



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería de Montes

**Análisis comparativo de diferentes
métodos para la determinación de dureza
en maderas**

Alumno: de la Calle Grande, José Carlos

**Tutor/a: Acuña Rello, Luis
Cotutor/a: Spavento, Eleana**

Mayo de 2013

Copia para el tutor/a

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por haberme apoyado durante los largos años de universidad, sin ellos nunca hubiera sido posible llegar hasta aquí. A mi novia por haber sido mi mejor compañera de fatigas. A mis compañeros durante mis dos años de estancia en Palencia y de quién conservaré inolvidables recuerdos. A todos los amigos que me han apoyado en los momentos difíciles y que me hicieron olvidar las angustias de exámenes y entregas.

Agradecimiento especial a mi tutor Luis por haber estado siempre al pie del cañón y dispuesto para resolver las innumerables dudas que me surgieron durante la realización del proyecto.

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Introducción	5
2.2. Estructura de la madera	6
2.2.1. Estructura macroscópica de la madera.....	6
2.2.2. Estructura microscópica de la madera.....	7
2.3. Dureza	9
2.3.1. Dureza en maderas.....	9
2.3.2. Factores que influyen en la dureza de la madera.....	9
2.3.2.1. Densidad.....	9
2.3.2.2. Dirección de las fibras.....	10
2.3.2.3. Crecimiento del árbol.....	11
2.3.2.4. Parte del tronco.....	11
2.3.2.5. Especie.....	12
2.3.3. Ensayos de dureza en maderas.....	12
2.3.3.1. Ensayo Monnin o Chalais Meudon.....	13
2.3.3.2. Ensayo Janka.....	14
2.3.3.3. Ensayo Brinell.....	15
3. OBJETIVOS	17
3.1. Objetivo general	18
3.2. Objetivos específicos	18
4. MATERIAL Y MÉTODOS	19
4.1. Materiales empleados.....	20
4.1.1. Probetas de madera.....	20
4.1.1.1. Especies.....	20
4.1.1.2. Dimensiones.....	21
4.1.2. Equipo de trabajo.....	21
4.1.2.1. Máquina de corte.....	21
4.1.2.2. Calibre.....	21
4.1.2.3. Balanza.....	22
4.1.2.4. Estufa.....	22

4.1.2.5. Desecador	22
4.1.2.6. Máquina universal de ensayo.....	23
4.2. Metodología	23
4.2.1. Medición de las probetas.....	23
4.2.2. Determinación del peso en condiciones normales	24
4.2.3. Realización de los ensayos de dureza.....	24
4.2.3.1 Ensayo de dureza a fuerza constante 1kN.....	25
4.2.3.2 Ensayo de dureza a fuerza constante 2kN.....	26
4.2.3.3 Ensayo de dureza a penetración constante 2mm.....	26
4.2.4. Determinación de la humedad.....	26
4.3. Cálculo de propiedades físicas y mecánicas	27
4.3.1. Densidad	27
4.3.2. Humedad.....	27
4.3.3. Dureza.....	27
4.4. Tratamiento estadístico de los datos	29
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1. Análisis descriptivo	31
5.2. Análisis comparativo	34
5.2.1. Comparación entre especies	34
5.2.1.1. Ensayo Dureza 2mm	35
5.2.1.2. Ensayo Dureza 1kN	37
5.2.1.3. Ensayo Dureza 2kN	39
5.2.2. Comparación entre grupos taxonómicos.....	40
5.2.2.1. Ensayo Dureza 2mm	41
5.2.2.2. Ensayo Dureza 1kN	42
5.2.2.3. Ensayo Dureza 2kN	43
5.2.3. Comparación entre métodos de ensayo	45
5.3. Correlación entre métodos de ensayo	45
5.3.1. Dureza 2mm – Dureza 1kN.....	46
5.3.2. Dureza 2mm – Dureza 2kN.....	47
5.3.3. Dureza 1kN – Dureza 2kN	48
5.4. Análisis predictivo	50
5.4.1. Relación entre valores de dureza y densidad	50
5.4.1.1. Dureza 2mm y densidad	50
5.4.1.2. Dureza 1kN y densidad.....	51
5.4.1.3 Dureza 2kN y densidad.....	52

5.4.1.4. Sumario de resultados para las relaciones entre dureza y densidad.....	54
5.4.2. Relación entre valores de dureza con densidad y especie	54
5.4.2.1. Dureza 2mm con densidad y especie	54
5.4.2.2. Dureza 1kN con densidad y especie	55
5.4.2.3. Dureza 2kN con densidad y especie	55
5.4.2.4. Sumario de resultados para dureza con densidad y especie.....	56
6. CONCLUSIONES	57
7. BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEJO I. Estadística.....	63
I.1. Datos de los ensayos	64
I.1.1. Dimensiones de las probetas.....	64
I.1.2. Valores obtenidos en los ensayos	72
I.2 Comparación de modelos alternos	79
I.2.1. Comparación entre ensayos	80
I.2.1.1. Dureza 2mm – Dureza 1kN.....	80
I.2.1.2. Dureza 2mm – Dureza 2kN.....	80
I.2.1.3. Dureza 1kN – Dureza 2kN	81
I.2.2. Correlación dureza - densidad.....	82
I.2.2.1. Correlación dureza 2mm y densidad.....	82
I.2.2.2. Correlación dureza1kNm y densidad	83
I.2.2.3. Correlación dureza 2kN y densidad	84

1. RESUMEN

1. RESUMEN

Dentro de las numerosas propiedades físico-mecánicas de la madera, la dureza ha sido una de las que ha sido objeto de un menor número de estudios. Los valores de dureza que se pueden consultar en diferentes bibliografías presentan grandes diferencias entre sí. Esto se debe por una parte a la heterogeneidad de la madera como material, pero por otro lado a la diferencia existente entre los distintos tipos de ensayos y su baja fiabilidad a la hora de comparar valores correspondientes a distintos rangos de magnitudes.

En este estudio se trata de ampliar los conocimientos sobre las similitudes y diferencias que puedan existir entre distintos tipos de ensayos. Nos centraremos en analizar la relación entre ensayos de dureza a penetración constante y ensayos de dureza a fuerza constante. También se analizará la influencia de la densidad sobre el valor de dureza, y su variación entre los diferentes grupos taxonómicos.

A pesar de utilizar el mismo indentador o cabezal que en el ensayo Monnin (cilindro 30mm diámetro), se trabajó tanto a fuerza constante como a penetración constante. Por tanto podríamos decir que el ensayo a penetración constante que se realizó, es una combinación del ensayo Monnin con otros como Janka o Brinell que trabajan a penetración constante y miden la fuerza ejercida, ya que se utiliza el indentador característico del primero pero midiendo parámetros propios de los otros dos.

Se realizaron un total de 980 mediciones sobre 320 probetas de 16 especies distintas, intentando abarcar un rango de densidades lo más amplio posible. En cada una de las probetas se realizaron tres ensayos:

- Dureza a penetración constante 2mm
- Dureza a fuerza constante 1kN
- Dureza a fuerza constante 2kN

Una vez obtenidos los valores, se realizó un análisis estadístico para determinar: diferencias y similitudes entre los valores obtenidos para cada ensayo, diferencias entre coníferas y frondosas, correlaciones entre ensayos y, por último, la relación existente entre los valores de densidad y dureza, incluyendo en uno de estos análisis la especie como factor categórico.

Los resultados revelan que los valores obtenidos en el ensayo a penetración constante proporcionan valores muy por encima de los obtenidos en los otros dos ensayos. Para los ensayos a fuerza constante, los valores son más próximos pero con diferencias claras entre ellos, siendo mayores en el caso de la dureza 2kN.

A pesar de esta diferencia de magnitudes se puede afirmar que existe una buena correlación entre ellos, presentando una regresión lineal entre los ensayos a fuerza constante y mejorándose claramente esta regresión con curvas logarítmicas entre éstos y el ensayo a penetración constante.

En cuanto a la comparación entre grupos taxonómicos se puede afirmar que no existe similitud entre los valores obtenidos para coníferas y frondosas.

Para la relación entre densidad y dureza se obtienen valores aceptables para los tres ensayos, siendo el ensayo a penetración constante el que presenta un mayor valor R-cuadrado con un 90,96%.

La inclusión de la especie como factor categórico mejora considerablemente las relaciones existentes entre densidad y dureza, lo cual confirma que para igualdad de densidades, el factor especie tiene una clara influencia en el valor de dureza.

2. ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

2.1. Introducción

Desde hace miles de años la madera ha sido empleada para una gran variedad de usos, muchos de ellos relacionados con la construcción y la fabricación de todo tipo de objetos. En sus primeras aplicaciones, la madera fue empleada sin demasiada elaboración a parte del descortezado y moldeado para adecuarlas a las dimensiones requeridas para su uso.

Con el paso del tiempo, la madera fue adquiriendo un papel fundamental en el desarrollo de las civilizaciones. La aparición de la tecnología permitió una elaboración más compleja de la madera adecuándola a los distintos usos para los que era requerida. Así pues aparecieron todo tipo de instrumentos específicos como sierras, tornos, lijas, etc. que permitían obtener un producto de mejor acabado.

Además de estos instrumentos y su posterior conversión en maquinaria automatizada, comenzaron a aparecer nuevos tratamientos físico-químicos que permitieron la creación de nuevos materiales derivados de la madera como tableros contrachapados, tableros de fibras, pasta de papel, etc. Estos tratamientos también permitieron la utilización de madera maciza bajo condiciones de uso que generaban su deterioro y pérdida de cualidades como la presencia de agentes bióticos, presencia de humedad o incendios.

En el ámbito de la construcción, la madera maciza ha jugado siempre un papel fundamental. A pesar de ello, una de las limitaciones más importantes a destacar es en relación al tamaño de las piezas, ya que este depende a su vez del tamaño del árbol del que se obtienen. Para compensar esta desventaja surge la madera laminada, que debido a los avances relacionados en materia de productos adhesivos permite obtener piezas compactas de gran tamaño sin perder sus propiedades resistentes. De esta manera se pueden crear grandes estructuras sin contar con el factor limitante del tamaño de las piezas.

La creación de estas grandes estructuras lleva consigo la instalación de puntos de unión entre las diferentes piezas que la conforman. Estas uniones se realizan por distintos métodos, siendo los más utilizados los pernos o tornillos metálicos de ensamblaje que proporcionan estabilidad a la estructura. La fiabilidad de este tipo de anclaje guarda una relación directa con la dureza de los materiales sobre los que son instalados, ya que es en estos puntos de contacto donde se producen las mayores tensiones sobre la superficie de la madera.

Dentro de las diferentes propiedades resistentes de la madera como pueden ser la resistencia a la flexión, resistencia a tracción, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, etc., la dureza ha sido una sobre las que menor número de ensayos se han llevado a cabo.

En este estudio trataremos de establecer cuáles son los métodos que ofrecen una mayor precisión para la medición de esta cualidad así como la relación real existente entre la densidad de la madera y su dureza.

2.2. Estructura de la madera

Para la comprensión del concepto de dureza y sus mediciones, es necesario tener en cuenta algunos aspectos relacionados con la estructura de la madera, tanto a nivel macroscópico como microscópico.

La madera es un material que procede de la estructura vital de un ser vivo, por lo tanto, surge como consecuencia de la disposición de sus células de una manera más o menos ordenada para crear los tejidos que permitan la realización de sus funciones vitales.

La formación de esta estructura dependiendo de las distintas partes del material, tiene como consecuencia una heterogeneidad que no es común para otros materiales estructurales con distinta procedencia como acero u hormigón. Esta característica de la madera debe ser tenida en cuenta en los diferentes estudios que se realicen para determinar sus propiedades ya que influirá de manera importante en los resultados obtenidos.

2.2.1. Estructura macroscópica de la madera

El tronco de un árbol presenta distintas partes que pueden diferenciarse a simple vista observando su sección transversal (Figura 2.1).

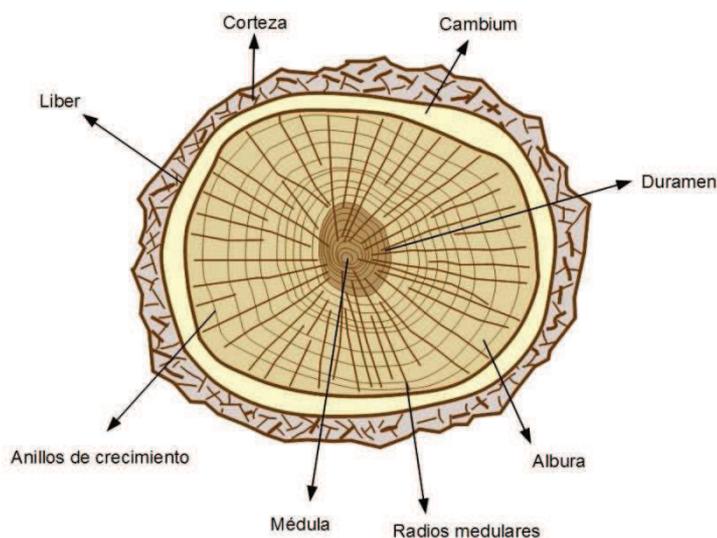


Figura 2.1 Sección transversal del tronco de un árbol

Corteza: es la parte externa del tronco. Tiene como objeto proteger las partes internas del contacto con el exterior evitando el contacto con agentes bióticos.

Líber: situado entre la albura y la corteza. Contiene unos conductos llamados tubos cribosos por los que se transporta la savia.

Cambium: es una zona cuya finalidad es el crecimiento diametral del tronco. Produce el líber hacia la parte exterior y leño hacia el interior.

Albura: es la madera más externa del tronco, justo bajo la corteza. Es tejido biológicamente activo (madera viva) cuya función es la conducción de agua de las raíces al follaje. Es de color más claro que el duramen y es muy susceptible al ataque de hongos y de insectos.

Duramen: Es la madera que encuentra ocupando prácticamente toda la porción central del tronco y ramas de un árbol. Está compuesto por células biológicamente muertas cuya única función es proporcionar al tronco del árbol una estructura interna fuerte y resistente con la cual poder sostener todo el peso de las ramas y la copa en general. Es mucho más duro, pesado y resistente que la albura, y más resistente al ataque de hongos e insectos. Popularmente al duramen se le conoce como el "corazón" de la madera. (Mundoforestal 2013)

Médula: Parte central del tronco. Constituida por tejido flojo y poroso. De ella parten radios medulares hacia la periferia.

Anillos de crecimiento: son marcas que dejan de manifiesto la diferente composición de la madera en función del tipo de crecimiento. A las partes más claras se las denomina anillos de primavera y a las más oscuras anillos de otoño.

2.2.2. Estructura microscópica de la madera

El análisis microscópico de la estructura de la madera, se puede expresar como un conjunto de células tubulares acopladas cuya función es la formación de tejidos para el transporte de nutrientes a lo largo de la planta.

Tanto en las maderas de coníferas como en las de frondosas podemos distinguir dos tipos fundamentales de tejidos.

Prosenquimatosos: son tejidos formados por células alargadas, fusiformes o filiformes, firmemente unidos por sus extremos puntiagudos, de membranas engrosadas en mayor o menor grado, sin que existan en ellas contenido protoplásmico o muy poco.

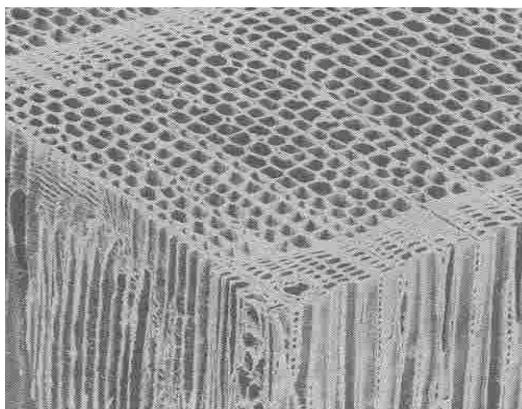


Figura 2.2. Tejidos prosenquimatosos (INIA 2013)

Parenquimatosos: son tejidos formados por células más o menos isodiamétricas de membranas sutiles, no lignificadas, con protoplasma parietal.

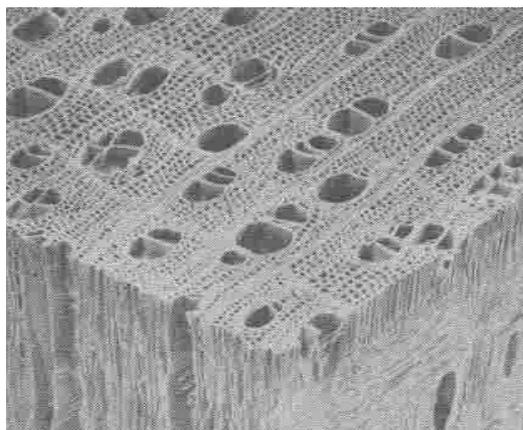


Figura 2.3. Tejidos parenquimatosos (INIA 2013)

Aunque tanto las frondosas como las coníferas estén formadas por estos dos tipos de tejidos, existen diferencias entre ambas desde el punto de vista microscópico:

Tabla 2.1. Diferencias entre tejidos en coníferas y frondosas (INIA 2013)

	TEJIDOS	CONÍFERAS	FRONDOSAS
ELEMENTOS LONGITUDINALES.	Prosenquimatosos	Traqueidas Normales Traqueidas resinosas. Traqueidas en cadena	Vasos Traqueidas vasculares. Traqueidas vasicéntricas. Fibrotraqueidas Fibras libriformes.
	Parenquimatosos	Parénquima longitudinal Células epiteliales de los canales resiníferos longitudinales.	Parénquima de células fusiformes. Parénquima de células septadas. Células epiteliales secretoras que rodean los canales.
ELEMENTOS TRANSVERSALES	Prosenquimatosos	Traqueidas radiales.	No existen.
	Parenquimatosos	Células de parénquima de los radios leñosos. Células epiteliales de los canales resiníferos Transversales	Células de parénquima de los radios leñosos.

2.3. Dureza

La dureza es una propiedad usada comúnmente; da una indicación general de la resistencia del material y de su resistencia al rayado y al desgaste. De manera más específica, la dureza por lo general se especifica como la resistencia a la indentación o presión permanente. Por lo que, por ejemplo, el acero es más duro que el aluminio, y el aluminio es más duro que el plomo. La dureza no es, sin embargo, una propiedad fundamental, dado que la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador y de la carga aplicada (Kalpakjian et. al. 2002).

2.3.1. Dureza en maderas

A diferencia de otros materiales como el acero o el hormigón, la madera no es un material homogéneo, sino que se compone de una serie de elementos estructurales derivados de su procedencia orgánica que tiene como resultado la anisotropía de este material. Debido a este hecho los valores obtenidos para sus características físico-mecánicas varían en función de las condiciones en las que se realicen las mediciones.

En cuanto a su clasificación, la más aceptada actualmente se corresponde con la recogida en la norma UNE 56.540 “Características físico mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de ensayo”, que diferencia entre los valores para los principales grupos taxonómicos: coníferas y frondosas. Esta clasificación queda reflejada en las Tablas 2.2 y 2.3 que se muestran a continuación.

Tabla 2.2. Clasificación según dureza para especies de coníferas (Guindeo 1997)

Dureza (1/mm)	Clasificación
1-2	Blandas
2-4	Semiduras
4-20	Duras

Tabla 2.3. Clasificación según dureza para especies de frondosas (Guindeo 1997)

Dureza (1/mm)	Clasificación
0,2-1,5	Muy blandas
1,5-3	Blandas
3-6	Semiduras
6-9	Duras
9-20	Muy duras

2.3.2. Factores que influyen en la dureza de la madera

2.3.2.1. Densidad

La densidad es un índice de calidad de la madera que influye de forma muy directa en casi la totalidad de características físicas y mecánicas y, por tanto, es muy importante su conocimiento. Por ejemplo, una disminución en la dureza superficial y en la fuerza de compresión está relacionada con el grado de pérdida de densidad (Gunduz et. al. 2009).

Böthig (2001) estudió la relación entre la densidad y la dureza superficial de la madera a través del método Janka de *Eucalyptus grandis*.

Schwab E. (1990), estudió la dureza Brinell y la densidad para especies de frondosas con densidad entre 0,58 y 1,04 gr/cm³.

De manera general, estos estudios así como otros realizados hasta la fecha sobre la relación existente entre la dureza y la densidad revelan que existe una relación lineal entre estas dos variables.

Sin embargo en ocasiones los rangos de densidades se limitan a una misma especie o a grupos de especies con rangos relativamente reducidos. En nuestro caso trataremos de analizar cómo se comporta esta relación entre especies con un mayor rango de densidades, abarcando valores desde los 0,32 gr/cm³ de *Sequoia sempervirens* (Secuoya) hasta los 1,01 gr/cm³ de *Hymenaea courbaril* (Jatoba), y contando con la representación de especies de los principales grupos taxonómicos: coníferas y frondosas.

2.3.2.2. Dirección de las fibras

Para el cálculo de las propiedades físico-mecánicas en maderas podemos definir tres direcciones de aplicación de estas fuerzas según su dirección respecto a las fibras de la madera: radial, tangencial y longitudinal o axial.

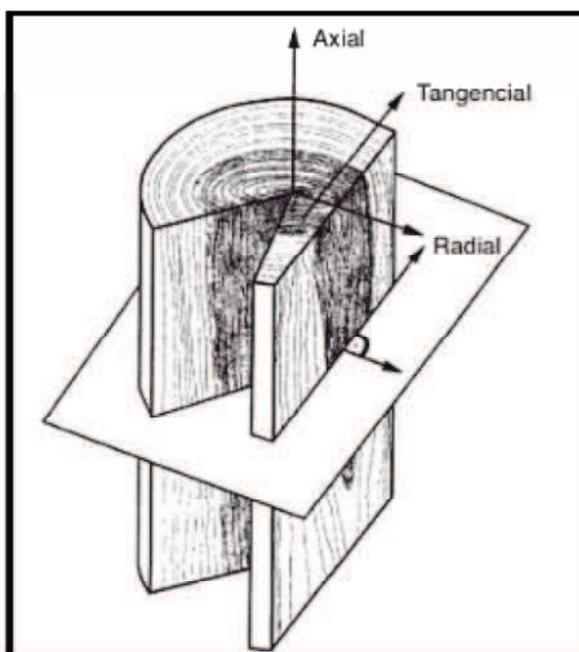


Figura 2.4 Direcciones de la madera (Vignote 2006)

Para el caso específico de la dureza solo nos interesa saber si esta dirección es paralela o perpendicular a la fibra. En estudios anteriores de dureza se ha comprobado que su valor es mayor en el caso de la aplicación de fuerzas en sentido paralelo a la fibra, por tanto los ensayos son realizados en la medida de lo posible en esta dirección y en caso de existir una combinación entre sentido paralelo y tangencial hablaremos de dirección “mixta” (Figuras 2.5 y 2.6).



Figura 2.5. Dirección paralela a la fibra



Figura 2.6. Dirección mixta

2.3.2.3. Crecimiento del árbol

Por regla general, se ha comprobado que las especies de crecimiento lento producen una madera de mayor dureza que las especies de crecimiento rápido.

2.3.2.4. Parte del tronco

La parte central y más antigua del árbol, el duramen, es habitualmente más duro que la parte exterior del árbol, la albura, debido, esencialmente, a los compuestos de duraminización que impregnan esta zona del tronco (Larrea 2012).

Los anillos de crecimiento también influyen en la medición de la dureza. Como norma general se puede afirmar que la dureza medida sobre la zona correspondiente al crecimiento de primavera presenta valores de dureza mayores que los obtenidos en la zona de crecimiento de otoño.

Una aplicación en el conocimiento de la dureza es el resistógrafo que registra la fuerza necesaria de penetración en el tronco de un árbol. Se pueden comprobar distintas franjas que indican la diferencia de dureza para la situación de los anillos de crecimiento (Figura 2.7).

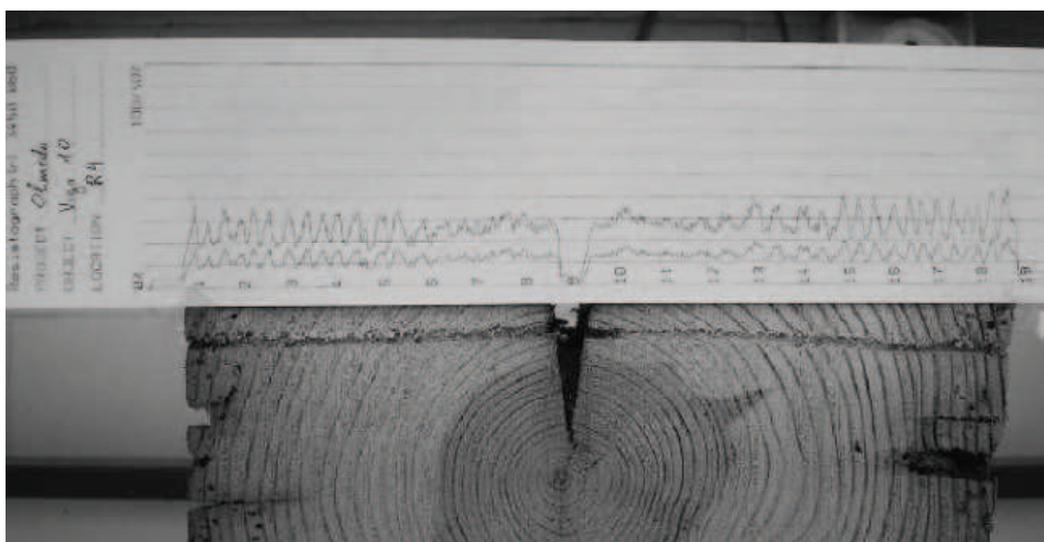


Figura 2.7. Prueba de dureza mediante resistógrafo (Acuña *et al.* 2011)

En la figura anterior se pueden observar los diferentes cambios de dureza coincidiendo con la variación entre los crecimientos de primavera y verano. Por este motivo, resulta de vital importancia que los ensayos de dureza se realicen sobre una misma superficie en la medida de lo posible, de lo contrario podemos encontrar diferencias significativas entre los valores obtenidos para cada una de las superficies.

2.3.2.5. Especie

Además de los factores enunciados anteriormente, existe una relación entre la dureza y las distintas especies de madera. Si bien, en gran parte, esta relación se debe a las diferencias existentes entre algunos de los factores citados en apartados anteriores como la densidad o el crecimiento.

Tabla 2.4. Dureza de algunas de las especies objeto de estudio (Guindeo 1997)

ID	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	TIPO	DUREZA (mm ⁻¹)	CLASIFICACION
1	<i>Peltogyne</i> spp.	Amaranto	F	7,5	DURA
2	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	Bubinga	F	8,2-8,5	DURA
4	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	Secuoya	C	1,1	BLANDA
6	<i>Lovoa trichilioides</i> Harms	Embero	F	2,6-2,8	BLANDA
7	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Pino silvestre	C	2,0	SEMIDURA
8	<i>Picea abies</i> L.	Abeto europeo	C	1,2-1,6	SEMIDURA
9	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	Sipo	F	3,0-3,3	SEMIDURA
11	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	Abeto de Douglas	C	2,2	SEMIDURA
13	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	Taly	F	8,5-(10)	MUY DURA
15	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatoba	F	8,0	DURA
16	<i>Larix decidua</i> Miller	Alerce	C	2,2-3,2	SEMIDURA

Como referencia, se pueden observar en la Tabla 2.4 los valores de dureza obtenidos en otros ensayos para algunas de las especies que utilizaremos a partir del método “Chalais-Meudon” o “Monnin” y siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE 56.534 “Características físico mecánicas de la madera. Determinación de la dureza” en mm⁻¹ (Guindeo 1997)

La clasificación que se observa en la Tabla 2.4 corresponde a la clasificación reflejada en la norma UNE 56.540 540 “Características físico mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de ensayo”

2.3.3. Ensayos de dureza en maderas

Debido a la diferencia de dureza entre los distintos materiales, existen una gran variedad de ensayos de dureza. Estos ensayos pueden agruparse básicamente en tres grupos: por rayado, por penetración, y por rebote. En el caso de la madera el ensayo más recomendado es el ensayo por penetración. Dentro de este grupo existen diferentes ensayos dependiendo de la forma del indentador (cabezal de contacto) y valores empleados para las mediciones. Algunos de ellos son: Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop, Janka, Monnin o Chalais Meudon.

En la siguiente tabla se exponen las características de algunos de los métodos más utilizados para la medición de dureza en maderas, así como los indentadores utilizados para la medición y el parámetro a medir.

Tabla 2.5. Métodos para la determinación de dureza (Holmberg 2000)

MÉTODO	FORMA DEL IDENTADOR							ÁREA	FUERZA
	Bola	Cilindro	Cuña	Prisma	Cono	Clavo	Aguja		
Brinell	X							X	
Janka	X								X
Stamer	X								X
Krippel	X							X	
Monnin		X						X	
Hoeffgen				X					X
Büsgen						X			X
Hoppler					X			X	
Doyle Walker			X					X	
Meyer Wegelin							X		X

Como podemos ver en la tabla anterior los distintos métodos pueden dividirse en dos grupos, los que miden el área de contacto del indentador con la superficie de la madera (puede obtenerse de manera indirecta a partir de la penetración) y los que miden la fuerza necesaria para realizar una penetración determinada.

En cuanto al indentador utilizado podemos observar que la bola de acero es la más utilizada. No obstante para nuestro estudio utilizaremos un cilindro tal y como explica la norma UNE 56-534-77. El método utilizado será el de Monnin realizando una ampliación del mismo para medir también la fuerza para una penetración constante.

2.3.3.1 Ensayo Monnin o Chalais Meudon

En España la dureza de la madera se mide conforme a la norma UNE 56.534 según el método Monnin o también llamado Chalais-Meudon, por el que se aplica una carga de 100 Kp (1kN) por centímetro de anchura de la probeta, a través de un cilindro de acero de 30 mm de diámetro. En la siguiente figura se observa el esquema simple del ensayo de dureza Monnin (Vignote 2006).

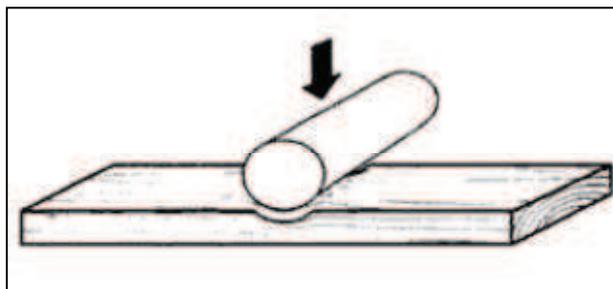


Figura 2.8. Ensayo de dureza de Ensayo Monnin o Chalais Meudon (Vignote 2006)

Además del ensayo de Monnin, los ensayos para la determinación de la dureza en maderas más utilizados son el ensayo Janka y Brinell los cuales se detallan a continuación.

2.3.3.2 Ensayo Janka

Es el método adoptado por la norma estadounidense D143-83 "Standard methods of testing. Small clear specimens of timber". Consiste en determinar la fuerza necesaria para hacer penetrar en la madera una esfera de acero hasta su plano diametral, con un diámetro de 11,28 mm. Se utilizan probetas de 50x50x150cm. En este ensayo la dureza se expresa en unidades de fuerza (libras, Newtons o kilopondios).

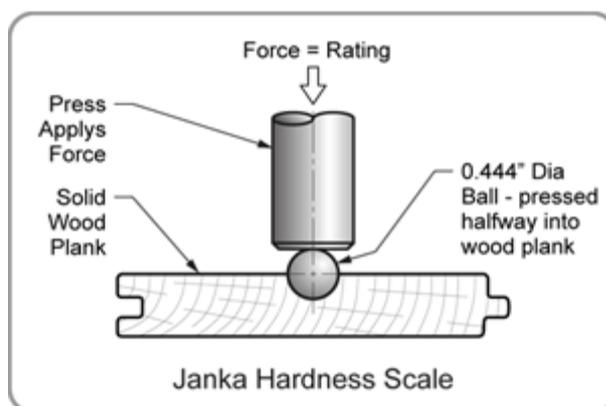


Figura 2.9. Ensayo de dureza Janka (Ua Floors 2013)

Existe una cierta correlación entre la dureza de Janka y Monnin que permite una aproximación para traducir valores de ambos métodos. A partir de la correlación de valores de 44 especies de frondosas, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,89 con la siguiente recta de regresión (Guindeo 1997).

$$\text{Dureza Monnin (1/mm)} = 0,1448 + 0,002897 * \text{Dureza Janka (libras)}$$

De la misma forma pero aplicado a 9 especies de frondosas se obtuvo un coeficiente de correlación igual a 0,87 con la siguiente recta de regresión.

$$\text{Dureza Monnin (1/mm)} = -0,634 + 0,003899 * \text{Dureza Janka (libras)}$$

La escala de valores para la dureza Janka se puede observar en la Tabla 2.6

Tabla 2.6. Escala de valores para dureza Janka (Vignote 2006)

Clasificación	Dureza Janka
Muy blanda	< 150
Blanda	150 -350
Semidura	350-650
Dura	650-900
Muy dura	> 900

2.3.3.3 Ensayo Brinell

Este método consiste en aplicar una fuerza determinada en la superficie de la madera a través de una esfera de acero (10mm de diámetro) evaluando la dureza como la relación entre la fuerza y la superficie del casquete esférico que se introduce en la madera (kp/mm²). La carga ejercida es normalmente de 50kp (10kp si la madera es muy blanda y 10kp si es muy dura)

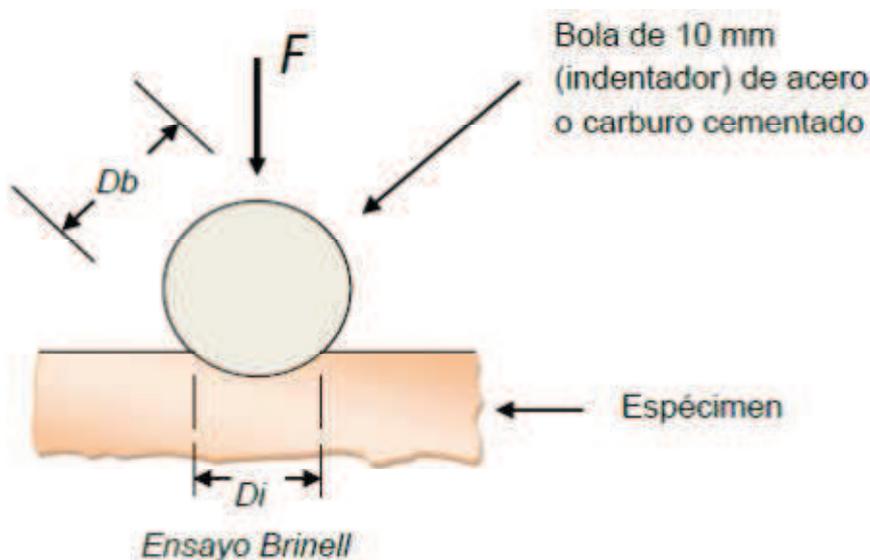


Figura 2.10. Ensayo de dureza Brinell (Larrea 2012)

Uno de los inconvenientes de este método es la aplicación de cargas diferentes, por lo que no son comparables directamente los resultados entre especies de distinta dureza. Además, el diámetro de la bola es muy reducido, lo cual genera resultados muy distintos según la penetración se realice sobre madera de primavera o de verano.

La escala de durezas para este ensayo su puede observar en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Escala de valores para dureza Brinell (Vignote 2006)

Clasificación	Dureza Brinell (kp/mm ²)
Muy blanda	< 1
Blanda	1-2
Semidura	2-4
Dura	4-8
Muy dura	> 8

Sin embargo se han encontrado correlaciones entre la dureza Brinell y Monnin a partir de funciones parabólicas, sin embargo la correlación para especies de dureza superior a 8,0 (Monnin) se hace aleatoria (Vignote 2006).

Tabla 2.8. Escala de valores para dureza Brinell (Vignote 2006)

Clasificación	Dureza Brinell (kp/mm ²)
Muy blanda	< 1
Blanda	1-2
Semidura	2-4
Dura	4-8
Muy dura	> 8

3. OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

Dentro de los objetivos de este proyecto podemos diferenciar los siguientes:

3.1. Objetivo general

El objetivo general del proyecto será analizar los valores de dureza obtenidos para los diferentes ensayos existentes que se pueden emplear con la madera.

3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos podemos clasificarlos según se detalla a continuación:

1. Comparación de los valores obtenidos para distintos tipos de ensayos (fuerza constante: 1kN y 2kN, y penetración constante 2mm) sobre las mismas probetas en distintas especies de maderas.
2. Análisis de la influencia de la densidad en la dureza de la madera.
3. Comparación de los resultados para los diferentes grupos taxonómicos: coníferas y frondosas.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Materiales empleados

Para llevar a cabo los ensayos podemos diferenciar entre materiales objeto de estudio (probetas de madera) y equipo o elementos de trabajo.

4.1.1. Probetas de madera

4.1.1.1. Especies

Para este estudio se ha contado con un total de 16 especies entre las cuales se ha intentado que exista un rango de densidades lo más amplio posible ya que esta será una de las variables que queremos analizar. También se intenta contar con una representación de los principales grupos taxonómicos, con un total de 10 especies de frondosas y 6 de coníferas.

Las especies con las cuales se llevará a cabo el estudio se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla 4.1. Selección de especies para el estudio

ID	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	TIPO
1	<i>Peltogyne</i> spp.	Amaranto	F
2	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	Bubinga	F
3	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	Arce	F
4	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	Secuoya	C
5	<i>Nothofagus pumilio</i> P.	Lenga	F
6	<i>Lovoa trichiiloides</i> Harms	Embero	F
7	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Pino silvestre	C
8	<i>Picea abies</i> L.	Abeto rojo	C
9	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	Sipo	F
10	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Acacia	F
11	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	Pino de Oregón	C
12	<i>Amburana cearensis</i> A.	Cerejeira	F
13	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	Taly	F
14	<i>Pinus taeda</i> L.	Pino tea	C
15	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatoba	F
16	<i>Larix decidua</i> Miller	Alerce	C

4.1.1.2. Dimensiones

Para cada una de las especies citadas en el apartado anterior se han empleado 20 probetas cuyas dimensiones se muestran en la figura 4.1.

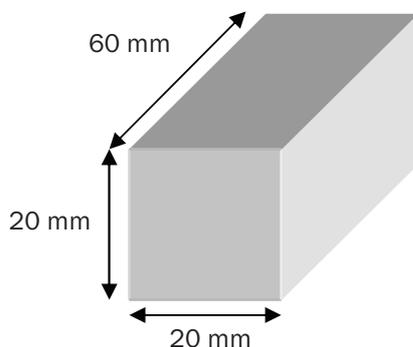


Figura 4.1. Dimensiones de las probetas empleadas

Estas dimensiones son orientativas, ya que debido a las imperfecciones producidas durante el proceso de dimensionado con la sierra de banda, las medidas finales varían ligeramente respecto a estos valores.

4.1.2. Equipo de trabajo

Para la realización de las distintas mediciones, así como para el acondicionamiento de las probetas se han empleado distintos elementos que se detallan a continuación por orden de utilización.

4.1.2.1. Máquina de corte

Para el dimensionado de cada una de las probetas se ha utilizado la sierra de banda ubicada en la carpintería del laboratorio de maderas.

4.1.2.2. Calibre

Debido a las imperfecciones durante los procesos de corte en carpintería es necesario realizar la medición de cada una de las piezas con el fin de conocer sus dimensiones exactas. Para ello hemos utilizado un calibre de precisión $\pm 0,05$ mm.



Figura 4.2. Calibre para medición de probetas

4.1.2.3. Balanza

Para determinar el peso de cada una de las probetas se ha empleado una balanza digital de precisión $\pm 0,0001$ g. El peso se medirá antes y después del secado con el fin de determinar el contenido en humedad de la madera.



Figura 4.3. Balanza de precisión (Larrea 2012)

4.1.2.4. Estufa

Para obtener el contenido en humedad de las probetas es necesario eliminar la humedad después de la primera pesada con el fin de obtener el peso anhidro.



Figura 4.4. Estufa (Larrea 2012)

4.1.2.5. Desecador

Permite que las probetas no recuperen la humedad una vez extraídas de la estufa.

4.1.2.6. Máquina universal de ensayo

Para la realización de los diferentes ensayos de dureza en cada una de las probetas se ha empleado una máquina universal de ensayo modelo ELIB-100W de la marca IBERTEST (Figura 4.5).



Figura 4.5. Máquina universal de ensayos IBERTEST ELIB-100W

Esta máquina permite realizar numerosos tipos de ensayo para la determinación de distintas propiedades físico-mecánicas de la madera. La configuración y resultados se muestran en un ordenador al que se encuentra conectada.

Para nuestro caso emplearemos ciclos de compresión y utilizaremos un cabezal compuesto por un cilindro de acero de 30 mm de diámetro.

4.2. Metodología

4.2.1. Medición de las probetas

Una vez obtenidas las probetas y estabilizadas a temperatura ambiente se procede a la medición mediante el calibre de anchura, altura y longitud de cada una de ellas.



Figura 4.6. Medición de las probetas

4.2.2. Determinación del peso en condiciones normales

A continuación pesamos cada una de las probetas con la balanza. Este valor junto con las dimensiones obtenidas en el apartado anterior nos permite obtener el valor de densidad en condiciones normales. (12% humedad equilibrio higroscópico).

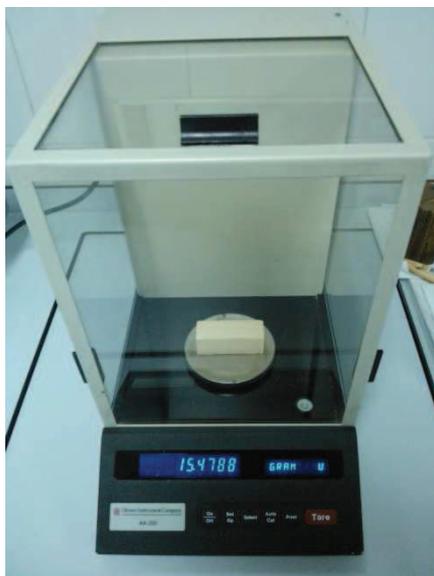


Figura 4.7. Pesado de las probetas

4.2.3. Realización de los ensayos de dureza

En cada una de las piezas se realizarán los diferentes ensayos sobre la misma cara con una separación aproximada de 2 cm (Figura 4.8).



Figura 4.8. Puntos de realización de los ensayos

Para cada uno de los puntos previstos, se realiza un ensayo de compresión en función del tipo de ensayo que estemos realizando. Para ello colocaremos cada una de las piezas en la máquina y el cabezal cilíndrico (indentador) aplicará la fuerza necesaria para la realización de los diferentes ensayos, obteniendo en el ordenador los resultados que nos permitirán obtener los valores de dureza para cada probeta (Figura 4.8).

Estos ensayos constarán de dos fases. La primera fase comienza cuando el cabezal entra en contacto con la superficie de la probeta, a partir de este momento

comienza a aplicarse la fuerza requerida para cada uno de los ensayos. La segunda fase comienza cuando finaliza el tiempo previsto para alcanzar la fuerza o penetración requerida en cada ensayo. Esta última fase tiene como objetivo la estabilización de la superficie de la probeta después de la aplicación de la fuerza.



Figura 4.9. Colocación de las probetas para los ensayos.

A continuación se detallan cada uno de los ensayos realizados para la determinación de la dureza.

4.2.3.1 Ensayo de dureza a fuerza constante 1kN

Este ensayo consiste en la aplicación de fuerza constante 1kN sobre la superficie de la probeta con el fin de determinar la deformación obteniendo el valor en mm. Los parámetros utilizados para este ensayo se detallan en la siguiente gráfica.

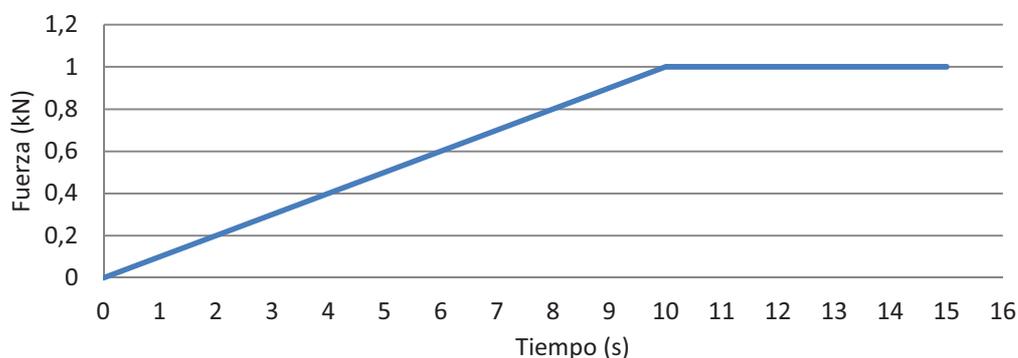


Figura 4.10. Ensayo a fuerza constante 1kN

4.2.3.2 Ensayo de dureza a fuerza constante 2kN

Este ensayo consiste en la aplicación de fuerza constante 2kN sobre la superficie de la probeta con el fin de determinar la deformación obteniendo el valor en mm. Los parámetros utilizados para este ensayo se detallan en la siguiente tabla gráfica.

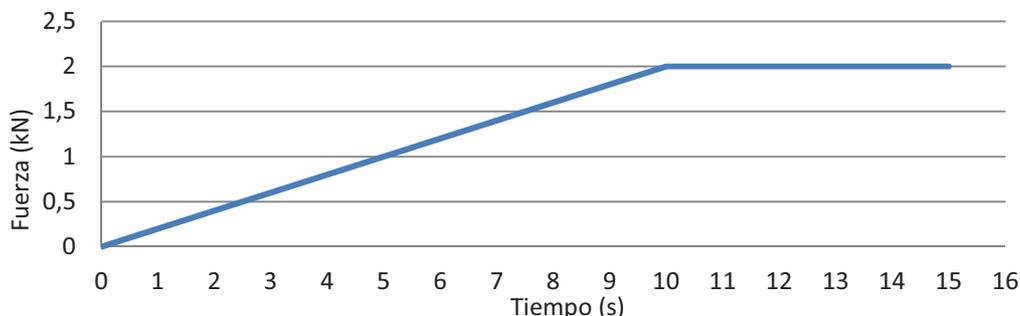


Figura 4.11. Ensayo a fuerza constante 2kN

4.2.3.3 Ensayo de dureza a penetración constante 2mm

A diferencia de los ensayos anteriores, en este caso aplicaremos una fuerza sobre la superficie que irá aumentando hasta conseguir una penetración de 2 mm. Los parámetros utilizados para este ensayo se detallan en la siguiente gráfica.

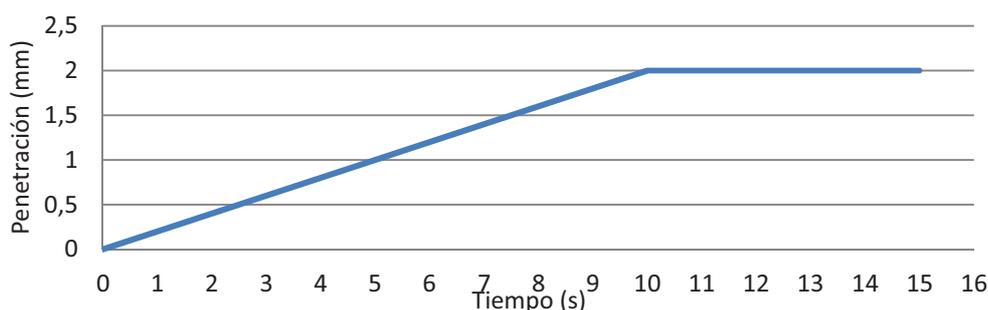


Figura 4.12. Ensayo a fuerza constante 2mm

4.2.4. Determinación de la humedad

Una vez realizados los diferentes ensayos de dureza procedemos al secado de las probetas. En nuestro caso hemos elegido al azar una probeta de cada una de las 20 que utilizamos para cada especie. Estas probetas se mantuvieron en el interior de la estufa a una temperatura de 103°C durante un periodo de 24 horas tras los cuales se pesaron hasta que dos pesadas consecutivas difiriesen en menos de 1/200 de la primera de las pesadas, tal y como indica la norma UNE 56-529-77 para determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro.

Una vez extraídas de la estufa se procede al pesado en seco de las probetas elegidas con el fin de determinar su peso anhidro. Este valor junto con el peso en condiciones normales, nos permitirá conocer el contenido en humedad de las probetas durante el ensayo. En nuestro caso, el contenido de humedad al que se realizaron los ensayos fue del 8,5%.

4.3. Cálculo de propiedades físicas y mecánicas

4.3.1. Densidad

Como se ha comentado anteriormente, para el cálculo de la densidad en condiciones normales, se han empleado los valores obtenidos de la medición de altura, anchura y longitud de cada probeta, con los cuales obtenemos el volumen, y sus pesos correspondientes. Así pues, el cálculo de la densidad queda determinado por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{P}{A \cdot B \cdot C} = \frac{P}{V}$$

Donde:

D = densidad (g/cm³)
A = altura (cm)
B = anchura (cm)
C = longitud (cm)
P = peso (g)
V = volumen (cm³)

4.3.2. Humedad

El cálculo de la humedad se ha realizado atendiendo a la norma UNE...Este valor nos permite conocer las condiciones exactas de humedad a las que se ha realizado el ensayo. Para ello calculamos los valores de humedad obtenidos en cada especie mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o} \cdot 100$$

Donde:

H = contenido en humedad de la probeta
P_h = peso en condiciones normales (g)
P_o = peso anhidro (g)

4.3.3. Dureza

La ecuación que determina la dureza de un material es la siguiente:

$$D_u = \frac{F}{S}$$

Donde:

D_u = dureza (kN/cm²)
F = fuerza (kN)
S = superficie (cm²)

El valor de la superficie de la huella se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S = L \cdot B$$

Donde:

S = superficie (cm²)

L = longitud del arco de circunferencia marcado (cm)

B = base de la probeta

Conocida la penetración producida en el ensayo, que será variable para el caso de los ensayos a fuerza constante y fija en el ensayo de penetración constante, y el diámetro del cilindro del cabezal (ambos valores nos los proporciona la máquina de ensayo), podemos mediante cálculos trigonométricos obtener la longitud del arco.

Para la obtención de la longitud del arco, debemos calcular previamente el ángulo α que la determina. Este ángulo se obtiene por la relación existente entre la longitud X que puede observarse en la Figura 3.9 y el radio de la circunferencia.

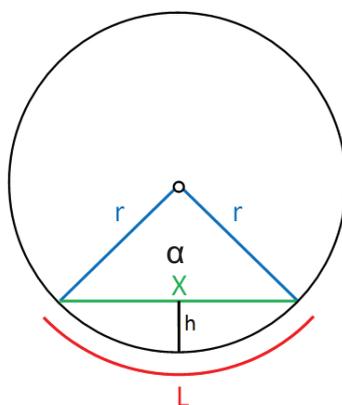


Figura 4.13. Parámetros para el cálculo de L

Siendo el valor $r = 15\text{mm}$, y conociendo el valor h (mm) podemos determinar el valor de X mediante la siguiente ecuación:

$$X = 2 \sqrt{(15^2) - (15 - h)^2}$$

Una vez hemos obtenido el valor X, podemos calcular el ángulo α mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{2X}{3}$$

Por tanto:

$$L = \frac{2\pi r \alpha}{3}$$

4.4. Tratamiento estadístico de los datos

En primer lugar se recogieron los datos en tablas que más tarde se digitalizaron mediante el software "Excel 2007". Este programa nos permite manejar los datos y disponerlos de la forma correcta.

A continuación se pasaron estas tablas al software "STATGRAPHICS CENTURIÓN XV versión 15.2.06" que nos permite realizar una gran variedad de análisis estadísticos.

Una vez introducidos los datos en el programa, se realizó un resumen estadístico con el fin de describir los valores medios de las variables a analizar.

A continuación se procedió al análisis comparativo. En primer lugar mediante comparación de los valores obtenidos por especie para los distintos tipos de ensayo. Este proceso se repite comparando entre tipos de especie: frondosas y coníferas.

Una vez realizado el análisis comparativo se procedió a realizar la correlación entre distintos tipos de ensayo con el fin de interpretar las diferencias y similitudes existentes entre ellos. Para ello se utilizaron regresiones simples.

Después se realizó el análisis predictivo que consta de dos partes. En primer lugar realizó una regresión simple con la finalidad de obtener las relaciones existentes entre la dureza y la densidad en cada uno de los ensayos. Por último se realizó un modelo lineal generalizado para cada uno de los ensayos incluyendo, además de la densidad, la especie como factor categórico y de esta manera comprobar si existe dependencia de la especie para los cálculos de dureza.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis descriptivo

A continuación se detallan los resultados para cada una de las variables objeto de estudio. Los variables que vamos a analizar serán por un lado la densidad de cada una de las especies, y por otro los distintos valores obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorio. Por tanto las variables a analizar serán:

- Densidad (g/cm³)
- Dureza por penetración constante 2mm (kN/cm²)
- Dureza por fuerza constante 1kN (kN/cm²)
- Dureza por fuerza constante 2kN (kN/cm²)

Las tablas que se muestran a continuación representan los siguientes valores para cada una de las variables: media, coeficiente de variación (CV), máximo (Max), mínimo (Min) y número de muestras (n) para cada especie. En primer lugar se analizan los valores de densidad.

Tabla 5.1. Análisis de los valores de densidad

ID	TIPO	NOMBRE	Densidad (g/cm ³)				
			Media	CV %	Min	Max	n
1	F	<i>Peltogyne</i> spp.	0,79903	2,45%	0,75928	0,85297	20
2	F	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	0,90099	1,58%	0,87432	0,92392	20
3	F	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	0,76163	1,22%	0,74426	0,77706	20
4	C	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	0,32935	5,27%	0,31028	0,38437	20
5	F	<i>Nothofagus pumilio</i> P.	0,48542	8,46%	0,41982	0,52886	20
6	F	<i>Lovoa trichioides</i> Harms	0,48374	3,13%	0,46158	0,50998	20
7	C	<i>Pinus sylvestris</i> L.	0,57755	2,59%	0,56042	0,6088	20
8	C	<i>Picea abies</i> L.	0,40997	4,73%	0,38343	0,4493	20
9	F	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	0,56994	2,17%	0,55077	0,59006	20
10	F	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0,71424	3,22%	0,65116	0,75044	20
11	C	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	0,48555	1,50%	0,46419	0,49524	20
12	F	<i>Amburana cearensis</i> A.	0,68101	5,13%	0,63095	0,73495	20
13	F	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	0,95827	2,49%	0,88678	0,98856	20
14	C	<i>Pinus taeda</i> L.	0,54530	8,13%	0,46356	0,6369	20
15	F	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	1,01424	4,31%	0,94395	1,1026	20
16	C	<i>Larix decidua</i> Miller	0,52927	8,24%	0,46167	0,63891	20

Como se puede observar en la Tabla 5.1, los valores medios de densidad oscilan entre los 0,33 g/cm³ de la secuoya (4) y los 1,01 g/cm³ de la jatoba (15). En cuanto a los coeficientes de variación para la densidad dentro de cada especie podemos destacar las especies alerce (16), lenga (5) y pino tea (14), todos ellos con valores superiores al 8% y con una diferencia considerable al resto de especies que presentan valores inferiores al 5%.

A continuación pasamos a analizar las tablas correspondientes a los valores de dureza obtenidos en los diferentes ensayos.

Debido a un fallo en la célula de carga para la especie 1 (*Peltogyne* spp.) durante los ensayos de dureza a fuerza constante de 1kN y 2kN se prescinde de estos resultados a efectos de cálculo para los siguientes apartados.

Tabla 5.2. Análisis de los valores de Dureza 2mm

ID	TIPO	NOMBRE	Dureza 2mm				
			Media	CV %	Min	Max	n
1	F	<i>Peltogyne</i> spp.	2,44670	12,05%	2,0074	2,9663	20
2	F	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	3,15046	5,78%	2,7967	3,3875	20
3	F	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	2,21515	9,74%	1,8056	2,7725	20
4	C	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	0,57583	13,00%	0,4566	0,6921	20
5	F	<i>Nothofagus pumilio</i> P.	0,84821	12,99%	0,6465	1,0779	20
6	F	<i>Lovoa trichiloides</i> Harms	1,00805	11,67%	0,7649	1,2428	20
7	C	<i>Pinus sylvestris</i> L.	1,25574	18,90%	0,8804	1,8175	14
8	C	<i>Picea abies</i> L.	0,76679	11,67%	0,6416	0,9188	20
9	F	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	1,22245	8,10%	1,0482	1,3864	20
10	F	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	2,26177	10,28%	1,9809	2,7414	20
11	C	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	1,08384	27,89%	0,5954	1,7017	20
12	F	<i>Amburana cearensis</i> A.	1,82014	8,55%	1,5951	2,1994	20
13	F	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	3,22487	10,66%	2,5596	3,7319	20
14	C	<i>Pinus taeda</i> L.	1,34732	21,23%	0,9006	1,881	20
15	F	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	4,34968	10,87%	3,4028	5,144	20
16	C	<i>Larix decidua</i> Miller	0,91463	30,73%	0,6068	1,6079	20

Observando los valores de la Tabla 5.2, podemos destacar en primer lugar la jatoba (15) como especie que muestra una mayor dureza con 4,34 kN/cm² muy por encima del resto de especies. En cuanto a los coeficientes de variación los valores oscilan entre 5,78% en bubinga (2) y 30,73% en el alerce (16).

Tabla 5.3. Análisis de los valores de Dureza 1kN

ID	TIPO	NOMBRE	Dureza 1kN (kN/cm ²)				
			Media	CV %	Min	Max	n
2	F	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	0,80376	10,39%	0,6486	0,9659	20
3	F	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	0,71768	13,55%	0,5791	0,8595	20
4	C	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	0,47314	9,96%	0,413	0,5691	20
5	F	<i>Nothofagus pumilio</i> P.	0,56037	9,61%	0,4789	0,7026	20

Tabla 5.3. Análisis de los valores de Dureza 1kN (Cont.)

6	F	<i>Lovoa trichioides</i> Harms	0,62091	10,43%	0,4259	0,6923	20
7	C	<i>Pinus sylvestris</i> L.	0,69307	8,81%	0,5681	0,8059	20
8	C	<i>Picea abies</i> L.	0,50454	10,82%	0,408	0,6333	20
9	F	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	0,62572	12,54%	0,5256	0,7549	20
10	F	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0,84496	10,31%	0,6838	1,0584	20
11	C	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	0,67769	16,64%	0,4779	0,8402	20
12	F	<i>Amburana cearensis</i> A.	0,70743	12,15%	0,5331	0,8678	20
13	F	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	0,88834	12,72%	0,6885	1,1183	20
14	C	<i>Pinus taeda</i> L.	0,62805	16,00%	0,4603	0,8629	20
15	F	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	0,92488	10,41%	0,7644	1,0764	20
16	C	<i>Larix decidua</i> Miller	0,58471	15,82%	0,4428	0,782	20

Para el ensayo de dureza con fuerza constante 1kN, observamos que ninguna de las especies muestra valores por encima de 1kN/cm². La especie que presenta una mayor dureza es la jatoba (15) con un valor de 0,93 kN/cm², muy por debajo del valor obtenido para el caso de la dureza obtenida en el ensayo a penetración constante 2mm. En cuanto a los coeficientes de variación, los valores oscilan entre 16,64% para el pino de Oregón (11) y 6,02 del amaranto (1).

Tabla 5.4. Análisis de los valores de Dureza 2kN

ID	TIPO	NOMBRE	Dureza 2kN (kN/cm ²)				
			Media	CV %	Min	Max	n
2	F	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	1,27012	9,83%	1,0454	1,4704	20
3	F	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	1,09509	10,47%	0,9178	1,2813	20
4	C	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	0,43580	32,42%	0,2458	0,746	20
5	F	<i>Nothofagus pumilio</i> P.	0,68841	12,17%	0,5477	0,8208	20
6	F	<i>Lovoa trichioides</i> Harms	0,80203	7,38%	0,6341	0,913	20
7	C	<i>Pinus sylvestris</i> L.	0,88653	10,42%	0,7087	1,0719	20
8	C	<i>Picea abies</i> L.	0,62005	8,79%	0,5365	0,7183	20
9	F	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	0,86616	8,47%	0,7623	1,0065	20
10	F	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	1,25854	7,37%	1,0552	1,4754	20
11	C	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	0,86642	20,70%	0,4346	1,1364	20
12	F	<i>Amburana cearensis</i> A.	1,07218	8,18%	0,9182	1,275	20
13	F	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	1,35926	11,84%	1,0463	1,6339	20
14	C	<i>Pinus taeda</i> L.	0,91473	14,77%	0,7186	1,2496	20
15	F	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	1,42128	8,75%	1,1637	1,5999	20
16	C	<i>Larix decidua</i> Miller	0,69400	24,53%	0,4564	1,0142	20

Para el ensayo de dureza a fuerza constante 2kN, observamos que la madera que presenta una mayor dureza es la jatoba (15), con un valor de 1,42 kN/cm². Los coeficientes de variación oscilan entre el 32,42% de la secuoya (4) y el 7,37% de la acacia (10).

De manera general y a la vista de los resultados obtenidos en las diferentes mediciones de dureza, podemos destacar varios aspectos que se visualizan mejor en el siguiente gráfico.

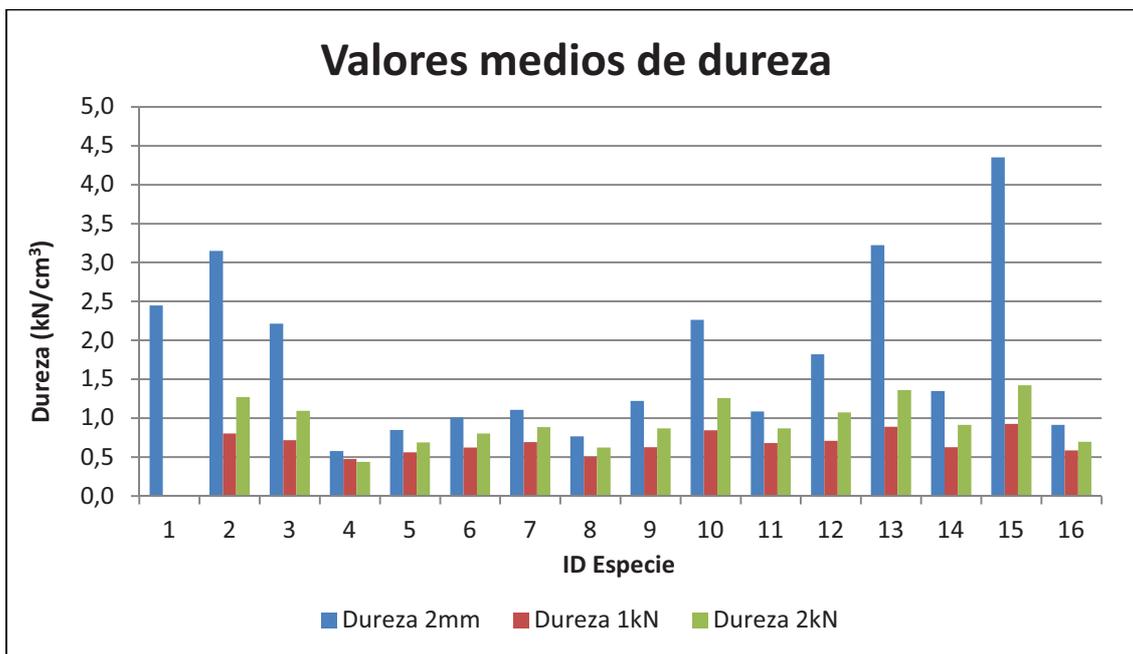


Figura 5.1. Valores medios de dureza para las distintas especies

Observando la gráfica anterior (Figura 5.1) podemos observar que existe una relación clara entre los valores obtenidos en los diferentes ensayos. Para el caso del ensayo de 2mm los valores son claramente más elevados que para los otros dos, siendo mayores los valores en el caso de la dureza 2kN y la dureza 1kN.

A pesar de esta diferencia podemos apreciar a la vista de la Figura 5.1 que a excepción de la especie 4 los valores para el ensayo Dureza 2mm son mayores que para el ensayo Dureza 2kN y estos a su vez mayores que para el ensayo Dureza 1kN, lo cual puede dar indicios de una buena correlación entre los distintos tipos de ensayo.

5.2. Análisis comparativo

5.2.1. Comparación entre especies

En este apartado trataremos por separado cada uno de los ensayos realizados para el cálculo de la variable dureza y estudiaremos como varían estos valores entre las diferentes especies.

El primer paso que debemos realizar en cada uno de los ensayos es efectuar una prueba de homocedasticidad. Mediante estas pruebas comprobaremos si las poblaciones que utilizamos para realizar el análisis ANOVA cumplen las exigencias de: independencia, normalidad e igualdad de varianzas exigidas por él.

De los tres supuestos anteriores, aceptados los dos primeros, utilizaremos el Test de Levene para determinar la hipótesis de igualdad de varianzas; mediante este test obtendremos el P-valor que determina la relación existente entre las varianzas de

las distintas especies. En caso de obtener un P-valor superior a 0,05 diremos que se trata de una hipótesis nula, y por tanto podemos afirmar que las varianzas de las distintas especies son iguales entre sí. En caso contrario hablaríamos de hipótesis alternativa y supondremos que las varianzas son distintas entre sí.

Una vez realizado el test tendremos dos casos posibles: verificación de varianzas positiva, en cuyo caso realizaremos un análisis de varianzas ANOVA atendiendo a los valores medios, y verificación de varianzas negativa, en cuyo caso realizaremos un análisis Kruskal-Wallis atendiendo a los valores de medianas.

5.2.1.1. Ensayo Dureza 2mm

Tabla 5.5. Prueba de Levene para los valores de Dureza 2mm

	Prueba	P-valor
Levene	6,89771	0,0

El P-valor para la prueba de Levene es claramente inferior a 0,05 por tanto no podemos afirmar que se trate de un conjunto poblacional de varianza homogénea.

Así pues, el análisis a realizar para la variable dureza 2mm será Kruskal-Wallis el cual se detalla a continuación.

Tabla 5.6. Prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 2mm

Nº	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	20	233,45
2	20	273,05
3	20	217,7
4	20	13,2
5	20	62,75
6	20	95,35
7	14	133,571
8	20	46,5
9	20	134,65
10	20	220,75
11	20	102,65
12	20	184,6
13	20	275,1
14	20	142,35
15	20	304,0
16	20	73,15

Estadístico = 291,249 P-valor = 0,0

La prueba de Kruskal-Wallis indica que existen diferencias significativas entre las distintas especies.

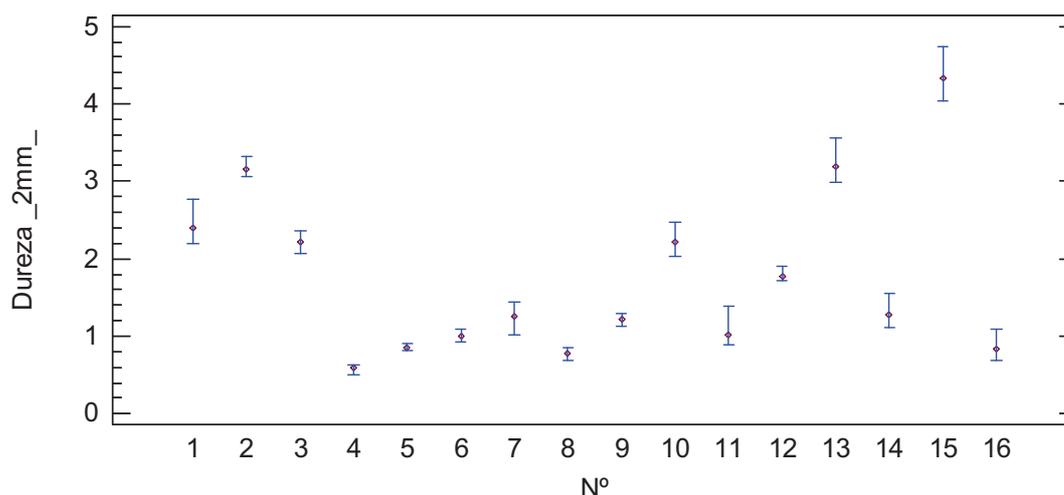


Figura 5.2. Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza para Dureza 2mm

En el gráfico anterior pueden observarse los valores de las medianas para cada una de las especies.

A continuación se detalla el análisis de rangos múltiples. Esta prueba representa el nivel de homogeneidad existente entre los valores de dureza para cada una de las especies. Esta prueba se realiza mediante el test LSD (Least Significant Difference) de Fisher.

Tabla 5.7. Prueba de rangos múltiples para Dureza 2mm

Nº	Casos	Media	Grupos Homogéneos
8	20	0,57583	X
12	20	0,766785	X
9	20	0,84821	X
20	20	0,91463	XX
10	20	1,00805	XX
15	20	1,08384	XX
13	20	1,22245	XX
11	14	1,25574	X
18	20	1,34732	X
16	20	1,82014	X
7	20	2,21515	X
14	20	2,26177	X
3	20	2,44669	X
6	20	3,15046	X
17	20	3,22487	X
19	20	4,34968	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

La interpretación de este test se basa en la superposición de las marcas “X” en la columna de grupos homogéneos. Una superposición en las marcas “X” implica una igualdad estadística entre los grupos.

Atendiendo a la tabla de la prueba de rangos múltiples podemos observar que existen diferencias significativas entre la mayoría de las especies, además existen varias especies cuyos valores no guardan relación alguna con los de otras especies.

5.2.1.2. Ensayo Dureza 1kN

Tabla 5.8. Prueba de Levene para los valores de Dureza 1kN

	Prueba	P-valor
Levene	2,42612	0,00312423

El P-valor para la prueba de Levene es claramente inferior a 0,05 por tanto no podemos afirmar que se trate de un conjunto muestral de varianza homogénea.

Así pues, el análisis a realizar para la variable dureza 1kN será Kruskal-Wallis el cual se detalla a continuación.

Tabla 5.9. Prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 1kN

Nº	Tamaño Muestra	Rango Promedio
2	20	226,2
3	20	178,2
4	20	26,175
5	20	75,675
6	20	118,075
7	20	164,975
8	20	42,2
9	20	119,3
10	20	243,875
11	20	152,775
12	20	172,4
13	20	255,65
14	20	120,475
15	20	269,75
16	20	91,775

Estadístico = 213,549 P-valor = 0,0

La prueba de Kruskal-Wallis indica que existen diferencias significativas entre las distintas especies.

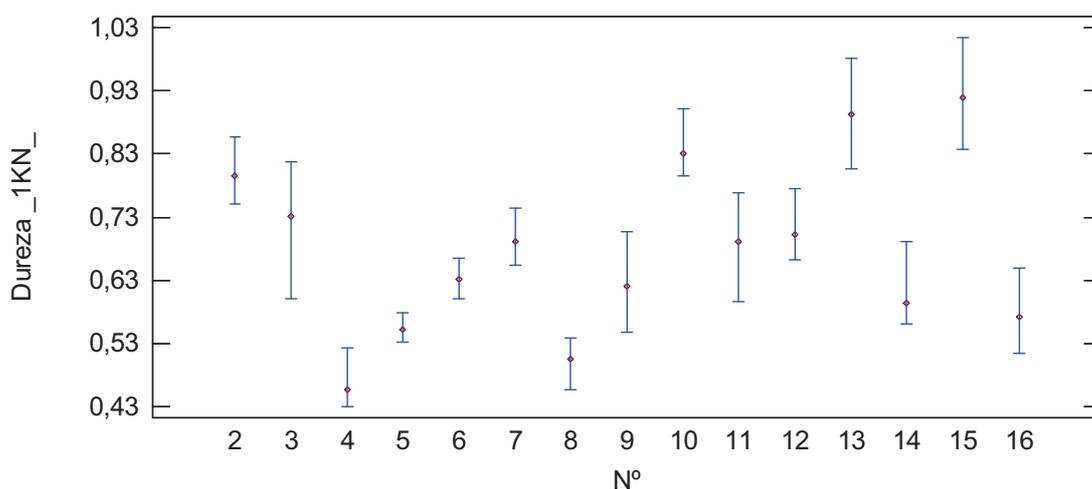


Figura 5.3. Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza para Dureza 1kN

En el gráfico anterior pueden observarse los valores de las medianas para cada una de las especies.

A continuación pasamos a analizar la prueba de rangos múltiples:

Tabla 5.10. Prueba de rangos múltiples para Dureza 1kN

Nº	Casos	Media	Grupos Homogéneos
4	20	0,473135	X
8	20	0,50454	X
5	20	0,56037	X
16	20	0,58471	XX
6	20	0,620905	X
9	20	0,62572	XX
14	20	0,62805	XX
11	20	0,677685	XX
7	20	0,693065	X
12	20	0,70743	X
3	20	0,71768	X
2	20	0,80376	X
10	20	0,84496	XX
13	20	0,88834	XX
15	20	0,924875	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

Atendiendo a la prueba de rangos múltiples podemos destacar que en este caso existe una gran disparidad en el conjunto poblacional.

5.2.1.3. Ensayo Dureza 2kN

Tabla 5.11. Prueba de Levene para los valores de Dureza 2kN

	Prueba	P-valor
Levene	3,40637	0,0000406839

El P-valor para la prueba de Levene es claramente inferior a 0,05 por tanto no podemos afirmar que se trate de un conjunto muestral de varianza homogénea.

Así pues, el análisis a realizar para la variable dureza 2kN será Kruskal-Wallis el cual se detalla a continuación.

Tabla 5.12. Prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 2kN

Nº	Tamaño Muestra	Rango Promedio
2	20	245,125
3	20	201,675
4	20	18,5
5	20	61,8
6	20	102,25
7	20	135,7
8	20	42,775
9	20	128,475
10	20	243,35
11	20	128,6
12	20	196,375
13	20	262,075
14	20	142,975
15	20	275,175
16	20	72,65

Estadístico = 257,321 P-valor = 0,0

La prueba de Kruskal-Wallis indica que existen diferencias significativas entre las distintas especies.

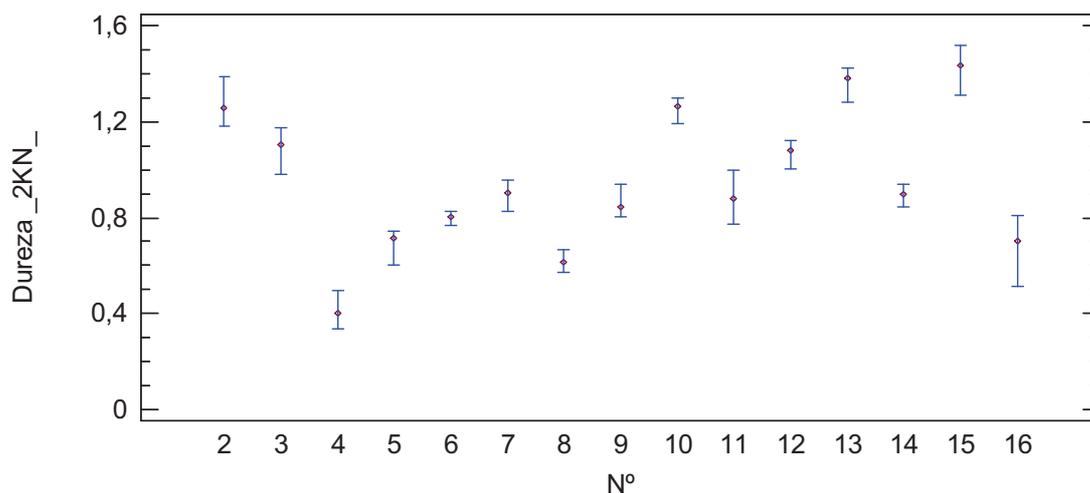


Figura 5.4. Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza para Dureza 2kN

A continuación se detalla el análisis de rangos múltiples para dureza 2kN mediante el test de LSD.

Tabla 5.13. Prueba de rangos múltiples para Dureza 2kN

Nº	Casos	Media	Grupos Homogéneos
4	20	0,4358	X
8	20	0,62005	X
5	20	0,688405	X
16	20	0,693995	X
6	20	0,80203	X
9	20	0,866155	XX
11	20	0,86642	XX
7	20	0,88653	X
14	20	0,91473	X
12	20	1,07218	X
3	20	1,09509	X
10	20	1,25854	X
2	20	1,27012	X
13	20	1,35926	X
15	20	1,42128	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

En este ensayo existe una gran variabilidad entre las distintas especies, aunque si existe una cierta relación con los valores obtenidos para el ensayo de dureza 1kN.

5.2.2. Comparación entre grupos taxonómicos

A continuación se analizan los resultados obtenidos para la comparación de los dos grupos taxonómicos: coníferas (C) y frondosas (F). Las especies incluidas en cada grupo quedan reflejadas en la siguiente tabla.

Tabla 5.14. Relación de especies por grupos taxonómicos

Nº	ESPECIE	TIPO
1	<i>Peltogyne</i> spp.	F
2	<i>Guibourtia demeusei</i> J. Léonard	F
3	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	F
4	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl	C
5	<i>Nothofagus pumilio</i> P.	F
6	<i>Lovoa trichiiloides</i> Harms	F
7	<i>Pinus sylvestris</i> L.	C
8	<i>Picea abies</i> L.	C
9	<i>Entandrophragma candollei</i> Harms	F
10	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	F
11	<i>Pseudotsuga menziessi</i> Franco	C
12	<i>Amburana cearensis</i> A.	F
13	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	F
14	<i>Pinus taeda</i> L.	C
15	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	F
16	<i>Larix decidua</i> Miller	C

Del total de 16 especies que componen el ensayo, 6 pertenecen al grupo de frondosas (F) y 10 al grupo de coníferas (C).

5.2.2.1. Ensayo Dureza 2mm

Los resultados del ensayo de Dureza 2mm se analizan a continuación.

Tabla 5.15. Prueba de Levene para los valores de Dureza 2mm

	Prueba	P-valor
Levene	87,3979	0,0

El P-valor para la prueba de Levene es claramente inferior a 0,05 por tanto no podemos afirmar que se trate de un conjunto poblacional de varianza homogénea.

Así pues, el análisis a realizar para la variable dureza 2mm será Kruskal-Wallis el cual se detalla a continuación.

Tabla 5.16. Prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 2mm

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
C	114	82,693
F	200	200,14

Estadístico = 121,515 P-valor = 0,0

El P-valor para la prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 2mm revela que no existe una relación entre la varianza de los distintos grupos.

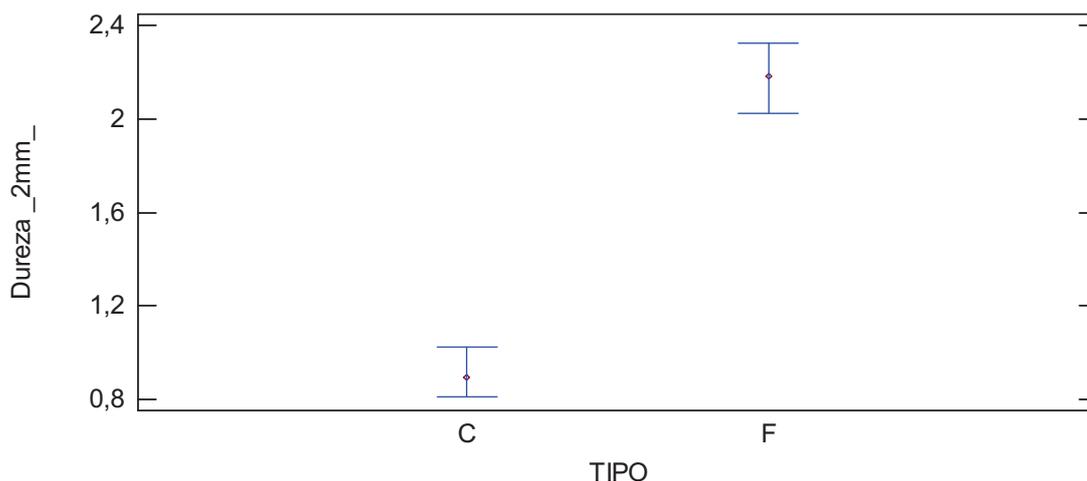


Figura 5.5. Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza para Dureza 2mm

Como vemos en el gráfico de medianas, los valores de coníferas son muy inferiores a los valores de las frondosas, no existiendo una similitud entre ellos.

En la siguiente tabla se expresan los resultados de manera gráfica mediante la prueba de rangos múltiples.

Tabla 5.17. Prueba de rangos múltiples para Dureza 2mm por tipo

TIPO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C	114	0,976739	X
F	200	2,25475	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

En la prueba de rangos múltiples podemos apreciar que no existe homogeneidad entre los valores correspondientes a los distintos grupos taxonómicos.

5.2.2.2. Ensayo Dureza 1kN

Los resultados del ensayo de Dureza 1kN se analizan a continuación.

Tabla 5.18. Prueba de Levene para los valores de Dureza 1kN

	Prueba	P-valor
Levene	8,8171	0,00322668

El P-valor para la prueba de Levene es claramente inferior a 0,05 por tanto no podemos afirmar que se trate de un conjunto muestral de varianza homogénea.

Así pues, el análisis a realizar para la variable dureza 1kN será Kruskal-Wallis el cual se detalla a continuación.

Tabla 5.19. Prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 1kN

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
C	120	99,7292
F	180	184,347

Estadístico = 68,5101 P-valor = 0,0

P-valor para la prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 1kN revela que no existe una relación entre la varianza de los distintos grupos.

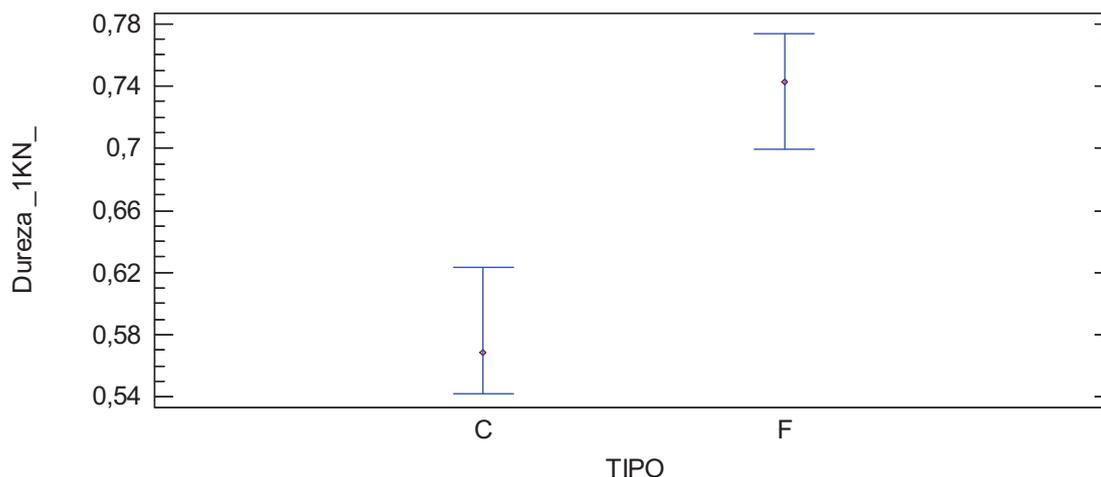


Figura 5.6. Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza para Dureza 1kN

En este caso observamos que existe una clara diferencia entre los valores obtenidos para los dos grupos de especies.

En la siguiente tabla se expresan los resultados de manera gráfica mediante la prueba de rangos múltiples.

Tabla 5.20. Prueba de rangos múltiples para Dureza 1kN por tipo

TIPO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C	120	0,593531	X
F	180	0,743782	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

En la prueba de rangos múltiples podemos apreciar que no existe homogeneidad entre los valores correspondientes a los distintos grupos taxonómicos.

5.2.2.3. Ensayo Dureza 2kN

Los resultados del ensayo de Dureza 2kN se analizan a continuación.

Tabla 5.21. Prueba de Levene para los valores de Dureza 2kN

	Prueba	P-valor
Levene	8,75017	0,0033437

El P-valor para la prueba de Levene es claramente inferior a 0,05 por tanto no podemos afirmar que se trate de un conjunto muestral de varianza homogénea.

Así pues, el análisis a realizar para la variable dureza 2kN será Kruskal-Wallis el cual se detalla a continuación.

Tabla 5.22. Prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 2kN

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
C	120	90,2
F	180	190,7

Estadístico = 96,6406 P-valor = 0,0

P-valor para la prueba de Kruskal-Wallis para Dureza 2kN revela que no existe una relación entre la varianza de los distintos grupos.

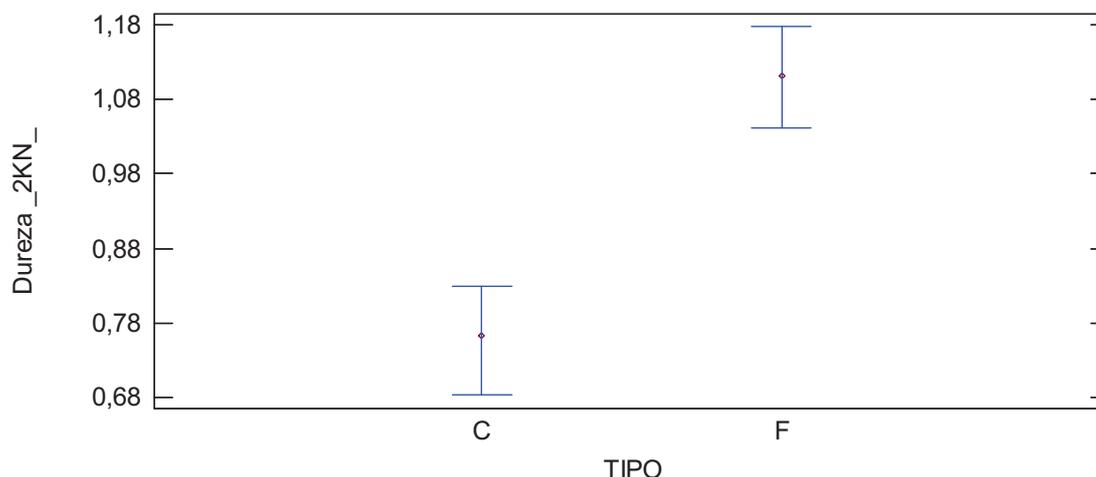


Figura 5.7. Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza para Dureza 2kN

Podemos observar en el gráfico anterior como los valores de las medianas para el caso del ensayo de dureza 2kN son claramente distintos, cabiendo destacar que existe una diferencia entre grupos similar al caso del ensayo de dureza 1kN.

En la siguiente tabla se expresan los resultados de manera gráfica mediante la prueba de rangos múltiples.

Tabla 5.23. Prueba de rangos múltiples para Dureza 2kN por tipo

TIPO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C	120	0,736254	X
F	180	1,09256	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

Como se puede comprobar en la tabla anterior, no existe homogeneidad entre los valores de los distintos grupos.

5.2.3. Comparación entre métodos de ensayo

Se van a realizar comparaciones entre métodos de ensayo para las tres posibles combinaciones:

- Dureza 2mm – Dureza 1kN
- Dureza 2mm – Dureza 2kN
- Dureza 1kN – Dureza 2kN

El análisis de los valores obtenidos para las distintas combinaciones de ensayos se realizará por el método comparativo de muestras pareadas. Este método consiste en la estimación media de los valores de diferencia existentes para los dos métodos.

Los resultados para este método pueden observarse en la siguiente tabla.

Tabla 5.24. Intervalos de confianza del 95% para las comparaciones entre los distintos ensayos

	2mm-1kN	2mm-2kN	1kN-2kN
Intervalos de confianza del 95,0% para la media	[0,9518; 1,1748]	[0,6990; 0,8911]	[-0,2858; -0,2469]
Intervalos de confianza del 95,0% para la desviación estándar	[0,8990; 1,0573]	[0,7743; 0,9106]	[0,1582; 1,857]

Para afirmar que existe igualdad entre los valores obtenidos en ambos ensayos, los valores inferior y superior para los intervalos de confianza del 95% de la media deben contener el valor 0 entre su rango.

Podemos comprobar por tanto que para ninguna de las combinaciones posibles entre ensayos existe igualdad entre los valores de dureza obtenidos.

Así pues para la comparación entre los ensayos 2mm y 1kN podemos afirmar que el ensayo 2mm proporciona valores de dureza muy superiores a los del ensayo 1kN.

Para la comparación entre los ensayos 2mm y 2kN podemos afirmar que el ensayo 2mm proporciona valores de dureza muy superiores al ensayo 2kN aunque en este caso la diferencia no es tan significativa como en el caso anterior.

Por último para la comparación entre el ensayo 1kN y 2kN se observa que el rango de valores del ensayo 1kN se encuentra por debajo de los valores obtenidos en el ensayo 2kN, sin embargo la diferencia de magnitudes entre estos dos ensayos es mucho menor que en los casos anteriores.

5.3. Correlación entre métodos de ensayo

En este apartado vamos a establecer relaciones entre los valores obtenidos en los distintos ensayos de dureza. Para ello analizaremos las distintas relaciones:

- Dureza 2mm – Dureza 1kN
- Dureza 2mm – Dureza 2kN
- Dureza 1kN – Dureza 2kN

Mediante el análisis de las regresiones simples entre los distintos ensayos obtendremos datos relevantes sobre las similitudes y diferencias más significativas.

5.3.1. Dureza 2mm – Dureza 1kN

En primer lugar analizaremos la relación existente entre el ensayo de Dureza 2mm con el ensayo de dureza 1kN. En el siguiente gráfico se muestra la recta de regresión que relaciona estos dos ensayos.

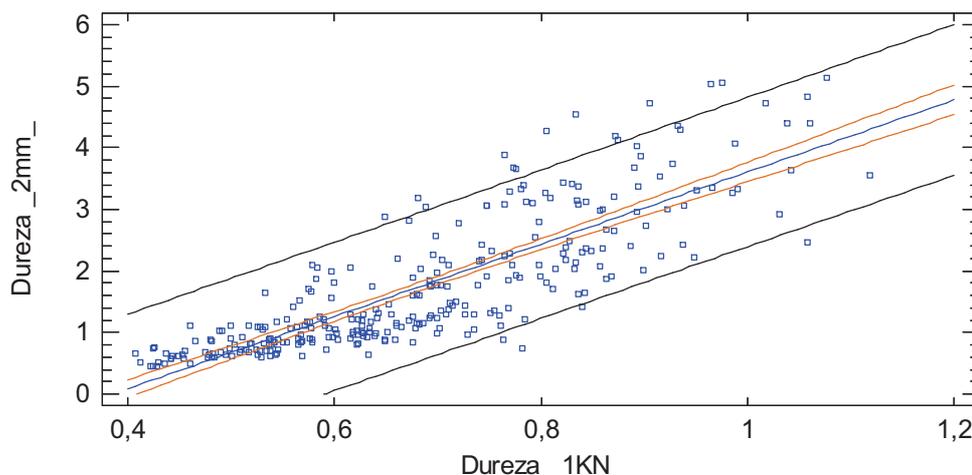


Figura 5.8. Gráfico del modelo ajustado para la relación entre Dureza 2mm y Dureza 1kN

La recta de regresión que refleja la relación lineal existente entre estas dos variables es la siguiente:

$$\text{Dureza 2mm} = -2,25741 + 5,86313 * \text{Dureza 1kN}$$

Los coeficientes propios de la relación de regresión se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.25. Coeficientes para la relación Dureza 2mm y Dureza 1kN

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	P-valor
Intercepto	-1,28688	0,0958457	-13,4266	0,0000

A continuación se muestra el análisis de varianza para esta relación:

Tabla 5.26. Análisis de varianza para la relación Dureza 2mm y Dureza 1kN

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	243,866	1	243,866	653,94	0,0000
Residuo	108,891	292	0,372916		
Total (Corr.)	352,757	293			

A la vista de los valores expresados en Tabla 4.26 de análisis de varianza podemos decir que dado que P-valor = 0,00 (<0,5) existe una relación estadísticamente significativa entre ambas variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de la relación de regresión son los siguientes:

Coefficiente de Correlación = 0,831453

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 69,0257%

El coeficiente de correlación muestra un 0,831453 de correlación entre ambas variables, el cual es un valor significativamente alto para un ensayo de estas características.

En cuanto al valor R-cuadrado nos indica que el modelo de regresión propuesto representa el 69,0257% de la variabilidad total de la muestra.

5.3.2. Dureza 2mm – Dureza 2kN

Pasamos al análisis de la relación entre el ensayo de Dureza 2mm y el ensayo de Dureza 2kN. A continuación se muestra la recta de regresión para estas dos variables.

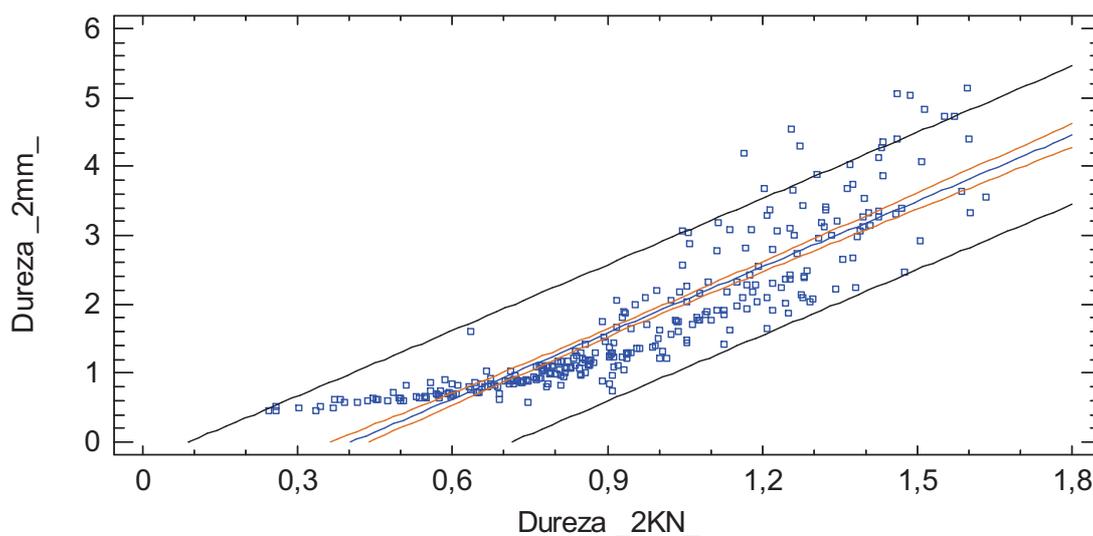


Figura 5.9. Gráfico de modelo ajustado para la relación Dureza 2mm y Dureza 2kN

La recta de regresión que refleja la relación lineal existente entre estas dos variables es la siguiente:

$$\text{Dureza 2mm} = -1,28688 + 3,18903 \cdot \text{Dureza 2kN}$$

Los coeficientes propios de la relación de regresión se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.27. Coeficientes para la relación Dureza 2mm y Dureza 2kN

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	P-valor
Intercepto	-1,28688	0,0958457	-13,4266	0,0000

A continuación se muestra el análisis de varianza para esta relación:

Tabla 5.28. Análisis de varianza para la relación Dureza 2mm y Dureza 2kN

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	279,008	1	279,008	1104,70	0,0000
Residuo	73,7492	292	0,252566		
Total (Corr.)	352,757	293			

A la vista de los valores expresados en tabla de análisis de varianza podemos decir que dado que el P-valor = 0,00 (<0,5) existe una relación estadísticamente significativa entre ambas variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de la relación de regresión son los siguientes:

Coeficiente de Correlación = 0,889345

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 79,0219%

El coeficiente de correlación, con un valor de 0,889345 denota una correlación excelente entre ambos ensayos.

En cuanto al valor R-cuadrado nos indica que el modelo de regresión propuesto representa el 79,0219% de la variabilidad total de la muestra.

En este caso la relación existente es muy buena, debiendo destacar las diferencias de magnitudes entre ambos.

5.3.3. Dureza 1kN – Dureza 2kN

Por último analizaremos la relación existente entre el ensayo de Dureza 1kN con el ensayo de Dureza 2kN. En el siguiente gráfico se muestra la recta de regresión que relaciona estos dos ensayos.

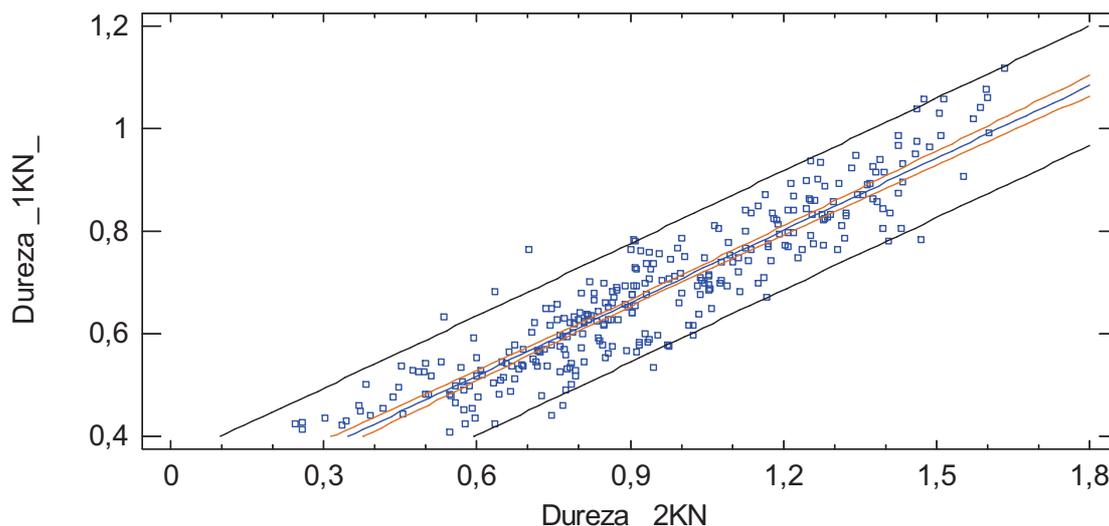


Figura 5.10. Gráfico de modelo ajustado para la relación Dureza 1kN y Dureza 2kN

La recta de regresión que refleja la relación lineal existente entre estas dos variables es la siguiente:

$$\text{Dureza 1kN} = 0,23652 + 0,470676 * \text{Dureza 2kN}$$

Los coeficientes propios de la relación de regresión se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.29. Coeficientes para la relación Dureza 2mm y Dureza 1kN

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	P-valor
Intercepto	0,23652	0,0111664	21,1814	0,0000

Tabla 5.30. Análisis de varianza para la relación Dureza 2mm y Dureza 2kN

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	6,08863	1	6,08863	1766,39	0,0000
Residuo	1,02719	298	0,00344694		
Total (Corr.)	7,11582	299			

A la vista de los valores expresados en tabla de análisis de varianza podemos decir que dado que el P-valor = 0,00 (<0,5) existe una relación estadísticamente significativa entre ambas variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de la relación de regresión son los siguientes:

Coeficiente de Correlación = 0,925012

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 85,5163 %

El coeficiente de correlación, con un valor de 0,925012 denota una similitud excelente entre ambos ensayos.

El valor R-Cuadrado indica que el modelo ajustado representa el 85,5647% de la variabilidad total de la muestra.

Del conjunto de datos expuestos para esta relación podemos destacar el fuerte nivel de correlación existente entre ambos tipos de ensayos.

5.4. Análisis predictivo

5.4.1. Relación entre valores de dureza y densidad

Una vez analizados los resultados correspondientes a los diferentes ensayos y la relación que muestran entre sí, realizaremos un análisis en el que trataremos de establecer la relación existente entre los valores de dureza obtenidos y los valores de densidad.

Para la realización de este análisis utilizaremos el método de regresión simple aplicado a cada uno de los ensayos realizados.

5.4.1.1. Dureza 2mm y densidad

En el siguiente gráfico se muestra la recta de regresión que relaciona estas dos variables.

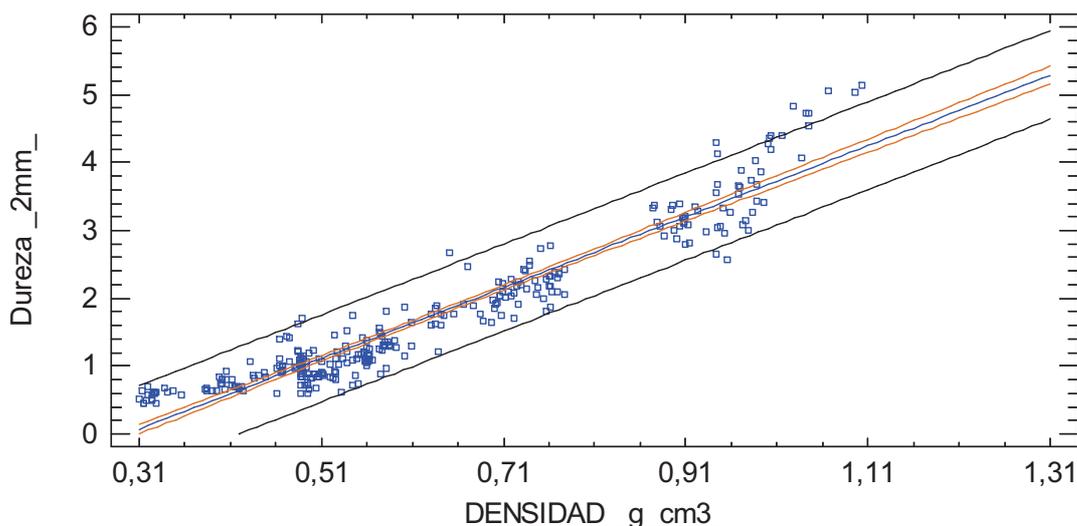


Figura 5.11. Gráfico de modelo ajustado para la relación Dureza 2mm y densidad

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Dureza 2mm} = -1,54466 + 5,21672 \cdot \text{DENSIDAD (g/cm}^3\text{)}$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables.

Tabla 5.31. Análisis de varianza para la relación Dureza 2mm y densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	321,926	1	321,926	3048,89	0,0000
Residuo	30,8317	292	0,105588		
Total (Corr.)	352,757	293			

Dado que en resultados del análisis de varianza para la relación entre el ensayo 2mm y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05 podemos afirmar que el modelo es adecuado para la relación de las dos variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

Coefficiente de Correlación = 0,9553

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91,2299 %

El coeficiente de correlación es igual a 0,9553, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 91,2299 % de la variabilidad entre dureza 2mm y densidad.

5.4.1.2. Dureza 1kN y densidad

En el siguiente gráfico se muestra la recta de regresión que relaciona estas variables.

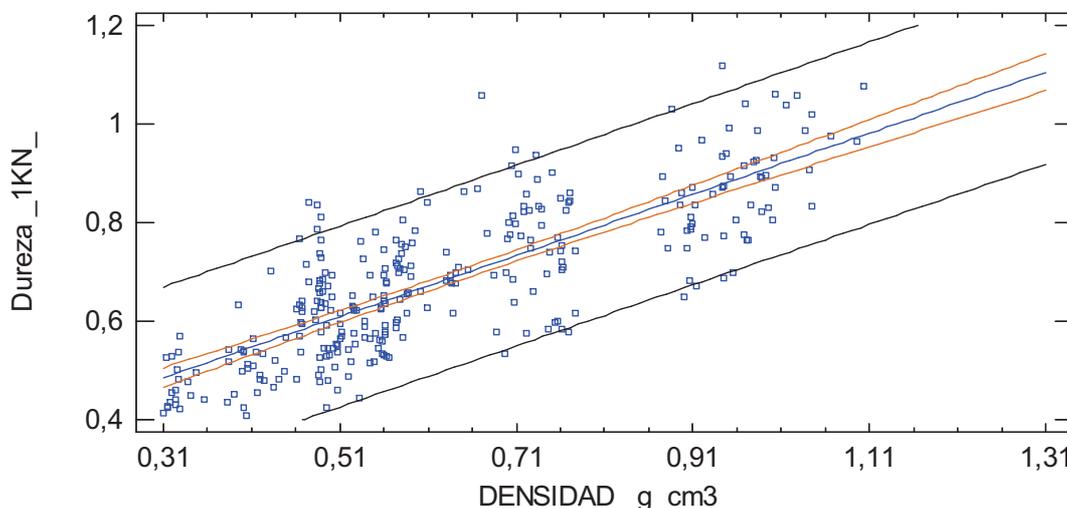


Figura 5.12. Gráfico de modelo ajustado para Dureza 1kN y densidad

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Dureza 1KN} = 0,293647 + 0,619335 \cdot \text{DENSIDAD (g/cm}^3\text{)}$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables.

Tabla 5.32. Análisis de varianza para la relación Dureza 1kN y densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	4,54415	1	4,54415	526,57	0,0000
Residuo	2,57168	298	0,00862979		
Total (Corr.)	7,11582	299			

Dado que en resultados del análisis de varianza para la relación entre el ensayo 1kN y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05 podemos afirmar que el modelo es adecuado para la relación de las dos variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Los valores característicos que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

Coefficiente de Correlación = 0,799123

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 63,7385 %

El coeficiente de correlación es igual a 0,799123, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 63,7385 % de la variabilidad entre la Dureza 1kN y densidad.

A la vista de los resultados podemos afirmar que existe relación entre la densidad de las muestras y su dureza calculada por medio del ensayo 1kN, aunque en este caso no se observa una relación tan ajustada como en el ensayo anterior.

5.4.1.3 Dureza 2kN y densidad

En el siguiente gráfico se muestra la recta de regresión que relaciona estas variables.

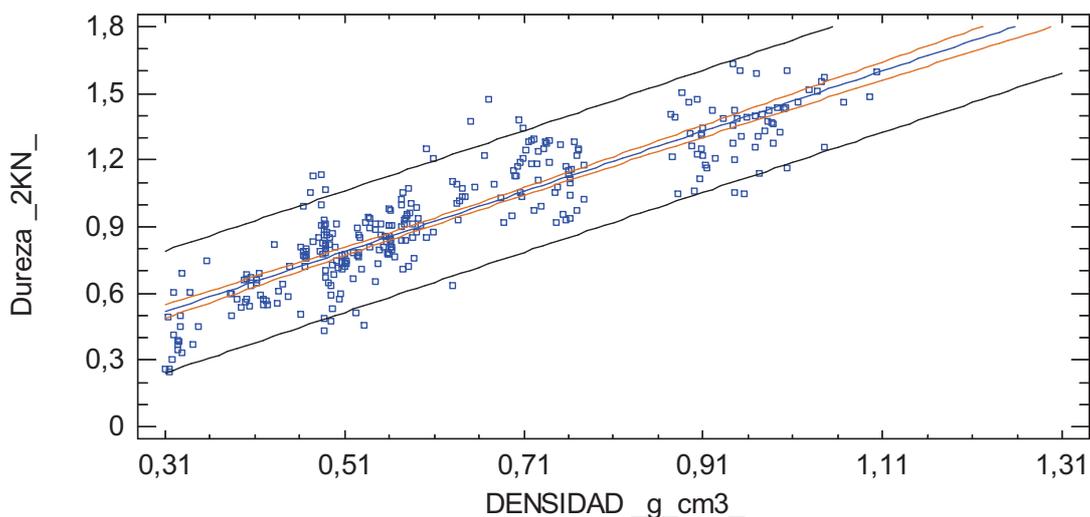


Figura 5.13. Gráfico de modelo ajustado para Dureza 2kN y densidad

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Dureza 2KN} = 0,0969371 + 1,35464 * \text{DENSIDAD (g/cm3)}$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas dos variables.

Tabla 5.33. Análisis de varianza para la relación Dureza 2kN y densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	21,7395	1	21,7395	1127,80	0,0000
Residuo	5,74424	298	0,019276		
Total (Corr.)	27,4837	299			

Dado que en resultados del análisis de varianza para la relación entre el ensayo 2kN y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05 podemos afirmar que el modelo es adecuado para la relación de las dos variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

Coefficiente de Correlación = 0,889379

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 79,0293 %

El coeficiente de correlación es igual a = 0,889379, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 79,0293 % de la variabilidad entre la dureza 2kN y la densidad.

A la vista de los resultados podemos afirmar que existe una clara relación entre la densidad de las muestras y su dureza calculada por medio del ensayo 2kN, en este caso la relación es mayor que para el ensayo 1kN aunque inferior al ensayo 2mm.

5.4.1.4. Sumario de resultados para las relaciones entre dureza y densidad

En la siguiente tabla se representa un sumario para los resultados obtenidos en el análisis de relación entre dureza y densidad para los distintos ensayos.

Tabla 5.34. Sumario de resultados para las relaciones entre dureza y densidad

	2mm	1kN	2kN
Coefficiente de correlación	0,953877	0,799123	0,889379
R-cuadrado ajustada	90,96%	63,74%	79,03%

Los niveles de ajuste de las relaciones entre dureza y densidad son claramente superiores para el ensayo 2mm, con un nivel de representación excelente para este tipo de ensayos. El ensayo 2kN también presenta valores altos para esta relación aunque algo inferiores. Por otro lado podemos afirmar que el ensayo que presenta una menor relación entre los valores de densidad y dureza es el ensayo de 1kN, claramente por debajo de los otros dos.

5.4.2. Relación entre valores de dureza con densidad y especie

Una vez analizada la relación existente entre los valores de dureza y densidad para los distintos ensayos, procederemos a analizar la relación entre la dureza y la densidad teniendo en cuenta la especie.

Para este análisis utilizaremos el test GLM, que además de establecer relación entre dos variables, nos permite incluir en el estudio una o varias variables categóricas, que en nuestro caso será la especie. De esta manera comprobaremos si además de la densidad existe una influencia de la especie sobre los valores de dureza obtenidos.

5.4.2.1. Dureza 2mm con densidad y especie

En la siguiente tabla se muestra el análisis de varianza para la relación entre dureza con densidad y especie en el ensayo Dureza 2mm.

Tabla 5.35. Análisis de varianza para la relación Dureza 2mm con densidad y especie

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	349,566	16	21,8479	462,40	0,0000
Residuo	14,033	297	0,0472492		
Total (Corr.)	363,599	313			

Tabla 5.36. Suma de cuadrados para la relación Dureza 2mm con densidad y especie

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Nº	18,7338	15	1,24892	26,43	0,0000
DENSIDAD_g_cm3	3,57462	1	3,57462	75,65	0,0000
Residuo	14,033	297	0,0472492		
Total (corregido)	363,599	313			

Dado que en los resultados del análisis de varianza, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05 podemos afirmar que el modelo es adecuado para la relación de las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El valor de R-cuadrado ajustado para esta relación es de 95,9326%.

5.4.2.2. Dureza 1kN con densidad y especie

En la siguiente tabla se muestra el análisis de varianza para la relación entre dureza con densidad y especie en el ensayo Dureza 1kN.

Tabla 5.37. Análisis de varianza para la relación Dureza 1kN con densidad y especie

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	5,17144	15	0,344763	50,36	0,0000
Residuo	1,94438	284	0,00684641		
Total (Corr.)	7,11582	299			

Tabla 5.38. Suma de cuadrados para la relación Dureza 1kN con densidad y especie

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Nº	0,627295	14	0,0448068	6,54	0,0000
DENSIDAD_g_cm3	0,0884245	1	0,0884245	12,92	0,0004
Residuo	1,94438	284	0,00684641		
Total (corregido)	7,11582	299			

Dado que en los resultados del análisis de varianza, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05 podemos afirmar que el modelo es adecuado para la relación de las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El valor de R-cuadrado ajustado para esta relación es de 71,232%.

5.4.2.3. Dureza 2kN con densidad y especie

En la siguiente tabla se muestra el análisis de varianza para la relación entre dureza con densidad y especie en el ensayo Dureza 2kN.

Tabla 5.39. Análisis de varianza para la relación Dureza 2kN con densidad y especie

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	23,7472	15	1,58314	120,33	0,0000
Residuo	3,73655	284	0,0131569		
Total (Corr.)	27,4837	299			

Tabla 5.40. Suma de cuadrados para la relación Dureza 2kN con densidad y especie

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Nº	2,00769	14	0,143406	10,90	0,0000
DENSIDAD_g_cm3	0,313482	1	0,313482	23,83	0,0000
Residuo	3,73655	284	0,0131569		
Total (corregido)	27,4837	299			

Dado que en los resultados del análisis de varianza, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05 podemos afirmar que el modelo es adecuado para la relación de las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El valor de R-cuadrado ajustado para esta relación es de 85,6864%

5.4.2.4. Sumario de resultados para dureza con densidad y especie

En la siguiente tabla se representa un sumario para los resultados obtenidos en el análisis de relación entre dureza con densidad y especie para los distintos ensayos.

Tabla 5.41. Análisis de varianza para la relación Dureza 2mm y Dureza 2kN

	2mm	1kN	2kN
R-cuadrado ajustada	95,933%.	71,232%.	85,687%

Comparando los valores obtenidos en la tabla anterior con los obtenidos en el caso de la relación entre dureza y densidad se puede comprobar que para los tres ensayos existe una mejora de la precisión, ya que en todos ellos se produce un incremento del valor R-cuadrado.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones a partir de los resultados obtenidos para los distintos análisis realizados. Es conveniente tener en cuenta la heterogeneidad del material utilizado, por tanto estas conclusiones deben ser tomadas en cuenta de una manera general.

En cuanto a los valores obtenidos en los diferentes ensayos podemos decir que existe una clara diferencia de magnitudes, especialmente entre los ensayos de dureza a fuerza constante 1kN y 2kN y los obtenidos mediante penetración constante 2mm. Para este último caso los valores son claramente superiores a los otros dos.

Los elevados valores de los coeficientes de variación para las especies más blandas en el ensayo a fuerza constante 2kN revelan que existe una menor fiabilidad para este grupo mediante este método. Precisamente, la mayor variabilidad se produce en el caso de la secuoya (4) con un valor de 32%, especie que presenta una menor densidad. Esto se debe a que existen umbrales inferiores de densidad para los cuales las probetas parten y se producen anomalías en las mediciones.

Cabe pensar, por tanto que el ensayo de dureza de Monnin, el cual aplica una fuerza constante, presenta una clara desventaja para la comparación de resultados entre especies de distinta dureza, ya que en ocasiones la fuerza aplicada apenas deforma la madera de especies más duras, y por otro lado, las especies de menor dureza pueden partirse presentando irregularidad en los resultados.

Las comparaciones entre especies para los distintos tipos de ensayo dejan de manifiesto que no existe relación entre los valores obtenidos para las distintas especies. Lo mismo ocurre con la comparación entre grupos taxonómicos. Este hecho responde a la diferencia de características morfológicas que existe tanto entre especies como entre coníferas y frondosas, y que determinan diferentes niveles de dureza.

En cuanto a la comparación entre métodos de ensayo podemos afirmar que no existe igualdad entre ninguna de las posibles combinaciones, por tanto los resultados deben ser tomados en cuenta independientemente unos de otros.

En cuanto a las correlaciones entre ensayos podemos afirmar que existe una excelente correlación para los ensayos realizados a fuerza constante 1kN y 2kN con un coeficiente de correlación 0,92% entre ellos. Parece evidente que la metodología empleada, fuerza constante o penetración constante, no solo afecta al rango de valores obtenidos sino también a la correlación entre ellos. A pesar de que en este ensayo hemos realizado regresiones de tipo lineal para simplificar los cálculos, cabe destacar que para las relaciones entre ensayos de distinto tipo, dureza a penetración constante con dureza a fuerza constante 1kN y 2kN se mejora la regresión aplicando curvas logarítmicas. Sin embargo para la correlación entre ensayos de dureza a

penetración constante, la mejor regresión entre ambos se corresponde con una regresión lineal.

Los valores de R-cuadrado ajustado para las relaciones entre dureza y densidad, revelan que la mejor relación se da para el ensayo a penetración constante 2mm obteniendo un valor de 90,96%. Para los ensayos de fuerza constante 1kN se dan los peores resultados con un valor de R-cuadrado de 63,74%.

Para las relaciones entre dureza y densidad incorporando la especie como factor categórico observamos un aumento de R-cuadrado para todos los ensayos, pasando del 90,96% al 95,93% en el ensayo de penetración constante 2mm, de 63,74% a 71,32% en el ensayo a fuerza constante 1kN y de 79,03% a 85,68% en el ensayo a fuerza constante 2kN. Estos resultados dejan de manifiesto una clara influencia de la especie sobre los valores de dureza para igualdad de densidad.

Dada esta mejora en las relaciones entre dureza y densidad atendiendo a la especie, se considera conveniente la realización de nuevos ensayos que profundicen en las causas atendiendo a factores propios de la naturaleza de la especie.

UNE 56-534-77. "*Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la dureza*"

UNE 56.540. "*Características físico mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos*"

VIGNOTE, S. & MARTÍNEZ, I. (2006). **Tecnología de la madera**. Ed. Mundi Prensa.

Wood hardness scale: UA FLOORS (2013). <http://www.uafloors.com.tw/library4.html>

ANEJO I. Estadística

I. ANEJOS

I.1. Datos de los ensayos

I.1.1. Dimensiones de las probetas

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
1	1	F	20,60	20,70	20,80	20,60	60,45	0,85297
2	1	F	20,80	20,90	20,90	20,80	60,55	0,76725
3	1	F	20,90	20,90	20,80	21,10	60,10	0,79454
4	1	F	20,60	20,60	20,60	20,60	60,60	0,80295
5	1	F	20,80	20,80	20,90	20,75	60,85	0,79702
6	1	F	20,70	20,70	20,70	20,75	60,10	0,75928
7	1	F	20,75	20,70	20,70	20,70	60,30	0,82056
8	1	F	20,90	20,60	20,70	20,60	60,50	0,80487
9	1	F	20,65	20,65	20,70	20,70	62,80	0,79306
10	1	F	20,20	20,20	20,35	20,05	60,25	0,81594
11	1	F	20,55	20,55	20,50	20,75	60,60	0,80526
12	1	F	20,75	20,75	20,90	20,80	60,80	0,79898
13	1	F	20,00	20,00	20,00	20,55	60,60	0,79300
14	1	F	20,70	20,70	20,60	20,70	60,90	0,80581
15	1	F	20,70	20,70	20,75	20,70	60,75	0,81588
16	1	F	20,50	20,55	20,60	20,55	60,65	0,79166
17	1	F	20,85	20,75	20,65	20,60	60,75	0,79760
18	1	F	20,45	20,60	20,60	20,60	60,60	0,79616
19	1	F	20,75	20,70	20,65	20,70	60,55	0,78267
20	1	F	20,60	20,60	20,60	20,70	60,55	0,78520
21	2	F	20,40	20,40	20,40	21,00	61,35	0,89702
22	2	F	20,60	20,60	20,65	20,90	60,70	0,91228
23	2	F	20,70	20,60	20,50	21,00	60,65	0,92392
24	2	F	20,45	20,60	20,75	21,20	60,00	0,92007
25	2	F	20,35	20,35	20,35	20,00	61,20	0,90801
26	2	F	20,65	20,65	20,65	20,55	60,75	0,91352
27	2	F	20,00	20,05	20,10	20,55	60,90	0,89970
28	2	F	20,25	20,15	20,20	20,05	60,75	0,90969
29	2	F	20,65	20,60	20,35	20,50	60,60	0,90356
30	2	F	20,35	20,40	20,40	20,35	59,65	0,87877
31	2	F	20,15	20,00	20,00	20,55	60,35	0,87432

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
32	2	F	20,40	20,40	20,40	20,60	60,85	0,87473
33	2	F	20,35	20,50	20,50	19,80	60,80	0,90875
34	2	F	20,00	19,90	20,10	20,75	60,50	0,89471
35	2	F	20,75	20,90	20,10	21,10	60,60	0,90329
36	2	F	20,10	20,30	20,50	21,10	60,45	0,88223
37	2	F	20,60	20,45	20,25	20,95	60,60	0,89321
38	2	F	20,90	20,90	20,90	20,50	60,40	0,90812
39	2	F	20,60	20,50	20,80	20,25	60,50	0,90801
40	2	F	20,25	20,15	20,25	21,00	60,55	0,90581
41	3	F	21,20	21,20	21,10	20,60	59,05	0,77070
42	3	F	20,85	20,80	20,75	20,15	60,00	0,77040
43	3	F	20,20	20,20	20,30	20,60	60,40	0,76670
44	3	F	20,75	20,70	20,65	20,60	60,60	0,74426
45	3	F	20,60	20,50	20,35	21,10	60,45	0,77630
46	3	F	20,40	20,30	20,10	20,85	60,55	0,75955
47	3	F	20,55	20,60	20,60	20,15	60,60	0,75690
48	3	F	19,90	19,90	19,80	20,50	60,60	0,77706
49	3	F	20,55	20,65	20,75	20,60	60,80	0,75745
50	3	F	20,50	20,50	20,50	20,00	60,25	0,76959
51	3	F	20,50	20,50	20,50	20,20	60,50	0,76099
52	3	F	20,50	20,55	20,55	20,75	60,60	0,75363
53	3	F	20,70	20,75	20,75	20,60	60,10	0,75990
54	3	F	20,65	20,75	20,90	20,65	60,55	0,76131
55	3	F	21,00	21,00	21,00	20,50	60,40	0,76955
56	3	F	20,50	20,50	20,45	20,90	60,00	0,74729
57	3	F	20,85	20,80	20,75	20,60	60,50	0,76295
58	3	F	21,20	21,20	21,10	20,70	60,40	0,74581
59	3	F	20,20	20,20	20,20	20,50	60,45	0,76113
60	3	F	20,50	20,50	20,60	20,60	60,60	0,76112
61	4	C	20,15	20,25	20,25	18,15	61,00	0,31345
62	4	C	19,70	19,65	19,60	17,30	59,90	0,32389
63	4	C	20,30	20,30	20,30	18,00	60,20	0,32946
64	4	C	20,10	20,20	20,30	17,65	61,40	0,35593
65	4	C	19,90	19,85	19,80	18,00	60,70	0,31910
66	4	C	20,00	20,10	20,20	18,00	60,75	0,32694
67	4	C	20,40	20,40	20,40	17,35	61,15	0,32518
68	4	C	19,80	19,80	19,85	18,00	60,60	0,34746
69	4	C	20,20	20,20	20,25	17,80	60,95	0,32388
70	4	C	20,00	20,05	20,10	18,85	61,00	0,31791
71	4	C	19,55	19,65	19,70	17,30	61,40	0,32679
72	4	C	19,90	19,90	19,90	18,60	60,95	0,31509
73	4	C	17,65	17,40	17,30	19,90	61,00	0,32895

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
74	4	C	20,75	20,70	20,65	18,00	60,25	0,34172
75	4	C	19,80	20,00	20,15	18,20	59,30	0,33731
76	4	C	19,80	19,80	19,75	19,20	61,00	0,32362
77	4	C	19,90	20,15	20,30	17,90	61,15	0,38437
78	4	C	19,60	19,70	19,85	18,05	60,50	0,32035
79	4	C	20,00	19,80	19,65	19,25	60,90	0,31536
80	4	C	18,30	18,60	18,90	20,50	61,20	0,31028
81	5	F	20,70	20,70	20,70	20,15	61,70	0,50703
82	5	F	20,00	20,00	20,00	21,20	60,50	0,43213
83	5	F	21,15	21,10	21,10	20,25	61,45	0,42335
84	5	F	20,60	20,70	20,80	20,10	61,10	0,42424
85	5	F	21,10	21,05	21,00	20,25	61,60	0,41982
86	5	F	20,70	20,75	20,80	20,40	60,00	0,43616
87	5	F	20,40	20,50	20,60	20,20	61,20	0,50687
88	5	F	20,75	20,50	20,70	20,55	61,85	0,50352
89	5	F	20,75	20,75	20,75	20,35	61,40	0,49775
90	5	F	20,75	20,70	20,70	20,40	61,00	0,52886
91	5	F	20,60	20,60	20,70	20,50	61,25	0,50994
92	5	F	20,85	20,80	20,70	20,00	60,00	0,48943
93	5	F	20,70	20,70	20,70	20,35	61,50	0,50984
94	5	F	20,50	20,55	20,60	20,30	60,90	0,52617
95	5	F	20,70	20,65	20,60	20,55	61,00	0,51182
96	5	F	20,60	20,60	20,60	20,35	60,95	0,52484
97	5	F	20,50	20,50	20,50	20,30	60,85	0,51927
98	5	F	20,65	20,65	20,65	20,25	61,35	0,51158
99	5	F	20,80	20,85	20,90	20,50	60,40	0,42036
100	5	F	20,75	20,70	20,65	20,40	60,40	0,50537
101	6	F	20,40	20,40	20,40	20,40	61,60	0,46775
102	6	F	20,20	20,20	20,15	20,30	61,35	0,48659
103	6	F	20,25	20,30	20,50	20,60	61,50	0,46366
104	6	F	20,50	20,50	20,50	20,65	60,55	0,49306
105	6	F	20,50	20,50	20,50	20,50	61,45	0,46732
106	6	F	20,40	20,35	20,30	20,20	60,35	0,49100
107	6	F	20,30	20,25	20,20	20,50	60,55	0,49915
108	6	F	20,35	20,45	20,40	20,25	61,50	0,47493
109	6	F	20,05	20,05	20,20	20,40	61,00	0,46158
110	6	F	20,70	20,65	20,70	20,40	61,00	0,49679
111	6	F	20,05	20,10	20,20	20,40	61,90	0,46689
112	6	F	20,50	20,50	20,50	20,45	61,05	0,46695
113	6	F	20,45	20,50	20,50	20,50	60,60	0,46615
114	6	F	20,50	20,50	20,60	20,25	60,60	0,49118
115	6	F	20,35	20,30	20,30	20,45	61,20	0,50110

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
116	6	F	20,30	20,30	20,35	20,40	60,60	0,48946
117	6	F	20,50	20,50	20,50	20,00	61,05	0,49542
118	6	F	20,45	20,35	20,30	20,40	62,05	0,48841
119	6	F	20,25	20,25	20,15	20,05	61,00	0,50998
120	6	F	20,30	20,40	20,45	20,25	62,20	0,49739
121	7	C	20,95	20,90	21,00	20,95	57,40	0,59445
122	7	C	21,60	21,60	21,60	20,85	56,70	0,58821
123	7	C	21,40	21,40	21,60	21,25	59,15	0,57352
124	7	C	21,10	21,10	21,30	20,90	58,40	0,58984
125	7	C	21,45	21,60	21,45	21,35	60,50	0,56050
126	7	C	21,40	21,45	21,50	20,65	57,65	0,56209
127	7	C	21,70	21,80	21,85	20,90	58,75	0,58161
128	7	C	21,50	21,55	21,55	21,00	61,00	0,59246
129	7	C	21,55	21,60	21,50	21,35	60,85	0,56042
130	7	C	21,00	21,00	21,00	21,00	59,20	0,58224
131	7	C	21,15	21,20	21,25	20,90	57,50	0,57702
132	7	C	21,50	21,45	21,60	21,00	61,25	0,57309
133	7	C	20,90	21,00	21,05	21,00	59,90	0,58209
134	7	C	21,33	21,30	21,30	20,85	60,00	0,56341
135	7	C	21,35	21,60	21,70	21,35	61,90	0,56148
136	7	C	21,85	21,75	21,80	21,10	59,10	0,56273
137	7	C	21,20	21,30	21,35	20,45	61,06	0,60210
138	7	C	21,55	21,55	21,50	21,80	58,60	0,56046
139	7	C	21,40	21,60	21,60	20,90	60,60	0,60880
140	7	C	21,55	21,55	21,60	20,85	59,55	0,57446
141	8	C	19,30	19,30	19,25	21,10	58,70	0,44930
142	8	C	20,75	20,75	20,75	20,55	58,80	0,39558
143	8	C	20,60	20,55	20,30	22,50	60,00	0,41684
144	8	C	21,10	21,00	21,00	22,50	58,40	0,44757
145	8	C	20,70	20,60	20,60	21,10	56,60	0,41149
146	8	C	20,10	21,10	21,05	20,75	57,00	0,38343
147	8	C	21,00	20,90	20,80	21,75	56,35	0,43498
148	8	C	20,90	20,80	20,70	20,75	60,00	0,40651
149	8	C	20,70	20,75	20,75	22,30	57,50	0,40115
150	8	C	20,75	20,85	20,80	21,65	56,05	0,40174
151	8	C	20,80	20,70	20,70	22,30	59,60	0,40633
152	8	C	19,50	19,50	19,50	21,45	60,90	0,41470
153	8	C	19,00	19,15	19,10	20,60	59,50	0,44105
154	8	C	20,80	20,80	20,80	22,50	61,30	0,39826
155	8	C	21,50	21,45	21,35	22,15	59,30	0,40062
156	8	C	20,60	20,60	20,70	21,50	56,50	0,41170
157	8	C	20,85	20,90	20,80	20,40	59,90	0,39041

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
158	8	C	21,10	21,20	21,50	22,45	60,20	0,40429
159	8	C	20,90	20,85	20,90	20,50	59,90	0,38381
160	8	C	20,75	20,75	20,75	21,40	56,35	0,39963
161	9	F	21,45	21,30	21,10	21,70	56,30	0,56565
162	9	F	20,30	20,30	20,30	20,50	60,40	0,58555
163	9	F	21,65	21,65	21,85	20,05	59,70	0,55859
164	9	F	20,40	20,40	20,45	20,50	61,50	0,57985
165	9	F	20,40	20,45	20,50	20,25	60,85	0,57896
166	9	F	20,40	20,50	20,45	20,50	61,20	0,58388
167	9	F	21,10	21,20	21,20	20,50	59,25	0,56171
168	9	F	22,20	22,00	22,10	21,85	59,20	0,56056
169	9	F	21,35	21,40	21,35	20,50	59,40	0,55434
170	9	F	22,10	22,10	22,00	20,80	59,90	0,55077
171	9	F	21,30	21,30	21,35	21,70	60,60	0,55667
172	9	F	21,50	21,20	21,35	20,20	59,30	0,56259
173	9	F	21,40	21,25	21,20	20,30	58,60	0,55912
174	9	F	20,60	20,60	20,40	20,40	61,15	0,57777
175	9	F	20,45	20,40	20,50	20,40	61,50	0,57356
176	9	F	20,25	20,25	20,25	20,40	60,25	0,58577
177	9	F	20,25	20,25	20,35	20,15	61,90	0,59006
178	9	F	20,40	20,35	20,35	20,50	61,10	0,57959
179	9	F	20,55	20,60	20,60	20,60	60,85	0,57682
180	9	F	21,20	21,20	21,20	21,00	58,20	0,55698
181	10	F	20,75	20,75	20,75	20,45	60,90	0,73218
182	10	F	19,00	18,80	18,40	21,00	60,40	0,66990
183	10	F	20,80	20,70	20,70	21,00	61,00	0,65116
184	10	F	20,55	20,55	20,50	21,10	60,90	0,73404
185	10	F	20,45	20,80	20,65	21,00	61,10	0,73791
186	10	F	20,60	20,60	20,70	20,80	60,50	0,71821
187	10	F	20,60	20,65	20,75	20,30	60,95	0,75044
188	10	F	20,70	20,60	20,60	20,80	61,00	0,73908
189	10	F	20,60	20,60	20,60	20,75	60,95	0,69814
190	10	F	20,50	20,50	20,70	21,00	60,85	0,70871
191	10	F	20,50	20,50	20,70	20,90	61,45	0,70969
192	10	F	20,55	20,55	20,55	21,25	61,00	0,71522
193	10	F	20,60	20,55	20,60	20,65	61,20	0,70565
194	10	F	20,70	20,75	20,60	21,00	60,80	0,70397
195	10	F	20,75	20,80	20,80	20,70	61,00	0,70661
196	10	F	20,80	20,75	20,60	20,30	61,20	0,72676
197	10	F	20,60	20,70	20,70	21,00	60,85	0,71256
198	10	F	20,90	20,70	20,80	20,75	61,45	0,71871
199	10	F	20,50	20,55	20,60	20,85	61,10	0,72471

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
200	10	F	20,85	20,85	20,70	20,90	61,25	0,72108
201	11	C	19,70	19,60	19,70	19,70	60,70	0,48970
202	11	C	19,75	19,75	19,75	19,65	61,00	0,48896
203	11	C	20,65	20,65	20,75	19,75	60,90	0,46419
204	11	C	20,00	19,90	19,70	20,00	60,90	0,48469
205	11	C	20,80	20,60	20,40	20,00	60,50	0,48676
206	11	C	20,60	20,50	20,40	19,75	60,75	0,48819
207	11	C	20,65	20,70	20,75	20,45	61,10	0,48892
208	11	C	20,65	20,60	20,50	20,90	60,80	0,48464
209	11	C	20,30	20,50	20,50	20,70	60,55	0,47544
210	11	C	20,75	20,70	20,60	20,60	61,10	0,47278
211	11	C	20,50	20,55	20,55	20,55	60,55	0,48949
212	11	C	20,55	20,60	20,60	20,65	60,85	0,48193
213	11	C	20,00	19,85	19,70	19,70	60,95	0,48767
214	11	C	20,75	20,60	20,60	20,60	60,70	0,49410
215	11	C	20,50	20,35	20,35	20,40	61,10	0,48697
216	11	C	20,80	20,80	20,75	20,50	61,50	0,48602
217	11	C	20,70	20,85	20,90	19,85	60,80	0,49154
218	11	C	20,30	20,35	20,40	20,30	60,95	0,49524
219	11	C	20,60	20,50	20,60	20,50	60,45	0,48685
220	11	C	20,60	20,60	20,60	20,80	60,80	0,48681
221	12	F	21,00	20,80	20,70	20,80	60,50	0,70085
222	12	F	20,70	20,55	20,65	20,65	61,20	0,68429
223	12	F	19,50	19,60	19,50	20,20	60,75	0,72190
224	12	F	20,00	20,00	20,00	20,40	61,00	0,70819
225	12	F	19,00	18,85	18,45	20,65	60,25	0,64164
226	12	F	19,35	19,35	19,35	20,95	60,75	0,64416
227	12	F	19,65	19,50	19,45	21,00	61,00	0,63095
228	12	F	19,40	19,40	19,40	20,80	60,80	0,63487
229	12	F	19,55	19,55	19,55	20,70	61,20	0,63532
230	12	F	20,65	20,65	20,50	20,50	60,70	0,69967
231	12	F	19,40	19,40	19,40	20,60	61,00	0,64214
232	12	F	20,00	21,00	21,00	20,45	60,60	0,67712
233	12	F	20,65	20,75	20,80	20,75	60,55	0,70257
234	12	F	20,75	20,75	20,75	20,65	60,95	0,65583
235	12	F	20,90	20,90	20,80	20,70	61,20	0,72592
236	12	F	20,55	20,50	20,40	20,45	60,75	0,68766
237	12	F	20,20	20,10	20,00	20,10	60,70	0,69731
238	12	F	20,70	20,60	20,50	20,65	60,50	0,66611
239	12	F	20,45	20,30	20,40	20,75	61,25	0,73495
240	12	F	20,75	20,75	20,70	20,25	61,70	0,72879
241	13	F	20,65	20,45	20,30	20,55	60,60	0,93289

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
242	13	F	19,40	19,50	19,60	17,80	61,00	0,94518
243	13	F	20,35	20,25	20,15	20,65	60,60	0,98856
244	13	F	17,60	17,50	17,30	20,90	60,10	0,96933
245	13	F	20,50	20,25	20,00	20,45	60,30	0,94750
246	13	F	20,85	20,85	20,75	20,65	60,50	0,95300
247	13	F	18,25	18,10	18,00	20,90	61,00	0,98708
248	13	F	18,45	18,45	18,45	20,55	61,60	0,88678
249	13	F	18,60	18,80	19,00	20,60	61,70	0,94352
250	13	F	20,50	20,50	20,40	18,40	60,35	0,94466
251	13	F	20,55	20,50	20,45	17,65	60,55	0,98234
252	13	F	17,80	18,05	18,20	20,75	60,20	0,95042
253	13	F	20,65	20,35	19,90	20,35	60,45	0,95837
254	13	F	17,20	17,00	17,00	20,60	60,95	0,94270
255	13	F	17,75	17,90	18,00	19,50	60,95	0,95543
256	13	F	19,35	19,30	19,25	21,25	60,95	0,98338
257	13	F	21,00	21,00	21,00	20,75	61,25	0,97620
258	13	F	20,60	20,60	20,60	20,80	60,70	0,97797
259	13	F	21,25	21,25	21,15	20,65	60,80	0,96810
260	13	F	20,80	20,75	20,65	20,50	60,60	0,97194
261	14	C	20,60	20,70	20,60	20,45	60,50	0,48383
262	14	C	20,05	20,05	20,05	19,45	62,15	0,53775
263	14	C	20,50	20,50	20,35	20,35	61,45	0,57545
264	14	C	20,50	20,50	20,30	20,05	60,60	0,56039
265	14	C	20,50	20,50	20,60	20,35	60,75	0,52732
266	14	C	20,00	20,00	20,00	19,35	60,60	0,57328
267	14	C	20,10	20,33	20,40	19,70	60,45	0,60200
268	14	C	20,70	20,80	20,85	20,35	60,80	0,50732
269	14	C	20,40	20,45	20,50	20,50	60,65	0,60944
270	14	C	20,90	20,80	20,90	20,50	60,75	0,63690
271	14	C	20,50	20,50	20,50	20,40	60,45	0,54371
272	14	C	20,60	20,60	20,60	20,40	60,85	0,55463
273	14	C	20,50	20,45	20,40	20,60	61,00	0,53766
274	14	C	20,30	20,30	20,30	20,50	60,40	0,54502
275	14	C	20,75	20,75	20,75	20,40	61,00	0,52649
276	14	C	20,50	20,50	20,50	20,65	61,00	0,46526
277	14	C	20,90	20,70	20,70	20,50	60,50	0,55804
278	14	C	20,50	20,35	20,35	20,50	61,10	0,56173
279	14	C	20,40	20,60	20,60	20,25	60,90	0,53621
280	14	C	20,80	20,75	20,75	20,45	60,60	0,46356
281	15	F	20,30	20,15	20,15	21,20	60,60	1,09565
282	15	F	20,75	20,75	20,75	20,33	60,85	0,99555
283	15	F	20,70	20,75	20,80	20,60	60,60	0,97135

Tabla I.1 Dimensiones de las probetas (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	ANCHURA 1 (mm)	ANCHURA 2 (mm)	ANCHURA 3 (mm)	ALTURA (mm)	LONGITUD (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
284	15	F	20,90	20,90	20,95	20,70	60,40	1,02769
285	15	F	20,65	20,55	20,50	20,70	60,50	1,04441
286	15	F	20,15	20,15	20,15	20,55	60,90	1,03704
287	15	F	20,65	20,65	20,65	20,60	60,70	0,99999
288	15	F	20,80	20,85	21,00	20,80	60,60	0,94479
289	15	F	20,50	20,75	20,90	20,95	60,80	0,99292
290	15	F	20,45	20,45	20,45	20,75	60,65	0,96840
291	15	F	20,60	20,70	20,80	20,95	60,60	1,01546
292	15	F	20,80	20,80	20,85	20,60	61,10	0,94395
293	15	F	20,35	20,40	20,50	20,20	60,60	1,06612
294	15	F	20,90	20,90	20,90	20,45	60,90	1,00279
295	15	F	20,25	20,30	20,30	20,35	60,80	1,04437
296	15	F	20,45	20,55	20,75	20,50	60,75	1,04124
297	15	F	20,95	20,85	20,75	20,70	60,35	0,98611
298	15	F	20,70	20,55	20,50	20,35	60,45	1,10260
299	15	F	20,75	20,85	20,90	20,90	60,20	1,00110
300	15	F	20,85	20,85	20,80	21,00	60,85	1,00323
301	16	C	20,10	20,10	20,20	20,60	60,40	0,54382
302	16	C	20,50	20,50	20,50	20,20	60,40	0,53182
303	16	C	20,50	20,55	20,60	20,75	60,85	0,52395
304	16	C	20,95	20,95	21,00	20,75	60,35	0,48322
305	16	C	20,45	20,60	20,70	20,80	61,15	0,55101
306	16	C	20,40	20,65	20,70	20,75	60,50	0,63891
307	16	C	20,90	20,85	20,90	20,95	61,25	0,53288
308	16	C	20,05	20,25	20,40	20,90	61,00	0,54709
309	16	C	20,90	20,70	20,60	20,60	60,75	0,54926
310	16	C	20,30	20,30	20,25	20,40	60,90	0,52640
311	16	C	20,50	20,60	20,75	21,00	60,40	0,63077
312	16	C	20,80	20,80	20,80	20,25	61,60	0,52257
313	16	C	20,35	20,50	20,55	20,60	60,65	0,49571
314	16	C	20,90	20,90	20,70	20,85	60,60	0,50151
315	16	C	20,80	20,80	20,75	20,60	60,05	0,51916
316	16	C	20,95	21,00	21,10	20,80	60,70	0,46167
317	16	C	20,90	21,00	21,00	21,00	61,30	0,48699
318	16	C	20,65	20,65	20,60	20,75	60,60	0,50369
319	16	C	20,25	20,25	20,40	20,50	60,80	0,53857
320	16	C	20,70	20,70	20,70	20,30	61,20	0,49643

I.1.2. Valores obtenidos en los ensayos

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
1	1	F	2,9663	0,3684	0,6283
2	1	F	2,1784	0,3864	0,7121
3	1	F	2,4846	0,4047	0,7526
4	1	F	2,8464	0,3936	0,7777
5	1	F	2,7829	0,3979	0,7325
6	1	F	2,2460	0,3671	0,6802
7	1	F	2,5287	0,3582	0,7117
8	1	F	2,8816	0,3843	0,7190
9	1	F	2,8606	0,3819	0,7290
10	1	F	2,1133	0,4363	0,7578
11	1	F	2,4692	0,3609	0,6705
12	1	F	2,0074	0,3662	0,6500
13	1	F	2,1858	0,4174	0,7948
14	1	F	2,5771	0,3595	0,7011
15	1	F	2,3184	0,3582	0,6684
16	1	F	2,4179	0,3794	0,6943
17	1	F	2,3027	0,3676	0,6736
18	1	F	2,0119	0,3386	0,6293
19	1	F	2,3959	0,3767	0,6637
20	1	F	2,3588	0,3729	0,7275
21	2	F	3,0029	0,8599	1,2621
22	2	F	3,0809	0,8362	1,1778
23	2	F	3,2964	0,7700	1,2083
24	2	F	3,3423	0,9659	1,4243
25	2	F	3,0934	0,7916	1,2527
26	2	F	2,8151	0,6725	1,1673
27	2	F	2,8840	0,6486	1,0588
28	2	F	3,2029	0,8706	1,3440
29	2	F	3,0556	0,7476	1,2287
30	2	F	3,1279	0,8443	1,3945
31	2	F	3,3236	0,7813	1,4053
32	2	F	3,3758	0,8937	1,2142
33	2	F	2,7967	0,7984	1,2197
34	2	F	3,3738	0,8361	1,3215
35	2	F	3,3875	0,7831	1,4704
36	2	F	3,0630	0,7480	1,0454
37	2	F	3,3096	0,9505	1,4595
38	2	F	3,1760	0,8098	1,3137
39	2	F	3,1246	0,7858	1,3200
40	2	F	3,1771	0,6813	1,1142

Alumno: José Carlos de la Calle Grande
 UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
 Titulación de: Máster en Ingeniería de Montes

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
41	3	F	2,3595	0,8433	1,2456
42	3	F	2,3721	0,8595	1,2535
43	3	F	2,3796	0,8237	1,2813
44	3	F	2,2544	0,6957	1,0526
45	3	F	2,0611	0,6157	1,0247
46	3	F	2,3144	0,8485	1,1496
47	3	F	2,2854	0,7700	1,1702
48	3	F	2,4245	0,7426	1,1766
49	3	F	1,8056	0,5998	0,9280
50	3	F	2,3105	0,8402	1,2197
51	3	F	1,8700	0,5828	0,9340
52	3	F	1,9908	0,5971	0,9534
53	3	F	2,1785	0,7422	1,1321
54	3	F	2,3302	0,7531	1,0967
55	3	F	2,0920	0,5791	0,9738
56	3	F	2,1586	0,7407	1,0785
57	3	F	2,1068	0,7104	1,1617
58	3	F	2,0566	0,5842	0,9178
59	3	F	2,1799	0,7042	1,0393
60	3	F	2,7725	0,7208	1,1127
61	4	C	0,6414	0,5255	0,4956
62	4	C	0,5805	0,4423	0,3913
63	4	C	0,6190	0,5691	0,6915
64	4	C	0,5725	0,4427	0,7460
65	4	C	0,6921	0,5288	0,6069
66	4	C	0,5932	0,4818	0,4984
67	4	C	0,6147	0,5012	0,3841
68	4	C	0,6433	0,4948	0,4475
69	4	C	0,5235	0,4302	0,3446
70	4	C	0,4876	0,4355	0,3025
71	4	C	0,6098	0,5378	0,4527
72	4	C	0,4621	0,4288	0,2578
73	4	C	0,4596	0,4219	0,3347
74	4	C	0,6219	0,4500	0,3725
75	4	C	0,6859	0,4760	0,6018
76	4	C	0,4977	0,4608	0,3704
77	4	C	0,6472	0,5433	0,4984
78	4	C	0,5828	0,4539	0,4150
79	4	C	0,4566	0,4253	0,2458
80	4	C	0,5252	0,4130	0,2585
81	5	F	0,8904	0,5367	0,7369

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
82	5	F	1,0779	0,7026	0,8208
83	5	F	0,6907	0,5347	0,5695
84	5	F	0,6465	0,4789	0,5495
85	5	F	0,6591	0,4827	0,5477
86	5	F	0,8235	0,5200	0,6105
87	5	F	0,8484	0,5503	0,7103
88	5	F	0,8836	0,5461	0,7165
89	5	F	0,8135	0,5315	0,6828
90	5	F	1,0196	0,6219	0,7117
91	5	F	0,8997	0,5655	0,7239
92	5	F	0,8442	0,5795	0,6740
93	5	F	0,8999	0,6158	0,7422
94	5	F	0,9081	0,5764	0,7628
95	5	F	0,8750	0,5786	0,7459
96	5	F	0,9328	0,6313	0,7716
97	5	F	0,8433	0,5420	0,7846
98	5	F	0,8697	0,5688	0,7334
99	5	F	0,6897	0,4904	0,5736
100	5	F	0,8486	0,5537	0,5999
101	6	F	1,0080	0,6187	0,7917
102	6	F	1,0966	0,6646	0,8286
103	6	F	1,0012	0,6342	0,7910
104	6	F	1,0784	0,6344	0,8180
105	6	F	0,9791	0,6410	0,8008
106	6	F	1,1018	0,6597	0,8642
107	6	F	0,8287	0,6233	0,8093
108	6	F	1,0650	0,6791	0,8292
109	6	F	0,9727	0,6235	0,8093
110	6	F	1,1839	0,6725	0,8683
111	6	F	0,9339	0,5944	0,7691
112	6	F	0,9517	0,6280	0,7578
113	6	F	0,9244	0,5986	0,7636
114	6	F	1,1497	0,6855	0,8725
115	6	F	1,2428	0,6923	0,9130
116	6	F	0,9815	0,6279	0,8001
117	6	F	0,7649	0,4259	0,6341
118	6	F	0,9459	0,6391	0,8155
119	6	F	1,0649	0,5952	0,7768
120	6	F	0,8859	0,4802	0,7277
121	7	C	0,7060	0,7831	0,9067
122	7	C	0,7980	0,6585	0,7569

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
123	7	C	0,7463	0,7648	0,9018
124	7	C	0,7399	0,6913	0,8747
125	7	C	0,7525	0,7458	0,9787
126	7	C	0,8409	0,7079	0,9764
127	7	C	0,9696	0,5681	0,7219
128	7	C	1,2687	0,7595	0,9371
129	7	C	1,2805	0,6934	0,9060
130	7	C	1,3639	0,7037	0,9616
131	7	C	1,4381	0,7264	0,9114
132	7	C	1,5070	0,7180	0,9991
133	7	C	1,8175	0,8059	1,0719
134	7	C	1,2566	0,6761	0,9041
135	7	C	1,1717	0,6356	0,8242
136	7	C	1,1572	0,6794	0,8048
137	7	C	1,1538	0,6598	0,8504
138	7	C	1,0184	0,6521	0,8575
139	7	C	1,2969	0,6284	0,8767
140	7	C	0,8804	0,6035	0,7087
141	8	C	0,8422	0,5672	0,7183
142	8	C	0,6416	0,6333	0,5365
143	8	C	0,7079	0,4558	0,5906
144	8	C	0,9107	0,4998	0,5843
145	8	C	0,7168	0,5095	0,6466
146	8	C	0,6502	0,4369	0,5972
147	8	C	0,8594	0,4660	0,5565
148	8	C	0,9188	0,5116	0,6740
149	8	C	0,8013	0,5395	0,6871
150	8	C	0,8021	0,5369	0,6688
151	8	C	0,7996	0,5037	0,6330
152	8	C	0,6932	0,5383	0,6908
153	8	C	0,8636	0,4814	0,6440
154	8	C	0,8468	0,5424	0,6570
155	8	C	0,7367	0,4253	0,5761
156	8	C	0,7990	0,5655	0,6621
157	8	C	0,6474	0,4530	0,5751
158	8	C	0,6621	0,4080	0,5454
159	8	C	0,6849	0,5175	0,5986
160	8	C	0,7514	0,4992	0,5590
161	9	F	1,0949	0,5256	0,7623
162	9	F	1,2959	0,6159	0,8483
163	9	F	1,0936	0,5336	0,7811

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
164	9	F	1,3540	0,7549	0,9581
165	9	F	1,3220	0,6426	0,8363
166	9	F	1,3120	0,7512	1,0065
167	9	F	1,1675	0,5736	0,8050
168	9	F	1,1194	0,5912	0,8386
169	9	F	1,1822	0,5443	0,8103
170	9	F	1,1767	0,5768	0,8655
171	9	F	1,2105	0,6235	0,8336
172	9	F	1,0938	0,5281	0,7923
173	9	F	1,0482	0,5309	0,7776
174	9	F	1,3027	0,7081	0,9386
175	9	F	1,2608	0,5857	0,8401
176	9	F	1,3006	0,6558	0,9105
177	9	F	1,3864	0,7112	0,9862
178	9	F	1,3014	0,7359	0,9463
179	9	F	1,2348	0,6991	0,9295
180	9	F	1,1915	0,6264	0,8564
181	10	F	2,4220	0,9368	1,2535
182	10	F	2,4762	1,0584	1,4754
183	10	F	2,6693	0,8636	1,3743
184	10	F	2,4074	0,8872	1,2820
185	10	F	2,4869	0,8281	1,2863
186	10	F	2,2820	0,8216	1,1856
187	10	F	2,7414	0,9012	1,2666
188	10	F	2,5503	0,7945	1,1914
189	10	F	1,9809	0,6991	1,1500
190	10	F	2,0898	0,7984	1,2079
191	10	F	2,2100	0,9482	1,3418
192	10	F	2,1059	0,7719	1,2789
193	10	F	2,0261	0,6838	1,0552
194	10	F	2,2352	0,9162	1,3810
195	10	F	2,0314	0,8137	1,1909
196	10	F	2,2318	0,7644	1,2375
197	10	F	2,0183	0,8990	1,2439
198	10	F	2,0306	0,8321	1,2909
199	10	F	2,1698	0,8236	1,1806
200	10	F	2,0700	0,8574	1,2971
201	11	C	0,8831	0,7641	0,7019
202	11	C	0,9639	0,7292	0,9101
203	11	C	1,4040	0,7681	0,9919
204	11	C	1,2170	0,7852	1,0004

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
205	11	C	1,1227	0,6822	0,8641
206	11	C	1,7017	0,8116	1,0655
207	11	C	1,1175	0,5004	0,7846
208	11	C	1,6287	0,8362	1,1364
209	11	C	1,4244	0,8402	1,1272
210	11	C	1,4335	0,7139	1,0552
211	11	C	1,0124	0,6265	0,8195
212	11	C	0,9599	0,6188	0,8477
213	11	C	0,8446	0,6763	0,9035
214	11	C	0,9836	0,6991	0,8477
215	11	C	1,0423	0,7359	0,9305
216	11	C	1,0214	0,4916	0,7752
217	11	C	0,7119	0,5453	0,6482
218	11	C	0,7180	0,5923	0,5938
219	11	C	0,5954	0,4779	0,4346
220	11	C	0,8907	0,6589	0,8904
221	12	F	1,9085	0,7999	1,1254
222	12	F	1,7672	0,6922	1,0306
223	12	F	1,7058	0,5756	0,9765
224	12	F	1,7454	0,6373	1,0358
225	12	F	1,5951	0,6762	1,0378
226	12	F	1,7421	0,7095	1,0372
227	12	F	1,7726	0,7385	1,1018
228	12	F	1,8455	0,6920	1,0895
229	12	F	1,6309	0,6793	1,0022
230	12	F	1,8555	0,7681	1,1272
231	12	F	1,7613	0,6997	1,0749
232	12	F	1,8989	0,7794	1,0915
233	12	F	1,9223	0,7763	1,1693
234	12	F	1,7629	0,7029	1,0791
235	12	F	1,9036	0,7477	1,1109
236	12	F	1,6733	0,5778	0,9182
237	12	F	1,6549	0,5331	0,9468
238	12	F	1,9198	0,8678	1,2197
239	12	F	2,1377	0,8337	1,2750
240	12	F	2,1994	0,6616	0,9943
241	13	F	2,9876	0,8578	1,3845
242	13	F	3,0310	0,6885	1,0570
243	13	F	3,4365	0,8217	1,2778
244	13	F	3,6333	1,0418	1,5871
245	13	F	3,0714	0,9388	1,3888

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
246	13	F	2,9669	0,8925	1,3083
247	13	F	3,6864	0,8900	1,3635
248	13	F	2,9111	1,0304	1,5054
249	13	F	2,6474	0,8706	1,3551
250	13	F	3,6763	0,7737	1,2031
251	13	F	3,7319	0,9273	1,3744
252	13	F	3,3383	0,9904	1,6028
253	13	F	3,2679	0,8043	1,3958
254	13	F	3,5568	1,1183	1,6339
255	13	F	2,5596	0,6984	1,0463
256	13	F	3,2575	0,9850	1,4263
257	13	F	3,1393	0,8353	1,4074
258	13	F	2,9967	0,9228	1,3328
259	13	F	3,5276	0,9148	1,3974
260	13	F	3,0740	0,7644	1,1376
261	14	C	1,2435	0,6416	0,9045
262	14	C	1,5160	0,5671	0,8921
263	14	C	1,4899	0,7115	1,0531
264	14	C	1,3744	0,6410	0,9035
265	14	C	1,2210	0,5546	0,8517
266	14	C	1,5648	0,5974	1,0225
267	14	C	1,8799	0,8629	1,2496
268	14	C	1,1013	0,4603	0,7684
269	14	C	1,6446	0,8423	1,2083
270	14	C	1,8810	0,6756	0,9320
271	14	C	1,7464	0,6939	0,8901
272	14	C	1,4139	0,5608	0,8557
273	14	C	1,2197	0,5894	0,9386
274	14	C	1,0965	0,5646	0,9115
275	14	C	1,1115	0,6268	0,8620
276	14	C	0,9006	0,5380	0,7186
277	14	C	1,0672	0,5581	0,7740
278	14	C	1,0662	0,5772	0,8462
279	14	C	1,2961	0,7270	0,9401
280	14	C	1,1119	0,5709	0,7721
281	15	F	5,0360	0,9647	1,4865
282	15	F	3,4028	0,8301	1,3232
283	15	F	3,8763	0,7644	1,3052
284	15	F	4,8221	1,0583	1,5143
285	15	F	4,7294	1,0180	1,5716
286	15	F	4,0682	0,9875	1,5071

Tabla I.2 Valores para los ensayos de dureza (Cont.)

Nº	ESPECIE	TIPO	DUREZA 2mm (kN/cm ³)	DUREZA 1kN (kN/cm ³)	DUREZA 2kN (kN/cm ³)
287	15	F	4,2816	0,8058	1,4312
288	15	F	4,1338	0,8744	1,4263
289	15	F	3,8543	0,8968	1,4332
290	15	F	3,6553	0,7756	1,2591
291	15	F	4,4004	1,0384	1,4600
292	15	F	4,2985	0,9345	1,2739
293	15	F	5,0465	0,9754	1,4611
294	15	F	4,1943	0,8723	1,1637
295	15	F	4,5429	0,8337	1,2558
296	15	F	4,7244	0,9055	1,5526
297	15	F	4,0244	0,8925	1,3710
298	15	F	5,1440	1,0764	1,5968
299	15	F	4,3566	0,9323	1,4332
300	15	F	4,4018	1,0609	1,5999
301	16	C	0,7138	0,5153	0,6522
302	16	C	0,6260	0,4428	0,4564
303	16	C	1,4607	0,6533	0,8950
304	16	C	0,9864	0,6025	0,7883
305	16	C	0,7359	0,7820	0,9098
306	16	C	1,2075	0,6173	1,0142
307	16	C	1,1042	0,7608	0,9214
308	16	C	0,8607	0,6489	0,7346
309	16	C	1,1124	0,5176	0,7936
310	16	C	0,8120	0,6218	0,7819
311	16	C	1,6079	0,6822	0,6366
312	16	C	0,8204	0,5188	0,5096
313	16	C	0,6078	0,5302	0,4746
314	16	C	0,8849	0,6495	0,7450
315	16	C	1,0285	0,4885	0,6664
316	16	C	0,6068	0,4838	0,5060
317	16	C	0,7176	0,5251	0,4850
318	16	C	0,6870	0,5083	0,5717
319	16	C	1,0539	0,6005	0,8081
320	16	C	0,6582	0,5450	0,5295

I.2 Comparación de modelos alternos

En este apartado se muestran los coeficientes de correlación así como los valores de R-cuadrado de otros modelos de regresión alternos a la regresión lineal utilizada en el estudio.

I.2.1. Comparación entre ensayos

I.2.1.1. Dureza 2mm – Dureza 1kN

Tabla I.3 Modelos alternativos para Dureza 2mm-Dureza 1kN

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8643	74,70%
Multiplicativa	0,8634	74,54%
Exponencial	0,8615	74,22%
Raíz Cuadrada de Y	0,8541	72,95%
Inversa-Y Log-X	-0,8515	72,50%
Curva S	-0,8505	72,34%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,8495	72,17%
Log-Y Cuadrado-X	0,8450	71,40%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8436	71,17%
Cuadrado de X	0,8380	70,23%
Lineal	0,8315	69,13%
Raíz Cuadrada de X	0,8226	67,66%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,8188	67,05%
Logaritmo de X	0,8101	65,62%
Cuadrado Doble	0,7823	61,20%
Inversa de X	-0,7754	60,13%
Cuadrado de Y	0,7586	57,54%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,7417	55,01%
Cuadrado-Y Log-X	0,7218	52,10%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,6746	45,50%
Inversa de Y	<sin ajuste>	
Raíz Cuadrada Doble	<sin ajuste>	
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Doble Inverso	<sin ajuste>	
Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

I.2.1.2. Dureza 2mm – Dureza 2kN

Tabla I.4 Modelos alternativos para Dureza 2mm-Dureza 2kN

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Exponencial	0,9465	89,58%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9371	87,82%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9343	87,28%
Log-Y Cuadrado-X	0,9336	87,15%
Raíz Cuadrada de Y	0,9259	85,73%
Cuadrado de X	0,9161	83,92%

Tabla I.4 Modelos alternativos para Dureza 2mm-Dureza 2kN (Cont.)

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Multiplicativa	0,9119	83,16%
Doble Inverso	0,9007	81,13%
Lineal	0,8893	79,09%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8730	76,22%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8676	75,27%
Raíz Cuadrada deX	0,8587	73,74%
Cuadrado Doble	0,8421	70,91%
Logaritmo de X	0,8128	66,06%
Curva S	-0,8025	64,40%
Cuadrado de Y	0,7904	62,48%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,7488	56,07%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,7383	54,51%
Cuadrado-Y Log-X	0,6941	48,18%
Inversa de X	-0,6713	45,06%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,5470	29,92%
Inversa de Y	<sin ajuste>	
Raíz Cuadrada Doble	<sin ajuste>	
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Inversa-Y Log-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

I.2.1.3. Dureza 1kN – Dureza 2kN

Tabla I.5 Modelos alternativos para Dureza 1kN-Dureza 2kN

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Cuadrado Doble	0,9318	86,82%
Cuadrado de X	0,9281	86,13%
Raíz Cuadrada de Y	0,9266	85,86%
Lineal	0,9250	85,56%
Exponencial	0,9244	85,46%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9203	84,70%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9183	84,32%
Raíz Cuadrada Doble	0,9150	83,73%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,9139	83,52%
Cuadrado de Y	0,9107	82,94%
Inversa de Y	-0,9090	82,64%
Log-Y Cuadrado-X	0,9087	82,58%
Raíz Cuadrada deX	0,9082	82,48%
Multiplicativa	0,8974	80,53%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8885	78,94%

Tabla I.5 Modelos alternativos para Dureza 1kN-Dureza 2kN (Cont.)

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,8842	78,19%
Logaritmo de X	0,8763	76,79%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8750	76,57%
Cuadrado-Y Log-X	0,8429	71,05%
Doble Inverso	0,8294	68,80%
Curva S	-0,7990	63,85%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,7799	60,82%
Inversa de X	-0,7584	57,52%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7100	50,41%
Inversa-Y Log-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

I.2.2. Correlación dureza - densidad

I.2.2.1. Correlación dureza 2mm y densidad

Tabla I.6 Modelos alternativos para Dureza 2mm y densidad

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Cuadrado de X	0,9700	94,09%
Raíz Cuadrada de Y	0,9666	93,43%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9643	93,00%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9600	92,17%
Exponencial	0,9575	91,69%
Multiplicativa	0,9556	91,31%
Lineal	0,9553	91,26%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9441	89,14%
Raíz Cuadrada de X	0,9388	88,14%
Log-Y Cuadrado-X	0,9373	87,86%
Cuadrado Doble	0,9291	86,32%
Curva S	-0,9223	85,06%
Inversa-Y Log-X	-0,9201	84,66%
Logaritmo de X	0,9150	83,71%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,8903	79,26%
Cuadrado de Y	0,8882	78,89%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,8590	73,79%
Inversa de X	-0,8445	71,32%
Cuadrado-Y Log-X	0,8233	67,78%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7338	53,85%
Inversa de Y	<sin ajuste>	
Raíz Cuadrada Doble	<sin ajuste>	

Tabla I.6 Modelos alternativos para Dureza 2mm y densidad (Cont.)

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Doble Inverso	<sin ajuste>	
Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

I.2.2.2. Correlación dureza1kNm y densidad

Tabla I.7 Modelos alternativos para Dureza 1kN y densidad.

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Multiplicativa	0,8061	64,98%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8050	64,80%
Raíz Cuadrada Doble	0,8036	64,58%
Doble Inverso	0,8032	64,51%
Raíz Cuadrada deX	0,8025	64,40%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8014	64,22%
Logaritmo de X	0,8006	64,10%
Lineal	0,7991	63,86%
Inversa-Y Log-X	-0,7987	63,79%
Raíz Cuadrada de Y	0,7971	63,54%
Curva S	-0,7965	63,44%
Cuadrado de Y	0,7930	62,88%
Exponencial	0,7918	62,69%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,7905	62,48%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,7885	62,17%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,7873	61,99%
Cuadrado Doble	0,7859	61,76%
Cuadrado-Y Log-X	0,7825	61,23%
Cuadrado de X	0,7815	61,07%
Inversa de X	-0,7775	60,45%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,7741	59,92%
Inversa de Y	-0,7716	59,54%
Log-Y Cuadrado-X	0,7634	58,27%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7474	55,87%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,7330	53,73%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

I.2.2.3. Correlación dureza 2kN y densidad

Tabla I.8 Modelos alternativos para Dureza 2kN y densidad

Modelo	Coefficiente de correlación	R-cuadrado
Logaritmo de X	0,9009	81,16%
Raíz Cuadrada de X	0,8981	80,66%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8966	80,39%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,8958	80,25%
Curva S	-0,8947	80,05%
Cuadrado de Y	0,8939	79,91%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,8917	79,51%
Lineal	0,8894	79,10%
Raíz Cuadrada Doble	0,8867	78,62%
Inversa de X	-0,8846	78,26%
Cuadrado Doble	0,8833	78,03%
Cuadrado-Y Log-X	0,8828	77,93%
Multiplicativa	0,8782	77,13%
Raíz Cuadrada de Y	0,8716	75,97%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8607	74,08%
Cuadrado de X	0,8602	73,99%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,8421	70,91%
Exponencial	0,8390	70,40%
Doble Inverso	0,8385	70,31%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,8322	69,25%
Log-Y Cuadrado-X	0,7895	62,33%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,7557	57,10%
Inversa de Y	-0,7223	52,17%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,6566	43,11%
Inversa-Y Log-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	