

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RELACIÓN ENTRE ÁNGULO MICROFIBRILAR,  
MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE RUPTURA  
EN *Pinus taeda* CULTIVADO EN URUGUAY**

**por**

**Fredy PLADA TASSANO**  
**Germán STOCKLE GILLIG**

**TESIS presentada como uno  
de los requisitos para obtener  
el título de Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO**  
**URUGUAY**  
**2011**

Tesis aprobada por:

Director:.....

Ing. Agr. Carlos Mantero

.....

Ing. Agr. Gustavo Daniluk

.....

Ing. Agr. Andrés Dalto

Fecha:.....

Autor:.....

Fredy Plada Tassano

.....

Germán Stockle Gillig

## AGRADECIMIENTOS

- Los autores agradecen al Ingeniero Agrónomo Carlos Mantero, por su apoyo y seguimiento en todas las etapas de elaboración del trabajo.
- Al personal de la unidad de microscopía y medios audiovisuales por sus servicios y permitirnos usar el espacio físico.
- Al personal de la cátedra de protección forestal por compartir el espacio físico para el trabajo de laboratorio, así como diferentes materiales que fueron necesarios para el trabajo.
- Al Ingeniero Pepelescov y al Instituto de Ensayo de Materiales por permitirnos el uso de instalaciones de la Facultad de Ingeniería y aportar conocimientos.
- Al personal de biblioteca de Facultad de Agronomía.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PARED CELULAR.....	2
2.2. ÁNGULOS MICROFIBRILARES ENCONTRADOS .....	4
2.3. VARIACIONES DEL ÁNGULO MICROFIBRILAR.....	5
2.3.1. <u>Variaciones del AMF dentro del árbol</u> .....	5
2.3.2. <u>Variación del AMF entre procedencias</u> .....	6
2.3.3. <u>Efecto ambiental sobre AMF</u> .....	6
2.3.4. <u>Heredabilidad del AMF</u> .....	7
2.4. PROPIEDADES DE LA MADERA JUVENIL .....	7
2.5. MADERA JUVENIL, SU RELACIÓN CON EL ÁNGULO MICROFIBRILAR Y PROPIEDADES MECÁNICAS.....	9
2.6. ÁNGULO MICROFIBRILAR, MOE Y MOR.....	11
2.7. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÁNGULO MICROFIBRILAR.....	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1. MATERIALES.....	17
3.2. MÉTODOS.....	17
3.2.1. <u>Preparación de probetas</u> .....	17
3.2.2. <u>Establecimiento de la relación entre AMF, MOE Y MOR</u> .....	18
3.2.3. <u>Medición del ángulo microfibrilar (AMF)</u> .....	19

3.2.4. <u>Medición de flexión estática (MOE y MOR)</u> .....	19
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	21
4.1. <u>RESUMEN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DEL ÁNGULO           MICROFIBRILAR DE LAS PROBETAS ESTUDIADAS</u> .....	21
4.2. <u>ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, MÓDULO DE           RUPTURA Y ÁNGULO MICROFIBRILAR SEGÚN UBICACIÓN           EN EL RADIO</u> .....	23
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	28
6. <u>RESUMEN</u> .....	30
7. <u>SUMMARY</u> .....	31
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	32
9. <u>ANEXOS</u> .....	43

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Valores promedio de peso específico, módulo de elasticidad y módulo de ruptura en los anillos medios desde la médula para dos diferentes edades árboles.....	10
2. Valores promedio de las propiedades por edad en pino taeda.....	10
3. Comparación de las diferentes técnicas de medición.....	15
4. Valores obtenidos de las probetas.....	21
5. Valores promedio según ubicación en el radio.....	23

### Figura No.

1. Representación esquemática de una fibra de Madera, mostrando el arreglo de las microfibrillas en las varias capas de la pared celular.....	3
2. Efecto de la madera juvenil sobre las propiedades físicas y mecánicas.....	7
3. Esquema de obtención de probetas.....	18
4. Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal.....	20

Gráfico No.

1. Relación entre MOE y AMF.....	12
2. Relación entre MOR y AMF.....	13
3. MOE y MOR promedio según ubicación en el radio.....	14
4. Relación MOE Y MOR.....	22
5. Relación MOE - AMF.....	22
6. RelaciónMOR- AMF.....	23
7. AMF según ubicación en el radio.....	25
8. MOE según ubicación en el radio.....	26
9. MOR según ubicación en el radio.....	26

## 1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento futuro de madera se espera que provenga de árboles mejorados genéticamente y de plantaciones manejadas con edades de rotación cada vez menores, lo que aumentará las proporciones de madera juvenil en las cosechas. La madera juvenil en relación a la madera adulta, es considerada de "baja calidad" para usos como madera estructural o determinados tipos de papel (Bendtson, 1978). Para remediar esta situación, según Butterfield y Walker (1995), es necesario integrar a los programas de mejoramiento genético, variables que influyen directamente en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, siendo las más importantes la densidad y el ángulo fibrilar.

El ángulo fibrilar, corresponde al ángulo formado entre las microfibrillas de celulosa de la pared celular secundaria y el eje longitudinal de la célula (Donaldson, 1993), además es conocido como uno de los principales determinantes de las propiedades mecánicas de la madera, principalmente la rigidez y la contracción anisotrópica (Donaldson, 1996). Además, posee un impacto significativo en las propiedades del papel, como el rasgado y estiramiento (Watson y Dadswell, 1964).

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio del ángulo microfibrilar y el comportamiento mecánico de madera de *Pinus taeda* L. cultivado en Uruguay Además, del estudio de la relación existente entre el AMF y las propiedades mecánicas MOE (Módulo de elasticidad) y MOR (Módulo de ruptura.).

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PARED CELULAR

Tuset y Duran (1986) mencionan, que estudios combinando observaciones con microscopio óptico, microscopio electrónico, luz polarizada y difracción con rayos X, han confirmado la naturaleza fibrilar de la pared celular. Las fibrillas (o microfibrillas o micelas) se componen de manojos o haces de cadenas de moléculas de alfa-celulosa, siendo estas últimas polímeros formados por n unidades de glucosa.

Tanto Chafe (1974) como Barnett et al. (1997) agregan que las microfibrillas de celulosa se disponen en forma de láminas, estando presentes en plantas con diferente complejidad, desde algas unicelulares hasta plantas leñosas.

También se conoce hace mucho que la orientación de las microfibrillas puede cambiar drásticamente de una lámina a la siguiente como lo mencionan Preston y Astbury (1937), Nicolai y Frey – Wyssling (1938).

La pared celular de una fibra de madera está compuesta por pared primaria y secundaria.

Una descripción más profunda es detallada por Page et al. (1972), en esta nos muestra una pared secundaria constituida por las capas S1, S2 y S3, cuyos subíndices se refieren al orden en que se formaron durante la diferenciación. En estas capas la estructura cristalina de celulosa mencionada se encuentra embebida en una estructura amorfa de hemicelulosa y lignina. Las capas S1 y S3 presentan microfibrillas dispuestas en sentido prácticamente perpendicular al eje de la fibra, mientras que en la capa S2, las microfibrillas enrollan el eje en sentido helicoidal de manera empinada. El ángulo de la hélice o espiral, es denominado ángulo microfibrilar (AMF) y varía entre las fibras de un mismo árbol y entre árboles pero es aproximadamente constante dentro de estas. Page

(1969) afirma, que la capa S2 es por lejos la más espesa, entre el 80-95% del material de pared celular está contenido dentro de la misma, por lo que su ángulo microfibrilar es importante en el estudio del comportamiento físico de las fibras y la madera. De esto último Page et al. (1972) dan los siguientes ejemplos, la tensión o fuerza de la fibra depende del ángulo fibrilar y la contracción de una pieza de madera depende del valor promedio de ésta, tal como lo confirman Harris y Meylan (1965), Page et al. (1972).

Walker y Woollons (1997) concluyen que la S2 contribuye en gran forma a la rigidez axial y a la resistencia de la madera, mientras que las capas S1 y S3 tienen una influencia menor en estas propiedades ya que tienen sus microfibrillas pobremente alineadas.

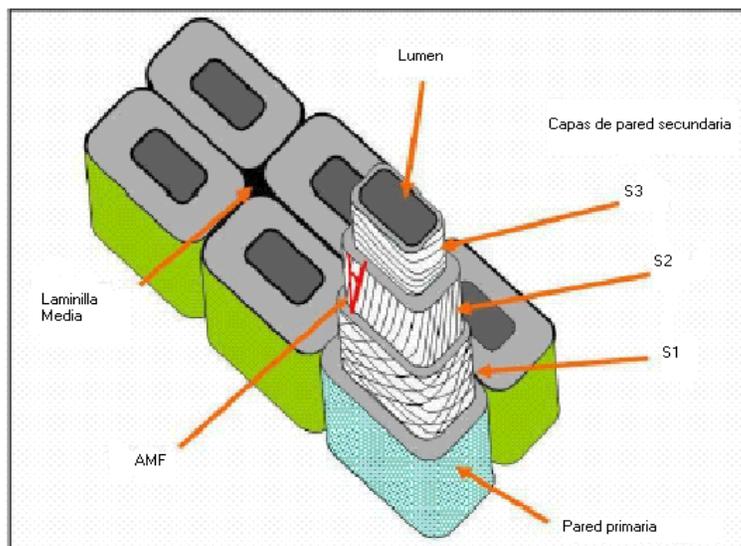


Figura No. 1. Representación esquemática de una fibra de Madera, mostrando el arreglo de las microfibrillas en las varias capas de la pared celular (El Hosseiny y Page, 1973).

La figura No.1 representa esquemáticamente según El-Hosseiny y Page (1973), una fibra de madera, mostrando el arreglo de las microfibrillas celulósicas en las varias capas de la pared celular, donde P representa la pared primaria; S1, S2 y S3 son las múltiples capas de que se compone la pared secundaria. Nótese la orientación de las microfibrillas en las sucesivas capas, con el detalle del ángulo para el caso de la S2, determinado por el eje de la fibra y la orientación de sus microfibrillas.

## 2.2 ÁNGULOS MICROFIBRILARES ENCONTRADOS

Según Walker y Woollons (1997), el ángulo microfibrilar es la característica fundamental que determina las propiedades de la madera y no el peso específico por si solo (sobre todo en leño juvenil de coníferas) estando este en función del número y de la altura del árbol. Estos mismos autores citan, Ying et al. (1994) quienes expresan que en el caso de *Pinus taeda*, el cambio en el ángulo microfibrilar con la edad tiene un patrón que se puede representar con una función escalonada, constante para los primeros cinco años y nuevamente constante a partir del año decimotercero.

Junto a la médula se encontraron ángulos grandes que disminuyen hacia la corteza (Phillips 1941, Bendtsen y Senft 1986, Donaldson 1993, Donaldson y Burdon 1995). Existe variación también en altura, disminuyendo el ángulo al aumentar la altura.

En *Pinus taeda*, por ejemplo, el AMF en madera adulta es pequeño (5 a 10°), en el leño juvenil es mayor alcanzando valores de 25 a 30°, observándose valores de hasta 50 en los anillos junto a la médula (Megraw 1986, Bendtsen y Senft 1986). En *Pinus elliottii*, Hiller (1965) reporto valores de AMF de 15° a los 20 años.

Como se señaló, el AMF disminuye del centro hacia fuera, por lo tanto cuanto más gruesa la pared secundaria, más chico es el ángulo. Hiller (1954) encontró que el ancho de la pared secundaria aporta de un 64 a 81% de la variación en el ángulo.

Según Mac Gregor (2003), en *Pinus elliottii*, el AMF disminuyó desde los anillos cercanos a la médula hasta el último anillo cercano a la corteza, para 2 alturas diferentes (1,30m y 3,30m). Esto mismo es afirmado por Bocage et al. (2000) para *Pinus taeda*.

## 2.3 VARIACIONES DEL ÁNGULO MICROFIBRILAR

De acuerdo a lo expuesto por Donaldson (1997), en su estudio de la variación del ángulo microfibrilar, dentro y entre árboles pertenecientes a un mismo sitio encuentra luego de realizar el análisis de varianza que la mayor variación se da entre árboles ( $p=0.028$ ). La variación entre los anillos de un mismo árbol ( $p=0.171$ ) y la variación dentro de un mismo anillo ( $p=0.510$ ), no resultaron significativas.

Las variaciones en la calidad de la madera se pueden atribuir a la variación dentro de un árbol, entre los árboles en un determinado sitio, entre los diferentes sitios de crecimiento y entre los diferentes regímenes silviculturales (Addis y Walker, 1995). El AMF varía desde la médula a la corteza, con la altura en el tallo y entre árboles. El AMF en la pared de la célula es afectado por el tamaño de la célula, células más cortas y más anchas tienen ángulos más grandes (Tsoumis, 1992).

### 2.3.1 Variaciones del AMF dentro del árbol

Los ángulos microfibrilares varían dentro de cada anillo de crecimiento. Cave y Walker (1994) reportaron que el AMF decrece desde la primer célula del leño temprano a la última célula del leño tardío.

Harris y Meylan (1965) también divulgaron que el AMF era mayor en el leño temprano que en el leño tardío. El AMF es mayor cerca de la médula, y declina desde esta hacia el cambium (Philips 1941, Walker y Butterfield 1996). Pardini (1992), Donaldson (1993) también reportaron que el mayor AMF ocurre entre los primeros 5 a

10 anillos de crecimiento desde la médula. El AMF, también disminuye con la altura en el tallo (Donaldson 1992, Walker y Butterfield 1996).

Walker y Butterfield (1996) notaron que la rigidez de las células crece desde la médula al cambium mientras que el AMF decrece.

El AMF es mayor en la madera de compresión que en la madera normal (Philips, 1941).

### 2.3.2 Variación del AMF entre procedencias

Aunque la variación en AMF de árbol a árbol parece ser controlada genéticamente, el grado de heredabilidad no es bien sabido (Zobel y Jett, 1995).

En un ensayo realizado por Donaldson y Burdon (1995) en un pequeño número de clones de Pino Monterrey concluyeron que había un componente genético significativo en la variación del AMF.

### 2.3.3 Efecto ambiental sobre AMF

El ambiente de crecimiento influye sobre el AMF de dos maneras. En primer lugar, árboles que crecen rápido tienen mayores AMF tanto en madera juvenil como en madera adulta, y en segundo lugar anillos de crecimiento estrechos se forman en algunos árboles cuando se suprimen y estos anillos tienden a tener traqueidas con mayor AMF (Pudín, 1992).

Los resultados de un ensayo realizado por Pudín (1992) sugieren que el rápido crecimiento puede bajar la calidad de la madera juvenil en *Picea* (spruce). Herman et al. (1999) reportaron una comparación entre rápido y lento crecimiento en las piceas de noruega, un significativo incremento en el AMF de la S2 se demostró con un rápido crecimiento.

La poda produce una aceleración de la maduración del leño representado por la disminución más marcada del ángulo microfibrilar (Mc Gregor, 2003).

Bocage et al. (2000) encontraron un efecto significativo de la poda en el descenso del ángulo microfibrilar para la porción basal del fuste, que haría desaparecer las diferencias encontradas entre ambas alturas (1,30m y 3,30m). Esto determinaría una transición más rápida a leño maduro, y por lo tanto una menor proporción de leño juvenil.

#### 2.3.4 Heredabilidad del AMF

Donaldson y Burdon (1995) reportaron que tanto la rigidez como el AMF tienen un significativo control genético. Cave y Walker (1994) reportaron que es suficiente la variación en el AMF entre árboles para justificar la selección de clones para mejorar la rigidez. Meylan y Probine (1969) sugieren que la mejora genética es necesaria para mejorar el AMF.

#### 2.4 PROPIEDADES DE LA MADERA JUVENIL

En los primeros años de crecimiento, los árboles producen madera juvenil, esta se extiende hacia fuera de la médula. Durante este período temprano de crecimiento, las características de la madera producida año tras año van cambiando. Durante un periodo de transición de 5 a 20 años, las características de la madera van mejorando hasta hacerse relativamente constantes. A este último material se lo conoce como madera madura (Kretschmann et al. ,1993).

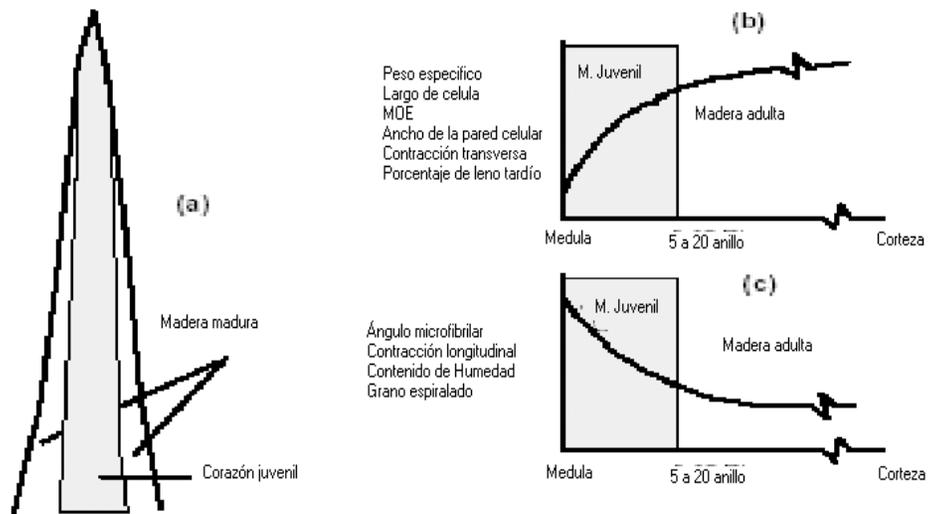


Figura No 2. Efecto de la madera juvenil sobre las propiedades físicas y mecánicas. Krestschmann et al. (1993)

- (a) Corazón juvenil localizado en el interior del tronco de un árbol  
 (b) Propiedades que se incrementan desde la madera juvenil a la madura.  
 (c) Propiedades que disminuyen desde la madera juvenil a la madura.

En coníferas, la madera juvenil, en comparación con la madera adulta, tiene:

- Menor módulo de elasticidad.
- Menor peso específico.
- Menor espesor de pared celular.
- Menor contenido de celulosa.
- Menor porcentaje de leño tardío.
- Mayor contracción longitudinal.
- Mayor madera de compresión.
- Mayor ángulo microfibrilar.
- Mayor contenido en lignina.

Krestschmann et al. (1993).

## 2.5 MADERA JUVENIL, SU RELACIÓN CON EL ÁNGULO MICROFIBRILAR Y PROPIEDADES MECÁNICAS

La proporción de madera juvenil en un árbol es función de la tasa de crecimiento en los primeros 5 años de crecimiento y de la edad del árbol. A diámetro igual, un árbol de crecimiento rápido contendrá más madera joven que un árbol de crecimiento lento que no tenga cúspide desarrollada. Como corolario de esto, medidas tomadas para acelerar el crecimiento a temprana edad pueden aumentar la proporción de madera juvenil e incluso prolongar el período de producción de madera juvenil.

La presencia de madera juvenil tiene varios impactos sobre las propiedades de la madera, entre los principales se destacan:

- La contracción longitudinal es hasta cinco veces superior en madera juvenil, esto aumenta los riesgos de torceduras en madera aserrada.
- Menor resistencia mecánica
- Menor rendimiento en la producción de pulpa

El módulo de elasticidad (MOE) de madera aserrada que contiene 100% de madera juvenil puede ser un 50 a 60% menor que madera que no la contiene (Zhang y Gingras, 1998)

El ángulo de las microfibrillas de la pared secundaria es más notable en la madera juvenil (alrededor de 30°) que en la madera adulta (alrededor de 10°).

El módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR), son características mecánicas de la madera que se correlacionan altamente con el peso específico. Por lo tanto, ambas características son fuertemente influenciadas por los patrones de edad encontrados para el peso específico. Los relativamente pocos estudios que han comparado las características de la madera juvenil y madera madura han

demostrado valores de resistencia constantemente mas bajos en madera juvenil (Larson et al., 2000).

Los datos de un estudio de Pearson y Ross (1984) basados en la madera de una prueba de progenie de *Pinus taeda* de 15 años ( 6 muestras de 1.2m) y de una plantación comercial de 25 años (3 muestras de 1.2m) se presentan en el cuadro No. 1.

Cuadro No. 1. Valores promedio de peso especifico, modulo de elasticidad y modulo de ruptura en los anillos medios desde la medula para dos diferentes edades de árboles.

Number of rings from pith	Specific gravity		MOE ( $\times 10^6$ lb/in <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>		MOR (lb/in <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	
	25-yr-old tree	15-yr-old tree	25-yr-old tree	15-yr-old tree	25-yr-old tree	15-yr-old tree
0+	0.4	0.38	0.88	0.64	9,080	7,260
2+	0.43	0.39	1.31	1.04	10,600	8,980
5+	0.47	0.44	1.53	1.36	13,100	11,400
10+	0.5	0.517	2.08	1.64	16,700	13,900

<sup>a</sup>1 lb/in<sup>2</sup> = 6.9 kPa.

Fuente: Bentdsen y Senft (1986)

Los datos de otro estudio de Bentdsen y Senft (1986) basados en una plantación de *Pinus taeda* de 30 años (seis muestras de 1.8-m)) se dan en el cuadro No. 2.

Cuadro No. 2 . Valores promedio de las propiedades por edad en pino taeda

Age (years)	Specific gravity	MOR (lb/in <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	MOE ( $\times 10^6$ lb/in <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	Maximum crush (lb/in <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	Tracheid length (mm)	Fibril angle (deg)	Ring width (in.) <sup>b</sup>
1	0.412	4,200	0.289	2,020	1.57	36.5	0.394
2	0.384	4,240	0.294	1,880	1.73	39.0	0.508
3	0.400	3,800	0.293	1,620	1.95	39.3	0.360
4	0.400	4,400	0.349	1,730	2.14	37.0	0.367
5	0.436	5,470	0.498	2,160	2.37	31.0	0.348
6	0.423	5,490	0.514	2,100	2.53	33.7	0.312
7	0.467	6,470	0.642	2,550	2.68	33.2	0.260
8	0.502	6,848	0.710	2,960	2.82	29.5	0.223
9	0.514	8,160	0.904	3,190	3.03	24.5	0.181
10	0.531	9,820	1.120	3,430	3.16	27.3	0.164
15	0.582	11,570	1.541	4,140	3.51	22.0	0.138

<sup>a</sup>1 lb/in<sup>2</sup> = 6.9 kPa.

<sup>b</sup>1 in. = 25.4 mm.

Fuente: Bentdsen y Senft (1986).

En este último estudio se observó un incremento de cinco veces el valor medio de MOE ( $0.3$  a  $1.6 \times 10^{06}$  lb/in<sup>2</sup> ( $2.1$  a  $11$  GPa)) y un incremento de 3 veces en el valor medio de MOR ( $4,000$  a  $12,000$  lb/in<sup>2</sup> ( $27.6$  a  $82.7$  MPa)) desde la madera juvenil a la madera madura (23 años).

Los datos del estudio de Pearson (1984) sugieren que las diferencias de resistencia encontradas entre la madera juvenil y la madera adulta no se pueden considerar asociadas a las diferencias encontradas en el peso específico (Bendtsen, 1978). En ayuda de esta sugerencia, Cave y Walker (1994) concluyeron que el ángulo de la fibrilla era el único factor que por sí solo podría explicar la disminución pronunciada del MOE de la madera de pino radiata.

## 2.6 ÁNGULO MICROFIBRILAR, MOE Y MOR

La fuerte relación entre MOE y AMF que fue previamente expuesta (Brazier, 1986) fue confirmada, cuando el análisis de regresión mostró una línea recta en los datos muy buena. Cuando aumentaba AMF el MOE decrecía. Esa clara evidencia de simple regresión lineal fue usada para describir la relación entre AMF y MOE por las cuatro procedencias de Sitka (Picea) El modelo mostró que cuando el AMF decrecía de  $22^\circ$  a  $12^\circ$ , el MOE crecía desde  $5,185$  Nmm<sup>2</sup> a  $11,246$  Nmm<sup>2</sup>. En algunas procedencias el incremento en MOE entre la madera formada cerca de la médula y la madera cerca de corteza fue muy notorio.

La relación entre AMF y MOR es débil (Addis y Walker, 1995). Esto fue confirmado en el gráfico de los datos y el análisis de regresión. El modelo sugiere que una reducción similar en el AMF anteriormente proyectada, causa solamente un incremento del 54% en el valor de MOR. En concordancia, no hay evidencia de diferencias entre provincias en la relación entre MOR y AMF encontradas.

Diferencias no significativas fueron encontradas en los valores medios de MOE por las cuatro procedencias testadas. En contraste, diferencias significativas fueron encontradas entre los valores medios de MOR de las muestras de la procedencia de Washington. La posible explicación de esto, es el menor valor del AMF en la procedencia de Washington, mientras que en la procedencia de California tienen el mayor. Mientras que la relación entre AMF y MOR no es tan fuerte como entre AMF y MOE. Esta es una relación mucho más lineal que la que tiende a considerarse para MOR (Treacy et al., 2000).

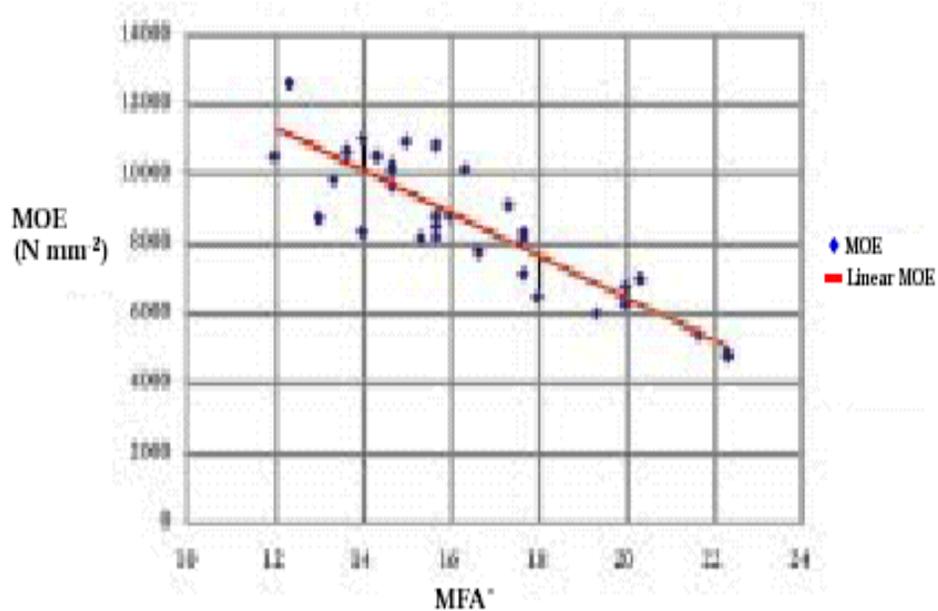


Gráfico No. 1. Relación entre MOE y AMF ( Treacy et al., 2000).

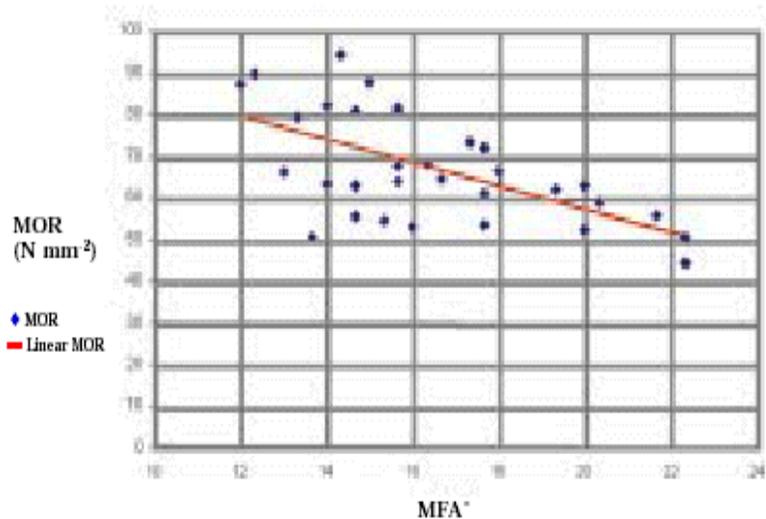


Gráfico No. 2. Relación entre MOR y AMF (Treacy et al., 2000).

La correlación entre ambas propiedades de resistencia a la flexión (MOE y MOR) y el ángulo microfibrilar fue negativa en *Pinus resinosa*, siendo el MOE más sensible que el MOR (Deresse et al., 2003).

También sugieren que prácticas culturales que incrementen el ancho de los anillos tempranos en el desarrollo, incrementan el AMF y reducen el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad.

Estos mismos autores citan a Cave y Walker (1994) quienes reportan que el AMF de la S2 ejerce un mayor control sobre el módulo de elasticidad (MOE) que el peso específico.

O'Neill et al. (2003) en su informe sobre propiedades mecánicas de *pinus taeda* del litoral del Uruguay indica un incremento en las propiedades mecánicas MOE y MOR desde la médula hacia la corteza. Siendo, esta constante al comienzo (Probeta A y B) para luego incrementarse mayormente (Probeta C).

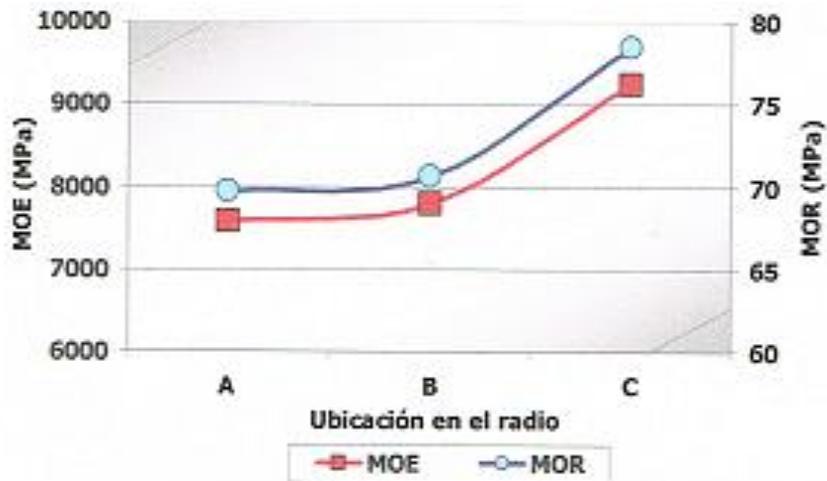


Gráfico No 3: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio (O'Neill et al., 2003).

## 2.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÁNGULO MICROFIBRILAR

Existen distintos métodos que permiten medir el AMF, algunos de ellos son:

- Luz polarizada (\*)
- Tinción con yodo (\*)
- Chequeo ultrasónico
- Apertura de la puntuación (\*)
- Calentamiento
- Difracción de rayos X

(\*) Las muestras se pueden obtener usando micrótopo o prescindiendo de este (a mano con elemento cortante)

En el cuadro No. 3, se compara las diferentes técnicas de medición según lo describen Chih – Lin Huang et al. (1997). Donde los números altos indican la mayor precisión, la facilidad de lectura, la facilidad de preparación de las muestras y la

simplicidad del equipo a utilizar. Por útil, se listan las principales ventajas y desventajas de cada método.

Cuadro No.3 Comparación de las diferentes técnicas de medición.

A	B	C	D	E	F
Microscopio de luz polarizada / Secciones de 156 µm.	2	3	3	3	<input type="checkbox"/> No se precisa hacer la orientación microfibrilar visible x Difícil para fibras de paredes gruesas; se precisa experiencia para encontrar áreas con pared secundaria simples
Microscopio de luz polarizada / Secciones a mano.	1	1	5	4	<input type="checkbox"/> Muestra fácil x Difícil de alinear y leer
Tinción con yodo al microscopio Óptico / secciones 15 µm.	5	1-4	2	4	<input type="checkbox"/> Muy usada para calibrar en el método de difracción de Rayos X x Gases tóxicos; difícil diferenciar el patrón de la S2, del de la S1 o S3
Tinción con yodo al microscopio óptico / secciones a mano	4	1-3	4	5	<input type="checkbox"/> Rápida preparación de la muestra x Difícil de alinear y leer
Chequeo ultrasónico al microscopio óptico / secciones de 15µm	5	4	2	3	<input type="checkbox"/> Chequeo más consistente que el del calentamiento x Mucha fibrilación en ángulos microfibrilares bajos
Apertura de la puntuación al microscopio óptico / secciones de 15µm	1-4	1-4	3	4	<input type="checkbox"/> Mínimo entrenamiento, aperturas fácilmente disponibles; alta precisión en el leño tardío
Apertura de la puntuación al Microscopio óptico / secciones a mano	1-3	1-3	5	5	<input type="checkbox"/> Mínimo entrenamiento, aperturas fácilmente disponibles; alta precisión en el leño tardío
Calentamiento / secciones de 15 µm	5	5	1	3	<input type="checkbox"/> Fácil lectura x Chequeo inconsistente
Difracción con rayos X / áreas de ¾” cuadradas en superficie tangencial de leño temprano y leño tardío	3	4	2	1	<input type="checkbox"/> Muchas fibras en un escaneo x No se puede usar a campo, se precisa calibración, no se puede leer una sola fibra

Fuente: Chin – lin Huang et al. (1997).

- A. Técnica aplicada.
- B. Precisión.
- C. Facilidad de lectura.

- D. Facilidad de preparación de la muestra.
- E. Simplicidad de manejo del equipo.
- F. Principales, ventajas y x desventajas.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIALES

Para los ensayos se utilizaron probetas extraídas de 18 trozas basales provenientes de árboles de *Pinus taeda L.* de 18 años de edad cultivados en la zona del litoral oeste de Uruguay.

#### 3.2 MÉTODOS

##### 3.2.1 Preparación de probetas

Para los ensayos de flexión estática se utilizaron probetas libres de defectos de 25mm x 25mm x 400mm, mientras que para la determinación del AMF se confeccionaron probetas de 25mm x 25 mm y del largo correspondiente al diámetro de la troza. El procedimiento de obtención de las mismas se describe a continuación.

Una vez apeados los árboles seleccionados, y a partir de las trozas basales de los mismos se cortó una troza de 1 m de largo donde el punto medio de la misma correspondió a la altura del pecho (1,3m). Luego se cortó un disco de 50cm de altura , cercana a la marca de la altura del pecho. Este disco se usó para todos los ensayos.

Luego, de este disco se cortó una tabla (radial) de 25mm x 25mm x 425mm, en dirección noreste – suroeste (identificándose los mismos en la muestra) . En estas tablas se eligió una de las secciones desde la médula que se utilizará (NE o SW). Se seleccionan los anillos a los que se le midió el AMF, y se procedió a cortar las probetas de 25mm x 25mm x 425mm donde el anillo del centro de la probeta correspondió a uno de los anillos seleccionados. Luego a estas probetas se les corto uno de los extremos, obteniendo las probetas de 25mm x 25mm x 25mm, que se utilizaran para medir el

AMF, quedando probetas de 25mm x 25mm x 400mm que se utilizaron para los ensayos de flexión estática (MOE Y MOR).

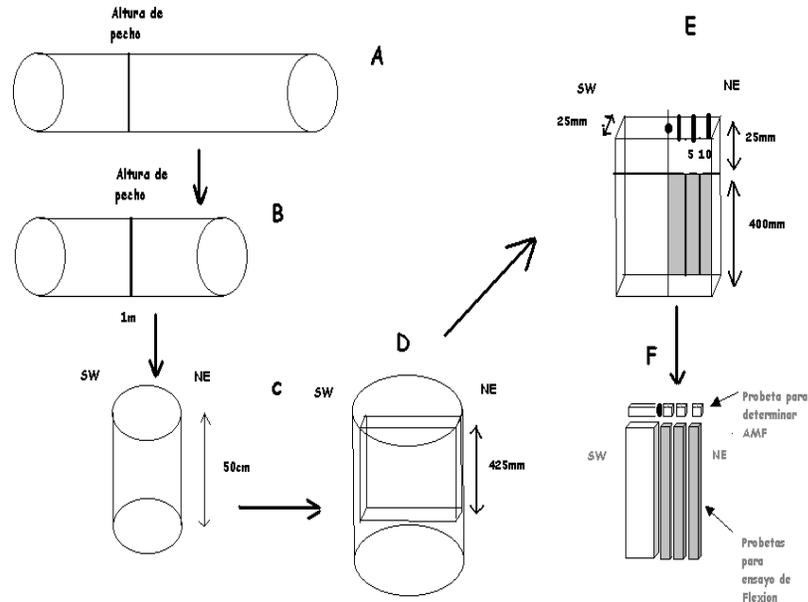


Figura No. 3: Esquema de obtención de probetas.

### 3.2.2 Establecimiento de la relación entre AMF, MOE Y MOR

Para establecer la relación entre AMF y MOE/MOR, la determinación de las variables de AMF y MOE/MOR se estimó a partir de la misma muestra de madera, según se describió anteriormente. La muestra para la determinación del AMF fue obtenida del extremo de la probeta que se utilizó para los ensayos de flexión estática (MOE y MOR). En esta muestra se marco el anillo central y esta fue partida a lo largo del mismo. Luego, se extrajo las secciones del leño tardío que fueron llevadas al microscopio para la determinación del AMF.

### 3.2.3 Medición del ángulo microfibrilar (AMF)

Para la medición del ángulo microfibrilar se utilizó la técnica de tinción con yodo, usando micrótopo para la obtención de las secciones de leño tardío y cuya metodología se lista a continuación:

- Las secciones de 15-30  $\mu\text{m}$  secas se colocaron en un portaobjetos.
- Se agregó lugol (Ioduro de potasio, KI) a la sección por cinco segundos.
- Se secó con papel secante.
- Se agregó una gota de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) sobre el portaobjeto para precipitar los cristales de Iodo.
- Se aplicó el cubreobjeto y se extrajo el excedente con papel secante.
- Se observó el preparado al microscopio (aumento 200X), el cual tenía montada una cámara fotográfica.
- Se tomaron imágenes de fibras bien espaciadas mostrando la orientación de las micro fibrillas en la S2.
- Se hicieron mediciones del AMF, utilizando semicírculo graduado.

### 3.2.4 Medición de flexión estática (MOE y MOR)

El ensayo de flexión estática se realizó sobre pequeñas probetas libres de defectos (25 mm x 25 mm x 400 mm) en la Máquina universal, propiedad de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República), utilizando una celda de carga de 50 kN de capacidad, con una distancia entre apoyos inferiores (luz) de 350 mm, ejerciendo la carga en la cara radial y en el centro de la probeta (Ver figura No. 3).

Para este ensayo se siguió lo prescrito en la norma UNIT 1137:2007 (Método de ensayo para la determinación de los módulos de elasticidad y ruptura en ensayo de flexión estática en maderas.

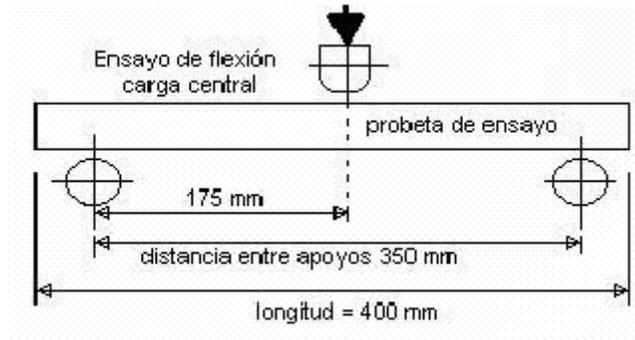


Figura No. 4: Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DEL ÁNGULO MICROFIBRILAR DE LAS PROBETAS ESTUDIADAS.

En el cuadro No. 4 se presentan los valores medios obtenidos de las probetas libres de defectos.

	<b>Módulo de elasticidad (MPa.)</b>	<b>Módulo de ruptura (MPa.)</b>	<b>Ángulo Microfibrilar (°)</b>
<b>Numero de Ensayos</b>	102	102	144
<b>Promedio</b>	6539,41	86,22	27,4
<b>Desviación estándar</b>	1901,53	17,28	5,9

Cuadro No.4: Valores obtenidos de las probetas.

Los valores obtenidos en estos ensayos son muy similares a los obtenidos por O'Neill et al. (2003), para MOE y MOR en madera de *Pinus taeda* del litoral Oeste de Uruguay.

En el Gráfico No. 4 se puede observar que existe una correlación positiva entre el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura ( $r= 0,635$ ). El valor obtenido es menor que el reportado por O'Neill et al. (2003).

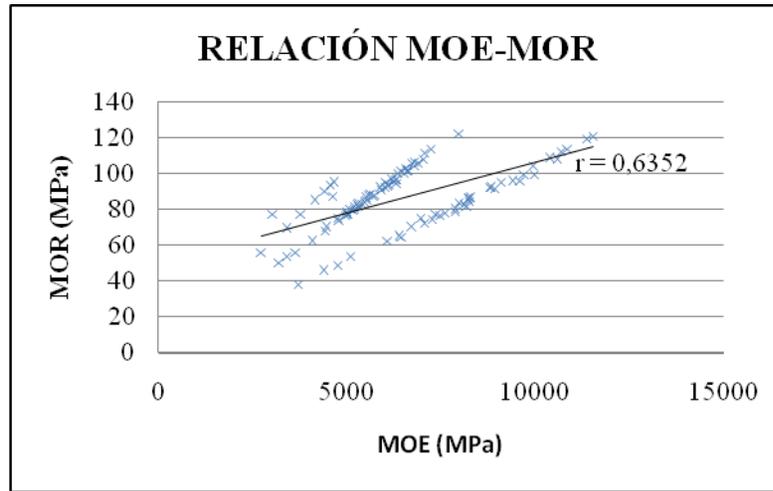


Gráfico No.4: Relación MOR – MOE.

En los gráficos No. 5 y No. 6 se puede observar la relación existente entre el Ángulo Microfibrilar (AMF) y las propiedades de resistencia a la flexión (MOE y MOR). Según se puede ver, existe una relación más estrecha entre el AMF y MOE ( $r = 0,541$ ) que entre el AMF y MOR ( $r = 0,425$ ), en concordancia con lo observado por Deresse et al. (2003).

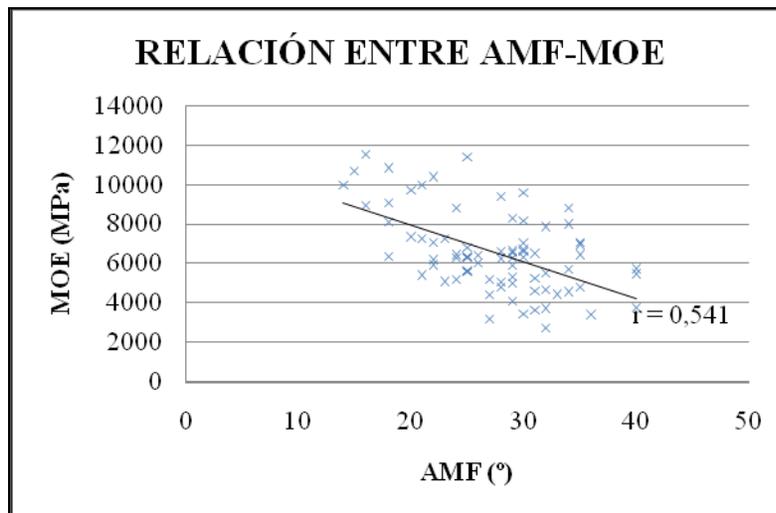


Gráfico No. 5: Relación MOE–AMF.

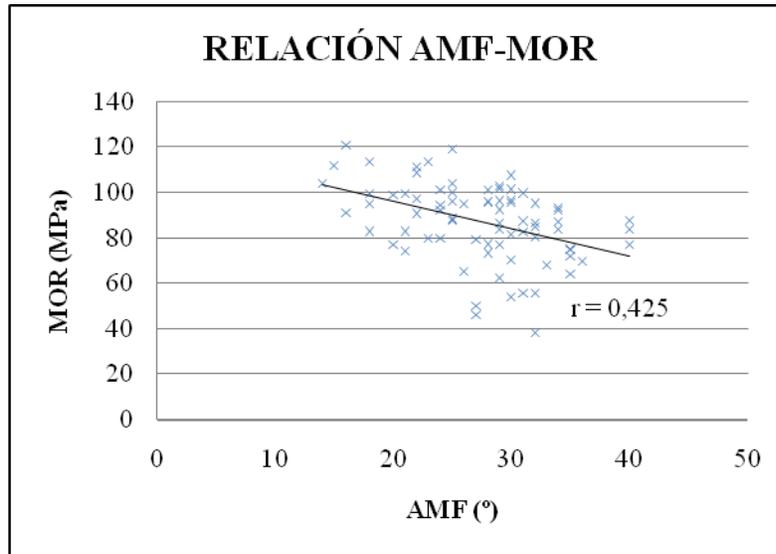


Gráfico No. 6: Relación MOR-AMF.

#### 4.2 ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, MÓDULO DE RUPTURA Y ÁNGULO MICROFIBRILAR SEGÚN UBICACIÓN EN EL RADIO

En el cuadro No. 5, vemos los valores promedio obtenidos de las probetas según la ubicación en el radio que ocupaban (Desde la médula (A) hacia la corteza (C)).

	<b>Módulo de elasticidad (MPa.)</b>	<b>Módulo de ruptura (MPa.)</b>	<b>Ángulo Microfibrilar (°)</b>
<b>A</b>	5873,80	78,30	28,2
<b>B</b>	6176,80	81,90	27,9
<b>C</b>	7072,80	92,60	26,7

Cuadro No. 5: Valores promedio según ubicación en el radio.

Al analizar los valores de los ángulos fibrilares medidos en este trabajo, se determina que los mayores ángulos se registran en la cercanía a la médula y declina gradualmente, desde la médula al cambium vascular. Esto concuerda con los resultados de otros autores (Phillips 1941, Walker y Butterfield 1995). Pedini (1992), Donaldson (1993) determinaron que los ángulos fibrilares mayores se encontraron dentro de los primeros cinco a diez anillos de crecimiento a partir de la médula, lo que también se cumple con los valores de los ángulos fibrilares de este estudio y se nota claramente en el esquema gráfico No.7.

Bocage et al. (2000), Mac Gregor (2003) trabajando con *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* de más de 35 años de edad, cultivados en Uruguay y sin poda encontraron rangos de variación en el AMF de médula a corteza de 33° a 18,7° y de 37,4° a 17,7° respectivamente. Esto es consistente con la edad y tratamientos silviculturales de los árboles estudiados en este trabajo, que no fueron podados y tenían 18 años de edad.

Las intervenciones silviculturales, según Lindström (1996) son una fuente de variación significativa en el ángulo fibrilar e incluso son herramientas para la obtención de productos forestales con características específicas. Donaldson (1993), en un estudio de variación de ángulo fibrilar, con respecto a la edad, para valores máximos de ángulo fibrilar que se presentan a determinadas edades, no pudo asignarlos a intervenciones silvícolas. El autor lo atribuye a factores ambientales desconocidos u otros no considerados.

Otro factor importante que se debe señalar, es el componente genético que influye en la forma que adquiere la relación entre el ángulo fibrilar y la edad. Donaldson y Burdon (1995), determinaron un índice de repetibilidad genética de 0,7 para *Pinus radiata* con respecto al ángulo fibrilar. Según los autores, este índice representa un muy buen potencial para la selección genética, ya que es una característica que se transmitiría con buena probabilidad.

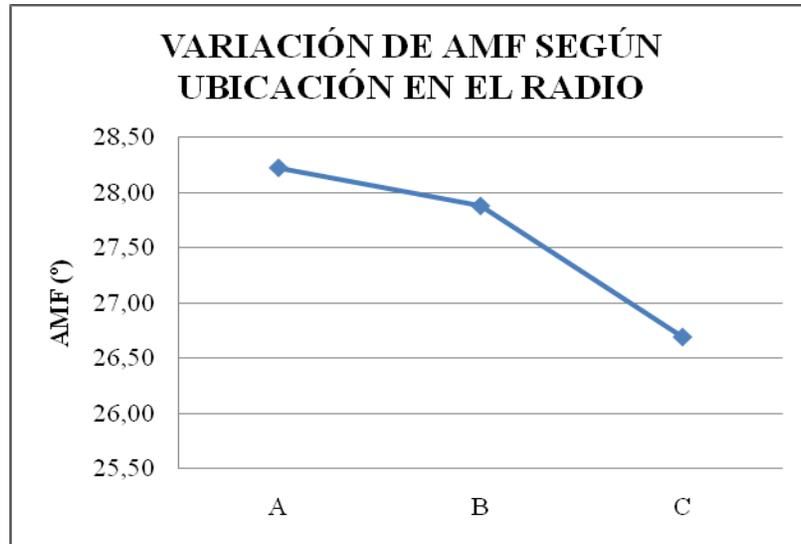


Gráfico No. 7: AMF según ubicación en el radio

En los gráficos siguientes (No. 8 y No. 9) se observa la tendencia a incrementarse, que tienen las propiedades mecánicas (MOE y MOR) desde la médula hacia la corteza. Igual a lo observado por O'Neill et. al. (2003) y que se destaca en el gráfico No.3 el incremento es leve entre la probeta A y B, aumentando marcadamente hacia la probeta C.

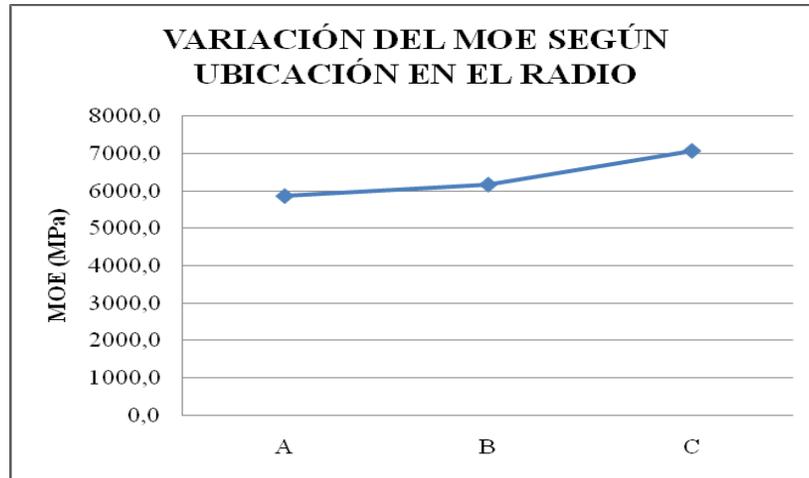


Gráfico No. 8: MOE según ubicación en el radio.

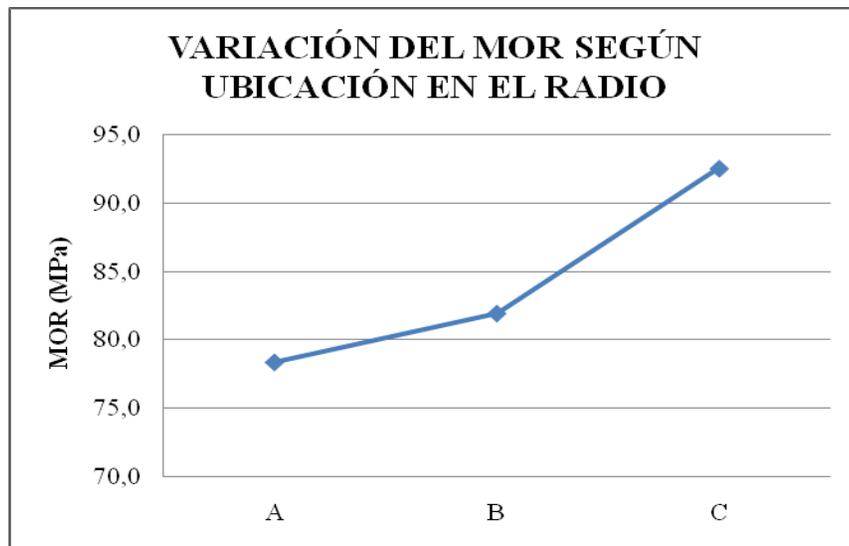


Gráfico No. 9: MOR según ubicación en el radio.

Con respecto al método de Senft y Bendtsen (1985), utilizado para visualizar el ángulo fibrilar, se debe destacar que corresponde a un método fácil de emplear, de acuerdo a la técnica y equipos. Por otra parte, los valores de ángulo fibrilar que se

obtuvieron en esta investigación, son muy similares a otros obtenidos mediante métodos distintos y para la misma especie, lo que valida en cierto aspecto su uso.

Según proyecciones realizadas por Butterfield y Walker (1995), si se logra disminuir en 5° el ángulo fibrilar para *Pinus radiata*, lo cual según sus propias conclusiones, es bastante razonable considerando su variación natural y una intensidad de selección modesta en árboles previamente sometidos a mejoramiento genético (1 de 10 individuos), los beneficios serían muy satisfactorios, pues se esperaría como resultado:

- Un incremento en la rigidez de la madera entre un 25 -50%, lo que equivale a subir en un grado la calificación para madera estructural.
- Un incremento en la longitud de traqueida de 0,5 mm, mejorando las propiedades de rasgado en el papel.
- Una reducción en los defectos de torcedura de la madera.

Los valores de ángulo fibrilar obtenidos en este estudio, reflejan una situación muy similar a experiencias realizadas en Nueva Zelanda para *Pinus radiata*. Esto indica que lo propuesto anteriormente, puede ser una realidad que también se llegue a proyectar en nuestro país.

## 5 CONCLUSIONES

- La madera utilizada para estos ensayos, corresponde en su gran mayoría a madera juvenil. Debido a los bajos valores promedio de las propiedades mecánicas y elevado ángulo microfibrilar promedio. Por lo que la madera estudiada, no es recomendable para uso estructural.

- Existe una relación entre el AMF y las propiedades de resistencia a la flexión, principalmente con el MOE ( $r= 0,541$ ). Por lo que el AMF, puede ser un buen criterio de selección para un programa de mejoramiento genético.

- No se pudo observar, al menos en forma clara el inicio del leño adulto, sin embargo se puede señalar que el ángulo microfibrilar descende desde los primeros anillos cercanos a la médula hasta el anillo 12 a 15 donde lo comienza hacer de forma más acentuada. Al igual que el MOE y MOR aumentan. Para poder afirmar cuando finaliza la transición a leño adulto sería necesario evaluar más anillos de crecimiento pero esto es imposible dada la edad de los árboles. La comparación con trabajos anteriores hechos en Uruguay permite observar una clara coincidencia entre el AMF y la edad de árboles de la misma especie cultivados en distintos sitios. La media del ángulo microfibrilar y la edad de los árboles estudiados coinciden con el leño de transición propuesto por Bocage et al. (2000).

- La media de MOE encontrada en este trabajo es similar a la reportada por O'Neill et al. (2003) Para madera de árboles de la misma especie y edad, cultivados en sitios similares. El MOR

encontrado en este trabajo es algo inferior al encontrado por esos autores.

- Existe una tendencia a aumentar las propiedades de resistencia a la flexión de la madera, desde la médula hacia la corteza. Así como también tiende a disminuir el AMF. Por lo que, cualquier tratamiento que favorezca el lento crecimiento inicial favorecerá la obtención de madera estructuralmente mejor.

- El valor de correlación entre el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura ( $r=0,635$ ) de las muestras estudiadas es algo inferior al encontrado por O'Neill (2003).

## 6 RESUMEN

Se estudio el ángulo microfibrilar (AMF), módulo de elasticidad (MOE), módulo de ruptura (MOR) y su relaciones en madera proveniente de un rodal de Pinus taeda de 18 años de edad creciendo en el litoral oeste del Uruguay. El estudio se baso en la obtención de probetas libre de defectos a las que se le midió el AMF mediante el método de tinción con iodo, fotografía, trazado y medición de los ángulos. Luego, se procedió a medir MOE y MOR con la máquina universal utilizando la norma UNIT 1137:2007. Se encontró un relación entre el ángulo microfibrilar (AMF) y ambas propiedades (MOE Y MOR). Por lo que el AMF sería un buen criterio de selección para futuros programas de mejoramiento de las propiedades de resistencia estática de la madera.

Palabras clave: Madera juvenil; Ángulo microfibrilar; Módulo de elasticidad; Módulo de ruptura; Propiedades de la madera; Pinus taeda

## 7 SUMMARY

Was studied microfibrillar angle (MFA), modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR) and their relationships in wood from a stand of *Pinus taeda* 18 years old growing in the eastern coast of Uruguay. The study was based on obtaining samples free of defects for which the AMF was measured by iodine staining method, photography, drawing and measuring angles. Then he proceeded to measure MOE and MOR with the universal machine using the standard UNIT 1137:2007. We found a relationship between the microfibrillar angle (MFA) and both properties (MOE and MOR). As the MFA would be a good selection criterion for future breeding programs of the static strength properties of wood.

Keywords: Juvenile wood; Microfibril angle; Stiffness; Strength;  
Wood properties; *Pinus taeda*.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

1. ADDIS, T.; WALKER, J.C.F. 1995. Spiral grain in Canterbury *Pinus radiata*; within-and between-tree variations and effect on mechanical properties. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 25 (3): 358-366.
2. BARNETT, J.; CHAFFEY, N.; BARLOW, P. 1997. Cortical microtubules and microfibril angle. In: Butterfield, B.G. ed. *Microfibril angle in wood*. Wesport, New Zeland, s.e. pp. 253-265.
3. BENDTSEN, B.A.; SENFT, J. 1986. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood and Fiber Science*. 18(1): 23-38.
4. BENDTSON, B. 1978. Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal*. 28(10): 61-72.
5. BOCAGE, E.; BORAGNO, L.; ENRIQUE, A. 2000. Madera juvenil en *Pinus taeda*, cultivado en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 70 p.

6. BRAZIER, J.D. 1986. Juvenile wood. In: Kucera, L.J. ed. Xylorama. Bassel, Switzerland, Birkhauser Verlag. pp. 25–32.
7. BUTTERFIELD, B.; WALKER, J. 1995. The importance of microfibril angle for the processing industries. *New Zealand Forestry*. 4(4):34-40.
8. CAVE, I.D. 1968. Anisotropic elasticity of the plant cell wall. *Wood Science Technology*. 2: 268-278.
9. \_\_\_\_\_; WALKER, J.C.F. 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation, the influence of microfibril angle. *Forest Products Journal*. 44(5):43-48.
10. CLARK, A.; SAUCIER, J. 1986. Comparison of juvenile wood in planted loblolly and slash Pine. Athens, Georgia, s.e. s.p.
11. COWN, D. 1992. Corewood (juvenile wood) in *Pinus radiata* – Should we be concerned *New Zealand Journal of Forestry Science*. 22(1):87-95.

12. CHAFE, S. 1974. Cell wall structure in the xylem of *Cryptomeria*. *Protoplasma*. 81:63-76.
13. CHIH-LIN HUANG; KUTSHA, N.P.; LEAF, J.G.; MEGRAW R.A. 1997. Comparison of microfibril angle measurement techniques. In: Butterfield, B. G. ed. *Microfibril angle in wood*. Westport, New Zealand, s.e. pp. 177-205.
14. DERESSE, T.; SHEPARD, R.K.; SHALER, S.M. 2003. Microfibril angle variation in red pine (*Pinus resinosa* Alt.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood. *Forest Products Journal*. 53(7/8):34-40.
15. DONALDSON, L. 1992. Within and between tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 22: 77-86.
16. \_\_\_\_\_. 1993. Variation in microfibril angle among three genetic groups of *Pinus radiata* trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 23(1): 90-100.

17. \_\_\_\_\_.; BURDON, R. 1995. Clonal variation and repeatability of microfibril angle in *Pinus radiata*. New Zealand Journal of Forestry Science. 25(2):164-174.
18. \_\_\_\_\_. 1996. Effect of physiological age and site on microfibril angle in *Pinus radiata*. IAWA Journal. 17(4):421-429.
19. \_\_\_\_\_. 1997. Between tracheid variation in microfibril angle in radiata pine. In: Butterfield B. G. ed. Microfibril angle in wood. Westport, New Zealand, s.e. pp. 206-224.
20. ECHOLS, RM. 1960. Effects of growing space on wood specific gravity in loblolly pine. In: Society of American Foresters Annual Meeting (1960, Washington). Proceedings. s.n.t. pp. 140–143.
21. EL-HOSSEINY, F.; PAGE, D. 1973. The measurement of fibril angle of wood fibers using polarized light. Wood and Fiber Science. 5(3): 208-214.
22. HARRIS, J.; MEYLAN, B. 1965. Influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. Holzforschung. 19(5):144-153.

23. HERMAN, M.; DUTILLEUL, P.; AVELLA-SHAW, T. 1999. Growth rate effects on intra-ring and inter-ring trajectories of microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*). *IAWA Journal*. 20(1): 3–21.
24. HILLER, C. 1954. Variations in fibril angles in slash pine. Madison, WI, USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. 26 p.
25. \_\_\_\_\_. 1965. Estimating size of the fibril angle in latewood tracheids of slash pine. *Journal of Forestry*. 62: 249–252.
26. KRETSCHMANN, D.; BENDTSEN, B. 1992. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity. *Wood and Fiber Science*. 24(2): 189-203.
27. \_\_\_\_\_.; MOODY, R. C.; RUSSELL C.; PELLERIN, R. F.; BENDTSEN, B. A.; CAHILL, J. M.; MCALISTER, R. H.; SHARP, D. W. 1993. Effect of various proportions of juvenile wood laminated veneer lumber. Madison, WI, USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. 31 p.

28. LARSON, P.R.; KRETSHMANN, D.E.; CLARK, A.; ISEBRANDS, J.G. 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines. Madison, WI, USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. 42 p.
29. LINDSTRÖM, H. 1996. Basic density in norway spruce. Part III. Development from pith outwards. *Wood and Fiber Science and Technology*. 28(4):391-405.
30. \_\_\_\_\_.; EVANS, J.; VERRILL, J. 1998. Influence of cambial age and growth conditions on microfibril angle in young Norway spruce. *Holzforschung*. 52(6): 193-205.
31. McALISTER, R.; CLARK, A. 1995. Effect of initial spacing on mechanical properties of lumber sawn from unthinned slash pine at age 40. Madison, WI, USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. 6 p.
32. MAC GREGOR, J.F. 2003. Madera juvenil en *Pinus elliottii*, cultivado en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 27 p.
33. MANWILLER, F.G. 1972. Wood and bark properties of spruce pine. Res. Papanicolaou. SO-78. Asheville, NC, USDA. Forest Service. 25 p.

34. MEGRAW, R.A.; LEAF, J.G.; BREMER, D.; WEYERHAEUSER Co. 1997. Longitudinal shrinkage and microfibril angle in loblolly pine. In: Butterfield, B. G. ed. Microfibril angle in wood. Westport, New Zealand, s.e. pp. 27-61.
35. MEYLAN, B.A.; PROBINE, M.C. 1969. Microfibril angle as a parameter in timber quality y assesment. Forest Products Journal. 19 (4): 30 – 33.
36. NICOLAI, E.; FREY-WYSSLING, A. 1938. Uber den Feinbauder Zellwand von Chaetomorpha. Protoplasma. 30: 401-410.
37. O'NEILL, H.; TARIGO, F.; TRAMBAUER, C. 2003. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L.del litoral de Uruguay. Montevideo, LATU/ Grupo Técnico de la Madera Aserrada de Pino. 47 p. (Informe no. 2)
38. PAGE, D.H. 1969. A method for determining the fibrilar angle in wood tracheids. Journal of Microscopy. 90(2):137-143.

39. \_\_\_\_\_.; EL-HOSSEINY, F.; WINKLER, K.; BAIN, R. 1972. The mechanical properties of single wood-pulp fibers. Part I; A new approach. *Pulp and Paper Magazine of Canada*. 73(8):198-203.
40. PEARSON, R. G. 1984. Characteristics of structural importance of clear wood and lumber from fast-grown loblolly pine stands. stands. In: Symposium on the Changing Wood Resource in the Southern United States (1984, Raleigh). Proceedings. Raleigh, NC, North Carolina State University. pp. 66-70.
41. PEDINI, M. 1992. The variation in the microfibrillar angle within the juvenile wood of Sitka spruce. *IAWA Bulletin New Series*. 13(3): 261.
42. PHILLIPS, E. 1941. The inclination of fibrils in the cell wall and its relation to the compression of timber. *Empire Forestry Journal*. 20:74-78.
43. PILLOW, M.; TERRELL, B.; HILLER, C. 1959. Patterns of variation in fibril angles in loblolly pine. Madison, WI, USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. 11 p.
44. PRESTON, R.; ASTBURY, W. 1937. The structure of the wall of the green alga *Valonia ventricosa*. *Proceedings of the Royal Society*. B122:76-97.

45. SENFT, J.; BENDTSEN, A. 1985. Measuring microfibrillar angles using light microscopy. *Wood Fiber Science*. 17 (4):564-567.
46. SHEPHERD, K. R. 1986. *Plantation silviculture*. Dordrecht, The Netherlands, Martinus Nijhoff. 322 p.
47. TREACY, M.; EVERTSEN, J.; NI DHUBHAIN, A. 2000. A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of Sit ka spruce provenances. Dublin, National Council for Forest Research and Development. 30 p.
48. TSOUMIS, G. 1992. *Science and technology of wood; structure, properties, utilisation*. New York, Van Nostrand Reinhold. 494 p.
49. TUSET, R.; DURAN, F. 1986. *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización*. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. 688 p.
50. WALKER, J.C.F. 1993. *Primary wood processing; principles and practice*. London, Chapman and Hall. 583 p.

51. \_\_\_\_\_.; WOOLONS, R. C. 1997. Cell wall organization and the properties of xylem-a speculative review. In: Butterfield, B. G. ed. Microfibril angle in wood. Westport, New Zealand, s.e. pp. 13-26.
52. WATSON, A.; DADSWELL, H. 1964. Influence of fibre morphology on paper properties. 4. Micellar spiral angle. *Appita Journal*. 17:151-156.
53. YING, L. KRETSCHMANN. D, BENDTSEN, B. 1994. Longitudinal shrinkage in fast-grown Loblolly pine plantation wood. *Forest Products Journal*. 44(1):58-62.
54. YOUMING XU; HAN LIN; CHUNYUN XIANG. 1997. Genetic and geographic variation in microfibril angle of loblolly pine in provenances. In: Butterfield, B. G. ed. Microfibril angle in wood. Westport, New Zealand, s.e. pp. 388-395.
55. ZHANG, S.; GINGRAS, J.F. 1998. Aménagement forestier pour la qualité du bois et la plus grande valeur du produit fini. *Le Progrès Forestier*. Automne: 49-54.

56. ZOBEL, B.J. 1961. Inheritance of wood properties in conifers. *Silvae Genetica*.  
10: 65-70.
57. \_\_\_\_\_.; JETT, J. B. 1995. Genetics of wood production. s.l., Springer-  
Verlag. 337 p.

## 9 ANEXOS

UBICACIÓN EN EL RADIO DESDE LA MÉDULA A LA CORTEZA											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
TROZA	AMF (°)										
1	29.00	30.00	25.00			31.00			20.00		
2	31.00			24.00					30.00		
3	25.00	22.00	31.00	32.00		27.00		27.00	18.00		
4	30.00	35.00						29.00		26.00	
5	22.00			28.00				35.00	14.00		
6	17.00	23.00	18.00					20.00	25.00		
7	25.00	28.00	24.00		29.00	25.00	24.00				
8											
9	15.00	34.00	35.00					40.00	45.00		
10	18.00	34.00		26.00	19.00		21.00				
11	34.00		26.00	32.00				29.00	28.00		
12	30.00										
13	27.00	22.00	21.00			20.00		31.00	32.00	30.00	
14	16.00			22.00			16.00	18.00	21.00		
15	29.00	32.00	29.00	28.00			40.00				
16	29.00	29.00	30.00	31.00	23.00	30.00		22.00			28.00
17	24.00	29.00	25.00							30.00	
18	33.00		40.00	35.00	32.00	34.00	32.00	48.00	36.00	45.00	

UBICACIÓN EN EL RADIO DESDE LA MÉDULA A LA CORTEZA											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
TROZA	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)	MOE (N)
1	18554.93	6624.42	5570.97			6515.94		18605.35			
2	20062.25	6789.03		6310.38			4771.55		18048.13		
3	6790.03	5929.85	3637.21	3731.15		4401.17		5165.08	9090.11		
4	3425.92	7058.94						5017.50		6403.47	4411.84
5	10394.24			4787.95		4172.34	4764.78	6968.89	9949.44		
6	13772.20	7232.50	8117.78					9696.35	6285.82		
7	11374.06	5042.10	8825.74	7477.07	4082.87	6367.64	5210.17	6084.13			
8											
9	10688.87	8802.33	4775.73				6016.91	3768.31	4512.68		
10	10839.04	5696.69	4994.23	6039.90	5314.21	4476.54	5411.03	10588.41	6730.03		
11	4574.78	5197.12	5300.35	4663.94		6016.91	3025.26	5321.98	9395.52		
12	6714.80							5116.04	8263.89		
13	3199.43	4565.04	7280.30	6075.73		7354.31	8211.67	5268.30	7870.60	8173.24	
14	11533.93	6890.87	8264.12	6181.88			8924.52	6349.37	9987.25		
15	6296.48	5524.87	8287.30	6252.20			5731.19	5042.10			
16	6640.81	6554.93	7025.33	4622.83	5087.87	9591.55		7080.24	6119.47		6605.15
17	6440.73	5892.58	5634.12					7613.57	7887.98	6319.43	7966.52
18	4437.05	6252.20	5479.08	6444.29	2722.73	7993.81	5529.50	4978.62	3406.49	3806.79	4984.71

UBICACIÓN EN EL RADIO DESDE LA MÉDULA A LA CORTEZA											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
TROZA	MOR (N)										
1	189.34	101.39	87.49			99.73		189.85	92.87		
2	204.72	106.51		94.17			48.69		184.16		
3	103.93	90.76	55.67	38.07		46.03		79.06	95.08		
4	53.75	72.03						76.80		65.34	90.04
5	108.72			73.28		85.15	48.62	74.67	104.06		
6	144.05	113.47	82.83					98.94	96.21		
7	118.96	77.18	92.31	76.30	62.49	99.90	79.75	93.12			
8											
9	111.80	92.07	74.93				92.10	76.90	92.10		
10	113.37	87.19	78.35	94.76	81.34	70.23	82.82	108.05	105.59		
11	93.36	81.54	108.17	95.18		92.10	77.18	83.50	95.87		
12	70.23							53.51	86.43		
13	50.20	95.49	74.29	62.00		76.92	85.89	82.65	80.31	81.32	
14	120.64	105.47	84.33	96.99			91.07	99.61	99.36		
15	96.37	86.68	86.68	95.70			87.72	77.18			
16	101.65	102.84	107.53	87.27	79.82	95.43		111.08	93.67		101.10
17	101.05	92.45	88.39					77.69	78.48	96.73	121.94
18	67.91	95.70	83.86	64.11	55.57	83.61	84.64	78.11	69.52	77.69	76.30