



Determinación de los coeficientes de rozamiento en piezas de madera de castaño de procedencia española y su aplicación estructural

José R. Villar ¹, Antonio J. Corbacho ², Manuel Moya ¹, Pablo Vidal ³

- ¹ Grupo de Investigación Forestal, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, Cáceres, España; jrwillar@unex.es, manuelmi@unex.es
- ² Grado en Ingeniería Forestal, Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, Cáceres, España; acorbachf@alumnos.unex.es
- ³ Grupo de Investigación Ingeniería Mecánica y Fluidos, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura. Av. Adolfo Suarez s/n, 06071 Badajoz, España; pvidal@unex.es

Resumen: Este trabajo presenta la determinación de los coeficientes de rozamiento tanto estático como dinámico en madera de castaño (*Castanea Sativa Mill.*) de origen español, así como la aplicación práctica de los resultados. La madera de frondosas está actualmente en auge para su empleo estructural, y dentro de ella la madera de castaño. Ni la normativa de cálculo ni otros estudios aportan valores para sus coeficientes de rozamiento, estando centrados principalmente en coníferas. En madera, los coeficientes de rozamiento dependen del contenido en humedad, de las propiedades anatómicas, de la dureza y del mecanizado de las superficies así como de la orientación del plano estudiado respecto a la dirección de la fibra, originando distintas rugosidades. Los planos considerados han sido los principales que define la ortotropía del material, que suelen coincidir con las caras en contacto en situaciones reales. En la realización de los ensayos se ha modificado un aparato de corte directo, máquina del ámbito de la geotecnia, para reproducir el sistema tribológico. Como valores medios se obtuvieron $\mu_e=0.45$ para fricción estática y $\mu_c=0.32$ para dinámica. Los valores obtenidos se han aplicado al diseño de una pasarela peatonal bajo el sistema de placa tensada, donde el rozamiento entre tablones resulta determinante en el cálculo de la misma.

Palabras clave: Tribología, Fricción, Propiedades mecánicas, Aparato de corte directo

1. Introducción

La fricción entre piezas de madera está presente en multitud de sistemas estructurales realizados con este material, desde un simple apoyo en un durmiente hasta el rozamiento entre tablones de una placa tensada, pasando por la transmisión de fuerzas en uniones entre barras de madera.

Diversos trabajos [1-7] atestiguan la importancia del conocimiento de estos coeficientes para una correcta simulación de las uniones en estructuras de madera y profundizar en el conocimiento de los mecanismos de transmisión de esfuerzos. Las situaciones descritas corresponden a rozamiento entre elementos en reposo, propio del interés estructural, pero también resulta de interés la fricción de la madera entre acoplamientos por rozamiento y en otros sistemas dinámicos.

Considerando un bloque sólido simplemente apoyado en una superficie, su peso W , genera una fuerza de contacto normal a la superficie, N , de igual valor, colineal y de sentido contrario. Si actuamos horizontalmente con una fuerza P , aparece en la reacción de la superficie una componente horizontal F que es la resultante de todas las fuerzas de contacto que se producen entre el bloque y la superficie. Mientras el bloque no se mueva P se ve contrarrestada por F , al aumentar progresivamente P también aumentará F hasta llegar a un valor máximo F_{\max} que se corresponde con el "punto" o "condición de deslizamiento inminente". Superado este punto la fuerza de rozamiento ya no es capaz de contrarrestar el valor de P y se produce el deslizamiento, en ese momento y de manera teóricamente instantánea el valor de F disminuye entorno a un 20 - 25 % para un gran número de materiales empleados en construcción. En este punto hablaremos de fuerza de rozamiento cinético F_c por contraposición al máximo valor de F en reposo que denominaremos fuerza de rozamiento estático o F_e . Para que el bloque se desplace a velocidad constante ha de ejercerse una fuerza de igual magnitud y de sentido opuesto a la fuerza de rozamiento cinético, esto es, si el deslizamiento se realiza a velocidad constante la fuerza ejercida es igual a F_c .

La mecánica de sólidos considera con mucha aproximación que existe una proporcionalidad directa entre F_e y N [8, 9] donde la constante de proporcionalidad recibe el nombre de coeficiente de rozamiento estático μ_e :

$$F_e = \mu_e N \quad (1)$$

De manera similar existe una proporcionalidad entre F_c y N a través del coeficiente de rozamiento cinético μ_c :

$$F_c = \mu_c N \quad (2)$$

Ambos coeficientes son prácticamente independientes a efectos macroscópicos del área de contacto y de la magnitud de la fuerza normal [8–11].

En el caso de superficies de madera, los coeficientes de rozamiento dependen del contenido en humedad, de la rugosidad y de las características de la superficie [12]. Estos dos últimos factores directamente relacionados con las propiedades anatómicas, la dureza de la madera y del mecanizado o tratamiento recibido por las piezas. En cuanto a las propiedades anatómicas se hace patente por la anisotropía del material, donde la orientación de la superficie estudiada respecto a las direcciones de ortotropía, longitudinal o paralelo a la fibra, y perpendicular a la fibra, con las direcciones radial y tangencial, da lugar a distintas rugosidades para una misma pieza.

En general los estudios se realizan para cortes ortogonales a estas direcciones principales, puesto que en muchos casos se corresponden con las superficies en contacto que se originan en el empleo de la madera. El mecanizado o tratamiento de las superficies en contacto también afectará a su rugosidad, en este trabajo se considera rozamiento entre piezas de madera aserrada.

Respecto a la humedad, para la mayoría de las especies de madera, los coeficientes de fricción aumentan con el contenido de humedad hasta alcanzar la saturación de las fibras.

La única referencia en cuanto a valores de coeficientes de rozamiento en la normativa europea de cálculo de estructuras, es en el Eurocódigo 5-Parte 2: Puentes (EC 5-2) [13] en el que se indican para su aplicación a placas de láminas tensadas, y únicamente para coníferas, Tabla 1.

Tabla 1. Valores de cálculo del coeficiente de rozamiento estático según EC5-2. Tomada de [13]

Material	Contenido de humedad madera (%)			
	≤12		≥16	
	Perpendicular a la fibra	Paralela a la fibra	Perpendicular a la fibra	Paralela a la fibra
Madera aserrada- Madera aserrada	0.3	0.45	0.23	0.35
Madera cepillada- Madera cepillada	0.2	0.4	0.17	0.3
Madera aserrada- Madera cepillada	0.3	0.45	0.23	0.35

Publicaciones de física general indican en madera valores genéricos para el coeficiente de fricción dinámico de 0.20 y 0.25-0.5 para el estático [9].

Ya en el caso de publicaciones centradas en madera, [14] recoge como valores genéricos para madera seca 0.25 a 0.7 para el coeficiente de fricción estático y 0.15 a 0.4 para el dinámico. También [12] indica de manera genérica que los coeficientes de fricción cinética para la madera lisa y seca contra superficies duras y lisas pueden variar desde 0.3 a 0.5; cuando el contenido de humedad es intermedio de 0.5 a 0.7 y cerca de la saturación de fibra, de 0.7 a 0.9. McKenzie et al [15] indica en madera-madera un coeficiente de fricción dinámico de 0.45 y un valor estático de 0.6 pero sin precisar direcciones.

Otros valores, ya teniendo en cuenta la ortotropía de la madera, son los reportados para el roble por Kollman, F. [16], que indica para rozamiento entre superficies paralelas a la fibra 0.62 para fricción estática y un valor dinámico de 0.48, perpendiculares a la fibra 0.54 en fricción estática y dinámica de 0.34, y por último rozando superficies paralelas contra perpendiculares $\mu_e=0,43$ y $\mu_c=0,19$.

Los valores para superficies y direcciones de rozamiento concretas generalmente provienen de investigaciones relacionadas con uniones en estructuras de madera para su empleo en simulaciones numéricas, algunos de estos valores [17–19] se emplearán en la comparación con los resultados obtenidos en este trabajo.

De la revisión bibliográfica realizada se desprende que en muchos casos los datos son ofrecidos sin especificidad de especies, y en pocas ocasiones se refieren a los distintos planos de simetría que genera la ortotropía del material. Al mismo tiempo no se han encontrado estudios relevantes para la madera de castaño, la cual es una madera ampliamente empleada en estructuras, especialmente como madera aserrada, lo que en muchos casos conlleva el empleo de uniones tradicionales o carpinteras donde el coeficiente de rozamiento tiene una alta influencia en su comportamiento.

2. Materiales y métodos

La normativa europea actual no recoge ningún método estandarizado para realizar ensayos de rozamiento, tampoco en particular para elementos de madera. Como marco de referencia se podría tomar la norma americana ASTM G-115-10 [20] que recoge recomendaciones en cuanto a la preparación de las muestras, superficies y método de ensayo, indicando de manera genérica que se reproduzca lo más fielmente posible la realidad que se desea conocer con el ensayo.

El ensayo para obtener los coeficientes de rozamiento implica poner en contacto las superficies a rozar aplicarles una carga normal (N) y registrar el desplazamiento y la fuerza (F) necesaria para producirlo. En este trabajo se expone la modificación de una máquina de ensayo ampliamente presente en los laboratorios de materiales, como es la máquina de corte directo CD, para la obtención de coeficientes de rozamiento tanto estáticos como dinámicos entre superficies de sólidos, en el caso de este trabajo especímenes de madera. El procedimiento aquí propuesto ayudaría por tanto a estandarizar el ensayo de obtención de coeficientes de rozamiento.

2.1. Implementación del ensayo

Para implementar el ensayo de rozamiento es necesario disponer los especímenes con sus caras enfrentadas de tal forma que pueda existir movimiento relativo entre ellas. Para ello resulta necesario realizar una serie de modificaciones en el aparato de corte directo hasta conseguir la configuración recogida en la Figura 1 que principalmente consiste en retirar la caja de corte y disponer los especímenes de madera tal que el espécimen inferior es móvil recibiendo el empuje a través de su apoyo en el portacajas donde se aloja. Mientras que el superior se retiene contra el puente de la caja de corte, que a su vez se encuentra unido a través de un brazo a una célula de carga que capta la fuerza de retención sobre el espécimen superior. La carga vertical N es conocida y se puede seleccionar a través de la disposición de las masas conocidas, que, en este caso, mediante un brazo de palanca multiplican la carga hasta los 2.5 kN sobre los especímenes. Un captador de desplazamiento registra el desplazamiento horizontal producido. El software adquiere datos continuamente de la célula de carga y del sensor LDVT permitiendo el cálculo continuo del coeficiente de rozamiento y su posterior representación para detectar μ_e y μ_c .



Figura 1. Fotografía de la disposición del ensayo.

2.2. Materiales

En este trabajo se ha empleado madera de castaño (*Castanea Sativa* Mill.) de procedencia española. Para cada test el specimen se compone de dos partes de iguales dimensiones, 105 x 50 x 25 mm. Estas dimensiones permiten la correcta disposición de los especímenes en el aparato modificado y permiten un recorrido de rozamiento de 20 mm que se ha comprobado suficiente para captar la estabilización de la fuerza de rozamiento que se necesita para definir μ_c . Las probetas fueron acondicionadas entorno al 12% de humedad para realizar los ensayos.

Al mismo tiempo, la ortotropía de la madera origina distintas rugosidades en distintos planos, por lo que se han de estudiar las direcciones de los cortes según dicha anisotropía y el interés para determinadas aplicaciones.

Las superficies estudiadas, con indicación de su aplicación a superficies de contacto en uniones carpinteras, han sido las siguientes, Figura 2:

- Plano o sección transversal, perpendicular a la fibra, dos direcciones de deslizamiento; por ejemplo, en encuentros frontales en uniones en empalme de llave o uniones embarbilladas con poca inclinación:

- dirección predominante de deslizamiento radial (según el radio de los anillos de crecimiento), (A) en la Figura 5.

- dirección predominante de deslizamiento tangencial (a los anillos de crecimiento), (B) en la Figura 5.

- Plano o sección radial, definido por el eje y un radio del tronco:

- dirección de deslizamiento paralela a las fibras; por ejemplo, en superficies radiales en empalmes de llave o embarbillados con poca inclinación, (C) en la Figura 5.

- dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra; por ejemplo, en rozamiento entre tablones que constituyen placas tensadas, (D) en la Figura 5.

- Plano o sección tangencial, tangente a los anillos de crecimiento:

- dirección de deslizamiento paralela a las fibras; por ejemplo, en superficies tangenciales en empalmes de llave o embarbillados con poca inclinación, (E) en la Figura 5.

- dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra; por ejemplo, en rozamiento entre tablones que constituyen placas tensadas, (F) en la Figura 5.

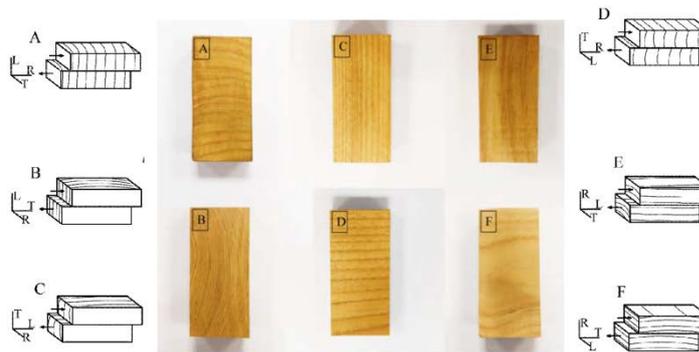


Figura 2. Caras de rozamiento indicando la dirección de deslizamiento.

El número de test realizados para cada dirección se estableció entorno a 25, si bien en algún caso no se pudo alcanzar este número por la necesidad de rechazar algunos ensayos debido a comportamientos inconsistentes del espécimen ensayado con respecto al del conjunto, lo que en algún caso no permitió fijar los valores de alguno de los coeficientes.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados y discusión de los test de rozamiento

Para apreciar la fase estática y dinámica del rozamiento y así determinar los valores del coeficiente estático y dinámico en cada caso, se representó la variación del coeficiente frente al desplazamiento producido en cada uno de los tests.

Como ejemplo de los test realizados, la Figura 3, muestra los gráficos de variación del coeficiente de rozamiento frente al desplazamiento producido para distintas orientaciones de las superficies y direcciones de rozamiento. Se ha representado un ejemplo de cada uno de los casos ensayados. Se puede apreciar como los gráficos reproducen el comportamiento indicado en el apartado 1, diferenciándose una región inicial que se corresponde con una situación estática y una posterior dinámica.

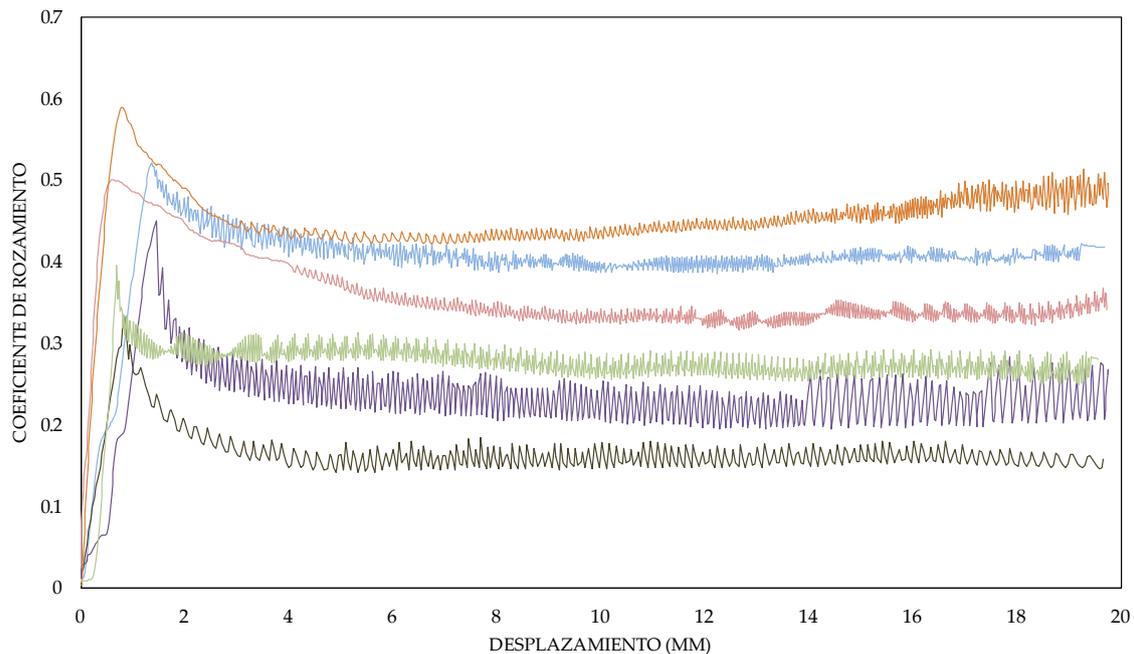


Figura 3. Ejemplos de variación del coeficiente de rozamiento frente a desplazamiento para (superficie/dirección de deslizamiento respecto a la fibra): — transversal/radial; — transversal/tangencial; — radial/paralela; — radial/perpendicular; — tangencial/paralela; — tangencial/perpendicular.

En la región estática se produce un incremento lineal de la fuerza de fricción, y por tanto del coeficiente asociado, hasta alcanzar el punto o pico de "desplazamiento inminente". A partir del cual se produce una inflexión en la gráfica generalmente pronunciada, dicho máximo constituye el coeficiente de fricción estático μ_e que se puede obtener con la Ecuación (1).

Se observa que dicho máximo aparece tras captarse un pequeño desplazamiento, inclinación del inicio del gráfico, en la mayoría de casos inferior a 1 mm, no apreciable en la realización del ensayo, atribuible a la rotura de microsoldadudas entre superficies y a pequeñas deformaciones entre ambas partes que constituyen el espécimen, algo también observado en Aira et al. [17] y a posibles ajustes en el contacto madera-metal con el puente que ejerce la retención. Esta inclinación ligera al inicio del gráfico es recogido como comportamiento típico en la norma ASTM G-115-10 [20].

Posteriormente se produce la estabilización entorno a una asíntota horizontal que constituye el coeficiente de rozamiento dinámico o cinético μ_c que se puede obtener con la Ecuación (2). También en la Figura 3 se aprecia como la mayoría de los test presentaron un ligero comportamiento "stick-slip" en este periodo dinámico, un cíclico incremento y decremento en la fuerza de fricción a medida que progresa el deslizamiento comportamiento también recogido en la norma ASTM G-115-10 [20] como posible en algunos materiales. Sin embargo, el pequeño valor de esta variación permite identificar correctamente el valor del coeficiente cinético μ_c frente al valor de μ_e .

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos, mostrando los valores medios para los coeficientes de rozamiento estático y dinámico en función de la orientación de las superficies en contacto y la dirección de deslizamiento.

Tabla 2. Coeficiente estático y dinámico para las superficies y direcciones estudiadas. Valores medios y coeficientes de variación (CV %)

Superficie	Dirección de deslizamiento	μ_e	μ_c	μ_c/μ_e
Transversal	Radial	0.45(31.5)	0.32(32.6)	0.72
	Tangencial	0.39(36.8)	0.25(39.8)	0.63
Radial	Paralela a la fibra	0.41(30.7)	0.31(35.2)	0.76
	Perpendicular a la fibra	0.52(32.3)	0.34(40.2)	0.65
Tangencial	Paralela a la fibra	0.36(30.3)	0.28(38.7)	0.78
	Perpendicular a la fibra	0.55(23.9)	0.39(34.9)	0.71

A la vista de la Tabla 2 los valores medios obtenidos sin considerar las distintas secciones y direcciones de la madera fueron de 0.45 para fricción estática y 0.32 para dinámica. Valores que se encuentran dentro de los recogidos por [9, 16] para madera en general: coeficiente estático (0.25-0.5) y ligeramente superiores al 0.20 indicado para el cinético, pero entre el 0.3 y 0.5 también indicado para el cinético por [12] con humedad del 12%. McKenzie et al [15] indica una estática de 0.6 y dinámica 0.45 sin precisar direcciones ni especies, lo que resultaría más elevado de lo aquí obtenido.

Los CV, dentro de cada dirección considerada, si bien resultan elevados en algún caso para los coeficientes dinámicos (llegando al 40.2% en un caso), en el resto de casos se encuentran dentro de la variabilidad propia de la madera y semejantes a los obtenidos por otros autores.

La relación entre coeficientes μ_c/μ_e arrojó un valor medio global de 0.71, valor que se encuentra cercano al 25% de descenso en el valor de la fricción cinética respecto a la estática indicado en general para rozamiento entre sólidos [8–11]. Al relacionar μ_e y μ_c se puede apreciar una buena correlación, lo que indicaría que obtenido el valor de la fricción estática se podría estimar la dinámica en cada caso.

Si atendemos a las distintas direcciones consideradas se aprecia que los mayores valores tanto para el rozamiento estático como dinámico se producen para superficies de corte radiales y tangenciales en dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra, con valores entre un 16 y un 23% y entre 8 y 24% más que el valor medio para μ_e y μ_c respectivamente. Siendo los menores valores obtenidos los correspondientes a superficies tangenciales con dirección de deslizamiento paralela a la fibra, con valores 19% y 11% menores que la media para μ_e y μ_c respectivamente, lo que muestra el efecto de la menor intersección con los anillos de crecimiento. En el caso de μ_c también destaca el bajo valor obtenido para superficies transversales y dirección tangencial de deslizamiento. En todos estos casos se aprecia la estrecha relación entre μ_e y μ_c en cuanto a que los valores máximos y mínimos estáticos también lo son dinámicos.

Respecto a la relación con los valores obtenidos por otros autores para las distintas direcciones, se pueden realizar los siguientes apuntes, si bien hay que tener presente la ausencia de estudios para algunas de ellas, en muchos casos englobadas conjuntamente varias direcciones, que sí han sido consideradas en este trabajo:

(i) Para superficies provenientes de cortes transversales se han obtenido unos valores medios de 0.42 (μ_e) y 0.29 (μ_c) que resultan similares a los reportados por [18] para madera laminada de *Picea abies* L. Karst (0,467 (μ_e) y 0,310 (μ_c)) en cortes transversales y dirección de deslizamiento indefinida o intermedia radial-tangencial. También para superficies perpendiculares a la fibra y madera de roble Kollmann [16] indica valores del orden de los aquí obtenidos. Para madera de coníferas en general y humedades inferiores al 12%, en rozamiento perpendicular a la fibra, la norma Eurocode 5-Part 2: Bridges [13] indica un valor de diseño para el coeficiente estático de 0.30, que debiera considerarse conservador.

(ii) Para deslizamiento paralelo a la fibra se han obtenido unos valores medios de 0.41 (μ_e) y 0.31 (μ_c) en caso de superficies radiales, y 0.36 (μ_e) y 0.28 (μ_c) para superficies tangenciales.

Lo que se puede comparar con el valor del coeficiente estático aportado por la norma Eurocode 5-Part 2: Bridges [13] para madera de coníferas, 0.23 (μ_e), valor bajo, inferior a los obtenidos, y que debiera considerarse conservador dada su aplicación normativa. Valores más elevados los aporta Kollmann [16] para madera de roble y superficies paralelas a la fibra: 0.62(μ_e) y 0.48(μ_c).

(iii) En el caso de deslizamiento perpendicular a la fibra en superficies de corte paralelas a la misma, radiales o tangenciales, (movimiento como de rodadura entre fibras), se han obtenido unos valores muy semejantes entorno a 0.5(μ_e) y 0.35(μ_c) para superficies radiales y tangenciales. La única referencia cercana a este tipo de rozamiento puede encontrarse en los ensayos realizados por Soilán [19] con madera laminada de *Picea abies* Karst obteniendo valores ligeramente menores a los de este trabajo. Por otro lado, el valor aportado por la norma Eurocode 5-Part 2: Bridges [13] para rozamiento estático perpendicular a la fibra de 0.30 se pudiera interpretar como válido también para estas superficies y bajo al tratarse de valores de diseño.

Los resultados obtenidos se encuentran dentro del orden de los valores aportados por la bibliografía, aunque la comparación que se pudo realizar contiene limitaciones, ya que en unos casos es para otras especies, o para madera en general, o no precisan todas las direcciones estudiadas en este trabajo. Ha de tenerse presente también que los distintos métodos de ensayo añaden variabilidad a los resultados obtenidos por los distintos autores.

3.2. Aplicación al cálculo de una pasarela de madera

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de una pasarela con tablero de placa de madera tensada de castaño. Dicha pasarela estaría destinada al paso de peatones, pero con capacidad vehicular para mantenimiento o emergencia como puede ser un camión motobomba para la extinción de incendios. Salva una luz de 5 m con un ancho de 3,5m y se emplaza en un Espacio Natural Protegido, “Sierra de Gredos y Valle del Jerte”, perteneciente a la Red Natura 2000, por lo que una pasarela de madera aportaría una mejor integración ambiental con un material de construcción sostenible.

Este sistema se basa en la conformación de placas rígidas a través de piezas de madera, aserradas o laminadas, dispuestas de canto longitudinalmente una al lado de la otra. Se emplean barras de acero que atraviesan transversalmente las piezas de madera y que luego son tensadas, todo ello para garantizar la colaboración de todos los elementos entre sí. La transmisión de carga resulta de la unión por rozamiento entre las tablas. Esta tipología estructural permite que la pasarela tenga también uso vehicular. La Figura 4 muestra las características de la placa tensada de la pasarela.

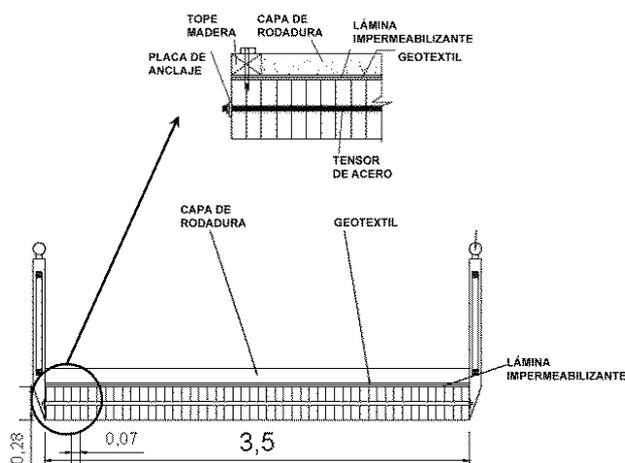


Figura 4. Sección transversal de la pasarela de placa tensada y detalle.

La introducción del coeficiente de rozamiento se realiza en la determinación del nivel requerido de tensión inicial de las barras tensoras, P_i , que a su vez generará la compresión perpendicular sobre la madera. Será función del momento transversal (M_t) y del cortante transversal (V_t) que producen la combinación de cargas a aplicar al tablero según:

$$P_i = 2,5 * P \quad P = \text{MAX} [(6 * M_t) / d^2 ; (1,5 * V_t) / (v * d)]$$

siendo "d" el espesor de la placa y "v" el coeficiente de rozamiento estático

Los resultados obtenidos en los ensayos para la madera de castaño indican un valor medio del coeficiente de rozamiento de 0,5 para este tipo de contactos, que supera holgadamente el que propone la norma para rozamiento perpendicular a la fibra (0,3) en coníferas y valor aconsejado ante ausencia de más datos, si bien abre la puerta al empleo de valores obtenidos por experimentación. En este caso se ha obtenido por considerar que los ensayos han servido para confirmar del lado de la seguridad el valor dado por la norma no sólo para coníferas sino también para el castaño y se ha empleado $\mu_e = 0,3$ en el cálculo normativo de la pasarela.

Habiéndose determinado previamente un espesor de la placa de 28 cm, empleando un acero de límite elástico $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$ y con tensores espaciados 50 cm entre sí, se toma un diámetro de barra de 25 mm y unas placas de anclaje cuadradas de 7 cm de lado para evitar el aplastamiento en el apoyo sobre la madera.

3.3. Aplicación a la simulación numérica de estructuras

El conocimiento del coeficiente de rozamiento estático es fundamental para una correcta simulación de los contactos entre piezas estructurales. La obtención de estos valores para el castaño permitirá realizar este tipo de estudios con este material constructivo, lo que resulta de gran importancia dado que la madera de castaño se emplea generalmente en forma de madera aserrada y las estructuras ejecutadas suelen resolverse mediante uniones tradicionales o carpinteras, donde la transmisión de esfuerzos implica en gran medida la presencia del rozamiento.

Los autores del presente trabajo ya disponen de modelos de simulación numérica validados para diversas uniones estructurales en madera [1–3, 6, 7] por lo que se han podido comenzar los estudios del comportamiento de este material al respecto. Como ejemplo de aplicación y comienzo de dichos estudios, la Figura 5 muestra las tensiones normales paralelas a la fibra en una simulación numérica por elementos finitos para un embarbillado simple trasero entre un par y un tirante de una cercha de gran escuadría ejecutada con madera de castaño. Los valores de las propiedades elásticas se han recogido de un trabajo previo de los autores [21], mientras que los valores del coeficiente de rozamiento empleados fueron los valores medios obtenidos en el presente estudio, $\mu_e = 0,42$ para la cara de contacto frontal (media en las superficies transversales) y $\mu_e = 0,39$ para la cara inferior de rozamiento (media entre los valores en superficies tangenciales y radiales con deslizamientos paralelos a la fibra) dadas las superficies de rozamiento que se generan en las condiciones antes indicadas al emplear madera aserrada de castaño.

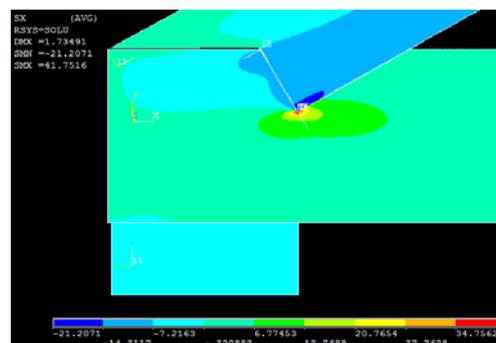


Figura 5. Tensiones normales paralelas a la fibra (N/mm^2) en una unión por embarbillado trasero en un encuentro par-tirante para una carga en el par de 137 kN. Software ANSYS [22].

4. Conclusiones

El procedimiento desarrollado para la determinación de los coeficientes de rozamiento en madera mediante la modificación de un aparato de corte directo propio de estudios de geotecnia ha resultado viable. A la standarización del método puede contribuir el procedimiento aquí descrito ya que el aparato de corte directo es una máquina comunmente disponible en laboratorios de materiales.

Los valores medios obtenidos sin considerar las distintas direcciones de la madera fueron de $\mu_e = 0.45$ para fricción estática y $\mu_c = 0.32$ para dinámica. Los mayores valores obtenidos tanto para rozamiento estático como dinámico se producen para superficies de corte radiales y tangenciales con dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra, seguidos de los obtenidos para secciones transversales. Los menores valores obtenidos son los correspondientes a superficies de corte tangenciales con deslizamiento paralelo a la fibra, lo que también muestra el efecto de la ausencia (o ligera) intersección con los anillos de crecimiento.

En todos los casos μ_e ha resultado mayor a μ_c . Se ha apreciado una buena correlación entre μ_s y μ_k lo que permitiría estimar el coeficiente dinámico conocido el estático.

La determinación de estos valores ha tenido su aplicación práctica en el diseño y cálculo de una pasarela de madera de castaño con sistema de placa tensada, ya que los valores que aporta la normativa son únicamente para coníferas.

Finalmente, la determinación del coeficiente de rozamiento estático ha permitido una correcta simulación del contacto entre superficies de elementos estructurales con este material, e iniciar el estudio del estado tensional de uniones en estructuras de madera de castaño.

5. Agradecimientos

Para este trabajo se ha contado con la financiación de la Junta de Extremadura (España) a través de las ayudas GR18175 y GR18193 (financiadas parcialmente por fondos FEDER).

Referencias

1. Villar JR, Guaita M, Vidal P, Arriaga F. Analysis of the Stress State at the Cogging Joint in Timber Structures. *Biosyst Eng.* 2007, 96, 79–90. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.09.009
2. Villar-García JR, Crespo J, Moya M, Guaita M. Experimental and numerical studies of the stress state at the reverse step joint in heavy timber trusses. *Mater Struct.* 2018, 51, 17. doi: 10.1617/s11527-018-1144-9
3. Villar JR, Guaita M, Vidal P, Argüelles R. Numerical simulation of framed joints in sawn-timber roof trusses. *Spanish J Agric Res.* 2008, 6, 508–520. doi: 10.5424/sjar/2008064-345
4. Aira JR, Íñiguez-González G, Guaita M, Arriaga F. Load carrying capacity of halved and tabled tenoned timber scarf joint. *Mater Struct.* 2016, 49, 5343–5355. doi: 10.1617/s11527-016-0864-y
5. Koch H, Eisenhut L, Seim W. Multi-mode failure of form-fitting timber connections – Experimental and numerical studies on the tapered tenon joint. *Eng Struct.* 2013, 48, 727–738. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.002
6. Villar-García JR, Vidal-López P, Crespo J, Guaita M. Analysis of the stress state at the double-step joint in heavy timber structures. *Mater. Construcción.* 2019. In press.
7. Villar JR, Crespo J, Lorenzana JA, Guaita M. Análisis experimental y por elementos finitos del estado tensional de uniones tradicionales por embarbillado simple y doble en madera estructural. VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería. Orihuela, España, 1- 3 junio 2016. Libro de Actas pág. 516–527.
8. Tipler PA (2008) *Physics for scientists and engineers*, 6th ed. W. H. Freeman-Worth, 1999 4th ed., New York, USA
9. Serway RA, Jewett JW (2013) *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Cengage Learning, New York, USA
10. Keller FJ, Gettys WE, Skove MJ (1993) *Physics, classical and modern*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, USA

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

11. Young HD, Freedman RA (2016) *University Physics*, 14th ed. Pearson Education, San Francisco, USA
12. USDA Forest Products Laboratory (2010) *Wood handbook: wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. doi: 10.2737/FPL-GTR-190
13. CEN EN 1995-2:2016 (2016) *Eurocode 5: Design of timber structures - Part. 2. Bridges*. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
14. Argüelles R, Arriaga F, Esteban M, et al (2015) *Timber Structures. Joints* (in Spanish). AITIM. Technical Research Association of the Wood and Cork Industries, Madrid, Spain
15. McKenzie WM, Karpovich H. The frictional behaviour of wood. *Wood Sci Technol*. 1968, 2, 139–152. doi: 10.1007/BF00394962
16. Kollmann F (1959) *Wood technology and its applications*. Technologie des Loses und der Holzwerkstoffe. Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias y servicio de la madera. Ministerio de Agricultura., Madrid, Spain
17. Aira JR, Arriaga F, Iniguez-Gonzalez G, Crespo J. Static and kinetic friction coefficients of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), parallel and perpendicular to grain direction. *Mater Constr*. 2014. doi: 10.3989/mc.2014.03913
18. Crespo J, Regueira R, Soilan A. Methodology to determine the coefficients of both static and dynamic friction apply to different species of wood. 1st Ibero-Latin American Congress Wood Construction CIMAD, Coimbra, Portugal, 11 Junio 2011. Proceedings doi: 978-989-96461-2-4
19. Soilán A, Arriaga F, Baño V. Analysis of the behavior of the dovetail connection by numerical simulation with the finite element method. 1st Ibero-Latin American Congress Wood Construction CIMAD, Coimbra, Portugal, 11 Junio 2011. Proceedings doi: 978-989-96461-2-4
20. ASTM International ASTM G115-10(2018) (2018) *Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients*. doi: 10.1520/G0115-10R18
21. Villar-García JR, Crespo J, Moya M, Guaita M. Determinación de las propiedades mecánicas del castaño extremeño mediante medición de la velocidad de propagación de onda de ultrasonidos. IX Congreso Ibérico de Agroingeniería. Bragança, Portugal, 4 - 6 Septiembre 2016.
22. ANSYS Inc. ANSYS® (2012) *Academic Research*, Release 14.0, ANSYS Mechanical APDL