

**SERIE**

FO: DP/CHI/83/017  
DOCUMENTO DE TRABAJO N° 25

INVESTIGACION Y DESARROLLO DE AREAS SILVESTRES  
EN ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS

CORPORACION NACIONAL FORESTAL

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS  
PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION

ESTUDIO SOBRE EL SECADO Y ALGUNAS PROPIEDADES  
DE TRABAJABILIDAD Y USOS DE LA MADERA DE ALGARROBO,  
ESPINO Y TAMARUGO

Misael Gutiérrez D.  
Tomás Karsulovic C.  
Patricio Torres G.  
Adolfo León G.

Santiago - Chile  
1989

FAO/616# 288547

## PROLOGO

Históricamente en Chile, la madera del bosque nativo de zonas áridas y semiáridas se ha utilizado principalmente como combustible, dado sus cualidades energéticas. Sin embargo, esta madera, tiene un uso potencial dirigido hacia la confección de piezas o elementos menores de aplicación industrial, aprovechando las características físicas, mecánicas y estructurales de algunas especies con buenas aptitudes como son el Tamarugo (Prosopis tamarugo), Algarrobo (Prosopis chilensis) y Espino (Acacia caven).

La publicación de este documento permite conocer el comportamiento de la madera de las especies seleccionadas, frente a condiciones y programas de secado, procesos mecánicos de elaboración y fabricación de piezas o elementos para usos especiales, caracterizando además el comportamiento en servicio de estos elementos.

Los autores del presente documento son los señores M. Gutiérrez, T. Karsulovic, A. León y P. Torres, docentes de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Chile, a quienes el Proyecto les agradece su aporte.

JAIMÉ LATORRE ALONSO  
DIRECTOR PROYECTO  
CHI/83/017

## RESUMEN

Las especies algarrobo (Prosopis algarrobo), tamarugo (Prosopis tamarugo) y espino (Acacia caven) fueron estudiadas analizando su respuesta a procesos de secado, trabajabilidad y su uso en la fabricación de diferentes elementos mecánicos.

Desde el punto de vista del secado de madera dimensionada tanto al aire como en horno los resultados pueden considerarse como exitosos en las especies algarrobo y tamarugo, presentando ambas especies defectos mínimos, especialmente en el algarrobo, abriendo de esta manera, las posibilidades de usos alternativos. El espino en cambio, no dió los resultados esperados, constituyéndose en una especie de difícil secado (refractaria) con defectos inaceptables que hacen imposible su utilización.

En el secado de rodelas sólo el algarrobo respondió a las expectativas esperadas con resultados sorprendentes al no detectarse defecto alguno de rajaduras radiales, lo cual demuestra las buenas características físicas de esta especie.

Por otra parte, el estudio de trabajabilidad resultó ser excelente (terminación de las superficies) en el torneado del tamarugo y espino, no así en el algarrobo que se caracterizó por un fuerte desgarramiento de las fibras.

El cepillado no fue óptimo, obteniéndose en las tres especies zonas de excelente calidad y otras distorsionadas por la presencia de fibras en contra sentido.

Los procesos de lijado y fresado dieron buenos resultados con terminaciones suaves y lustrosas. Similar comportamiento se tiene en el taladrado, determinándose además los esfuerzos de penetración donde los valores mayores se detectaron en el tamarugo.

Otros ensayos sobre trabajabilidad como es el aserrado de las tres especies en condiciones verdes y secas fueron incluidos, determinándose una calidad de corte sólo aceptable en el aserrado en verde, presentando la superficie una textura no lo suficientemente suave y pareja en contraste con el dimensionado en condiciones secas, lo cual fue excelente por la calidad de la superficie.

En relación a la fabricación de elementos de transmisión y de fijación, puede establecerse que en general todas las piezas construídas tales como bujes, poleas planas, poleas en V y ejes, presentaron buenas condiciones en su fabricación donde fundamentalmente se utilizó el torneado. Sólo en el caso de los

engranajes se observó una situación negativa en la cual los dientes de ciertas zonas de la periferia relacionado con la dirección de la fibra produce un desmembramiento del diente.

En estas apreciaciones generales son válidos los resultados de trabajabilidad que dicen relación con la calidad de la superficie.

No obstante lo anterior, los ensayos realizados para evaluar la aptitud de estos elementos de transmisión no dieron el éxito esperado, limitado fundamentalmente por su resistencia mecánica.

En efecto, se determinó que las poleas cumplen bien su cometido en transmisiones livianas de baja y mediana potencia, mientras que los ejes de tamarugo pueden ser empleados en rangos similares sin la existencia de sobrecargas repetitivas.

Por otra parte, los engranajes y bujes fabricados de tamarugo y algarrobo no mostraron un buen comportamiento, no siendo aconsejable en principio, la utilización de estas especies. Mayor opción presentaría el tamarugo en aplicaciones de potencias menores.

Los ensayos mecánicos de elementos de fijación, específicamente de chavetas longitudinales, tarugos, lamelos y lenguetas, fueron exitosos, aconsejándose su uso para los fines a que son destinados.

Se descartó el uso del espino en la fabricación de elementos de transmisión y de fijación por las dificultades en el secado, bajo aprovechamiento de la madera y el ataque intenso de insectos.

## INDICE

	Pág.
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	2
2. REVISION BIBLIOGRAFICA .....	4
2.1 Prosopis chilensis (algarrobo) .....	4
2.2 Acacia caven (espino) .....	6
2.3 Prosopis tamarugo (tamarugo) .....	7
3. MUESTREO DE LAS ESPECIES A ESTUDIAR Y PREPARACION DEL MATE- RIAL (ASERRADO) .....	10
3.1 Muestreo de las especies algarrobo y tamarugo .....	10
3.2 Muestreo de la especie espino .....	11
3.3 Preparación del material .....	12
CAPITULO I	
PROCESO DE SECADO NATURAL Y ARTIFICIAL DE LAS ESPECIES TAMA- RUGO, ALGARROBO Y ESPINO .....	13
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	13
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	13
2.1 Proceso de secado natural .....	13
2.2 Proceso de secado al horno .....	16
2.3 Determinación del contenido de humedad, densidad básica y contracción .....	18
3. DISCUSION DE RESULTADOS .....	19
3.1 Proceso de secado al aire .....	19
3.2 Proceso de secado al horno .....	21
3.3 Contenido de humedad, densidad básica y contracción....	25
4. CONCLUSIONES .....	25
CAPITULO II	
ESTUDIO DE TRABAJABILIDAD .....	27
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	27
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	29

INDICE

	Pág.
2.1 Descripción general .....	29
2.2 Requerimientos generales y selección de muestras .....	30
2.3 Muestreo y dimensiones de probetas .....	31
2.4 Procedimiento de ensayo y variables de proceso .....	32
2.5 Herramientas y equipos empleados .....	34
2.6 Procedimientos de evaluación .....	35
3. PRESENTACION DE RESULTADOS .....	38
3.1 Cepillado .....	38
3.2 Taladrado .....	43
3.3 Lijado .....	45
3.4 Torneado .....	46
3.5 Fresado .....	48
3.6 Aserrado en verde y dimensionado en seco .....	49
4. ANALISIS DE RESULTADOS .....	49
4.1 Cepillado .....	49
4.2 Taladrado .....	50
4.3 Torneado .....	51
4.4 Fresado .....	51
5. CONCLUSIONES .....	52
CAPITULO III	
FABRICACION Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS MECANICOS DE MADERA	
DE ALTA DENSIDAD PARA USOS ESPECIALES .....	
	55
FABRICACION DE ELEMENTOS MECANICOS .....	
	55
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	55
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	57
3. RESULTADOS Y DISCUSION .....	61
COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS MECANICOS .....	64
ESTUDIO DE ELEMENTOS DE TRANSMISION .....	64
A. COJINETES DE DESLIZAMIENTO .....	64
1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	64
2. RESULTADOS Y DISCUSION .....	66
3. CONCLUSIONES .....	67

	Pág.
B. EJES DE TRANSMISION .....	68
1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	68
2. RESULTADOS Y DISCUSION .....	69
3. CONCLUSIONES .....	70
C. POLEAS DE CORREAS PLANAS Y TRAPEZOIDALES .....	70
1. METODOLOGIA .....	70
2. RESULTADOS Y DISCUSION .....	71
3. CONCLUSIONES .....	73
D. ENGRANAJES CILINDRICOS DE DIENTES RECTOS .....	73
1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	73
2. RESULTADOS Y DISCUSION .....	74
3. CONCLUSIONES .....	74
E. ESTUDIO DE ELEMENTOS DE FIJACION .....	75
A. CHAVETAS LONGITUDINALES .....	75
1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	75
2. RESULTADOS .....	75
3. CONCLUSION .....	75
B. CONECTORES PARA MADERA: TARUGOS, LAMELOS Y LENGUETAS ....	75
1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	75
2. RESULTADOS Y DISCUSION .....	76
3. CONCLUSIONES .....	76
F. BIBLIOGRAFIA .....	77

## INTRODUCCION

Se tiene limitada información sobre los usos potenciales de la madera de zonas áridas y semiáridas dirigido hacia la confección de piezas o elementos menores de aplicación industrial, aprovechando las características físicas, mecánicas y estructurales de algunas especies aparentemente con buenas aptitudes como son el Tamarugo (Prosopis tamarugo), Algarrobo (Prosopis chilensis) y el Espino (Acacia caven). Mas bien se citan aplicaciones tradicionales y sugerencias de uso como son la confección de adornos artesanales, elementos para la industria textil y la agricultura, y su aprovechamiento como combustible dada sus cualidades energéticas.

Por otra parte, también es completamente desconocido la disposición de estas especies frente a procesos de tanta importancia como es el secado, que en la práctica define en gran medida las posibilidades de su aplicación a un nivel industrial. También se desconoce su conducta frente a diferentes tipos de transformación para su potencial uso como es el caso del corte de las piezas, cepillado, torneado, taladrado, moldurado y lijado.

Una información sobre los puntos anteriores, permite aportar con antecedente de tipo tecnológico en la decisión de repoblar en forma masiva dichas zonas y abrir al mismo tiempo la posibilidad de desarrollar una actividad industrial con perspectivas de interés.

Dentro de la búsqueda de aplicaciones potenciales, debe tenerse presente fundamentalmente la disponibilidad del recurso, productividad del bosque, aprovechamiento de los individuos dada su forma de crecimiento y costo de su explotación. En consecuencia, se debe actuar con gran criterio de racionalidad en los posibles usos, selección de piezas o elementos que cumpliendo con el requisito de ser útiles, impliquen un alto aprovechamiento de la madera, un costo de transformación aceptable y una utilidad agregada que justifique su construcción y la decisión de su explotación.

Finalmente, el proyecto presenta como característica esencial, la "experimentación" en todas las etapas de su desarrollo, contribuyendo de esta manera y en una forma efectiva, a un mayor conocimiento tecnológico y posibles usos de las principales especies de las zonas áridas y semiáridas de Chile.

## 1. ANTECEDENTES GENERALES

Considerando los antecedentes antes expuestos, referido a la madera de las especies Prosopis tamarugo (tamarugo), Prosopis chilensis (algarrobo) y Acacia caven (espino), se define para este estudio los siguientes objetivos específicos:

- Investigación del comportamiento de la madera de las especies seleccionadas, frente a condiciones de secado, y establecer los niveles óptimos de las variables de proceso, de los programas que resulten más adecuados.
- Evaluación de las propiedades y características de trabajabilidad de estas maderas, en relación a algunos de los procesos mecánicos de elaboración de mayor aplicación en la industria tradicional.
- Determinación de la posibilidad técnica de fabricación con estas maderas, de piezas o elementos para usos especiales. A la vez, caracterizar el comportamiento en servicio de dichos elementos.

El proyecto presenta tres etapas técnicas bien definidas, común para las tres especies establecidas en la introducción.

En la primera parte se lleva a cabo un estudio sobre el proceso de secado tanto natural como artificial, obteniéndose información sobre la velocidad de secado, cuantificación de los defectos típicos del proceso y la determinación de algunas propiedades físicas como densidad, contracción en el ancho y espesor de las piezas y el contenido de humedad en condiciones verdes.

En esta primera parte del estudio se hace uso de equipos de secado a nivel de laboratorio y semi-industrial, donde las variables del proceso, fundamentalmente la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa, son investigadas bajo condiciones similares al de un nivel industrial.

Se experimentó con madera dimensionada en escuadría de 75 x 75 mm y de 50 x 50 mm, dado el hecho que las diferentes piezas a fabricar se obtienen de estas dimensiones. Estas condiciones de medidas son de mayor dificultad de secar. Sin embargo resultan apropiadas para los objetivos establecidos.

Por otro lado, en el estudio correspondiente a la segunda etapa del proyecto se llevaron a cabo diferentes pruebas de trabajabilidad como torneado, taladrado, cepillado, aserrado, fresado y lijado.

Estos procesos corresponden también a la trabajabilidad necesaria para transformar la madera en piezas industriales. Se utilizó, en la experimentación, maquinarias disponibles en el Departamento de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Chile y otras solicitadas especialmente a talleres mecánicos en Santiago.

Finalmente se tiene una última etapa correspondiente a la fabricación de diversas piezas de transmisión, sujeción y otras como poleas, ejes, descansos, engranajes, chavetas en general y zapatas.

Incluye este estudio una cuantificación de la eficiencia de los diferentes casos, entregándose antecedentes técnicos de estas piezas en servicio.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Prosopis chilensis (algarrobo)

La especie nativa chilena "Prosopis chilensis", denominada comúnmente "algarrobo", constituye una de las dos especies de mayor interés existente en la zona desértica del norte de Chile.

En el siglo pasado, extensas zonas que se extendían en una superficie de alrededor del millón de hectáreas estaban cubiertas por algarrobo y tamarugo.

Como en el caso del tamarugo, fue explotada en forma intensiva dadas las necesidades de combustibles para la alimentación de industrias de la zona, uso doméstico y como combustible para los barcos en el litoral del norte (6, 7).

Esta especie pertenece a la familia de las leguminosas, ampliamente distribuidas en el orbe, contando con un número de géneros entre 550 a 600 y de 13.000 a 18.000 especies de acuerdo a diferentes autores (11, 35), correspondiéndole al algarrobo el género Prosopis.

Sus principales características desde el punto de vista de su hábitat, lo hacen resistente a regiones secas desprovistas prácticamente de agua, suelos más bien pobres y salinos sujetos a fuertes cambios de temperatura y humedad relativa durante el día.

Se describe como una especie de altura más bien baja con presencia de ramificaciones caracterizado por un fuste corto y tortuoso, no siendo usual obtener trozas rectas que superen los 2 metros.

La importancia de la gran mayoría de las leguminosas se encuentra en sus posibilidades de ser fuentes de alimentación y de forraje para ganado como así también maderables (4, 5, 15) para diferentes usos. Por otro lado, la presencia de extraíbles lo llevan a constituirse en excelentes fuentes de obtención de productos derivados tales como gomas, colorantes, estimulantes, resinas y compuestos medicinales.

En el caso específico del algarrobo en Chile, dada la limitada disponibilidad del recurso, largo útil y forma del fuste, no permite una explotación maderable a nivel industrial. Sin embargo, sus características físicas y mecánicas lo hacen potencialmente interesante para ciertos usos industriales caracterizados por piezas de dimensiones menores.

Una abundante información es posible encontrar en la bibliografía en relación a sus características fisiológicas y condiciones edáficas en

que crece, descripción macroscópica de la especie, aprovechamiento como alimento de ganado, y conocimientos botánicos en general, en contraste con la escasa información disponible sobre conocimientos tecnológicos, basados en la experimentación. Sin embargo, algunos estudios han establecido que la albura del algarrobo es muy permeable, en cambio el duramen presenta características de una baja permeabilidad (12), lo que podría sugerir facilidades y dificultades respectivamente en procesos de secado e impregnación, no encontrándose información en relación al tiempo de secado y grado de defecto de la especie. En todo caso, pueden establecerse posibles tendencias de su comportamiento dada su característica de ser una especie de densidad media a alta (15, 22).

De acuerdo a estudios realizados por Woodson y Mc Millin (38) sobre la calidad de la terminación de la superficie, influyen diferentes factores según sea el tipo de maquinado. Es así como las características geométricas de la herramienta de corte, son de gran importancia en el cepillado, aserrado, torneado y moldurado, principalmente en relación al ángulo de corte y de incidencia que se emplee como así también la velocidad de corte y de avance de la madera (1, 24, 25, 27).

Por otro lado, factores de tipo anatómico como es la dirección de la fibra, influye también en el esfuerzo de corte, afectando al mismo tiempo su terminación y presencia de defectos no deseables (23, 24, 26).

El taladrado es otra operación técnica de importancia en la transformación física de la madera, donde los esfuerzos de penetración y torque generados, conjuntamente con la calidad de la terminación de la superficie, están influenciados por factores tales como el diámetro de la broca, tipo de herramienta, velocidad de corte, preparación de la arista de corte, dirección del grano, contenido de humedad, profundidad de la perforación y espesor de viruta (13, 26).

Los esfuerzos de penetración antes dicho, no presentan diferenciación significativa en los sentidos tangencial y radial, estableciéndose además que son menores dichos esfuerzos en sentido transversal que en el sentido longitudinal.

Por otra parte, mirado desde el punto de vista de la densidad de la madera que está en relación directa con su resistencia y dureza, presenta una tendencia a un mejoramiento de su calidad superficial cuando mayor es su densidad, favoreciendo de esta manera a las especies que se desarrollan en las zonas áridas o semiáridas.

Otro tipo de trabajabilidad de gran importancia, lo constituye el torneado, no existiendo información alguna sobre la especie algarrobo por estar inserta en cualquier proceso de transformación física para obtener piezas circulares (ejes, bujes, poleas, etc.).

En esta operación, los factores que influyen en el esfuerzo de corte y calidad de la terminación superficial son principalmente la preparación de la herramienta de corte (diferentes ángulos), velocidad de corte, velocidad de avance, densidad de la madera, diámetro de la pieza, dirección del grano y el contenido de humedad (27).

## 2.2 Acacia caven (espino)

El espino pertenece al orden de las leguminosas, de la familia Mimosaceae. Es una microfanerófita que se desarrolla en forma arbustiva o también como un pequeño árbol con una altura máxima de unos 6 m, correspondiéndole al fuste una altura no mayor a los 2 m, con forma recta y una corteza de color pardo oscuro. Forman masas puras, con espacios amplios entre individuos.

Su hábitat se extiende desde el río Copiapó hasta Concepción, abarcando la zona central y los contrafuertes de la cordillera de Los Andes y de la costa (34).

Desde un punto de vista macroscópico, su madera presenta una diferencia muy marcada entre albura y duramen, con una coloración blanco-amarillento y un castaño rojizo respectivamente, siendo su textura heterogénea con fibras entrelazadas y oblicuas (7).

Su utilización potencial no sólo es interesante desde un punto de vista de su madera, la cual es aprovechable en la industria del carbón, y en la producción de leña sino que también en su aspecto atractivo, utilizándose en la fabricación de artículos decorativos (28, 32). Por otro lado, la gran dureza y resistencia a la degradación que presenta, permite aprovecharlo en postes para cerco.

Como en el caso de las otras especies en estudio (algarrobo y tamarugo), no existe información alguna sobre procesos de secado al aire y artificial (18) que indiquen tiempos de secado haciendo referencias a especies similares. En todo caso, es conocido el hecho que el espino en Chile presenta fuertes deformaciones, rajaduras y grietas en el secado natural, con tiempos largos de exposición para lograr el contenido de humedad de equilibrio correspondiente al medio.

De igual manera, no se conocen antecedentes sobre trabajabilidad del espino en Chile, sin embargo puede establecerse que dada su alta

densidad y dureza se requieren esfuerzos de corte mayores que las especies tradicionales. Información sobre la calidad de la superficie trabajada son desconocidas.

Estudios realizados en Nueva Zelandia (18) en relación a procesos de secado al aire y artificial para la especie Acacia melanoxylon R Br (Australian blackwood) originaria del sureste de Australia y Tasmania, mostraron un excelente comportamiento frente a condiciones drásticas de temperatura que alcanzaban los 75°C.

Sin embargo, estos resultados bajo el mismo programa para la especie Acacia caven posiblemente no serían los mismos dadas las grandes diferencias en sus propiedades físicas. La especie presenta un contenido de humedad cercano al 100% y su densidad básica es de 0,58 g/cm<sup>3</sup>.

Tiempos de 5 a 7 meses eran necesarios para lograr en un secado natural un contenido de humedad final de un 30% (espesor de 50 mm).

En cambio en el secado artificial para el mismo espesor, es de 8 a 10 días a partir de un 35% de contenido de humedad inicial y de un 20% final.

### 2.3 Prosopis tamarugo (tamarugo)

El tamarugo es una especie que crece en forma natural en uno de los desiertos más áridos del mundo, en la Pampa del Tamarugal, perteneciente a la familia Leguminosae, sub-familia Mimosaceae, género Prosopis (5, 15, 17, 36).

Es un árbol de tamaño mediano, que alcanza un promedio de 12 a 18 m de altura y 0,5 a 0,8 m de diámetro (15, 29). Los troncos son sinuosos, cubiertos por una corteza gruesa y rugosa de color pardo oscuro, presentando ramificaciones cerca de la base (15, 29, 36).

El tamarugo puede desarrollarse en condiciones que para otras especies resultarían letales, como son las que presenta el ecosistema del desierto de la Pampa del Tamarugal. Las características climáticas más significativas de éste son: altas temperaturas diurnas, gran oscilación térmica, ausencia casi absoluta de precipitaciones, nieblas ocasionales, baja humedad relativa e intensa luz solar (5, 15, 17). Desde el punto de vista vegetacional, se trata de bosques naturales abiertos, constituidos por tamarugos asociados a algarrobo. La densidad de estos bosques no va más allá de 30 a 40 árboles/ha (6).

Información acerca de las características tecnológicas de la madera de tamarugo es limitada en la literatura. Sólo algunos comentarios de Ortíz (1966), en el cual elogia las cualidades de esta madera: "es muy dura, difícil de pulimentar con cepillo, pesada, compacta, resistente e incomprensible". Debido a estas características también se señala que los usos más comunes son: mazas y razos de carreta y posiblemente para descansos de maquinarias, excelente para leña y carbón, también para mangos de herramientas y en la construcción (29).

Es importante mencionar que por la forma ramificada y tortuosa en que crecen los árboles de tamarugo, presentan altos contenidos de madera de tensión. Esto se verificó en el análisis químico realizado con respecto a las sustancias estructurales de la pared celular, ya que se encontró un bajo contenido de lignina con respecto a otros *Prosopis* (31).

Cuevas et al. (10) informan sobre las propiedades físicas de la madera de tamarugo. Esta presenta muy alta densidad, supera todos los valores de las maderas comerciales del país y sólo puede ser comparada con la madera más densa de Chile: la luma, *Amomyrtus luma* (Mol.) Legr. et Kaus, cuya densidad básica es 1,05 g/cm<sup>3</sup> y a 12% de contenido de humedad (CH) 1,15 g/cm<sup>3</sup>. Los valores de densidad para el tamarugo son:

- 1) básica 0,79 y 0,96 gr/cm<sup>3</sup>, para árboles de 22 y 50 años respectivamente.
- 2) anhidra 0,90 y 1,05 gr/cm<sup>3</sup>, para los mismos años.

En relación a los valores de contracción de uso práctico (hasta 12% CH), se encontró que son relativamente bajos comparados con especies como *Eucalyptus* y *Coigue* que presentan densidad media a alta: 0,86 y 0,69 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente (4), Antes del Reacondicionamiento (AR). La tabla siguiente muestra las magnitudes de contracción que experimenta la madera de tamarugo, cuando es secada desde verde a condiciones anhidras, para distintas edades (10).

Contracción de tamarugo en % desde verde a anhidro (AR)

Sentido	22 años	50 años
Tang.	9,90	9,48
Rad.	5,43	5,12
Vol.	15,75	14,61

Se encontró, además, que la madera de tamarugo es susceptible al colapso, por la evidente recuperación de las dimensiones y por la significativa disminución de la densidad después del Reacondicionamiento (DR), estos cambios se indican a continuación.

Contracción (en%) desde verde a 12% CH de tamarugo

		Tamarugo (%)	
		22 años	50 años
AR	T	5,62	2,73
	R	2,77	2,98
DR	T	2,81	1,93
	R	1,57	1,16

T : sentido tangencial

R : sentido radial

Densidad de tamarugo AR y DR (en g/cm<sup>3</sup>)

	22 años	50 años
12% AR	0,97	1,17
12% DR	0,93	1,11

### 3. MUESTREO DE LAS ESPECIES A ESTUDIAR Y PREPARACION DEL MATERIAL (ASERRADO)

La distribución geográfica de las especies Prosopis tamarugo (tamarugo) y Prosopis chilensis (algarrobo) ubicadas en la Primera Región y de la Acacia caven (espino) preferentemente en la Cuarta Región y Región Metropolitana, hizo necesaria la realización de un muestreo en dos etapas, las cuales fueron efectuadas dentro de los meses de mayo y junio de 1987.

Se llevó a cabo una recolección de trozas de madera de las tres especies, definiéndose en todos los casos un largo de cada pieza de 1 m y un diámetro comprendido entre los 15 a 35 cm. Las razones se deben a consideraciones de tipo técnico (largo de las piezas a secar), restricciones por la geometría de los árboles y el hecho de realizar el estudio con diámetros representativos de la masa boscosa.

#### 3.1 Muestreo de las especies algarrobo y tamarugo

##### 3.1.1 Sector de muestreo

El muestreo de estas dos especies se llevó a cabo en la I Región, sector "Reserva Nacional Pampa del Tamarugal", en el Fundo El Refresco. Esta reserva, se encuentra actualmente bajo la administración de la Corporación Nacional Forestal, CONAF. Dicha entidad dió las facilidades del caso tanto en lo técnico como logístico, para la realización de esta etapa.

El Fundo El Refresco, con más de 15.000 ha cubiertas con algarrobo y tamarugo, representa más del 50% de la vegetación existente en la Pampa del Tamarugal (25.000 ha de vegetación natural y plantaciones de ambas especies. En este fundo, por informaciones provenientes de inventarios recientes, existen sectores con árboles cuya edad alcanza hasta los 60 años y por lo tanto presentan ejemplares de interés desde el punto de vista dasométrico.

##### 3.1.2 Número de muestras

De acuerdo a las necesidades de madera por parte de cada una de las actividades de investigación de estas especies, se determinó que un total de aproximadamente 18 a 20 metros lineales de trozas, de cada especie, era suficiente para los requerimientos del proyecto.

Estos 18 a 20 metros, debían materializarse en una cantidad idéntica de árboles, de los cuales se extrajo una troza de 1 m de largo y cuyo

diámetro estaba dentro del rango de tolerancia diamétrica permitido. Esto se realizó con el fin de asegurar una representatividad estadística de los resultados, al tener por lo menos, muestras de 18 árboles diferentes.

### 3.1.3 Criterios de selección y muestreo

El muestreo realizado fue dirigido, poniendo especial atención en las restricciones de largo y diámetro de trozas. Sin embargo, consideraciones de tipo ecológico, tuvieron especial importancia en la selección del árbol a extraer.

Tamarugo y algarrobo son especies de crecimiento simpódico, con un desarrollo importante en cada una de sus ramas. Por esta razón, ninguna muestra se obtuvo volteando un árbol por completo, sino cortando ramas con el diámetro y largo necesario para obtener la troza requerida.

### 3.1.4 Sellado de trozas

Con el propósito de prevenir la pérdida excesiva de humedad de las trozas, durante el transporte desde la Pampa a Santiago, fueron sellados en sus extremos, inmediatamente después de ser cortados, con pintura de Aluminio y posteriormente introducidos en una manga de polietileno de 0,2 mm de espesor cerrada en sus extremos.

## 3.2 Muestreo de la especie espino

### 3.2.1 Sector de muestreo

La obtención de muestras de espino fue realizada en la Región Metropolitana, Provincia de Melipilla, a 35 km de esta ciudad por el camino que conduce al pueblo de Alhué, dentro del Fundo "Los Guindos", seleccionándose el lugar apto para la corta, en función de las características dasométricas de los espinos requeridos.

### 3.2.2 Número de muestras

Se obtuvieron trozas de 18 a 20 árboles, para asegurar representatividad estadística al ensayo.

### 3.2.3 Criterios de selección y muestreo

Se voltearon árboles completos, para así obtener la troza del escaso fuste recto que poseían los individuos.

Es importante hacer notar que las restricciones de largo y diámetro de trozas, son exactamente las mismas establecidas para algarrobo y tamarugo.

### 3.2.4 Sellado de trozas

Desde el punto de vista de la protección contra la pérdida excesiva de humedad, se empleó el método de sellado químico de los extremos, utilizándose una doble capa de pintura esmalte.

No fue necesario envolver las trozas en polietileno, pues las condiciones de temperatura y humedad de la región en esta época del año, garantizan plenamente un buen estado de la madera, desde el punto de vista de su agrietamiento producto de una elevada pérdida de humedad.

### 3.3 Preparación del material

Se acondicionó una máquina dimensionadora de tableros disponible en el Departamento de Tecnología de la Madera, la cual utiliza una sierra circular. Se adaptaron dos escuadras a dicha mesa semejando un carro de un banco sierra. Las trozas fueron tomadas entre ambas escuadras y sujetas a su vez al carro, permitiendo de esta manera obtener una cara de referencia para los cortes sucesivos en espesores de 75 y 50 mm.

En todo caso, el número total de piezas dimensionadas para efectuar toda la experimentación del proyecto, es de 336, distribuidas en las escuadras de 75 x 75 mm y 50 x 50 mm. Por otro lado, también se prepararon rodajas de diferentes espesores y en un número total de 135 unidades.

En el contexto general de su uso, debe procederse al secado de todas las piezas ya sea por medio del método artificial o natural previo a su utilización en los ensayos de trabajabilidad y construcción de cualquier elemento de transmisión con características de uso industrial.

**CAPITULO I**  
**PROCESO DE SECADO NATURAL Y ARTIFICIAL DE LAS ESPECIES**  
**TAMARUGO, ALGARROBO Y ESPINO**

**1. ANTECEDENTES GENERALES**

En esta primera etapa experimental del proyecto, se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento que experimentan las especies algarrobo (*Prosopis chilensis*), espino (*Acacia caven*) y tamarugo (*Prosopis tamarugo*) en escuadrias de 50 mm x 50 mm y 75 x 75 mm, expuestas a procesos de secado natural y artificial (secado al horno), incluyéndose además el secado de rodelas correspondiente a las tres especies y en espesores de 20, 40 y 60 mm, sometidas al secado natural y sólo la especie algarrobo en el proceso artificial.

En todos los casos se cuantifican los tiempos de secado y los defectos típicos del proceso que permitan conocer el grado de dificultad en esta importante técnica, fundamental para el uso posterior en la construcción de diversas piezas.

Cada proceso de secado al horno está sujeto a un programa de secado propuesto surgido de la experiencia, antecedentes generales sobre esta técnica y de las características que se conocen sobre estas especies.

Por otro lado, el secado natural es conducido tomando en cuenta todas las medidas técnicas que permitan favorecer el proceso, quedando sujeto el tiempo de secado a las condiciones climáticas imperantes en la zona de Santiago.

Finalmente se incluye en esta primera parte la determinación del contenido de humedad inicial de las especies en condiciones verdes, densidad básica y la contracción que experimentan las piezas sometidas a este proceso.

**2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

**2.1 Proceso de secado natural**

**2.1.1 Descripción general**

El secado natural se llevó a cabo entre los meses de Noviembre de 1986 y Marzo de 1987 en Santiago, en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la U. de Chile, exponiéndose las piezas de madera a las

condiciones ambientales desde condiciones verdes. Para estos efectos se preparó un cobertizo de madera provisto de techo y rodeado por una reja de alambre que permite la libre circulación del aire a través de los mini-castillos ubicados en su interior.

Previo al inicio del proceso, se determinó el contenido de humedad inicial, a través de probetas de 2 cm de largo obtenidas de cada pieza, con lo cual es posible conocer en cualquier momento el contenido de humedad de cada una de ellas, medida que progresa el secado.

Dado el hecho que a medida que transcurre el tiempo, la pérdida de humedad (tasa de secado) es menor, el control de pesadas se efectuaba en lapsos de tiempo mayor fluctuando entre 2 a 7 días, entre control.

La experimentación se da por terminada una vez que el contenido de humedad promedio de todas las piezas permanecen a un nivel aproximadamente constante según las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa que indica el haber alcanzado el contenido de humedad de equilibrio.

Una vez terminada la experimentación, se procedía a cuantificar los defectos típicos de secado, específicamente la presencia de grietas, rajaduras, arqueadura, encorvadura, acanaladura y torcedura; por tratarse de piezas de secciones cuadradas y por definición, la arqueadura y encorvadura son iguales, siendo indiferente elegir uno de los dos defectos. (Gráficos 1 y 2).

#### 2.1.2 Selección y preparación del material

Sólo se seleccionaron las piezas que no presentaban defectos de pudrición o presencia de canto vivo, correspondiendo en un 100% a madera de duramen en el caso del tamarugo y algarrobo, no así en el espino que dadas las dimensiones de menor diámetro de las trozas y la presencia de defectos varios, un 20 - 25% del material preparado contenía albura y duramen.

En el caso de las rodelas, se utilizó una motosierra para obtenerlas, sin eliminar la corteza y teniendo el cuidado de mantener los espesores de 20, 40 y 60 mm con una variabilidad no más allá de un + 5%.

#### 2.1.3 Descripción de los equipos utilizados

Corresponden fundamentalmente a un termohigrógrafo marca R. Peckly

capaz de graficar a través del tiempo las variables temperatura y humedad relativa del ambiente, una balanza marca Mettler con una precisión de un 1%, un pie de metro (Vernier) para las mediciones de defectos y un xilohigrómetro para verificar el contenido de humedad final y compararlo con el método de control de pesadas.

#### 2.1.4 VARIABLES IMPLÍCITAS EN EL PROCESO

El contenido de humedad de equilibrio depende de la temperatura y humedad del ambiente, especies y velocidad del aire entre madera. Estos factores constituyen las 4 variables involucradas en el secado natural.

#### 2.1.5 CONTROL DEL PROCESO

En la descripción general se explicó el procedimiento para el control del contenido de humedad de las tres especies, el cual varía a través del tiempo, dándose por terminada la experimentación, una vez que sea alcanzado el contenido de humedad de equilibrio correspondiente.

#### 2.1.6 CUANTIFICACIÓN DE LOS DEFECTOS

##### a) CUANTIFICACIÓN DE LAS PIEZAS DIMENSIONADAS

Al término del secado natural, se efectuó una cuantificación de los defectos típicos del secado, a través de la medición de las deformaciones que experimenta cada pieza.

En el caso de las piezas superficiales y rajaduras, se procede a determinar el número de ellas y su longitud, mientras que en la arqueadura o encorvadura, se determina la flecha formada entre la recta que une ambos extremos y el punto más alejado de la superficie que mira a dicha recta.

Finalmente, en la torcedura, se mide la flecha entre la superficie plana en que se apoyan tres vértices de una cara y el cuarto vértice correspondiente.

##### b) CUANTIFICACIÓN DE LOS DEFECTOS EN RODELAS

El defecto consiste en la formación de una rajadura radial, midiéndose el largo de dicha rajadura y la abertura producida en su periferia. Pueden presentarse también grietas en la médula, cuantificándose en este caso su número.

## 2.2. Proceso de secado al horno

### 2.2.1 Descripción general

El secado al horno de las especies algarrobo, tamarugo y espino en escuadrías de 75 x 75 mm y 50 x 50 mm, se llevó a cabo en dos equipos de secado pertenecientes al Departamento de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Chile. Corresponden a un túnel de secado de capacidad reducida y a una cámara piloto convencional.

El trabajo experimental, consistió básicamente en someter un número de 16 a 20 piezas de madera por cada carga a ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa, de acuerdo a un programa de secado previsto según especie y escuadría.

Se contempló un total de 10 procesos de secado de madera dimensionada distribuidas en cuatro para cada una de las especies de algarrobo y tamarugo y dos en el caso del espino. Además de lo anterior, se efectuó un proceso adicional correspondiente a una carga de rodela de algarrobo, dado los buenos resultados obtenidos en el secado al aire. A su vez, el número total de cargas por cada especie, preveía un proceso por cada escuadría y su respectiva repetición a excepción del espino, que dadas las razones establecidas oportunamente sólo contempló una carga por escuadría.

Las piezas utilizadas en el secado tenían un largo de 0,45 m, empleándose un total de 16 unidades por proceso para una escuadría de 75 x 75 mm y de 20 unidades para escuadrías de 50 x 50 mm.

La metodología aplicada en cada proceso consistió en efectuar un vaporizado inicial con tiempos fluctuantes según sea la especie, seguido por el secado propiamente tal bajo el programa previsto, para terminar con un vaporizado final variable entre las 24 y 48 horas, con el objeto de eliminar la presencia de tensiones internas y lograr uniformidad en el contenido de humedad.

Durante cada secado se procedió a un control de las variaciones del contenido de humedad experimentando a lo largo del proceso, a través de 6 piezas seleccionadas por carga. El procedimiento consistió en pesar dichas piezas cada cierto tiempo aplicando las mismas relaciones físicas y criterio técnico explicado en el punto 2.1.5, correspondiente al control llevado a cabo en el secado natural.

Una vez terminado el secado a un contenido de humedad final de un 12%, se procedió a cuantificar los efectos producidos dejándose constancia

de los defectos de grietas y rajaduras en los extremos y las deformaciones de torcedura y arqueadura.

La metodología aplicada en el secado fue conducida en las mismas condiciones como se lleva a cabo en el secado industrial, de tal modo que los resultados obtenidos fueran muy próximos a la realidad, incluyendo también en la metodología un tiempo final de enfriamiento para evitar la aparición de grietas superficiales adicionales. (Gráficos 3, 4 y 5).

### 2.2.2 Selección y preparación del material

En forma similar a la selección del material utilizado en el secado natural y explicado en el punto 2.1.2, las diferentes piezas en las escuadrías de 75 x 75 mm y 50 x 50 mm, se obtuvieron en el proceso de aserrado descrito en el punto 4 sobre muestreo de las especies.

Posteriormente, se efectuó una rigurosa selección de las piezas teniéndose especial cuidado que no presentaran defectos y fueran todas ellas madera de duramen. Sólo en el caso del espino no fue posible obtener estas condiciones, aceptándose una combinación de albura y duramen en un 40% de la carga.

### 2.2.3 Descripción de los equipos utilizados

#### a) Equipos de secado

Consiste básicamente en una pequeña cámara a través de la cual circula el aire en un circuito cerrado formado por ductos de aluminio cubierto por material aislante.

El equipo consta de los sistemas de ventilación formado por un ventilador axial movido por un motor eléctrico, sistema de calefacción eléctrico, sistema de vaporización formado por una caldera de vapor y tubo de vaporización, sistema de renovación de aire y finalmente un sistema de control registrador que permite operar sobre los otros sistemas manteniendo las condiciones de temperatura y humedad relativa deseada.

La otra cámara de secado es de mayor capacidad, contando con los mismos sistemas que el caso anterior, disponiendo de una caldera que permite efectuar el calentamiento también por medio de vapor. Ciertas adaptaciones, empleándose baffles y cortinas de aire, debieron utilizarse en su interior para minimizar sus dimensiones y acomodarse a los volúmenes de las cargas.

#### b) Equipos menores

Se emplearon además, balanzas de precisión, estufa para lograr las condiciones anhidras de las probetas, anemómetro para medir la velocidad del aire, psicrómetro y termocupla digital.

#### 2.2.4 Control y variables en el proceso

Las variables implícitas en el proceso fueron la temperatura, velocidad del aire, humedad relativa del ambiente, especie y escuadrías, empleándose en el control el mismo procedimiento explicado en el punto 2.1.5 del secado natural.

#### 2.2.5 Cuantificación de los defectos

Los defectos típicos del proceso de secado son definidos y cuantificados en la forma descrita en el punto 2.1.6 del secado natural.

### 2.3 Determinación del contenido de humedad, densidad básica y contracción

#### 2.3.1 Contenido de humedad

La metodología consistió en preparar 12 probetas de duramen por especie de 2 cm x 2 cm x 5 cm, las cuales fueron previamente obtenidas de rodela muestreada de las trozas destinadas al estudio.

#### 2.3.2 Densidad básica

Se determinó la densidad básica empleando el método de inmersión por desplazamiento de mercurio haciendo uso de un volumenómetro.

Para estos efectos se prepararon 12 probetas de duramen por cada especie de dimensiones 2 cm x 2 cm x 2 cm.

#### 2.3.3 Contracción

Su determinación se basa en una medición directa de la variación dimensional en el espesor de 6 piezas por especie con dos mediciones por cada una de ellas al principio y término del proceso de secado en una carga por especie.

Los valores obtenidos no corresponden a una dirección tangencial o radial, sino que a una combinación de ambas.

### 3. DISCUSION DE RESULTADOS

#### 3.1 Proceso de secado al aire

##### 3.1.1 Secado al aire de algarrobo

Se tiene un comportamiento normal de la velocidad de secado al aire con tiempos de 74 días y 122 días para alcanzar contenidos de humedad de equilibrio correspondientes a un 13% (50 x 50 mm) y de un 15% (75 x 75 mm) respectivamente, los cuales son muy próximos entre sí, mostrando en relación a los gráficos de contenido de humedad de equilibrio normalmente utilizados como promedio, un valor superior entre un 2 a 3% de contenido de humedad.

Esta especie no presentó defectos de deformación, grietas o rajaduras, lo cual es sorprendente dados los antecedentes preliminares que se tenían al respecto, conducentes más bien a describirla como una especie difícil de secar.

Por otro lado, el secado de rodela para los espesores de 20, 40 y 60 mm, se tienen tiempos de secado muy similares comprendido entre los 58 y 65 días para un contenido de humedad final promedio de un 13,3%.

Las rodela también presentaron un comportamiento poco usual en las especies en general, no detectándose en todas las piezas defectos de rajaduras radiales.

Lo anterior permite establecer que el algarrobo presenta una gran estabilidad dimensional, relacionado posiblemente a una contracción menor que el promedio usual para esa densidad y a una diferencia reducida entre la contracción tangencial y radial. Se sumaría a lo anterior una predisposición de un mejor acomodo de las fibras como consecuencia de dicha contracción y la presencia de tensiones internas durante el secado. Siendo por lo tanto conveniente la utilización del algarrobo en piezas que requieren de una gran estabilidad dimensional como es el parquet o partes de muebles especiales.

En el uso de parquet, cumple además con la condición de tratarse de componentes de dimensiones reducidas, posibilitando de esta manera un buen aprovechamiento de las trozas. Se agrega a lo anterior, sus buenas propiedades mecánicas de dureza y una densidad básica promedio de 0,68 gr/cm<sup>3</sup>.

Finalmente, una comparación entre las especies algarrobo, espino y tamarugo, permite establecer una mayor velocidad de secado del algarrobo.

### 3.1.2 Secado al aire de tamarugo

El comportamiento de la velocidad de secado de esta especie, se caracteriza por el empleo de largos tiempos de secado, alcanzando a los 168 días para una escuadría de 75 x 75 mm y un contenido de humedad final de un 12%. En cambio, para una escuadría de 50 x 50 mm para el mismo tiempo se logra un 10%.

La velocidad de secado de las rodelas presenta un comportamiento muy similar entre los tres espesores, estableciéndose por lo tanto que la permeabilidad en el sentido longitudinal, no varía significativamente en los largos de 20, 40 y 60 mm.

El estudio muestra, que el tiempo requerido para lograr un contenido de humedad de equilibrio promedio de un 9% según las condiciones imperantes (septiembre a noviembre), se requieren alrededor de los 84 días.

Por otro lado, un análisis de los defectos producidos durante el proceso de secado al aire para las escuadrías de 75 x 75 mm y 50 x 50 mm respectivamente, muestran prácticamente la no existencia de grietas superficiales y de rajaduras en los extremos. No se detectaron además grietas interiores.

La situación es diferente en el caso del secado al aire de las rodelas. En efecto, prácticamente todas las rodelas presentan rajaduras radiales de dimensión apreciable que los deja fuera de posibilidades para ser utilizados en piezas mecánicas.

### 3.1.3 Secado al aire de espino

Los resultados obtenidos en esta especie tanto en la velocidad de secado como en los defectos producidos fueron negativos. En efecto, sólo a los 145 días de secado se logró alcanzar en escuadrías de 50 x 50 mm un contenido de humedad de un 16,6% y de 20,6% para las escuadrías de 75 x 75 mm.

Estos resultados fueron obtenidos durante los meses de diciembre a abril, favorables para el proceso.

Puede además establecerse que esta especie presenta posiblemente un contenido de humedad de equilibrio superior a las especies en general para las condiciones ambientales según las tablas de humedad normalmente conocidas.

Este comportamiento no se podría atribuir a la presencia de humedades altas en el centro de las piezas por la baja permeabilidad de la especie, dado el hecho que pruebas posteriores no mostraron gradientes superiores a un 4%.

Una explicación del alto contenido de humedad de equilibrio podría encontrarse en la presencia de un alto contenido de extraíbles que alterarían dicha humedad.

Las rodelas mostraron diferentes velocidades de secado según el espesor, correspondiéndoles un tiempo promedio aproximado de 76 días para lograr contenidos de humedad comprendidos entre un 13% a un 22%.

Por otra parte, un análisis de los defectos producidos en las piezas dimensionadas de 75 x 75 mm y 50 x 50 mm, muestran una cantidad de grietas y rajaduras no deseables para ser utilizadas posteriormente. También puede observarse una fuerte intensificación de la dimensión de estos defectos comparados con el algarrobo y tamarugo, variando el largo de las grietas y rajaduras entre los 25 y 200 mm.

Los defectos altos, especialmente en escuadrías de 50 x 50 mm, se encontraron presentes prácticamente en todas las piezas. Debe considerarse en esta apreciación que dichas piezas tienen un largo reducido (0,45 m) por lo tanto, estos defectos resultan ser inaceptables desclasificándolas a una cuarta o quinta calidad, para largos mayores.

Los defectos que presentan las rodelas de espino son de menor intensidad que en el tamarugo, obteniéndose piezas sin rajaduras radiales, principalmente en aquellas de menor diámetro. Sin embargo, tiene la presencia de grietas cerradas en la médula de diferentes largos, lo cual lo hace no apropiado para la fabricación de elementos de uso mecánico.

### 3.2 Proceso de secado al horno

#### 3.2.1 Secado al horno de algarrobo

Un análisis de la velocidad de secado de algarrobo para escuadrías de 75 x 75 mm, bajo dos diferentes programas de secado permite establecer

una importante reducción en el tiempo de secado al aplicarse el programa de secado E, el cual es más exigente, como puede observarse al comparar los programas (Cuadros A al F).

Las curvas presentan un comportamiento normal de secado, con tiempos de 38 días y 30 días para un contenido de humedad final de un 11% aplicando los programas E y B respectivamente.

Sin embargo, dado los mínimos defectos producidos con el programa E, considerándose como de excelentes los resultados obtenidos, es perfectamente factible reducir los 30 días.

Los defectos de torcedura y arqueadura muestran valores reducidos y perfectamente aceptables para ser utilizados en la fabricación de elementos mecánicos u otros. Se comprobó la no existencia de grietas, gradientes de humedad variables entre un 2 a 5% entre la zona externa y el centro y un grado de tensión reducido.

Como en todos los procesos de secado al horno en el presente estudio, se llevó a cabo una vaporización final a una temperatura correspondiente a la más alta del programa de secado respectivo, un contenido de humedad de un 99% y un tiempo de 24 horas.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el secado al horno de algarrobo en escuadrias de 50 x 50 mm pueden también considerarse como excelentes, dado el bajo grado de defectos al aplicarse los programas de secado C y D.

La velocidad de secado para llegar a un 11% de humedad final fue de 24 días y 20 días aplicando los programas de secado C y D respectivamente.

Finalmente, un análisis en el proceso de secado de rodela permite establecer diferencias no apreciables para los espesores de 40 y 60 mm, con tiempos de 4 a 4,5 para efectos de alcanzar un contenido de humedad final de un 10%, mientras que en un espesor de 20 mm se emplearon 3 días.

En todo caso resulta sorprendente el mínimo grado de defecto producido bajo el programa de secado F. En efecto, no se detectó como en el caso del secado al aire la aparición de rajaduras radiales con la excepción de una rodela y en tres casos de un total de 15 se presentaron grietas en el centro.

### 3.2.2 Secado al horno de tamarugo

El proceso de secado al horno de tamarugo no presenta las mismas facilidades y el éxito obtenido con el algarrobo.

La velocidad de secado aplicando en la primera carga el programa de secado A requiere de un tiempo de secado de 58 días para alcanzar un 13% de contenido de humedad final (escuadría de 75 x 75 mm), mientras que al utilizar un programa de secado B más exigente se logra reducir drásticamente el tiempo del proceso a 47 días (12% de contenido de humedad final).

Sin embargo, un análisis comparativo de los defectos producidos en ambas cargas muestran una intensificación de los defectos para la 2a. carga utilizando el programa B.

En efecto, la intensificación del número de grietas es apreciable incrementándose las piezas afectadas de 2 a 17 de un total de 20. De igual manera puede observarse un fuerte incremento de las rajaduras en los extremos y de deformación.

Ambos procesos incluyeron un vaporizado final de 24 horas a 45°C y una humedad relativa de un 95%, con el objeto de minimizar la presencia de grietas internas, gradientes de humedad y uniformidad de la carga.

No obstante lo anterior, la segunda carga no reaccionó como se esperaba, presentando grietas internas insinuadas (no abiertas) y tensiones internas.

Del análisis anterior, puede establecerse que el programa A empleado en la primera carga (escuadría de 75 x 75 mm) resulta ser adecuado, con buenos resultados, descartándose el programa B por la cantidad y grado de defectos producidos en el proceso.

Por otra parte, el Gráfico 11 muestra la velocidad de secado para las dos cargas ensayadas en escuadrías de 50 x 50 mm, aplicándose el programa C para la primera carga y el D para la segunda.

En este caso, los tiempos empleados fueron de 20 días y 18 días para la primera y segunda carga respectivamente, obteniéndose un contenido de humedad final de un 12 a 13%.

Un análisis de los defectos producidos en ambas cargas conducen a establecer una intensificación apreciable de los defectos en la segunda carga (programa D). Por lo tanto este programa no sería conveniente de emplear a nivel industrial.

En cambio, los resultados obtenidos según el programa C, pueden considerarse como buenos dado los defectos mínimos producidos. En efecto, dos piezas de un total de 20 presentaron grietas superficiales, mientras que rajaduras en los extremos sólo se detectó en una sola pieza.

Los defectos de torcedura y arqueadura en esta carga también pueden considerarse como normales dado el bajo grado de intensidad (2 mm) y el número de piezas afectadas. Por otro lado, pruebas adicionales no detectaron la presencia de tensiones internas y grietas interiores.

### 3.2.3. Secado al horno de espino

Los procesos de secado llevados a cabo en escuadrías de 75 x 75 mm y 50 mm x 50 mm, no dieron los resultados deseados, aún cuando en ambos casos se emplearon programas de secado moderados. Los tiempos se extendieron a 68 días y 48 días para las escuadrías respectivas, y un contenido de humedad final entre un 13,5 y 14,5%.

La cuantificación de los defectos producidos en ambos casos son inaceptables, no siendo posible aprovechar posteriormente las piezas, dado el número e intensidad en que ellos se presentan. En efecto, grietas superficiales se encuentran prácticamente en todas las piezas con largos que hacen imposible su utilización. Por otra parte, también las rajaduras en los extremos y torceduras producidas constituyen defectos serios con un grado de intensidad que contribuyen en gran medida al poco éxito en el secado al horno.

Las causas de este resultado pueden encontrarse en la baja permeabilidad de esta especie, provocando durante el proceso y en el primer estado del secado, fuertes sollicitaciones de tracción en la superficie y de compresión en el interior, cuando la zona externa alcanza un contenido de humedad bajo el punto de saturación de la fibra. Estas condiciones dan lugar a la formación de grietas una vez que los esfuerzos de tracción superan el esfuerzo unitario de ruptura del material.

Se suma a lo anterior, la presencia de tensiones de crecimiento observadas durante el secado al aire y una posible desviación de la fibra que contribuye al defecto de torcedura.

La formación de rajaduras en los extremos obedece a un secado acelerado en esas zonas como consecuencia de un desplazamiento rápido del flujo de agua en el sentido longitudinal, característica conocida de las especies latifoliadas por la gran presencia de vasos.

### 3.3 Contenido de humedad, densidad básica y contracción

#### 3.3.1 Contenido de humedad

Valores de 51,5% y de 51,7% correspondientes al algarrobo y espino resultan ser muy similares, aún cuando ambas especies presentan diferencias en su densidad básica. Por otra parte, el tamarugo con un contenido de humedad de un 40,7% (variando entre un 37,4 y 44,1%) constituye posiblemente la especie de menor contenido de humedad en condiciones verdes existentes en el país y una de las más bajas en el mundo.

#### 3.3.2 Densidad básica

Las densidades básicas de 0,68 - 0,97 y 0,83 (g/cm<sup>3</sup>) correspondientes al algarrobo, tamarugo y espino, están en concordancia con la información encontrada en la bibliografía.

#### 3.3.3 Contracción

La contracción desde verde a un 12% de contenido de humedad determinadas, sin un reacondicionamiento, afectaría significativamente a las especies tamarugo y espino, por la presencia de colapso (aplastamiento de las fibras).

Se observó este defecto con mayor intensidad en el espino que en el tamarugo, lo cual explicaría la fuerte contracción determinada en la primera especie; en el algarrobo, en cambio, no se visualiza a simple vista defecto de colapso.

## 4. CONCLUSIONES

- El secado al aire de las especies algarrobo y tamarugo, llevado a cabo en la zona metropolitana durante los meses de diciembre a marzo, es favorable para el posterior uso de la madera, no así en el caso del espino, dado los defectos apreciables de grietas, rajaduras y deformaciones.
- Tiempos de 122 días y 82 días se requieren para el algarrobo en escuadrías de 75 x 75 mm y de 50 x 50 mm respectivamente, para alcanzar un contenido de humedad de equilibrio promedio de un 14,5%. El tamarugo en cambio, para un contenido de humedad de equilibrio de

un 12%, necesita 168 días y 112 días para las mismas escuadrías. El espino requiere tiempos más largos, determinándose un tiempo de 145 días para un contenido de humedad de un 20,6% (escuadría de 75 x 75 mm).

- Secado al aire de rodelas de tamarugo y espino dieron resultados negativos por la presencia de intensas rajaduras radiales. Rodelas de algarrobo en cambio, en espesores de 20, 40 y 60 mm reaccionaron favorablemente no presentando defectos de rajaduras radiales.
- Procesos de secado al horno de algarrobo empleando indistintamente el programa de secado B (moderado) o E (acelerado) resultan exitosos para escuadrías de 75 x 75 mm con tiempos de secado de 38 y 30 días respectivamente, reduciéndose a 24 y 20 días en el caso de escuadrías de 50 x 50 mm aplicando los programas C y D respectivamente.
- Procesos de secado al horno de tamarugo empleando el programa de secado "A" para escuadrías de 75x 75 mm resulta exitoso con un tiempo de 58 días para un contenido de humedad final de un 13%.
- Procesos de secado al horno de espino no dieron resultados adecuados aún empleándose programas muy moderados.
- Secado al horno de rodelas de algarrobo presenta buenos resultados bajo el programa de secado "F", con tiempos comprendidos entre los 3 y 4,5 días.
- Contenidos de humedad promedio en condiciones verdes de un 51,6% se obtuvieron para el algarrobo y espino, alcanzando en el caso del tamarugo un contenido de humedad sorprendentemente bajo de un 40,7%.
- La densidad básica de las especies algarrobo, tamarugo y espino es de 0,68 - 0,97 y 0,83 (gr/cm<sup>3</sup>) respectivamente (madera de duramen).
- Valores de contracción determinadas sin reacondicionamiento, fueron de 2,11%, 4,83% y 7,2% para el algarrobo, tamarugo y espino respectivamente.

## CAPITULO II

### ESTUDIO DE TRABAJABILIDAD

#### 1. ANTECEDENTES GENERALES

Una de las características significativas de la madera, es la facilidad con la cual ella puede ser maquinada (trabajada). Sin embargo, existen entre especies, fuertes variaciones en su comportamiento bajo la acción de herramientas de corte.

La posibilidad de utilización de estas especies de alta densidad, sin duda requiere un conocimiento importante de sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, a lo cual debe sumarse su comportamiento frente a procesos de secado y trabajabilidad, con el propósito de establecer si es posible contar con un material adecuado desde el punto de vista tecnológico, para ser empleado en aquellos usos que estén acordes con sus potencialidades. Sin lugar a dudas la necesidad de determinar la compatibilidad de éstas y otras especies, para usos donde las características de la superficie maquinada son de primera importancia, requiere un estudio sistemático y adecuado para conocer las propiedades de maquinado y determinar así las condiciones bajo las cuales es posible obtener una buena terminación superficial.

Son muchos los factores que inciden en las aptitudes o dificultades que pueda presentar una madera para ser trabajada empleando herramientas de corte, los cuales influyen tanto en la calidad de la superficie cortada como también en la mayor o menor resistencia que opone la madera frente al proceso; y pueden tener su origen en la materia prima madera o bien en las características del elemento de corte.

La madera como material orgánico, presenta una estructura y organización celular característica que es claramente diferenciada en tres ejes que identifican a los planos radial, tangencial y transversal. Esta variación, sumada a aquella existente entre especies, hace que algunas de las propiedades de la madera experimenten diferencias que pueden llegar a ser importantes. Aunque no sólo problemas derivados de la diferencia de estructura y disposición de los elementos anatómicos puede originar cambios en las propiedades.

Los procesos de corte no están ajenos a esta situación y por lo tanto son varios los factores que inciden en la facilidad con que una madera puede ser trabajada. Es así, como de todas las propiedades físicas que tiene el material, la densidad y su contenido de humedad son

relevantes en el caso del maquinado, considerando que son dos las variables de interés: esfuerzo de corte y calidad de superficie.

En términos generales, es clara la relación existente entre las propiedades físicas: densidad y contenido de humedad y las variables: esfuerzo de corte y calidad de superficie. En el caso de la densidad, la relación de ésta, en forma independiente con el esfuerzo de corte y la terminación superficial, responde a un comportamiento creciente, es decir, el aumento de la densidad origina tanto un incremento en el esfuerzo de corte como un mejoramiento en la terminación superficial. Por otra parte, analizando el comportamiento de las mismas variables con respecto al contenido de humedad, es posible constatar que la relación es inversa y por lo tanto al incrementarse la humedad de la madera disminuyen tanto el esfuerzo de corte como la calidad de la superficie trabajada.

Sin embargo, no sólo de las propiedades de la madera depende el comportamiento de una especie frente a procesos de maquinado, sino también de una serie de variables tecnológicas del proceso de corte, como por ejemplo la calidad de la herramienta empleada, velocidad de corte, velocidad de avance, ángulo de ataque, ángulo de salida, espesor de corte y otros. De acuerdo a esto, parece importante entonces, considerar tanto aspectos relacionados con la madera como con el proceso, para establecer así las bondades que presenta una madera para ser trabajada.

Los procesos de trabajabilidad a que puede ser sometida la madera, van desde aquellos de transformación primaria (aserrado) hasta los de transformación secundaria que involucran una serie de procesos típicos de elaboración. En todos ellos juegan un rol importante el conjunto de variables mencionadas con anterioridad, analizadas individual o interrelacionadamente.

Para medir cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de la madera frente a la acción de herramientas de corte, es necesario definir los procesos de transformación a que ella sería eventualmente sometida. Los variados procesos abarcan desde el aserrado en verde y dimensionado en seco, hasta aquellos de elaboración tradicional como el cepillado, taladrado, moldurado, torneado y lijado.

Este capítulo hace referencia al estudio de trabajabilidad o caracterización de las aptitudes de maquinado de tres especies consideradas de alta densidad como el *Prosopis tamarugo* (tamarugo), *Prosopis chilensis* (algarrobo) y *Acacia caven* (espino). La alta densidad que presentan estas especies constituye una característica importante de la cual dependerá sin duda la calidad de la superficie (trabajada), sin embargo existen otros elementos relativos a su

estructura anatómica y calidad del material leñoso que también juegan un rol importante. Los antecedentes de aquí emanados, servirán de base para el establecimiento de condiciones de proceso, bajo las cuales desarrollar la fabricación de prototipos de elementos mecánicos de transmisión y fijación, que constituyen potenciales usos de la madera de estas especies.

## 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En términos generales la metodología empleada se basa en la Norma ASTM D 1666-64 (reaprobada en 1976) a excepción de ciertas modificaciones e incorporaciones de métodos complementarios, dada la naturaleza del estudio y con el propósito de enriquecer la información obtenida.

### 2.1 Descripción general

#### 2.1.1 Propósitos del estudio

Los ensayos de maquinado que fueron realizados tuvieron por propósito determinar las cualidades y características de trabajabilidad de las especies Prosopis tamarugo (tamarugo), Prosopis chilensis (algarrobo) y Acacia caven (espino) frente a operaciones de maquinado comúnmente empleadas en la manufactura de productos de madera y en particular de gran interés para los posibles usos industriales de estas maderas, tales como elementos mecánicos de transmisión y fijación.

#### 2.1.2 Operaciones de maquinado

Los alcances del estudio cubren métodos de ensayo para operaciones de maquinado tradicionales y que específicamente corresponden a cepillado, taladrado, lijado, torneado y fresado; las cuales permiten evaluar la potencialidad de estas especies para ciertos usos donde esas propiedades son de vital importancia.

Complementariamente y sólo con carácter descriptivo se analiza además, el comportamiento de las tres especies frente a procesos de corte primario como el aserrado de las trozas en verde y el dimensionado de probetas en seco, con el fin de visualizar las características y dificultades prácticas del proceso de corte. Este mismo procedimiento de análisis es empleado para el proceso de fresado, debido a la dificultad para cuantificar la superficie con defectos o libre de ellos, dada la forma de los elementos mecánicos obtenidos para ensayos de la etapa en que se prueban algunos usos industriales posibles.

## 2.2 Requerimientos generales y selección de muestras

Las generalidades sobre la calidad y métodos de selección de muestras para obtención de probetas, son aplicables en su totalidad a las tres especies estudiadas.

### 2.2.1 Estado sanitario

La madera que ha sido aserrada y posteriormente secada, ya sea en horno o al aire, debe ser seleccionada procurando obtener la mayor cantidad de probetas libres de defectos. Esta condición es básica para cualquier probeta de ensayo y por lo tanto debe cumplirse a cabalidad, para lo cual son evitados nudos, manchas, pudrición incipiente, grietas superficiales, rajaduras en los extremos y madera de reacción.

### 2.2.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad real de la madera de cada especie a estudiar, debe fluctuar entre 12% a 14%, situación que en la práctica coincide plenamente, pues los programas de secado empleados dieron como resultado un contenido de humedad final aproximadamente equivalente a lo solicitado.

El cuadro siguiente muestra los contenidos de humedad que efectivamente tenían las especies al momento de ser trabajadas.

Especie	Contenido de humedad %
Tamarugo	12% - 15%
Algarrobo	12% - 15%
Espino	15%

Las operaciones de elaboración y dimensionado en seco fueron realizadas efectivamente con madera a esos contenidos de humedad, sin embargo el aserrado en verde de las trozas, fue llevado a cabo a los contenidos de humedad que presentaban las tres especies días después de ser muestreadas y mantenidas un corto tiempo bajo agua. Dada la alta densidad de estas maderas, la absorción de humedad puede considerarse despreciable.

El cuadro siguiente muestra los contenidos de humedad en el momento de la operación de aserrado.

Especie	Contenido de humedad %
Tamarugo	40%
Algarrobo	50% - 55%
Espino	50% - 55%

### 2.2.3 Selección de material y obtención de probetas

De la totalidad de la madera que fue secada en horno o al aire, se seleccionó material considerando como criterio la obtención de piezas que proporcionaran un alto rendimiento en probetas libres de defectos. Las muestras en sí fueron seleccionadas en forma dirigida, pero tratando de abarcar la totalidad del material seco para cada especie.

## 2.3 Muestreo y dimensiones de probetas

### 2.3.1 Número de muestras

El número total de muestras (probetas) de ensayo corresponde a 16 unidades para cada especie y operación de maquinado, para permitir un procedimiento de análisis ajustado a las condiciones planteadas originalmente en el proyecto. Considerando que el análisis de los procesos de aserrado en verde y dimensionado en seco son sólo de tipo descriptivo y que en torneado y fresado se mide el comportamiento de cada especie luego de la preparación de los elementos mecánicos de transmisión y fijación que son ensayados en otra etapa de este proyecto; solamente el número de 16 probetas se cumple para los procesos de cepillado, taladrado y lijado.

### 2.3.2 Dimensiones de probetas

Las dimensiones de las probetas de ensayo que se emplean en este estudio difieren en función de la forma que ellas presentan para cada tipo de proceso, es así como las probetas usadas para las operaciones

de cepillado, lijado y taladrado presentan las siguientes dimensiones: 25 x 50 x 450 mm.

El torneado y el fresado fueron realizadas sobre las piezas mecánicas que debían ser ensayadas en el estudio de aplicaciones industriales (torneado: ejes y fresado: engranajes) y por lo tanto, las dimensiones de dichos elementos (probetas de trabajabilidad) se especifican en el Capítulo 3.

### 2.3.3 Preparación de probetas

Las trozas de madera obtenidas de cada especie fueron aserradas en verde en las dimensiones requeridas para el proceso de secado. Luego de completar el secado, aquellas piezas seleccionadas, se dimensionan en seco en escuadrías que corresponden al tamaño final de las probetas de ensayo; esto en el caso de cepillado, lijado y taladrado. Para el torneado, se emplearon piezas cuyas dimensiones fueron idénticas a aquellas obtenidas luego del secado y que en particular corresponden a escuadrías de 75 x 75 mm y 50 x 50 mm. El fresado por otra parte, emplea madera en forma de rodela cuya dirección de fibras es paralelo al plano circunferencial y para lo cual debió emplearse en algunos casos, técnicas de encolado usando adhesivos del tipo Urea formaldehído y Resorcinol fenol formaldehído, siguiendo procedimientos de encolado tradicionales. En este caso, las dimensiones de las rodela manufacturadas fueron de 75, 100, 150 y 210 mm de diámetro y en un espesor único de aproximadamente 35 mm.

Es importante mencionar, que de acuerdo a los ensayos preliminares realizados con algunos engranajes en la etapa correspondiente a aplicaciones industriales, se detectó deficiencias en aquellas probetas encoladas con urea formaldehído, lo cual significó utilizar casi exclusivamente la resina resorcinol fenol formaldehído.

## 2.4 Procedimientos de ensayo y variables de proceso

### 2.4.1 Cepillado

Las variables empleadas en el cepillado son las siguientes:

- Angulo de ataque : 24° y 30°
- Espesor de corte : 1,5 mm y 0,5 mm (espesor viruta)

El procedimiento de ensayo consistió en cepillar 16 probetas por especie empleando primeramente un ángulo de ataque de 30° y variando

el espesor de corte de 0,5 mm a 1,5 mm. Otras 16 probetas fueron posteriormente cepilladas usando un ángulo de 24° y siguiendo el mismo procedimiento que para el ángulo de 30°. Este método de ensayo permite establecer el análisis comparativo correspondiente.

#### 2.4.2 Taladrado

De igual forma que en el proceso anterior, existe una variable de operación que fue estudiada en el taladrado. Esta consiste en la velocidad de rotación del elemento de corte (broca). Los valores adoptados para ella fueron de 740 y 1.240 r.p.m.

El ensayo de taladrado consistió en perforar 16 piezas de madera por especie empleando una broca de 1/2" de diámetro para la calificación de la superficie cortada. Paralelamente se determinan además, los esfuerzos necesarios para efectuar las perforaciones en cada especie, empleando para ello una broca de 1" y aparatos de medición adecuados (dinamómetro).

La realización de los ensayos de taladrado para medir calidad de la superficie cortada, se llevó a cabo empleando una fuerza de penetración constante para cada especie y velocidad de rotación.

#### 2.4.3 Lijado

Esta operación de corte tan particular, requiere el uso de un elemento especial como es la lija. El proceso en sí fue efectuado empleando como variable dos granos de textura diferentes, que consistieron en grano 80 y 120. Debe mencionarse que el incremento en el número de grano de la lija corresponde a texturas cada vez más finas.

El lijado, por razones obvias, fue realizado sobre piezas de madera provenientes directamente del dimensionado en seco y maquinadas sólo en la mitad de la superficie de la probeta, con el propósito de comparar la eficiencia del proceso, en relación a la calidad de superficie.

#### 2.4.4 Torneado

Este proceso se efectuó sobre 12 piezas de sección cuadrada (50 x 50 mm y 75 x 75 mm) por cada especie, transformándolas en ejes de diferentes diámetros por la interacción de una herramienta de corte típica en torneado. La máquina utilizada es un torno universal mecánico, empleándose en la experimentación una velocidad de rotación

de las piezas de madera de 600 r.p.m., la cual permanece constante, empleándose dos velocidades de avance longitudinal correspondientes a 0,16 m/min y 0,35 m/min.

Se utilizaron además dos tipos de herramientas con características geométricas (ángulos de ataque, de incidencia y salida) diferentes.

Las piezas de madera, originalmente de sección cuadrada y de un largo de 0,45 metros, eran transformadas en cilindros de diferentes diámetros, estudiándose en cada caso la calidad de la superficie.

Este proceso es posible estudiarlo en repetidas oportunidades por estar implícito en la fabricación de elementos mecánicos.

#### 2.4.5 Fresado

El fresado constituye una operación de maquinado que se caracteriza por el empleo de herramientas de forma circular similar a aquellas utilizadas en el moldurado.

En este caso la fresa tenía como objetivo la fabricación de ruedas dentadas, caracterizándose en el ensayo por girar a 500 r.p.m.

Por otro lado, la velocidad de avance de la madera en la experimentación fue de 0,30 m/min y de 2 m/min, que es la capacidad máxima de la fresadora.

Aproximadamente un número de 12 piezas fueron analizadas desde el punto de vista de la trabajabilidad, observándose la calidad de la superficie obtenida por acción de la herramienta de corte.

Estas pruebas fueron llevadas a cabo sólo en Tamarugo y Algarrobo por la imposibilidad de construir elementos mecánicos a partir del Espino.

### 2.5 Herramientas y equipos empleados

Las maquinarias empleadas y las herramientas de corte específicas que forman parte de la maquinaria, responde a cada uno de los procesos de maquinado aplicados.

#### 2.5.1 Cepillado

Para esta operación se empleó una máquina cepilladora con cabezal de cuchillos rectos con ángulos de ataque que se especificaron en el punto 2.4.1 de este capítulo.

### 2.5.2 Taladrado

Se usó un taladro eléctrico y brocas de 1/2" y 1" de diámetro, con ángulo de punta equivalente a 120°.

Para la determinación de los esfuerzos de penetración fue necesario implementar un sistema especial que utilizó un elemento de medición de fuerza (dinamómetro) y un torno mecánico adaptado para posicionar a el conjunto broca-dinamómetro. Del torno fue importante usar el carro de desplazamiento que posee.

### 2.5.3 Lijado

Para el desarrollo del proceso de lijado se empleó una lijadora orbital y papeles abrasivos grano 80 y 120.

### 2.5.4 Torneado

En este proceso se utilizó un torno universal mecánico.

### 2.5.5 Fresado

Este tipo de trabajabilidad se llevó a cabo en una fresadora universal marca U.F. (Alemana).

## 2.6 Procedimientos de evaluación

Luego de realizadas las operaciones de cepillado, taladrado, torneado y fresado en todas las probetas consideradas y de acuerdo a las variables involucradas en cada caso, se inspecciona cada muestra visualmente para detectar la posible aparición de defectos en la superficie. Los tipos de defectos más característicos de estos procesos y la forma de tabulación de los resultados, se detallan a continuación:

### 2.6.1 Cepillado

Se examinan las probetas visualmente, clasificando cualquier posible defecto que se presente de acuerdo a su grado, sobre la base de la siguiente escala:

Grado 1 (excelente: libre de defectos)

- Grado 2 (bueno)
- Grado 3 (aceptable)
- Grado 4 (malo)
- Grado 5 (muy malo)

Esta escala desde su grado 1 a 5 es aplicable a los defectos más comunes encontrados luego del cepillado de madera. Estos defectos se indican y explican a continuación:

- Grano levantado: superficie rugosa producto de un levantamiento de la madera dura de verano sobre la madera blanda de primavera, pero no hay desgarro del material suelto (común en madera de coníferas).
- Grano o fibra suelta (grano lanoso): partículas pequeñas o grupos de fibras que no separan claramente en el maquinado, pero que se disponen sobre el nivel general de la superficie sin producirse pérdida de material.
- Grano desgarrado: pérdida de material en grupos importantes de fibras sobre la superficie trabajada.
- Marcas de astillas: mellas poco profundas en la superficie que se disponen paralelas a la dirección de las fibras.

Las marcas de cuchillo por pulgadas no serán consideradas un defecto.

Con respecto a la evaluación del proceso y posterior comparación entre especies y variables de operación utilizadas, debe mencionarse que la base de comparación son los porcentajes obtenidos de piezas libres de defectos y la ocurrencia de defectos de cepillado suaves (grados 1 y 2). Sin embargo, la presencia de los grados 3, 4 y 5 sirven para dar una visión más completa de los grados de algunos defectos que se presentan y además permiten comparar también la calidad de superficie obtenida. Dos cosas deben ser tenidas en mente: (1) Grados consecutivos emergen gradualmente sin algún cambio abrupto en calidad o alguna clara línea divisoria. (2) Algún grado dado no está totalmente uniforme en calidad, pero tiene un rango entre el peor y el mejor ejemplo dentro del grado. Cualquiera sea la situación planteada, se consideró necesario asumir para un defecto dado el grado promedio presente en la superficie evaluada.

Como es lógico, la evaluación de los defectos y sus grados de ocurrencia, se hizo sobre la base de los patrones presentados en la Norma ASTM D-1666 Fotografía N° 1 y 2).

### 2.6.2 Lijado

Las muestras fueron examinadas y calificadas por rayado y fibra suelta, empleándose como base de comparación entre especies y granos de lija usado, el porcentaje de piezas libres de defectos.

Además debe considerarse que el mayor o menor grado de rayado que se produzca en la superficie, depende sin duda del grano de la lija utilizada y de la técnica de maquinado del operador. Por esta razón, este defecto se analiza en términos descriptivos y se mencionará su presencia o ausencia.

### 2.6.3 Taladrado

Como se mencionó en su momento, el taladrado se realiza variando para cada especie la velocidad de rotación de la broca.

El comportamiento de tamarugo, algarrobo y espino ante el proceso de taladrado, se mide analizando los orificios y graduando los defectos tales como el triturado, desgarrado y fibra suelta. Además, debe observarse la suavidad general del corte. Cada orificio se califica sobre una escala de cinco grados igual a la expuesta para el proceso de cepillado y la comparación de las diferentes especies se basa en el porcentaje de orificios en grado 1 o grado 2.

### 2.6.4 Torneado

Las muestras de torneado corresponden a los ejes que son ensayados en la etapa 3 de este proyecto y se califica su textura superficial haciendo un registro de todos los defectos encontrados en una escala de grado 1 a grado 5. Se hacen comparaciones basadas en los porcentajes de los tres mejores grados. Los defectos más comunes de la operación de torneado son grano suelto, aspereza y grano desgarrado.

### 2.6.5 Fresado

Dada la forma de los engranajes fresados, es muy difícil calificar y cuantificar los defectos producidos, por lo tanto, en este proceso se procede a realizar una evaluación, sobre la base de antecedentes prácticos de operación observados durante el ensayo y que permitan diferenciar las aptitudes relativas de cada especie al ser comparadas.

### 2.6.6 Aserrado en verde y dimensionado en seco

Para estos procesos no existe cuantificación de defectos, sino que se procede a examinar visualmente a través de fotografías la calidad de la superficie obtenida para cada especie y establecer así un análisis comparativo. Complementariamente, se mencionan aspectos prácticos de operación que caracterizan los procesos en cuestión.

## 3. PRESENTACION DE RESULTADOS

### 3.1 Cepillado

Del estudio de los resultados obtenidos se desprende que en el cepillado de las tres especies maquinadas, los defectos producidos son grano o fibra suelta y grano desgarrado. Por lo tanto, los cuadros resumen muestran sólo esos defectos y sus cuantificaciones en términos de grado y porcentaje de ocurrencia en relación a la superficie total. Además los cuadros indican el porcentaje de probetas con presencia de cada defecto. Debe considerarse que la suma de dichos porcentajes no es igual a 100%, pues existen piezas que presentan en su superficie maquinada más de un defecto.

La presentación de los resultados obtenidos para cada especie se desglosan en: a) cuadros resumen, y b) observaciones.

3.1.1 Cuadro resumen de resultados

CUADRO 1. Número total de probetas según tipo y grado de defectos, ángulo de ataque y espesor de corte para cada especie cepillada.

ESPECIE	Probetas por especie	Angulo de Ataque	Espesor de Corte	Grano o fibra suelta (grados)					Grano desgarrado (grados)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Tamarugo	16	30°	0.5 mm	4	2	4	-	-	4	6	1	2	1
Algarrobo	16	30°	0.5 mm	3	1	3	1	-	3	2	3	4	1
Espino	16	30°	0.5 mm	0	8	3	-	-	0	4	6	1	1
Tamarugo	16	30°	1.5 mm	4	2	4	-	-	4	2	3	2	2
Algarrobo	16	30°	1.5 mm	3	-	1	1	1	3	2	3	5	3
Espino	16	30°	1.5 mm	0	6	1	2	-	0	2	10	3	-
Tamarugo	16	24°	0.5 mm	5	-	1	-	-	5	5	1	2	3
Algarrobo	16	24°	0.5 mm	6	-	2	-	-	6	-	4	3	3
Espino	16	24°	0.5 mm	3	-	-	2	3	3	2	2	4	5
Tamarugo	16	24°	1.5 mm	6	2	-	-	-	6	1	3	1	5
Algarrobo	16	24°	1.5 mm	11	1	1	-	-	11	2	-	1	1
Espino	16	24°	1.5 mm	3	1	-	1	-	3	5	4	2	1

NOTA: No debe olvidarse que el grado 1 para cada defecto corresponde a probetas libres de defectos y por lo tanto son las mismas para grano suelto y grano desgarrado.

CUADRO 2. Porcentaje de probetas libres de defectos según especie, ángulo de ataque y espesor de corte.

Especie	Angulo ataque	Espesor corte	Total probetas	Total probetas s/defectos	%
Tamarugo	30°	0.5 mm	16	4	25,0
Algarrobo	30°	0.5 mm	16	3	18,8
Espino	30°	0.5 mm	16	0	0,0
Tamarugo	30°	1.5 mm	16	4	25,0
Algarrobo	30°	1.5 mm	16	3	18,8
Espino	30°	1.5 mm	16	0	0,0
Tamarugo	24°	0.5 mm	16	5	31,3
Algarrobo	24°	0.5 mm	16	6	37,5
Espino	24°	0.5 mm	16	3	18,8
Tamarugo	24°	1.5 mm	16	6	37,5
Algarrobo	24°	1.5 mm	16	11	68,8
Espino	24°	1.5 mm	16	3	18,8

NOTA: No debe dividirse por el grado de ataque y espesor de corte para cada dato correspondiente a las especies libres de defectos y por lo tanto son las mismas para cada especie y grado de ataque.

CUADRO 3. Superficie promedio ocupada por cada tipo de defecto en relación a la superficie total de la probeta, expresado en porcentaje.

Especie	Angulo de ataque	Espesor de corte	Tipo de defecto	
			Grano o fibra suelta (%)	Grano desgarrado (%)
Tamarugo	30°	0.5 mm	8,0	9,0
Algarrobo	30°	0.5 mm	12,5	23,7
Espino	30°	0.5 mm	11,6	14,4
Tamarugo	30°	1.5 mm	22,0	24,4
Algarrobo	30°	1.5 mm	26,0	22,9
Espino	30°	1.5 mm	8,4	12,2
Tamarugo	24°	0.5 mm	1,0	15,0
Algarrobo	24°	0.5 mm	8,0	14,3
Espino	24°	0.5 mm	5,0	6,2
Tamarugo	24°	1.5 mm	24,0	14,4
Algarrobo	24°	1.5 mm	14,0	20,0
Espino	24°	1.5 mm	7,5	9,8

### 3.1.2 Observaciones

Con el propósito de complementar los resultados obtenidos en el proceso de cepillado de las tres especies estudiadas, es importante considerar una serie de observaciones hechas durante la operación y que se ratifican luego del detallado análisis de la superficie maquinada.

Tamarugo, algarrobo y espino son especies de alta densidad y disposición anárquica de los elementos fibrosos a lo largo de las piezas de madera. Esta disposición, hace que el enfrentamiento producido entre el cuchillo y las fibras sea en ángulos diversos, en diferentes zonas de cada probeta. Por esta razón, durante el proceso de corte, se producen fuertes golpes de cuchillo sobre la superficie, en aquellas zonas de grano encontrado que dieron origen en muchos casos a la producción de los defectos caracterizados y en otros, a la eliminación parcial o total del extremo de las muestras o de algunos costados de ellas. Esta situación fue más frecuente en la madera de tamarugo.

En el estudio, se pasaron muestras de madera con defectos naturales (nudos, corteza incluida, etc.) para observar el efecto sobre la calidad de superficie. Los resultados obtenidos muestran serios problemas de calidad superficial, principalmente en las zonas adyacentes a los nudos debido a la fuerte inclinación de las fibras colindantes (Fotografías N° 3 y 4).

Durante la obtención de probetas, se hizo muy difícil conseguir espino libre de defectos naturales y por lo general, las probetas los presentaron en superficie. Esto originó que las muestras cepilladas evidenciaron generalmente defectos de maquinado. Además, debido a la dificultad en conseguir diámetros grandes para esta especie, las probetas tenían incorporadas habitualmente, un porcentaje alto de albura, razón por la cual se producía una diferencia de calidad superficial al tratarse de cepillado en este tejido o en duramen. Un hecho agravante que se suma a lo anterior, consistió en que la madera de espino seleccionada mostraba fuertes ataques de insectos en la zona de la albura, que hizo imposible obtener madera de buena calidad para ser cepillada. Sin embargo, en aquellas zonas con ausencia de defectos (nudos, corteza, ataque de insectos) la superficie obtenida fue de excelente calidad con apariencia lustrosa al igual que tamarugo y algarrobo. Sin duda, de los dos defectos producidos en el cepillado, grano o fibra suelta y grano desgarrado, es este último el que más problemas conlleva, pues por una parte su ocurrencia en zonas de grano encontrado y la alta densidad de las maderas estudiadas, provoca un desgaste prematuro de las herramientas de corte; y por otra, la magnitud con que generalmente se presentó este tipo de defecto hace irrecuperable una pieza, aún sometiéndola a un proceso posterior de lijado (Fotografías N° 5, 6 y 7).

La desviación de fibras anárquica que presentan estas especies, principalmente el tamarugo, es la causa de muchos de los defectos aparecidos e incluso de los altos grados en que éstos se manifestaron.

### 3.2 Taladrado

El único defecto observado en todas las probetas y para cada una de las especies estudiadas, fue aquel conocido como grano aplastado. Este defecto, consiste en un levantamiento de las fibras al estilo del defecto conocido como grano o fibra suelta, pero que sin embargo, no se observa como tal, luego de realizada la perforación, pues se produce un aplastamiento del material por parte de la broca, luego de sucesivas rotaciones de ésta.

Por otra parte, la determinación de los esfuerzos de penetración con broca de 1" de diámetro se efectuó en la dirección transversal y longitudinal en las tres especies, dando los valores indicados en el Cuadro (Promedio de 8 ensayos).

#### 3.2.1 Cuadros resumen de resultados

CUADRO 4. Superficie promedio ocupada según tipo defecto y número de probetas según grado del defecto; para tamarugo, algarrobo y espino en taladrado bajo dos velocidades de rotación de broca de 1/2" de diámetro.

Especie	Velocidad de rotación (r.p.m.)	N° total de probetas	Grano aplastado					
			Ocupación superficial promedio(%)	N° probetas por grado				
				1	2	3	4	5
Tamarugo	740	16	18,7	10	6	-	-	-
Algarrobo	740	16	26,3	3	8	5	-	-
Espino	740	16	14,3	12	4	-	-	-
Tamarugo	1.240	16	19,2	11	5	-	-	-
Algarrobo	1.240	16	25,4	5	6	5	-	-
Espino	1.240	16	13,5	13	3	-	-	-

CUADRO 5. Esfuerzo promedio de penetración de broca de 1" de diámetro

Especie	Velocidad Broca r.p.m	Velocidad de Penetración cm/min	Dirección Grano	Esfuerzo de Penetración Normal (Kgs)	Esfuerzo de Penetración Máj (Kg)
Tamarugo	650	6,0	L	43,0	47,0
		6,0	T	28,2	34,0
		12,0	L	67,0	67,0
		12,0	T	41,0	48,0
Algarrobo	650	6,0	L	26,2	30,7
		6,0	T	20,9	24,9
		12,0	L	34,0	34,0
		12,0	T	24,2	30,0
Espino	650	6,0	L	26,3	31,3
		6,0	T	16,5	25,2
		12,0	L	40,0	40,0
		12,0	T	25,3	31,3

L = longitudinal  
T = transversal

### 3.2.2 Observaciones

En las tres maderas estudiadas se puede observar que la zona de cada perforación que no presenta defecto adquiere una excelente terminación superficial con evidente apariencia lustrosa. Este defecto es sin duda más notorio en la madera de tamarugo y espino.

La calidad de las perforaciones efectuadas debe también analizarse en relación a la terminación de las zonas de salida de la broca, puesto que es habitual que se presente desgarramiento de fibras en los bordes. Este defecto, de no gran importancia, se presentó en forma

bastante más notoria en algarrobo, siendo para tamarugo y espino casi inexistente.

Este proceso de corte, no difiere de los procesos tradicionales y por lo tanto, la calidad de la terminación superficial está directamente relacionada con la densidad de la madera cortada. Por esta razón, es posible también, observar en el taladrado diferencias de comportamiento entre albura y duramen.

También presenta gran importancia en estas pruebas el tipo de broca utilizada y los respectivos ángulos y geometría de la herramienta, por lo tanto debe tomarse en consideración que los esfuerzos determinados en el presente ensayo rige para las condiciones previamente establecidas.

Desde el punto de vista del material ensayado el taladrado se llevó a cabo solamente en madera de duramen y en las direcciones transversal y longitudinal para las tres especies, seleccionándose 6 probetas por esfuerzo, sin presencia de defectos en la zona de perforación.

Es interesante hacer notar el hecho que producto de la experimentación, aparece un esfuerzo máximo en cada ensayo localizado al inicio de la operación, disminuyendo posteriormente a un valor constante como se indica en el Cuadro 5 y definido como un esfuerzo de penetración normal. (Fotografía N° 8).

### 3.3 Lijado

#### 3.3.1 Cuadros resumen de resultados

CUADRO 6. Total de probetas libres de defectos para tamarugo, algarrobo y espino, según grano de lija empleado.

Especie	Grano lija	N° total de probetas	N° total de probetas sin defectos
Tamarugo	80	16	16
Algarrobo	80	16	16
Espino	80	16	16
Tamarugo	120	16	16
Algarrobo	120	16	16
Espino	120	16	16

### 3.3.2 Observaciones

De acuerdo a los antecedentes bibliográficos recopilados sobre esta operación, resultan ser dos los defectos más comunes observados luego del maquinado; rayado superficial y fibra suelta. Sin embargo, como se muestra en el cuadro anterior, ninguno de ellos fue observado en el proceso de lijado y por lo tanto, la totalidad de las probetas maquinadas carecen de defecto alguno.

Este proceso de lijado fue realizado en probetas que fueron directamente obtenidas del proceso de dimensionado en seco, pues es ésta la secuencia más lógica de operación. El acabado superficial que se obtuvo para las tres especies fue de excelente calidad, sin importar el grano de lija. (Fotografías N° 9, 10 y 11).

Como ya se ha dicho, la terminación superficial de la madera cortada en seco es de muy buena calidad, pero existen zonas con defectos tales como desviación de fibra marcada o nudos, que hacen obtener algunos defectos de corte importantes. Estas zonas sin duda, muestran fuertes diferencias de textura superficial con respecto a la zona lijada. Cuando estos defectos de lijado son de magnitud elevada, el proceso no permite eliminarlos totalmente.

Tal como se ha venido mencionando en las operaciones de corte anteriores, existen diferencias de textura entre la madera de albura y duramen. El dimensionado en seco no está ajeno a esta situación, pero el lijado logra remediar el problema entregando con grano 120 una excelente terminación superficial.

### 3.4 Torneado

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la operación de torneado de ejes y se indican algunas observaciones prácticas de operación que constituyen elementos de gran interés en la determinación de las aptitudes de las tres especies frente a este proceso de maquinado. (Fotografía N° 12).

Especie	Grano	Observación
1	20	Superficie lisa
2	30	Superficie lisa
3	40	Superficie lisa
4	50	Superficie lisa
5	60	Superficie lisa
6	70	Superficie lisa
7	80	Superficie lisa
8	90	Superficie lisa
9	100	Superficie lisa
10	110	Superficie lisa
11	120	Superficie lisa

3.4.1 Cuadro resumen de resultados

CUADRO 7. Torneado. N° de probetas con defectos, superficie de ocupación promedio del defecto y N° de probetas sin defectos para tamarugo, algarrobo y espino.

Especie	N° total de probetas	N° total de probetas s/de defectos	Defecto: grano o fibra suelta				
			Superf. prom. ocupada (%)	N° probetas c/ defecto según grano			
				2	3	4	5
Tamarugo	8	4	20,6	2	2	-	-
Algarrobo	8	0	55,8	-	1	3	3
Espino	8	5	18,3	2	1	-	-

3.4.2 Observaciones

Es indudable que el torneado constituye una de las operaciones de maquinado más importantes por la gran utilización en la transformación de la madera en piezas donde está implícito superficies cilíndricas (ejes, bujes, poleas y engranajes).

La calidad de la superficie torneada depende de factores relacionados con la geometría de la herramienta de corte, fundamentalmente de los ángulos de ataque, incidencia y de salida, como así también de la velocidad de rotación de la pieza (dependiente del diámetro) y de la velocidad de avance de la herramienta de corte. Por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente estudio se refiere a las condiciones pre-definidas.

No obstante lo anterior, y a vista de los resultados obtenidos según Cuadro 7, es clara la disposición que presentan las tres especies frente al proceso de torneado y la marcada diferencia de la calidad desde el punto de vista de su densidad.

### 3.5 Fresado

El proceso de fresado implica una operación que permite la formación de ranuras de forma diversa, similar al trabajo que se efectúa en el moldurado. El término es aplicado normalmente en la trabajabilidad de metales, que incluye la fabricación de ruedas dentadas (engranajes).

La trabajabilidad de fresado se ha aplicado en el presente estudio en la madera, específicamente en la fabricación de engranajes dadas las posibilidades de aplicación de uso industrial.

Se descartó en este caso la construcción de estos elementos en base a madera de espino por los resultados completamente desfavorables en el secado que no justifica su uso, de igual manera el algarrobo no presenta las condiciones mecánicas que lo hagan atractivo. Sin embargo, como el estudio se refiere a la trabajabilidad del fresado independiente de su uso, se ha tomado en cuenta esta última especie, además del tamarugo, concentrándose el interés principalmente en el tamarugo.

El Cuadro 8 muestra los resultados sobre un total de 8 engranajes por especie.

CUADRO 8. Fresado. Defectos según grano o fibra suelta.

Especie	N° total de probetas	N° total de probetas s/defecto	Defecto: grano o fibra suelta			
			N° de probetas c/defecto según grano			
			2	3	4	5
Tamarugo	8	6	1	1	-	-
Algarrobo	8	5	1	2	-	-

#### 3.5.1 Observaciones

El fresado se efectuó con fresas (herramienta de corte) de módulos 2,5 y 3, empleándose una velocidad de 500 r.p.m. y una velocidad de avance de 1,2 m/min.

### 3.6 Aserrado en verde y dimensionado en seco

En este punto se describen sólo algunas observaciones realizadas durante ambos procesos y se indican algunas figuras ilustrativas. El análisis visual de la madera aserrada en verde ratifica sin duda, los alcances hechos en relación a la calidad de la superficie obtenida. Es así como la terminación superficial que se obtuvo en las tres especies, no corresponde a un nivel aceptable aunque es evidente que dicha textura es superior a la obtenida para algunas maderas de menor densidad (Fotografías N° 13, 14 y 15). Incluso es posible observar en la superficie cortada, las marcas dejadas por la sierra durante el corte. Esta operación fue realizada con velocidades de corte y de avance muy bajas debido a la alta densidad de las tres especies.

Por su parte, en el dimensionado en seco, los resultados obtenidos fueron significativamente buenos, observándose escasos defectos producto del corte y marcas tenues de la sierra utilizada. Esta buena terminación superficial, es atribuible a la alta densidad de las maderas, el bajo contenido de humedad con que fueron trabajadas y las características de la herramienta de corte (Fotografía N° 16).

La sierra circular utilizada en el aserrado presenta como característica técnica, un espesor de 4,5 mm, diámetro de 540 mm y un paso de 50 mm, con dientes tipo S fijo trabado.

El dimensionado en cambio, se efectuó con una sierra de dientes calzados con bisel frontal y superior alterno, de un espesor de 3 mm, diámetro de 300 mm y un paso de 20 mm.

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos se realiza en forma independiente para cada operación de maquinado efectuada con la madera de tamarugo, algarrobo y espino.

### 4.1 Cepillado

De los defectos observados en el cepillado, el grano desgarrado en sus grados 3, 4 y 5 corresponde al que presenta mayores problemas, pues es muy difícil su eliminación posterior.

En las tres especies estudiadas no es muy claro el panorama en relación a los resultados obtenidos, debido a la variabilidad de características que presentan sus maderas. Sin embargo, es posible deducir que el algarrobo es el que presenta mejores resultados a juzgar por el porcentaje de probetas libres de defectos que se obtuvo. Esta situación es mucho más clara en el caso de usar un ángulo de ataque de 24°. Para esta misma especie resultó más satisfactorio el espesor de corte de 1,5 mm bajo el mismo ángulo de 24°, situación que parece algo contradictoria pero que se puede explicar por la variabilidad en el ángulo de inclinación de las fibras.

El tamarugo por su parte, presenta resultados también algo contradictorios; sin embargo, igualmente es posible observar mejor comportamiento bajo ángulo de ataque de 24°, sólo analizando el número de probetas sin defectos. En relación al espesor de corte, el comportamiento se presenta mejor en el caso de 0,5 mm para ángulo de ataque de 30° y la situación no es tan clara con ángulo de 24°.

Por su parte en espino, se puede observar que existe un mejor comportamiento al cepillar con ángulo de 24°. Con respecto al espesor de corte, las muestras presentan mejor terminación superficial con espesor de 0,5 mm bajo 30° de ángulo de ataque y de 1,5 mm en el caso de 24°. Estos resultados, un tanto contradictorios, no pueden tener otra explicación que no sea la alta heterogeneidad de la madera respecto al ángulo de sus fibras y a la imposibilidad de obtener siempre piezas libres de defectos naturales, dada las características propias de la especie.

Pese a la existencia de gran cantidad de probetas con defectos de grano suelto y grano desgarrado, se debe hacer notar que los defectos en cuestión no superan en ocupación de la superficie trabajada más del 25% de ella, observándose en aquellas zonas que no los presentan, una terminación superficial excelente y apariencia marcadamente lustrosa.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.2 Taladrado

En general, las tres especies presentan excelentes resultados al taladrado. Sin embargo, el tamarugo y espino superan en comportamiento al algarrobo, pues la calidad de superficie de las perforaciones es excelente y de un marcado aspecto lustroso. La presencia del defecto grano aplastado, no constituye un menoscabo a la textura de la superficie cortada, pues la suavidad de esa zona es también de buen nivel. Además, el porcentaje promedio que ocupa no es tan alto (13 a 26%) y con grados 1, 2 y 3, lo cual ratifica el buen comportamiento de estas maderas.

De los ensayos realizados se desprende también, que no existen diferencias significativas al perforar con velocidades de rotación de 740 y 1.240 r.p.m.

Por otra parte, la determinación de los esfuerzos de penetración según Cuadro 5 muestran para todas las especies un incremento del esfuerzo a mayor velocidad de penetración, como así también valores mayores en el sentido longitudinal que en el transversal, no comportándose en este caso proporcionalmente al incremento de la velocidad.

En el sentido longitudinal los esfuerzos llegan a ser aproximadamente superior con respecto al transversal en un 52,3% para el tamarugo, 25,4% para el algarrobo y un 59,4% en el caso del espino.

Una comparación entre las tres especies, permite establecer de acuerdo a los valores del mismo cuadro, un mayor esfuerzo en el tamarugo, seguido por el espino y el algarrobo, observándose una diferencia significativa de estas dos últimas especies con respecto al tamarugo.

#### 4.3 Torneado

Un análisis de los resultados obtenidos permite establecer las excelentes condiciones que presenta el tamarugo en procesos de torneado, entregando una superficie extraordinariamente lisa, sin presencia de rayaduras en madera de duramen.

De igual manera, el espino presenta muy buenas condiciones de trabajabilidad en torneado pero en todo caso inferior al tamarugo.

El algarrobo, en cambio, no reaccionó en forma tan positiva mostrando superficies rugosas con desgarramiento de fibras. Sin embargo, este resultado no puede considerarse definitivo, siendo necesario una mayor investigación en esta especie para mejorar estas condiciones.

Las razones del éxito logrado en las especies tamarugo y espino pueden encontrarse en la alta densidad de estas especies (mayor resistencia mecánica), la presencia de un porcentaje importante de extraíbles contenidos en la pared celular que ayudan a la suavidad de la superficie (lubricación) y a una adecuada preparación de la herramienta de corte.

#### 4.4 Fresado

Los resultados obtenidos en este caso, muestran una excelente disposición de las especies tamarugo y algarrobo, lo cual puede hacerse extensivo al moldurado.

El tamarugo entrega una superficie tanto del fondo de los dientes como de la zona lateral, una excelente terminación muy parecida al torneado, cualquiera sea la dirección de la fibra, lo cual lo hace extremadamente interesante por sus posibilidades de uso y el trabajo continuo de roce a que están sometidos los engranajes.

El algarrobo también resultó exitoso en este tipo de trabajabilidad con una buena calidad de la superficie.

## 5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos para cada especie en relación a sus características de trabajabilidad y con apoyo de una serie de observaciones sobre aspectos prácticos de operación es posible extraer las siguientes conclusiones:

- Las tres especies estudiadas presentan algunos problemas frente al cepillado, producto de la disposición de sus fibras en ángulos diversos. Los defectos más comunes son grano o fibra suelta y grano desgarrado. Sin embargo, el algarrobo es la especie con mejores resultados, aunque en todas las especies existe una textura excelente cuando no están los mencionados defectos.
- Con 24° de ángulo de ataque en cepillado de algarrobo, se obtiene mejores resultados que usando 30°. En relación al espesor de corte, el uso de 1,5 mm da una buena respuesta.
- Tamarugo presenta mejor comportamiento usando ángulo de ataque de 24° y no existe claridad para diferenciar respuesta entre espesores de corte diferentes. Para 30° de ángulo de ataque el espesor de 0,5 mm corresponde al de mejor calidad de superficie obtenida.
- Espino es una especie con presencia de gran cantidad de defectos naturales y por ende la respuesta frente al proceso de cepillado no es tan clara. Sin embargo, aparentemente existe un resultado más favorable empleando ángulos de ataque de 24° y no es tan clara la situación al analizar el espesor de corte.
- En resumen, la variabilidad de la madera de estas especies no permite obtener resultados muy claros en relación a la terminación superficial luego del cepillado. Sin embargo, producto de la alta densidad que presentan, la textura de las caras maquinadas es de alta suavidad y apariencia lustrosa, cuando hay ausencia de defectos de proceso.

- Pese a la existencia de gran cantidad de probetas con defectos de cepillado, principalmente tamarugo y espino, debe considerarse que la ocupación relativa de ellas en la superficie total trabajada no supera el 25%.
- En todas las especies y en zonas con enfrentamiento fuerte entre fibras y cuchillo se produce grano desgarrado en su grado 5 que no es posible eliminar posteriormente ni siquiera lijando.
- Tamarugo, espino y algarrobo presentan excelentes resultados al taladrado; sin embargo, algarrobo no arroja tan buenos resultados como las otras dos especies.
- No existen diferencias significativas al taladrar con velocidades de 740 y 1,240 r.p.m.
- Los esfuerzos de penetración de brocas son significativamente mayores en el tamarugo que en el espino y algarrobo, siendo estos últimos del mismo orden de magnitud. Esfuerzos en el sentido longitudinal superan el 50% al transversal en el tamarugo y algarrobo.
- La terminación superficial de las tres especies es lustrosa y de alta suavidad. Se evidencia muestras de grano aplastado, pero en bajo porcentaje de ocupación y con suavidad muy buena.
- No existen diferencias significativas de comportamiento al lijado de las tres especies; siendo en todos los casos excelente e incluso es posible eliminar grados bajos de algunos defectos producidos en el dimensionado.
- El grano de lija usado (Nº 80 y 120) sólo hace observable una pequeña diferencia de textura, pero en ningún caso existe presencia de defectos como el denominado fibra suelta.
- Existen muestras de rayaduras en superficie lijada, principalmente cuando se emplea lija de grano Nº 80, hecho absolutamente natural, pero que se acentúa por mala técnica de operación empleada.
- Terminaciones de superficies torneadas de tamarugo y espino presentan un excelente acabado sin presencia de rayaduras o desgarramiento de fibra, mientras que el algarrobo no entregó los resultados esperados, caracterizándose por una superficie muy rugosa y proyección de fibras desgarradas.
- La trabajabilidad de fresado en madera de tamarugo y algarrobo dió excelentes resultados, entregando una superficie lisa con grado 2 y

3 de defecto parecido a la terminación del torneado en tamarugo. El comportamiento anterior puede hacerse extensivo a los procesos de moldurado.

- En relación al proceso de aserrado verde y dimensionado seco, se concluye que la calidad de la terminación obtenida en ambos casos es buena, si se compara con los procesos de corte en otras especies. Esto tiene su explicación en la alta densidad del material leñoso empleado y en la calidad de las herramientas usadas en cada caso.
- El dimensionado en seco es de una calidad de superficie notable, que incluso no requeriría proceso de cepillado posterior, a no ser por algunos pequeños defectos ocasionales que se presentan en las caras y que tienen su origen en la presencia de defectos naturales de cada madera. La apariencia lograda es de carácter lustroso y suave.

### CAPITULO III

#### FABRICACION Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS MECANICOS DE MADERA DE ALTA DENSIDAD PARA USOS ESPECIALES

##### FABRICACION DE ELEMENTOS MECANICOS

##### 1. ANTECEDENTES GENERALES

Uno de los objetivos relevantes planteados en el proyecto, se refiere a la fabricación de elementos mecánicos construídos a partir de las tres especies de alta densidad consideradas en el estudio.

Sin embargo, los antecedentes técnicos obtenidos en los procesos de secado, los cuales definen en gran medida las posibilidades potenciales de los posibles usos, mostraron grandes limitaciones en la especie Acacia caven (espino), debido fundamentalmente a la imposibilidad de obtener piezas de madera de calidad aceptable que permitiera la confección de las piezas mecánicas previstas. Tanto en el secado natural como artificial de dicha especie se detectó a simple vista la presencia de tensiones de crecimiento, principal causante de la deformación de torceduras y arqueaduras.

Contribuye a lo anterior la gran dificultad en el proceso de secado, tanto artificial como natural, detectado a través de los resultados obtenidos y reflejados en los tiempos largos del proceso y la formación de defectos inaceptables de grietas y rajaduras, tanto en la cantidad presente como en la intensificación o grado del defecto. Esta reacción frente al proceso se explica básicamente por el hecho de tratarse de una especie de baja permeabilidad, creándose fuertes gradientes de humedad y presencia de tensiones internas.

Por otro lado, el grado de aprovechamiento (rendimiento volumétrico) de la troza puede considerarse como muy bajo, alcanzando valores comprendidos entre un 25 a un 30%, lo cual no es atractivo para eventuales usos. Las causas se encuentran en los diámetros reducidos prevalecientes, geometría distorsionada de las trozas, presencia de un porcentaje importante de albura no deseable para la fabricación de piezas, todo lo cual hacía prácticamente inevitable la obtención de piezas con presencia de albura.

Las razones anteriormente argumentadas, conducen a establecer por el momento la inconveniencia de utilizar esta especie en alguna aplicación de tipo industrial, limitándose este importante recurso más bien hacia su utilización en aspectos ecológicos, alimentación de

ganado, producción de leña y carbón como combustible y en adornos artesanales menores.

Por los motivos expuestos, no se consideró en el presente estudio la fabricación de elementos a partir de esta especie.

La situación es diferente en el caso del tamarugo y el algarrobo, donde los procesos de secado pueden considerarse como muy buenos en el caso del tamarugo y sorprendente por la excelente calidad de la madera obtenida en el caso del algarrobo (ver capítulo I).

Estos resultados decidieron la determinación de fabricar diferentes piezas mecánicas y evaluar su uso. La alta densidad mostrada por el tamarugo, los defectos limitados y factibles de controlar durante el proceso de secado al horno, aspecto estético de la madera y características excelentes en su trabajabilidad (reacción frente a una herramienta de corte) lo hacen especialmente atractivo a posibles usos.

Por otro lado, el algarrobo presenta una gran facilidad de secado sin presencia de defectos, sumándose a lo anterior otras cualidades relevantes como son el comportamiento de una gran estabilidad dimensional y un buen aprovechamiento de las trozas, que lo hacen atractivo de emplear en ciertas piezas mecánicas, aún cuando su densidad no sea tan alta como el caso del tamarugo.

Se descartó en este estudio la construcción de elementos a partir de rodela, dado los resultados inaceptables de defectos obtenidos en las especies tamarugo y espino. El algarrobo, en cambio, aún cuando no se detectaron defectos de rajaduras y grietas, no mostraron condiciones apropiadas para el uso de engranajes en pruebas preliminares de resistencia en el sentido tangencial.

La fabricación de las diferentes piezas se llevaron a cabo en un taller mecánico provisto de las máquinas necesarias para un buen maquinado como son los tornos, fresadoras y taladros. También fue utilizada toda la infraestructura del taller de carpintería del Departamento de Tecnología de la Madera para la fabricación de piezas para usos menores.

Finalmente, en la confección de conectores para madera como son los tarugos, lamelos y lenguetas y chavetas longitudinales, se emplearon maquinarias de elaboración correspondiente a un serrucho circular, sierra huincha carpintera, cepilladora y lijadora.

El proceso no presentó ningún problema, obteniéndose elementos en buenas condiciones para ser ensayados.

## 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 2.1 Descripción general

Pueden distinguirse desde el punto de vista del uso de los elementos mecánicos fabricados, aquéllos que pueden emplearse directamente en transmisiones mecánicas y que se indican a continuación:

- Descansos o cojinetes
- Ejes
- Poleas de correas planas
- Poleas de correas en V o trapezoidales
- Engranajes de dientes rectos

Por otro lado, se tienen elementos de fijación que corresponden dentro de lo propuesto en el proyecto a los siguientes tipos de piezas:

- Pernos
- Chavetas longitudinales
- Conectores para madera (tarugos, lamelos y lenguetas)

En la fabricación de los elementos mecánicos de empleo directo se utilizó fundamentalmente, máquinas herramientas correspondientes a un torno mecánico y una máquina fresadora universal, complementándose con un taladro de pedestal para transformaciones menores.

Como procedimiento general en la fabricación de los elementos mecánicos, se llevó a cabo, en primer lugar, una selección del material (madera de tamarugo y algarrobo) no aceptándose en las diferentes piezas, la presencia de grietas y rajaduras. La madera utilizada se obtuvo indistintamente de un secado natural o al horno, aceptándose un contenido de humedad máximo de un 15%.

Uno de los aspectos de mayor trascendencia introducidos en la fabricación se refiere al empleo de madera laminada, esto es, las piezas aserradas originalmente en escuadrias de 50 x 50 mm y 75 x 75 mm, se unieron para formar otras de mayor ancho.

Las razones de esta medida se justifican por la necesidad de construir piezas de dimensiones mayores y además por la importancia de lograr un mejor aprovechamiento, dadas las limitaciones propias de la especie.

Los resultados obtenidos fueron óptimos desde el punto de vista de la adhesión, resistiendo todos los elementos los esfuerzos mecánicos a que fueron sometidos en los diferentes ensayos.

A continuación se ejecutó el maquinado propiamente tal, hasta obtener los elementos de transmisión terminados, finalizando con una inspección visual minuciosa, principalmente en lo relativo a la terminación de la superficie. Alcances prácticos en relación a la interacción de la herramienta de corte-madera, facilidad en la operación y tiempo de ejecución fueron también considerados en los resultados.

## 2.2 Características y selección del material

Las piezas de maderas seleccionadas, libres de defectos, tanto de tamarugo como de algarrobo, se obtuvieron de material acondicionado a un promedio de 12% de contenido de humedad, a partir de escuadrias de 50 x 50 mm y 75 x 75 mm y de un largo original de 0,45 m.

En la práctica fue imposible elegir una determinada orientación, predominante de la fibra, dado el hecho que los elementos mecánicos utilizados en transmisiones son de forma geométrica circular, por lo tanto siempre se tiene una combinación de las tres direcciones típicas de la madera (longitudinal, tangencial y radial) considerando el clásico corte de aserrado de la madera. Este aspecto tiene la máxima importancia por la influencia que presenta en la terminación y resistencia mecánica de dichos elementos.

El número de elementos mecánicos fabricados por cada tipo varió entre un mínimo de seis a un máximo de 12 por especie, los cuales fueron utilizados posteriormente en los ensayos y en la evaluación descrita más adelante.

## 2.3 Equipos utilizados

### a) Torno mecánico universal

Esta máquina herramienta fue utilizada en la fabricación de todos los elementos de transmisión.

### b) Fresadora universal

Esta máquina permite entallar los dientes que conforman el engranaje. Se caracteriza por disponer de un eje porta-fresa que puede girar con cuatro diferentes velocidades comprendidas entre las 50 r.p.m. y 1.000 r.p.m. Cuenta con un carro de movimiento automático con velocidad variable, sobre el cual se encuentra el cabezal divisor que permite dividir exactamente la periferia de la pieza a entallar según sea el número de dientes. La potencia de la unidad es de 3 HP.

c) Herramienta de corte

Complementando lo anterior, se utilizaron herramientas de corte para el torneado, fresado y taladrado, adaptadas para la trabajabilidad de la madera.

2.4 Secuencia técnica en el maquinado

a) Fabricación de cojinetes

Características dimensionales y orientación de fibra:

- Largo : 55 mm
- Diámetro exterior : 65 mm
- Diámetro interior : 35 mm
- Dirección de fibra : Sentido longitudinal coincidente con el eje de simetría.

Secuencia de las diferentes operaciones efectuadas en el torno.

- Torneado exterior
- Perforación central con broca
- Torneado interior
- Refrentado lateral en ambos extremos

b) Fabricación de ejes

Características dimensionales y orientación de fibra:

- Largo : 450 mm
- Diámetro : 35 mm
- Dirección fibra : Sentido longitudinal coincidente con el eje de simetría.

Secuencia de las diferentes operaciones efectuadas en el torno.

- Torneado exterior
- Dimensionado en el largo
- Refrentado lateral en ambos extremos

c) Fabricación de poleas planas

Características dimensionales y orientación de fibra:

- Diámetro exterior (mm) : 70 - 140
- Ancho : 60 mm
- Perforación central : 35 mm
- Dirección de fibra : Variable

Secuencia de las diferentes operaciones efectuadas en el torno:

- Perforación central con broca
- Torneado interior
- Torneado exterior
- Refrentado lateral y vaciado lateral (forma geométrica)
- Lijado

d) Fabricación de poleas en V

Características dimensionales y orientación de fibras:

- Tipo de ranura : A
- Diámetro primitivo (mm) : 89,6 - 189,6
- Ancho : 36 mm
- Diámetro perforación central : 35 mm
- Dirección de fibra : Variable

Secuencia de las diferentes operaciones efectuadas en el torno:

- Perforación central con broca
- Torneado interior
- Confección de ranura en V TIPO A
- Refrentado lateral y vaciado lateral
- Lijado

e) Fabricación de engranajes

Características dimensionales y orientación de fibra:

- Módulo : 2,5 y 3,0
- Número de dientes : 27 - 21 - 54 - 42
- Diámetro exterior (mm) : 72,5 - 69 - 140 - 132
- Diámetro perforación central : 35 mm
- Ancho (mm) : 25 - 30
- Orientación de fibra : Sentido longitudinal  
coincidente con el eje de  
simetría.

Secuencia de las diferentes operaciones efectuadas en el torno y fresadora:

- Perforación central con broca
- Torneado interior, perforación central
- Torneado diámetro exterior
- Refrentado lateral
- Entallado de los dientes, utilizando máquina fresadora y la correspondiente fresa según módulo y número de dientes.

f) Fabricación de pernos

Características dimensionales y orientación de fibra:

- Diámetro : 15 mm (3/4")
- Largo : 75 mm (3")
- Número de hilos por pulgada : 18

Secuencia de las diferentes operaciones efectuadas en el torno:

- Torneado diámetro exterior y cabeza del perno
- Confección de la rosca o hilo
- Refrentado de la cabeza del perno

También se fabricaron pernos de rosca cuadrada con un paso de 3 mm y un diámetro de 1".

Fotografía N° 17 representa algunos de los diferentes elementos mecánicos que fueron fabricados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados en la fabricación de los elementos mecánicos, no pueden presentarse y analizarse estrictamente bajo el punto de vista del maquinado propiamente tal sin referirse a un conjunto de interacciones como es la trabajabilidad y los ensayos mecánicos presentados más adelante en el presente capítulo.

Es por ello que las conclusiones que pueden establecerse sobre su fabricación más bien forman parte de las conclusiones del proyecto en general.

La confección de las diferentes unidades constituye sólo el medio para disponer de dichos elementos y estudiarlos, dependiendo el resultado de una buena o mala pieza obtenida de factores convergentes como son:

- Características físicas y anatómicas de la madera.
- Dirección de la fibra, en relación a la geometría del elemento a fabricar.
- Características técnicas de las herramientas de corte.
- Características técnicas de la máquina utilizada y que dice relación con la velocidad de avance y velocidad de corte.
- Habilidad del operador en su fabricación.

Puede observarse que los factores citados están directamente relacionados con aspectos de trabajabilidad (terminación) y las propiedades mecánicas.

No obstante, lo anterior es de gran interés dejar constancia de los aspectos cualitativos más relevantes que fueron observados en el proceso de maquinado haciendo referencia a la trabajabilidad ya estudiada en el capítulo II.

### 3.1 Elementos mecánicos construidos en madera de algarrobo

Perforaciones efectuadas con brocas de espiral (ángulo de  $120^\circ$ ) no presentan dificultad en ninguna dirección de la fibra con un esfuerzo de penetración bajo según los datos obtenidos al respecto y coincidente con la facilidad que puede apreciarse en la práctica.

Por otro lado, la operación de torneado también es efectuada con comodidad sin mayor esfuerzo, sin embargo la terminación que se logra en ciertas zonas (torneado en la periferia) dejan mucho de desear, principalmente donde se presentan fibras en contrasentido dejando una superficie con proyección de fibras. Esta situación es fácilmente corregida lijando simplemente la superficie.

El comportamiento explicado anteriormente, se extiende a todas las piezas sometidas al maquinado de torno.

La confección de engranajes como así también, la fabricación de pernos no resultaron en esta especie muy alentadoras.

Lamentablemente ciertas zonas de la periferia donde se efectúa el entallado no respondían a las perspectivas deseadas, observándose dos dificultades notorias. Por un lado, un desprendimiento del diente a diferentes alturas y un desgarramiento de material a la salida de la herramienta (término de la confección de un diente).

Estos defectos se observaron en las zonas donde la dirección de la fibra es tangente a cualquier circunferencia, comprendida entre el diámetro exterior y la base del diente, por lo tanto el desprendimiento se debe a un esfuerzo de clivaje, esto es, por abertura de las fibras.

Por otra parte, resultados poco alentadores se observaron en la fabricación de pernos, específicamente en la confección de la rosca. Tanto en el caso de la rosca triangular como cuadrada, se produce una destrucción del hilo, lo cual puede atribuirse a las dimensiones reducidas de altura y paso, y una posible no adecuación de la herramienta de corte que se adapte a la madera (ángulo en general).

### 3.2 Elementos mecánicos construidos en madera de tamarugo

Los esfuerzos de corte en cualquiera de las herramientas utilizadas tanto en torneado, fresado o uso de broca, son mayores notándose en la práctica al realizarse el avance del carro porta-herramienta en forma manual. Este comportamiento está de acuerdo con el estudio de trabajabilidad respectivo.

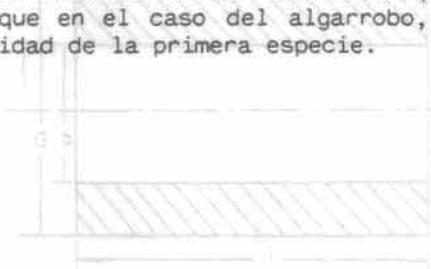
Independiente de este comportamiento, las terminaciones de las superficies son excelentes, de una calidad muy superior al Algarrobo.

El torneado resulta excepcional con las herramientas de corte, según característica técnica ya descrita. Sin embargo, el fresado de ruedas dentadas (engranajes) de diámetro superior (sobre los 200 mm) resultaron problemáticos con desprendimiento de parte de los dientes en aquellas zonas donde la dirección de la fibra es tangente a la circunferencia correspondiente a la base del diente, contribuyendo a este defecto las vibraciones de la pieza mientras ésta es fresada. Las ruedas dentadas de diámetros menores dieron excelentes resultados, mientras que en la confección de pernos se observó un comportamiento similar al Algarrobo.

### 4. CONCLUSIONES

- El torneado en la fabricación de elementos mecánicos de transmisión resulta aceptable en el caso del algarrobo y de excelente calidad en madera de tamarugo y espino.

- Esfuerzos de corte superiores se observan en los diferentes procesos de maquinados en el tamarugo que en el caso del algarrobo, debido principalmente a la mayor densidad de la primera especie.



= Gran importancia en la terminación de las piezas presenta la dirección de la fibra, predominando la mejor calidad en las zonas donde no se presentan fibras en contrasentido a la dirección de avance de la herramienta de corte o en la rotación de la pieza a toronar.

= Buenos resultados se obtienen en la fabricación de ruedas dentadas, utilizando fresas con ángulo de ataque de 15° en madera de tamarugo. Condiciones no favorables en la terminación y destrucción parcial de los dientes en ciertas zonas, según dirección de fibra se obtuvieron con mayor intensidad en el algarrobo.

- Fresado perpendicular a la fibra no resulta ser el más adecuado, destruyéndose el diente por cizalle.

COMPORTAMIENTOS DE ELEMENTOS MECANICOS

- ESTUDIO DE ELEMENTOS DE TRANSMISION

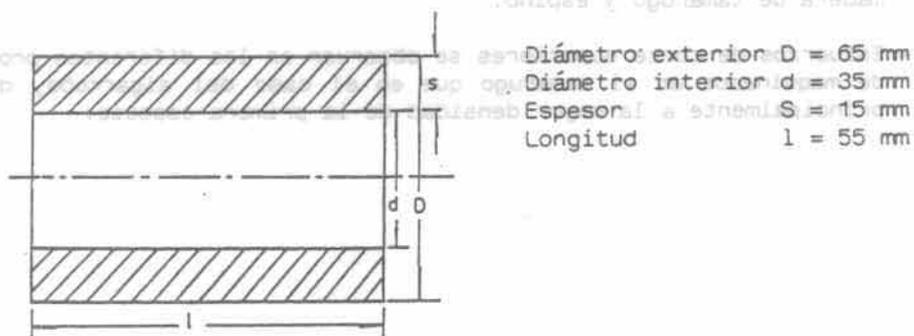
A. COJINETES DE DESLIZAMIENTO

1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

1.1 Material de ensayo

El material de ensayo consistió en bujes fabricados en base a un dimensionamiento tentativo. Estos fueron construídos para trabajar con un eje de acero de 35 mm de diámetro. Se adoptó un valor de 1,5 para la razón largo del cojinete-diámetro del gorrón (en este caso igual al diámetro del eje), correspondiendo a un valor intermedio de los prescritos para los cojinetes más corrientes usados en transmisión. El diámetro exterior fue elegido un poco menor que el doble del diámetro interior, determinando un espesor que se consideró adecuado a los objetivos del estudio. (Para cojinetes de fundición gris, se recomienda que:  $D = 1,3 d + 15 \text{ mm}$ , donde D es el diámetro exterior y d el diámetro interior).

Figura N° 1 : esquema de cojinete y medidas adoptadas.



La instalación de los bujes en el soporte, apoyo A (Figura N° 2) fueron ajustados a un anillo de acero, el cual fue alojado en el interior de un soporte de cojinete de rodamientos y fijado a éste mediante la fuerza de apriete de la tapa de dicho soporte.

Previo al desarrollo de los ensayos sistemáticos se creyó necesario efectuar algunas experiencias que permitiesen delimitar el rango de estudio de los parámetros de funcionamiento. Para este objetivo se ensayaron dos bujes por cada una de las diferentes combinaciones de parámetros que determinarían las condiciones más exigentes. En total se verificaron seis combinaciones, ensayándose un total de 12 bujes por especie. Los resultados obtenidos llevaron a descartar algunos de los niveles de parámetros que se habían considerado inicialmente, así fue que se eliminaron del estudio los dos últimos niveles de presión (3 y 4 kg/cm<sup>2</sup>) y el mayor nivel de velocidad (3,5 m/seg), reteniéndose finalmente los siguientes valores:

Presión superficial media, pm (kg/cm<sup>2</sup>): 1,0; 2,0  
 Velocidad periférica, v (m/seg): 0,5; 1,5

Para determinar la condición más favorable de funcionamiento se efectuaron ensayos bajo diferentes combinaciones de los parámetros considerados, determinándose en cada una de ellas la velocidad de calentamiento y la temperatura máxima alcanzada por el cojinete y el eje, como así mismo la situación de su estado general (desgaste, presencia de grietas, deformaciones, ruido producido) después de lapsos de funcionamiento de 2 y 4 horas; la temperatura se midió mediante una termocupla ubicada sobre el buje por la cara exterior de su sección transversal, en intervalos de 5 minutos de modo de establecer una curva característica de la velocidad de calentamiento hasta alcanzar el nivel de temperatura de régimen.

Los tratamientos establecidos, definido por las combinaciones de los parámetros considerados, fueron los siguientes (el subíndice del parámetro indica el nivel del valor en orden creciente):

Número de tratamiento	Presión media superficial	Velocidad periférica	Juego
1	P1	V1	J1
2	P1	V2	J1
3	P1	V1	J2
4	P1	V2	J2
5	P2	V1	J1
6	P2	V2	J2
7	P2	V1	J2

Se efectuaron dos repeticiones por cada tratamiento, ensayándose un total de 14 bujes por especie.

## 2. RESULTADOS Y DISCUSION

Del total de bujes ensayados sólo uno, de madera de tamarugo, supera las 16 horas de funcionamiento; en algarrobo sólo uno alcanzó a lo más 12 horas de trabajo (con detenciones en periodos de cuatro horas). El mejor comportamiento se obtuvo, para ambas especies, en el tratamiento p1 v1 J2 en que se combinan el primer nivel de presión ( $p_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$ ) y el primero de velocidad ( $v_1 = 0,5 \text{ m/seg}$ ) y el juego máximo ( $J_2 = 0,6 \text{ mm}$ ). Los otros tratamientos que les siguen con resultados un poco inferiores fueron p1 v1 J2 y p2 v1 J2. Los peores resultados se obtuvieron con las combinaciones que involucran el juego J1, es decir los tratamientos p1 v1 J1, p1 v2 J1 y p2 v1 J1.

La mayoría de los bujes mostraron un alto grado de carbonización, produciéndose por lo general agripamiento, ruido excesivo y marcha irregular producto de un notorio desgaste, cuando ellos lograron sobrepasar las cuatro horas de funcionamiento. La zona de contacto entre eje y cojinete tendió a pulimentarse a espejo, dando un aspecto grafitado por el roce del gorrón sobre la madera carbonizada pero presentando pequeñas fisuras o estrías longitudinales en la misma dirección de las fibras, lo que hace suponer que corresponden a los espacios dejados por el rompimiento de los vasos a medida que se producía el desgaste.

Los resultados muestran que el juego entre gorrón y cojinete tiene un rol preponderante; en efecto con juegos inferiores a 0,6 mm se produjo generalmente agripamiento (ruido excesivo y vibración) y ulterior fractura (también se produjo fractura en funcionamiento) durante los primeros periodos de trabajo. Esto sin duda, es producto de la interacción de diversos factores, a saber: dilatación térmica diferente entre ambos materiales, contracción de la madera al calentarse y perder humedad, formación de depósitos de carbón, pérdida de resistencia mecánica de la madera por efecto de la temperatura, hinchamiento de la madera al absorber humedad en los periodos de detención, asimetría de las variaciones dimensionales por efectos térmicos y de humedad.

Los juegos reducidos favorecen para que se produzca, en un corto tiempo, elevaciones considerables de temperatura producto del calor generado por la fricción, lo que provoca una rápida carbonización de

Tratamiento	Velocidad (m/seg)	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Juego (mm)	Horas de funcionamiento
1	v1	p1	J1	0
2	v2	p1	J1	0
3	v1	p2	J1	0
4	v2	p2	J1	0
5	v1	p1	J2	16
6	v2	p1	J2	12
7	v1	p2	J2	12
8	v2	p2	J2	12

la madera en la zona de contacto y variaciones dimensionales (cuyo efecto neto implica una reducción del diámetro del buje) que el juego no puede compensar, tendiendo a trabar o agripar el eje, produciéndose ruido y vibración. Se generan así tensiones internas importantes que son causa de fractura ya sea durante la marcha o cuando el buje se contrae al enfriarse una vez que se ha detenido el movimiento. La situación es agravada debido a la orientación asimétrica de los anillos de crecimiento ya que la diferencia en la magnitud de las contracciones en las direcciones radial y tangencial favorece a la creación de concentración de tensiones.

Una fractura típica en los bujes, consistió en una partidura longitudinal siguiendo la dirección de las fibras (la que en la mayoría de los casos se presenta inclinada, especialmente en tamarugo). Pese a que la magnitud del juego con que se obtuvo los mejores resultados relativos fue 0,6 mm, éste puede considerarse demasiado elevado si se pretende estudiar la posibilidad de uso de aceites lubricantes, dado la alta presión que éstos deberían desarrollar para sustentar al eje y llegar a un estado de rozamiento fluido o de rotación, así mismo, como se colige de los resultados, el juego no evita que se produzcan fracturas, por el contrario, el juego excesivo favorece a que se provoquen choques en el arranque originando la ruptura del cojinete, especialmente cuando éste ha llevado un cierto tiempo de funcionamiento y se encuentra debilitado por grietas, fisuras y carbonización.

En relación al calentamiento de los cojinetes, las temperaturas máximas y los tiempos en que ellas fueron alcanzadas, referidas a una temperatura ambiental de 20°C; se observa que el promedio de la temperatura máxima de funcionamiento del cojinete alcanzó cerca de 60°C en ambas especies, lo que referida a una temperatura ambiental de 20°C, significa un incremento de 40°C en un período medio de alrededor de 30 minutos.

### 3. CONCLUSIONES

- Todos los bujes de madera requieren de un elevado juego para poder absorber las variaciones dimensionales, lo que hace difícilmente factible la lubricación por aceites.

- Los cojinetes experimentan grandes cambios dimensionales en forma irregular, lo que produce importantes concentraciones de tensiones, causantes de fractura al enfriarse y absorber humedad. Este efecto es mucho más pronunciado en tamarugo que en algarrobo.

- Se detecta carbonización en la superficie interior de los cojinetes, que en menor grado es favorable puesto que el carbón tiende a disminuir el coeficiente de roce entre las superficies.
- La temperatura media de régimen alcanzada en los cojinetes, se situó, en general, dentro de niveles aceptables; sin embargo, el calor disipado a través del eje resultó excesivo. Se requiere prever un sistema de refrigeración para disminuir la temperatura, mejorándose de esta manera su rendimiento.
- De las características generales de funcionamiento de los cojinetes en estudio, se establece que las especies estudiadas pueden ser aptas para fabricar este tipo de elementos siempre y cuando ellos sólo sean destinados para sistemas livianos de transmisión con una frecuencia de trabajo moderado. Los resultados indican que no sería conveniente sobrepasar una presión media de  $1 \text{ kg/cm}^2$  con una velocidad periférica máxima de  $0,5 \text{ m/seg}$ . El grado de confiabilidad de estos valores sólo puede ser establecido a través de un estudio más específico.

## B. EJES DE TRANSMISION

### 1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 1.1 Material de ensayo

Se construyeron 12 ejes de 35 mm de diámetro y 45 cm de largo para cada especie. Los ejes de tamarugo, en general, presentaron una superficie relativamente lisa, sin embargo en algunos de ellos se observaron grietas en los extremos, producto de tensiones internas desarrolladas durante su secado; en cambio, los ejes de algarrobo presentaron una superficie menos lisa pero con mucho menos agrietamiento en los extremos. El acabado a lija de los ejes de tamarugo resultó notablemente superior que los de algarrobo. Esta terminación no tiene influencia en las pruebas de resistencia.

Los ensayos de estos elementos se efectuaron en el banco de pruebas, en una situación similar a como se ensayaron los cojinetes, reemplazando el eje de acero de esa transmisión por los ejes de madera.

#### 1.2 Metodología de ensayo

Dada la alta resistencia a la flexión que presentan las maderas en estudio, no se consideró necesario efectuar ensayos en estas condiciones, dándole mayor preponderancia a los ensayos de torsión.

Se concibió un sistema formado de polea motora y una conducida, ambas de aluminio con correas trapeciales unidas al eje mediante chavetas de acero (se ensayaron además con chavetas de madera). La disposición de la transmisión se muestra en la Figura N° 3.

A objeto de diseñar el ensayo fue necesario poseer una noción sobre el valor de esfuerzo de ruptura a la torsión de las maderas en estudio, para lo cual se efectuaron ensayos preliminares de 12 probetas cilíndricas con extremos cuadrados a fin de efectuar una buena sujeción y aplicación de la carga; esta última se verificó a través de llave de torque.

El valor medio de esfuerzo de torsión fue de 194 kg/cm<sup>2</sup>, esto significa que se requería de un torque promedio de 8,16 kg-m para producir la fractura del eje, disponiéndose de 1,42 kg-m a velocidad nominal; esto implicó reducir la velocidad del eje conductor, a través de la elección adecuada de los diámetros de las poleas de transmisión intermedia.

Se procedió al ensayo aplicando carga en intervalos de 5 kg hasta tratar de producir la fractura del eje.

## 2. RESULTADOS Y DISCUSION

En el ensayo de tamarugo sólo tres muestras llegaron a la ruptura, de los restantes seis sufrieron falla en el chavetero y en los otros no fue posible provocar su fractura. Respecto a los ejes de algarrobo, la mitad de ellos fueron fracturados en torsión, el resto falló en el chavetero.

Los resultados muestran que el torque medio de ruptura para tamarugo (sin considerar los que fallaron en el chavetero) fue de 7,3 kg-m, de lo que se obtiene un esfuerzo medio de ruptura a la torsión de 173 kg/cm<sup>2</sup>, el mínimo valor obtenido fue de 107 kg/cm<sup>2</sup>. Para algarrobo el esfuerzo de torsión medio resultó igual a 5,0 kg-m, el cual determina un esfuerzo de ruptura medio de 199 kg/cm<sup>2</sup>, correspondiendo el mínimo valor a 90 kg/cm<sup>2</sup>.

Las fracturas en los chaveteros de los ejes de tamarugo se produjeron a consecuencia de concentración de tensiones inducidas en las aristas, agravadas por la existencia de posibles grietas internas y fibras inclinadas. En algarrobo, las fallas se originaron por aplastamiento.

### 3. CONCLUSIONES

- El tamarugo podría utilizarse en la fabricación de ejes destinado a transmisiones livianas, siempre y cuando el aspecto de seguridad no sea muy importante, puesto que existe el riesgo de la presencia de grietas internas, no detectables visualmente, que puedan producir una fractura repentina del elemento.
- La madera de algarrobo a pesar de alcanzar un valor aceptable de resistencia a la torsión, es muy recomendable como para ser utilizada en este tipo de elemento.

### C. POLEAS DE CORREAS PLANAS Y TRAPEZOIDALES

#### 1. METODOLOGIA

##### 1.1 Material utilizado

- La no disponibilidad de material en las dimensiones requeridas para la fabricación de las poleas, condujo a la necesidad de unir trozos de madera de dimensiones menores mediante encolados, usándose para este efecto urea formaldehído y resorcinol fenol-formaldehído.

El dimensionamiento de las poleas se efectuó de acuerdo a medidas normalizadas en cuanto ello fue posible. Ambos tipos de poleas se construyeron para trabajar con ejes de acero y madera de 35 mm de diámetro y en una relación de transmisión,  $1 = 1/2$ .

A continuación se dan las medidas correspondientes a las correas y poleas:

##### - Poleas correas planas:

Correa de caucho con fibra textil, ancho 59 mm y 3 mm de espesor.

Diámetro polea motora	: 70 mm
Diámetro polea conducida	: 140 mm
Diámetro agujero	: 35 mm
Ancho polea	: 60 mm

##### - Poleas correas trapeziales:

Correa caucho con fibra, tipo A; sección 13 x 8,7 mm.

Diámetro exterior polea motora	: 100 mm
Diámetro efectivo polea motora	: 89,6 mm

Diámetro exterior polea conducida : 200 mm  
Diámetro efectivo polea conducida : 189,6 mm  
Diámetro agujero : 35 mm  
Ancho polea : 36 mm

Todas las poleas fueron fabricadas macizas, sin cubo, practicándose, sólo en el caso de las poleas planas, un pequeño alivianamiento (Fotografías N° 18 y 19); además, con objeto de poder fijarlas al eje se les ejecutó un chavetero de 10 x 8 mm de sección y 52,5 mm de largo (DIN 6885).

Se fabricaron un total de 12 juegos de poleas, 6 por cada especie, las que fueron ensayadas en el banco de pruebas que fue diseñado y construido especialmente para el desarrollo de estas experiencias.

### 1.2 Metodología de ensayo

A objeto de evaluar el comportamiento de las poleas, éstas fueron instaladas en el banco de prueba, configurando el sistema de transmisión que se ilustra en el esquema de la Figura N° 4.

Fueron ensayadas 12 muestras por especie, en diferentes tipos de corte, con el acabado de superficie dejado por la sierra circular; el contenido de humedad de las probetas correspondió a la humedad de equilibrio ambiental de las especies estudiadas (aprox. 12% - 14%).

## 2. RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores promediados del coeficiente de fricción obtenidos en los ensayos de rozamiento, fueron los siguientes:

Tamarugo:  $\mu = 0,406$

Algarrobo:  $\mu = 0,420$

Se observa que el valor correspondiente a tamarugo resultó ser levemente inferior que para el algarrobo, esto concuerda con experiencias al respecto, donde se ha demostrado que a medida que la densidad de la madera es mayor, el coeficiente de roce disminuye, así mismo se ha encontrado que variaciones de humedad entre estado anhidro y contenido de humedad de equilibrio en condiciones ambientales, no producen variaciones significativas en la fricción. Dada la pequeña diferencia en el valor del coeficiente entre ambas especies, se adoptó su valor promedio,  $\mu = 0,41$ .

Los parámetros más característicos del diseño de la transmisión, fueron obtenidos en función del coeficiente de roce, u especificado anteriormente, el ángulo abrazado por la correa, en la polea motora y con un valor de fuerza tangencial, P, de 42 kg, correspondiente a la máxima potencia útil a transmitir.

La transmisión con correas trapeciales tanto el rendimiento del ramal tenso como el coeficiente de tracción de la correa son muy elevados, requiriendo por otra parte una tensión de montaje bastante menor que la necesaria para las poleas de correas planas.

El alto módulo de fricción en la transmisión con correa trapezial se debe al elevado coeficiente de roce entre los materiales, adicionado al efecto de incremento de roce que se obtiene con la acanaladura. Esto permite inferir que es posible reducir considerablemente el ángulo abrazado por la correa sin alterar mayormente el rendimiento, lo que en otros términos significa la posibilidad de trabajar con relaciones de transmisión muy reducidas.

En la Figura N° 5, se muestran las curvas de variación de la potencia útil en función del porcentaje de resbalamiento, correspondiente a cada tipo de polea y según especie. Se aprecia una tendencia creciente del resbalamiento a medida que potencia aumenta, como es normal que ello ocurra. Para que el sistema trabaje con un buen rendimiento y la correa dure un tiempo suficiente, no es conveniente sobrepasar el límite de deslizamiento de 3%; pues en caso contrario, el deslizamiento produce un calentamiento excesivo de las poleas deteriorándolas rápidamente y provocando una tendencia a la carbonización de la superficie de la madera.

Bajo el punto de vista mecánico, todas las poleas tuvieron un excelente comportamiento, no detectándose ningún tipo de deterioro por la acción de las cargas actuantes.

En primer término, se puede observar que a igualdad de rendimiento por deslizamiento las poleas de correas trapeciales permiten transmitir cerca del 70% más de potencia que las poleas de correas planas.

En la transmisión por correas planas las de tamarugo mostraron una mayor capacidad de transmisión de potencia, posiblemente debido al mejor acabado de superficie que se obtiene con esta madera, lo que hace obtener una mejor adherencia.

En poleas con correas trapeciales prácticamente los resultados fueron idénticos para las dos especies, enmascarándose el efecto de acabado de superficie.

**3. CONCLUSIONES**

- Las poleas de correas planas fabricadas de tamarugo permiten transmitir, con un elevado rendimiento, una potencia de hasta 1 HP a una velocidad de correa de 5,0 m/seg.
- Excelentes propiedades presentaron las poleas de correas trapecial construídas en tamarugo y algarrobo, siendo posible transmitir hasta 2 HP a una velocidad de correa de 5,0 m/seg.
- En función de los resultados anteriores, se pueden inferir los valores para otras transmisiones de distinta capacidad.

**D. ENGRANAJES CILINDRICOS DE DIENTES RECTOS**

**1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Se construyeron 6 juegos de engranajes compuestos de piñón y rueda, fabricados con cada una de las especies estudiadas. En los piñones construídos con ambas especies, el tallado de los dientes resultó bastante satisfactorio, no ocurriendo lo mismo con las ruedas, donde se produjo fractura durante el maquinado, especialmente en el caso del algarrobo y en la madera de albura en tamarugo.

Los engranajes se dimensionaron de acuerdo al sistema normalizado Brown and Sharpe, en módulos 2,5 mm y 3,0 mm, sus dimensiones principales fueron las que se especifican a continuación:

Dimensión	Piñones		Ruedas	
	M=2,5 mm	M=3,0 mm	M=2,5 mm	M=3,0 mm
Diámetro primitivo	67,5	63	67,5	126
Diámetro exterior	72,5	69	140	132
Largo del diente	25	30	25	30
Número de dientes	27	21	54	42
Diámetro del agujero	35	35	35	35

El número total de engranajes previsto inicialmente fue reducido a un mínimo por las dificultades que presentó su construcción. Los ensayos de evaluación de su comportamiento se realizaron en el banco de prueba diseñado al efecto, donde se ensayaron conformando dos situaciones; como juego piñón-rueda y formando un tren de engranajes con una rueda intermedia de gran dimensión ( $D = 245$  mm y  $Z = 98$  dientes). El ensayo consistió en aplicar carga variable mediante la acción de un momento torsor resistente creado mediante el freno de Prony, en la rueda conducida, hasta un nivel de carga tal que se produjese la fractura de los dientes. (Fotografía N° 20).

## 2. RESULTADOS Y DISCUSION

En todos los ensayos se produjo fractura de los dientes con una carga tangencial de baja y mediana magnitud. Los más resistentes resultaron ser los contruidos con madera de tamarugo, sin embargo presentaron gran variabilidad. La máxima potencia útil transmitida alcanzó alrededor de 1 HP sufriendo fractura posteriormente al detenerse y reiniciar la marcha.

A pesar de que la resistencia a la flexión de los dientes es bastante aceptable, esta capacidad se ve menoscabada por la presencia de pequeños defectos de la madera que quedan ubicados en zonas críticas del diente, iniciándose la fractura por esos puntos; otro inconveniente importante fue el que se presentó en algunos casos relativos a la falta de paralelismo de los dientes en engrane o desuniformidad en la superficie de contacto; en efecto, basta una leve deformación de un diente para que ello sea producto de fractura al tender a concentrarse la acción de la carga en el diente que engrana.

## 3. CONCLUSIONES

- De las dos especies estudiadas la que resultó más apta para la fabricación de engranajes fue el tamarugo.
- No se demuestra factible el uso de maderas de alta densidad para la construcción de engranajes destinados a sistemas de transmisión por el alto riesgo de fractura que ellos presentan. Su uso sería posible en situaciones muy especiales donde se requiere transmitir baja velocidad con muy escasa potencia.

## ESTUDIO DE ELEMENTOS DE FIJACION

### A. CHAVETAS LONGITUDINALES

#### 1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El ensayo de las chavetas no se efectuó siguiendo un método sistemático, se aprovechó de evaluar su comportamiento, utilizándolas en la fijación de las poleas de madera al eje de acero en la ocasión del ensayo de poleas; para este efecto se fabricaron numerosas chavetas tratando de que ellas presentasen distintas orientaciones de fibras y anillos; sus dimensiones fueron 10 x 8 mm de sección y 55 mm de largo, de acuerdo a los requerimientos establecidos en el ensayo de poleas.

#### 2. RESULTADOS

En general las chavetas de tamarugo presentaron un muy buen comportamiento, puesto que ellas no sufrieron fractura durante los ensayos, habiendo estado sometidas a elevadas tensiones de trabajo. El inconveniente que presentan es que prácticamente no son utilizables, puesto que quedan deformadas o se deterioran al desmontar la polea.

#### 3. CONCLUSION

Las chavetas longitudinales de madera de tamarugo se muestran aptas para ser utilizadas en la fijación de madera a ejes de madera o acero.

### B. CONECTORES PARA MADERA: TARUGOS, LAMELOS Y LENGUETAS

#### 1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se fabricaron tarugos de tamarugo y algarrobo en tres diferentes dimensiones: 6, 8 y 10 mm; así mismo se obtuvieron lenguetas de 10 cm de largo y 5 cm de ancho, con un flanco inclinado en 1/10, con estos elementos se estructuraron uniones.

Para la instalación de los lamelos se procedió de la manera corriente practicando las ranuras correspondientes en cada una de las partes a unir, constituidas de tableros de partículas y contrachapado. Los tarugos también fueron instalados en la forma tradicional utilizándose en la unión de madera de Pino Insigne. Estos dos tipos de elementos de

unión fueron ensayados mediante la aplicación de una carga periódica aplicada en sentido transversal, haciendo un efecto de palanca sobre la unión hasta provocar la ruptura o desunión de los elementos.

1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2. RESULTADOS Y DISCUSION

El ensayo de las clavetas no se efectuó siguiendo un método. Mediante el ensayo de cargas periódicas ningún elemento de unión de ambas especies se fracturó, fallando el material de los elementos unidos o bien soltándose la unión por aplastamiento progresivo que produjo el tarugo y lamelo sobre el material.

Para las lenguetas no se siguió una metodología sistemática de ensayo sino más bien se trataron de obtener resultados de tipo cualitativos. En general se observó una aparente funcionabilidad; sin embargo, examinando las superficies de contacto se visualizó un exceso de aplastamiento de las maderas de alta densidad sobre las superficies de madera de pino, lo que hace suponer que no tendrían un muy buen funcionamiento por su marcada diferencia en dureza y elasticidad.

En los ensayos de tarugos y lamelos se observó un comportamiento, puesto que ellas no sufrieron fractura durante los ensayos, habiendo estado sometidas a elevadas tensiones de tracción.

3. CONCLUSIONES

- Los tarugos y lamelos podrían ser aptos para ejecutar uniones en maderas de densidades altas. En la unión de elementos de madera de densidades medias y bajas no tienen buen comportamiento.

- En las lenguetas sólo se preve su utilización con fines decorativos.

8. CONECTORES PARA MADERA: TARUGOS, LAMELOS Y LENGUETAS

1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se fabricaron tarugos de tarugo y algarrobo en tres diferentes dimensiones: 6, 8 y 10 mm. Al mismo tiempo se obtuvieron lenguetas de 10 cm de largo y 5 mm de ancho, con un fijeo incluido en 1/10, con estos elementos se efectuaron uniones.

Para la instalación de los lamelos se procedió de la manera siguiente practicando las ranuras correspondientes en cada una de las partes a unir, consistiendo de ranuras de partículas y contrapartidas. Los tarugos también fueron instalados en la forma tradicional utilizándose en la unión de madera de Pino Insigne. Estos dos tipos de elementos de

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1971. Annual Book of ASIM Standards. ASTM D 1666-64.
2. ASSOCIATION FRANCAISE OF NORMALISATION. N. F. Edit. for AFNOR. 1942.
3. BOLZA, N. y KEATING, W. G. 1972. African timbers. The properties, uses and characteristics of 700 species. CSIRO, Div. Build. Res. Melbourne, Australia.
4. BLUHM, E. et al. 1965. Recuperación del colapso en madera de Eucalipto (Eucalyptus globulus). En: Actas de la Reunión sobre Investigaciones en Productos Forestales. Instituto Forestal. Informe Técnico N° 21. pp. 147-152.
5. CONTRERAS, DAVID. 1978. Estado actual de conocimiento del tamarugo (Prosopis tamarugo Phil.). Santiago, Chile. FAO. 23 p.
6. CONTRERAS, O. 1982. Distribución, productividad y manejo de ecosistemas naturales y artificiales de tamarugo y algarrobo en Chile. Algarroba U.Z. Simposio Brasileiro sobre Algarroba. Empresa Pesquisa Agropecuaria de Río Grande de Norte S.A. Natal, Brasil.
7. CUEVAS, E. 1985. Usos alternativos de tamarugos y algarrobos. Características y propiedades tecnológicas de la madera. Universidad de Chile. Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile.
8. CUEVAS, E. 1965. Determinación de la contracción y colapso en el secado de la madera de Eucalyptus viminalis. En: Actas de la Reunión sobre Investigaciones en Productos Forestales. Instituto Forestal. Informe Técnico N° 21. pp. 166-171.
9. \_\_\_\_\_ 1969. Incidencia en los fenómenos de contracción y colapso en el secado de algunas maderas comerciales de Chile. En: Actas de la Reunión sobre Investigaciones en Productos Forestales. Instituto Forestal. Informe Técnico N° 36. pp. 145-155.

10. \_\_\_\_\_ et al. 1985. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de tamarugo y algarrobo de la Pampa del Tamarugal. En: Estado actual del conocimiento sobre Prosopis tamarugo: Mesa Redonda Internacional sobre Prosopis tamarugo Phil. Arica, Chile, 11-15 de Junio. pp. 357-366.
11. CUMBIE, B. G. 1960. Anatomical studies in the Leguminosae. Tropical Woods, 113: 1-48.
12. DONOSO, J. et al. 1985. Durabilidad natural y permeabilidad de la madera de tamarugo (Prosopis tamarugo Phil.) y algarrobo (Prosopis alba Griseb.). En: Estado actual del conocimiento sobre Prosopis tamarugo: Mesa Redonda Internacional sobre Prosopis tamarugo Phil. Arica, Chile. 11-15 de Junio. pp. 367-371.
13. ENDERSBY, H. J. 1965. The cutting action of woodworking. IUFRO Congr. Proc. Vol. 3, Sect 41, 7 p. Melbourne.
14. ESTADOS UNIDOS. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1965. Secado de la madera. México. Centro Regional de Ayuda Técnica. 159 p.
15. FAO. 1970. Informe sobre el proyecto de plantaciones de tamarugo y explotación ganadera en el norte grande. Washington D.C. FAO, 264 p.
16. GUTIERREZ, M. 1985. Diseño y construcción de un túnel experimental para procesos de secado a alta temperatura. Revista Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. 4(2): 43-53.
17. HABIT, M. A.; CONTRERAS, D. y GONZALEZ, R. 1981. Prosopis tamarugo: arbusto forrajero para zonas áridas. Roma, FAO. 143 p.
18. HASLLET, A. N. 1983. Drying properties of New Zealand - grown Acacia melanoxylon. New Zealand Journal of Forestry Science 13(2): 130-138. For. Rest. Inst., N.Z. For. Serv., Rotorua, New Zealand.
19. HUTTE, . 1968. Manual del Ingeniero. Construcción de máquinas. Tomo II. Editorial Gustavo Gili. Barcelona.
20. \_\_\_\_\_ 1962. Manual del Ingeniero de Taller. Tomo I. Editorial Gustavo Gili. Barcelona.

21. KAUMAN, W. y MITTAK, G. 1966. Ensayos de secado en coigue (Nothofagus dombeyi). Instituto Forestal. Informe Técnico N° 25.
22. KILN DRYING OF SAWN TIMBER. 1970. Editor: Robert Hildebrand. Germany.
23. KIVIMAA, A. 1951. Cutting force in wood working. Helsinki.
24. KOCH, P. 1955. An analysis of the lumber planing process: Part I. Forest Prod. J. 5: 255-264.
25. KOCH, P. 1964. Wood machining processes. 530 p. New York. Ronald Press Co.
26. \_\_\_\_\_. 1972. Utilization of the southern pines. Vol. II. Processing. US Department of Agriculture Forest Service.
27. KOLLMANN, F.; COTE, W. 1968. Principles of wood science and technology. I, Solid wood. Springer-Verlag. New York Inc.
28. MUÑOZ, A. 1981. Factores que influyen en la producción de plantas de Acacia caven (Mol.) Hook et Arn. y Prosopis chilensis (Mol.) Stuntz. Tesis Ing. Forestal. U. de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal. Santiago.
29. ORTIZ, M. 1966. Algunos forestales chilenos de la estepa septentrional. Ministerio de Agricultura. Dirección de Agricultura y Pesca. Boletín N° 23.
30. PEZZANO, P.; KLEIN, A. 1960. Engranajes y poleas. Editorial El Ateneo. Argentina.
31. ROSENDE, R. et al. 1985. Composición química de las maderas y cortezas de tamarugo (Prosopis tamarugo Phil.) y algarrobo (Prosopis alba Gris.) de la Pampa del Tamarugal. En: Estado actual del conocimiento sobre Prosopis tamarugo: Mesa Redonda Internacional sobre Prosopis tamarugo Phil. Arica, Chile, 11-15 de Junio. pp. 373-380.
32. SEMINARIO INTERNO. 1983. Características anatómicas y físicas de Acacia caven (espino). U. de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. Depto. Tecnología de la Madera. (No publicado).
33. TORRES O., H. 1971. Maderas. Santiago, Chile. Corporación Chilena de la Madera. 270 p.

34. TORTELLI, L. 1956. Maderas y bosques argentinos. Editorial Acme S.A.C.I. Buenos Aires.
35. TURNER, R. M. 1963. Growth in four species of sonoran desert trees. Ecology 44: 760-765.
36. ULLOA, I. et al. 1985. Estructuras anatómicas y características organolépticas del tamarugo (Prosopis tamarugo Phil.) y algarrobo (Prosopis alba Gris.) de la Pampa del Tamarugal. En: Estado actual del conocimiento sobre Prosopis tamarugo: Mesa Redonda Internacional sobre Prosopis tamarugo Phil. Arica, Chile, 11-15 de Junio. pp. 255-262.
37. VILLAR, L. D. 1984. Secado de madera de Coigue (Nothofagus dombeyi Mirb. Bl.). Tesis Ing. For., Santiago, Chile. Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales.
38. WOODSON, G. E.; MC MILLIN, C. W. 1971. Machine boring of Southern pine wood. USDA Forest Service. Southern Forest Experiment Station.
39. MURDOCH, J. 1981. Factores que influyen en la producción de plantas de Acacia saligna Moill. Hook et Arn. y Prosopis chilensis Moill. en Chile. Tesis Ing. Forestal, U. de Chile, Santiago.
40. REZANO, R. 1980. Ingenuidad y robos en el tamarugo de Atacama. Chile.
41. ROBBE, R. et al. 1981. Composición química de las maderas de Prosopis tamarugo Phil. y Prosopis alba Gris. Tesis Ing. Forestal, U. de Chile, Santiago.
42. SEMINARIO INTERNACIONAL. 1983. Características anatómicas y organolépticas de Prosopis tamarugo Phil. y Prosopis alba Gris. U. de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Mesa Redonda sobre Prosopis tamarugo Phil. Arica, Chile, 11-15 de Junio de 1983.
43. TORRES, J. 1971. Maderas de Chile. Editorial del Ministerio de Agricultura, Santiago.

LISTA DE DOCUMENTOS PUBLICADOS POR EL  
PROYECTO CONAF/PNUD/FAO-CHI/83/017

- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 1. 1986.  
José Alberto Pardos: "Un programa de mejoramiento genético en Prosopis tamarugo y Prosopis chilensis".
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 2. 1986.  
Alfonso Muñoz G. : "Manual para la producción de plantas de eucalipto en macetas".
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 3. 1986.  
"Actas del Primer Seminario de Información Forestal Chilena".
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 4. 1986.  
"Evaluación de ensayos de introducción de especies vegetales en zonas áridas y semiáridas de Chile".
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 5. 1986.  
"Insectos que atacan tamarugo y algarrobo. Revisión bibliográfica".
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 6. 1986.  
Gabriel Cogollor.: Phoracantha semipunctata en plantaciones de Eucalyptus spp. Revisión bibliográfica.
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 7. 1986.  
Simposio internacional sobre avances en el cultivo de la jojoba (Simmondsia chinensis Link. Schneider).
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 8. 1987.  
Luis Faúndez Y., Gustavo Mieres U.: Productividad forestal y forrajera en el Tipo Forestal Esclerófilo y Estepa de Acacia caven. Revisión bibliográfica.
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 9. 1987.  
Mario Peralta P., María Teresa Serra V.: Caracterización del habitat de las especies del género Prosopis, en las provincias de Huasco y Copiapó. III Región, Chile.
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 10. 1987.  
Alvaro Rojas M., Juan Franco de la J.: El Sector Forestal y el Desarrollo Rural (I Encuentro Nacional).
- DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 11. 1987.  
R. Schlatter, R. Murúa, J. Oltremari: Diagnóstico de la situación actual en la fauna silvestre (Aves y Mamíferos) más característica que habita entre la II y VII Región Administrativa de Chile.

- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 12. 1987.  
R. Schlatter, R. Murúa, J. Oltremari: Bibliografía seleccionada de aves y mamíferos silvestres que habitan entre la II y VII Región de Chile.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 13. 1988.  
Manuel Contreras S.: Plan de desarrollo para la cuenca Chapiquiña.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 14. 1988.  
José Antonio Prado D., Pedro Infante L., Manuel Arriagada, Sergio Aguirre A.: Funciones de biomasa para Siete Especies Arbustivas en la IV Región.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 15. 1988.  
José Antonio Prado D., Pedro Infante L., Manuel Arriagada S., Sergio Aguirre A.: Aprovechamiento de la Biomasa en Zonas Áridas y Semiáridas.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 16. 1988.  
Andrés Iroumé A., Jorge Gayoso A.: Metodología para determinar prioridades de manejo en cuencas hidrográficas.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 17. 1988.  
Resumen de Conclusiones y Proyecciones del Programa de Investigación.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 18. 1989.  
Gabriel Cogollor H., Miguel Poblete R., Gerardo Barria C.: "Las plagas y enfermedades que afectan Atriplex spp.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 19. 1989.  
Gabriel Cogollor H., Miguel Poblete R., Gerardo Barria C.: Problemas fitosanitarios en algunas especies del Tipo Forestal Esclerófilo.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 20. 1988.  
Gabriel Cogollor H., Juan Pablo Contreras R., Marcelo Navarro J.: Un estudio de control de Phoracantha semipunctata en plantaciones de Eucalipto.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 21. 1989.  
Antonio Vita A.: Ecosistemas de Bosques y Matorrales Mediterráneos y sus tratamientos Silviculturales en Chile.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 22. 1989.  
Alvaro Rojas M., Juan Franco de la J., Jorge Maldonado P., Jaime Rebolledo V.: Estudio de áreas silvestres en zonas áridas y semiáridas con problemas socio-ecológicos relacionados con la utilización de los recursos naturales.
- DOCUMENTO DE TRABAJO N° 23. 1989.  
Claudia Botti, Eugenio Doussoulín, Hugo Escobar y Claudia Zunino: Estudio de reproducción vegetativa en Jojoba (Simmondsia chinensis) (Link) Schneider).

DOCUMENTO DE TRABAJO N° 24. 1989.

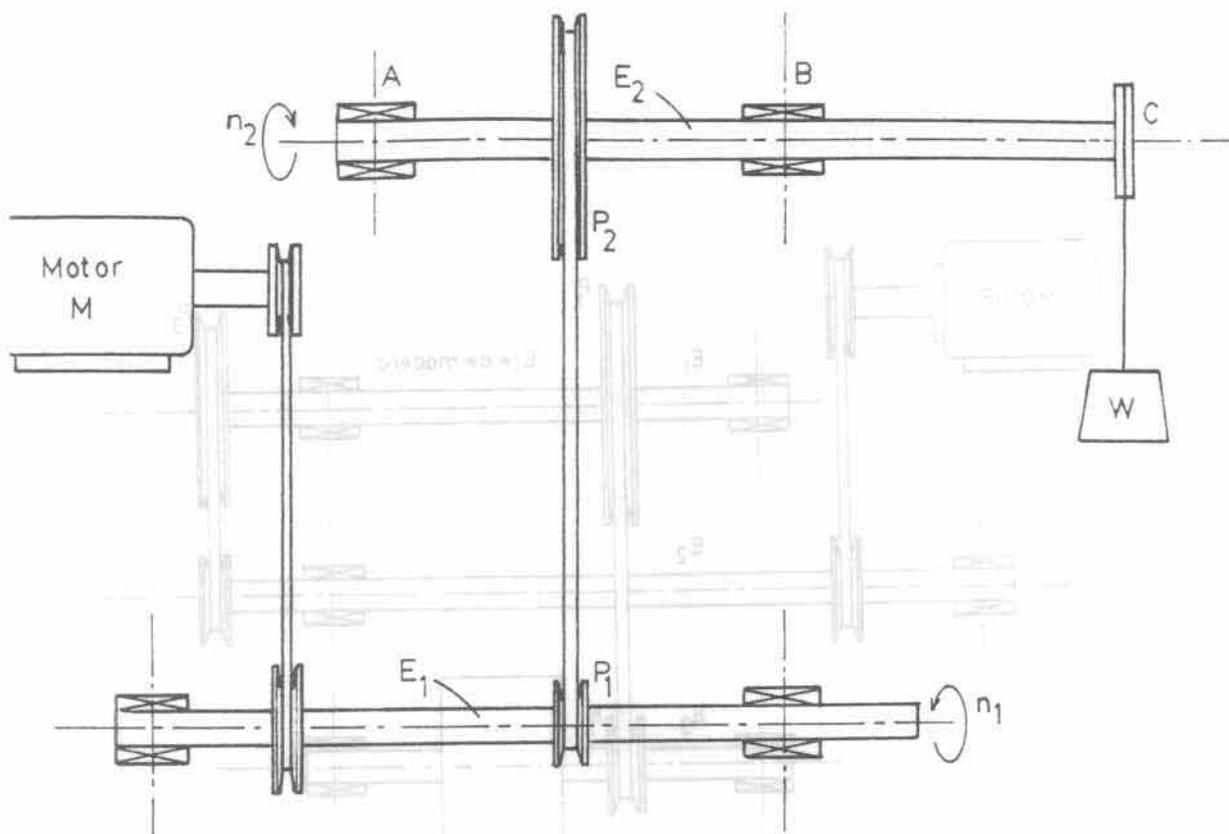
Fabiola Martín V.: Extraíbles químicos de especies nativas de Zonas Áridas y Semiáridas. Revisión bibliográfica.

DOCUMENTO DE TRABAJO N° 25. 1989.

Misael Gutiérrez D., T. Karsulovic C., P. Torres G., A. León G.: Estudio sobre el secado y algunas propiedades de trabajabilidad y usos de la madera de algarrobo, espino y tamarugo.

DOCUMENTO DE TRABAJO N° 26. 1989.

Juan Donoso, E. Cuevas, R. Rosende, I. Ulloa: Estudio de la mortalidad de árboles en la Pampa del Tamarugal.



- A : Cojinete deslizante de madera
- B : Cojinete de bolas
- P<sub>1</sub> : Polea motora
- P<sub>2</sub> : Polea conducida
- n<sub>1</sub> : r.p.m. eje conductor
- n<sub>2</sub> : r.p.m. eje conducido
- W : Peso aplicado

FIGURA N°2 Esquema del sistema de transmisión de movimiento y de aplicación de carga

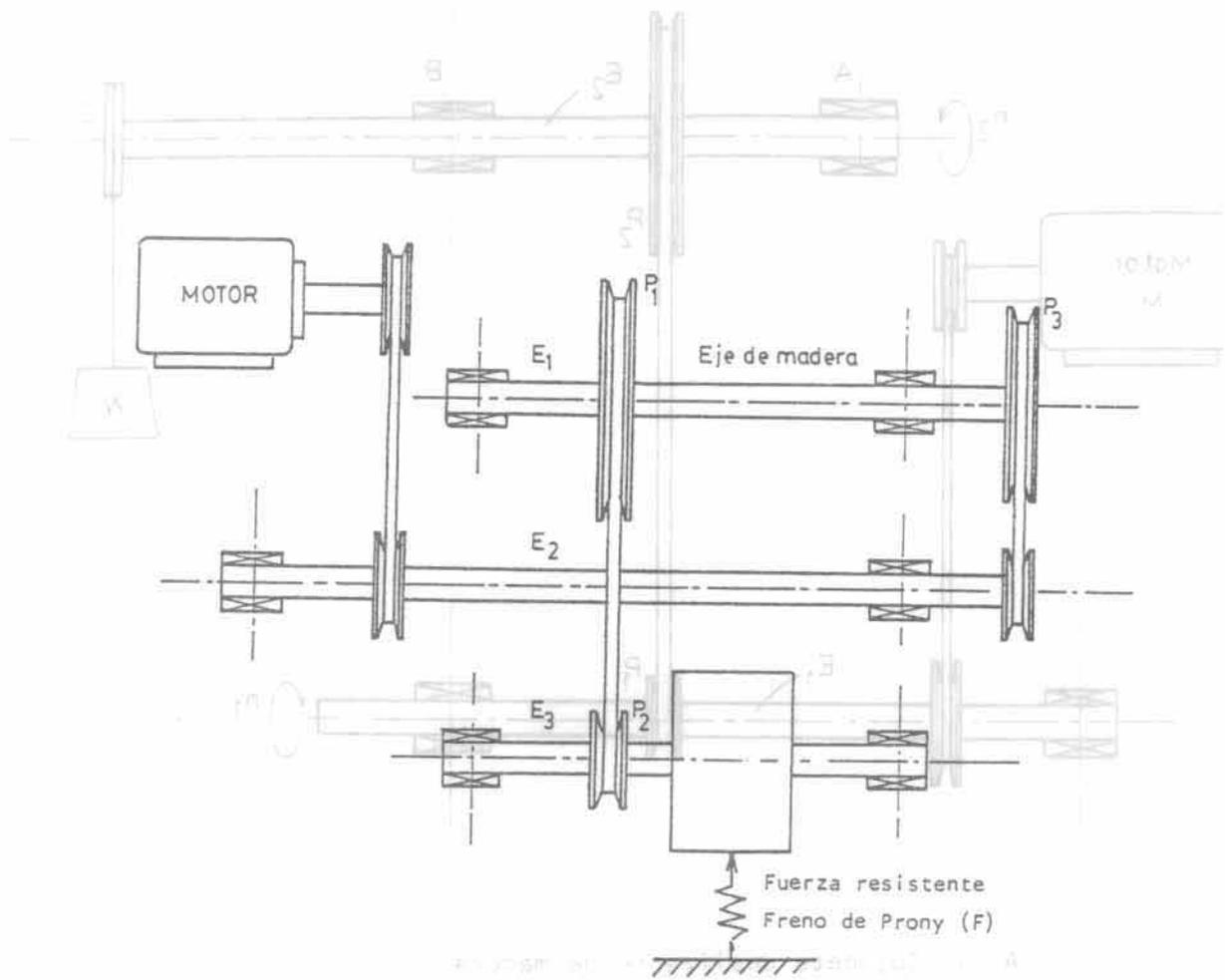


FIGURA N° 3 Disposición de la transmisión para el ensayo de ejes

FIGURA N° 3 Disposición del sistema de transmisión de ejes para el ensayo de ejes

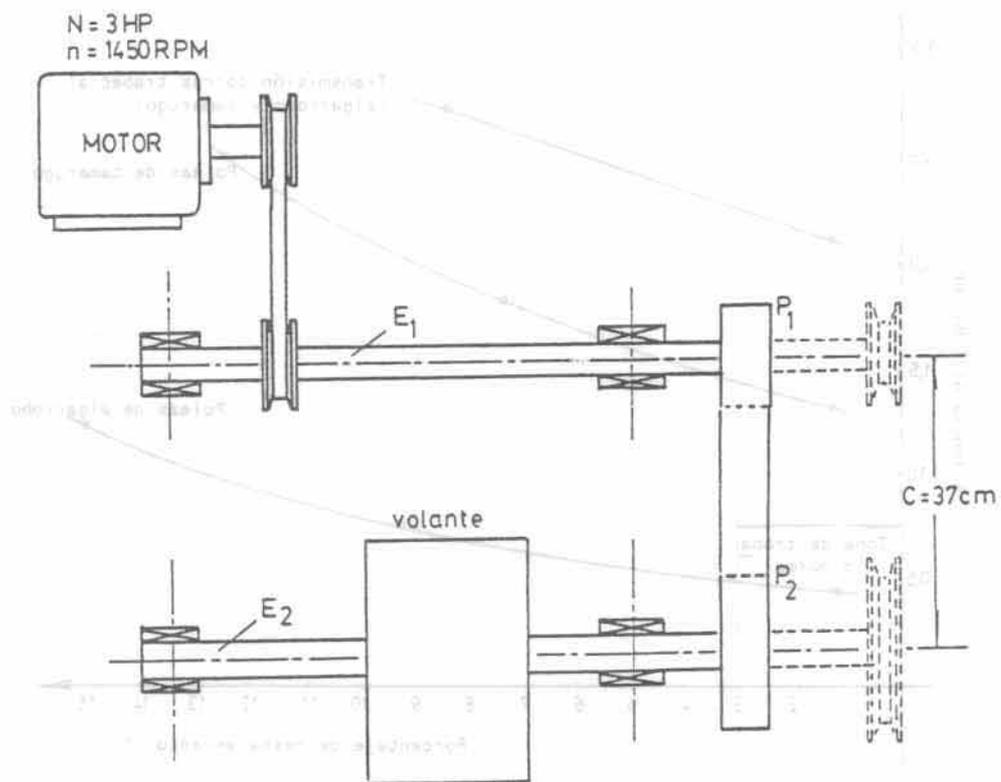


FIGURA N° 4 Esquema del sistema de transmisión

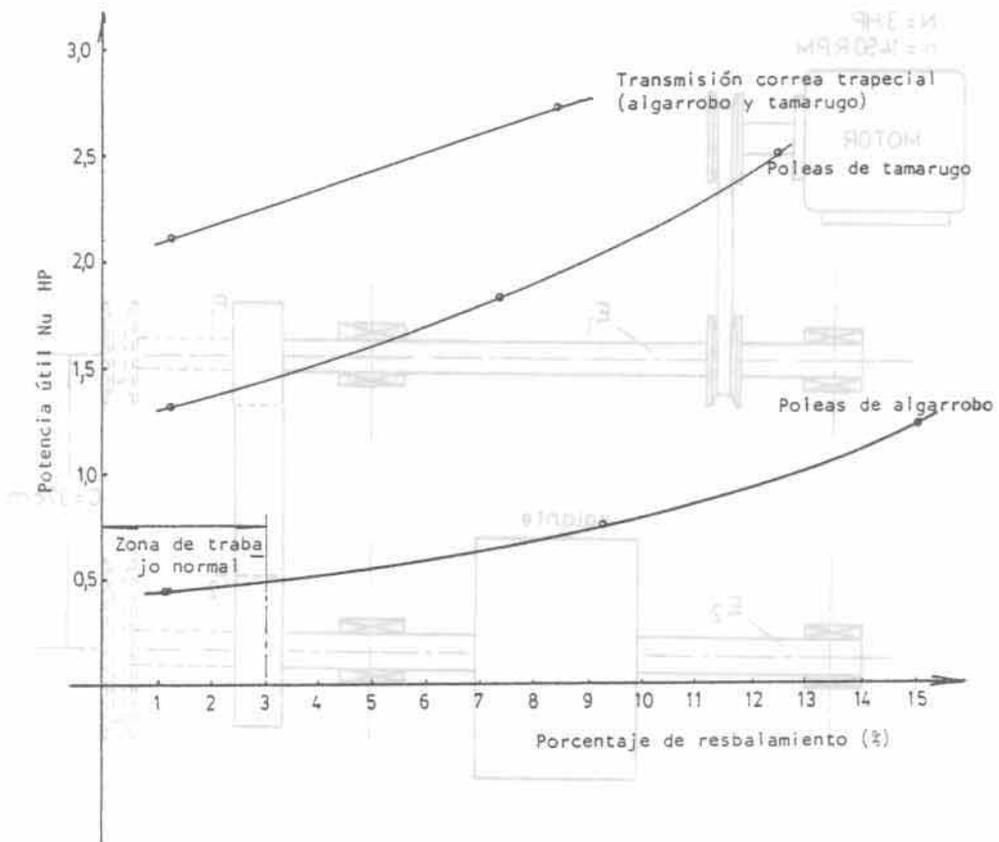


FIGURA N° 5 Potencia útil transmitida en función del porcentaje de resbalamiento de la correa

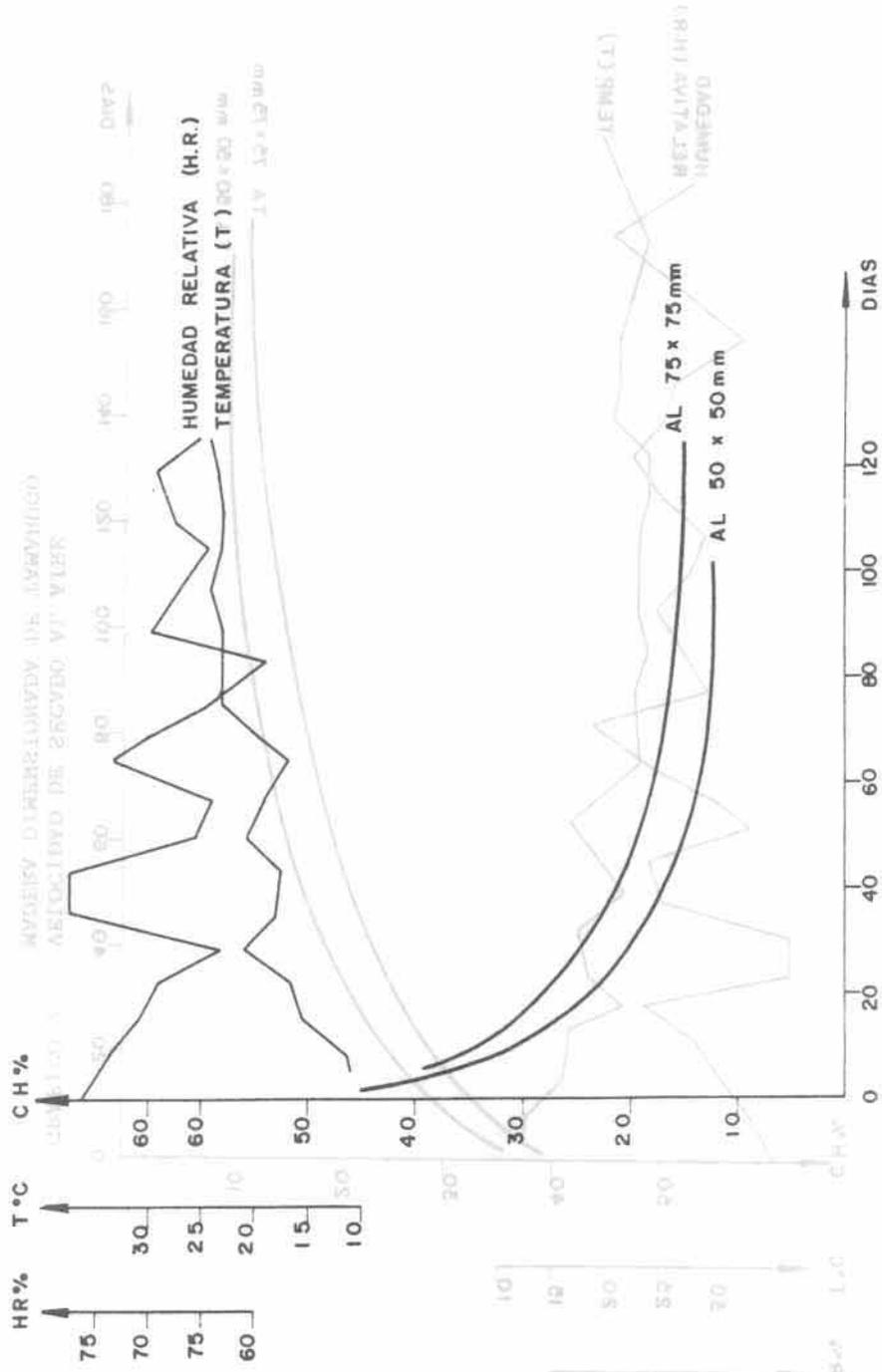


GRAFICO 1 VELOCIDAD DE SECADO AL AIRE  
MADERA DIMENSIONADA DE ALGARROBO

VELOCIDAD DE SECADO DE LA MADERA TAMARUGO  
 VELOCIDAD DE SECADO AL AIRE

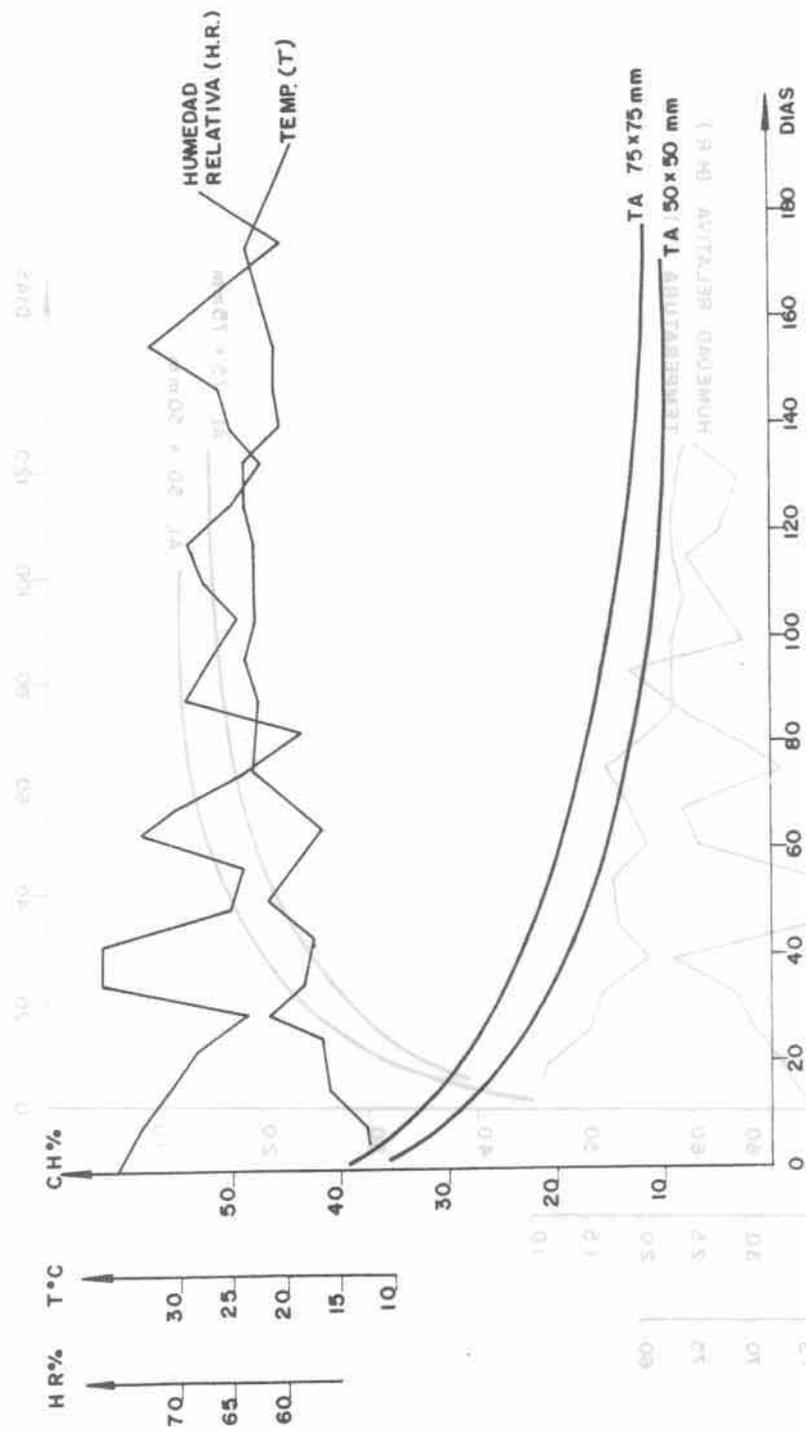


GRAFICO 2 VELOCIDAD DE SECADO AL AIRE  
 MADERA DIMENSIONADA DE TAMARUGO

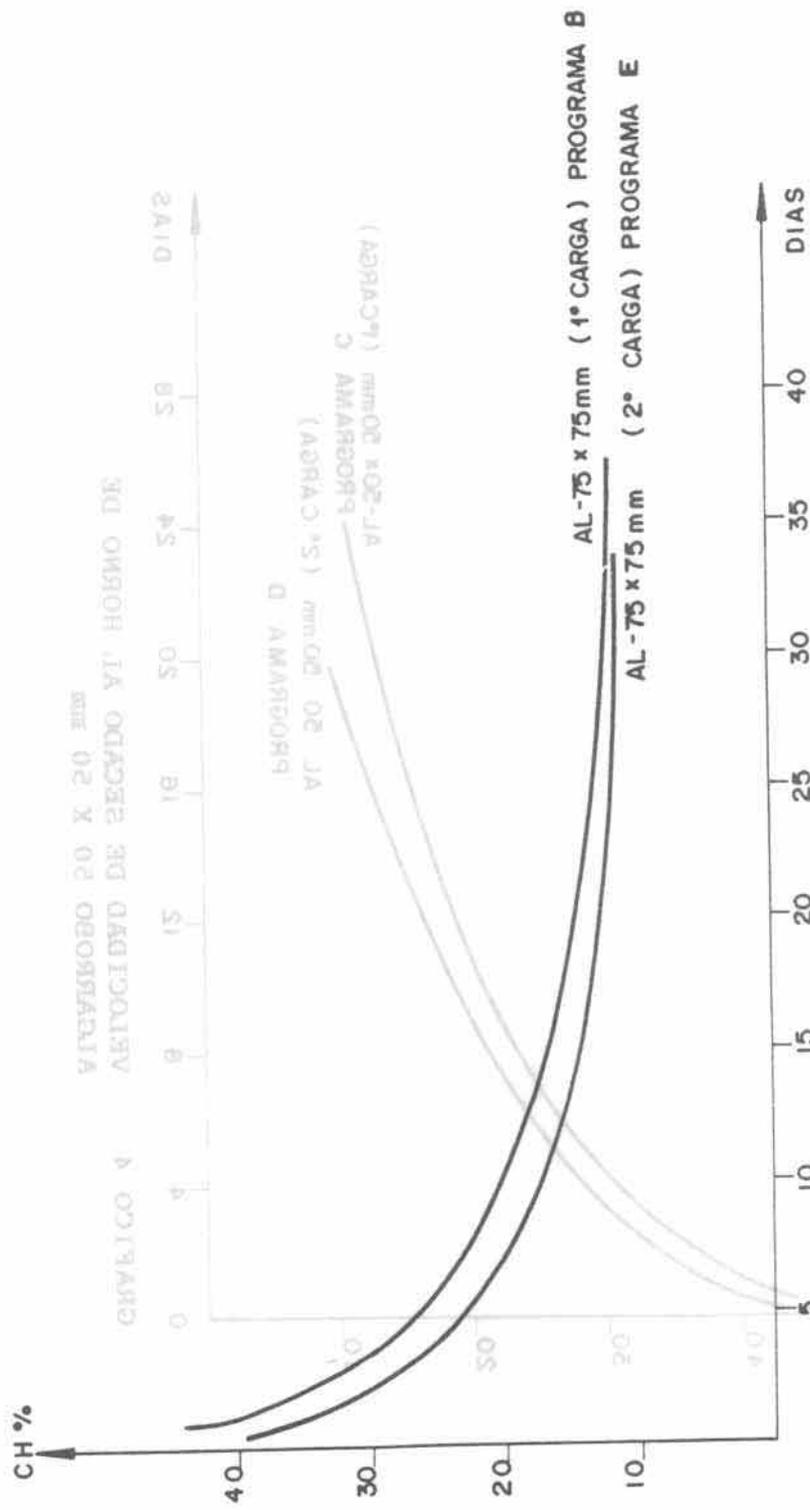
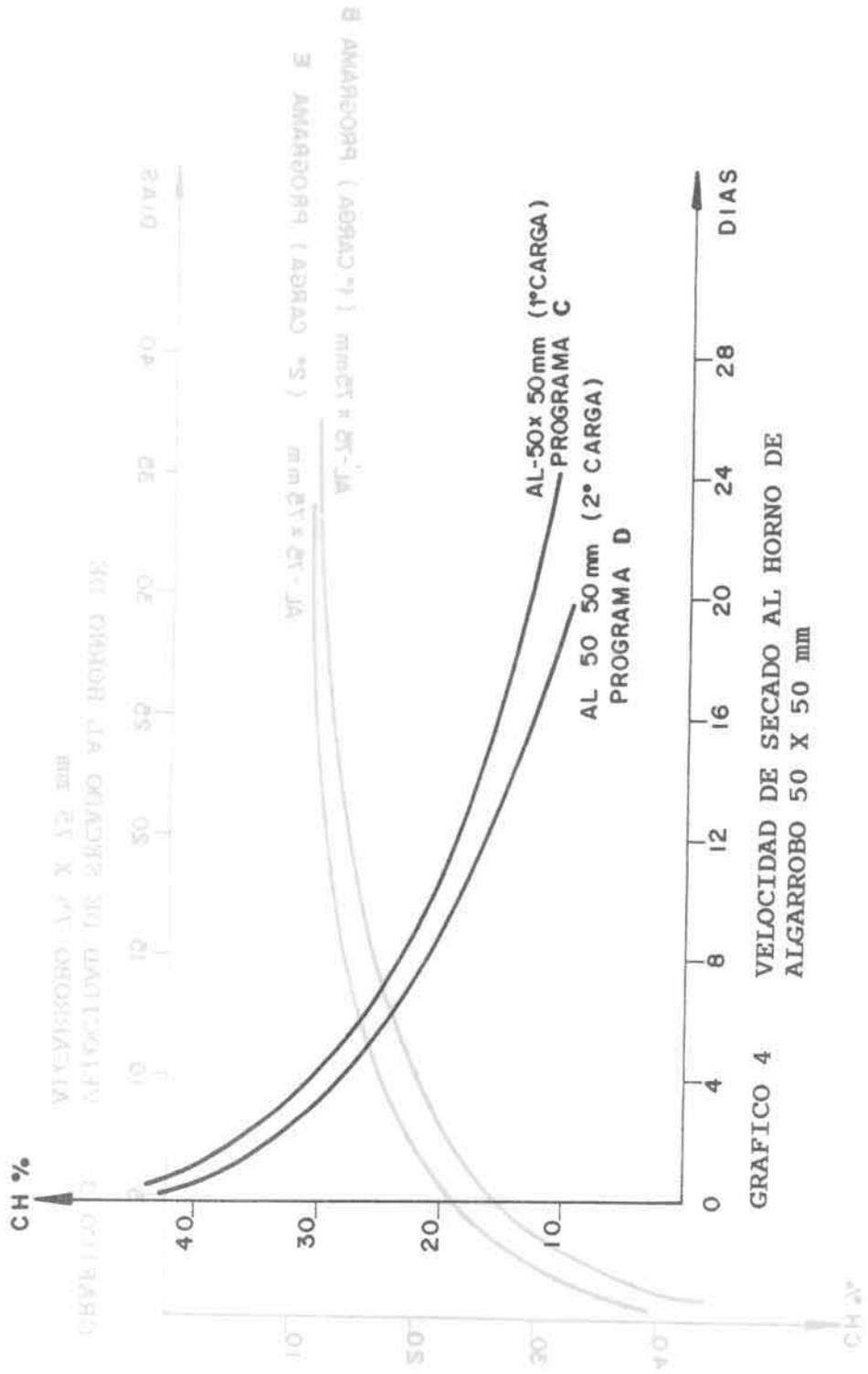


GRAFICO 3 VELOCIDAD DE SECADO AL HORNO DE  
 ALGARROBO 75 X 75 mm

CH %



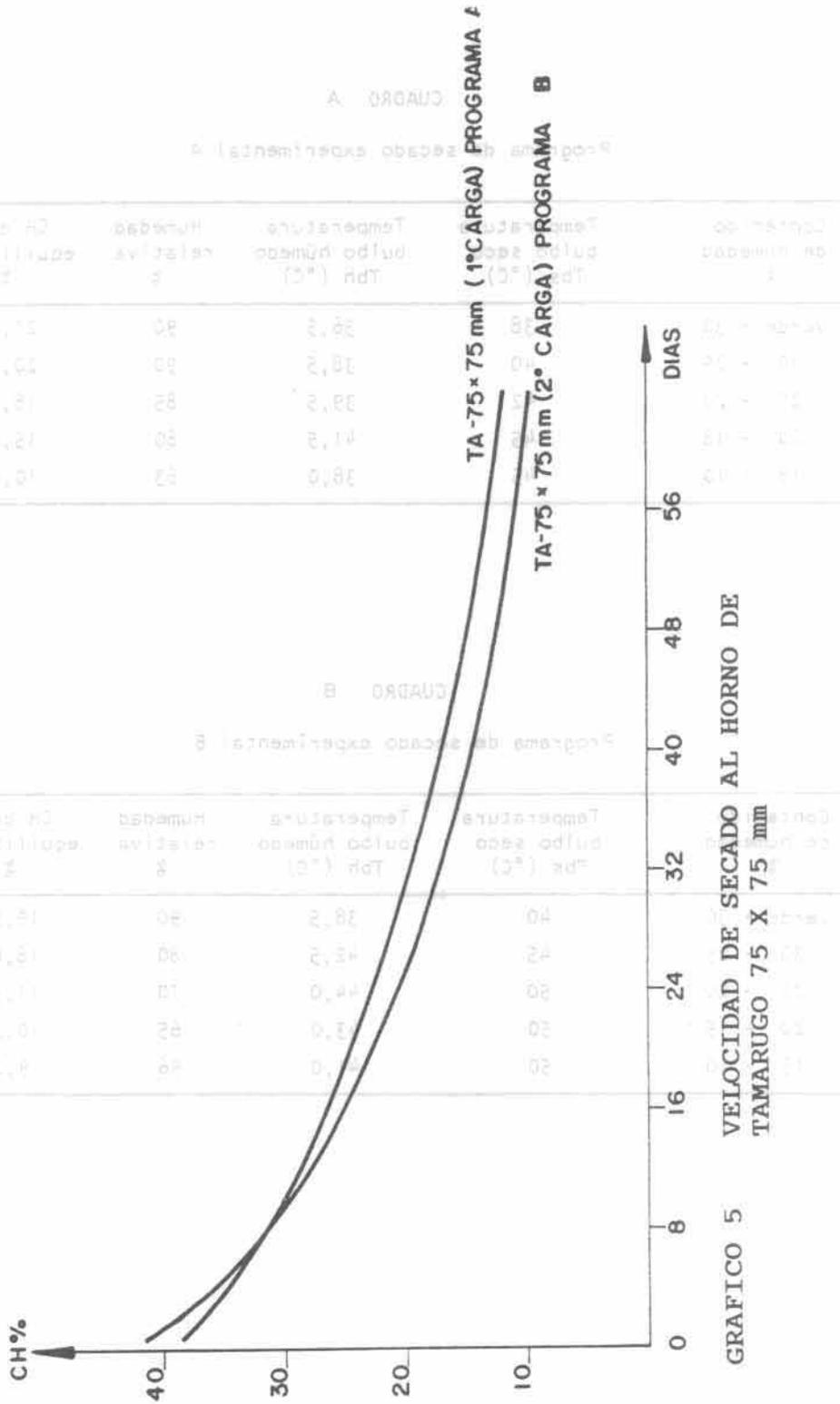


GRAFICO 5 VELOCIDAD DE SECADO AL HORNO DE TAMARUGO 75 X 75 mm

Programa de secado experimental	Temperatura pulpa seco (°C)	Temperatura pulpa húmeda (°C)	Humedad relativa (%)	CH (%)
Programa A (1°C)	38,0	38,0	80	40
	41,2	38,2	80	35
	39,2	38,2	80	30
	38,2	38,2	80	25
	38,2	38,2	80	20
Programa B (2°C)	38,0	38,0	80	40
	42,2	38,2	80	35
	44,0	38,2	80	30
	43,0	38,2	80	25
	43,0	38,2	80	20

CUADRO B Programa de secado experimental B

CUADRO A Programa de secado experimental A

CUADRO A

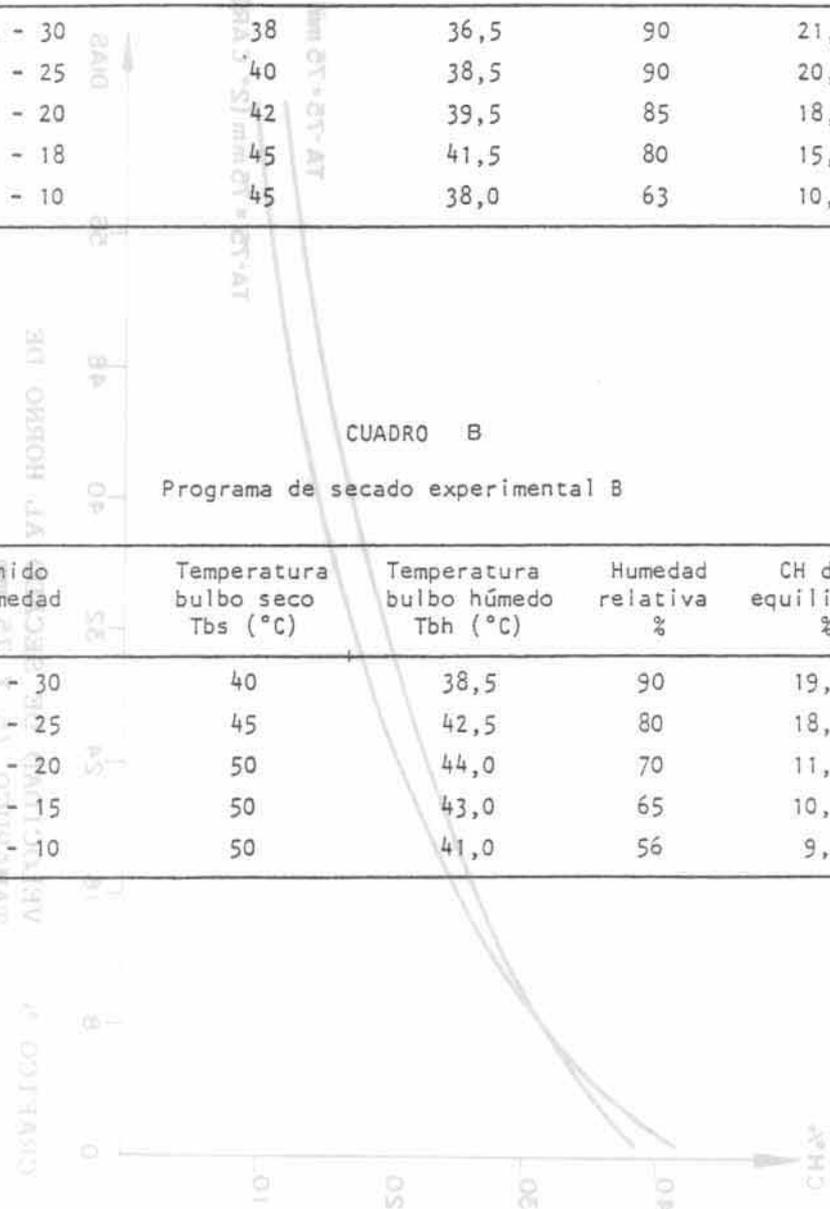
Programa de secado experimental A

Contenido de humedad %	Temperatura bulbo seco Tbs (°C)	Temperatura bulbo húmedo Tbh (°C)	Humedad relativa %	CH de equilibrio %
Verde - 30	38	36,5	90	21,0
30 - 25	40	38,5	90	20,0
25 - 20	42	39,5	85	18,0
20 - 18	45	41,5	80	15,0
18 - 10	45	38,0	63	10,0

CUADRO B

Programa de secado experimental B

Contenido de humedad %	Temperatura bulbo seco Tbs (°C)	Temperatura bulbo húmedo Tbh (°C)	Humedad relativa %	CH de equilibrio %
Verde - 30	40	38,5	90	19,5
30 - 25	45	42,5	80	18,0
25 - 20	50	44,0	70	11,5
20 - 15	50	43,0	65	10,5
15 - 10	50	41,0	56	9,0



CUADRO C  
Programa de secado experimental C

Contenido de humedad %	Temperatura bulbo seco Tbs (°C)	Temperatura bulbo húmedo Tbh (°C)	Humedad relativa %	CH de equilibrio %
Verde - 30	40	33,5	65	10,5
30 - 25	45	38,0	65	10,5
25 - 15	50	41,5	60	9,5
15 - 10	50	40,0	53	8,5

CUADRO D  
Programa de secado experimental D

Contenido de humedad %	Temperatura bulbo seco Tbs (°C)	Temperatura bulbo húmedo Tbh (°C)	Humedad relativa %	CH de equilibrio %
Verde - 30	45	37,0	60	10,0
30 - 25	50	41,4	60	9,5
25 - 20	60	49,0	55	8,0
20 - 15	60	48,0	50	7,5
15 - 10	60	46,0	45	6,5

CUADRO E

Programa de secado experimental E

Contenido de humedad %	Temperatura bulbo seco Tbs (°C)	Temperatura bulbo húmedo Tbh (°C)	Humedad relativa %	C.H. de equilibrio %
Verde - 30	45	43,5	90	19,5
30 - 25	45	42,5	85	17,0
25 - 20	50	46,0	80	14,0
20 - 15	50	45,0	75	12,5
15 - 10	60	49,0	65	9,0

CUADRO F

Programa de secado experimental F

Contenido de humedad %	Temperatura bulbo seco Tbs (°C)	Temperatura bulbo húmedo Tbh (°C)	Humedad relativa %	C.H. de equilibrio %
Verde - 30	40	37,0	80	16,0
30 - 20	45	38,5	65	11,0
20 - 10	50	39,0	50	7,5

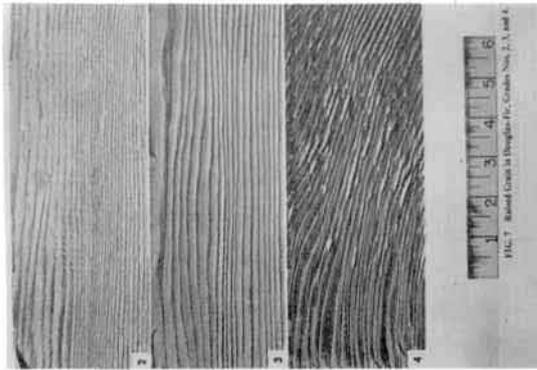


FOTO 1: Comparación de grados de grano levantado (ASTM D 1666).

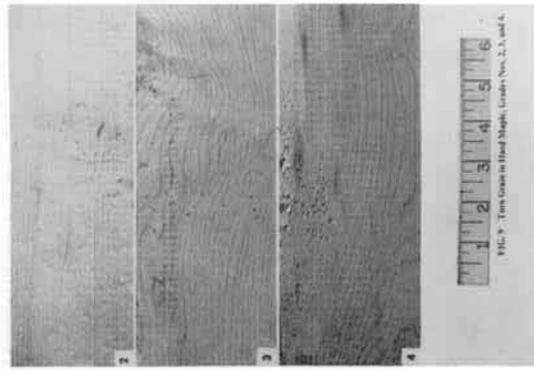


FOTO 2: Comparación de grados en defecto de grano desgarrado (ASTM 1666).

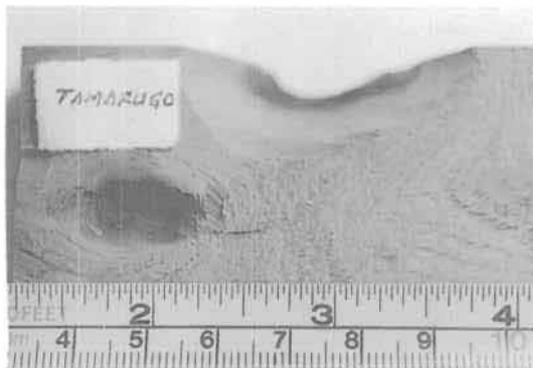


FOTO 3: Tamarugo. Grano desgarrado lateral por presencia de nudo.



FOTO 4: Tamarugo. (efecto de la inclinación de fibras en zona adyacente a los nudos). Defecto: grano desgarrado grado 2.

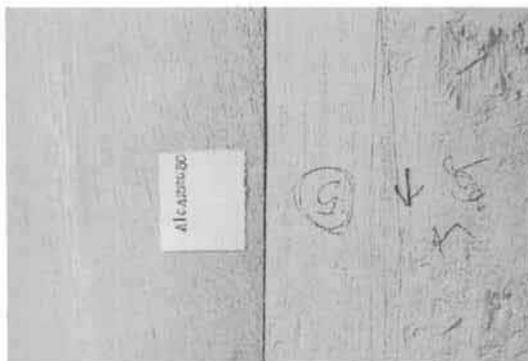


FOTO 5: Cepillado algarrobo (comparación probeta s/defectos y c/grano desgarrado grado 5).

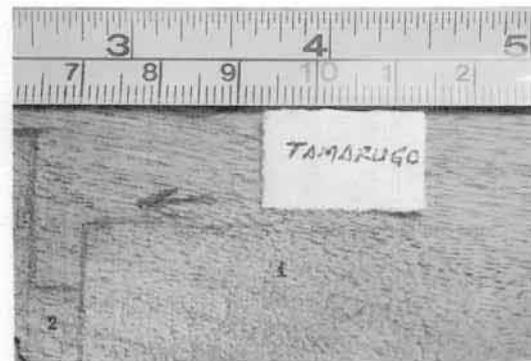


FOTO 6: Tamarugo c/grano desgarrado:  
(1) Grado 2  
(2) Grado 4



FOTO 7: Espino c/desgarro grado 5.



FOTO 8: Taladrado. Tamarugo, algarrobo y espino bajo una velocidad de rotación de 740 r.p.m.

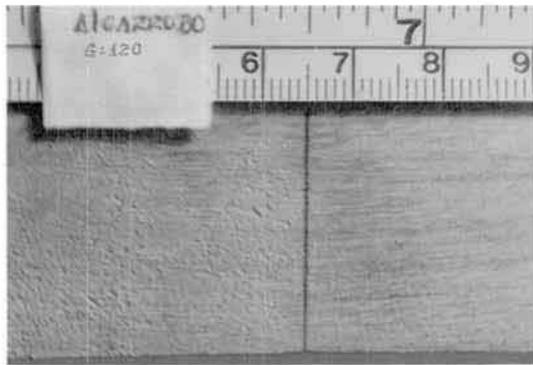


FOTO 9: Lijado algarrobo c/grano 120.  
Derecha: zona lijada  
Izquierda: zona no lijada

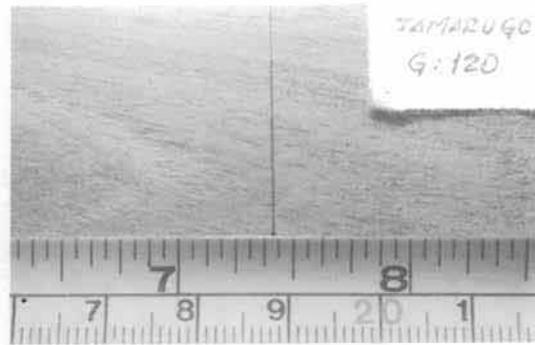


FOTO 10: Lijado tamarugo c/grano 120  
Derecha: zona lijada  
Izquierda: zona no lijada

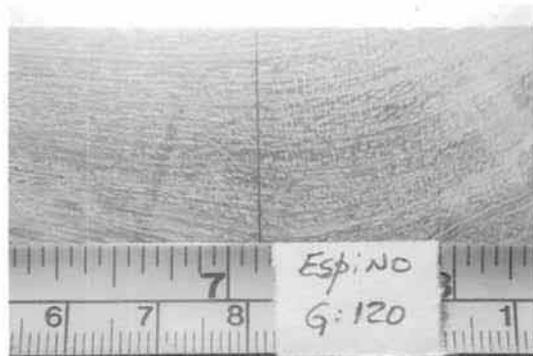


FOTO 11: Espino lijado c/grano 120.  
Derecha: zona lijada  
Izquierda: zona no lijada



FOTO 12: Tamarugo. Tornado de excelente calidad (libre de defectos).

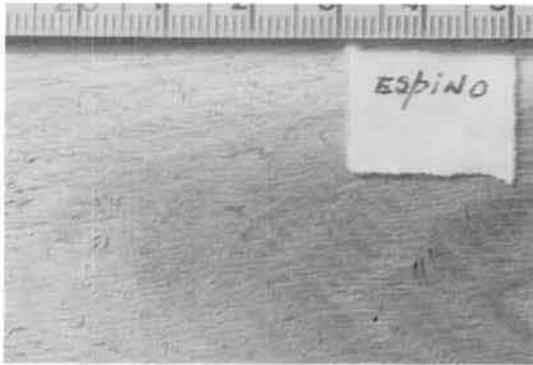


FOTO 13: Aserrado en verde de espino. Textura superficial (presencia de albura y duramen).



FOTO 14: Dimensionado en seco algarrobo. Textura superficial.

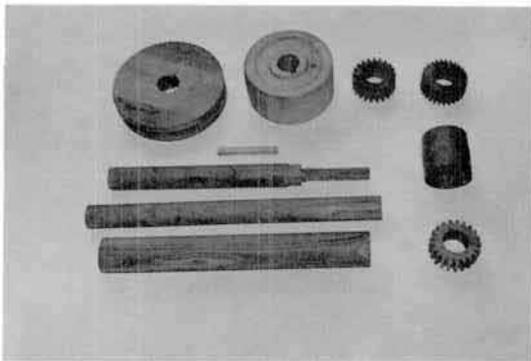


FOTO 15: Fabricación de elementos mecánicos (poleas planas, poleas en V, engranajes, ejes, chaveta y perno).



FOTO 16: Conjunto de poleas de correa plana.

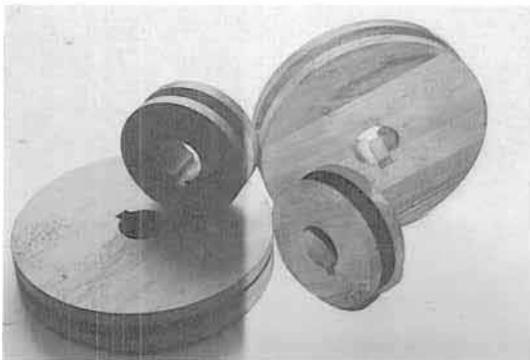


FOTO 17: Juego de poleas de correa trapecial.

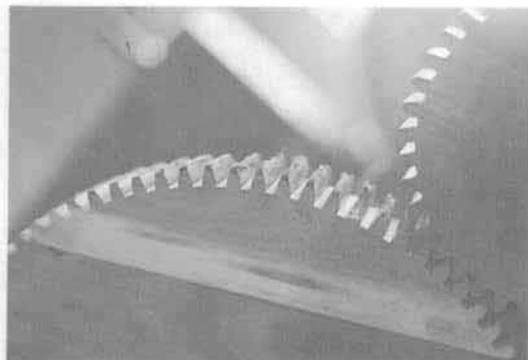


FOTO 18: Mal estado de los dientes de la rueda por efecto del tallado defectuoso.