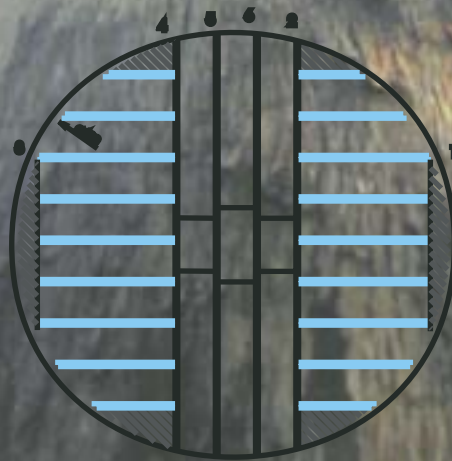


CIS-Madera

CENTRO DE INNOVACIÓN Y SERVICIOS TECNOLÓGICOS DE LA MADERA DE GALICIA

PROYECTO FAIR CT 98-9579:

**"SISTEMAS DE ASERRADO ADECUADOS PARA
Eucalyptus globulus EUROPEOS AFECTADOS
POR TENSIONES DE CRECIMIENTO"**



Project FAIR CT 98-9579
“RTD of sawmilling systems suitable
for European *Eucalyptus globulus* affected by
Growing stresses”

Coste total: 422,654 Euros
Fecha inicio: 01/01/1999

Contribución E.C.: 206,580 Euros
Fecha finalización: 30/06/2001

Coordinador



CIS-Madera

Parque Tecnológico de Galicia
San Cibrao das Viñas, 32901- Ourense. España
Tfno/ +34 988 368152
Fax/ +34 988 368153
Mail: info@cismadera.com

Participante C-2



CIRAD-Forêt

Programme Bois
73 Rue J.F. Breton
BP 5035
34032 MONTPELIER Cedex 01, Francia
Tfno/ 33-(0) 467616516
Fax/ 33-(0) 467615725
Mail: gerard.j@cirad.fr

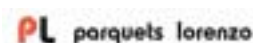
Participante A-1



Aserradero Hermanos Sánchez Pena S.L.

Feria del Tres s/n
15637 Villarmayor, La Coruña. España
Tfno/ +34 981 781718
Fax/ +34 981 781803

Participante A-2



Parquets Lorenzo S.A.

Avda. Eladio Lorenzo, 16
27748 Mondoñedo, Lugo. España
Tfno/+34 982 521712
Fax/ +34 982 521724

Participante A-3



Maderas Betanzos S.L.

Carretera de Castilla, s/n
15300 Betanzos, La Coruña. España
Tfno/ +34 981 770906
Fax/ +34 981 771812

Participante A-4



Sardinha & Leite S.A.

Rua da Voltinha
Apartado 66
4415 Carvalhos, Portugal
Tfno/ 351-22-7860100
Fax/ 351-22-7860109

Participante A-5



Maschinenfabrik Simon Möhringer GmbH.

Simon-Möhringer-Str. 4
D-97353 Wiesentheid, Alemania
Tfno/ 49-9383-9500
Fax/ 49-9383-95030

Nuevos Caminos para el Eucalipto

Cuando hace unos cinco años inició su andadura el Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera (CIS-Madera), se marcó como uno de sus objetivos prioritarios incrementar la competitividad de las empresas y propiciar un óptimo aprovechamiento del recurso forestal.

Aunque es cierto que el monte gallego tiene una enorme capacidad productiva, la cadena monte-industria de Galicia, por diversos motivos, sigue presentando desequilibrios y un claro déficit de madera de calidad para abastecer a la industria transformadora.

Precisamente, la consecución de una mayor productividad de nuestros montes y un mejor aprovisionamiento de materias primas por parte de la industria es una de las debilidades considerada como más importantes en los trabajos realizados para el proceso de constitución del Cluster de la Madera, siendo además una de las acciones de mejora a desarrollar, que fue propuesta como prioritaria por los Comités de Trabajo formados por empresarios del sector de la madera de Galicia.

Pero las cosas afortunadamente están cambiando, hoy surgen nuevas posibilidades que permitan diversificar el aprovechamiento de algunas especies como el eucalipto, hasta ahora proscrito en nuestra Comunidad Autónoma y objeto de discusiones viscerales, en las mayoría de los casos desafortunadas y sin fundamento.

La diversificación de los empleos de la madera de eucalipto para desarrollar productos de alto valor complementarios a la pasta de celulosa plantearía nuevos horizontes en la política forestal gallega, además de actuar como factor de equilibrio entre las posibilidades productivas del monte y las necesidades de la industria de transformación.

Durante los últimos años, el género *Eucalyptus* ha protagonizado un enorme desarrollo de sus plantaciones, sobre todo, con especies como *E. globulus* y *E. grandis*.

Actualmente hay en el mundo unos 13 millones de Ha. de plantaciones de eucalipto, distribuidas en países situados en zonas tropicales y templadas, como Brasil, India, Sudáfrica, Australia, España, Portugal, Argentina, Uruguay, Chile, Vietnam, etc.

En Galicia, según el Tercer Inventario Forestal, cuyas cifras fueron publicadas en el Nº 4 de nuestra revista, las plantaciones de eucalipto ocupan en 1998 una superficie de 178.000 Ha, y las masas mixtas de pino y eucalipto 159.000 Ha adicionales, además del incremento de la clase diametral de esta especie.

En los últimos años se han venido desarrollando en el mundo diferentes experiencias con eucaliptos por parte de la industria de transformación de la madera, empresas de fabricación de equipos para procesos y universidades y centros tecnológicos. Algunos de los proyectos más innovadores han sido llevados a cabo en Galicia, como la fabricación de tableros de fibra de media densidad (MDF) o perfiles laminados para carpintería.

Entre los trabajos de investigación realizados en estos últimos años por el CIS-Madera destaca la coordinación de un proyecto CRAFT de investigación cooperativa sobre aserrado de eucalipto en colaboración con empresas gallegas, portuguesas y alemanas, además del Cirad Forêt francés, cuyas conclusiones se exponen en un artículo de M. Touza en el número seis de nuestra revista, en el que se pone de manifiesto la posibilidad de fabricar nuevos productos con mejor calidad y mayor aprovechamiento del recurso forestal, ampliando de esta forma las posibilidades de mercado, además de marcar las nuevas pautas a seguir para conseguir una mayor productividad de las empresas que transformen dicha especie.

Paralelamente, el CIS-Madera en colaboración con el Centro Tecnológico das Indústrias de Madeira e Mobiliário y la Federación de Madeira e Mobiliário de Portugal y las Federaciones gallegas de Aserradores y Rematantes y de Carpintería, Ebanistería y Mobiliario, coordina un proyecto de promoción de los productos elaborados con madera de eucalipto blanco en la Eurorregión Galicia-Norte de Portugal.

Además, nuestro Centro pretende poner en marcha próximamente nuevas líneas de investigación para la optimización de productos como la chapa decorativa, el tablero contrachapado y la posible fabricación de tableros estructurales como la madera microlaminada, también conocida como LVL (Laminated Veneer Lumber), para cuyos productos el *Eucalyptus globulus* puede tener unas características físico-mecánicas extraordinarias.

Consideramos que los resultados obtenidos en estos primeros proyectos son muy buenos, y a tenor de las peticiones recibidas de empresas para aplicarlos y las propuestas para trabajar conjuntamente por parte de Universidades y Centros Tecnológicos de países como Australia, Brasil, Chile, Uruguay, Francia, Holanda y Alemania, podríamos calificarlos incluso de extraordinarios.

Pero lo que verdaderamente nos llena de satisfacción y nos anima a seguir trabajando e investigando en este campo, es el conocimiento que hemos adquirido de esta especie, además de saber que con la madera de eucalipto de nuestros bosques se pueden fabricar más productos que pasta de celulosa, y que el trabajo y el esfuerzo de estos cuatro años ya ha contribuido a la fabricación de nuevos productos y a la creación de nuevas industrias en nuestra Comunidad Autónoma, ayudando a mejorar la competitividad de otras, y creando al mismo tiempo una filosofía de trabajo basada en la cooperación entre empresas y centros tecnológicos.

Lo realizado hasta ahora es un primer paso en firme que servirá para marcar los nuevos caminos a seguir para un mayor y mejor aprovechamiento del eucalipto en el futuro, además de dar respuesta a las críticas negativas y a aquellos que opinaban hace cuatro años que lo que pretendíamos hacer era imposible, por eso lo hemos hecho.



Jaime D. Bermúdez Alvite
Director del CIS-Madera

Proyecto de Investigación sobre sistemas de aserrado adecuados para procesar *Eucalyptus globulus* con tensiones de crecimiento



El descubrimiento de que su madera constituye una materia prima óptima para la fabricación de pasta de celulosa, ha convertido al eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus* Labill) en uno de los principales recursos forestales de las áreas de influencia atlántica de la Península Ibérica.

De forma paralela a la expansión de sus plantaciones orientadas hacia la producción de fibra, numerosos industriales están cada vez más interesados ante la posibilidad de diversificar las aplicaciones de la madera de eucalipto.

Frente a este interés el mayor problema encontrado para procesar eucaliptos es la aparición de importantes fendas en las trozas y deformaciones posteriores en la madera aserrada, ambas ocasionadas por las tensiones de crecimiento, y que disminuyen considerablemente el rendimiento de muchos procesos productivos.

Por este motivo, El CIS-Madera planteó un proyecto de investigación cooperativa con el objetivo global de analizar la viabilidad técnica de serrar eucaliptos con edades cercanas a los 30 años de edad. El proyecto fue aprobado y cofinanciado por la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea y se desarrolló entre enero de 1999 y junio del año 2001.

En el proyecto participaron, además del CIS-Madera que ejerció el papel de coordinador; tres aserraderos de Galicia (Parquets Lorenzo, S.A., Maderas Betanzos S.L. y Hermanos Sánchez Pena, S.L), un aserradero de Portugal (Sardinha & Leite, S.A.), un fabricante alemán de equipos de aserrado de alta tecnología (Möhringer GmbH) y un Centro Tecnológico de la Madera de Francia (CIRAD-Forêt).

Tras dos años y medio de trabajo, los resultados del Proyecto que se resumen en este artículo reafirman las posibilidades de diversificar las aplicaciones de alto valor de los eucaliptares y permiten plantear importantes expectativas de futuro en la política forestal de Galicia.

Pero, por encima de cualquier otra consideración, el mejor resultado del Proyecto es la evidencia de como es posible avanzar en la consecución de resultados cuando un grupo de empresas y centros tecnológicos deciden cooperar y compartir su experiencia para alcanzar una objetivo común.

Gracias a este esfuerzo, España y Portugal forman parte del grupo de países pioneros en investigaciones sobre aserrado de eucaliptos, tratando de desarrollar fórmulas propias que optimizen el conjunto de posibles beneficios derivados de sus eucaliptares.

El futuro no ha hecho más que comenzar.

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones del género *Eucalyptus* ocupan una superficie próxima a los catorce millones de hectáreas en el mundo, siendo sus principales aplicaciones el suministro de madera con fines energéticos y de fibra para la industria de la celulosa.

En la Unión Europea existe una importante área de plantaciones de eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus* Labill) que se concentra en las regiones de influencia atlántica del Sur de Europa, especialmente en Galicia (España) y Portugal donde ocupan una franja costera que da forma a los bosques más productivos de Europa.

La llegada del eucalipto blanco a la Península Ibérica se produjo a mediados del siglo diecinueve, aunque su verdadera expansión se produce tras el descubrimiento de que su madera constituye una materia prima óptima para la elaboración de pasta de papel.

En 1923 la compañía portuguesa CAIMA emplea por primera vez en el mundo madera de *E. Globulus* en la elaboración de pasta de papel al bisulfito y en 1957 la empresa PORTUCEL inicia la producción de pasta de papel al sulfato. En España, ambas iniciativas son seguidas por las empresas SNIACE y ENCE y supusieron un enorme desarrollo de las plantaciones de eucalipto orientadas a la producción de fibra para elaborar pasta de papel.

Los datos más recientes sobre la situación de las masas forestales de eucalipto aparecen recogidos para Galicia en el Tercer Inventario Forestal Nacional del año 1998 (IFN-III) y en Portugal en la 3ª revisión del Inventario Forestal Nacional (III -IFN) del año 1999.

Según estas fuentes, el conjunto de la superficie dedicada al eucalipto en Galicia (383.000 ha) y Portugal (676.000 ha) ocupa un total de 1.060.00 hectáreas y constituye la principal área mundial de plantaciones de *E. globulus*.

En paralelo al auge de las plantaciones de eucaliptos, varios países están planteando la viabilidad de diversificar las aplicaciones de elevado valor de sus eucaliptares. Entre las investigaciones realizadas sobresalen varios proyectos desarrollados por la división forestal del Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), cuyas conclusiones subrayan que un número importante de plantaciones de eucaliptos de crecimiento rápido con turnos de entre 20 y 25 años de edad pueden tener un considerable potencial para obtener productos de elevado valor añadido.

España no es ajena a estas iniciativas, surgiendo en los últimos años nuevos productos de eucalipto blanco como el tablero de fibras de densidad media producido por el grupo FINSA o el inicio de la fabricación de

perfiles laminados para carpintería por la empresa LAMINADOS VILLAPOL. Por su parte, el Grupo ENCE ultima la puesta en marcha de un aserradero y de una fábrica de tablero contrachapado de eucalipto en España así como varias iniciativas destinadas a diversificar su patrimonio forestal en Uruguay.

Existen muchos ejemplos que indican que asistimos a la gestión de un importante cambio forestal en torno a las nuevas posibilidades que puedan ofrecer las plantaciones del género *Eucalyptus* y en el ámbito mundial los propietarios de eucaliptos se preguntan por la posibilidad de encontrar nuevos mercados para su recurso forestal.

En el caso del eucalipto blanco el mayor problema encontrado para procesar árboles jóvenes es la aparición de importantes fendas de testa en las trozas así como deformaciones posteriores en la madera aserrada, ambas ocasionadas por las elevadas tensiones de crecimiento.

Aunque la presencia de tensiones de crecimiento se considera una característica de numerosas especies

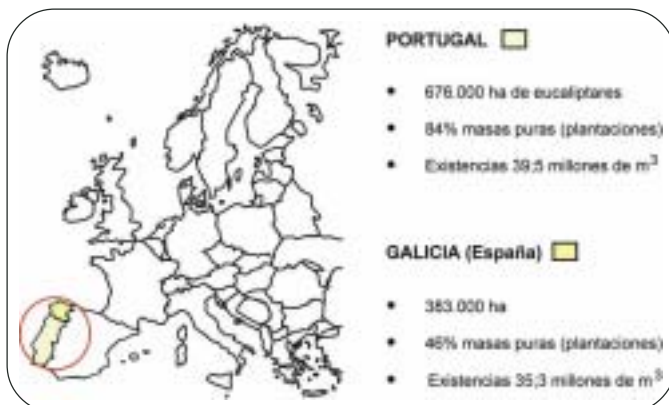
de eucalipto, los valores presentes en las masas de *Eucalyptus globulus* del Sur de Europa son anormalmente elevados tanto por las características de la propia especie como por sus excepcionales condiciones de crecimiento.

Esta realidad limita las aplicaciones de elevado valor de la madera maciza de los eucaliptares europeos.

En Galicia y aunque el eucalipto se ha convertido en la principal especie forestal por volumen de cortas, tan sólo representa un 8% del total de madera aserrada producida por la industria. De esta producción, las tres cuartas partes tiene como destino la fabricación de tablilla para palet y/o cuadradillo para mangos de herramienta, de semielaborados de escaso valor añadido y que son expedidos en verde o bien oreados en patio.

Esta situación coincide con las conclusiones recogidas en un reciente informe sobre aplicaciones de elevado valor añadido de eucaliptos (Flynn, Shield, 1999), en el que los autores concluyen que es prácticamente imposible encontrar un aserradero de eucalipto empleando la mejor tecnología disponible. En cualquier lugar del mundo, el aserrado de eucaliptos continúa dependiendo de tecnologías tradicionales y lentas que conllevan una elevada manipulación de la madera y unos elevados costes productivos.

Lo anterior surge como consecuencia de minimizar el hecho de que debido a características propias del género *Eucalyptus*, como sus elevadas tensiones de crecimiento, su aserrado requiere un diseño y unas características absolutamente particulares.



Por estos motivos, el CIS-Madera planteó un Proyecto CRAFT de Investigación Cooperativa con el objetivo principal de definir tecnologías de aserrado adecuadas para procesar eucaliptos blancos con tensiones de crecimiento.

El Proyecto se organizó en torno a un grupo empresarial formado por un núcleo de aserraderos de Galicia (Parquets Lorenzo, Maderas Betanzos y Hermanos Sánchez Pena) y de Portugal (Sardinha & Leite) con más de un siglo de experiencia conjunta en el aserrado de eucaliptos. Este grupo se completó con un socio tecnológico, la empresa alemana de fabricación de maquinaria de aserrado de alta tecnología Möhringer GmbH.

Esta estructura se complementó con la participación de dos Centros Tecnológicos; el CIRAD-Forêt de Francia y el CIS-Madera de España. El CIRAD-Forêt está considerado una referencia mundial en el estudio de maderas tropicales y ha participado en proyectos relacionados con eucaliptos en varios países. Por su parte el CIS-Madera también ha desarrollado varios proyectos en torno al eucalipto y está emplazado en Galicia por lo que posee un buen conocimiento sobre el estado de la tecnología y la problemática que plantea la transformación de la madera de eucalipto en Europa.

Para intentar garantizar la consecución de resultados el proyecto requería abordar el aserrado de eucaliptos desde una perspectiva global. Por ello se plantearon tareas complementarias a las específicas de aserrado como la selección de parcelas de eucalipto creciendo bajo distintas condiciones silvícolas, la medida de las tensiones de crecimiento en los árboles en pie o la caracterización de las principales propiedades físicas y mecánicas de la madera de eucalipto.

El Proyecto se inició en enero del año 1999 y culminó en junio del año 2001, realizándose un total de 20 experiencias industriales empleando distintas tecnologías de aserrado. A lo largo de estas experiencias se ha profundizado en el conocimiento de las deformaciones que tienen lugar durante el aserrado de eucaliptos con elevadas tensiones de crecimiento, lo que ha hecho posible plantear estrategias que minimizan su impacto.

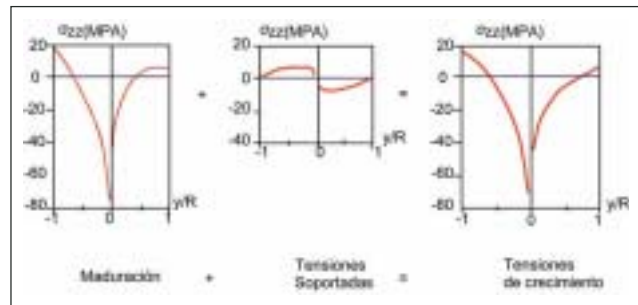
En este artículo se resumen las principales conclusiones del Proyecto que, en suma, confirman las expectativas iniciales que llevaron a plantearlo y constituyen un importante paso inicial en torno a una posible estrategia forestal para diversificar las aplicaciones de los eucaliptares europeos.

ORIGEN DE LAS TENSIONES DE CRECIMIENTO

El término tensiones de crecimiento («growth stresses») se propuso en la década de los años 40 para definir las tensiones existentes en el interior de la madera de los árboles en pie (Jacobs, 1939).

En realidad dicho término engloba dos grupos de tensiones de distinto origen que coexisten en el interior de cualquier árbol produciendo un autoequilibrio a lo largo de su crecimiento. Uno de ellos («support stresses») tiene un carácter intuitivo y está producido por las car-

gas debidas al peso propio del árbol, el otro («maturation stresses») está originado por las tensiones inherentes a un complicado proceso de maduración de las fibras que constituyen la madera.



Es frecuente considerar que las tensiones debidas al peso propio son despreciables frente a las originadas por el proceso de maduración celular y utilizar el término «tensiones de crecimiento» para referirnos exclusivamente a estas últimas. Esta será la nomenclatura utilizada en este artículo.

Especies tan habituales en el comercio como el haya (*Fagus sylvatica*) o la limba (*Terminalia superba*) tienen elevadas tensiones de crecimiento. En el género *Eucalyptus* son frecuentes las especies con tensiones de crecimiento elevadas, como *E. grandis*, *E. globulus*, *E. regnans*, *E. saligna*, etc.

Las causas que provocan las tensiones de crecimiento aparecen ligadas a la actividad del cambium que es el tejido responsable del crecimiento del árbol. Cada año, el cambium produce un nuevo anillo de xilema (madera de albura) hacia el interior del tronco y de corteza interna o líber, por la que circula la savia elaborada, hacia el exterior.

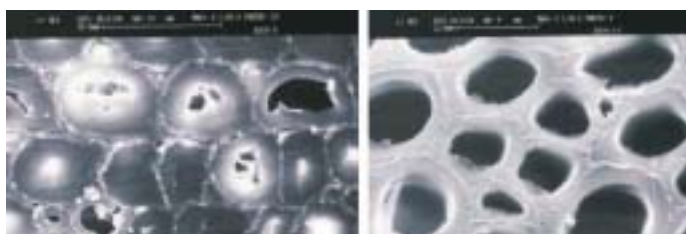


Las tensiones de crecimiento tienen su origen en el crecimiento de las células que produce el cambium y que durante su proceso de envejecimiento tienden a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente, lo que al ser impedido por las células formadas en años anteriores, genera un conjunto de tensiones.

Los mayores cambios estructurales tienen lugar en la pared secundaria de las células durante un proceso de maduración, en el que, las nuevas células con paredes delgadas a base de celulosa no muy cristalina, se transforman en células con paredes gruesas, rígidas y lignificadas (Fournier, 1990).

Las células de la madera de árboles con tensiones de crecimiento elevadas poseen características propias, como una longitud de sus fibras y vasos y un espesor de la pared celular superior a la de aquellos árboles con tensiones inferiores (Malan, 1979). De la misma forma a mayores tensiones, disminuye el porcentaje de lignina de la madera y mayor es la contracción volumétrica y el módulo de elasticidad (Gerard, 1994).

Fotografías realizadas al microscopio electrónico permiten visualizar este proceso de maduración celular en las fibras de los eucaliptos. La fotografía de la izquierda muestra fibras “jóvenes” con paredes celulares poco lignificadas y sometidas a esfuerzos de tensión que las han deformado reduciendo su diámetro e incrementando su longitud. La fotografía de la derecha muestra fibras “maduras”, lignificadas y sometidas a esfuerzos de compresión. Ambas fotografías han sido realizadas en muestras pertenecientes a una misma rodaja de madera de E. Globulus separadas entre sí unos 20 cms.



Con el paso de los años y como consecuencia de la acumulación de los sucesivos esfuerzos generados anualmente, en el árbol en pie el centro del tronco está sometido a tensiones de compresión cuya magnitud aumenta a medida que nos aproximamos a la médula, mientras que la periferia del tronco se encuentra sometida a esfuerzos de tracción que se incrementan en dirección a la corteza.

Además, la magnitud de las tensiones de crecimiento es muy diferente en la dirección que se considere. Así, en dirección axial es del orden de diez veces más grande que en dirección transversal y dentro de esta última, mayor en la dirección tangencial que en la radial (Vignote et al., 1996).

SILVICULTURA Y TENSIONES DE CRECIMIENTO

Todavía es muy escaso el conocimiento respecto a las posibles relaciones existentes entre silvicultura y tensiones de crecimiento.

Para algunos autores las evidencias disponibles sugieren que las técnicas silvícolas no parecen ser efectivas en el control de los niveles de tensiones de crecimiento (Malan, 1988). Sin embargo y aunque no ha podido demostrarse de forma científica, otros autores consideran que podría minimizarse el nivel de tensiones de crecimiento si se mantuviesen las condiciones de crecimiento y la distribución espacial de los árboles lo más uniforme posible a lo largo de su vida (Kubler, 1988).

Los estudios realizados hasta la fecha, tampoco han permitido definir unos elementos morfológicos claros del árbol que permitan prever los valores de sus tensiones de crecimiento, aunque si ha sido posible establecer ciertas relaciones entre el valor de dichas tensiones y parámetros como la edad del árbol, su diámetro, esbeltez, etc.

Dentro de todos estos factores el parámetro más significativo es el de la edad y tanto los resultados de los proyectos realizados con eucaliptos gallegos como los desarrollados en China o el Congo (Gerard, 1990), permiten constatar que mientras que la distribución de las tensiones de crecimiento en parcelas de árboles jóvenes no son significativamente diferentes entre sí, existe una determinada edad, a partir de la cual es observable un descenso en los valores de estas tensiones.

Esta conclusión parece ligada al propio fenómeno que produce las tensiones de crecimiento; es decir, la relajación de la actividad cambial como consecuencia de que el árbol va alcanzando sucesivos estados de madurez. En el caso de los eucaliptares gallegos esta disminución parece iniciarse en torno a los 25-30 años, en parte debido a sus excepcionales condiciones de crecimiento, mientras que en estaciones de calidad inferior es posible percibir dicha disminución a edades próximas a los 12-15 años (Vignote et al, 1996).

En el marco de este Proyecto CRAFT uno de los objetivos previstos era tratar de establecer relaciones entre los valores de las tensiones medidas en los árboles en pie y parámetros como la edad o densidad de plantación. Para ello se seleccionaron 6 parcelas de eucaliptos en Galicia en torno a los 25-35 años de edad y creciendo bajo distintas condiciones silvícolas.

En cada una de las parcelas se marcaron varios árboles que fueron cortados posteriormente para realizar las experiencias de aserrado. A cada uno de estos árboles se les midió sus tensiones de crecimiento en pie mediante un extensómetro diseñado por el CIRAD-Forêt.

La tabla adjunta presenta las principales características de las parcelas seleccionadas.

Parcela	Edad	Tensiones de crecimiento		Número de árboles	Diámetro Normal		Comentarios
		X	s		X	s	
1	38	78	28	11	48,8	68	Densidad inicial de 1.890-2.900 árboles/ha. Posteriormente se realizaron tres cortes a los 5, 12 y 23 años hasta obtener una densidad final en pie a los 500-600 árboles/ha.
2	33	92	48	15	51,9	78	Los árboles han sido seleccionados de forma regular dentro de esta amplia parcela. Las condiciones de crecimiento pueden considerarse homogéneas, pero los árboles de la parcela 2 son los más jóvenes y están a una altura inferior que los de la parcela 3.
3	38	78	34	15	51,5	63	
4	27	129	51	18	37,5	34	Densidad inicial de 2.562,5 m. A los 18 años se cortó una de cada dos filas.
5	35	96	55	20	52,2	132	Árboles plantados con una elevada densidad inicial (1.900-2.000 árboles/ha) y en ningún tratamiento silvícola posterior.
6	23	140	67	18	48,3	81	Árboles plantados con un marco de plantación de 3,5x3,5 m, en un antiguo suelo agrícola muy fértil.

Los eucaliptos de la parcela 6 tenían 23 años en el momento de su corta y han sido plantados con un marco de plantación de 3,5x3,5 m. Tanto el valor medio de su distribución de tensiones (\bar{x} = 140 μ m) como su desviación típica (σ = 67) son los más elevadas de entre todas las parcelas estudiadas.

Medida de las Tensiones de Crecimiento

El método utilizado para medir las tensiones de crecimiento es un extensómetro diseñado por el CIRAD-Forêt, que permite evaluar las tensiones perimetrales del árbol en su dirección axial.

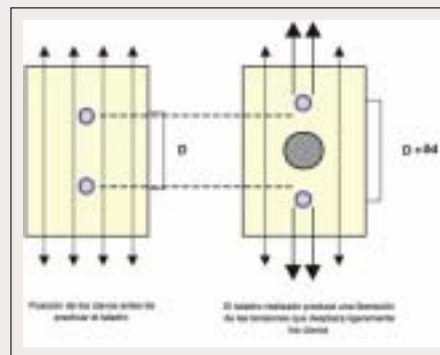
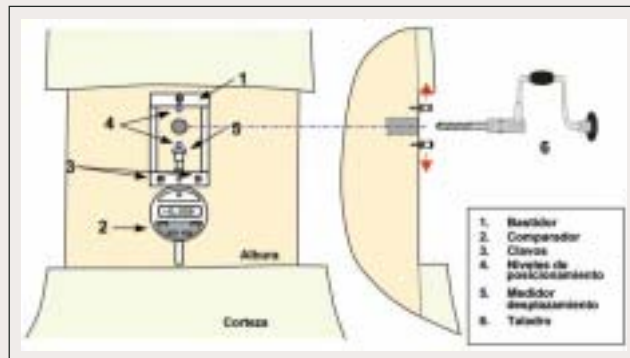
En esencia el equipo está formado por una estructura metálica (1), en la cual se coloca un comparador digital. Además de esta estructura se utiliza un molde con dos orificios que permiten situar dos clavos a una distancia fija uno del otro (4). El molde dispone de un tornillo a la mitad de la distancia entre los agujeros que se utiliza para marcar dicho punto en el árbol.

Las medidas de las tensiones de crecimiento se realizan sobre el cambium, para lo cual es necesario descortezar el árbol hasta alcanzar dicho tejido. El área descortezada tiene una altura de unos 30 cm. y suele realizarse a una distancia de 1.2-1.3 m. de la base del árbol para facilitar el trabajo. El valor de las tensiones se determina a través de una serie de medidas sobre el perímetro descortezado, recomendándose 8 para obtener una información completa de su distribución.

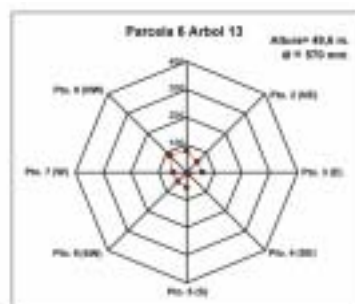
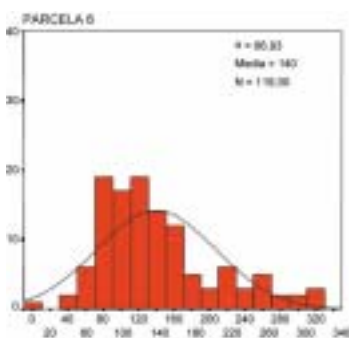
Para realizar cada una de las mediciones se sitúa el molde en posición paralela a la fibra del árbol y se introducen los dos clavos en la madera, marcando el punto medio entre ellos. A continuación se coloca la estructura metálica apoyándola sobre el clavo superior y se apoya el palpador del comparador digital en el clavo inferior (5), poniendo a cero su marcador.

Por último y con la ayuda de una broca (6) se practica un taladro de 20 mm de diámetro en el punto medio entre los clavos.

Este orificio permite liberar las tensiones de crecimiento de las fibras perimetrales, originando un desplazamiento que separa ligeramente los clavos entre sí. El desplazamiento es medido en micras por el comparador de precisión que se estabiliza en un valor proporcional a las tensiones existentes en el interior del árbol.



Es un hecho conocido que la distribución de los valores de las tensiones de crecimiento dentro de un grupo de eucaliptos en una misma parcela no es simétrica, sino que suele presentar una mayor o menor asimetría asociada a la presencia local de valores anormalmente elevados de tensión.



Estos valores puntuales suelen estar relacionados con la presencia de madera de reacción (madera de tensión en las frondosas) en un área concreta del tronco y pueden considerarse un indicador de competencia entre árboles para conseguir una posición privilegiada dentro de la parcela.

A menudo, la formación de la madera de tensión está asociada a una estrategia para mantener un equilibrio estructural en situaciones particulares como una elevada pendiente, la presencia de vientos dominantes, la reorientación de la copa, etc.

En la parcela 6 el terreno es prácticamente llano y los eucaliptos están equidistantes entre sí una distan-

cia de 3,5 m. Este espaciamiento entre árboles, unidos a su juventud y la extraordinaria calidad de la estación han debido de propiciar unas condiciones idóneas para ascender en altura desarrollando elevados valores medios de tensiones de crecimiento.

La distribución diamétrica es la más regular de entre todas las parcelas estudiadas indicando que todavía no se han desarrollado grandes diferencias entre árboles. Sin embargo si han comenzado a manifestarse fenómenos de tangencia de copas y los valores locales de madera de tensión parecen asociarse con estrategias de reorientación de las copas en busca de una posición privilegiada.

Es significativo que el árbol dominante de la parcela, un coloso de 50 metros de altura y 57 cm de diámetro, presente una distribución de tensiones reducida y equilibrada a pesar de su corta edad.

Esta situación se repetirá con los árboles dominantes de las otras parcelas que pueden extender sus copas de forma homogénea. Es decir, carecen de grandes estímulos para ascender en altura y/o reorientarse en una dirección concreta por lo que pueden permitirse su nivel de tensiones.

Los resultados obtenidos al comparar las parcelas 1 y 4 permiten profundizar en la posible relación entre silvicultura y tensiones de crecimiento.

Los árboles de la parcela 1 fueron plantados en el año 1969 con una densidad inicial de 1.800-2.000 árboles/ha y sin un marco de plantación definido. Posteriormente se cortaron algunos árboles a los 5, 12 y 23

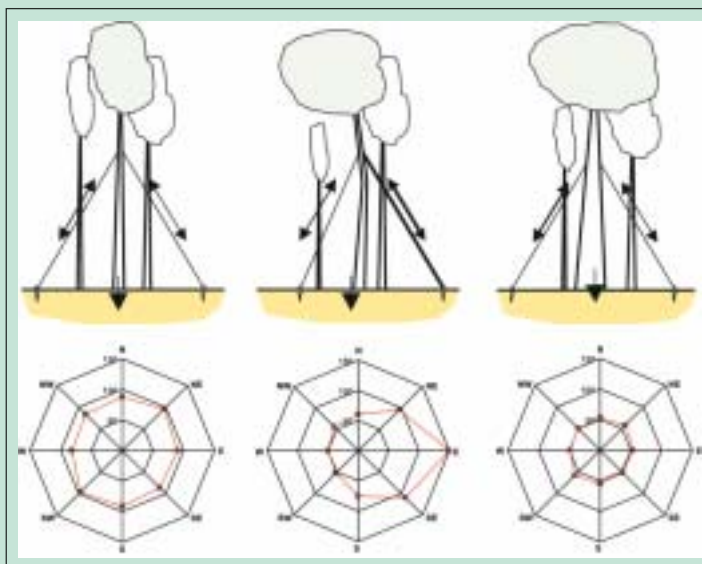
Silvicultura y tensiones de crecimiento

Aunque en el género *Eucalyptus* es difícil obtener conclusiones de carácter general, parece posible interpretar el desarrollo de las tensiones de crecimiento como una estrategia por parte de los árboles para poder competir de forma ventajosa por una posición privilegiada.

Una primera forma de competencia en una especie intolerante como el *E. Globulus* es el desarrollo de un rápido ascenso en altura en busca de luz, propio de árboles jóvenes y esbeltos creciendo bajo condiciones de elevada densidad. Estos árboles suelen presentar una distribución de tensiones equilibrada aunque con un elevado valor medio y bajo condiciones silvícolas similares es habitual que los árboles más jóvenes desarrollen mayores valores de tensiones.

Otra forma de competencia es el desarrollo de estrategias de reorientación en las que los árboles presentan una distribución de tensiones desequilibrada debido a la existencia de elevados valores locales de tensión. Esta estrategia permite al árbol autoequilibrarse en aquellas situaciones que exigen desarrollar esfuerzos en una dirección concreta.

Ambos tipos de competencia están influidos por la silvicultura, confirmando la hipótesis sugerida por Kubler, en el sentido de que es posible minimizar el nivel de tensiones al mantener las condiciones de creci-



miento y la distribución espacial de los árboles lo más uniforme posible a lo largo de su vida. En esencia limitar la aparición de estímulos que supongan, por parte del árbol, un incentivo para competir.

Lógicamente, la silvicultura también puede ejercer el efecto contrario durante mucho tiempo y se confirma la presencia de elevados valores de tensión en eucaliptos de hasta 35 años creciendo en parcelas orientadas a la producción de fibra y por lo tanto con una elevada densidad.

En la Península Ibérica los tratamientos silvícolas de las plantaciones de eucalipto se han orientado con el criterio de la producción de fibra. Como recomendaciones de carácter general, suele recomendarse plantar entre 1.100 y 1.600 plantas por hectárea y emplear turnos entre los 12 y 15 años en función de la calidad de la estación.

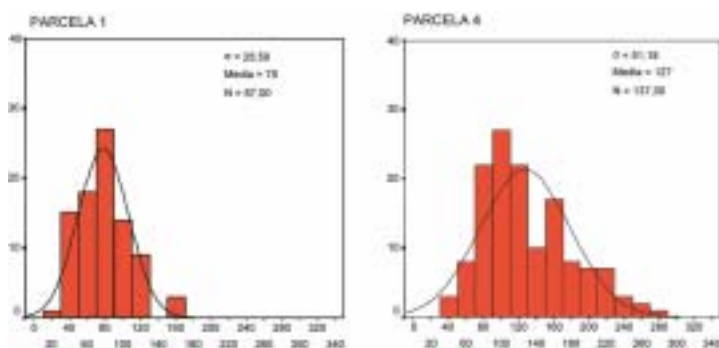
Tanto la elevada densidad de las plantaciones como la reducida edad de corta son dos factores que generan elevadas tensiones de crecimiento y, en la práctica, limitan la posible diversificación de las aplicaciones de la madera de eucalipto procedente de plantaciones.

Por ello, la conclusión más importante es la posibilidad de desarrollar una nueva silvicultura para los eucaliptares europeos tratados a monte alto y que intente compatibilizar los intereses de las industrias consumidoras de fibra y aquellas que necesitan madera maciza.

años hasta alcanzar una densidad final de 600 árboles/ha. Estas cortas intermedias fueron realizadas de forma cuidadosa para que los árboles remanentes quedasen espaciados y en una posición favorable.

Los árboles de la parcela 4 fueron plantados en el año 1972 empleando un marco de plantación de 2,5 x 2,5 metros. Transcurridos 20 años se cortó una de cada dos filas hasta obtener una densidad teórica de 800 árboles/ha que en realidad fue de 600 árboles/ha debido al derribo de árboles adicionales.

A pesar de tener edades similares y la misma densidad final (600 árboles/ha), la distribución de las tensiones de crecimiento es muy diferente. Los árboles de la parcela 4 tienen un valor medio de tensiones más elevado ($\bar{X}=127$ frente a $78 \mu\text{m}$) pero, sobre todo, una mayor asimetría ($\sigma = 54,17$ a $\sigma = 28,59$) asociada a la presencia de elevados valores locales de tensión.



En la parcela 4, la corta de una de cada dos filas provocó que los árboles remanentes dispusiesen de nuevos estímulos de crecimiento al suprimirse la competencia con los árboles de las filas paralelas pero, al mismo tiempo, estos estímulos debieron incrementar la competencia con los árboles situados en sus mismas filas. Es decir, surgió una nueva oportunidad de crecimiento pero que exigía reorientaciones asociadas a elevados valores locales de tensiones.

En el caso de la parcela 1, las cortas intermedias permitieron que los árboles remanentes quedasen espaciados y, por lo tanto, en una posición privilegiada en la que podían expandir sus copas de forma equilibrada y sin necesidad de reorientarse. Es la parcela que cuenta con unos valores medios de tensiones de crecimiento más reducidos y equilibrados.

En cuanto a la posible relación entre la disminución de los valores de las tensiones de crecimiento con la edad, existe un primer concepto intuitivo según el cual no tendrá las mismas facilidades para competir un eucalipto «joven» que otro de mayor edad.

Esta hipótesis se confirma al estudiar las parcelas 2 y 3, en realidad subparcelas pertenecientes a una gran parcela principal. En este caso, tanto el espaciamiento como las condiciones silvícolas son idénticas y existe una clara reducción del nivel de tensiones en los eucaliptos de 35 años de edad sobre los de 32 años.

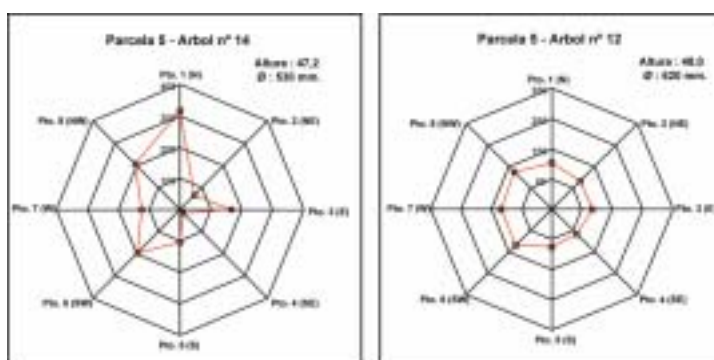
Sin embargo, los eucaliptos de la parcela 5 tienen una edad de 35 años y presentan una distribución de tensiones de crecimiento anormalmente elevada y desequilibrada ($\bar{X} = 96 \mu\text{m} / \sigma = 55$).

La parcela 5 fue plantada con una elevada densidad (1.900-2.000 árboles/ha) y no recibió ningún tratamiento silvícola posterior. Con el paso de los años se desarrolló una fuerte competencia entre árboles a consecuencia de la cual es posible encontrar dentro de la parcela estratos de eucaliptos dominados, semidominados y dominantes.

Por un lado, existen árboles claramente dominados y que parecen haber renunciado a sus posibilidades de crecimiento. Con una edad de 35 años y sin acceso a la luz este grupo de árboles presenta una baja distribución de tensiones de crecimiento.

De nuevo, el árbol dominante de la parcela 5 tiene una distribución de tensiones reducida y equilibrada. En este caso se trata del árbol referenciado como 12 y que con una altura de 48 m y 62 cm de diámetro normal ocupa una posición privilegiada que le permite dominar a los árboles que le rodean y que podrían actuar como competidores directos. En estas condiciones ha podido desarrollar su copa, incrementar su diámetro y reducir sus tensiones.

Sin embargo, existe otro grupo de árboles (ver árbol 14) dentro de la parcela que ocupan una posición codominante y que pese a su edad continúan compitiendo entre ellos, tratando de reorientarse para poder alcanzar una posición más privilegiada. En este caso la elevada densidad de la parcela continúa provocando fenómenos de competencia entre algunos árboles que se traduce en una distribución de sus tensiones de crecimiento elevada y desequilibrada a pesar de su edad.



Con la prudencia que debe acompañar siempre al género *Eucalyptus* los resultados del Proyecto CRAFT permiten interpretar el desarrollo de las tensiones de crecimiento como una estrategia por parte de los árboles para poder competir de forma ventajosa por una posición privilegiada.

Una primera forma de competencia en una especie intolerante como el *E. Globulus* es el desarrollo de un rápido ascenso en altura en busca de luz, propio de árboles jóvenes y esbeltos creciendo bajo condiciones de elevada densidad. Estos árboles suelen presentar una distribución de tensiones equilibrada aunque con un ele-

vado valor medio y bajo condiciones silvícolas similares es habitual que los árboles más jóvenes desarrollen mayores valores de tensiones.

Otra forma de competencia es el desarrollo de estrategias de reorientación en la que los árboles presentan una distribución de tensiones desequilibrada debido a la existencia de elevados valores locales de tensión. Esta estrategia permite al árbol autoequilibrarse en aquellas situaciones que exigen desarrollar esfuerzos en una dirección concreta.

Ambos tipos de competencia están influidos por la silvicultura, confirmando la hipótesis sugerida por Kubler, en el sentido de que es posible minimizar el nivel de tensiones al mantener las condiciones de crecimiento y la distribución espacial de los árboles lo más uniforme posible a lo largo de su vida. En esencia limitar la aparición de estímulos que supongan, por parte del árbol, un incentivo para competir.

Lógicamente, la silvicultura también puede ejercer el efecto contrario durante mucho tiempo y se confirma la presencia de elevados valores de tensión en eucaliptos de hasta 35 años creciendo en parcelas orientadas a la producción de fibra y, por lo tanto, con una elevada densidad.

Tanto la elevada densidad de las plantaciones como la reducida edad de corta son dos factores que generan elevadas tensiones de crecimiento y, en la práctica, limitan la posible diversificación de las aplicaciones de la madera maciza de eucalipto procedente de plantaciones.

En Galicia, buena parte de la industria transformadora de madera maciza de eucalipto subsiste, principalmente, gracias al aprovechamiento de los árboles presentes en las masas mixtas, especialmente con *Pinus pinaster*. En estas masas es habitual que los pies de eucalipto actúen como árboles dominantes lo que les permite extender sus copas y disminuir y equilibrar su nivel de tensiones internas.

La principal limitación de este tipo de árboles es que, a menudo, presentan un elevado índice de ramas que incrementa la presencia de nudos en la madera aserrada.

En estos momentos, entre Galicia y Portugal las existencias de madera de eucalipto en pie superan los ochenta millones de metros cúbicos con corteza. Si en el futuro, se plantease diversificar las aplicaciones de elevado valor de estos eucaliptares no bastaría con aumentar el turno de corta sino que sería necesario desarrollar cortas intermedias que permitan reducir la competencia entre árboles y, por lo tanto, su nivel de tensiones.

Por ello, la conclusión más importante es la posibilidad de desarrollar una nueva silvicultura para los eucaliptares europeos tratados a monte alto y que intente compatibilizar los intereses de las industrias consumidoras de fibra y aquellas que necesitan madera maciza.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS TENSIONES DE CRECIMIENTO. LAS FENDAS

En el instante de la corta y tronzado del árbol y a lo largo de las operaciones de aserrado posteriores, las tensiones que inicialmente se encontraban equilibradas durante su crecimiento se liberan de forma repentina. Cuando la magnitud de estas tensiones es elevada, su liberación genera un conjunto de deformaciones que provocan distintos efectos según se localicen en el extremo de las trozas o bien en los productos ya aserrados.

El defecto más común que se observa en los troncos de eucalipto con tensiones de crecimiento elevadas es la aparición de importantes fendas en los extremos de las trozas.

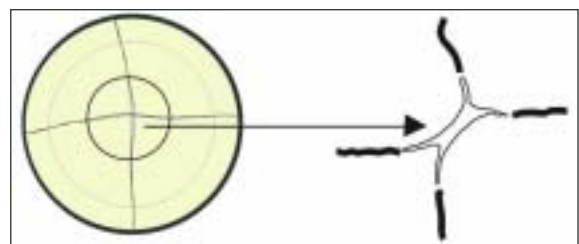
La explicación de este fenómeno radica en que el corte de las trozas produce una redistribución y transformación de las tensiones longitudinales en tensiones transversales al tronco. La zona periférica de tensión que esta debajo de la corteza ejerce una tracción sobre la cara interna de la zona neutra y, al mismo tiempo, la zona central del árbol que está sometida a compresión se expande y empuja la cara exterior de la zona neutra causando la fenda de testa (*Wilhelmy et al., 1973*).

En el árbol en pie las fibras distribuidas en la periferia del tronco tienen una longitud mayor de lo normal por estar sometidas a esfuerzos de tensión longitudinal. En el momento de la corta y tronzado del árbol se produce una liberación de las tensiones a que están sometidas estas fibras y como consecuencia tienden a acortarse.

De manera análoga, en la zona interior del tronco se encuentran fibras sometidas a esfuerzos de compresión longitudinales y que tenderán a expandirse como consecuencia de cualquier actividad que produzca una liberación de tensiones.

El desarrollo de las fendas se debe a la acumulación del doble efecto producido por el acortamiento de las fibras tensionadas y el alargamiento de las fibras comprimidas en el interior del tronco.

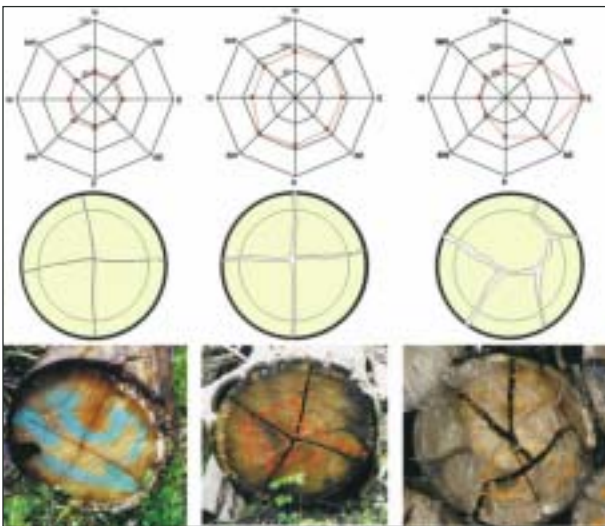
Cuando la distribución de las tensiones de crecimiento es homogénea a lo largo de la circunferencia del tronco, las fendas suelen iniciarse en la médula y extenderse hacia la periferia según un dibujo con forma radial. Este diseño está relacionado con la geometría de la médula del eucalipto que, normalmente, tiene una forma similar a la de un rectángulo con sus cuatro esquinas deformadas, es decir con cuatro «puntos débiles» a partir de los cuales se inicia el desarrollo de las fendas.



La experiencia adquirida durante el proyecto CRAFT indica que, en líneas generales, las medidas de las tensiones de crecimiento en los árboles en pie pueden utilizarse como un indicador de la forma y tamaño de las fendas de testa que se originarán en el momento de su corta y tronzado.

Una distribución homogénea de las tensiones de crecimiento tiende a provocar la aparición de fendas según el diseño radial explicado anteriormente. A su vez, la profundidad y anchura de estas fendas está relacionada con el valor medio de las tensiones medidas con el extensómetro en los árboles en pie.

Cuando la distribución de las tensiones de crecimiento presenta valores elevados en áreas concretas del tronco las fendas no suelen desarrollarse según un patrón radial. En este caso la existencia de esfuerzos concentrados en un área del tronco, es capaz de romper la simetría del desarrollo de fendas a partir de la médula y originar fendas de rotura en sentido tangencial.



Existen otros parámetros que influyen en el desarrollo de las fendas como las características físico mecánicas de la madera, el diámetro de la troza, la presencia de ramas etc.

Un aspecto importante a considerar de cara a reducir la aparición de defectos es dirigir con especial cuidado la caída del árbol en el momento de la corta tratando de evitar los impactos fuertes del árbol contra árboles ya caídos, piedras, etc. dado que estos golpes aumentan tanto la aparición y profundidad de las fendas como su forma irregular (Barnacle, 1972).

Esta afirmación se ha podido confirmar durante el proyecto CRAFT al comprobar en numerosas ocasiones como árboles con tensiones de crecimiento reducidas y equilibradas pero con fuertes impactos en el momento de su caída, desarrollaban fendas de testa superiores a las de árboles con elevados valores de tensiones y caídas controladas.

Durante el aserrado, la liberación de las tensiones de crecimiento ocasionada por los cortes, induce nuevas fendas así como curvaturas de las tablas aserra-

das. Tanto el desarrollo de fendas de testa como las deformaciones que se producen durante el aserrado son habituales en los eucaliptos presentes en Galicia y de hecho son el principal motivo de que a pesar de la buena conformación general de las trozas, su aprovechamiento por las industrias transformadoras de la madera apenas esté desarrollado.

METODOS PARA DISMINUIR LAS TENSIONES DE CRECIMIENTO.

Numerosos investigadores han intentado desarrollar técnicas para amortiguar los defectos asociados a la presencia de tensiones de crecimiento elevadas. En general, éstas técnicas se aplican al árbol una vez abatido y aunque logran en algunos casos una disminución significativa de los defectos, apenas se utilizan en el ámbito industrial debido a sus elevados costes (Touza, M., Pedras, F., 1999).

En lo que respecta a las investigaciones sobre los árboles en pie, se han estudiado distintas formas de disminuir su actividad e incluso de provocar su muerte. Entre estas experiencias destaca la de realizar un anillado, es decir, un descortezado de mayor o menor profundidad que suele provocar la muerte del árbol al cortar el paso de nutrientes aunque en un plazo de tiempo variable en función de muchos condicionantes.

Giordano et al., (1969) realizaron experiencias con eucaliptos rojos (*Eucalyptus camaldulensis*) que permanecieron varios meses anillados en bosques australianos. El anillado de los árboles fue profundo y provocó su muerte permitiendo constatar importantes reducciones de las deformaciones de las tablas aserradas procedentes de árboles anillados al compararlas con las de árboles sin anillar. Sin embargo, la misma técnica aplicada a otras especies no mostró ningún efecto significativo en la reducción de su nivel de tensiones (Giordano y Curró, 1973).

Otros investigadores habían señalado ligeras disminuciones en el nivel de fendas a los dos meses de realizar el anillado (Malan, 1979), aunque la investigación tuvo que ser interrumpida por la degradación sufrida por los árboles y su riesgo de caída.

Nicholson apenas encontró reducciones significativas en el nivel de tensiones tras provocar la muerte de un grupo de eucaliptos que permanecieron nueve meses en pie antes de su corta. Sin embargo, señaló que uno de los árboles anillados y que no llegó a morir mostró una reducción importante de su nivel de tensiones.

En el Proyecto CRAFT uno de los objetivos específicos contempló el estudio de la posible influencia del anillado en la reducción del nivel de tensiones de crecimiento de los árboles en pie.

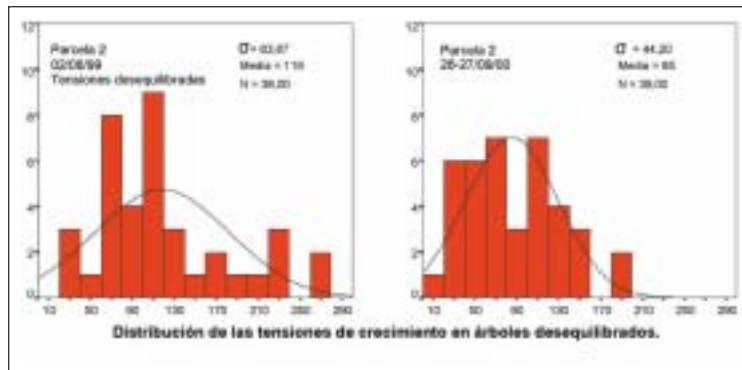
Para ello se decidió “anillar” todos los árboles a los que se les iban a medir sus tensiones de crecimiento, descortezando una sección de unos 30 cm de altura a lo largo de todo su perímetro. El descortezado se realizó de forma cuidadosa y superficial, dejando al descubier-

to el tejido del cambium pero sin infringir daños a la albura. Las tensiones fueron medidas en el momento del descortezado inicial y, posteriormente, a distintos intervalos de tiempo.

En la parcela número 2 se anillaron 8 árboles que permanecieron unos 13 meses en el bosque. Un primer análisis de los datos permite apreciar un importante descenso tanto en el valor medio de las tensiones ($\bar{X} = 104$ frente a $79 \mu\text{m}$) como en su desviación típica ($\sigma = 55$ a $\sigma = 39$).

Un estudio más detallado en el que se analizan de forma independiente los árboles que presentaban inicialmente una distribución de tensiones equilibrada y desequilibrada permite profundizar en este primer resultado.

En la muestra de árboles con una distribución de tensiones desequilibrada ($\bar{X} = 118,3 \mu\text{m} / \sigma = 63,9$) el principal efecto del anillado es producir una importante reducción de los valores locales más elevados, que se traduce también en un descenso de los valores medios de las tensiones de crecimiento. Transcurridos 13 meses, la desviación típica se ha reducido hasta el 69% del valor inicial ($\sigma = 44,2$) y el valor medio de las tensiones de crecimiento se reduce al 72% del valor inicial ($\bar{X} = 85,1 \mu\text{m}$).

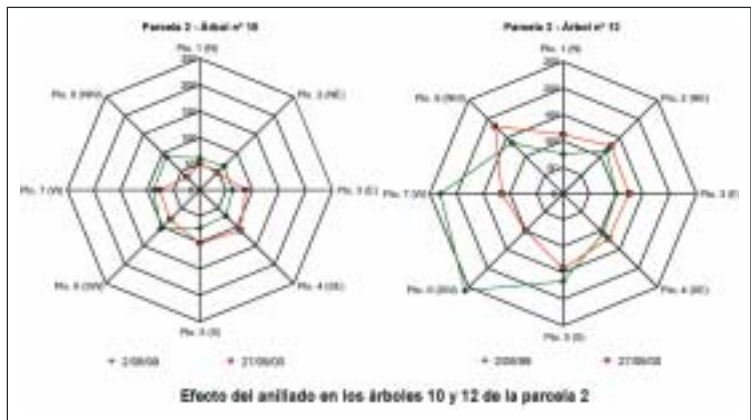


Sin embargo, en la muestra de árboles que inicialmente presentaba una distribución de tensiones equilibrada ($\bar{X} = 80 \mu\text{m} / \sigma = 21,4$) el anillado apenas produce efectos cuantificables. Transcurridos 13 meses, el valor medio ha disminuido hasta el 86% del valor inicial ($\bar{X} = 69 \mu\text{m}$) y la desviación típica se incrementa en un 15% ($\sigma = 24,5$).

Las gráficas adjuntas resumen el efecto del anillado en dos árboles tipo de la parcela 2. El número 10 es representativo de la muestra de árboles con tensiones inicialmente equilibradas y el número 12 de la muestra de árboles con tensiones inicialmente desequilibradas.

En el árbol número 12, el anillado ejerce un claro efecto equilibrador de los dos puntos con mayores tensiones de crecimiento (puntos 6 y 7). A consecuencia de este efecto el valor medio de la distribución de tensiones se reduce y, sobre todo, la nueva distribución se equilibra disminuyendo el valor de su desviación típica.

En el árbol número 10 la situación es completamente diferente. En este caso, el árbol parece limitarse a adaptarse ligeramente al daño infringido por el anillado pero sin grandes alteraciones en el valor medio o la desviación típica de su distribución de tensiones inicial.



En todas las parcelas se ha repetido esta situación, confirmando que el anillado produce una reducción de los valores puntuales más elevados de tensiones de crecimiento equilibrando la nueva distribución de tensiones.

En cuanto al tiempo necesario para que se manifieste esta reducción, los resultados del proyecto indican que es necesario que los árboles permanezcan vivos y en pie durante un periodo de tres meses antes de proceder a su corta.

En eucaliptos a los que se les provocó su muerte y permanecieron once meses en pie antes de su aserrado no se apreció ninguna reducción significativa en su nivel de tensiones, confirmando las observaciones de Nicholson.

El anillado se ha utilizado de forma tradicional en varios países, aunque no nos consta que sus efectos hubiesen sido cuantificados de forma científica. En Galicia solía realizarse a

eucaliptos previamente seleccionados para su destino como madera de carpintería o construcción y es muy probable que buena parte de las estructuras edificadas con eucalipto a inicios del siglo veinte hayan sido elaboradas a partir de árboles previamente anillados.

Los resultados del Proyecto CRAFT han permitido definir el efecto del anillado y agrupar parte de las conclusiones aparentemente contradictorias obtenidas en investigaciones anteriores. La fórmula ha sido trabajar con un mapa de la distribución de tensiones (8 puntos) de cada uno de los árboles, método laborioso pero que permite interpretar los resultados desde varias perspectivas.

Una de las limitaciones previas para aplicar este método era el riesgo de producir la muerte del árbol en pie y el consiguiente peligro de su caída. En todos los casos, los árboles anillados han seguido vivos durante un periodo de tiempo mínimo de un año y medio y desarrollando rebrotes para recuperarse de la herida infringida.

Parece claro que la capacidad de los árboles para recuperarse del daño infringido disminuye con la edad y los árboles de las parcelas de Mondoñedo (32 y 25 años) comenzaron a secarse a los 18 meses aproximadamente de haberles practicado el anillado.

Lógicamente, el anillado deja expuesto a la intemperie una porción del tejido del cambium y es posible que si se realiza en los meses más cálidos, coincidiendo con altas temperaturas y/o vientos desecantes, pueda provocar la muerte del árbol con rapidez. Por ello es recomendable considerar que la corta de los árboles se realice en el menor tiempo posible a partir de los tres meses desde su anillado.

En cuanto a la cuantificación económica del anillado, en aquellos árboles con una distribución de tensiones desequilibrada, su efecto logra disminuir el tipo y profundidad de las fendas de testa que se desarrollan en el momento de la corta y tronzado y, por lo tanto, aumentar considerablemente la productividad de los procesos industriales.

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES DE CRECIMIENTO EN EL ÁRBOL

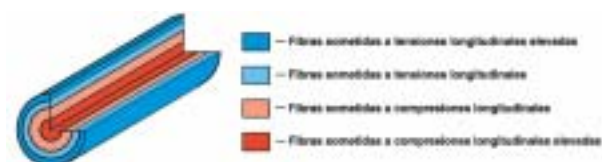
Inicialmente, el planteamiento del Proyecto para estudiar los efectos de la liberación de tensiones durante el aserrado, era seleccionar varias opciones de aserrado y reaserrado y trabajar con trozas procedentes de las parcelas estudiadas.

Durante las experiencias industriales se medirían las fendas y deformaciones presentes en la madera aserrada y se intentaría formular un modelo que relacionase el nivel de tensiones de la madera en pie con las deformaciones existentes en la madera aserrada.

Después de realizar las primeras experiencias, pudo comprobarse que cuantificar esta relación en el ámbito industrial iba a ser extremadamente difícil ya que, entre otros factores, el nivel de fendas desarrolladas estaba influenciado en gran medida por el tipo de despiece y la manipulación que recibiesen los tabloncillos durante su aserrado.

Sin embargo, el conocimiento práctico que se había adquirido sobre las tensiones de crecimiento permitió diseñar un modelo teórico de su distribución a lo largo de la sección de un tronco que permitía interpretar el conjunto de las deformaciones que aparecen durante cualquier opción de aserrado.

Como consecuencia de las tensiones de crecimiento, en un árbol en pie, las fibras de madera distribuidas en la periferia del tronco se encuentran sometidas a esfuerzos de tensión longitudinal (representados en color azul) que aumentan su intensidad hacia el exterior del tronco. Los valores medidos con el extensómetro son un indicador de la magnitud de estos esfuerzos.

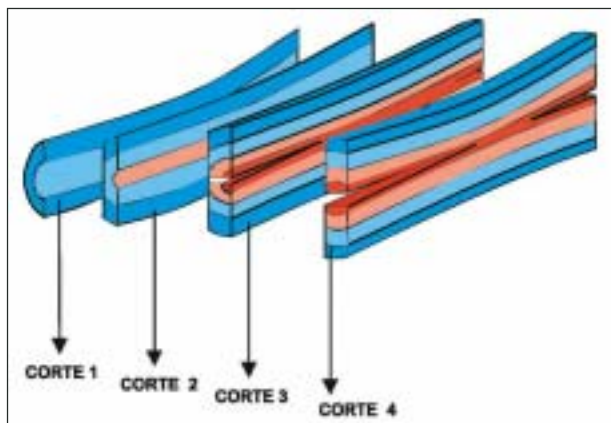


Este conjunto de fibras “jóvenes” sometidas a esfuerzos de tensión en el interior del tronco presenta una longitud mayor de lo normal. En el momento de la corta del árbol, tronzado y posteriores operaciones de aserrado se produce una liberación de las tensiones a que están sometidas estas células y como consecuencia tienden a acortarse.

Debido al mismo efecto, las fibras de madera de la zona interior del tronco se encuentran sometidas a esfuerzos de compresión longitudinales que aumentan su intensidad hacia la médula. Estas células tenderán a expandirse, aumentando su longitud, como consecuencia de cualquier actividad que produzca una liberación de tensiones.

La transición entre las áreas sometidas a tensión y compresión ocurre, aproximadamente, en un área comprendida entre un tercio y un medio de la distancia de la periferia del tronco a la médula.

Como ejemplo, es posible aplicar este modelo teórico para interpretar las deformaciones que se manifiestan durante la liberación de tensiones producida por un aserrado tradicional con sierra de banda y una secuencia de cortes paralelos.



El primer corte tiene lugar por la zona en la que las fibras se encuentran sometidas a los máximos esfuerzos de tensión longitudinal y produce una liberación de estos esfuerzos. Esta liberación conlleva una reducción de la longitud de estas fibras tanto mayor cuanto más nos acercamos a las proximidades del cambium.

El principal efecto que se manifiesta por la liberación de las tensiones de crecimiento durante el aserrado del primer tablón es una curvatura de cara con su concavidad hacia la corteza, indicador de que las fibras que se encuentran en la periferia del tronco se encuentran sometidas a una mayor tensión por lo que tienden a acortarse más.

Las curvaturas de canto son despreciables frente a las de cara porque su resultante se encuentra equilibrada al producirse con magnitud similar y sentidos opuestos con respecto al eje central del tablón.

El segundo corte se produce por una zona en la que las fibras continúan, en su mayor parte, sometidas a esfuerzos de tensión longitudinal salvo la influencia de

una reducida zona de fibras en la parte central del tablón sometidas a esfuerzos de compresión.

La liberación de las tensiones producida por este corte se traduce en una reducción de la longitud de las fibras sometidas a esfuerzos de tensión longitudinal y en un incremento de la longitud de las fibras sometidas a esfuerzos de compresión longitudinal.

Al igual que en el corte anterior, el principal efecto que se manifiesta en la tabla de madera aserrada es una curvatura de cara, con su concavidad hacia la corteza.

El tercer corte se produce por una zona del tronco en la que las fibras están sometidas tanto a esfuerzos de tensión como de compresión longitudinales.

A medida que los cortes se adentran hacia el interior del tronco, el conjunto de las fuerzas que se manifiestan como consecuencia de la liberación de las tensiones de crecimiento se equilibran en torno a los cantos de las piezas por lo que se reducen las curvaturas de cara en la madera aserrada.

En cuanto a las curvaturas de canto, el esfuerzo que se produce en cada sentido se incrementa considerablemente al acumularse el doble efecto producido por el acortamiento de las fibras situadas sobre la periferia del tronco y el alargamiento de las fibras en su parte central. Ambos efectos se superponen creando una resultante que tiende a producir una doble curvatura de canto con sus concavidades hacia el exterior.

Aunque estas fuerzas se encuentran equilibradas respecto al eje central de la tabla, su mayor intensidad genera esfuerzos de tracción perpendicular en el centro de la pieza que a menudo provocan la aparición de fendas.

El cuarto corte se produce por la zona central del tronco y sus efectos son similares a los descritos en el corte anterior. La intensidad de los esfuerzos que generan tracción perpendicular a la fibra se hacen máximos y coinciden con la porción del tronco que posee una menor resistencia frente a este tipo de esfuerzos al incluir tanto la médula como madera juvenil.



En estas condiciones es normal la aparición de importantes fendas en los tablones centrales cuya magnitud va a depender, entre otros factores, de los valores medios de las tensiones de crecimiento, de su gradiente,

de las propiedades de la madera y de la manipulación más o menos cuidadosa que reciba la tabla durante su procesado.

Se exponen a continuación las principales opciones industriales de aserrado y su relación con la aparición de estos defectos.

OPCIONES DE ASERRADO EN GRUPO DE CABEZA

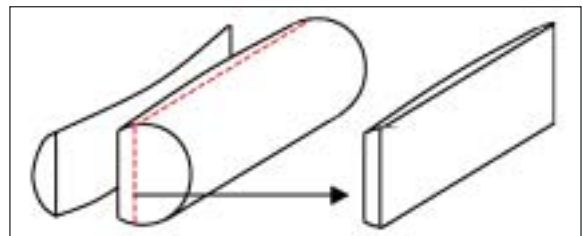
Sierra de cinta y carro portatroncos

Tanto en Galicia como en Portugal la forma más habitual de serrar eucaliptos emplea como grupo de cabeza una sierra de cinta y carro portatroncos con un esquema de aserrado que produce cortes paralelos.

Este esquema se ha utilizado tradicionalmente con madera de coníferas pero al utilizarlo para serrar eucaliptos tienen lugar todo el conjunto de defectos detallados en la secuencia anterior.

Los cortes iniciales producen tablas tangenciales con curvaturas de cara que presentan su concavidad hacia la corteza mientras que la porción de la troza que permanece en el carro suele curvarse ligeramente en sentido opuesto.

Debido a esto, es normal que las primeras tablas aserradas presenten variaciones en su espesor con una sobredimensión característica en la parte central de la tabla. Con maquinaria convencional, el aserrador trata de obtener una nueva referencia dando cortes de enderezamiento que repercuten en la productividad de la instalación.

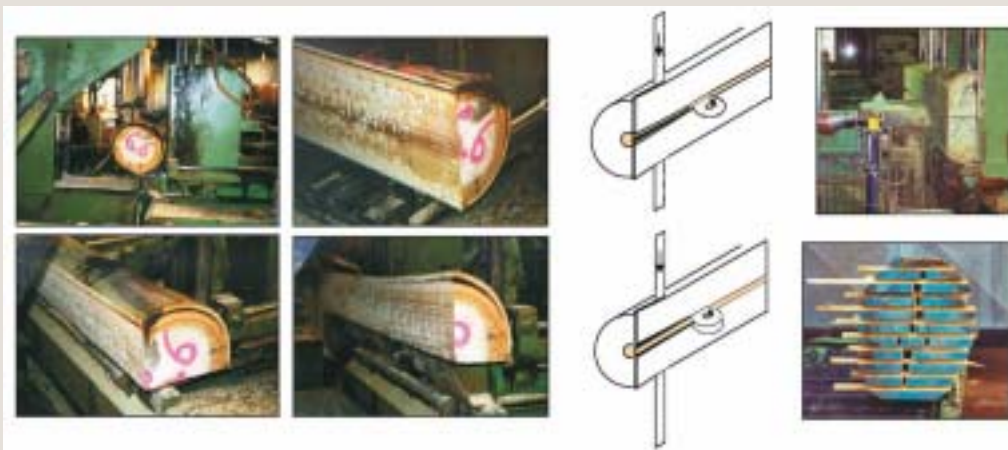


A medida que avanzamos hacia el interior del tronco y predominan los despieces de tipo radial, suelen producirse grandes fendas como consecuencia de la rotura de la madera en las proximidades de la médula por esfuerzos de tracción perpendicular a la fibra.

Estas fendas se producen por desgarro, por lo que suelen tener una anchura importante que aumentará con los impactos y posterior manipulación que reciba la tabla durante el proceso.

Además, las tablas obtenidas mediante este esquema de aserrado mantienen tensiones de crecimiento residuales que se liberaran durante el reaserrado final en forma de nuevas curvaturas de cara o canto según la posición de cada pieza.

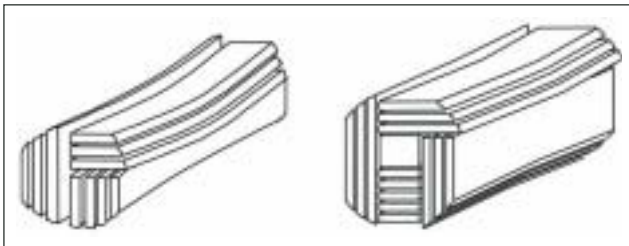
Una de las opciones para evitar el desarrollo de fendas durante el aserrado de eucaliptos con una sierra de banda en grupo de cabeza, consiste en realizar giros que limiten la aparición de esfuerzos de tracción perpendicular en las piezas centrales. Para ello, la recomendación general es no realizar cortes paralelos que se



Ejemplos de corte al centro de la troza e incorporación de sierras circulares para evitar el desarrollo de fendas en el grupo de cabeza.

adentren en la troza una distancia superior a dos tercios de su radio.

Estos esquemas de corte rompen la simetría de los esfuerzos que provocarían tracción perpendicular, sustituyéndolos por una liberación gradual de las tensiones de crecimiento en forma de esfuerzos que producen curvaturas de cara.



Las tablas obtenidas mantienen tensiones de crecimiento residuales que se liberarán durante el reaserrado posterior en forma de nuevas curvaturas de cara y/o canto, según la posición de cada pieza.

Otro esquema que permite evitar el desarrollo de fendas es realizar un corte al medio de la troza que impide la aparición de esfuerzos de tracción perpendicular en los tabloncillos centrales.

El corte central provoca que las dos semitrozas tengan una gran parte de sus tensiones internas liberadas por lo que pueden ser aserradas posteriormente mediante una secuencia de cortes paralelos. Una vez realizados estos cortes tendremos tablas con un predominio de curvaturas de canto que facilita su reaserrado posterior.

Un último ejemplo para evitar el desarrollo de fendas consiste en incorporar a un esquema de cortes paralelos, nuevos cortes realizados de forma simultánea con una o varias sierras circulares horizontales acopladas a la máquina de cinta, siguiendo el eje central del tronco o bien la línea de mayor fenda.

El corte de la sierra circular produce un doble efecto. Por un lado permite crear una «línea» de

referencia a través de la cual se produce una fuerte liberación de tensiones, consiguiendo que las tablas obtenidas no desarrollen nuevas fendas y, además, disminuye las deformaciones durante el reaserrado posterior al haber liberado previamente un porcentaje importante de las tensiones internas de la pieza.

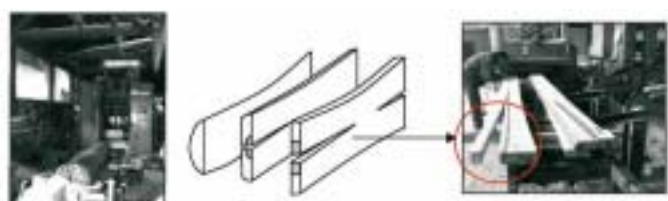
La incorporación de dos sierras circulares puede ser interesante si se dispone, por ejemplo, de una canteadora automática como máquina de reaserrado. En este caso las dos sierras circulares permiten eliminar directamente en el grupo de cabeza la parte central del tronco con defectos (nudos, madera juvenil) facilitando el posterior trabajo de la canteadora.

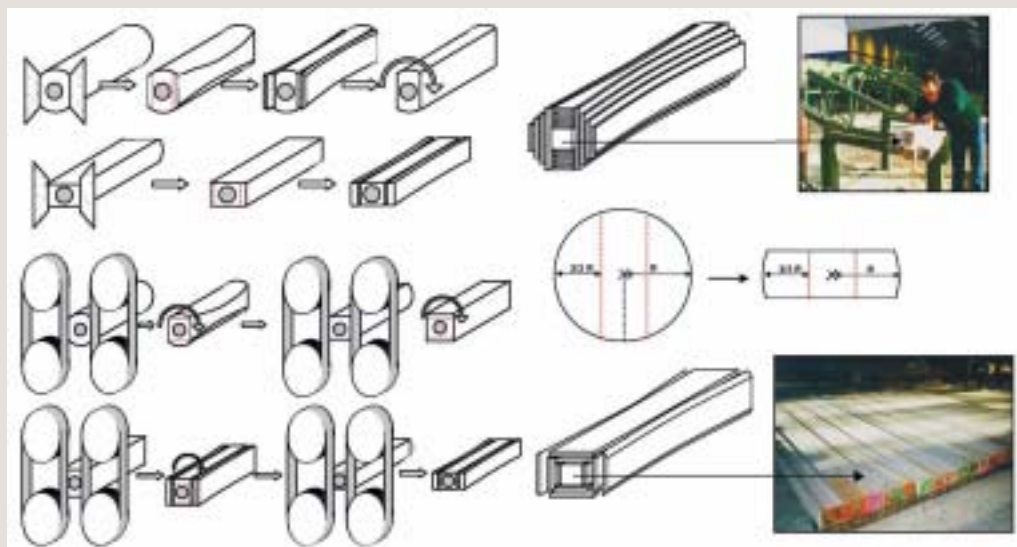
Si en las tablas centrales las dos sierras circulares producen un corte simétrico respecto al eje central del tronco, lograrán eliminar una pieza que contiene la zona de fibras con mayores tensiones de compresión sin producir apenas deformaciones en el resto del despiece.

Sierra alternativa

En relación con la liberación de las tensiones de crecimiento, el aserrado con una máquina alternativa en grupo de cabeza, presenta características similares a las del aserrado paralelo con una sierra de banda

Aunque la sierra alternativa produce los cortes de forma simultánea logrando una mayor exactitud de corte al equilibrar parcialmente la manifestación de curvaturas de cara, no permite evitar la aparición de fendas en los tabloncillos centrales donde se producen los mismos efectos desfavorables que en el aserrado tradicional.





Empleando esquemas de corte como los representados, un grupo de cabeza formado por sierras enfrentadas o por un chipper-canter y circulares, logra producir una liberación de tensiones simétrica y gradual que permite obtener un núcleo central prácticamente sin defectos.

Sistemas de aserrado con cortes dobles y simétricos (sierras enfrentadas y chipper-canter con sierras circulares)

A pesar de las grandes diferencias entre maquinaria, estos dos sistemas de aserrado producen un efecto similar desde el punto de vista de la liberación de tensiones de crecimiento.

Ambos sistemas permiten realizar cortes simétricos que equilibran parcialmente las curvaturas de cara y realizar giros que limitan la aparición de fendas en las piezas centrales. Para evitar la aparición de fendas en las piezas centrales debe cumplirse la recomendación general de que los cortes producidos en cada secuencia no se adentren en la troza una distancia superior a los dos tercios del radio.

El gráfico anexo representa el efecto en la liberación de las tensiones de crecimiento de un esquema de corte empleando un chipper-canter con un grupo de sierras circulares.

Durante la primera pasada, los dos chippers eliminan la parte de fibras más tensionadas mientras las sierras circulares obtienen tablas tangenciales respetando la recomendación de no adentrarse en la troza una distancia superior a los dos tercios del radio (evitando la aparición de fendas en las tablas centrales). Una vez alcanzada esta distancia de seguridad se produce el giro y se repite la secuencia de corte con la intervención de los dos chippers y nuevamente de las sierras circulares.

En el caso de las sierras enfrentadas el efecto es muy similar (ver esquema). El giro de la troza puede producirse después de cada secuencia de corte o bien producir cortes paralelos hasta alcanzar la distancia de seguridad y girar la troza a continuación.

Empleando esquemas de corte como los descritos, ambos sistemas producen una liberación de tensiones simétrica y gradual que permite obtener un núcleo central prácticamente sin defectos como curvaturas o fendas.

Las tablas producidas tienden a desarrollar curvaturas de cara que presentan todavía tensiones residuales internas que se liberarán durante su posterior reaserrado.

REASERRADO

Durante el reaserrado continúan produciéndose nuevas deformaciones como consecuencia de la liberación de las tensiones de crecimiento residuales.

La mayor parte de las deformaciones se producen en forma de curvaturas de cara y/o canto en las piezas finales y su importancia está directamente influenciada por el esquema de corte empleado en el grupo de cabeza.

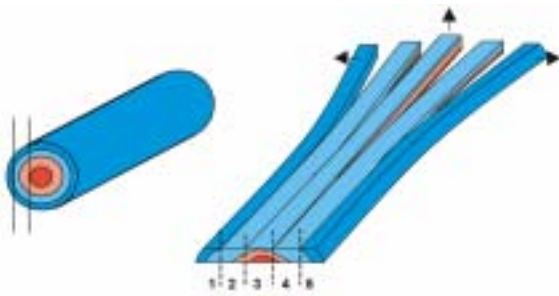
Reaserrado con fuerte liberación de tensiones de crecimiento

Entre las opciones que producen un reaserrado de este tipo nos encontramos con un grupo de cabeza formado por un carro con sierra de banda empleando un esquema de cortes paralelos y una sierra múltiple de circulares para el reaserrado de los tablones.

Al finalizar el reaserrado, las deformaciones presentes en las piezas finales no parecen seguir ninguna distribución racional. Unas tablas han desarrollado fuertes curvaturas de cara mientras otras presentan un predominio de curvaturas de canto y, en todos los casos, los valores varían considerablemente entre unas tablas y otras.

De manera análoga al aserrado en el grupo de cabeza, es posible aplicar el mismo modelo teórico para interpretar las deformaciones que tienen lugar durante las distintas opciones de reaserrado de madera de eucalipto.

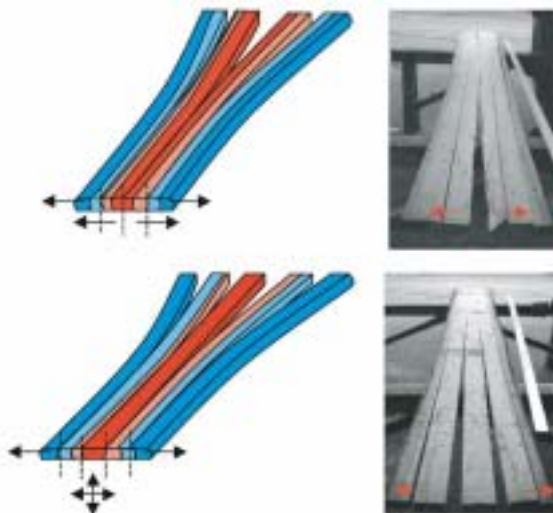
Durante el reaserrado de una tabla tangencial, las piezas más laterales tenderán a desarrollar nuevas curvaturas de canto debido a la asimetría existente respecto al eje de la pieza, con sus cantos formados por las fibras sometidas a los mayores esfuerzos de tensión longitudinal. Durante la liberación de tensiones producida por el reaserrado, estas fibras se acortan produciendo la curvatura de canto de estas tablas con su concavidad hacia el exterior.



En el caso de las piezas centrales con influencia de la zona de fibras comprimidas, la liberación de tensiones tiende a provocar la aparición de curvaturas de cara debido a la acumulación del doble efecto producido por el acortamiento de las fibras sobre la cara superior de la tabla y el alargamiento de las fibras en la cara inferior.

Si la tabla reaserrada tiene un despiece mayoritariamente radial, las piezas laterales tenderán a desarrollar nuevas curvaturas de canto.

A su vez, si el reaserrado produce un número impar de piezas finales, la tabla central (formada por las fibras sometidas a grandes esfuerzos de compresión) suele estar equilibrada por lo que la liberación de estos esfuerzos se produce de forma simétrica, sin una resultante definida y por lo tanto sin producir curvaturas.



Por el contrario, cuando el reaserrado de un tablón tangencial produce un número par de piezas finales, generalmente la pieza central es aserrada a lo largo de la línea de máxima tensión. De esta forma se produce una importante liberación de las tensiones de crecimiento de las fibras comprimidas, que se alargan, rompiendo la simetría de la pieza y provocando la aparición de curvaturas de canto.

Por los motivos anteriores este esquema de aserrado se caracteriza por la aparición de curvaturas de cara y canto en los productos finales cuya magnitud varía considerablemente de unas piezas a otras.

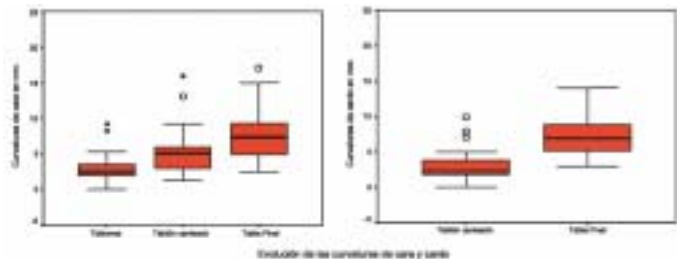
Reaserrado con liberación gradual de las tensiones de crecimiento

Después del aserrado en grupo de cabeza es posible provocar una liberación gradual de las tensiones de crecimiento antes del reaserrado final propiamente dicho.

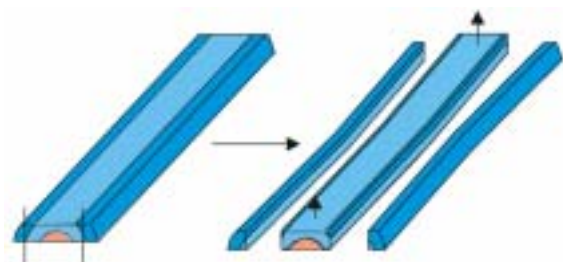
Como ejemplo de estas opciones tenemos la posibilidad de realizar un canteado de las tablas previo a su reaserrado posterior en sierras circulares múltiples.

En esta experiencia, el grupo de cabeza produce cortes paralelos de donde se obtienen tablas de 32 mm de espesor y anchura variable. Cada una de estas tablas se cantea en una máquina con dos discos móviles y, finalmente, son reaserradas en un grupo de sierras circulares hasta obtener un ancho de 72 mm en el producto final.

Los valores obtenidos en la medida de las curvaturas señalan el importante efecto liberador de tensiones que se produce a lo largo del proceso.



Durante el canteado se produce una liberación de tensiones que se manifiesta, sobre todo, en forma de curvaturas de cara que incrementan su valor desde 3,0 mm hasta 5,4 mm. Esto se debe a que el canteado produce cortes simétricos que eliminan la parte de fibras más tensionadas en el interior del tronco favoreciendo el desarrollo de curvaturas de cara en los despieces tangenciales.



Posteriormente durante el reaserrado de las tablas canteadas en una sierra múltiple se produce una nueva liberación de tensiones similar a la que tiene lugar durante el reaserrado de la madera verde directamente en unas sierras circulares.

En el caso de las curvaturas de cara, su valor se incrementa desde 5,4 mm hasta 7,6 mm. En lo que respecta a las curvaturas de canto es ahora cuando se produce su máxima liberación pasando de un valor de 3,1 mm hasta 6,7 mm.



Al igual que en un reaserrado directamente en sierras circulares, la desviación típica de las curvaturas de las piezas finales es elevada ($\sigma = 4,5$) debido a la influencia de factores como que el número de tablas obtenidas sea par o impar en la aparición de curvaturas de cara y/o canto respectivamente.

Tecnologías de tipo S.D.R (Saw, Dry, Resaw)

Las tecnologías de tipo SDR (Serrar, Secar y Reaserrar) han sido ampliamente utilizadas por aserraderos de Norteamérica, Australia y Tasmania (Haslett, 1988). En esencia, estas tecnologías consisten en producir tablonnes de espesor fijo en el carro principal que son secados hasta un contenido de humedad variable y reaserrados posteriormente hasta su ancho definitivo.

Es conocido que el proceso de secado permite “relajar” las tensiones de crecimiento en diferentes maderas optimizando su posterior reaserrado y durante el Proyecto CRAFT se realizaron varias experiencias para valorar el efecto del presecado de la madera de *Eucalyptus globulus* en la disminución de las deformaciones durante su reaserrado posterior.

En todos los casos se decidió presecar la madera hasta un contenido de humedad del 30-32% por ser viable alcanzarlo en un periodo de tiempo razonable (20-30 días según el espesor y contenido de humedad inicial) y con un bajo consumo energético.

En la primera experiencia se empleó un esquema que produce cortes paralelos en el grupo de cabeza

de donde se obtienen tablas de 32 mm de espesor y anchura variable. Una parte de estas tablas fue reaserrada directamente en un grupo de sierras circulares hasta un ancho de 72 mm. La otra partida de tablas fue presecada en un secadero convencional hasta un contenido de humedad próximo al 30-32% y reaserrada posteriormente en el mismo equipo y con el mismo criterio que las tablas anteriores.

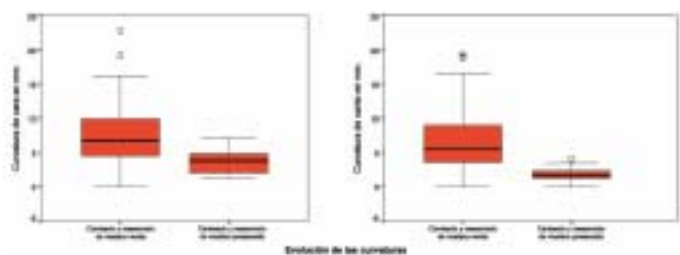
Los valores medios de las curvaturas de la madera reaserrada en estado verde fueron 5.9 mm ($\sigma= 3.0$) para las curvaturas de cara y 5.2 mm ($\sigma= 3.6$) en el caso de las curvaturas de canto. Los valores de las curvaturas obtenidas en la madera reaserrada después de su presecado fueron de 3.5 mm ($\sigma = 2.6$) en el caso de las curvaturas de cara y de 2.4 mm ($\sigma=1.8$) para las curvaturas de canto.



Los valores de las curvaturas de la madera presecada fueron, respectivamente, el 60% y el 46% de los que presentaba la misma madera reaserrada en estado verde. Los valores de la desviación típica también descendieron considerablemente, en especial los de las curvaturas de canto que alcanzaron un 50% del valor inicial de la madera reaserrada en estado verde.

En otra experiencia, complementaria de la anterior, se realizó un canteado de las tablas previo a su entrada en el presecadero con el objetivo de facilitar su transporte y disminuir el espacio requerido para su apilado.

En este caso los valores de las curvaturas de la madera canteada y presecada fueron, respectivamente, el 46% y el 25% de los que presentaba la madera canteada y reaserrada en estado verde. De la misma forma, los valores de la desviación típica también descendieron considerablemente, en especial los de las curvaturas de canto que alcanzaron un 22% del valor inicial de la madera reaserrada en estado verde.



El canteado de las tablas produce una liberación de las tensiones de crecimiento que se manifiesta con

una tendencia a incrementar las curvaturas de cara y minorar la manifestación de las de canto. Por ello, el presecado de tablas canteadas disminuye la manifestación de curvaturas de canto en el producto final. En cuanto a las curvaturas de cara, pueden ser parcialmente absorbidas durante el presecado mediante la colocación de cargas sobre las pilas de madera.

En todos los casos, los resultados confirman el importante efecto equilibrador que produce un presecado de la madera en las deformaciones que tienen lugar durante su reaserrado posterior.

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA DE EUCALIPTO

Un objetivo específico del Proyecto contempló el estudio de las principales propiedades de la madera de eucalipto procedente de las seis parcelas seleccionadas.

La caracterización de la madera es esencial para definir sus mercados potenciales y proporcionar información sobre su procesado a las industrias transformadoras. Otro objetivo previsto era determinar la variación que se produce entre estas propiedades y relacionarla con factores como la edad o las condiciones de crecimiento.

Los ensayos se realizaron sobre seis trozas obtenidas de tres árboles (terceras y cuartas trozas) de cada una de las seis parcelas y, en total, se han estudiado nueve propiedades tecnológicas:

El peso específico (densidad) es el parámetro más importante para caracterizar cualquier especie de madera. A menudo, esta propiedad está bien relacionada con las principales propiedades físicas y mecánicas así como con otras características de la madera como su durabilidad natural, impregnabilidad, etc.

La dureza Monnin es una propiedad de referencia para conocer la trabajabilidad de la madera y debe considerarse para cualquier utilización en que la madera esté sometida a impactos (pavimentos de madera, decking, etc).

El valor del punto de saturación de la fibra se corresponde con el contenido de humedad de la madera a partir del cual su secado se produce con variaciones dimensionales (hinchazón y merma). Esta propiedad proporciona información sobre los posibles riesgos durante el secado y las contracciones totales que experimentará la madera.

Los coeficientes de contracción radiales y tangenciales permiten estimar los problemas que puedan originarse durante el secado y los posteriores movimientos de la madera una vez puesta en servicio. La diferencia entre estas dos propiedades se considera uno de los mejores parámetros para calificar el grado de “nerviosismo” de una especie de madera.

La sensibilidad ante las variaciones higrótérmicas proporciona información sobre la tendencia de la madera a perder o ganar humedad cuando se alteran las condiciones ambientales del aire.

Las resistencias a la flexión y compresión y el módulo de elasticidad son las propiedades básicas para

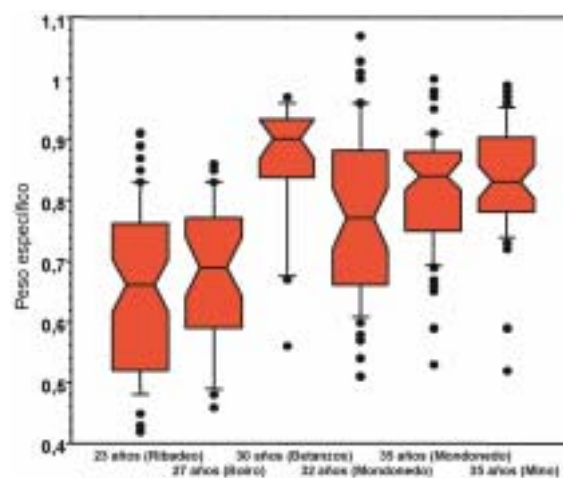
realizar el cálculo estructural de elementos de madera sometidos a esfuerzos mecánicos.

El valor medio de los resultados obtenidos en la caracterización de las propiedades de la madera de *Eucalyptus globulus* procedente de las seis parcelas (23 a 35 años) es el siguiente.

PROPIEDADES	Media	Rango	Coef. de variación	Calificación
Peso específico	0,76	0,42 - 1,07	11% a 20%	Medio
Dureza	6,0	3 - 10,1	22% a 28%	Medio a Alto
Coef. contracción radial (%)	7,5	2,9 - 11,6	13% a 30%	Alto
Coef. contracción tangencial (%)	13,8	6,9 - 20	6% a 27%	Alto
Sensibilidad ante las variaciones higrótérmicas (%)	3,6	3,2 - 4	-	Medio
Punto saturación de la fibra (%)	37	27 - 53	5% a 14%	Alto
Módulo de elasticidad (Mpa)	20580	6500 - 33000	17% a 31%	Alto
Resistencia a la compresión (Mpa)	71	39 - 107	12% a 20%	Alto
Resistencia a la flexión (Mpa)	130	48 - 181	12% a 23%	Alto

Estos resultados globales enmascaran grandes diferencias entre los valores de las distintas parcelas y, a su vez, entre árboles procedentes de una misma parcela.

A modo de ejemplo, se exponen los diagramas de cajas que representan el rango de variación del peso específico dentro de cada una de las parcelas. Una representación con cajas en forma de “copa” permite apreciar visualmente las diferencias entre las distribuciones de la densidad de cada parcela. Las diferencias entre dos distribuciones de datos se consideran significativas cuando no existe un solape entre las estrías de sus cajas.



Las diferencias existentes entre las propiedades de la madera de distintas parcelas pueden explicarse, sobre todo, considerando la influencia de la edad.

Las parcelas más jóvenes (Boiro 27 años y Ribadeo 23 años) presentan los valores más reducidos y dispersos para casi todas propiedades y este resultado coincide con los encontrados en otros proyectos con especies de crecimiento rápido. Esta característica se debe a que los árboles más jóvenes tienen una mayor proporción de madera juvenil con unas propiedades mecánicas inferiores y una mayor variabilidad de los resultados.

La gráfica permite apreciar la evolución entre las propiedades de la madera procedente de la parcela más joven (23 años) y la de mayor edad (35 años). En los doce años transcurridos las propiedades muestran una

enorme evolución durante la que, como media, los valores de las propiedades mecánicas se incrementan en un 35%, la densidad en un 30% y los coeficientes de contracción en un 35%.

A este respecto, la madera madura procedente de árboles de cierta edad se caracteriza por unas propiedades mecánicas superiores pero también por unos mayores coeficientes de contracción.



A priori los valores más reducidos de los coeficientes de contracción de la madera procedente de árboles jóvenes podría ser una importante ventaja si fuesen más estables. Sin embargo, el comportamiento de la madera durante el secado está relacionado tanto con estos valores como con su gradiente o variación a lo largo de una tabla. Esto permite explicar la reducida estabilidad de la madera procedente de árboles jóvenes durante el secado aunque el valor medio de sus coeficientes de contracción sea más reducido que el de árboles viejos.

A pesar de la influencia de la edad, es importante señalar que las características físicas y mecánicas de la madera procedente de la parcela 1 (Betanzos, 30 años) son las más elevadas de entre las seis parcelas (superiores incluso a las de las parcelas de mayor edad como Mondoñedo y Miño). Este fenómeno puede explicarse por las condiciones particulares de esta parcela donde las cortas intermedias que se realizaron pueden asimilarse a una silvicultura orientada a la producción de madera de calidad.

Además, la madera de tensión asociada a una distribución irregular de las tensiones de crecimiento ejerce un importante efecto sobre las propiedades de la madera. Aunque este efecto es local, contribuye a una mayor dispersión de los resultados de las propiedades.

En todos los casos, las propiedades presentan una fuerte tendencia a variar en el sentido radial que está directamente relacionada con la mayor o menor presencia de madera juvenil. Dentro de esta tendencia es posible hacer dos observaciones:

A excepción del punto de saturación de la fibra, las demás propiedades se incrementan de forma más o

menos acusada desde la médula y hacia la corteza. El módulo de elasticidad y los coeficientes de contracción pueden variar en una proporción de 1 a 3 y el peso específico o la resistencia a la flexión desde 1 a más de 2.

Como ejemplo, el gráfico muestra la variación de la densidad en árboles de distintas edades procedentes de las parcelas 2, 3 y 6.

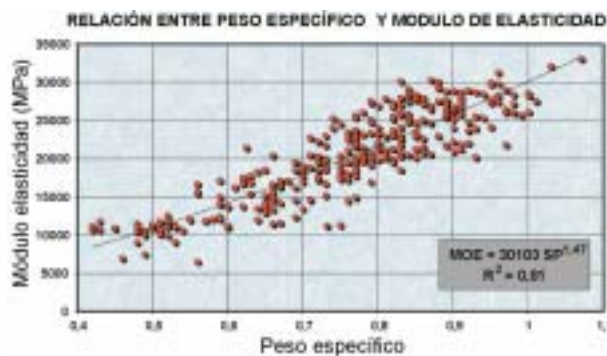


En las proximidades del cambium suele observarse una disminución de las propiedades que, en el caso del *Eucalyptus globulus* puede explicarse por la desviación de la rectitud de las fibras (fuerte presencia de fibra revirada y/o ondulada) y/o las diferencias entre el contenido de extractos entre albura y duramen.

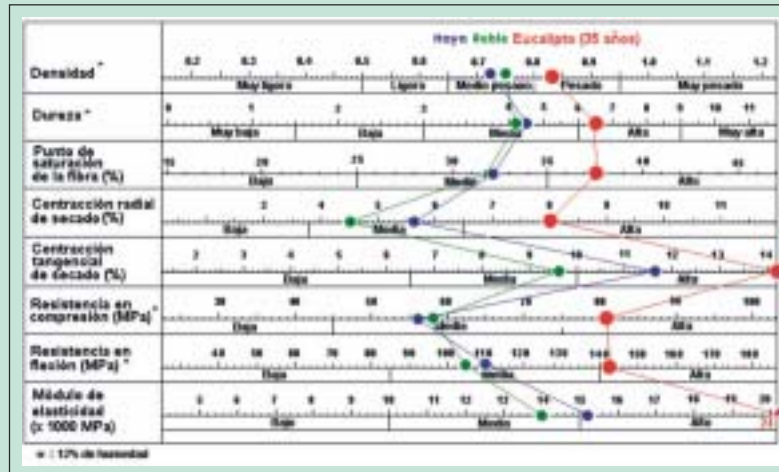
La metodología seguida en el proyecto ha permitido establecer relaciones entre las distintas propiedades de la madera que permitirá simplificar el número de ensayos necesarios para caracterizar la madera de *E. globulus* de distintas procedencias.

El peso específico está bien relacionado con casi todas las propiedades a excepción del punto de saturación de la fibra. A partir del conocimiento de esta propiedad, muy fácil de determinar, es posible obtener una información fiable sobre el comportamiento mecánico de madera de cualquier origen y una estimación sobre su nivel de contracciones.

A su vez, las tres propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión) están bien correlacionadas entre ellas, en particular el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión. Por ello la determinación del módulo de elasticidad (fácil y rápida de llevar a cabo mediante métodos acústicos) podría ser suficiente para conocer el comportamiento mecánico de las muestras ensayadas.



Propiedades de la Madera de *Eucalyptus globulus*

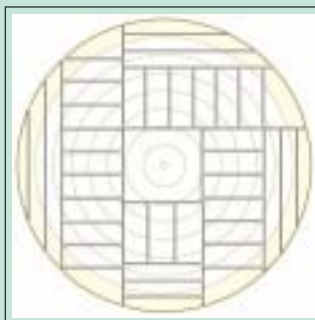


De acuerdo con los resultados obtenidos en *E. globulus* procedentes de las seis parcelas estudiadas en Galicia, el intervalo de edad a partir del cual la madera puede comenzar a considerarse madura y con unas propiedades uniformes se sitúa en torno a los 30 años y está influido por la silvicultura.

A partir de esta edad las propiedades mecánicas de la madera de *E. globulus* se revelan excepcionales y, como media, un 35% superiores a los valores «estándar» de frondosas templadas europeas como el roble o el haya. Estas propiedades unidas al valor de la densidad y dureza de la madera le abren importantes posibilidades de mercado en numerosas aplicaciones de calidad relacionadas con la carpintería y construcción.

En cuanto a la estabilidad de la madera, los principales indicadores utilizados para caracterizar el «nerviosismo» de una especie de madera (coeficientes de contracción unitarios y relación entre ellos) permiten concluir que la estabilidad dimensional del eucalipto es similar a la de especies tan empleadas en carpintería y mobiliario como el haya o el roble americano.

Es importante señalar que los valores recogidos para el eucalipto están penalizados debido a haber ensayado en cada árbol algunas probetas de la zona de madera juvenil procedentes del centro del tronco.



Una de las conclusiones del proyecto CRAFT es que, como ocurre con otras frondosas europeas, será necesario destinar a diferentes aplicaciones las distintas áreas del tronco de un eucalipto para poder absorber la fuerte variación entre propiedades que existe en sentido radial y conseguir productos finales con propiedades homogéneas y optimizadas para cada aplicación.

Por ello, los esquemas de corte no deben orientarse a la búsqueda de un producto único y distinguir la calidad de las distintas zonas del tronco. En este sentido, el aserrado de eucaliptos de una cierta edad no debe basarse exclusivamente en la producción sino que, al menos, una parte de cada tronco debe orientarse a mercados para una frondosa de calidad.

Al plantear estos despieces debemos considerar que la madera de eucalipto se encola sin dificultad, lo que permite aprovechar escuadrías reducidas de fácil secado en cámara y que, posteriormente, podrán formar parte de un perfil laminado para carpintería o un tablero alistonado.

Además, la albura es fácilmente impregnable con productos protectores y el conjunto de la madera tiene una aptitud muy buena para recibir acabados decorativos.

Sin embargo, los coeficientes de contracción y el punto de saturación de la fibra no están bien correlacionados entre sí y deberán ser determinadas de forma simultánea si se desea caracterizar el nivel de “nerviosismo” de una procedencia de madera.

Como conclusiones generales, el estudio de árboles de diferentes edades ha permitido constatar la enorme importancia de este factor en las propiedades de la madera. La madera juvenil se caracteriza por unas propiedades físicas y mecánicas inferiores así como por una importante dispersión de los valores de las propiedades dentro de cada árbol. A su vez, se observan importantes variaciones dentro de cada árbol, en especial, una importante progresión de las propiedades en sentido radial que evoluciona a medida que el árbol envejece.

Esta dispersión disminuye con la edad a consecuencia de la formación de madera madura y la estabilización de la estructura de las fibras. De acuerdo a los resultados obtenidos en *E. globulus* procedentes de las seis parcelas estudiadas en Galicia, el intervalo de edad a partir del cual la madera puede comenzar a considerarse madura y con unas propiedades uniformes puede situarse en torno a los 30 años y está influido por la silvicultura.

A partir de esta edad las propiedades mecánicas de la madera de *E. globulus* se revelan excepcionales y, como media, más de un 30% superiores a las de frondosas templadas como el roble o el haya. Estas propiedades unidas al valor de la densidad y dureza de la madera le abren importantes posibilidades de mercado en numerosas aplicaciones relacionadas con la carpintería y construcción.

SOFTWARE DE ASERRADO

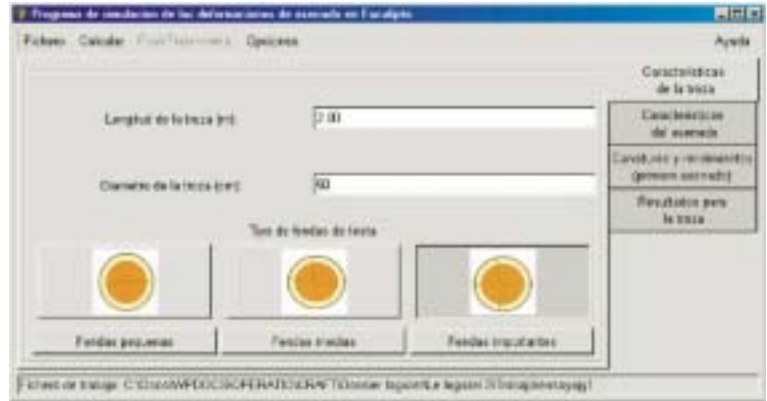
Otro objetivo del Proyecto fue el diseño de un software específico que considerase las características del aserrado de eucaliptos.

El software fué diseñado por el Laboratorio de Mecánica e Ingeniería Civil de la Universidad de Montpellier (Francia) y está basado en un programa en lenguaje Fortran 90 que permite enlazar modelos de distribución de las tensiones de crecimiento, del comportamiento mecánico de la madera (variación en sentido radial del Módulo de Young), características geométricas de las trozas, distribución de las fendas de testa y deformaciones de las tablas durante el aserrado.

El diseño del software pretende suministrar información práctica de los efectos producidos por la liberación de las tensiones de crecimiento durante el aserrado y en particular el nivel de deformaciones presentes en los productos finales.

Su funcionamiento se basa en «inputs» sencillos que pueden ser suministrados por cualquier aserradero de eucalipto. En una primera ventana deben introducirse

las principales características de la troza; su longitud, diámetro y el tipo de fendas de testa existentes. Para clasificar el tipo de fendas se presentan tres opciones, cada una de las cuales está vinculada a un nivel de la distribución de las tensiones de crecimiento en el interior de la troza.



En una segunda ventana deben introducirse las características básicas del proceso de aserrado (ancho de los tablones en el carro principal, vías de corte, dimensiones del producto final, etc.) y seleccionar un esquema de aserrado entre diversas opciones; cortes paralelos, cortes con giros o corte al medio de la troza.

Al iniciar los cálculos, el programa abre una nueva ventana denominada «ángulo de rotación» que permite rotar la troza para iniciar el aserrado en función de la mayor fenda existente o cualquier otro criterio.

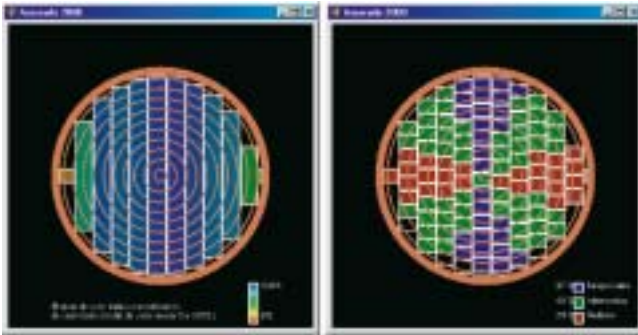
Respecto a los resultados del software, en una primera ventana se presenta un cuadro con las deformaciones de las tablas y su influencia en el rendimiento del proceso y los productos finales según su orientación.

Una segunda ventana presenta los distintos rendimientos obtenidos en función de la calidad de la madera (madera de duramen, presencia de albura o área central de la troza)

Número de tabla	Carácter de aserrado	Fenda de testa (cm)	Deformación (%)	Rendimiento (%)	Espesor	Orientación	Longitud (m)
1	07	20	26	0	0	0	0
2	08	20	31	0	0	0	0
3	14	30	33	0	2	0	0
4	07	20	34	0	2	0	0
5	07	30	35	0	1	0	0
6	14	27	36	0	0	0	0
7	00	30	37	0	1	0	0
8	03	27	38	1	0	0	0
9	07	30	39	0	0	0	0
10	08	30	36	0	1	0	0
11	03	30	38	0	0	0	0
12	08	30	38	0	0	0	0

Los resultados también se presentan de forma gráfica, mediante esquemas de aserrado que incluyen escalas de color para distinguir la orientación y el nivel de deformaciones de cada tabla.

Las trozas procedentes de las parcelas han suministrado los valores de referencia empleados en el programa para el cálculo del espesor de la corteza, albura y diámetro del área central del núcleo.



Los cálculos mecánicos de las deformaciones producidas por las tensiones de crecimiento han sido ajustados a la realidad mediante la realización de diversas experiencias industriales y un complejo proceso en laboratorio.

Esta primera versión del software continuará desarrollándose en el futuro y ha sido distribuida a los socios industriales del Proyecto para comprobar su funcionamiento en diversas situaciones.

En este sentido, cualquiera de los coeficientes considerados puede modificarse con facilidad para ajustarse a una calidad específica de trozas, etc. También es posible adaptar este software a cualquier otro escenario o especie del género *Eucalyptus*.

PROPUESTAS DE LÍNEAS DE ASERRADO

El aserrado de eucaliptos “jóvenes” y con tensiones de crecimiento requiere plantear estrategias de proceso muy particulares. Con independencia de la tecnología empleada, será necesario considerar siempre como minimizar los defectos asociados a la liberación de las tensiones y pensar en productos que permitan absorber la fuerte variación en sentido radial que se produce en las propiedades de la madera.

Como consecuencia de la liberación de las tensiones que se produce durante el aserrado pueden producirse dos grandes tipos de defectos; el desarrollo de fendas y/o curvaturas. Frente a estos defectos, existen opciones que permiten evitar el desarrollo de fendas en el grupo de cabeza y, posteriormente, es posible orientar e incluso disminuir las deformaciones que se producirán durante el reaserrado.

Desde el momento en que es posible evitar el desarrollo de fendas en el grupo de cabeza, se recomienda que las trozas de madera entren en proceso en el mínimo tiempo posible a partir de su corta. Si fuese necesario que las trozas permanezcan apiladas en parque durante un cierto tiempo, su riego periódico ayudará a limitar la importancia de las fendas de testa que desarrollen.

La madera de *Eucalyptus globulus* es muy densa y dura lo que exige robustez en la maquinaria de aserrado y una elevada potencia para poder trabajar a velocidades razonables.

Aunque tradicionalmente la madera de eucalipto se ha serrado con corteza, se recomienda trabajar con madera descortezada. La corteza de eucalipto incorpora elementos abrasivos que producen un rápido desgaste

de la herramienta de corte. Además, es frecuente que se vaya desprendiendo a lo largo del proceso y produzca atascos y alteraciones en el funcionamiento de la maquinaria.

Es esencial considerar la fuerte variación que existe entre las propiedades de la madera de eucalipto en sentido radial. Por ello y para optimizar los despieces, los esquemas de corte no deben orientarse a la búsqueda de un producto único y distinguir las distintas zonas del tronco, en especial la parte central que tiene una densidad muy reducida y concentra la presencia de nudos.

En este sentido el aserrado de eucaliptos nunca debe basarse exclusivamente en la producción sino que, al menos, una parte de cada tronco debe orientarse a mercados para una frondosa de calidad.

La madera de duramen tiene unas excelentes propiedades mecánicas que la hacen idónea para numerosas aplicaciones de carpintería y construcción. Los distintos despieces deben tener en cuenta las características de esta madera y diferenciarla de la albura y de la parte central del tronco para lograr un producto final con propiedades homogéneas.

En estos momentos existen tecnologías que permiten secar en un tiempo razonable madera de eucalipto con espesores de referencia comprendidos entre 15 y 35 mm.

La madera de albura es fácilmente tratable con sales hidrosolubles lo que permite su empleo en numerosas aplicaciones y los subproductos tienen un mercado garantizado al constituir una materia prima excelente para elaborar pasta de papel, tableros de fibras duros, etc.

Debido a las consideraciones anteriores, no existe una solución única para serrar eucaliptos, siendo posible diseñar líneas específicas adaptadas a materia prima y/o productos concretos.

Se exponen, a modo de ejemplo, tres opciones diferentes de líneas de aserrado de eucalipto que consideran los puntos tratados anteriormente. Las líneas están diseñadas para trabajar con trozas de eucalipto sin corteza y con una longitud de 2,5 m, la dimensión más habitual en Galicia.

Todas las líneas han sido diseñadas empleando maquinaria principal de la firma alemana Möhringer GmbH, quien ha suministrado sus características técnicas. Asimismo, en todos los casos se han realizado experiencias industriales que han permitido contrastar las líneas generales de su funcionamiento.

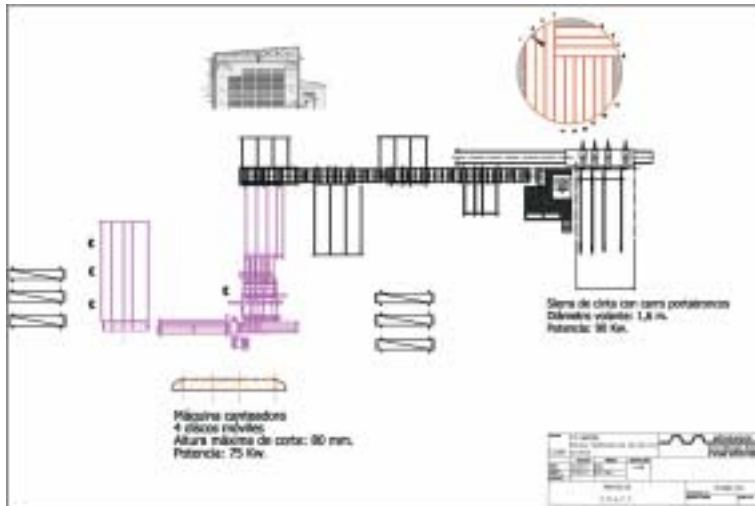
Línea 1

Esta línea de aserrado emplea un esquema de corte que realiza giros de la troza en el carro principal para evitar la aparición de fendas. El mismo esquema permite eliminar la influencia de la parte central de la troza en la mayor parte del despiece a excepción de los tableros resultantes de los últimos cortes, donde su eliminación se producirá en la canteadora.

Posteriormente, las tablas de mejor calidad se presecan hasta un contenido de humedad próximo al 30%

antes de proceder a su reaserrado. De esta manera se limitan, en gran medida, las deformaciones producidas debido a la liberación de tensiones internas de las tablas durante su reaserrado.

El grupo de cabeza está formado por una máquina de sierra de cinta con carro portatroncos y el reaserrado se realiza en una máquina canteadora. La línea dispone de un sistema de realimentación al carro, salida de costeros, salida de tabla para la cámara de presecado y un sistema de alimentación independiente de la madera presecada a la canteadora.



La sierra de cinta tiene una potencia de 90 kW y un diámetro de volante de 1,6 m. Con este tipo de maquinaria y sobre la base de las experiencias industriales realizadas es posible conseguir velocidades de avance medias próximas a 30 m/min.

El carro portatroncos es hidráulico y dispone de tres torres de fijación con movimiento independiente y garras desplazables que permiten un giro rápido y preciso del tronco descortezado. Con esta maquinaria la línea no tiene una limitación importante en el diámetro del tronco a procesar.

El segundo corte se realiza con una canteadora de 4 discos móviles y 75 kW de potencia que tiene la posibilidad de incorporar grupos de hojas.

El funcionamiento y control de la maquinaria principal de la línea requiere dos operarios, uno en la sierra de cinta con carro portatroncos y otro en la máquina canteadora. El resto del personal necesario trabajará, sobre todo, en tareas de carga, apilado y transporte de la madera.

En función del tipo de producto, esta línea producirá despieces mayoritariamente tangenciales aunque es posible elaborar tablón en el grupo de cabeza para producir despieces radiales. Esta última opción está limitada por el espesor máximo de secado.

Esta línea podría producir productos como cuadradillo para mangos de herramienta, elementos para tableros alistonados, pa-

vimentos, elementos para envase y embalaje, madera para cierres, etc.

Como referencia de la capacidad de esta línea, si se considera como materia prima de entrada trozas de eucalipto con un diámetro medio de 400 mm s.c. y una longitud de 2,5 m y empleando un esquema de corte en el grupo de cabeza que produce 12 tablas por troza de 35 mm de espesor (14 corte y 2 giros por troza).

En estas condiciones y aplicando los coeficientes de cálculo normales, esta línea tendría un consumo anual próximo a los 16.000 m³ de tronco de eucalipto por turno.

Línea 2

Esta línea de aserrado está formada por un chipper-canter con un grupo de 4 sierras circulares móviles de doble eje y una máquina canteadora de 4 sierras móviles (75 kW) y una altura máxima de corte de 80 mm.

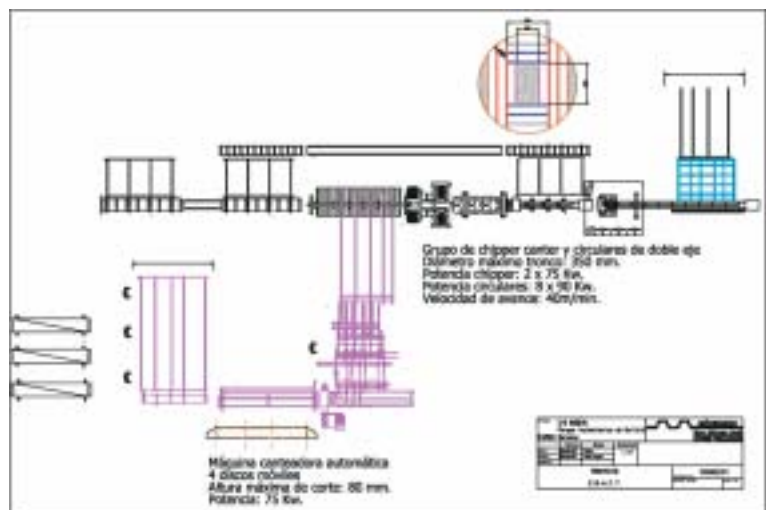
Esta opción de aserrado permite producir cortes simétricos y alternados en el grupo de cabeza, que evitan la aparición de fendas en las tablas y permiten conseguir un núcleo central estable y sin deformaciones.

Un sistema de realimentación permite, en caso de ser necesario, que una misma pieza pueda pasar varias veces por el grupo de cabeza hasta completar la secuencia de corte.

Además, se incorpora una salida para las tablas y núcleos centrales que no necesitan pasar por la canteadora.

El chipper canter dispone de una potencia total de 150 kW y el grupo de sierras circulares de 360 kW (4 x 90 kW). Con esta maquinaria se puede conseguir una velocidad media de avance próxima a los 40 m/min.

El funcionamiento de la línea es totalmente automático. Un escáner en la entrada mide las principales características del tronco (diámetro de las testas, curvaturas, etc.) y sobre la base de estos datos y los parámetros de corte introducidos en el programa, calcula automáticamente el mejor despiece para cada tronco.



Para el funcionamiento y control de la maquinaria principal de esta línea son necesarios dos operarios, uno en el grupo de chipper canter y sierras circulares y otro en la máquina canteadora. El resto del personal necesario trabajará sobre todo en tareas de carga, apilado y transporte de la madera.

Este tipo de línea con chipper-canter y circulares en grupo de cabeza permite alcanzar producciones muy elevadas aunque está limitada por el diámetro máximo del tronco que suele aproximarse a los 35 cm.

El sistema de aserrado proporciona madera sin fendas aunque con deformaciones, principalmente en forma de curvaturas de cara de las tablas más laterales. Con estas consideraciones, la línea de aserrado parece adecuada para procesar madera delgada y producir elementos donde la importancia de las curvaturas de cara no sea limitante.

En madera que precise secarse, el proceso de secado puede disminuir parcialmente las curvaturas de cara de las tablas, mientras que en elementos expedidos en verde, las curvaturas de cara pueden limitarse reduciendo la longitud del producto final.

Como referencia de la capacidad de esta línea, vamos a considerar como materia prima eucalipto con un diámetro medio de 300 mm s.c. y una longitud de 2,5 m.

En el esquema de corte propuesto cada tronco debe realizar tres pasadas por el grupo de chipper-canter y circulares para completar el despiece. En cada tronco se producen 10 tablas de 25 mm de espesor, de las que al menos 4 y el núcleo central deben cantearse.

En estas condiciones y considerando los coeficientes de cálculo normales, esta línea tendría un consumo anual próximo a los 44.000 m³ de tronco de eucalipto por turno.

Línea 3

Esta última opción de aserrado produce una liberación gradual de las tensiones de crecimiento de forma que éstas apenas tienen incidencia en el producto final.

La línea se compone de un grupo de cabeza con una máquina de sierra de cinta y carro portatroncos al

que se incorpora un grupo de dos sierras circulares horizontales móviles.

El esquema de aserrado propuesto consiste en producir dos semitroz as con una dimensión ligeramente superior al ancho de la máxima pieza radial que se desea obtener como producto final. Después de obtener la primera semitroza se sierran en espesor las tablas centrales con la ayuda de las sierras circulares. Estas sierras evitan la aparición de fendas en estas tablas y, al mismo tiempo, eliminan la influencia de la parte central de la troza facilitando el trabajo de la canteadora automática.

Cada semitroza es procesada en una múltiple de circulares con sistema de realimentación y posibilidad de incorporación de grupos de circulares. Para facilitar el agarre por los rodillos prensores de la múltiple se considera conveniente realizar un corte en el grupo de cabeza que permita disponer de una pequeña cara de referencia en cada semitroza.

Las tablas pasan finalmente por una canteadora automática con 4 sierras móviles de 75 kW, que sana las deformaciones y da el ancho final a las tablas.

Las características técnicas del grupo de cabeza son las mismas que las del empleado en la línea 1. En este caso la incorporación de dos sierras circulares supone una potencia adicional de 40 kW.

Para el segundo corte se ha seleccionado una máquina múltiple de circulares con 4 sierras móviles, 200 kW de potencia y altura de corte de hasta 200 mm. La velocidad de avance para esta máquina con madera de eucalipto se estima en unos 30 m/min.

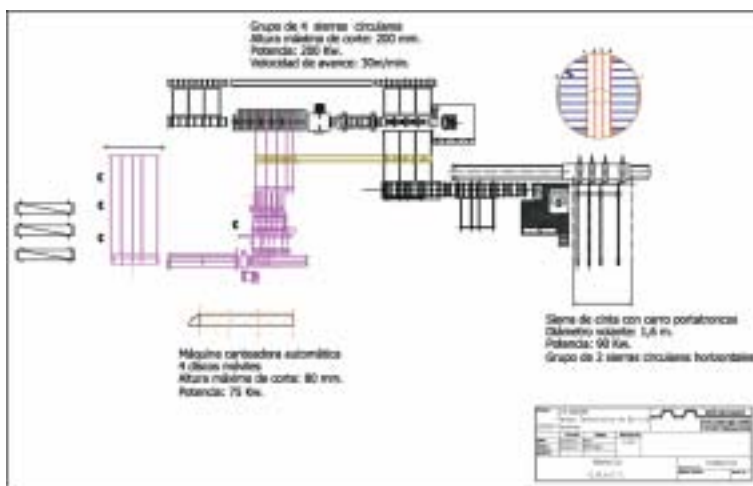
Esta línea de aserrado es muy flexible en cuanto al tamaño de la materia prima empleada y está diseñada para producir despieces mayoritariamente radiales e intermedios.

El reaserrado en una múltiple con hojas móviles permite distinguir diversos productos dentro de cada tablón en función de las propiedades de la madera, su orientación, etc.

Con estas consideraciones, esta línea permite producir una mezcla de productos de elevado valor (orientación radial y mayor anchura), con otros productos que incorporen madera de albura y de la zona central.

El funcionamiento y control de la maquinaria principal de la línea requiere tres operarios, uno en la sierra de cinta con carro portatroncos, otro en la múltiple de circulares y un tercero en la canteadora. El resto del personal necesario trabajará, sobre todo, en tareas de carga, apilado y transporte de la madera.

Como referencia de la capacidad de esta línea se propone emplear un esquema de corte en el grupo de cabeza que produce 2 semitroz as y 6 tablas por troza de 35 mm de espesor. Cada semitroza debe pasar tres veces por la múltiple, para obtener un total de 8 tablas.



En estas condiciones, considerando como materia prima trozas de eucalipto con un diámetro medio de 400 mm s.c. y una longitud de 2,5 m y aplicando los coeficientes de cálculo normales, esta línea tendría un consumo anual próximo a los 33.000 m³ de tronco de eucalipto por turno.

CONCLUSIONES

Durante el Proyecto CRAFT se han realizado más de un millar de medidas de tensiones de crecimiento a eucaliptos procedentes de seis parcelas de diferentes edades y creciendo bajo distintas condiciones silvícolas.

Con la prudencia que debe acompañar siempre al género *Eucalyptus*, el análisis de los datos obtenidos permite interpretar el desarrollo de las tensiones de crecimiento como una estrategia por parte de los árboles para competir de forma ventajosa por una posición privilegiada.

Una primera forma de competencia en una especie intolerante como el *E. Globulus* es el desarrollo de un rápido ascenso en altura en busca de luz, propio de árboles jóvenes y esbeltos creciendo bajo condiciones de elevada densidad. Otra forma de competencia es el desarrollo de estrategias de reorientación que permiten a los árboles autoequilibrarse en aquellas situaciones que exigen desarrollar esfuerzos en una dirección concreta.

Ambos tipos de competencia están influidos por la silvicultura, confirmando la hipótesis sugerida por Kubler, en el sentido de que es posible minimizar el nivel de tensiones al mantener las condiciones de crecimiento y la distribución espacial de los árboles lo más uniforme posible a lo largo de su vida. En esencia limitar la aparición de estímulos que supongan, por parte del árbol, un incentivo para competir.

Por ello y desde el punto de vista forestal, la conclusión más importante es la confirmación de las relaciones existentes entre silvicultura y tensiones de crecimiento y la posibilidad de desarrollar una silvicultura para los eucaliptares europeos tratados a monte alto que intente compatibilizar los intereses de las industrias consumidoras de fibra y aquellas que necesitan madera maciza.

Se ha comprobado la efectividad del anillado como un método simple que puede ser aplicado al árbol por los propietarios forestales y que equilibra el valor de las tensiones de crecimiento, disminuyendo parcialmente los defectos que aparezcan durante el aserrado.

Se confirma la relación existente entre los valores de las tensiones de crecimiento de los árboles en pie y el posterior desarrollo de fendas de crecimiento y deformaciones en la madera aserrada.

Definir esta relación ha permitido diseñar un modelo de distribución de tensiones de crecimiento en el interior del árbol que permite explicar el conjunto de las deformaciones que se manifiestan durante cualquier opción de aserrado y reaserrado.

Este modelo ha sido comprobado mediante la realización de unas 20 experiencias de aserrado industrial con las principales opciones de maquinaria existen-

tes, desde sierras de cinta y carros portatroncos, hasta sierras enfrentadas, alternativas y circulares con chipper-canter.

En estos momentos es posible evitar la aparición de fendas en el grupo de cabeza y dirigir las deformaciones que tienen lugar durante el reaserrado posterior (curvaturas de cara y/o canto). También es posible disminuir las curvaturas desarrolladas durante el proceso, introduciendo tecnologías de presecado antes del reaserrado final.

Aunque no existe una solución única para el aserrado de eucaliptos, es posible aplicar el modelo propuesto para diseñar estrategias de aserrado que minimicen el impacto de las deformaciones en cada producto concreto.

El Proyecto presenta la primera versión de un software de aserrado que introduce en el cálculo de la producción del aserradero el desarrollo de fendas y deformaciones en la madera aserrada producidas por la liberación de tensiones de crecimiento. El software incluye un criterio de clasificación visual que permite seleccionar el nivel de tensiones de una troza en función de las fendas de testa existentes.

El estudio de árboles de diferentes edades ha permitido constatar la enorme importancia de este factor en las propiedades de la madera. La madera juvenil se caracteriza por unas propiedades físicas y mecánicas inferiores así como por una importante dispersión de los valores de las propiedades dentro de cada árbol. A su vez, se observan importantes variaciones dentro de cada árbol y, en especial, una importante progresión de las propiedades en sentido radial que evoluciona a medida que el árbol envejece.

Esta dispersión disminuye con la edad a consecuencia de la formación de madera madura y la estabilización de la estructura de las fibras. De acuerdo con los resultados obtenidos en *E. globulus* procedentes de las seis parcelas estudiadas en Galicia, el intervalo de edad a partir de la cual la madera puede comenzar a considerarse madura y con unas propiedades uniformes puede situarse en torno a los 30 años y está influido por la silvicultura.

A partir de esta edad, las propiedades mecánicas de la madera de duramen de *E. globulus* se revelan excepcionales, como media, más de un 30% superiores a las de frondosas templadas como el roble o el haya. Estas propiedades unidas al valor de la densidad y dureza de la madera le abren importantes posibilidades de mercado en numerosas aplicaciones relacionadas con la carpintería y construcción.

Por ello, una de las conclusiones es que será necesario destinar a diferentes aplicaciones las distintas áreas del tronco de un eucalipto para poder absorber la variación entre propiedades que existe en sentido radial y conseguir productos finales con propiedades homogéneas y optimizadas para cada aplicación.

Al plantear estos despieces debemos considerar que la madera de eucalipto se encola sin dificultad, lo que permite aprovechar escuadrías reducidas de fácil

secado en cámara y que, posteriormente, podrán formar parte de un perfil laminado para carpintería o un tablero alistonado. Además, la albura es fácilmente impregnable con productos protectores y el conjunto de la madera tiene una muy buena aptitud para recibir acabados decorativos.

En este sentido el aserrado de eucaliptos no debe basarse exclusivamente en la producción sino que, al menos, una parte de cada tronco debe orientarse a mercados para una frondosa de calidad.

El Proyecto finaliza con tres propuestas de líneas de aserrado para eucalipto que tienen en cuenta todo lo expuesto anteriormente. Las líneas tienen distintas capacidades y plantean la posibilidad de aprovechar materia prima de distintos diámetros.

En suma, tras dos años y medio de trabajo los resultados del Proyecto no han hecho sino confirmar las expectativas iniciales que llevaron a plantearlo y constituyen un importante paso inicial en torno a una posible estrategia forestal para diversificar las aplicaciones de los eucaliptares europeos.

Será necesario sedimentar estos resultados y proseguir las investigaciones en campos como la mejora genética, la silvicultura, el mercado, la transferencia de los resultados obtenidos a otros productos de elevado valor añadido como la chapa decorativa o los tableros estructurales, etc.

En definitiva, el Proyecto ha contribuido a derribar muchos mitos surgidos en torno al eucalipto y propone nuevos caminos para los eucaliptares europeos.

Recorrer estos caminos constituye un importante reto para el conjunto del sector forestal aunque, en el caso de Galicia, consideramos que las enormes expectativas de futuro que se vislumbran compensarán el esfuerzo necesario para alcanzarlas.



AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer en nombre propio y del CIS-Madera la colaboración de todas las empresas y personas que con su esfuerzo han hecho posible este Proyecto.

Detrás de cualquier empresa están las personas que la representan y, en este sentido, el Proyecto nunca habría sido posible sin la dedicación de D. Fernando y D. José María Lorenzo de la empresa Parquets Lorenzo, S.A., D. José Ramón Sánchez Pena, D. José Manuel Sánchez Pena y D. Eloy Mayo de la empresa Hermanos Sánchez Pena, S.L., Dr. Simon Möhringer, D. Fernando Morales, Dña. Dorothee Moolhuyzen y Dña. Elke Leiwelt de la empresa Möhringer GmbH., D. Carlos y D. Adolfo Ucha y Dña. Cynthia Kirkendall de la empresa Maderas Betanzos, S.L., y D. Antonio Cándido Leite, D. Licinio de Oliveira y Dña. Fátima Neves de la empresa Sardinha & Leite, S.A.

El magnífico trabajo realizado por los Centros de Investigación en Francia ha estado liderado por el Dr. Jean Gerard, Dr. Bernard Thibaut y Dña. Anne Thibaut del CIRAD-Forêt y el Dr. Joseph Grill y D. Frederic Dubois del Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil de la Universidad de Montpellier II.

Por parte de la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea, nuestro agradecimiento a D. Norbert Winkler, D. Ignacio Seoane y Dr. Johannes Klumpers.

Desde el inicio y hasta el final del Proyecto sólo hemos escuchado la palabra «adelante» por parte de la Xunta de Galicia. Por ello queremos agradecer el constante apoyo brindado por D. Juan Rodríguez Yuste, Conselleiro de Industria de la Xunta de Galicia y D. José Manuel González, Director General de Programas Industriales e Infraestructuras Tecnológicas.

Tampoco olvidamos el apoyo prestado en las fases iniciales del Proyecto, cuando este era tan sólo una idea que comenzaba a gestarse. De aquella época agradecemos especialmente los ánimos infundidos por D. José Antonio Orza, Conselleiro de Economía y Hacienda de la Xunta de Galicia y D. Diego Diz, Director del IGAPE en aquel momento.

Durante la fase exploratoria agradecemos la colaboración prestada por el Dr. Carlos Baso, profesor de la Escuela de Ingeniería Forestal de Pontevedra que colaboró en el diseño del Proyecto definitivo y D. Ramiro Amo de la empresa Juan Benito S.L.

D. Jorge Vázquez, asesor jurídico del proyecto, realizó un trabajo impecable y D. Leonardo Zamorano (Industrias Colcura, Chile) y D. Evan Shield (Economic Forestry Associates, Australia) compartieron con nosotros su valiosa experiencia en aserrado de eucaliptos.


Mención especial merece el esfuerzo y el trabajo realizado por mis compañeros del CIS-Madera, en especial por parte de su Director D. Jaime Bermúdez, los técnicos D. Gonzalo Piñeiro y D. Francisco Pedras y el trabajo administrativo y de maquetación del proyecto desarrollado por Dña. María Antonia García, D. Juan Abal y Dña. Pilar Conde.

Por último, queremos agradecer la dedicación de las decenas de trabajadores de las plantas industriales donde realizamos las experiencias y los ánimos de innumerables personas del sector forestal de Galicia y de Portugal.

A todos y cada uno de los citados, muchas gracias.

BIBLIOGRAFÍA

- AITIM, CTBA, CIRAD-Forêt, INIA, LNETI, UNIMOR, UPM-ETSIM. (1993), "Study of eucalytus processing for its utilisation as solid wood". *Forest Program. Project MA2B-CT91-0038, Final Technical Report*.
- AITIM. (1995), "Estudio del procesado del eucalipto para su utilización como madera sólida". *Boletín de información técnica de AITIM*, Num. 175.
- Archer, R. (1976), «On the distribution of Tree Growth Stresses- Part 2: Stresses due to asymmetric growth strains. *Wood Science and Technology*, vol 8, 293-309.
- Archer, R. (1986), «Growth stresses and strains in trees». *Springer Series in Wood Science, New York*.
- Barnacle, J.G, Gottstein, J.W. (1968), "Control of end splitting in round timber". *Forest Products Technical Notes, CSIRO, Australia* n 4, 1-4.
- Barnacle, J. (1972), "Impact damage in felled tress: Sciences notes, with special reference to ring shake". *Forest Products. CSIRO*, Num. 64.
- Fournier, M. (1990), "Mécanique de l'arbre sur pied: maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard". *Thèse de Doctorat en Sciences du Bois*, INP de Lorraine.
- Gerard, J. (1989), "Valorisation technologique des Eucalyptus: une opportunité pour la filière-bois chinoise ?". *Rapport de mission en Chine, 24 mars-9 avril 1989, CTFT*, Nogent sur Marne.
- Gerard, J. (1990), «Mise en place d'une méthodologie de caractérisation des Eucalyptus de plantation à croissance rapide du Congo. 1^{er} et 2^{ème} Rapports intermédiaires de la convention FFN/CTFT, CTFT, Nogent sur Marne, 24 p.
- Gerard, J. (1994), "Contraintes de croissance, variations internes de densité et module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalytus de plantation". *Thèse de Doctorat en sciences du bois*, Université de Bordeaux I.
- Giordano, G., Currò, P., Ghisi, G. (1969), "Contribution of the study of internal stresses in he wood of Eucalyptus. *Wood Science and Technology*, vol 3, 1-13.
- Giordano, G., Currò, P. (1973), "Observations concerning an unusual methods for reducing damage from growth stressses in *Eucalyptus* sawn timber". *IUFRO*, Num. 5.
- Haslett, A.N. (1988), «Handling and grade-sawing plantation-grown Eucalypts». *Forest Research Institute, Bulletin Num 142, New Zealand*, 72 pp.
- Jacobs, M.R. (1939), "The fibre tension of woody stems, with special references to the genus *Eucalyptus*". *Bulletin Commonwealth Forestry Bureau*, Num 22, 37 pp.
- Kauman, W.G. et al. (1995), "Procesing of Eucalyptus". *Commonwealth Forestry Review*, Vol 74 (2), 147-154.
- Kubler, H. (1959), «Studies on growth stresses in trees: 1. The origin of growth stresses and the stresses in transverse direction». *Holz als Rohund Werkstoff*, Num 17 (1) 1-9.
- Kubler H. (1987), «Growth stresses in trees and related wood properties». *Forestry Abstract*, vol.48, n 3, 130-189.
- Ministerio da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas. Direecção Geral das Florestas. (1998). "Inventario Florestal Nacional 1998".
- Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. (2000). "Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006".
- Malan, FS. (1979), "The control of end splitting in sawlogs: A short literature review". *South African Forestry Journal*, Num. 109, 14-18.
- Nicholson, JE. (1973), "Effect of storage on growth stress in mountain ash logs and trees". *Australian Forest*, Num 36.
- Shield, E., Flynn, R. (1999), "Eucalyptus: Progress in higher value utilization. A global review". Robert Flynn & Associates. Economic Forestry Associates. 212 pp.
- Touza, M., (1997), "Posibilidades de transformación de la madera de eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus*)". *Revista del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera*, Num. 0, 18-26.
- Touza, M., Pedras, F. (1998), "Posibilidades de aserrado de eucaliptos con elevadas tensiones de crecimiento". *Revista del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera*, Num. 1, 40-52.
- Vignote, S. et al. (1996), "Estudio de las tensiones de crecimiento de *Eucalytus globulus* Labill en Galicia y su relación con las características de la estación y morfológicas del propio árbol". *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, Vol. 5 (1). 153-165, Madrid.
- Van Wyk, JL. (1978), "Hardwood sawmilling can have a bright future in South Africa", *CSIRO, Special Report Hout* 162.
- Wilhelmy, V., Kübler, H. (1973). "Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses". *Wood Science*, Num 6, 136-142.

 **Manuel C. Touza Vázquez**
 Director del Proyecto
 Jefe de Área de Innovación
 y Tecnología - CIS-Madera



CONSELLERÍA DE INDUSTRIA E COMERCIO

FUNDACIÓN PARA O FOMENTO DA CALIDADE INDUSTRIAL E O
DESENVOLVEMENTO TECNOLÓXICO DE GALICIA



European Commission
Research Directorate-General