

Desarrollo de metodología para la determinación de los coeficientes de fricción estático y dinámico de diferentes especies de madera

J. Crespo Outes

Ing. Montes, PEMADE.
Escuela Politécnica Superior de Lugo
USC (Lugo, España)
jorge.crespo@usc.es



R. Regueira Gay

Ing. Montes, Dpto Ingeniería Agroforestal.
Escuela Politécnica Superior de Lugo
USC (Lugo, España)
ruben.regueira@usc.es



A. Soilán Cañas

Ing. Montes, CIS Madeira
(Ourense, España)

azahara.soilan@cismadeira.com



M.R. Díez Barra

Dr. Investigador Titular de OPs
Dpto. Productos Forestales, CIFOR-INIA
(Madrid, España)
diez@inia.es



M. Guaita Fernández

Dr. Ing. Agrónomo, Dpto de Ingeniería Agroforestal
Escuela Politécnica Superior de Lugo
USC (Lugo, España)
m.guaita@usc.es



Palabras clave – Metodología, rozamiento, fricción, uniones tradicionales, estructuras de madera.

Keywords – Methodology, friction, carpentry joints, timber structures.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una metodología para poder determinar los coeficientes de fricción tanto estático como dinámico aplicable a diferentes especies de madera.

Para desarrollar dicha metodología se utilizan las instalaciones que posee la Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estructural (PEMADE) donde hay una mesa que permite la realización de ensayos de rozamiento. Se realizan ensayos utilizando una especie de madera muy usada en estructuras como es la *Picea abies* (L) Karst. La humedad de la madera es del 12%, ya que según indica la actual norma UNE-EN 408, los ensayos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera estructural se deben de hacer con ese contenido de humedad.

Finalmente, decir que este trabajo de investigación sienta las bases para realizar posteriores campañas de ensayos con esta base metodológica que permitan, para diferentes especies de madera y humedades, obtener rangos de valores de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico para las principales especies de madera de uso estructural.

ABSTRACT

This research develops a methodology to determine the coefficients of both static and dynamic friction apply to different species of wood.

To develop such a methodology is used the installations owned by the Plataforma de Enxeñería da Madeira Estructural (PEMADE) where there is a table that allows testing of friction. Tests are carried out using a wood species normally used in structures such as *Picea abies* (L) Karst. The wood moisture content is 12%, and that, according to the current UNE-EN 408 norm, the tests for determining the physical and mechanical properties of structural timber should do with that moisture content.

Finally, it can say that this research provides the basis for subsequent test campaigns with this methodological basis to obtain, for different wood species and moisture, the ranges of values of the coefficients of static and dynamic friction for major wood species for structural use.

1. Introducción

En las estructuras de madera, y más concretamente, en estructuras que presentan uniones de tipo tradicional, los esfuerzos se transmiten por las superficies en contacto de los diferentes elementos. Dichos esfuerzos provocan una serie de reacciones tanto normales como tangenciales que dan lugar a una fuerza de rozamiento o fricción en las superficies de contacto que es necesario conocer para un mejor dimensionado de las estructuras de madera.

En la actualidad, esta fuerza de fricción se ignora y no se tiene en cuenta en los cálculos de dimensionamiento de las uniones de las estructuras. Debido a esto, no existe ningún tipo de normativa española relacionada con los coeficientes de fricción, es decir, que no hay ningún tipo de normativa que establezca una metodología para la determinación de los coeficientes de fricción tanto estático como dinámico aplicable a madera estructural.

Para desarrollar dicha metodología, se realizarán una serie de ensayos en el laboratorio de la Plataforma de Ingeniería de la Madera Estructural (PEMADE) de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) utilizando una especie de madera muy utilizada en estructuras como es la *Picea abies* (L) Karst y a un contenido de humedad del 12% ya que, según la actual norma UNE-EN 408, los ensayos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera estructural se deben de hacer a unas condiciones de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura y a $65 \pm 5\%$ de humedad relativa lo que supone una humedad de equilibrio higroscópico del 12%.

2. Antecedentes

2. 1. Las uniones tradiciones en estructuras de madera

Las estructuras de madera están constituidas, en su mayor parte, por una serie de elementos unidos entre sí. Es en esas uniones donde tiene lugar una fuerza, denominada fuerza de rozamiento ya que es producida por la fricción de los elementos que están en contacto.

Existen muchos tipos de uniones para estructuras de madera pero en la que más influencia tiene el rozamiento son las uniones de tipo tradicional ya que los esfuerzos se transmiten de una pieza a otra a través de cajas y espigas, realizadas en la propia madera, equilibrando los esfuerzos axiales mediante compresiones y esfuerzos tangenciales. Los elementos metálicos que suelen añadirse a este tipo de uniones solo tienen, en general, la misión de asegurar o afianzar las piezas para impedir que estas se descoloquen.

2. 2. Teoría del rozamiento entre superficies

1.2.1. Origen del rozamiento por contacto

La mayoría de las superficies son extremadamente rugosas a escala microscópica, incluso las que se consideran pulidas. Los picos de cada una de las superficies que se ponen en contacto

determinan el área real de contacto que es una pequeña proporción del área aparente de contacto (el área de la base del bloque). El área real de contacto aumenta cuando aumenta la presión (la fuerza normal) ya que los picos se deforman.

Debido a las fuerzas de atracción, las moléculas de ambas superficies tienden a soldarse entre sí. Estas soldaduras tienen que romperse para que se produzca el deslizamiento, además existe siempre una incrustación de los picos de una de las superficies con los valles de la otra. Este es el origen del rozamiento estático.

La presencia de aceite o grasa en las superficies en contacto evita las soldaduras al revestirlas de un material inerte.

1.2.2. Coeficiente de rozamiento estático

Existe una fuerza de rozamiento entre dos cuerpos que no están en movimiento relativo, dicha fuerza es la fuerza de rozamiento estático.

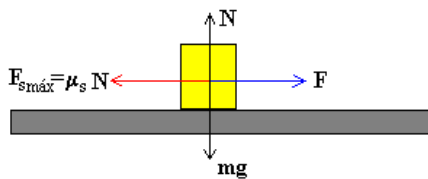


Figura 1 - Fuerza de rozamiento estático máxima

La fuerza F aplicada sobre el bloque aumenta gradualmente, permaneciendo el bloque en reposo. Como la aceleración es cero la fuerza de rozamiento estático (F_s) es igual y opuesta a la fuerza aplicada (F). La máxima fuerza de rozamiento estático corresponde al instante en el que el bloque está a punto de deslizarse:

donde:

- $F_{smáx}$: fuerza máxima de rozamiento estático.
- μ_s : coeficiente de rozamiento estático.
- N : fuerza normal.

$$F_{smáx} = \mu_s N \quad (1)$$

1.2.3. Coeficiente de rozamiento dinámico

Si un cuerpo desliza con una velocidad constante experimenta una fuerza de rozamiento llamada fuerza de rozamiento dinámico.

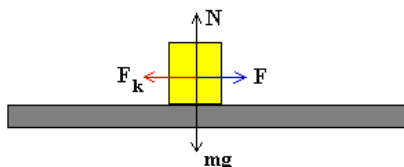


Figura 2 - Fuerza de rozamiento dinámico

Si la velocidad con la que se mueve el cuerpo es constante, entonces la fuerza de rozamiento dinámico (F_k) es igual y opuesta a la fuerza aplicada (F). La fuerza de rozamiento dinámico F_k es proporcional a la fuerza normal (N):

donde:

- F_k : fuerza de rozamiento dinámico.
- μ_k : coeficiente de rozamiento dinámico.
- N : fuerza normal.

$$F_k = \mu_k N \quad (2)$$

El valor de μ_k es casi independiente del valor de la velocidad para velocidades relativas pequeñas entre las superficies, y decrece lentamente cuando el valor de la velocidad aumenta considerablemente.

El coeficiente de rozamiento estático (μ_s) siempre es mayor que el coeficiente de rozamiento dinámico (μ_k):

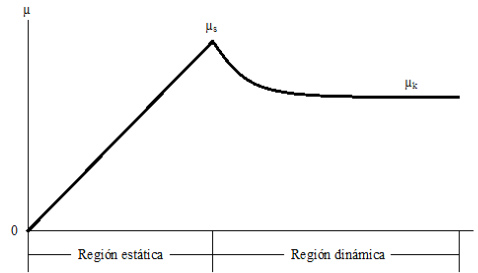


Figura 3 - Representación gráfica de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico

2. 3. Motivación

En este apartado cabe citar la Tesis Doctoral de D. José Ramón Villar García, cuyo título es “Optimización estructural mediante análisis con simulación numérica del estado tensional de uniones tradicionales por ensamblaje embarbillado en estructuras de madera”.

En esta tesis, se analiza un tipo de unión tradicional como es el ensamblaje embarbillado mediante una técnica de simulación numérica. A través de este tipo de simulación se obtiene el estado tensional de las dos piezas presentes en la unión.

El cálculo del ensamblaje se ve mejorado respecto del propuesto por el Código Técnico con la inclusión de las fuerzas originadas por el rozamiento entre las superficies (F1T y F2T). Contando con estas fuerzas, las resultantes ya no son perpendiculares a las superficies donde actúan sino que tienen un cierto ángulo respecto de estas.

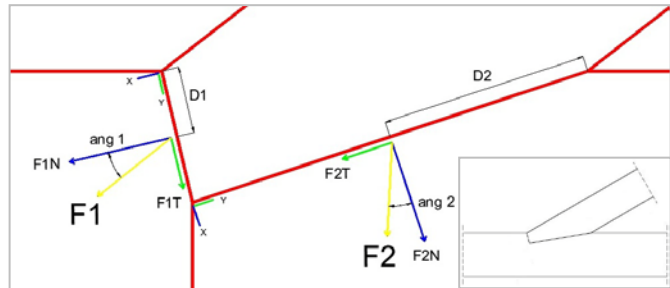


Figura 4 - Esquema de las fuerzas en un ensamblaje embarbillado

El resultado final de esta Tesis Doctoral teniendo en cuenta las fuerzas de rozamiento entre las dos piezas de madera es el que se muestra a continuación:

Longitud del cogote:

$$t \geq \frac{F_d \cos \beta}{bf_{c,\alpha,d}} k \quad (3)$$

Profundidad de la barbilla:

$$a \geq \frac{F_d \cos \beta}{bf_{v,d}} k \quad (4)$$

Valor del coeficiente k:

$$k = [(3,88\mu - 1,31)\cos\beta - (3,76\mu - 2,22)] \quad (5)$$

donde:

- F_d : valor de cálculo de la compresión en el par o pieza equivalente.
- β : ángulo entre par y tirante o piezas equivalentes.
- b : ancho de la pieza.
- $f_{c,\alpha,d}$: valor de cálculo de la resistencia a compresión oblicua.
- $f_{v,d}$: valor de cálculo de la resistencia a cortante.
- μ : coeficiente de rozamiento estático.

Esto indica que en las expresiones de estimación de “a” y “t”, además de influir el coeficiente de rozamiento, interviene un segundo coseno del ángulo que recoge el efecto de la distribución de tensiones en función del ángulo que forman las piezas entre sí y que no se tienen en cuenta al despreciar la presencia de fricción entre piezas en el cálculo convencional recogido en el Código Técnico.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de investigación consiste en desarrollar una metodología que permita la determinación, mediante ensayos de laboratorio, de los coeficientes de fricción estático y dinámico de diferentes especies de madera.

Como objetivo secundario se pretenden mostrar los valores de coeficientes de fricción estático y dinámico para *Picea abies* (L) Karst laminada obtenidos en los ensayos.

Además, quedan sentadas las bases para poder realizar campañas de ensayos con esta base metodológica que permitan la caracterización física para diversas especies de uso estructural a diferentes contenidos de humedad.

4. Metodología

El trabajo de investigación se puede dividir en dos fases claramente diferenciadas:

- La primera fase consiste en la elaboración de las probetas a partir de vigas de tamaño estructural.
- La segunda fase se basa en la realización de los ensayos que permiten desarrollar la metodología para la determinación de los coeficientes de fricción.

4. 1. Primera fase: elaboración de las probetas

Para la elaboración de las probetas se parte de vigas de tamaño estructural. Con la ayuda de una sierra de cinta vertical Kenbill se cortan unas rebanadas de 200 mm de largo, 100 mm de ancho y 20 mm de alto. Después a cada rebanada de 200 x 100 x 20 mm se le da un corte al medio quedando unas probetas de aproximadamente 200 x 50 x 20 mm. En madera laminada hay aleatoriedad en la disposición de las láminas, con lo que la orientación sería la de un corte transversal perpendicular a la fibra en el que el valor del rozamiento sería fruto de una combinación aleatoria de orientaciones radiales y tangenciales y por lo tanto el valor resultado es un valor medio aproximado entre ambas orientaciones.

La orientación del corte es el que se puede ver a continuación:

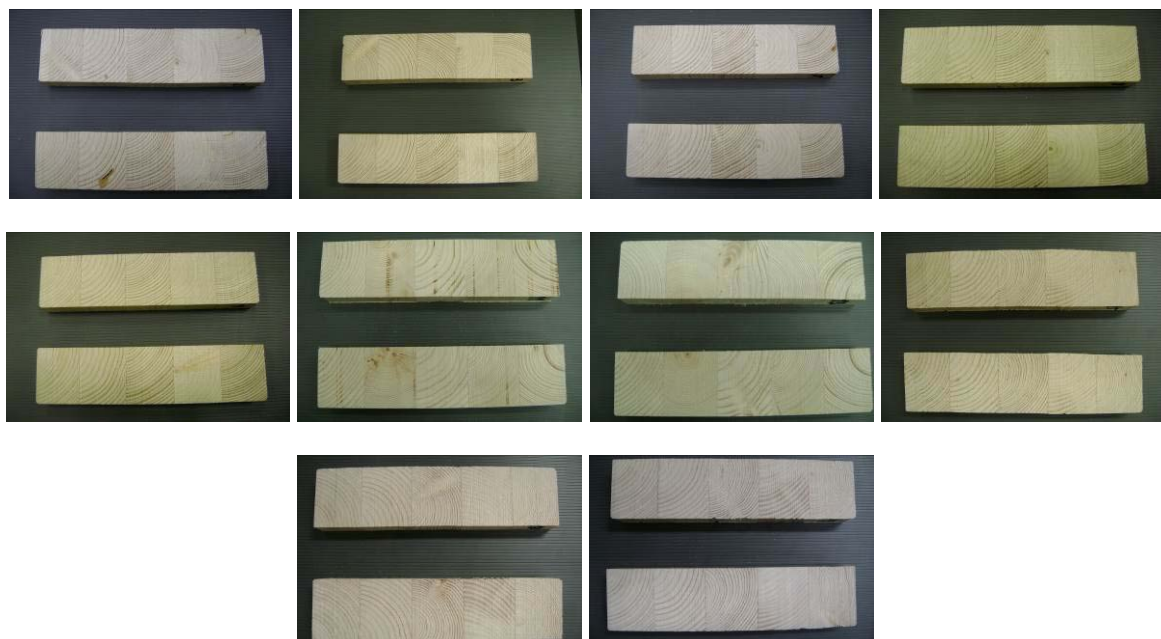


Figura 5 – Detalle de la orientación del corte en la superficie de rozamiento

Una vez preparadas las probetas se enumeran.

Debido a que las probetas presentan una humedad superior al 12% (humedad a la que se realizan los ensayos), estas deben de ser acondicionadas en una atmósfera normalizada de 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa. Se considera que las probetas están acondicionadas cuando llegan

a masa constante, considerando masa constante cuando dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 horas, no difieren en más de 0,1% de la masa de la probeta.

Con las probetas al 12% ya se puede proceder a la realización de los ensayos.

4. 2. Segunda fase: realización de los ensayos

Previo a la realización de los ensayos propiamente dichos, las probetas:

- Se miden con un calibre.
- Se pesan con una balanza electrónica.
- Se fotografían con una cámara de fotos digital.

Para llevar a cabo la realización de los ensayos se utiliza la mesa de ensayos de rozamiento que posee la Plataforma de Ingeniería de la Madera Estructural (PEMADE) en la Universidad de Santiago de Compostela (USC).



Figura 6 - Mesa de ensayos de rozamiento

Dicha mesa de ensayos se controla a través de un software desarrollado por Microtest cuya versión en el momento de la elaboración de este trabajo de investigación es la 1.0.44.

Los ensayos se realizan en grupos de dos en dos probetas las cuales deben de ser fijadas cada una en el soporte correspondiente. Una de las probetas va fijada en el soporte superior (estático) y la otra en el inferior (desliza). La fijación se realiza según los siguientes pasos:

- Con la ayuda del puente grúa se levantan las masas que actúan como fuerza normal y se colocan los seguros.
- Luego se libera el soporte superior quitando el pasador que lo une a la barra roscada.
- Después se aflojan los tornillos de los prisioneros tanto del soporte superior como inferior.
- Se coloca cada probeta centrada en el soporte correspondiente, se ajustan los prisioneros y se aprietan fuertemente los tornillos.



Figura 7 - Elevación de las masas

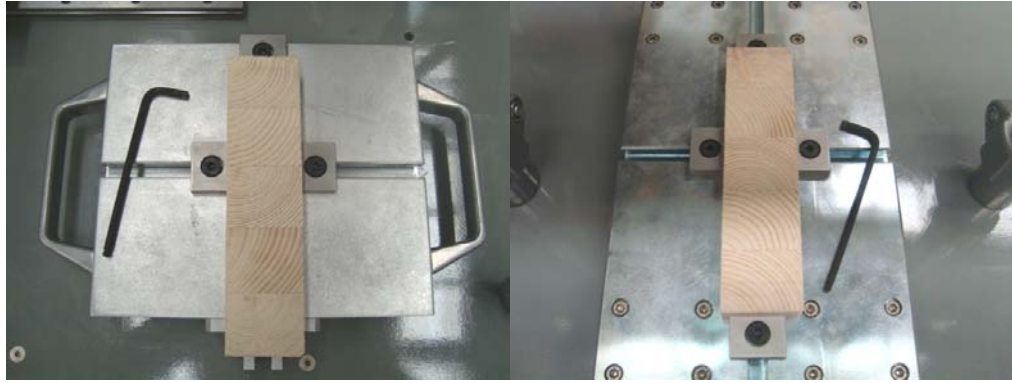


Figura 8 - Colocación de las probetas en los soportes

Una vez que las probetas están colocadas en sus correspondientes soportes se procede al ajuste total del conjunto de los elementos antes de poner en funcionamiento la máquina:

- Se une el soporte superior mediante el pasador con la barra roscada y esta se nivela con la ayuda de un nivel de burbuja.

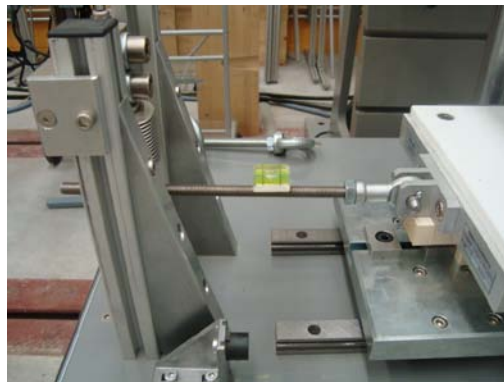


Figura 9 - Nivelación de la barra roscada

- La probeta superior debe de estar aproximadamente 1 cm por detrás de la probeta inferior con el fin de eliminar unos ruidos en los resultados producidos en el inicio del movimiento.

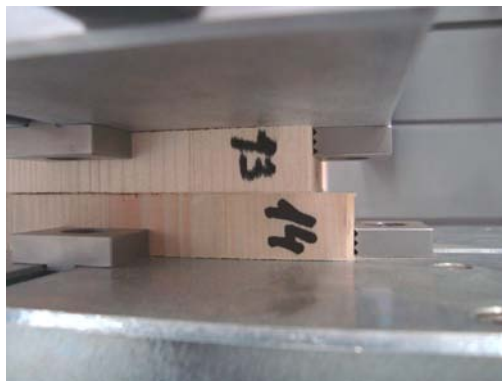


Figura 10 - Colocación relativa de las probetas

- Con los dos soportes moviéndose como un conjunto solidario, se mueven hasta que el soporte superior quede aproximadamente 1 cm por delante de los pesos que actúan como fuerza normal.

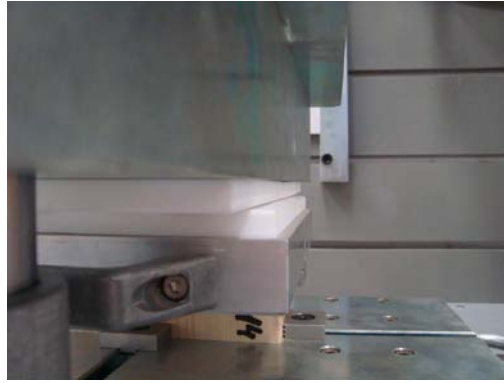


Figura 11 - Colocación relativa del porta probetas superior

- Después se ajusta suavemente la tuerca de la barra roscada hasta que esta haga tope con la célula de carga.

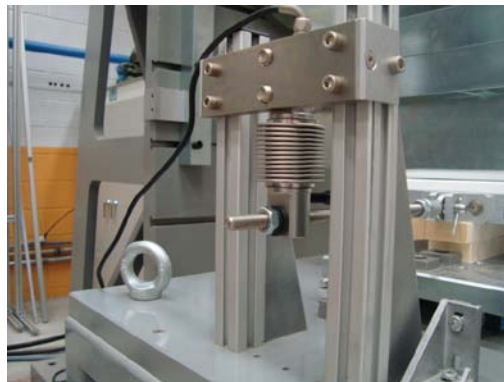


Figura 12 - Ajuste de la tuerca con la célula de carga

- Se bajan los pesos suspendidos del puente grúa y se dejan descansar sobre el soporte superior. Colocar siempre los seguros con la finalidad de que los pesos no caigan bruscamente.
- En contacto con la probeta inferior se coloca un extensómetro de 100 mm que es el encargado de medir la longitud de rozamiento entre las dos probetas, además de parar el ensayo cuando dicha longitud llegue a 50 mm

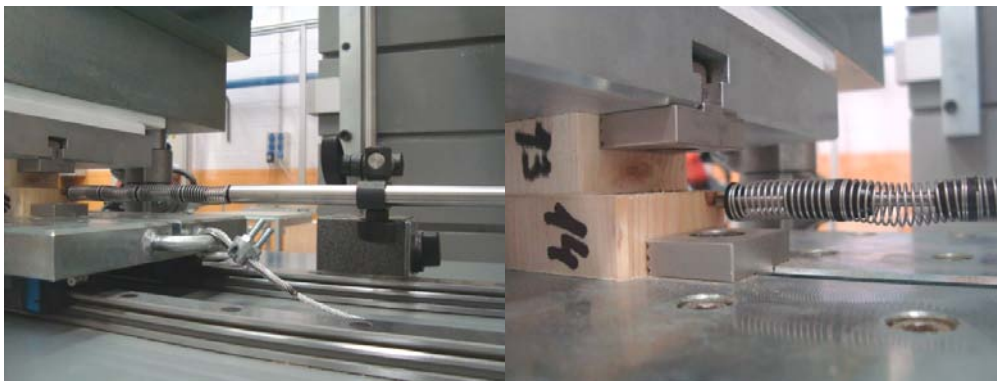


Figura 13 - Colocación del extensómetro de 100 mm

- Se engancha el cable que tira del soporte inferior al hidráulico con la ayuda del pasador. Verificar que dicho cable pasa por la roldana para que el conjunto trabaje correctamente.



Figura 14 - Fijación y ajuste del cable con el hidráulico del bastidor 4

Con lo anterior perfectamente ajustado ya se puede proceder a la realización del ensayo.

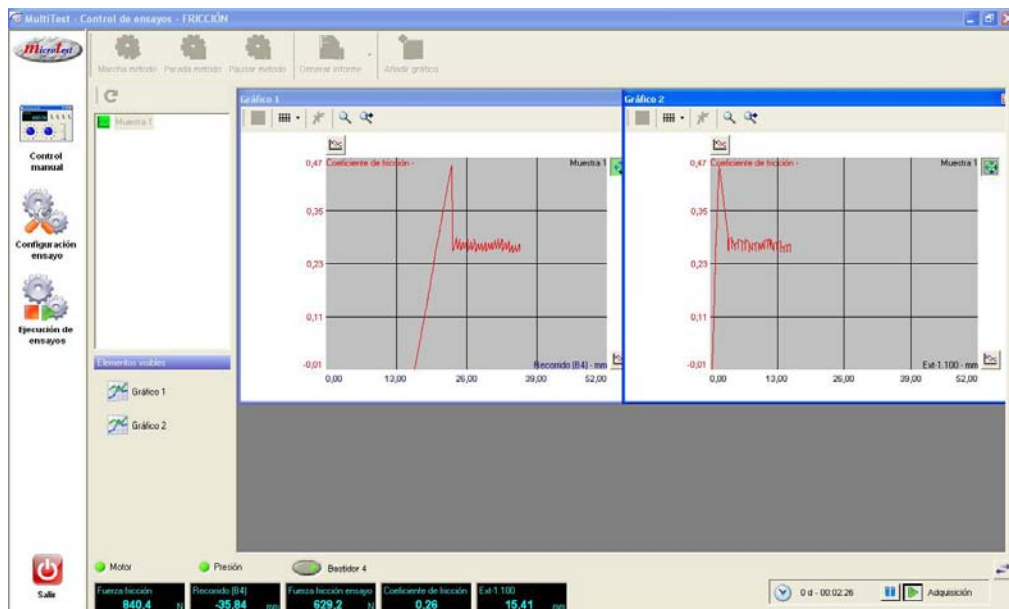


Figura 15 - Ensayo en proceso

Una vez finalizado el ensayo:

- Se levantan los pesos con la ayuda del puente grúa y se aseguran.
- Se aflojan los tornillos de los prisioneros para poder liberar las probetas.
- Para finalizar, las probetas se pesan en una báscula con una precisión de 0,01 gramos para saber el peso húmedo (m_1). Después se introducen en la estufa de secado con unas condiciones de 103 ± 2 °C hasta que la diferencia de peso entre dos pesadas realizadas en un intervalo de 2 horas sea inferior al 0,1%. Por último, se sacan las probetas de la estufa y se pesan inmediatamente para saber el peso anhidro (m_0) y así poder calcular la humedad (ω) a la que fue realizado el ensayo según la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} 100 \quad (6)$$

donde:

- ω : contenido de humedad en tanto por ciento.
- m_1 : masa de la probeta antes de secar, en gramos.
- m_0 : masa de la probeta después de secar (anhidro), en gramos.
- El resultado se expresa con aproximación del 0,1%.

5. Resultados

Los resultados obtenidos para cada par de probetas son el coeficiente de rozamiento estático y el coeficiente de rozamiento dinámico, así como la humedad y la densidad de cada una de las probetas.

Ficha	Número ensayo	Humedad media	Densidad media	Coef. estático	Coef. dinámico
Ficha 07-08	1	12,3	464,5	0,393	0,268
Ficha 09-10	2	12,1	471,0	0,418	0,225
Ficha 05-06	3	12,3	457,6	0,494	0,208
Ficha 01-02	4	12,3	459,8	0,510	0,345
Ficha 03-04	5	12,1	465,4	0,483	0,379
Ficha 15-16	6	12,5	459,3	0,480	0,331
Ficha 17-18	7	12,8	475,5	0,466	0,452
Ficha 19-20	8	12,7	486,0	0,447	0,314
Ficha 11-12	9	12,8	477,8	0,453	0,285
Ficha 13-14	10	12,8	480,1	0,526	0,294
Valor máximo		12,8	486,0	0,526	0,452
Valor medio		12,5	469,7	0,467	0,310
Valor mínimo		12,1	457,6	0,393	0,208

Tabla 1 - Resumen de las fichas de ensayos

Según la tabla anterior, donde se indican los resultados obtenidos en los ensayos para la especie de madera *Picea abies* (L) Karst de madera laminada GL24h y rugosidad de corte transversal perpendicular a la fibra al 12% de humedad, el promedio en los valores de coeficientes de rozamiento estático y dinámico en un orden inicial de magnitud a falta de una campaña amplia de ensayos es el siguiente:

- Coeficiente de rozamiento estático medio: 0,467.
- Coeficiente de rozamiento dinámico medio: 0,310.

6. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de este trabajo de investigación son las siguientes:

- Se ha desarrollado una metodología que ha permitido la realización de ensayos a partir de los cuales se podrán obtener valores de coeficientes de rozamiento para diferentes especies y humedades.
- Con este trabajo se abre la posibilidad de realizar campañas de ensayos a través de los cuales poder caracterizar diferentes especies de madera de uso estructural en cuanto a coeficientes de rozamiento se refiere.
- En los ensayos que se han realizado para la especie de madera *Picea abies* (L) Karst en probetas de madera laminada con sección de rozamiento perpendicular a la fibra, el valor medio obtenido del coeficiente de rozamiento estático tiene un orden de magnitud de 0,467 y del coeficiente de rozamiento dinámico es de 0,310.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias al Gobierno de España a través del Plan Nacional del Ministerio de Ciencia y Tecnología, con el proyecto de investigación AGL2009-11331 y al proyecto 09MDS016291PR del Gobierno de la Xunta de Galicia.

Referencias Bibliográficas

Artículos

J.R. Villar; M. Guaita; P. Vidal; F. Arriaga (2007) "Analysis of the Stress State at the Cogging Joint in Timber Structures". BIOSYSTEMS ENGINEERING. Vol. 96(1). Páginas 79-90.

J.R. Villar; M. Guaita; P. Vidal; F. Arriaga (2008) "Numerical Simulation of Framed Joints in Sawn-Timber Roof Trusses". SPANISH JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH. Vol. 6(4). Páginas 508-520.

Libros

ARGÜELLES ALVAREZ, R.; ARRIAGA MARTITEGUI, F.; MARTINEZ CALLEJA, J. J. *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. 2ª Edición. Madrid: Aitim, 2003. ISBN: 84-87381-17-0

FIDALGO, J.A.; FERNANDEZ, M.R. *Física general*. 7ª Edición. León: Everest, 1997. ISBN: 84-241-7600-6

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. *Física*. 3ª Edición. Volumen 1. Madrid: Thomson Editores Spain, 2003. ISBN: 84-9732-168-5

Normas

AENOR. *Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. UNE-EN 408. Madrid: AENOR, 2004.

AENOR. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa*. UNE-EN 13183-1. Madrid: AENOR, 2002.

Ministerio de Vivienda. *Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad estructural, Madera*. CTE DB SE-M. Madrid: Ministerio de Vivienda, 2006.

Tesis

VILLAR GARCIA, José Ramón. "Optimización estructural mediante análisis con simulación numérica del estado tensional de uniones tradicionales por ensamble embarbillado en estructuras de madera". Directores: Manuel Guaita Fernández y Pablo Vidal López. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Agrarias, Departamento de ingeniería del medio agronómico y forestal, 2008.

IÑIGUEZ GONZALEZ, Guillermo. "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural". Director: Francisco Arriaga Martitegui. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Construcción y Vías Rurales, 2007.