

## Etude de la performance au collage du *Pinus patula* dans la fabrication de panneaux lamellés collés

TRIANOSKI Rosilani<sup>1</sup>, MICHAUD Franck<sup>2</sup>, MATOS, Jorge<sup>1</sup> IRLE Mark<sup>2</sup>,  
MOREAU Jérôme<sup>2</sup>, SIMON Flore<sup>2</sup>, DUARTE Luigiano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Fédérale du Paraná

<sup>2</sup>LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois  
rosilani@ufpr.br

**Mots clés :** Panneaux lamellés collés ; *Pinus patula* ; collage du bois ; aboutage ; acétate de polyvinyle ; adhésif isocyanate polymérisé en émulsion (EPI).

### Contexte et objectifs

Actuellement, l'une des principales préoccupations mondiales est liée au changement climatique, qui est corrélé à la production d'énergie, l'industrie manufacturière et minière, la fabrication de divers produits, l'utilisation des transports, l'agriculture, la déforestation des forêts, entre autres activités (ONU, 2023). L'IBÁ (2022) indique que ce changement représente un risque majeur pour les systèmes naturels et économiques. De fait le ralentissement et l'atténuation de ses effets sont devenus des objectifs de politique publique dans le monde entier.

L'Accord de Paris, traité mondial adopté par les pays signataires de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) fixe des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En outre, il cherche à renforcer la réponse à la menace du changement climatique et à renforcer la capacité des pays à faire face aux impacts générés par ce changement (ONU 2015, MCTI 2023).

En Europe, le Green Deal européen, fruit de l'Accord de Paris, a été défini comme la nouvelle politique industrielle pour lutter contre le changement climatique, promouvoir les produits durables et circulaires, réduire les déchets et augmenter la performance énergétique (EcoReFibre - UNION EUROPÉENNE 2022).

Du côté brésilien, et sur la base de l'article 5 de l'accord, certains des engagements pris sont liés à l'encouragement de l'intégration des cultures, des forêts et du bétail, à l'élimination de la déforestation illégale et à la restauration et au reboisement de 12 millions d'hectares de forêts (naturelles et plantées). Le pacte brésilien pour l'environnement oriente davantage les efforts vers l'expansion et le développement du secteur des arbres plantés, confirmant son importance pour garantir l'approvisionnement en matières premières associées à l'économie à faible émission de carbone (IBÁ 2016).

La superficie forestière du Brésil est de 492 millions d'hectares (mi/ha), dont 482 mi/ha sont des forêts naturelles ou indigènes (98 %) et 9,93 mi/ha sont des forêts plantées (2 %). Parmi ces dernières, 7,53 mi/ha sont des Eucalyptus, 1,93 mi/ha des Pins et 0,47 mi/ha d'autres espèces. Bien qu'elles ne représentent que 2 % du total des forêts, les plantations forestières fournissent plus de 90 % du bois consommé dans les processus industriels (IBÁ 2022).

L'approvisionnement en bois des industries brésiliennes est principalement dû à la production de volumes élevés, en effet le Brésil est en tête du classement mondial de la productivité, avec une moyenne de 36 m<sup>3</sup>/ha/an pour les plantations d'Eucalyptus et 31 m<sup>3</sup>/ha/an pour les plantations de Pins, les principaux genres utilisés comme matières premières dans les industries. Cette productivité forestière prend tout son sens lorsqu'on la compare aux informations fournies

par CEI-Bois (2019), qui indique que pour produire 1 m<sup>3</sup> de bois, 1 tonne de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est absorbée dans l'atmosphère et 0,7 tonne d'oxygène (O<sub>2</sub>) est libérée. Les arbres et le bois constituent donc un important réservoir de carbone et peuvent jouer un rôle important dans l'atténuation du changement climatique.

Le sud du Brésil concentre 1,72 mi/ha de forêts de Pins (89 %), dont 0,71 mi/ha dans l'État du Paraná. L'espèce traditionnellement utilisée dans les plantations est le *Pinus taeda* et, dans une moindre mesure, le *Pinus elliottii*. Les entreprises de reboisement et les industries ont toutefois cherché à planter d'autres espèces de ce genre afin de diversifier la matière première, d'améliorer la qualité des produits générés et, dans certaines régions, d'éviter les attaques sélectives de certains ravageurs, tels que la "guêpe perce-bois" (*Sirex noctilio*) et le "capucin noir" (*Sapajus nigritus*) (IBÁ 2022).

Pour ces raisons, certaines entreprises forestières situées dans la région Centre-Sud du Paraná ont investi dans des zones de *Pinus patula*. Des recherches sur la qualité du bois produit et ses applications possibles, y compris son utilisation dans les moulures et les panneaux lamellés collés (Edge glued panel - EGP), sont nécessaires pour la bonne valorisation de cette ressource.

Outre l'évaluation de l'adéquation du bois à un usage particulier, le processus de production doit répondre à des exigences de qualité minimales au meilleur coût. Dans le cadre du collage du bois pour les moulures et les panneaux lamellés collés (EGP), des paramètres tels que le type de colle et son prix, le grammage et les variables de pressage sont extrêmement importants. En effet, au-delà d'affecter la qualité et les coûts de production, ils ont un effet "en cascade" sur le volume de colle transporté (transport), la fabrication de la colle, la consommation de matières premières et la consommation d'énergie. Ceci provoque plus ou moins d'émissions de gaz à effet de serre et a une incidence sur le changement climatique.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'aptitude du bois de *Pinus patula* à la production de moulures et de panneaux lamellés collés (collage latéral), ainsi que de maximiser les variables du processus de production, la proportion de l'adhésif et la pression, afin de générer un produit dont la qualité répond aux exigences réglementaires et dont le coût et l'impact sur l'environnement soient les plus faibles possibles.

## Matériel et méthode

Le bois de *Pinus patula* utilisé dans cette recherche provient d'une plantation forestière de 18 ans située à Bituruna, dans la région Centre-Sud de l'État du Paraná. Les arbres ont été collectés pour plusieurs études, totalisant un échantillon d'environ 15 m<sup>3</sup> de grumes. Une partie des grumes (10 m<sup>3</sup>) a été divisée en planches (35 x 140 x 2600 mm) et en lattes (35 x 55 x 2600 mm) qui ont été séchées à un taux d'humidité final de 10-12% dans une industrie du bois locale et envoyées pour l'aboutage et le panneautage (collage latéral).

Le collage par aboutage a été réalisé à l'échelle industrielle, et une partie des planches a été transformée en lamelles sans défauts. Après l'obtention des lamelles sans défauts, des entures ont été usinées (longueur : 7 mm ; largeur : 3,7 mm et largeur de la pointe d'enture : 1,7 mm), puis encollés avec un adhésif à base d'acétate de polyvinyle (PVAc) appliqué par des rouleaux sur 75 % des dents. Les lamelles ont été assemblées et pressées (20 kgf.cm<sup>-2</sup> /± 2 MPa) dans une presse automatique, générant des pièces de dimensions 35 x 55 x 2000 mm et 35 x 140 x 2000 mm (épaisseur, largeur et longueur).

Le collage latéral (EGP) a été réalisé en laboratoire, où les planches séchées industriellement ont été conditionnées pour atteindre ou être maintenues à un taux d'humidité de 12%. Elles ont ensuite été échantillonnées afin de comprendre toute la variabilité naturelle du bois et des plans

de coupe, puis transformées en lamelles de dimensions 25 x 60 x 310 mm. Après calibrage, elles ont été mesurées pour déterminer la densité apparente.

Le plan d'expérience pour le collage latéral (EGP) comprenait l'étude de l'utilisation d'adhésifs PVAc et EPI, appliqués en grammages de 160, 180, 200 et 220 g.m<sup>-2</sup>, et pressés entre 7 et 10 kgf.cm<sup>-2</sup> (un peu moins de 1 MPa), générant le plan factoriel : 2 adhésifs x 4 grammages x 2 pressions.

Les adhésifs ont été appliqués à l'aide d'un rouleau en mousse sur une seule ligne de colle et chaque grammage a été vérifié sur une balance de précision. Après l'application de la colle, les joints ont été pressés dans une presse manuelle et la pression a été calibrée et contrôlée à l'aide d'une cellule de charge numérique et d'une clé dynamométrique. Le temps de pressage a été d'une heure pour les deux adhésifs, conformément aux recommandations des fabricants, et les conditions ambiantes de l'environnement de pressage ont été de 18 à 20° C et l'humidité relative de 70/75%.

Au titre de référence et de comparaison, 2 traitements ont été produits avec du bois de *Pinus taeda*, une essence utilisée par l'industrie des moulures et des panneaux lamellés collés (EGP). Les conditions de collage ont suivi la norme industrielle adoptée pour cette essence. Au total, 18 traitements ont été réalisés, 16 conditions expérimentales avec *Pinus patula* et 2 avec *Pinus taeda*. Pour chaque traitement, 7 joints ou répétitions ont été collés.

Une fois l'adhésif complètement durci et conditionné, les joints de collage latéraux et les échantillons aboutés ont été sectionnés pour fabriquer les spécimens. La qualité de l'aboutage a été évaluée conformément à la norme ASTM 5572 (2005) à l'aide d'essais de flexion et de traction, et les échantillons ont été prétraités : adhésif sec ou durci, prétraitement à haute température, et en triple cycle avec 30 répétitions par prétraitement. L'adhérence latérale a été évaluée à l'aide du test de résistance au cisaillement selon la méthodologie recommandée par la norme EN 13354 (2009) avec un prétraitement indiqué pour les panneaux de type SWP/1 (Solid Wood Panel 1), qui sont utilisés dans des conditions sèches, et consiste à tester les spécimens après immersion pendant 24 heures dans l'eau à une température de 20±3°C. Trente-cinq échantillons ont été testés par condition expérimentale ou de collage. Après les essais, les échantillons de résistance à la traction et au cisaillement ont également été analysés pour détecter une éventuelle rupture du bois.

Une analyse statistique a été réalisée en utilisant les tests d'homogénéité de la variance, l'analyse de la variance et la comparaison de Tukey des moyennes au sein de chaque adhésif testé. Tous les tests ont été effectués à un niveau de fiabilité de 95 % (Statgraphics WVII). Les résultats des performances du *Pinus patula* ont été comparés aux exigences normatives de l'ASTM 5572 (2005) et de l'EN 13353 (2022), ainsi qu'aux performances du *Pinus taeda*.

## Résultats et discussion

### *Densité du bois*

La masse volumique apparente du bois de *Pinus patula* était de 0,432 g.cm<sup>-3</sup> (CV : 15,34%) et celle de *Pinus taeda* de 0,444 g.cm<sup>-3</sup> (CV : 10,69%). Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre ces deux moyennes. Comme le *Pinus taeda*, il est considéré de densité légère ou faible. Selon Sellers (1994), les bois de faible densité sont plus faciles à coller car ils ne nécessitent pas d'adhésifs à haute résistance ou performance, facilitent la mobilité de l'adhésif dans sa structure et ne requièrent pas de procédures spéciales pendant le processus de collage.

### Collage de l'aboutage

Les résultats moyens du collage de l'aboutage (Tab. 1) ont montré que le bois de *Pinus patula* répondait aux exigences minimales de la norme ASTM 5572 (2005) pour la flexion statique dans tous les prétraitements, à savoir une résistance minimale de 13,8 MPa dans l'essai à sec et de 6,9 MPa dans l'essai à haute température et à triple cycle. De même, la résistance minimale a également été atteinte lors de l'essai de traction, qui recommande une valeur de 13,8 MPa lors de l'essai à sec et de 6,9 MPa lors de l'essai à haute température et à triple cycle. Les défaillances obtenues pour l'essai de traction étaient comprises entre 75 et 95 %, ce qui est considéré comme élevé et supérieur à la valeur minimale de 60 % pour l'essai à sec et de 30 % pour l'essai à cycle triple. Sur la base de ces résultats, on peut affirmer que le bois de *Pinus patula* a le potentiel ou la capacité d'être utilisé pour les moulures ou l'aboutage des panneaux lamellés collés.

Tab. 1 : Résultats moyens des collages par aboutage

Conditions de l'essai	Résistance en flexion (MPa)	Traction	
		Résistance (MPa)	Taux de défaillance (rupture du bois) (%)
Réticulé/Sec	39,46 (23,78)	22,09 (32,74)	95
Température élevée	28,04 (25,05)	21,19 (29,86)	75
Cycle triple	37,07 (23,30)	22,71 (28,59)	93

Entre parenthèses les coefficients de variation CV (%) ; n : 30 échantillons par essai (Flexion et Traction) et par condition de l'essai, totale : 180.

### Collage latéral

L'analyse de la variance pour la résistance au cisaillement latéral a montré des différences statistiquement significatives entre les différents traitements ou conditions expérimentales pour chaque adhésif évalué. De faibles valeurs de résistance ont été observées dans les traitements collés avec l'adhésif PVAc, ainsi que des valeurs de rupture du bois faibles ou nulles. Bien qu'il y ait une légère tendance à l'augmentation de la résistance avec l'augmentation du poids et de la pression de l'adhésif, tous les traitements collés avec cet adhésif ont échoué en termes de qualité de collage, compte tenu de l'exigence minimale de 2,50 MPa pour le 5<sup>e</sup> percentile requise par la norme EN 13353 (2022). Par rapport au traitement de contrôle de *Pinus taeda*, on peut toutefois dire que le comportement de la qualité de collage entre les deux espèces est similaire (Tab. 2). Dans les traitements collés avec l'adhésif EPI, des valeurs moyennes de résistance au cisaillement plus élevées ont été observées par rapport aux valeurs obtenues pour les traitements collés avec le PVAc, indiquant une meilleure performance dans le collage des panneaux lamellés collés (EGP). Cela conduit à envisager une analyse du coût et de la performance du collage.

La comparaison des moyennes entre les traitements de *Pinus patula* collés avec l'adhésif EPI a indiqué une meilleure performance pour les grammages de 180, 200 et 220 g.m<sup>-2</sup> et des pressions de 10 kgf.cm<sup>-2</sup>, ainsi que pour le traitement de grammage 200g.m<sup>-2</sup> et une pression de 7 kgf.cm<sup>-2</sup>, tous statistiquement égaux entre eux. Tous les traitements ont satisfait à l'exigence minimale de 2,5 MPa pour le 5<sup>e</sup> percentile inférieur (5% d'exclusion) requis par la norme EN 13353 (2022), ainsi qu'à des valeurs de rupture du bois supérieures à 40 %, (exigence pour une masse volumique allant jusqu'à 0,60 g.cm<sup>-3</sup>).

Il convient de noter que même les traitements collés avec le grammage le plus faible, c'est-à-dire 160 g. m<sup>-2</sup>, et ce aux deux pressions étudiées, ont atteint des valeurs supérieures à 2,50 MPa pour le 5<sup>e</sup> percentile inférieur. Il est donc possible de réduire légèrement la quantité de colle

appliquée sur la ligne de collage, diminuant ainsi des coûts de production et, par conséquent, avoir une incidence positive sur la performance environnementale globale (compte tenu de la fabrication de la colle, de la consommation d'énergie, du transport).

Tab. 2 : Résultats moyens de la résistance au cisaillement du collage latéral

Traitement	Cisaillement (MPa)	Rupture du bois (%)	5e Percentile (MPa)
<b>PVAc*</b>			
P <sub>patula</sub> /PVA/160g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	1,24 c (24,72)	1	0,86
P <sub>patula</sub> /PVA/180g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	1,40 bc (27,67)	1	0,90
P <sub>patula</sub> /PVA/200g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	1,32 bc (27,14)	2	0,96
P <sub>patula</sub> /PVA/220g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	1,47 bc (22,94)	0	0,93
P <sub>patula</sub> /PVA/160g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	1,56 b (24,23)	0	1,01
P <sub>patula</sub> /PVA/180g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	2,21 a (21,96)	0	1,37
P <sub>patula</sub> /PVA/200g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	2,28 a (22,19)	1	1,63
P <sub>patula</sub> /PVA/220g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	2,41 a (16,74)	0	1,85
<b>P<sub>taeda</sub> /PVA/180g.m<sup>-2</sup>/7kgf.cm<sup>-2</sup></b>	<b>1,96 (34,21)</b>	<b>0</b>	<b>0,98</b>
<b>EPI**</b>			
P <sub>patula</sub> /EPI/160g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	4,22 c (15,47)	47	3,38
P <sub>patula</sub> /EPI/180g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	4,46 bc (16,17)	55	3,70
P <sub>patula</sub> /EPI /200g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	4,74 abc (20,37)	42	3,75
P <sub>patula</sub> /EPI/220g.m <sup>-2</sup> /7kgf.cm <sup>-2</sup>	4,48 bc (21,46)	42	3,56
P <sub>patula</sub> /EPI/160g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	4,17 c (23,85)	57	2,76
P <sub>patula</sub> /EPI/180g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	4,97 ab (13,74)	44	4,20
P <sub>patula</sub> /EPI/200g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	5,10 ab (17,61)	52	3,98
P <sub>patula</sub> /EPI/220g.m <sup>-2</sup> /10kgf.cm <sup>-2</sup>	5,19 a (19,03)	45	3,97
<b>P<sub>taeda</sub> /EPI/180g.m<sup>-2</sup>/7kgf.cm<sup>-2</sup></b>	<b>4,03 (16,09)</b>	<b>13</b>	<b>3,11</b>

\* e \*\* = p ≤ 0.05 ; Les moyennes suivies de la même lettre dans la même colonne et à l'intérieur de chaque adhésif sont statistiquement égales entre elles avec une fiabilité de 95 %. Les valeurs entre parenthèses indiquent le coefficient de variation des échantillons en pourcentage.

## Conclusion

- L'adhésif EPI a montré une meilleure qualité de collage sur *Pinus patula* (et *Pinus taeda*) comparé à l'adhésif à base d'acétate de polyvinyle (PVAc).
- La qualité de l'adhésion ou du collage a eu tendance à augmenter avec le grammage et la pression.
- *Pinus patula* présente des résultats sur l'aboutage qui sont supérieurs aux exigences de l'ASTM 552 (2005) à la fois pour la flexion et la traction.
- *Pinus patula* a montré des résultats de qualité de collage latéral (EGP) supérieurs aux exigences de la norme EN 13353 (2008), lorsqu'il est collé avec un adhésif EPI.
- *Pinus patula* a montré une qualité de collage similaire ou supérieure à *Pinus taeda*, la principale espèce utilisée par l'industrie du moulage et du panneau (EGP).
- *Pinus patula* convient ou a un potentiel pour la production de moulures et de panneaux lamellés collés (EGP).

## Remerciements

Aux entreprises Remasa Reflorestadora, Randa Compensados Portas e Molduras, à l'Université fédérale du Paraná (UFPR), à l'École supérieure du bois (ESB), et en particulier au programme Capes Brafitec.

## Références

American Testing Society for Testing and Materials (2005) ASTM 5572, Standard specification for adhesives used for finger joints in nonstructural lumber products.

CEI-Bois (2019) Wood- Building the Bioeconomy, 56 p.

European Standard (2022) EN 13353, Solid wood panels, Requirements.

European Standard (2009) EN 13354 Solid wood panels, Bonding quality, Test Method.

European Union, Ecorefibre (2022) European wood panel industry scales up end-of-life recycling and circular uses of recovered wood. Press release.

IBÁ (2022) Relatório Anual 2022.

IBÁ (2016) A importancia e o potencial de uso da madeira plantada. <https://iba.org/750-a-importancia-e-o-potencial-de-uso-da-madeira-plantada>.

MCTI (2023) Acordo de Paris. [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo\\_paris.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf)

ONU (2023) Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas. <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.

ONU (2015) Convention-cadre sur les changements climatiques, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1

Sellers T (1994) Adhesive in the Wood Industry, Handbook of adhesive technology, Cap. 37.