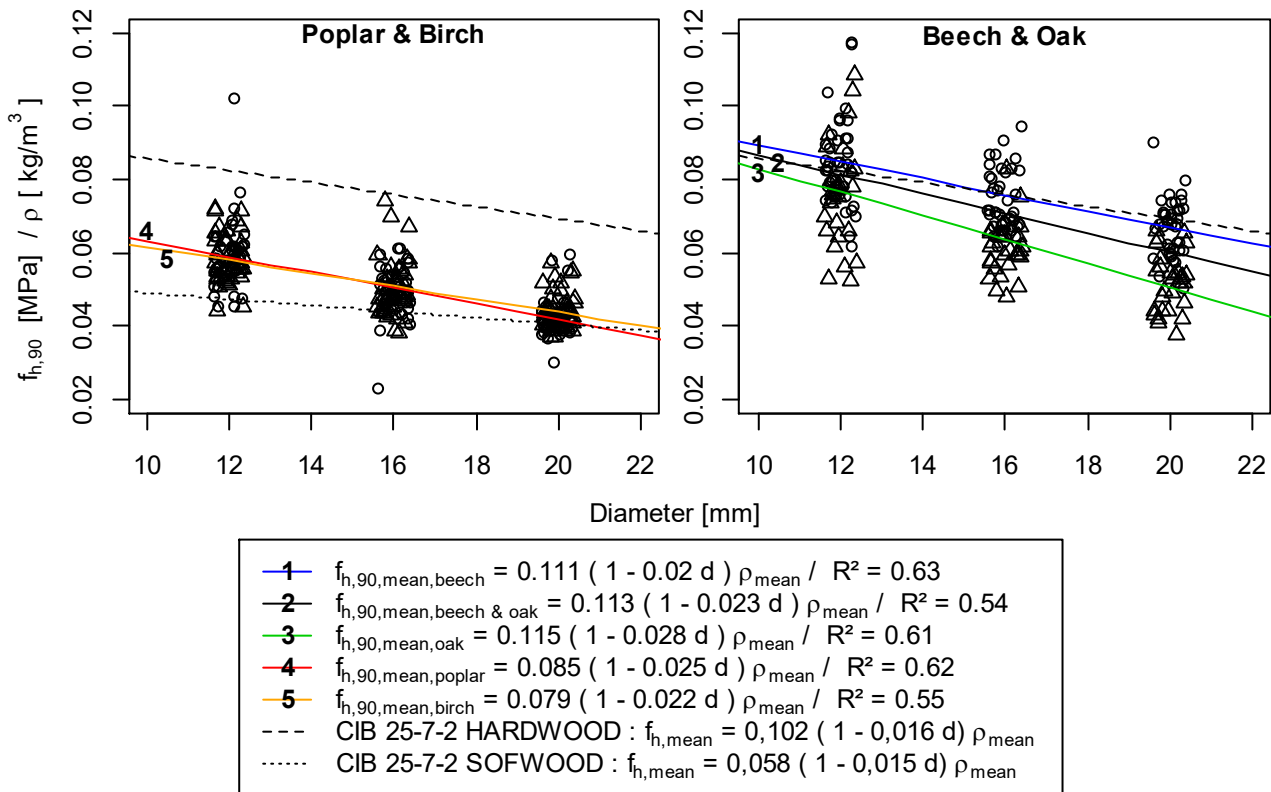


Figure 6: Embedding strength perpendicular to the grain as a function of diameter and density. The variation of the diameter is due to an artificial jitter to make the curve easier to read.

The average equations regarding embedment strength parallel to the grain are converted into characteristic equations in Table 4. In Eurocode 5, the determination of the embedment perpendicular to the grain is based on the Hankinson formula, in which a coefficient k_{90} is introduced as $k_{90} = f_{h,0,k}/f_{h,90,k}$. The equation of k_{90} is defined for rods with diameters ranging from 12 mm to 20 mm.

Table 4: Characteristic relationships of the embedding strength perpendicular to the grain and k_{90} coefficient according the definition of EN 1995-1-1.

Species	$f_{h,90,mean} =$	γ	$f_{h,90,k} =$	$k_{90} =$
Poplar	$0.085 (1 - 0.025 d) \rho_{mean}$	0,724	$0.061 (1 - 0.025 d) \rho_k$	$1.017 + 0.072 d$
Birch	$0.079 (1 - 0.022 d) \rho_{mean}$	0,752	$0.060 (1 - 0.022 d) \rho_k$	$1.141 + 0.042 d$
Beech	$0.111 (1 - 0.020 d) \rho_{mean}$	0,740	$0.083 (1 - 0.020 d) \rho_k$	$1.238 + 0.022 d$
Oak	$0.115 (1 - 0.028 d) \rho_{mean}$	0,657	$0.076 (1 - 0.028 d) \rho_k$	$0.86 + 0.071 d$
Beech & Oak	$0.113 (1 - 0.023 d) \rho_{mean}$	0,677	$0.077 (1 - 0.023 d) \rho_k$	$1.147 + 0.039 d$

Using the characteristic equation to predict embedment strength parallel to the grain found for each species, the experimentally defined reduction factor k_{90} is shown not to be as low as that proposed by Eurocode 5 (2).

For birch and poplar, the prediction made using the equations of Eurocode 5 (1) to predict embedment strength and the factor k_{90} for softwood underestimates embedment strength by nearly 2% compared to the experimental results (the maximum deviation is 10% for poplar with a diameter of 16 mm). Without modifying EN 384 density classes, this difference is largely compensated by the systematic under-evaluation of density (C24 at 350 kg/m³ when experimental results show an average characteristic density of 400 kg/m³ for poplar).

Using the Eurocode 5 equations (1) and (2) with the experimental results of beech timber, the difference between the prediction and the results is a maximum of 1.5%. However, for oak timber, the calculation code tends to overestimate the embedment strength by nearly 17% on average compared to the experimental results, which is not acceptable. Consequently, two correction approaches may be proposed:

- keep equation (1) to estimate embedment strength parallel to the grain and define a new k_{90} (15), or
- use the proposed equation (9) and define the k_{90} equation associated (14).

For these two approaches, the characteristic embedment strength perpendicular to the grain is defined in (13) with a COV of 25% and 6.5% for the density (measured values). With this correction, the equation underestimates the perpendicular embedment of oak by an average of 9% and of beech by an average of 30%.

$$f_{h,90,k} = 0.0746 (1 - 0.0234 d) \rho_k \quad (13)$$

$$k_{90} = 1.15 + 0.04 d \quad (14)$$

$$k_{90} = 0.88 + 0.039 d \quad (15)$$

The same methodology can be applied to define a coefficient k_{90} associated with the proposed equation (12). It is noticeable that the expression proposed by Hubner et al. (2008) gives a similar prediction to that of equation (16), even if the set of coefficients are different. Consequently, the difference between the two studies in terms of embedding strength parallel to the grain is probably linked to the roughness of the dowel used for the tests. The modification of the average equation into a characteristic equation and its comparison with equation (12) makes it possible to propose a general factor k_{90} for hardwoods and softwoods (17). While these new equations give results close to experimental values, they overestimate the embedment strength for birch by 13% and for oak by 3%. For specific study, if the overestimation for birch timber is not acceptable, the k_{90} factor describe by equation (18) should be used.

$$f_{h,90,mean} = 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{mean}^{2,133} \cdot d^{-0,564} \tag{16}$$

$$k_{90} = 1.065 + 0.041 d \tag{17}$$

$$k_{90} = 1.32 + 0.040 d \tag{18}$$

5.3 Embedding strength with an angle to the grain

According to Figure 7, the variation of the embedding strength at an angle of 30° between the load direction and the grain is quite similar for beech and oak. For embedment at an angle of 60°, the tests highlight three phenomena:

- When the diameter of the rods increases, the diminution of embedment strength for beech timber is more important than it is for oak timber.
- The embedding strength of 20 mm diameter rods is higher than that of 16 mm diameter rods.
- For beech and oak timber, the embedding strength at an angle of 60° is lower than the embedding perpendicular to the grain, as show by Franke and Magniere.

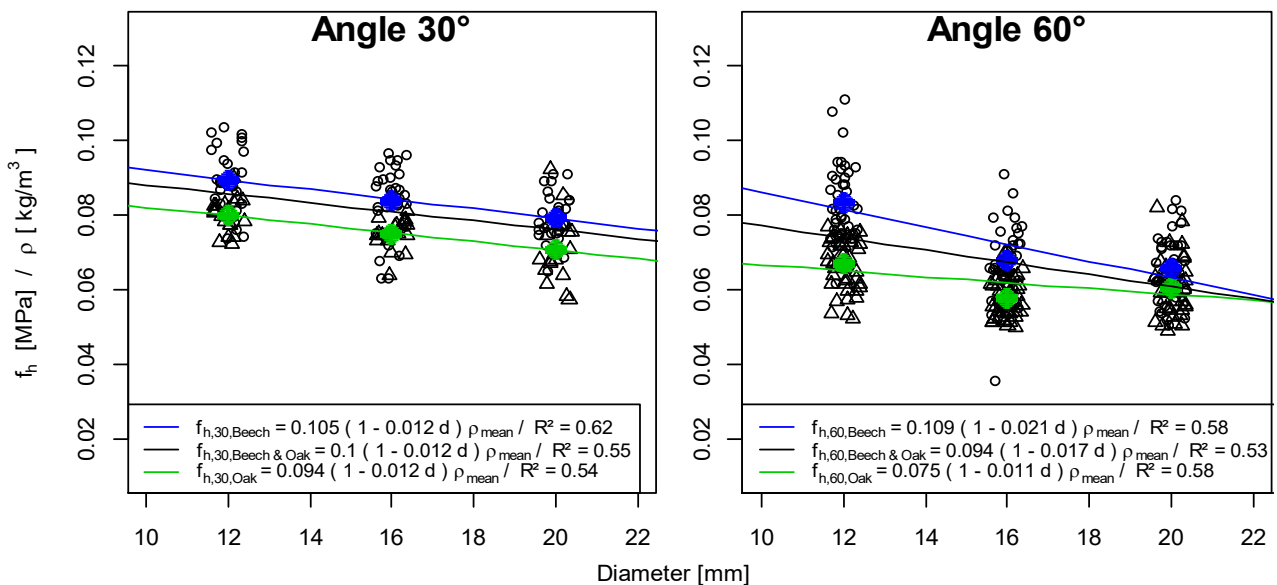


Figure 7: Embedding strength $f_{h,5mm}$ with an angle of 30° and 60° between the load direction and the grain as a function of the diameter and density for beech and oak timber.

Among all the relationships proposed by Schweigler et al. (2018) to describe the evolution of the embedding strength as a function of the angle, only the Hankinson formula (2) with a trigonometric coefficient lower than two makes it possible to predict a 60° embedding strength lower to the embedding strength perpendicular to the grain.

$$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0} \cdot f_{h,90}}{f_{h,0} \cdot \sin^{b_1} \alpha + f_{h,90} \cdot \cos^{b_2} \alpha} \quad (19)$$

The four possible variations of the trigonometric parameters are:

- b_1 and b_2 equal: $b_1 = b_2$;
- b_1 and b_2 equal and definite as a function of the diameter: $b_1 = b_2 = f(d)$;
- b_1 and b_2 different; and
- b_1 and b_2 different and definite as a function of the diameter: $b_1 = f(d)$ and $b_2 = f(d)$.

To define these coefficients, two thirds of the data are randomly extracted and used for the non-linear regression, while the last third is used to validate the model. The different parameters for the Hankinson formula are summarised in Table 5.

For the equation using the same coefficient b_1 and b_2 , the difference between the prediction and the last third of data varies from 9.6% to 11.5%. If the diameter variation is considered in the parameters b_1 and b_2 , the prediction is only improved by 1%. As a result, the equation based on constant coefficients b_1 and b_2 is sufficiently accurate to describe the variation of the embedment strength as a function of the grain angle.

Table 5: Coefficients b_1 and b_2 for the Hankinson formula (19) for each variation tested.

Species	$b_1=b_2$	$b_1=b_2=f(d)$	b_1	b_2	$b_1=f(d)$	$b_2=f(d)$
Beech	1.650	$0.015 d^2 - 0.47 d + 5.2$	1.76	1.51	$-0.01 d^2 + 0.35 d - 1.22$	$0.035 d^2 - 1.17 d + 10.8$
Oak	1,698	$0.008 d^2 - 0.164 d + 2.252$	1.782	1.416	$-0.032 d^2 + 0.977 d - 5.543$	$0.106 d^2 - 3.001 d + 21.811$
Beech & Oak	1.624	$0.011 d^2 - 0.310 d + 3.716$	1.80	1.43	$-0.018 d^2 + 0.044 d - 2.88$	$0.044 d^2 - 1.33 d + 11.1$

In practice, only characteristic values of embedding strength are considered to design connection. Because the coefficients of variation depend on the grain angle and the rod size (between 8% and 23%), it is impossible to convert the mean equation into a characteristic equation using a global coefficient of variation. Therefore, the new equation is established with characteristic embedment strength values determined at each angle. The embedding strength parallel and perpendicular to the grain are determined using equations (9) and (14). The characteristic values for embedment at an angle of 30° and 60° are extracted from tests results.

The mean and characteristic embedding strength equations are plotted in Figure 8. If a trigonometric coefficient of 1.598 is needed to fit the results for a mean law, the value of two can be kept for the characteristic law. Even if the difference between the predictions made by the standard and the embedding strength parallel and perpendicular tests results appears important, the deviation is less significant when the force is applied with an angle to the grain. The current prediction of the embedding strength made by the standard equation underestimates the embedding strength at an angle of 30° (7.6%) and overestimates it at an angle of 60° (12.4%). The previous relative gap with the trigonometric parameters set at two is 4.6% and 8.8%, respectively.

When the embedding strength is estimated with a power function, the same analysis gives a trigonometric best factor equal to 2.033.

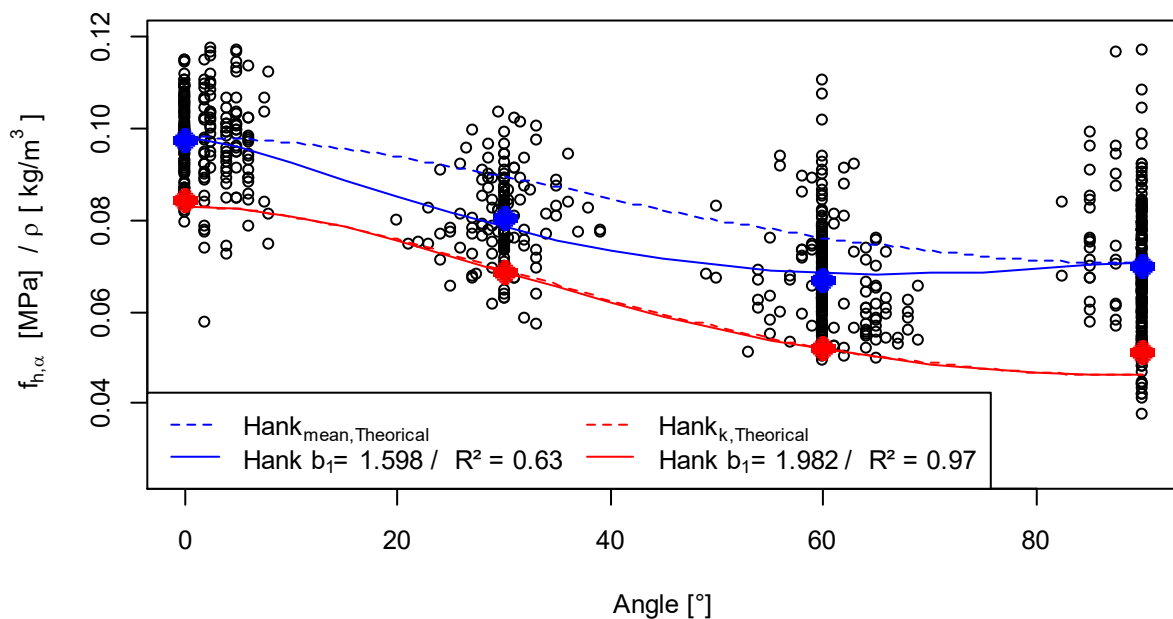


Figure 8: Variation of embedding strength as a function of the diameter, density and angle between the load direction and the grain for beech and oak.

6 Conclusions

This study highlights that the embedding strength of poplar and birch can be accurately estimated by using the current Eurocode 5 equations recommended for softwoods. However, important differences can be found in other hardwood species (oak and beech). With the current equations (1) and (2), the embedment parallel to the grain is largely undervalued. For oak timber, embedment strength perpendicular to the grain is overestimated.

Therefore, for a better prediction of the embedment strength of hardwood, a new equation for the strength parallel to the grain must be used (10). A modification of this relationship implies necessarily to define a new ratio k_{90} (14). If the Hankinson formula must be adapted to correctly fit the mean laws, a parametric coefficient of two is sufficient for a characteristic estimation.

For hardwood (beech and oak), the current study proposes the following equation for embedding strength:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{0.100 (1-0.013 d) \rho_k}{(1.15+0.04 d) \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (20)$$

Tests revealed significant differences between the densities of the tested woods and the densities estimated by mechanical grading. For example, with visual grading (NF B 52-001 in France), the majority of hardwoods are attributed to the D24 class. This underestimation of the density leads to a difference of 30% on the prediction of the embedment strength. Before any modification is made to the embedment strength equations in the Eurocode 5, a reassessment of the density proposed in EN 338 must be implemented in order to enable an increase the use of hardwoods in timber construction.

7 Outlook

To improve this proposal, further tests should be conducted on other hardwood species such as birch, ash and chestnut... An further study based on a largest range of densities and constituted of hardwood and softwood will allow validation of the equation with an exponent on the density parameter.

As the embedding strength parallel to the grain is largely impacted by the roughness of the fasteners, two different approaches could be plan to a revision of standard. The first approach would involve the use of smooth fasteners which minimise strength and allow defining safety behaviour. The second approach would precisely quantify this phenomenon and integrate a new factor in the definition of the embedding strength to take this into consideration.

8 Acknowledgements

A part of this study has been realised as part of the EFEUR5 project (2015-2020), financed by the Agence Nationale de la Recherche (convention ANR-15-CE08-0027).

This study has been carried out within the project hardwood_joint, which is supported under the umbrella of ERA-NET Cofund ForestValue by BMLFUW (AT), ADEME (FR), FNR (DE), Vinnova, Swedish Energy Agency and Formas (SE). ForestValue has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N_ 773324.

9 References

- Blass, H. J., Uibel, T. (2007) Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsper Holz – KIT Scientific Publishing – ISBN 978-3-86644-139-3
- Bleron, L. (2000) Contribution à l'optimisation des performances d'assemblages bois en structure. Analyse de la portance dans les assemblages de type tige, Thesis (only available in French), University of Lorraine.
- Ehlbeck, J., Werner, H. (1992) Softwood and Hardwood Embedding strength for dowel-type fasteners, CIB-W18/25-07-2, Åhus, Sweden.
- EN 383:2007. Timber structures. Test methods. Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. CEN.
- EN 384 (2018) Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. CEN.
- EN 1990 (2003) Eurocode Basis of structural design. CEN. (Eurocode 0)
- EN 1995-1-1 (2004): Design of timber structures – Part 1-1: General and rules for buildings. CEN. (Eurocode 5).
- EN 13183-1 (2002) Moisture content of a piece of sawn timber – Part 1: Determination by oven dry method. CEN.
- EN 14358 (2016) Timber structures – Calculation and verification of characteristic values. CEN.
- Franke, S., Magniere, N. (2014) Discussion of Testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections, INTER/47-7-1, Bath, United Kingdom.
- Hohenwarter, J. (2014) Vergleich der Lochleibungsfestigkeit in Folge von Zug- und 367 Druckbelastung. GRAZ University of Technology.
- Hübner, U., Bogensperger, T., Schickhofer, G. (2008) Embedding strength of European hardwoods, CIB-W18/41-7-5, Andrews, Canada.
- Johansen, K.W. (1949) Theory of Timber Connections, International Association for Bridge and Structural Engineering (ABSE) Pub. 9, p. 249–262.
- Kobel, P., Frangi, A., Steiger, R. (2014) dowel-type connections in LVL made of beech wood, INTER/47-7-2, Switzerland
- Kovriga, A., Stapel, P., Van De Kuilen J. W. G. (2019) Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech, Wood Material Science and Engineering
- Larsen, H. J. (1973) The yield load of bolted and nailed joints, International Union of Forestry Research Organisation Division V (IUFRO V), Rapport NR. R 52 1974, p. 16–31.
- Rodd, P. D. (1973) The analysis of timber joints made with circular dowel connectors, Thesis, University of Sussex.

- Sandhaas, C., Ravenshorst, G. J. P., Blass, H. J., Van De Kuilen, J. W. G. (2013) Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species, *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol 71, num 5, p. 599–608.
- Schweigler, M., Bader, T. K., Vessby, J., Eberhardsteiner, J. (2017). “Constrained displacement boundary conditions in embedment testing of dowel-type fasteners in LVL”. In: *Strain* 53(6). DOI: 10.1111/str.12238.
- Schweigler, M., Bader, T. K., Hochreiner, G., Lemaître, R. (2018). “Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic embedment behaviour of wood”. In: *Composites Part B: Engineering* 142, pp. 142–158.
- Schweigler, M., Bader, T. K., Bocquet, J.-F., Lemaître, R., Sandhaas, C. (2019) Embedment test analysis and data in the context of phenomenological modelling for dowelled timber joint design, INTER-52-7-8.
- Whale, L. R. J., Smith, I. (1986) Behaviour of nailed and bolted joints under short-term lateral load – Conclusions from some recent research, CIB-W18/19-7-1, Florence, Italy.

Table 6: Density and embedding strength for each test configuration

Species	α [°]	d [mm]	N	H [%]	$\rho_{m,12\%}$ [kg/m ³]	$\rho_{k,12\%}$ [kg/m ³]	COV ρ	$f_{h,5mm,mean}$ [MPa]	$f_{h,5mm,k}$ [MPa]	COV $f_{h,5mm}$
Poplar	0°	12	40	9.70%	501	436	7%	43.03	37.04	8%
		16	38	10.37%	456	389	8%	39.70	31.76	12%
		20	35	9.93%	459	404	7%	35.90	30.05	10%
	90°	12	39	9.80%	483	412	8%	28.42	21.04	17%
		16	39	11.21%	450	401	6%	22.15	15.53	16%
		20	40	11.10%	466	397	9%	19.49	14.92	14%
Birch	0°	12	45	10.09%	603	553	5%	50.14	39.92	12%
		16	45	9.52%	609	554	5%	49.40	40.00	12%
		20	45	9.85%	604	549	5%	45.46	34.74	15%
	90°	12	45	10.18%	613	561	5%	35.48	28.11	13%
		16	45	10.19%	611	552	6%	30.09	22.49	18%
		20	45	9.99%	609	554	5%	26.75	21.15	14%
Beech	0°	12	35	11.55%	745	697	4%	79.69	68.10	8%
		16	40	11.26%	721	647	6%	73.04	59.57	11%
		20	40	11.49%	723	643	6%	67.99	53.61	13%
	30°	12	29	11.53%	720	668	4%	63.61	50.39	13%
		16	32	11.43%	674	567	9%	55.80	39.52	17%
		20	30	11.94%	702	648	4%	55.07	44.96	11%
	60°	12	42	11.45%	737	670	5%	60.44	45.96	15%
		16	43	11.89%	700	599	8%	46.85	31.34	20%
		20	39	13.10%	701	646	5%	45.70	36.46	12%
	90°	12	40	11.95%	721	636	7%	60.12	41.92	20%
		16	40	12.00%	704	624	7%	52.01	38.70	17%
		20	40	12.04%	710	631	6%	47.23	34.80	16%
Oak	0°	12	30	12.50%	702	619	7%	68.45	53.67	14%
		16	30	12.90%	715	625	7%	68.75	58.28	9%
		20	30	11.70%	682	603	7%	58.14	45.16	13%
	30°	12	20	11.35%	684	612	6%	54.48	46.89	8%
		16	19	11.22%	672	555	10%	50.47	41.89	10%
		20	17	11.73%	682	604	6%	47.39	35.70	15%
	60°	12	40	11.76%	688	578	9%	45.43	32.41	18%
		16	46	11.73%	641	563	7%	36.58	29.29	13%
		20	39	13.49%	707	647	5%	42.70	32.82	15%
	90°	12	30	13.20%	696	610	7%	52.59	33.53	23%
		16	29	12.68%	700	608	7%	42.50	32.32	15%
		20	29	11.04%	702	632	6%	35.95	27.11	16%

N: Number of samples

d: Diameter of dowel

H: Mean moisture content

$\rho_{m,12\%}$: Mean density at 12% of MC

$\rho_{k,12\%}$: Characteristic density at 12% of MC

$f_{h,5mm,mean}$: Mean embedding strength

$f_{h,5mm,k}$: Characteristic embedding strength

$f_{h,inter,mean}$: Mean embedding strength