

Predicción mediante ultrasonidos del módulo de elasticidad longitudinal de elementos de madera utilizados como barandillas de seguridad

Castaño Cabañas, A.

Arquitecto Técnico
Dpto. Expresión Gráfica aplic.
a la Edificación, UPM
angel.castano@upm.es

Cobo Escamilla, A.¹

Dr. Ingeniero Industrial
Dpto. Tecnología de la
Edificación, UPM
alfonso.cobo@upm.es

González García, M^a.N.¹

Dra. Por la UPM
Dpto. Const. Arquitectónicas
y su Control, UPM
mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

Llauradó Pérez, N.

Arquitecto Técnico
Dpto. Expresión Gráfica aplic.
a la Edificación, UPM
nuria.llaurado@upm.es

RESUMEN

Entre los métodos de ensayo no destructivos (END) empleados para el estudio de madera aserrada, se encuentran los basados en la velocidad de transmisión de ultrasonidos (VU).

Desde hace decenios numerosos investigadores han empleado la técnica de la VU para predecir propiedades mecánicas en piezas de madera aserrada estructural. Sin embargo, después de una revisión bibliográfica del tema, todos los estudios que hemos encontrado se centran sobre elementos de gran escuadría.

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos cuando se utiliza la VU para predecir propiedades mecánicas de piezas de madera aserrada de pino silvestre de pequeña escuadría, por ser estas las utilizadas habitualmente como barandillas de seguridad.

Para ello se han obtenido rectas de regresión entre la VU y las propiedades mecánicas deducidas a partir de ensayos. Finalmente se han comparado estos resultados con los aportados por otros autores sobre piezas de gran escuadría.

ABSTRACT

Among the so called non-destructive test methods (END), those based on ultrasonic transmission speed (VU) are commonly used in the analysis of lumber elements.

Over the last decades, researchers have adopted this technique to predict the mechanical properties of lumber elements that are to be used structurally. However, upon revision of the literature on this topic, it has been found that most, if not all, research works exclusively address large scantling elements. This study presents the results and implications of adopting an ultrasonic speed method in the prediction of the mechanical properties of read-deal small scantling elements, given their widespread use as safet¹ and rails in several building projects.

¹ Grupo de Investigación Universidad Politécnica de Madrid. Patología de Estructuras, Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación.

To that end, regression lines between ultrasonic speed and the mechanical properties resulting from the tests have been calculated. Finally, results obtained in this study have been compared with those presented by other authors on large scantling elements.

Palabras clave – Velocidad de Transmisión de Ultrasonidos, Barandillas, Madera.

Keywords – Ultrasonic Transmission Speed, Guardrails, Timber.

1. Introducción

Los ensayos necesarios para poder determinar de manera precisa las propiedades mecánicas de una madera, por un lado imposibilitarían su posterior utilización ya que se trata de ensayos destructivos y por otro lado, incrementarían de forma importante el valor del material.

Debido a esto, se han utilizado diferentes métodos, no destructivos, de predicción de la calidad del material, siendo la clasificación visual el método más usado para decidir sobre la calidad mecánica de la madera, esencialmente por su sencillez y por su bajo coste.

Una de las primeras normas de clasificación visual de la madera tuvo lugar en los años 20 y fue desarrollada y publicada por el Forest Products Laboratory de Madison (EE.UU.). Posteriormente aparecieron diferentes normas de clasificación visual en Europa, entre las que cabe destacar las normas alemanas (DIN), inglesas (BSI), francesas (AFNOR), etc., teniendo todas ellas en común un principio altamente conservador.

Esta situación ha venido provocando un doble efecto, por un lado conduce a eficacias muy bajas en los resultados de la clasificación (porcentaje de acierto), pocas veces se supera el 50 %, consecuencia de lo cual el beneficio económico de la comercialización del producto se ve claramente reducido.

Por otro lado, se suele ofertar al mercado un producto cuyas cualidades, elastomecánicas estarán muy por encima de las exigencias preestablecidas.

La madera es un material que presenta un índice de variabilidad de sus propiedades muy elevado de forma general y de sus propiedades mecánicas de forma particular, debido a diferentes causas tales como, la herencia genética, las avanzadas prácticas en el manejo selvícola y el procesado industrial, manifestándose no solo entre árboles de diferentes especies sino también dentro de una misma especie, dentro de una misma masa forestal e incluso dentro del mismo árbol. Resultan ser muy habituales variaciones de algunas propiedades que oscilan entre el 30 y el 40%, medidas a través del coeficiente de variación, lo que ha obligado a clasificar la madera en grupos y/o calidades a los que se les asigna una supuesta resistencia con un aceptable nivel de seguridad.

Las variables que se utilizan para la clasificación en la Norma europea EN 338 a los efectos de definir grupos de calidad homogénea son el Módulo de Rotura a la flexión (MOR), el Módulo de elasticidad a flexión (MOE) y la densidad.

Los primeros ensayos empleando técnicas de ultrasonidos se remontan a 1965, cuando Leel. D. G. los utilizó para examinar el grado de pudrición de cubiertas de madera, habiendo sido muchos los investigadores que han comprobado la eficacia del método de ultrasonidos para determinar las constantes elásticas de la madera, (Bucur, V. 1984 a; Waubke, N.V. 1981, Sandoz, J.L 1989, Herzig, L. 1992, Koubaa, A. et al. 1997, Hernández, R. et al. 1998)

Las técnicas de ultrasonidos que más amplia aplicación tienen cuando se utilizan en la madera, son las denominadas de pulso o eco que consisten en dos transductores, un emisor y un receptor que, adecuadamente acoplados a la madera, miden el tiempo que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno a otro (TOF.- Time of Flight).

Las aplicaciones de estos métodos se basan en la fuerte relación existente entre las propiedades elastomecánicas de la madera (Rajeshwar, B. 1997) y en particular el módulo de elasticidad, y la constante dinámica deducida a partir de la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

En estudios realizados sobre probetas pequeñas libres de defectos se han obtenido buenos resultados en la predicción del módulo de elasticidad a través de la velocidad de propagación de ultrasonidos y la densidad en equipos automáticos (Boström, L. 1994). Para aplicar esta técnica como instrumento clasificador, ya en los años 70, Pellerin R.F. (1978) y Agi J.J. (1978) concluyeron que la velocidad de las ondas ultrasónicas decrecía a medida que aumentaban los defectos en tamaño y número, permitiendo así poder establecer velocidades críticas entre calidades. Desde entonces han aparecido un gran número de trabajos que utilizan la velocidad ultrasónica como variable clasificadora de la calidad de la madera.

Las frecuencias ultrasónicas que utilizan los equipos destinados a trabajar con madera, que es un material dispersivo, son bajas, entre 20 y 200 kHz normalmente, ya que permiten un mayor alcance de los impulsos y no se ven fuertemente afectadas por la falta de homogeneidad del material.

Una emisión a frecuencias bajas permite suponer una distribución del haz de ondas con un frente de onda esférico cuyo centro se sitúa en el palpador emisor y cuya dirección radial concentra la máxima presión sonora.

Al colocar los palpadores emisor y receptor de manera enfrentada, la propagación de la onda ultrasónica tenderá a recorrer el material por el camino más corto y su velocidad dependerá esencialmente de las características mecánicas de la pared celular. Así, los retardos de señal que se produzcan podrán ser debidos a una serie de factores como la especie, tanto por su densidad como por su microestructura (Rodríguez Liñán, C. y Rubio de Hita, P. 2000), la inclinación de las fibras respecto a la dirección de medida (Bucur, V. 1984 b; Kabir, M.F. 2001), la humedad (Bucur, V. 1995; Simpson, W.T. y Wang, X. 2001), las singularidades o defectos de la madera (Sandoz, J.L. 1989) y el grado de deterioro (Gerhards, C.C. 1982; Pellerin, R.F. et al. 1985; Beall, F.C. et al. 1994, 1998; Fujii, Y.; 1990).

2. Materiales y técnicas empleadas

2.1 Muestra de ensayo

Para la realización del presente trabajo se ha hecho uso de una base de datos de un trabajo anterior formada por tablas de madera de pino silvestre (PNSY), *Pinus Sylvestris* L, variedad ibérica Svob (Hermoso 2001^a), procedentes del Sistema Central, Sierra de Guadarrama, suministradas por el Aserradero de Maderas “El Espinar”, situado en Segovia. Esta madera corresponde a poblaciones de alta calidad.

Las tablas habían sido clasificadas previamente en aserradero en tres categorías comerciales en función de las caras y cantos de la tabla, libres de defectos:

Clase “Como Cae” (CC). Engloba tablas de calidad especial, primera o Segunda, recogidas en la norma UNE-EN 1611 (UNE-EN 1611-1, 2000) y presentan las dos caras y un canto libres de defectos. Clase Tercera (TA). Presentan una cara libre de defectos. Clase Cuarta (CA). Se permite cualquier tipo de defectos. Es la madera que usualmente se solicita al aserradero para su uso en construcción.

Se ha trabajado sobre tablas de madera, de categorías CC, TA y CA, de dimensiones aproximadas 1600 x 150 mm. Y espesores 22, 27, 30 y 40 mm.

La muestra fué sometida a una clasificación visual de acuerdo a la norma UNE 56544:2007 (UNE-EN 56544, 2007), que establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada de sección rectangular de las principales especies de coníferas españolas. Esta norma establece dos calidades visuales: ME-1 y ME-2. En su Anexo A, se asignan clases resistentes en función de la especie y calidad de la madera aserrada de sección rectangular de espesor menor o igual a 70 mm. Se han medido y observado los siguientes defectos: nudos, bolsas de resina y entrecasco, fendas, desviación de fibra, gemas, deformaciones de la madera (curvaturas y alabeos). En función de los defectos existentes, la madera ha sido clasificada en clases resistentes C27, C18 o rechazo R. La letra C hace referencia al género: Coníferas y el número indica el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase, en N/mm^2 .

La caracterización mecánica del material se realizó en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Madrid. En primer lugar se han determinado las dimensiones y el peso de todas las piezas, realizandose posteriormente los ensayos para determinar el Módulo de elasticidad longitudinal $E_{0,media}$, la Tensión de rotura a flexión $f_{m,k}$, la Densidad y el contenido de humedad.

2.2 Medidas ultrasónicas

Para efectuar las medidas de velocidad de paso de ondas ultrasónicas se empleó un equipo Ibertest Ultrasonic Tester E46, dotado de dos palpadores (emisor y receptor) de tipo cilíndrico, para la realización de las medidas con este equipo se requiere el uso de geles de contacto ya que el perfecto acoplamiento se consigue por contacto directo con la superficie de la madera. En este caso se ha utilizado la vaselina filante.



Figura 1- Ensayos con Ibertest Ultrasonic Tester E46.

Al igual que para el resto de equipos utilizados, el equipo Ibertest Ultrasonic Tester E46 empleado en las determinaciones fue sometido, de acuerdo con el manual del fabricante, a comprobación mediante la medición de la velocidad de transmisión de la onda sobre una probeta de un material de referencia suministrado por el propio fabricante del equipo.

Al colocar los palpadores emisor y receptor de manera enfrentada, la propagación de la onda ultrasónica tenderá a recorrer el material por el camino más corto y su velocidad dependerá esencialmente de las características mecánicas de la pared celular.



Figura 2- Ensayos con Sylvatest DUO.

Las medidas de la velocidad de paso de la onda entre el emisor y el receptor fueron llevadas a cabo mediante el método directo (palpadores colocados confrontados e insertados en las testas de las piezas) que se sitúan a una distancia conocida (L), midiéndose el tiempo (t) que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno al otro. También se tomaron mediciones indirectas, colocando los palpadores enfrentados por una cara y la opuesta de las tablas con lo cual la señal se transmite en dirección perpendicular a las fibras.

Dada la aplicación más centrada en el ensayo de hormigones del equipo Ibertest Ultrasonic Tester E46 y a los efectos de comprobar la reproducibilidad de las medidas que se realizan con este tipo de equipos, se replicaron los ensayos en una muestra representativa de las tablas mediante la utilización de un equipo SYLVATEST DUO (© Concept Bois Structures), dotado de dos palpadores de tipo cónico emitiendo a una frecuencia de 22 kHz. La realización de las medidas con este equipo no requiere el uso de geles de acoplamiento, ya que este se consigue por contacto directo con la madera y la terminación cónica de los palpadores favorece la concentración de energía. Algunas de las réplicas se realizaron practicando unos orificios cónicos en la testa de la pieza de 5 mm de diámetro y 10 mm de profundidad con el fin de conseguir una superficie de contacto pequeña y perfectamente adaptada a la forma de los palpadores. Algunas mediciones se

realizaron con un equipo Fakopp (45 kHz), que utiliza palpadores en forma de aguja clavados a las testas de las piezas, en este tipo de palpadores, la onda se produce al golpear levemente sobre el cabezal de la aguja emisora con un martillo que produce la excitación de un cristal piezoeléctrico.

Este equipo, así como Sylvatest cuando se realizan perforaciones de acoplamiento, requiere un ajuste de la distancia de propagación descontando 20 mm. Por la penetración de los sensores en las testas de la madera.



Figura 3- Humidímetro GANN Hydromette HT 85 T.

Antes de la realización de los ensayos de VU se testó la humedad de las piezas mediante un equipo GANN Hydromette HT 85 T encontrándose en un rango del 9 al 12,5 %.

2.3 Técnicas estadísticas. Regresión

Previamente se ha realizado un ensayo de comparación de dos muestras (datos obtenidos con el equipo Ibertest Ultrasonic Tester E46 y datos obtenidos con el equipo Sylvatest DUO, para comprobar la reproducibilidad de los datos obtenidos con el primero.

En general se trata de comprobar el comportamiento de la velocidad de transmisión de ultrasonidos como predictor de las propiedades mecánicas de la madera, básicamente tensión de rotura y módulo de elasticidad.

Dicho comportamiento se analiza mediante regresiones lineales simples entre variables y la comparación de los coeficientes de determinación (R²) para las diferentes variables en los distintos grupos de datos.

Con los datos obtenidos en la caracterización experimental, se han buscado correlaciones significativas a efectos de construir modelos de predicción entre variables.

En todos los casos, el análisis estadístico se ha llevado a cabo utilizando el programa Statgraphics®.

3. Resultados obtenidos

En primer lugar se muestran los resultados de la comparación de los datos obtenidos con el equipo Ibertest Ultrasonic Tester E46 y con el equipo Sylvatest DUO a los efectos de poder comprobar la reproductibilidad de las medidas tomadas con el primero.

Análisis 1. Comparación de Dos Muestras - VU Ibertest & VU sylvatest

Resumen del Procedimiento

Muestra 1: VU Ibertest 17 valores 3825,5 hasta 5595,85

Muestra 2: VU Sylvatest 17 valores 3869,0 hasta 5882,0

En la siguiente tabla se muestra el resumen estadístico de la comparación de dos muestras realizada con Stasgraphics. (Tabla 1)

	VU Ibertest	VU Sylvatest
Frecuencia	17	17
Media	4874,98	4851,94
Mediana	4933,51	4803,0
Varianza	234042	316864
Desviación típica	483,778	562,907
Mínimo	3825,5	3869,0
Máximo	5595,8	5882,0
Rango	1770,35	2013,0
Primer cuartil.	4660,38	4403,0
Segundo cuartil.	5164,32	5196,0
Rango intercuartil.	503,94	793,0
Asimetría	-0,402829	0,230613
Asimetría tipif.	-0,678063	0,388179
Curtosis tipificada	-0,00877187	-0,413179
Coef. de variación	9,9237%	11,6017%

Tabla1. Resumen estadístico comparativo de equipos

En la figura 4, se muestra el histograma comparativo, con las frecuencias de 8 clases. (Figura 4)

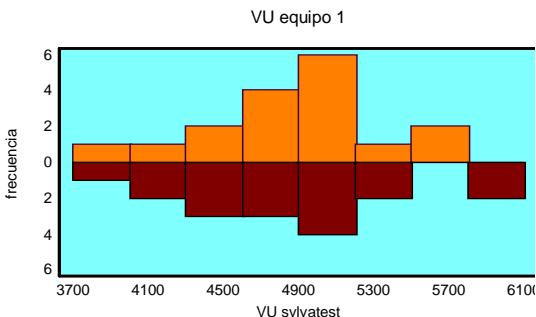


Figura 4- Histograma para 8 clases.

De particular interés está la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada que puede usarse para determinar si las muestras proceden de distribuciones normales. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican salidas significativas de normalidad que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones normales. En este caso, ambos valores de asimetría estandarizada están dentro del rango esperado. Ambos valores de curtosis estandarizada están dentro del rango esperado. En la siguiente figura, se muestra el gráfico de caja y bigotes de las dos muestras. (Figura 5)

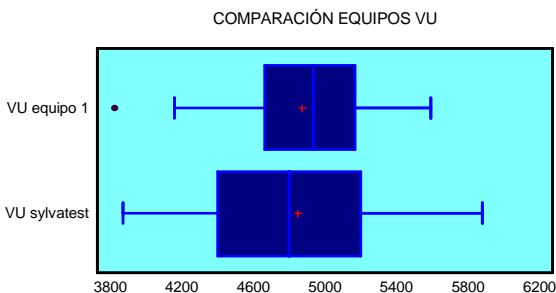


Figura 5- Diagrama de caja y bigotes comparativo.

Análisis 2. Análisis Multivariable

Resumen del Procedimiento

Datos/Variabes: E, Tensión rotura, VU D, Densidad.

Este procedimiento se ha diseñado para resumir varias columnas de datos cuantitativos. Calculará varios estadísticos, incluidas las correlaciones, covarianzas y correlaciones parciales. En el procedimiento están incluidos gráficos multivariantes que proporcionan interesantes vistas de los datos. El gráfico de correlaciones (Figura 6) ofrece una clara idea de los emparejamientos más útiles.

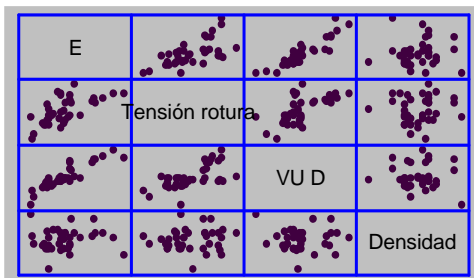


Figura 6- Gráfico de correlaciones.

Esta tabla muestra las correlaciones de Pearson entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1 y miden la fuerza de relación lineal entre las variables. También muestra entre paréntesis el número de pares de datos utilizados para el cálculo de cada coeficiente. La tercera columna de la tabla es un P-valor que comprueba la importancia estadística de las correlaciones estimadas. P-valores por debajo de 0,05 indican importancia estadística de correlaciones no-cero para un nivel de confianza del 95%. Los siguientes pares de variables tienen P-valores por debajo de 0,05:

(E y Tensión rotura) (E y VU) (Tensión rotura y VU).

Análisis 3. Regresión simple - E frente a VU

Coefficiente de Correlación = 0,905956

R-cuadrado = 82,0756 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 81,5777 porcentaje

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre E y VU D. La ecuación del modelo ajustado es $E = -11094,9 + 4,03251 \cdot VU D$. La adecuación de la recta a los valores puede verse en el gráfico. (Figura 7).

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01, existe relación estadísticamente significativa entre E y VU D para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 82,0756% de la variabilidad en E. El coeficiente de correlación es igual a 0,905956, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 1090,11. Dado que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

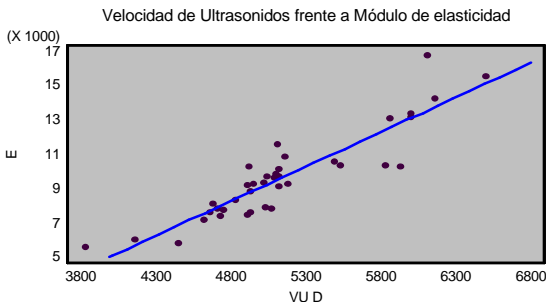


Figura 7- Recta de regresión VU-E.

Análisis 4. Regresión simple - Tensión rotura frente a VU D

Coefficiente de Correlación = 0,640114

R-cuadrado = 40,9746 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 39,335 porcentaje

Error estándar de est. = 11,441

Error absoluto medio = 8,23186

Estadístico de Durbin-Watson = 2,25522 (P = 0,1885)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,220894

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre Tensión rotura y VU D. La ecuación del modelo ajustado es:

Tensión rotura = $-33,7054 + 0,0164786 \cdot \text{VU D}$. La adecuación de la recta a los valores puede verse en el gráfico correspondiente (Figura 8).

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01, existe relación estadísticamente significativa entre Tensión rotura y VU D para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 40,9746% de la variabilidad en Tensión rotura. El coeficiente de correlación es igual a 0,640114, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 11,441. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones. Dado que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

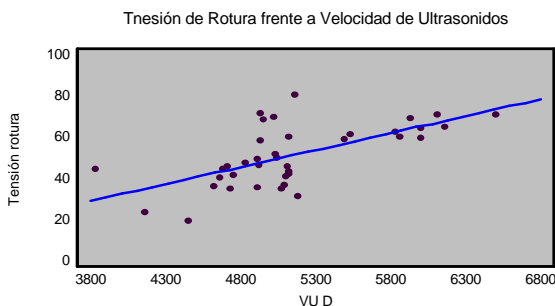


Figura 8- Recta de regresión VU-Tensión de rotura a flexión.

Análisis 5. Regresión simple - Tensión rotura frente a VU D (E)

Variable dependiente: Tensión rotura

Variable independiente: VU D

Variable de Selección: E

Coefficiente de Correlación = 0,640114

R-cuadrado = 40,9746 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 39,335 porcentaje

Error estándar de est. = 11,441

Error absoluto medio = 8,23186

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre Tensión rotura y VU D. La ecuación del modelo ajustado es:

Tensión rotura = $-33,7054 + 0,0164786 \cdot \text{VU D}$. La adecuación de la recta a los valores puede verse en el gráfico siguiente. (Figura 9).

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01, existe relación estadísticamente significativa entre Tensión rotura y VU D para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 40,9746% de la variabilidad en Tensión rotura. El coeficiente de correlación es igual a 0,640114, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 11,441. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones. Dado que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

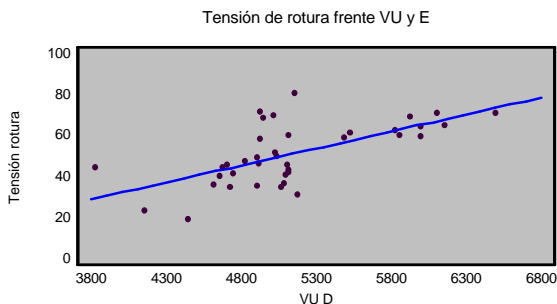


Figura 9- Recta de regresión VU-Tensión de rotura y E..

Análisis 6. Regresión simple - Densidad frente a VU D

Variable dependiente: Densidad

Variable independiente: VU D

Coefficiente de Correlación = -0,0401693

R-cuadrado = 0,161357 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = -2,61194 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0511385

Error absoluto medio = 0,0393915

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre Densidad y VU D. La ecuación del modelo ajustado es:

Densidad = $0,458554 - 0,00000355396 \cdot \text{VU D}$. La adecuación de la recta a los valores puede verse en el gráfico siguiente. (Figura 10).

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0,01, no existe relación estadísticamente significativa entre Densidad y VU D para un nivel de confianza del 90% o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 0,161357% de la variabilidad en Densidad. El coeficiente de correlación es igual a -0,0401693, indicando una relación relativamente débil entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0511385. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

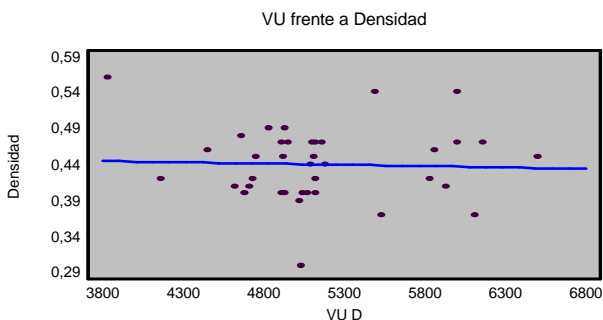


Figura 10- Recta de regresión VU-Densidad..

4. Conclusiones

Se ha podido comprobar mediante el ensayo de comparación de dos muestras, la reproducibilidad de las medidas que se realizan en madera con un equipo como el Ibertest Ultrasonic Tester E46, más adecuado para en el ensayo de hormigones, con las medidas obtenidas mediante la utilización de un equipo Sylvatest DUO, diseñado expresamente para éste fin.

Los primeros análisis estadísticos han puesto de manifiesto la elevada dispersión entre los valores de velocidad de transmisión de ultrasonidos cuando se utilizan métodos indirectos de propagación de onda (velocidad de transmisión transversal), por lo que los valores así obtenidos se han descartado de los experimentos de regresión y se han utilizado los valores obtenidos por medición directa (velocidad de transmisión longitudinal).

Considerando el Módulo de Elasticidad como variable dependiente y analizando su ajuste con la velocidad de transmisión de ultrasonidos, se observa que el coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo explica un 82% de la variabilidad en E. El coeficiente de correlación es de 0,91 lo que indica una relación relativamente fuerte entre las variables, con un nivel de significación del 99%. Por tanto, la velocidad de transmisión de ultrasonidos resulta ser, por sí sola, un buen predictor del Módulo de Elasticidad.

Considerando la tensión de rotura como variable dependiente y analizando su ajuste con la velocidad de transmisión de ultrasonidos, se observa que el coeficiente de determinación R^2 baja notablemente hasta valores en torno al 40%. El coeficiente de correlación, en este caso, es de 0,64 lo que indica una relación moderadamente fuerte entre las variables, con un nivel de significación del 99%.

La velocidad de transmisión de ultrasonidos no es un buen predictor de la densidad.

Los coeficientes de determinación obtenidos para la VU como predictora de la Tensión de Rotura a Flexión son del mismo orden que los que aparecen en la bibliografía como obtenidos por otros autores en piezas de mayor escuadría.

Los coeficientes de determinación obtenidos para la VU como predictora del Módulo de Elasticidad, se sitúan en el valor superior de la horquilla de valores (50% - 80%) que aparece en la bibliografía como obtenidos por otros autores en piezas de mayor escuadría.

El coeficiente de determinación para la VU como predictora de la densidad es incluso más bajo que la media de los valores que aparecen en la bibliografía como obtenidos por otros autores en piezas de mayor escuadría y que incluso con valores superiores de R^2 ha venido considerando la VU como mala predictora por sí sola de la densidad.

Agradecimientos.

Los autores agradecen la colaboración prestada por el profesor D. Francisco Arriaga Martitegui y su equipo colaborador, para la realización de ensayos con diferentes equipos de ultrasonidos en el Laboratorio de Industrias de la Madera de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid.

Los autores agradecen también al profesor D. Joaquín Santiago su aportación en la traducción a la lengua inglesa del Abstract.

Bibliografía.

ACUÑA, L.; DIEZ, M.R Y CASADO, M. *Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus pinaster Ait.* Boletín del CIDEU 2: 7-26 (2006). ISSN 1885-5237.

BEALL, F.C. 2002. *Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties.* Wood Science and Technology.

BUCUR, V. 1984. *Ondes Ultrasonores dans le Bois. Caracterisation mécanique et qualité de certaines essences de bois.* Thesis (Doctorat en Génie Mécanique) – Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint-Ouen, France.

GONZÁLEZ, M. N. 2010. "Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de protección de borde." *Tesis doctoral.* UPM.

HERMOSO, E. 2003. "Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.". *Tesis doctoral.* UPM.

HERNÁNDEZ, R; KOUBAA, A; BEAUDOIN, M.; FORTIN, Y. 1997. *Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones.* Wood and Fiber Science, vol 30, n 2. 1998.

HERZIG, L. 1992. *Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage.* M.Sc. Thesis (Génie Forestière), Faculté de Foresterie et de Géomatique, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Québec, Canada.

IÑIGUEZ, G. 2007. *Clasificación y evaluación mediante técnicas no destructivas de madera aserrada estructural de coníferas de gran escuadría.* Tesis doctoral. U.P.M.

MIER, R. 2001. *Clasificación de madera aserrada estructural mediante Inteligencia Artificial: Redes Neuronales.* Proyecto final de carrera. E.T.S. Ingenieros de Montes. U.P.M.

SANDOZ, J. L. 1989. *Grading of Construction timber by ultrasound.* Wood Science and Technology.