



Universitat de Lleida

Propietats químiques, físiques, mecàniques i resistents de la fusta massissa i laminada de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Eduard Correal Mòdol

Dipòsit Legal: L.1318-2013

<http://hdl.handle.net/10803/123825>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



UNIVERSITAT DE LLEIDA

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA AGROFORESTAL
GESTIÓ MULTIFUNCIONAL DE SUPERFÍCIES FORESTALS

PROPIETATS QUÍMIQUES,
FÍSiques, MECÀNIQUES I
RESISTENTS DE LA FUSTA
MASSISSA I LAMINADA DE
CASTANYER DEL SISTEMA
MEDITERRANI CATALÀ



TESI DOCTORAL

EDUARD CORREAL MÒDOL

XXIII DE SETEMBRE DE MMXIII



Universitat de Lleida
Departament d'Enginyeria
Agroforestal

Av. Alcalde Rovira Roure, 191
E 25198 LLEIDA (Catalunya)
Tel. +34 973 70 25 36
Fax +34 973 70 26 73
secretaria@eagrof.udl.cat
<http://www.etsea.udl.cat/dept/ea/>

Dra. María del Carmen Iglesias Rodríguez, DNI 19832941H, professora titular de la Universitat de Lleida, pertanyent al Departament d'Enginyeria Agroforestal, i en qualitat de directora de tesi d'en **Eduard Correal Mòdol**, Enginyer de Forest MSc universitari en Recerca en Sistemes i Productes Forestals.

FAIG CONSTAR

Que **Eduard Correal Mòdol, DNI 43718998T**, ha completat satisfactòriament els estudis de programa de doctorat Gestió Multifuncional de Superfícies Forestals, havent finalitzat la tesi titulada:

PROPIETATS QUÍMIQUES, FÍSiques, MECÀNIQUES I RESISTENTS DE LA FUSTA MASSISSA I LAMINADA DE CASTANYER DEL SISTEMA MEDITERRANI CATALÀ.

Es compleixen els requisits de qualitat i originalitat tant acadèmics com científics exigits per a una tesi doctoral, per la qual cosa s'informa favorablement perquè es procedeixi a la seva presentació a la Comissió de Doctorat de la Universitat de Lleida i al seu dipòsit.



Universitat de Lleida
Departament
d'Enginyeria Agroforestal

María del Carmen Iglesias Rodríguez

Lleida, 11 de juny de 2013

Als meus pares

“Crec que l’objectiu és ajudar les persones a veure les coses més clares (...). El que dóna valor a qualsevol model formal, inclús a la teoria de jocs, és que ens fa possible comprendre amb més claredat alguns dels principis en què es basen els fenòmens respecte quan ens manca un model. No obstant això, es tracta només d’alguns principis bàsics. Hom ha de deixar fora moltes coses, i de ben segur que alguna d’elles serà important”.



ROBERT AXELROD,
Matemàtic, Doctor en Ciències Polítiques,
Prisoner's dilemma
(Poundstone, W; 1992).

Índex

Agraiments	11
Resums	13
Resum	13
Resumen	15
Abstract	17
CAPÍTOL I - Introducció.....	19
CAPÍTOL II - Química i microscòpia de la fusta	61
CAPÍTOL III - Fusta lliure de defectes.....	143
CAPÍTOL IV – Fusta massissa estructural.....	217
CAPÍTOL V - Fusta laminada encolada	275
CAPÍTOL VI - Conclusions	343

Agraïments

En el decurs de la Tesi Doctoral moltes persones i institucions m'han ofert la seva col·laboració i ajut. Sense elles, recórrer aquest llarg i costerut camí hagués estat encara més complicat i, probablement, el cim hagués estat inabastable. Per això vull dedicar unes línies a reconèixer el seu suport i donar-los les gràcies de tot cor.

En primer lloc, a la Carmen Iglesias, la directora de la Tesi. Vas fer possible que acabés l'enginyeria sense haver de fer malabarismes entre plans d'estudi, també vas ser la meva tutora del treball de Màster d'Investigació, i després m'has portat fins aquí. La teva implicació amb els alumnes em sembla exemplar. Gràcies per la paciència, el bon fer, i els savis consells.

A en Jordi Gené i l'Anna Borràs, els meus companys de l'INCAFUST des del 3 de juliol de 2006. Recordo que aquell dia no tenia ni bolígraf. Fins ara ha plogut molt, tant que ha caigut pluja, pedra, calabruix, neu, satèl·lits i meteorits. Han estat molts projectes, viatges, estudis, investigacions, problemes i mals de cap. La Tesi és un reflex del que he viscut i après aquests anys a l'Institut amb vosaltres. Moltes gràcies per confiar en mi.

Al Marcel Vilches, per donar-me un cop de mà en els interminables assaigs i feina de laboratori, escoltar les meves cabòries i, sobretot, per ser-hi dia a dia.

A en Jordi Abrantes, per la valuosa informació derivada del seu Projecte Final de Carrera que em permeté evolucionar més ràpidament i de forma més sòlida en la investigació posterior de les propietats químiques.

A l'Institut Català de la Fusta (INCAFUST) pel suport tècnic i econòmic que ha fet possible aquesta Tesi.

A la Diputació de Barcelona i a l'Obra Social de "la Caixa" pel suport econòmic a l'"Estudi de les propietats bàsiques i resistents de la fusta de castanyer del Montseny". També vull agrair la bona disposició dels propietaris forestals per facilitar la gran quantitat de fusta necessària per dur a terme la investigació.

A l'Obra Social d'Unnim Caixa pel suport econòmic en el projecte "Producció de fusta laminada encolada amb frondoses autòctones".

Als integrants de l'European Science Foundation per donar-me l'oportunitat de participar en les accions COST (European Cooperation in Science and Technology). En elles he tingut l'oportunitat de conèixer el que succeeix més enllà, posar al meu abast tot un món de ciència i tecnologia, i gaudir de fructíferes col·laboracions que han fet possible que aquesta tesi arribés molt més lluny. Concretament vull mostrar el meu agraïment als investigadors de les accions E49 "Processes and Performance of Wood-based Panels", i FP1006 "Bringing new functions to wood through surface modification".

Als investigadors de la Fachhochschule de Salzburg per acollir-me en la magnífica estada científica que vaig dur a terme a Àustria, i especialment per la seva valuosa col·laboració desinteressada.

Al Comité Técnico de Normalización AEN/CTN 56, per validar les tasques dutes a terme amb la fusta massissa estructural, així com al CETEMAS i al CIS per la bona entesa aconseguida en aquest camp.

A tots aquells que, sense esmentar-los explícitament, han contribuït d'una forma o altra posant el seu granet d'arena. Sense vosaltres hagués estat molt més complicat.

I per acabar, he deixat als qui més tinc que agrair, als meus amics, a la meua família, i especialment als meus pares. Sense vosaltres mai hagués pogut arribar fins aquí.

A tots vosaltres, MOLTES GRÀCIES!!!

Resums

Resum

El castanyer és una espècie forestal important dels boscos del Sistema Mediterrani Català que ha estat aprofitada des de temps immemorials. Actualment, arrossega manca de gestió forestal, problemes sanitaris i la pèrdua d'interès econòmic dels productes que tradicionalment se n'han aprofitat. La tesi analitza les propietats de la seva fusta per optimitzar i ampliar les possibilitats d'ús de l'espècie.

En l'estudi es realitza un anàlisi diferencial de la fusta normal i roja per determinar les modificacions provocades per la coloració, l'abast de l'afectació i les seves possibilitats tecnològiques. La investigació es divideix en quatre parts en les quals es caracteritza el material a escales diferents. A la primera s'estudien algunes propietats químiques i microscòpiques, es determinen les causes histològiques que provoquen el roig i s'analitzen les propietats que poden incidir sobre l'encolat. A la segona es caracteritzen les propietats físiques i mecàniques de la fusta massissa lliure de defectes. A la tercera es proposa una metodologia de classificació visual per a la fusta massissa i s'assigna una classe resistent a la fusta estructural de secció rectangular. A la quarta, s'analitzen les propietats mecàniques i el potencial resistent de la fusta laminada encolada fabricada amb aquesta espècie.

Per realitzar la investigació s'han emprat més de tres-cents rolls procedents de cinc forests del Sistema Mediterrani Català. Els assaigs s'han dut a terme seguint els estàndards UNE, EN i TAPPI, a més d'altres tècniques d'anàlisi específiques d'acord amb la finalitat de la investigació. La fusta de castanyer ha demostrat ser apta per a ús estructural essent resistent, molt rígida i lleugera, i idònia per a fabricar fusta laminada encolada. El roig és una coloració provocada per productes de rebuig metabòlic que no altera significativament la majoria de les propietats de la fusta de castanyer.

Resumen

El castaño es una especie forestal importante de los bosques del Sistema Mediterráneo Catalán que ha sido aprovechada desde tiempos inmemoriales. Actualmente, arrastra falta de gestión forestal, problemas sanitarios, y la pérdida de interés económico de los productos que tradicionalmente se han aprovechado. La tesis analiza las propiedades de su madera para optimizar y ampliar las posibilidades de uso de la especie.

El estudio realiza un análisis diferencial de la madera normal y roja para determinar las modificaciones provocadas por la coloración, el alcance de la afectación, y sus posibilidades tecnológicas. La investigación se divide en cuatro partes en las que se caracteriza el material a escalas diferentes. En la primera se estudian algunas propiedades químicas y microscópicas, se determinan las causas histológicas que provocan el rojo, y se analizan las propiedades que pueden incidir sobre el encolado. En la segunda se caracterizan las propiedades físicas y mecánicas de la madera maciza libre de defectos. En la tercera se propone una metodología de clasificación visual para la madera maciza, y se asigna una clase resistente a la madera estructural de sección rectangular. En la cuarta, se analizan las propiedades mecánicas y el potencial resistente de la madera laminada encolada fabricada con esta especie.

Para realizar la investigación se han utilizado más de trescientos rollos procedentes de cinco montes del Sistema Mediterráneo Catalán. Los ensayos se han llevado a cabo siguiendo los estándares UNE, EN y TAPPI, así como otras técnicas de análisis específicas de acuerdo con la finalidad de la investigación. La madera de castaño ha demostrado ser apta para uso estructural siendo resistente, muy rígida y ligera, e idónea para fabricar madera laminada encolada. El rojo es una coloración provocada por productos de rechazo metabólico que no altera significativamente la mayoría de las propiedades de la madera de castaño.

Abstract

The sweet chestnut is an important forest tree species in the Catalan Mediterranean System that has been forested since immemorial times. Nowadays suffers from lack of forest management, sanitary problems, and loss of economic interest on its traditional products. The thesis analyses the wood properties to optimize and widen the usage of the species.

The study carries out a differential analysis between normal and red wood to determine the modifications made by the coloration, the reach of the affection, and its technological possibilities. The research is divided in four parts to characterize the material at different scales. In the first one some chemical and microscopic properties are studied to determine the histological causes of the coloration, the reach of the affection, and its technological possibilities. In the second part the physical and mechanical properties of the clear wood are characterized. On the third part it is proposed a method for visually grading the solid timber with rectangular cross section and a strength class is assigned. On the fourth part there are analyzed the mechanical properties and the potential strength of the sweet chestnut glulam.

In the investigation more than three hundred logs from five forests of the Catalan Mediterranean System were used. Tests were done according to UNE, EN, and the TAPPI standards, as well as other specific techniques according to the objectives of the research. The chestnut wood has proven to be suitable for structural use. It is resistant, very stiff and light, and it is ideal to manufacture glued laminated timber. The red coloration it is caused by metabolic waste products and does not produce significant changes on most properties of chestnut wood.

CAPÍTOL I
INTRODUCCIÓ

Índex

1. El castanyer	23
1.1 Morfologia	23
1.2. Fenologia	26
1.3. Ecologia	26
1.4. Silvicultura	27
1.5. Distribució.....	29
1.5.1. Distribució natural de l'espècie.....	31
1.5.2. Distribució actual de l'espècie	32
1.6. Diversitat genètica i regions de procedència	36
1.7. Les castanyedes a Catalunya en l'actualitat	38
1.8. Indústria i productes derivats del castanyer	40
1.8.1. Indústria no fustera: altres productes i propietats	40
1.8.2. Indústria i productes fusters	41
2. Objectius	45
3. Bibliografia.....	47
Annexos	53
Annex fotogràfic	55

1. El castanyer

Els boscos, i els productes que d'ells se n'obtenen, han jugat una funció cabdal en l'activitat humana d'ençà milions d'anys. El seu aprofitament ha condicionat, juntament amb les condicions ambientals, l'evolució de les masses de forma molt important provocant modificacions en el paisatge, canvis socials, econòmics i culturals en les civilitzacions que vivien al seu voltant. Cada una de les espècies forestals ha tingut el seu paper en aquest procés, i el castanyer europeu (*Castanea sativa*) n'ha tingut un de protagonista en ser un arbre fuster i fructícol a d'excel·lents propietats. Així doncs, el castanyer dels nostres boscos és herència de la gestió silvícola intensa duta a terme durant segles, i conèixer la seva història permet entendre la complexa conjuntura actual de l'espècie.

La fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català, objecte principal d'aquesta tesi, és un material de grans propietats que no ha estat caracteritzat exhaustivament fins al moment. Aquest pas és necessari per determinar el seu potencial i desenvolupar fusta laminada encolada, un dels materials estructurals que es preveu incrementi més la demanda en el futur.

El castanyer (*Castanea sativa*) és una angiosperma de l'ordre dels fagals que pertany a la família de les fagàcies, taxó integrat per vuit gèneres dels que tres es troben als Països catalans: *Fagus*, *Quercus* i *Castanea*. El gènere *Castanea* està format per dotze espècies natives de les zones temperades de l'hemisferi nord, sent-ne les principals *C. sativa* (Europa), *C. crenata* (Japó), *C. mollissima* (Xina) i *C. dentata* (Amèrica del Nord). Per tant, *C. sativa* és l'únic castanyer autòcton dels boscos del Sistema Mediterrani Català (Bolós *et al.*, 1990; Cobos Suárez, 1989; Galán Cela *et al.*, 1998).

1.1 Morfologia

Arbre de gran port, de copa ampla, densa i arrodonida, pot arribar a alçades entre 20 i 35 m. Els individus aïllats, dedicats a la producció de fruit i, per aquest motiu, sotmesos a podes freqüents, presenten un tronc curt, gruixut de diàmetre molt considerable (fins 62m de perímetre) i, en exemplars centenaris, fins i tot buit. En canvi, els individus silvestres que habiten masses espesses, potencialment destinats a la producció fustera, presenten el tronc molt més llarg, esvelt i menys

ramificat. L'escorça canvia amb l'edat, en individus joves de fins a 15-20 anys o en branques de petit diàmetre, és llisa i de color cendra o bruna, després s'esquerda longitudinalment, perd la lluentor i el color s'enfosqueix virant cap al castany.

Branquetes glabres castany-rogenques. Les fulles, més grans a les varietats cultivars que les silvestres, mesuren entre 10 i 25 cm de llarg i entre 5 i 8 cm d'amplada, tenen forma oblongo-lanceolada, vora serrada amb dents agudes i pecíol curt de fins 2 cm. Al néixer estan cobertes de fins pèls sedosos que es conserven a les fulles adultes formant una característica fila sobre la vora, finalment acaben desapareixent quan envelleixen. La nervadura, regularment pinnada, també conserva alguns pèls a les axil·les dels nervis secundaris. Tenen estípules allargades, de color ocre que ràpidament cauen. Durant la maduració la fulla s'endureix i canvia el color des de verd tendre i cendrós fins assolir un verd fosc i llustrós.

Aments masculins portats per un llarg peduncle rígid, s'agrupen en conjunts de fins 5-7 flors. La seva longitud oscil·la entre 13 i 30 cm i el seu diàmetre entre 5 i 7 mm, verds quan joves es tornen grocs a l'antesi. Cada grup porta una bràctea comú i cada flor un perigoni acampanat amb 6 lòbuls i 8-12 (20) estams sobresortints. Tot i que alguns aments poden presentar flors femenines, aquestes es disposen a la base de l'espiga, generalment, en grups de tres (1 a 5) i rodejades per un involucre de bràctees. Cada una duu un perigoni urceolat amb 6-8 lòbuls, presenten de 6 a 0 estils i poden dur alguns estams rudimentaris.

Cúpules de 6-10 cm de diàmetre amb llargues espines eriçonades, verdes a la primavera i de color groguenc a la maduresa, s'obren per 2 o 4 valves alliberant tres fruits, més rarament 2 o 1. Aquenis de 2,5 a 4 cm, una mica aplanats a la base i aguts a l'àpex, la seva forma varia segons el nombre de castanyes contingudes. En cas de ser tres, la central és més petita i presenta les dues cares planes; les dels extrems tenen plana la cara interna i convexa l'externa. Coberta fina, coriàcia i tenaç, llustrosa a l'exterior i vellutada a l'interior, de color bru-roguenc (castany), la base és més clara i l'àpex és pilós. Generalment contenen una sola llavor amb coberta membranosa de color bru o groguenc.

Sistema radicular potent, extens en totes les direccions però poc profund (1-1,5 m), la seva arrel principal atura el creixement quan la copa assoleix el màxim d'altura (Abella, 1996; Castroviejo, *et al.*, 1990; Cobos Suárez, 1989; Font Quer, 1980; Galán Cela *et al.*, 1998; López González, 2002).



Figura 1. Morfologia del castanyer (Thomé, 1885-1905). 1) Bràctea 2) Flor masculina 3) Estams 4) Secció d'antera 5-6) Flors femenines 7) Cúpula i aquenis 8) Aqueni A) Detall d'una branca florida i les seves fulles. Com a curiositat s'aprecia el nom no normalitzat que l'autor li assignà

1.2. Fenologia

Arbre caduc, el castanyer desperta de la parada vegetativa a finals d'abril o principis de Maig. Ara bé, si l'anyada presenta calorades primaverals intenses, fet que malauradament és cada cop més comú els darrers anys, la brotada pot avançar-se a primers d'abril. La floració transcorre de principis de maig a mitjans de juliol i, en aquesta, els aments masculins apareixen un més abans que els femenins. Els caràcters sexuals del castanyer conserven propietats poc evolucionades però, tot i ser una espècie principalment anemòfila, és pol·linitzada en bona mesura per coleòpters. Els fruits es desenvolupen durant l'estiu i a finals de setembre, pels vols de Sant Miquel, maduren les castanyes primerenques, el pic de maduració coincideix amb la festivitat de Tots Sants i els aquenis tardans cauen de l'arbre ben entrat el Novembre vora la festivitat de Sant Martí. El castanyer comença a donar fruits cap als 25 o 30 anys encara que les primeres castanyes, escasses, les dona cap als 10. Presenta contranyada i produeix bones collites cada 3-5 (2-4) anys. Pocs dies després de la recol·lecció dels fruits, abans d'entrar al desembre, l'arbre ja ha perdut totes les fulles per passar l'hivern. El castanyer es reproduïx per llavor i es regenera perfectament per brots de soca i arrel (Abella, 1996; Castroviejo, *et al.*, 1990; Galán Cela *et al.*, 1998; López González, 2002; Masalles, 1988).

1.3. Ecologia

El castanyer necessita climes quelcom humits i temperats, sense fortes sequeres estivals ni grans gelades hivernals, essent molt sensible a les gelades tardanes. Espècie de mitja ombra a la península i de llum a la resta d'Europa prefereix vessants de muntanya fresques i ombrívols però calentes a l'estiu, moment quan forma els fruits. Aquestes condicions les troba a diferents altituds a mesura que canvia la latitud: mentre al nord de la península el podem trobar a nivell del mar, a Catalunya el rang altitudinal va dels 100 m als 1200 m, i a les muntanyes andaluses arriba fins als 1500 o 1800 m. Tot i això, l'alçada preferent de l'espècie a les nostres contrades es situa entre els 400 m i els 750-1000 m, essent les cotes baixes les més favorables per a la producció de fruit. La seva presència ve condicionada per una pluviometria anual generosa sempre superior a 600 mm, essent òptima si assoleix els 1100-1300 mm/m²any. Es cria en sòls solts, sovint sorrencs, humits però mai entollats, amb contingut moderat de matèria orgànica,

d'acidesa forta o molt forta i profunditat superior a mig metre. Es desenvolupen sobre substrats silícis, preferint roques metamòrfiques: pissarra, esquist o gneis. També poden créixer sobre substrat calcari rentat si està altament descalcificat. Espècie de mitja ombra, necessita cobertura durant les primeres fases del seu desenvolupament però espai i llum per obtenir bons creixements i fructificació en edat adulta. En boscos silvestres tendeix a crear masses pures amb escassa presència de sotabosc. La forta presència al sòl de tanins alliberats pels més de 4000 kg/ha de fulles que un castanyar mig genera i l'aspecte ombrívol dels seus boscos en són les causes (Abella, 1996; Álvarez *et al.* 2000; Blanco *et al.*, 2000; Burriel *et al.*, 2000-2004; Castroviejo, *et al.*, 1990; Cobos Suárez, 1989; Galán Cela *et al.*, 1998; Génova i Gracia, 1984; López González, 2002; Masalles, 1988).

1.4. Silvicultura

El castanyer es beneficia en bosc de llavor o bosc de rebrot. Els arbres procedents de llavor mantenen el seu vigor durant períodes de temps més perllongats i poden assolir grans dimensions. Els tanys, per contra, tenen un importantíssim vigor inicial gràcies al sistema radicular preexistent però a la llarga tenen un vigor més reduït essent el tipus de bosc més estès. Els tractaments silvícoles que s'apliquen a les castanyeredes són diversos en funció de la situació inicial de la massa i el grau d'intervenció econòmicament viable, determinat pel valor de mercat dels productes fusters intermedis i finals que s'obtenen de la forest. Tradicionalment, es duien a terme diverses intervencions al llarg del cicle de creixement de la massa per maximitzar la producció de cada clap de bosc. Això era possible per la bona rendibilitat econòmica de les llenyes i aspres que s'obtenien en aquells aprofitaments intermedis. En l'actualitat, a causa del baix valor de mercat d'aquells subproductes, es tendeix a triar els arbres de futur en estadis juvenils de la massa realitzant poques i lleugeres intervencions, a canvi d'arriscar-se a obtenir menys arbres de gran qualitat a la tallada final. La selecció dels arbres de futur cal fer-la segons criteris de vigor, sanitaris, distribució regular i de qualitat tecnològica del fust.

En la gestió silvícola tradicional del bosc de rebrot, es recomanava realitzar una aclarida de tanys entre els cinc i nou anys i una aclarida de millora sobre els quinze. En bosc de llavor les aclarides es duien a terme sobre els vint anys. L'objectiu final per a producció de fusta de qualitat era el d'obtenir 150-250 peus/ha amb uns creixements de 10 mm/any i un coeficient d'esveltesa no superior a 100. En la

producció fustera la duració del torn, més llarg en masses de llavor que de rebrot, mai ha de superar els cent anys ja que a partir d'aquí al castanyer se li buida el cor. També es recomana no superar els cinquanta anys doncs, més enllà d'aquesta edat, els problemes de decaïment, clivelles i cullerots tenen gran incidència i gravetat. Són habituals tallades finals als trenta o trenta-cinc anys d'edat en castanyeredes de rebrot amb bons creixements i entre vint-i-cinc i trenta si l'estació és de mala qualitat. Torns entre dotze i vint anys són propis de masses destinades a la producció d'aspres, dogues i fusta de petita dimensió. (Álvarez *et al.* 2000; Cobos Suárez, 1989).

A Catalunya els creixements són generalment discrets (Veure Taula 1), les condicions sanitàries sovint deficientes i la qualitat d'estació força variable. En aquest escenari tant advers, l'obtenció de fusta de serra es veu circumscrita a estacions de molt bona qualitat amb soques no envellides i lliures de xancres, i limitada a fusta curta de diàmetre mitjà. Les estacions de qualitat bona o mitjana i amb baixa afectació per xancres poden ser rendibles si es destinen a la producció de barramenta i s'hi aplica una baixa inversió en gestió. Les estacions de baixa qualitat no són aptes per a l'obtenció de productes fusters i es veuen abocades a la substitució per pi insigne (*Pinus radiata*) o avet de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) principalment, o altres frondoses com l'alzina (*Quercus ilex*), la surera (*Quercus suber*), el faig (*Fagus sylvatica*) o altres caducifolis nobles com el cirerer (*Prunus avium*), el freixe (*Fraxinus excelsior*) o el roure de fulla gran (*Quercus petraea*, *Quercus humilis*). En tot cas les castanyeredes actuals són aptes per a la producció de fruit sempre que es controli el xancres amb hipovirulència. En localitzacions com la serra del Montnegre el 28% dels rodals no són aptes per a l'obtenció de fusta i el 72% restant només és apte per a la producció de barramenta. Al Montseny i les Guilleries, en canvi, és viable destinar el 50% de les masses a fusta de serra, el 42% a barramenta i es recomana destinar a fruit o canviar l'espècie en el 8% dels rodals (Vericat, 2010).

Taula 1. Dades mitjanes dels castanyers dels boscos de Catalunya (Burriel *et al.*, 2000-2004)

Edat mitjana (any)	Increment radial mitjà (mm)	Diàmetre normal mitjà (cm)	Altura mitjana (m)	Producció de fusta mitjana (t/ha/any)	Existències de fusta mitjanes (t/ha)
16,24	3,75	13,19	10,23	1,63	25,25

A banda dels aprofitaments, el castanyer és una espècie molt longeva que pot assolir edats mil·lenàries i diàmetres extraordinaris com el llegendari "Castagno dei Cento Cavalli" de la província de Catània essent un dels arbres més antics d'Europa i el més gran d'Itàlia (Cobos Suárez, 1989).

1.5. Distribució

El castanyer és una espècie termòfila originària de la Mediterrània Oriental, concretament d'Anatòlia i el Tírrè (Krebs *et al.*, 2004; López, 2002; Masalles, 1988), que buscà, com altres espècies dels gèneres *Quercus*, *Fagus*, *Fraxinus* o *Tilia*, refugi a les zones muntanyoses del Sud d'Europa, incloent les àrees marginals adjacents d'altitud baixa o mitjana, durant les glaciacions ocorregudes al llarg dels darrers 18.000 anys. Durant aquest període prehistòric, en ple paleolític, la distribució de l'espècie a la península Ibèrica es limitava, amb gran probabilitat, a la Serralada Cantàbrica fins arribar als peus dels Pirineus, a l'actual Galícia i nord de Portugal i, segurament, a alguns refugis aïllats de la costa mediterrània del País Valencià (Krebs *et al.*, 2004).

El primer punt d'inflexió en la distribució del castanyer ocorregué aproximadament fa 7.500 anys gràcies al final del període boreal i a la revolució agrícola del neolític, moment en què l'espècie començà a expandir-se molt lentament fora dels refugis on havia quedat reclosa. Malgrat que l'home de l'edat de pedra mai li va dedicar especials atencions silvícoles o agrícoles, doncs, simplement, en recollia els fruits i n'emprava la llenya com feia amb tantes altres espècies, la nova forma d'usar el sòl i les aclarides en busca de combustible realitzades als boscos van poder afavorir l'expansió de l'espècie (Conedera *et al.*, 2004).

Tot i que existeixen evidències arqueològiques que el castanyer s'utilitzava de forma preferent dos mil anys abans de Crist (Conedera *et al.*, 2004), no és fins l'Antiga Grècia, aproximadament cap al segle V aC. (Abella, 1996), quan es desenvolupa el cultiu fruiter de l'espècie encara que de forma subsidiària. La colonització de la Península Itàlica per part dels Antics Grecs dugué al futur Imperi Romà la pràctica del cultiu d'aquesta planta arreu d'Europa, tant és així, que a les zones sota domini Romà que havien estat prèviament colonitzades pels antics grecs, la castanya formava part de la dieta dels seus habitants (Conedera *et al.* 2004). Així doncs, no és casual que el nom "castanya" derivi del llatí *castanea*, mot que prové de la paraula grega *kastanon*, i aquest a la vegada del mot armeni *Kast, o bé, de Kastanís*, ciutat de la riba del Mar Negre on es cultivava aquest arbre en temps remots (López González, 2002). Conedera *et al.* (2004) creuen que el castanyer es va començar a cultivar a la regió Insúbria als principis de l'era cristiana quan es va descobrir que la barramenta era molt útil, versàtil, resistent a l'aigua i, per tant, molt adequada per produir pals per suportar les vinyes dels grans latifundis.

El cultiu del castanyer arribà a la península Ibèrica de la mà dels Romans cap al segle I dC., i en conseqüència també al Sistema Mediterrani Català. L'expansió del cultiu arreu de l'Imperi fou ràpida i lligada a la necessitat de disposar aspres amb què cultivar les vinyes per abastir de vi a les tropes arreu de l'Imperi. Així doncs, l'expansió de l'espècie no es degué al consum del seu fruit sinó a les bones aptituds tecnològiques de la fusta per a estructures i fusteria (Abella, 1996; Conedera *et al.*, 2004; Masalles, 1988).

Ara bé, tot i que la dispersió geogràfica del castanyer ja s'havia produït, no va ser fins l'arribada de l'edat mitjana i l'aparició de l'economia autàrquica de subsistència quan l'espècie prengué un paper importantíssim a les societats, arribant-se a parlar fins i tot de la "civilització de la castanya", fet que provocà l'expansió de l'arbre de forma notable pels nostres boscos. Cal tenir en compte que el fruit del castanyer s'emprava com a substitutiu dels cereals, gràcies a l'alt contingut en hidrats de carboni i altres nutrients, en aquells llocs de muntanya on les collites eren deficientes, i que, entre els segles XVI i XIX, poblacions enteres de muntanyesos d'arreu d'Europa vivien quasi exclusivament d'aquest fruit (Fauve-Chamoux, 2000), o que, ben entrat el segle XX encara fos habitual emprar les castanyes per fer farina panificable a les nostres contrades (Masalles, 1988). A la Catalunya del segle XVIII, a més del seu ús alimentari, esdevingué clau en les exportacions ultramarines d'olis i vins ja que aquest era emprat per fabricar bótes i carretells (Boada, 2003).

En l'actualitat, la realitat de l'espècie al Sistema Mediterrani Català ha canviat radicalment, sense les penúries alimentàries pròpies d'èpoques passades, els nous cultius de patates i panís (Abella, 1996), l'abandonament generalitzat de la gestió silvícola i l'escassa utilització de la seva fusta ha dut als boscos de castanyer al quasi abandonament de la seva gestió.

Desfent el camí narrat fins ara, s'aprecia com les necessitats de la societat han anat traçant l'evolució del castanyer i amb ella les festes que se'n celebren al seu voltant. De la castanyada tal com coneixem avui en dia, Halloween i algunes revetlles estrofolàries a part, no se'n té constància fins a darreries del segle XVIII (Soler, 2005), i d'igual forma, Joan Amades en el seu *Costumari Català* (1952) no en fa cap esment més enllà de 1792. Ambdós autors coincideixen en afirmar que el Cristianisme adoptà de mà dels Romans el costum i la litúrgia pagana de visitar els morts en aquella diada, al seu torn, l'imperi seguí amb la festivitat Celta que

marcava l'inici del seu any lunar: moment que s'encorralava el bestiar per passar l'hivern i es celebrava la darrera collita de l'any, la de la castanya.

Per tant, tenint en compte la intensa gestió antròpica suportada per l'espècie al llarg dels darrers mil·lennis, és necessari distingir entre la distribució natural pròpia del castanyer i els llocs fins on s'ha escampat durant la història fruit de l'acció humana.

1.5.1. Distribució natural de l'espècie

Determinar la distribució natural de l'espècie és quelcom complex ja que l'espècie ha estat estesa per la humanitat al llarg de la història. De tota forma, els registres palinològics (Bioversity International, 2008) i altres autors com Krebs *et al.* (2004) defensen que la distribució natural del castanyer correspon als refugis on restà confinat durant les glaciacions: macroregions amb microclimes favorables dispersos arreu de la seva geografia. Aquestes zones són:

- La costa sud del Mar Negre, una àrea extensa que inclou dos centres principals, un a les vessants sud del Caucas i un centre secundari al Bòsfor que probablement arribava al sud-est de Bulgària.
- La Península Itàlica, un àrea amb un centre dual al centre i al sud estenent-se entre l'estret cinturó muntanyós de les crestes dels Apenins i la costa Tirrena. També és contempla una possible extensió cap al nord abastant els Apenins de la Ligúria, el Piemont, l'Emília-Romanya i, potser, el Departament francès de l'Isère.
- Les muntanyes dels Pre-Alps situades a l'est del Llac de Garda al nord d'Itàlia.
- La península Ibèrica on quedà relegat en dos localitzacions discontinues. La més important abastava des dels Picos de Europa tot resseguint la Serralada Cantàbrica fins al País Basc Francès, i la segona, ocupava l'actual Galícia i el nord de Portugal.
- La Península Balcànica amb un centre al sud de Grècia i un segon dispers per Macedònia i el sud-oest de Bulgària.
- L'Orient Pròxim, concretament a les muntanyes de la zona costera del nord-oest de Síria i, possiblement, del Líban.

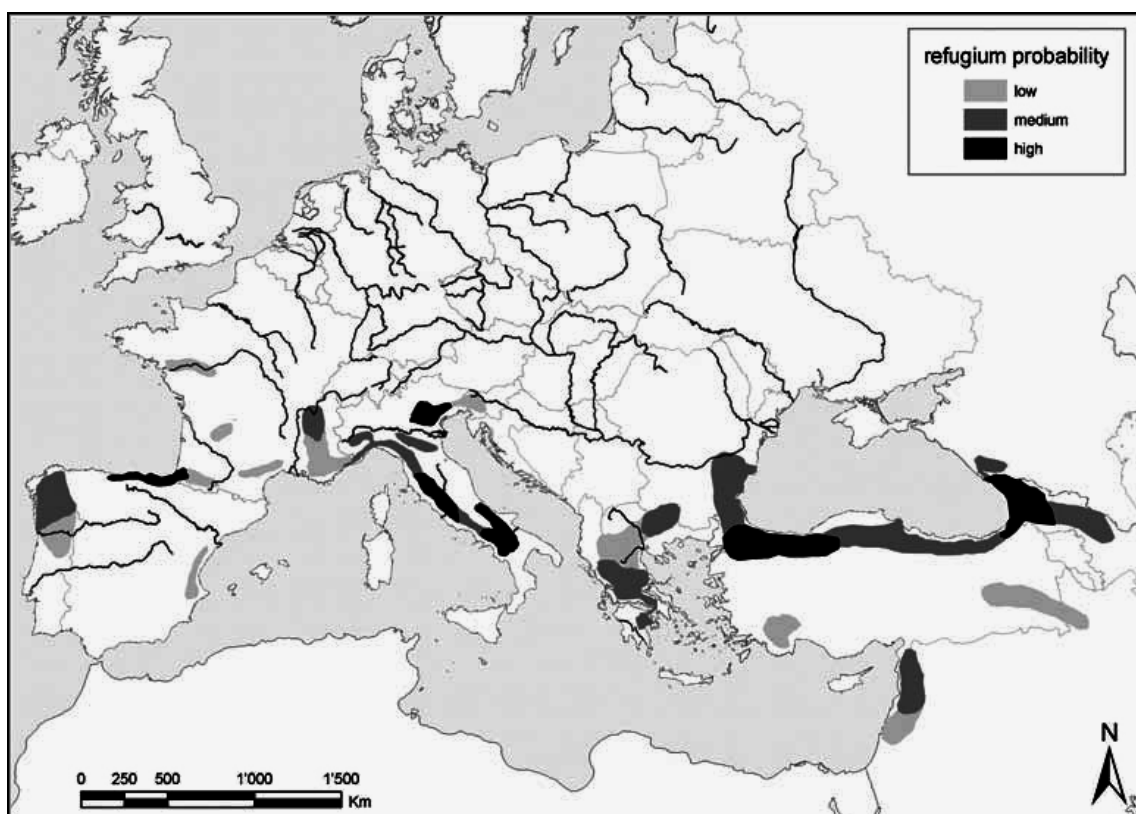


Figura 2. Principals refugis glacials del castanyer a l'era quaternària atenent la seva probabilitat (Krebs *et al.*, 2004)

1.5.2. Distribució actual de l'espècie

La distribució actual del castanyer europeu és producte de la intensa acció antròpica que ha patit l'espècie, aquest fet ha incrementat notablement la seva extensió duent-la fins a llocs força allunyats de la distribució original. Fins i tot, una de les zones amb major presència d'aquest arbre en l'actualitat, el centre i l'oest de França, no està entre els refugis glacials del quaternari arreu d'Europa (Veure Figura 3 i Taula 2).

Taula 2. Distribució del castanyer a Europa (Militz *et al.* 2003)

País	Superfície (ha)
França	1000000
Itàlia	650000
Espanya	130000
Portugal	32000
Regne Unit	30000
Suïssa (Ticino)	25000
Grècia	17000
Alemanya	2000

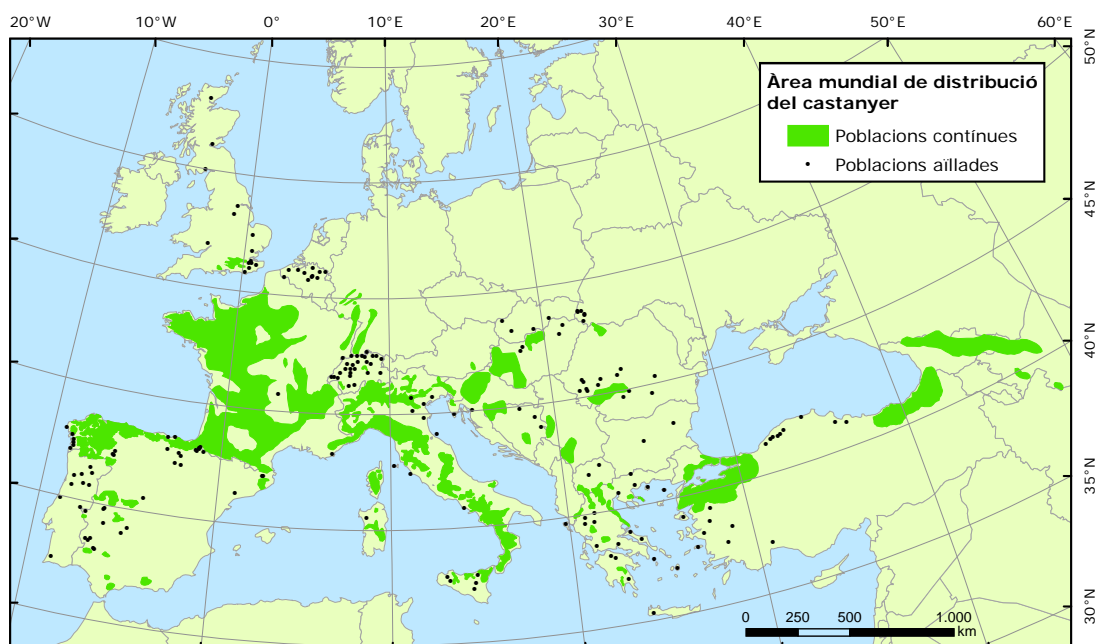


Figura 3. Àrea mundial de distribució del castanyer (*Castanea sativa*). Poblacions naturals i naturalitzades (Bioversity International, 2008)

Castanea sativa és una espècie mediterrània que s'estén principalment pel centre i sud del continent europeu i la Península d'Anatòlia. El rang de distribució longitudinal (25° W fins 50° E) s'estén des del Mar Caspi a l'Atlàntic incloent les petites Illes Canàries, Açores i Madeira. El seu abast latitudinal va des de les costes mediterrànies de Tunísia i Marroc (37° N) fins al sud d'Anglaterra (51°N) (INIA, 2008; Fernández-López y Alía, 1999; Bioversity International, 2008). A la península Ibèrica s'hi troben sis nuclis de població principals, essent el més important el que s'estén des de Galícia fins al litoral basc, coincidint amb les regions humides i fresques del nord peninsular (INIA, 2008; García Esteban *et al.*, 2003) (Figura 4):

- Costa atlàntica nord i serralades septentrionals: litoral gallec, muntanyes i altiplans interiors de Galícia, província de Lleó, província de Zamora, litoral asturià, litoral càntabre, vessant septentrional i meridional de la serralada cantàbrica, litoral basc, muntanyes del País basc, i petites poblacions al Sistema Ibèric i la Serralada del Moncayo.
- Sistema Mediterrani Català: Serralada Litoral, Serralada Prelitoral, i Muntanyes de Prades.
- Províncies de Cáceres i Toledo: Sierra de Gata, Sierra de Gredos, Montes de Toledo, Valle del Tiétar, i Sierra de Francia.
- Oest d'Andalusia i oest de Badajoz: Serranía de Ronda, Sierra Morena.
- Serralada Penibètica: Sierra Nevada, Sierra de los Filabres, Valle de Lanjarón, Serranía de Ronda i Sierra de Aracena.
- Illes Canàries: el Hierro, la Palma, la Gomera, Tenerife i Gran Canaria.

Als Països Catalans el trobem, principalment, als massissos litorals de la Catalunya humida i de clima marítim: l'Albera, les Guilleries, el Montseny, el Montnegre i les Muntanyes de Prades. Més esparsament es fa a moltes altres comarques, fins a l'Alt Palancià, vers el S. (Masalles *et al.*; 1988). Aquestes serralades formen el denominat Sistema Mediterrani Català (Fundació Enciclopèdia Catalana, 2008), una àrea geològicament molt complexa que abasta tota la zona costanera des del Baix Empordà fins Castelló de la Plana, essent un sistema dual d'alineacions muntanyoses paral·leles que inclou, a Catalunya, la Serralada Litoral Catalana, la Serralada Prelitoral Catalana i els Ports de Beseit i, ja al País Valencià, els Ports de Morella i les Serres del Maestrat. La població que per ben poc apareix des de la Catalunya nord s'estén arreu de la cara nord dels Pirineus i connecta amb la serralada cantàbrica i la resta de França. En total s'estima que el castanyer és present a Catalunya en 27800 ha que contenen aproximadament 1.160.000 m3 de fusta (Burriel *et al.*, 2000-2004) (Veure Figura 5).

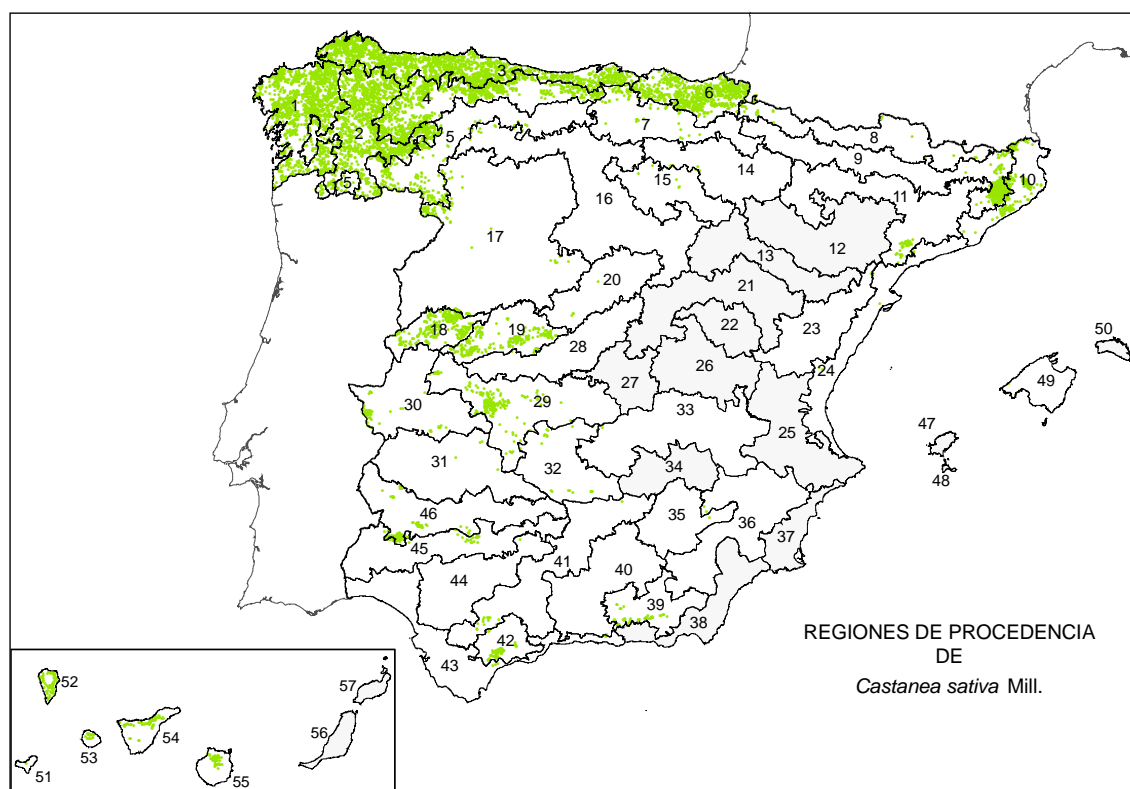


Figura 4. Distribució del castanyer (*Castanea sativa*) a Espanya. Regions de procedència segons el mètode divisiu (Veure Taula 3) (INIA, 2008)

Taula 3. Presència del castanyer a Espanya. Regions de procedència: mètode divisiu (INIA, 2008)

	Regió de procedència. Denominació original	Abundància de castanyer en una regió¹	Regions dins el Sistema Mediterrani Català
1	Galicia litoral	++++	
2	Montañas y Mesetas interiores de Galicia	++++	
3	Litoral astur-cántabro	++++	
4	Vertiente septentrional cantábrica	++++	
5	Vertiente meridional cantábrica-Lomas de La Maragatería	++	
6	Litoral vasco	++++	
7	Montes vasco-navarros	++	
8	Pirineo Axial	+	
9	Prepirineo	+++	X
10	Litoral catalán	+++	X
11	Orla septentrional de la Depresión del Ebro	++	X
12	Depresión del Ebro		
13	Orla meridional de la Depresión del Ebro		
14	La Rioja	+	
15	Sistema Ibérico septentrional-Macizo del Moncayo	+	
16	Páramos del Duero-Fosa de Almazán	+	
17	Tierras del Pan y del Vino	+	
18	Sierra de Gata	+++	
19	Sierra de Gredos	+++	
20	Sierras de Guadarrama-Ayllón	+	
21	Alcarrias		
22	Sierra de Albarracín		
23	Sistema Ibérico oriental		
24	Litoral levantino	+	X
25	Sistema Ibérico meridional		
26	Serranía de Cuenca		
27	Mesa de Ocaña		
28	Cuenca de Madrid		
29	Montes de Toledo	+++	
30	Tajo-Campo Arañuelo	+	
31	Guadiana-Tierra de Barros	+	
32	Campo de Calatrava	+	
33	La Mancha	+	
34	Campo de Montiel		
35	Sierras de Cazorla y Segura	+	
36	Subbética murciana	+	
37	Litoral murciano		
38	Litoral sur-oriental andaluz		
39	Sierras Nevada-Filábres	++	
40	Subbética granadina		
41	Orla meridional de la Depresión del Guadalquivir	+	
42	Serranía de Ronda	++	
43	Litoral meridional andaluz	+	
44	Depresión del Guadalquivir	+	
45	Sierra Morena meridional	+	
46	Sierra Morena septentrional	++	
47	Ibiza		
48	Formentera		
49	Mallorca, Conejera y Cabrera		
50	Menorca		
51	El Hierro		
52	La Palma	++++	
53	La Gomera	+++	
54	Tenerife	+++	
55	Gran Canaria	+++	
56	Fuerteventura		
57	Lanzarote		

¹ Molt abundant: +++++; Abundant: ++++; Poblacions molt disperses: ++; Testimonial: +

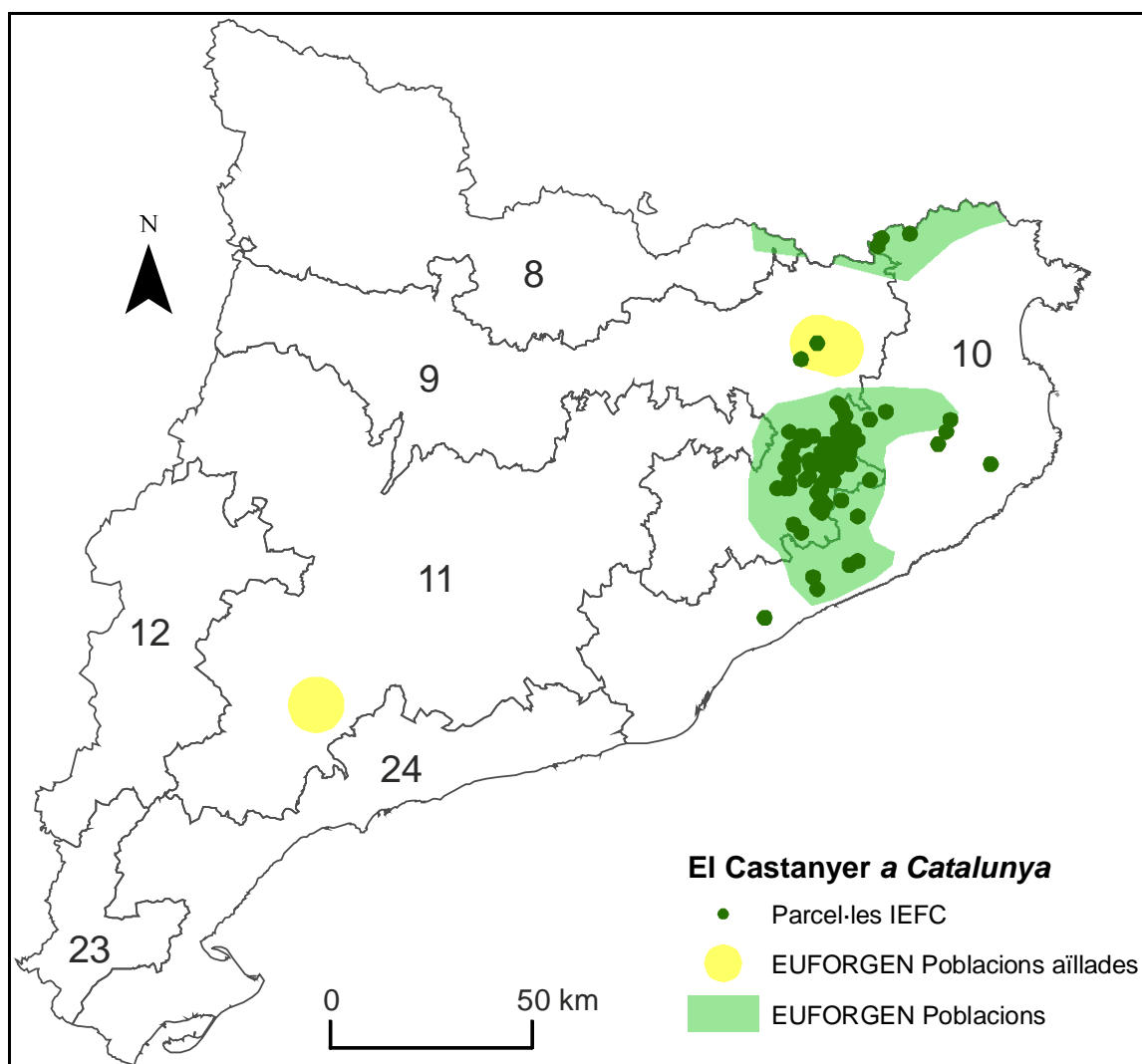


Figura 5. Distribució actual del castanyer (*Castanea sativa*) a Catalunya (Veure Taula 3)
(Bioversity International, 2008; Burriel *et al.* 2000-2004)

1.6. Diversitat genètica i regions de procedència

La diversitat genètica del castanyer europeu és molt àmplia i ha estat generada per dos factors principals: les glaciacions i el maneig antròpic. Segons Krebs *et al.* (2004), la variabilitat natural de l'espècie s'explica amb l'aïllament que patí en els diversos refugis en què restà reclosa durant la darrera glaciació. Aquest fet explica l'existència de poblacions que habiten indrets amb diferents temperatures i règims pluviomètrics. Fernández-López i Alía (1999) han estudiat la variabilitat genètica generada pel maneig humà i classifiquen els tipus de masses de castanyers actuals atenent al seu origen i maneig:

- **Bosc de rebrot:** regenerats per rebrot de soca després de cada aprofitament presenten diversos nivells de regeneració per llavor en funció de la densitat de la massa. La selecció de tanys ha estat un mètode d'aprofitament durant segles i en funció del tipus de les soques fruïteres o naturals, l'estructura genètica de la població pot ser diferent.
- **Horts empeltats:** formats per pocs individus d'alta qualitat fustera i grans productors de castanyes, aquest mètode de cultiu s'ha emprat durant segles obtenint genotips força selectes especialment pel que fa a l'obtenció de fruit. La selecció fustera ha estat molt escassa.
- **Noves poblacions naturals regenerades per llavor:** normalment provenen d'horts abandonats de clons empeltats i es caracteritzen per la poca quantitat de clons i el transport de les llavors per part dels ocells a altres indrets. La deriva genètica pot ser una força evolutiva important en aquest tipus de boscos.
- **Bosc mixtes de castanyer i altres planifolis:** Aquests boscos són probablement els indrets on millor s'ha mantingut la diversitat genètica sense influència humana i inclouen individus marginals destacables. No es coneixen fluxos genètics dins d'un mateix individu ni processos endogàmics. A Catalunya, la principal espècie acompanyant que es troba a les castanyedes és l'alzina (*Quercus ilex*), en segon lloc apareixen el roure martinenc (*Quercus humilis*) i l'alzina surera (*Quercus suber*) i amb molta menor freqüència trobem tot tipus de frondoses i algunes coníferes com l'arboç (*Arbutus unedo*), el cirerer (*Prunus avium*), l'avellaner (*Corylus avellana*), el trèmol (*Populus tremula*), el pinastre (*Pinus pinastre*), el pi roig (*Pinus sylvestris*) o el faig (*Fagus sylvatica*), a més d'altres espècies forestals que generalment no formen masses pures per elles mateixes (Burriel *et al.* 2000-2004).
- **Plantacions:** Provenients d'horts clonals o llavors d'origen desconegut.
- **Poblacions pol·línicament contaminades:** presència de pol·len de *Castanea crenata* o de l'híbrid *C. sativa* x *C. crenata*.
- **Poblacions sota problemes fitosanitaris greus:** Masses arbòries amb forta presència de xancre i/o tinta poden tendir a presentar fenòmens de deriva genètica.

Catalunya no ha restat al marge d'aquests processos i les castanyeredes que trobem avui en dia arreu del país, són sovint masses en estat d'abandó o escassa gestió fructícola i silvícola. L'aspecte naturalitzat d'aquests boscos oculta amb freqüència que són successors de poblacions ancestrals amb una intervenció antròpica intensa durant segles i una important selecció genètica. D'acord amb

aquests arguments s'ha preferit descartar les regions de procedència definides al RD 289/2003 (Espanya, 2003) com a factor d'estudi i acotar la zona d'estudi al Sistema Mediterrani Català, àrea d'influència de la indústria catalana, ja que:

- En la definició de les regions de procedència no es té en compte l'important maneig antròpic sofert per l'espècie. Una regió de procedència és defineix "per a una espècie o subespècie determinada, la zona o el grup de zones subjectes a condicions uniformes on es troben fonts llavoreres o rodals que presenten característiques fenotípiques o genètiques semblants, tenint en compte límits d'altitud, quan procedeixi" (Espanya, 2003: 9263).
- Existeixen dos formes per definir una regió de procedència, el mètode aglomeratiu i el divisiu. El primer s'aplica a espècies de primer ordre identificades i caracteritzades que consten d'un bon mapeig i caracterització genètica. L'altre, s'empra en espècies de segon ordre amb escassa informació bàsica on es discriminen les zones en base a característiques purament ambientals basant-se en la fragmentació successiva d'hàbitats semblants (Alía *et al.*, 2005, Catalán *et al.*, 1.991; Pastorino y Gallo, 2009). Aquest darrer seria el cas del castanyer a Espanya qui comparteix les mateixes regions de procedència amb altres 32 espècies.
- El mètode divisiu definit a Espanya fica dins del mateix sac els Prepirineus i la Serralada Prelitoral (Montseny i Guillerries) i deixa per a una altra procedència la veïna Serra del Montnegre-Corredor. Tot i que aquest pot ser un criteri general vàlid per a altres espècies, no concorda amb les dades de l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (Burriel *et al.* 2000-2004), ja que als Prepirineus catalans no s'hi troba castanyers i als Pirineus i Prepirineus catalans només n'apareixen al municipi aranès de Canejan on el clima és atlàntic i no mediterrani.

1.7. Les castanyedes a Catalunya en l'actualitat

La situació actual dels boscos de castanyer és reflex de l'activitat econòmica relacionada amb l'aprofitament de l'espècie i la gestió silvícola de les masses, combinat amb l'aparició de problemes fitosanitaris severos durant les darreres dècades. A la primera meitat del segle vint i a part de la segona la fusta de castanyer era molt apreciada ja que les seves característiques la feien ideal per a la fabricació de bótes i dogues amb les quals transportar, fins i tot a ultramar, tot tipus de líquids. Bona prova de la importància d'aquest arbre era el fet que se

n'importava d'Astúries, Itàlia o França o que a finals de la dècada dels anys quaranta, d'aquell mateix segle, els problemes associats als boscos de castanyer, un recurs molt preuat a la comarca de la Selva i rodalies, motivessin el naixement del Consorci Forestal de Catalunya a Santa Coloma de Farners amb la idea d'agrupar els propietaris per millorar l'eficiència en la gestió de les seves castanyedes. La crisi però arribà en forma de canvi tecnològic i de mercat: la generalització del plàstic i la desaparició progressiva de la venda a granel acabaren amb el domini del mercat natural de la fusta de castanyer fins aquell moment. L'abandonament progressiu dels aprofitaments i la manca d'actuacions silvícoles feren la resta en deixar via lliure a les malalties fúngiques que tradicionalment havien afectat el castanyer (Boada, 2003; Rovira, 2006). Es pot dir que, la situació és tant preocupant que, fins i tot, es tem per la pèrdua de varietats cultivars ancestrals de castanyes pel mal estat de les seves masses.

Avui en dia la situació dels boscos de castanyer és complexa i delicada, marcada sobretot per l'evolució del xancre i en menor mesura per la tinta. Si bé, moltes de les castanyedes de les zones altes (600 a 1200 m) s'estan substituint a final de torn per plantacions d'abet Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) gràcies als seus generosos creixements (15 m³/ha/any) i el seu port majestuós ideal per proporcionar gran quantitat de fusta de qualitat, no és menys cert que el castanyer encara ocupa bones raconades a les quals cal treure'n profit a causa de les seves característiques i al tracte preferent que ha rebut històricament (Boada, 2003; Rovira, 2006). Malgrat tot, gràcies a la recent expansió de la hipovirulència del xancre, a les possibilitats tecnològiques de la seva fusta i a alguns moviments locals de promoció del seu fruit, hom pot ser optimista vers el futur de l'espècie.

Actualment existeixen prop de 20,6 milions de castanyers a Catalunya essent l'onzena espècie pel que fa a existències en nombre de peus. Amb una distribució reduïda, és present en 28500 hectàrees i domina en altres 12200, es concentra, sobretot, a la zona oest de la comarca de la Selva (8800 hectàrees i 13,5 milions de peus) i a l'est d'Osona (quasi 2 milions més de peus). Present a la resta de comarques gironines també el podem trobar al Vallès Oriental, Maresme i a les Muntanyes de Prades. Amb una productivitat fustera notable de 7,1 m³/ha/any de mitjana (volum amb escorça), les castanyedes s'aprofiten tallant-les arreu aplicant un torn al voltant de 20 anys que és quan els arbres assoleixen la mida de perxes (Burriel *et al.*, 2000-2004).

1.8. Indústria i productes derivats del castanyer

L'interès econòmic del castanyer rau en la capacitat de proporcionar gran quantitat de matèries primeres emprades en processos productius molt diversos. La fusta i el fruit en són les més destacades, però l'escorça i les fulles són una font important de tanins i altres compostos químics (AEIM, 2007; Álvarez *et al.* 2000; Boada, 2003; Collardet *et Besset*, 1988; Centellas *et al.* 2006; Cigalat & Soler, 2.003; Chiej, 1983; Fellner *et al.*, 2007; Navarro i Rodríguez, 2009; Peraza *et al.*, 2.004; Soler, 2006; Ünsal i Kantay; 2009; Walker, 2007) (Veure Figura 6).

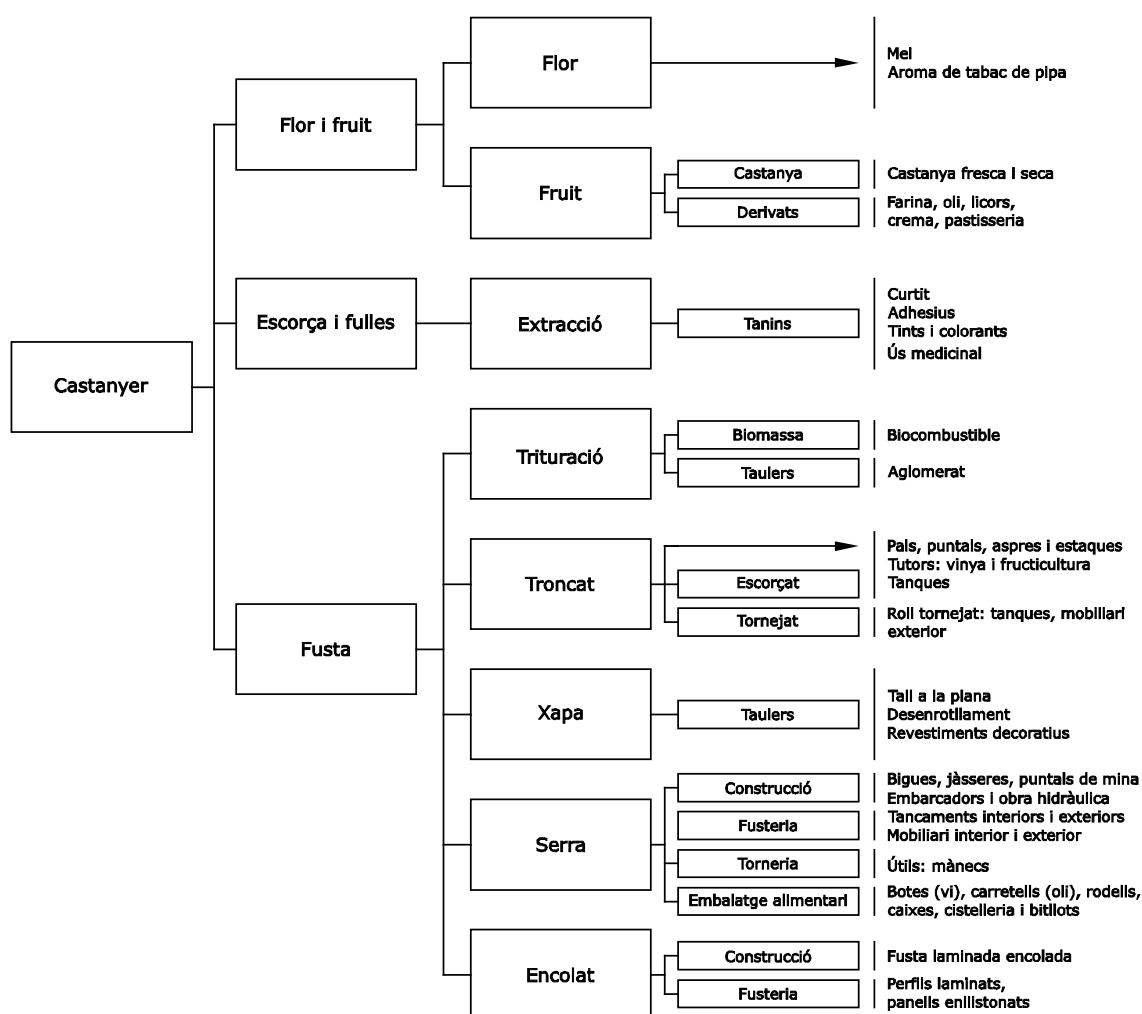


Figura 6. Principals productes derivats del castanyer

1.8.1. Indústria no fustera: altres productes i propietats

Malgrat que els productes no fusters derivats del castanyer (flor, fruit, escorça i fulles) no siguin objecte de la tesi, s'ha cregut convenient esmentar-los per la seva

importància en la nostra cultura i per millorar la contextualització de la situació actual de l'arbre, les seves masses i el seu aprofitament. Malauradament, en l'actualitat la indústria dels productes secundaris del castanyer ha quedat pràcticament desmantellada. Els antics aprofitaments de tanins que abastien les adoberies quedaren obsolets en front la indústria química. Per altra banda, la recol·lecció de la castanya ha minvat significativament per nombrosos motius. En primer lloc, l'abandonament de la gestió silvícola de les masses fruïteres ha provocat la disminució en quantitat i qualitat de les nostres castanyes. No s'ha afegit a la distribució del fruit sota marques de qualitat o denominacions d'origen, i existeix una importació significativa de castanyes d'altres comunitats autònomes espanyoles, Europa i Xina. La resta de productes alimentaris i medicinals es produeixen a petita escala i de forma artesanal. Una bona mostra de tots aquests productes pot trobar-se, per exemple, en fires de caire tradicional com la Fira de la Castanya de Viladrau.

L'escorça, la fusta i les fulles tenen propietats astringents. En infusió s'empren per combatre la diarrea; en forma de glopeig és útil en inflamacions de gola i consolidació de les peces dentals. Les castanyes són el fruit silvestre comestible més nutritiu, però la seva digestió és costosa i produeix contraindicacions si l'alimentació es basa principalment en el fruit. Més concretament, Font Quer (1980) indica que:

“Les fulles de castanyer contenen fins el 9% de matèries tànniques, amb sacarosa, glucosa, glucòsids, matèries grasses i pectíniques, etc. A l'escorça, així com al tronc, es troba àcid castano-tànnic en quantitats variables (fins un 16% segons l'edat de l'arbre). A les castanyes pelades, fresques es troba vora el 50% d'aigua; a les somalles, entre el 16% i 34% de fècula; de 4% a 14% de glucosa; de 7% a 17% de dextrina; i de 8% a 11% de matèries albuminoides” (Font Quer, 1980: 104).

1.8.2. Indústria i productes fusters

Els productes que tradicionalment s'han fabricat amb fusta de castanyer han aprofitat les seves característiques específiques. Assecat delicat. Presenta distribució irregular de la humitat dins les peces i notable tendència a clivellar-se quan el gradient d'humitat dins la fusta és important. Es recomana un assecat previ perllongat a l'aire lliure abans de l'entrada a l'assegador.

La seva llenya és un combustible poc apreciat ja que tendeix a esclatar i projectar petites estelles a causa de la presència de tensions internes. Genera força cendra, s'autoextingeix amb facilitat i desprèn força fum si la caldera no té molt tiratge. Proporciona un poder calorífic escàs per unitat de volum respecte altres frondoses per la seva lleugeresa relativa i per la dificultat i irregularitat de l'assecat (AFNOR, 2012). Malgrat ser una fusta relativament lleugera i amb tanins, aquest comportament fa que Elvira Martín (1984) classifiqui la fusta de castanyer de mida estructural com a de resistència al foc elevada. El carbó que se n'obté és de qualitat mediocre.

El seu contingut en metabòlits secundaris és important i la proporció de tanins és troba entre el 1-2% sobre el pes sec de la fusta en arbres joves i fins el 7-10% en arbres vells. A l'escorça aquest contingut puja fins el 8-14%. La presència d'aquestes substàncies fa que, sobretot en ambients humits, s'hagi de tenir cura en aplicacions mixtes fusta-metall perquè poden aparèixer taques de color blau molt fosc i, a més, l'acidesa de la fusta accelera la corrosió de claus, cargols i ancoratges metàl·lics. Resistent en front fongs i mitjanament durable a les termites, és sensible als anòbids i cerambícids. La impregnabilitat de l'albeca és mitjana, mentre que la penetració dels tractaments al duramen és insignificant. És una fusta durable apta per a ús exterior però es corroeix ràpidament en contacte amb la calç o el ciment. Així doncs amb ella es fabrica moble urbà per a exterior, mobiliari de jardineria (taules i jardineres), tanques i paravents cosits amb filferro, tanques de jardí, tanques de carretera i tutors per a jardineria, bé vinya o fructicultura. Els pals i tutors es poden presentar amb l'escorça, pelats o tornejats.

Es treballa bé en verd encara que presenta tendència a embossar les serres. Amb bona aptitud per al mecanitzat, se'n pot obtenir productes de torneria i xapa a la plana de qualitat per a revestiments per a mobles, portes i armaris. La seva flexibilitat i elasticitat permet utilitzar els rebrots de quatre o cinc anys en cistelleria. El clavat i el cargolat no presenten problemes, i s'encola bé en treballs de fusteria no estructural: portes, finestres, perfils laminats i mobiliari. Es recomana aplicar un tractament de tancament de porus abans d'aplicar productes d'acabat. Accepta bé les tincions.

En l'actualitat la indústria local pràcticament ha abandonat el producte artesanal de castanyer, com les dogues per a carretells, i produeix quatre games de productes segons el nivell de transformació i acabat. De menor grau de transformació a major, la fusta de mala qualitat i petit diàmetre ($\emptyset < 14$ cm) es destina a trituració,

principalment per a bioenergia ja que no és molt apreciada per a taulers aglomerats a causa de l'alt contingut en tanins. Els bastons, aspres i barres, són els segons productes menys transformats. Actualment en crisi, l'escassa demanda es deguda a la forta competència del RTI de pi i altres materials substituïts, així com el desconeixement per part dels consumidors de la seva excel·lent durabilitat natural. La fusta massissa serrada de bon diàmetre es destina a usos estructurals, generalment, bigues, llates i pilars. Amb la fusta de serra de menor diàmetre, però de bona qualitat, es fabriquen plafons enllistonsats, perfils laminats, sòcols i tarimes per a mobiliari, fusteria interior i exterior. La fabricació de bigues laminades segons les especificacions de la normativa estructural vigent es troba en estat incipient però en països com Itàlia s'han realitzat experiències (Abella, 1996; Boada, 1989; Cigalat y Soler, 2003; Collardet & Besset, 1988; Conedera, 2004; Consorci Forestal de Catalunya, 2009; Crous, 2010; Fengel & Wegener, 1989; Galán *et al.*, 1998; Giordano, 1988; Jackson & Day, 1998; López González, 2002; Masalles *et al.*, 1988; Militz *et al.*, 2003; Mundet i Capó, 2007; Peraza *et al.*, 2004; Rovira, 2006; Ünsal i Kantay, 2009; Walker, 2007).

L'evolució de la indústria del castanyer a Catalunya està en franc declivi. L'any 2006 només quedaven cinc de les més de vint-i-cinc serradores que havien existit a la comarca de la Selva en el moment àlgid de producció. El xancre, la substitució de peus per altres espècies i la baixa qualitat de la fusta com a conseqüència d'una mala gestió silvícola de les masses són les causes d'un descens important en el volum de fusta aprofitada. L'any 1977, moment en el que la incidència del xancre comença a ser patent, es serraven 44000 t/any i existia una superfície productiva de 11000 ha repartides arreu del Sistema Mediterrani Català. L'any 1993 la producció s'havia reduït fins a 35000 t/any i es generaven uns 8000 m³/any de fusta acabada. Set anys més tard, la producció ja era de només 30000 t/any. A partir d'aquí el descens ha resultat dramàtic, l'any 2006 es consumien 14000 t/any i la superfície aprofitada, concentrada al Montseny i les Guillerries, era de 5000 ha (Rovira, 2006). Per la seva banda, Navarro i Rodríguez (2009) afirmen que l'any 2009 el consum industrial mitjà de castanyer era de 2158 t/any, repartint la procedència de la matèria primera entre Catalunya (58%) i França (42%) ja que en el país veí els rolls tenen diàmetres més grans, i millor rectitud i qualitat. Tant és així, que el 80% de la fusta que surt actualment de les perxades locals es considera de baixa qualitat.

Taula 4. Productes derivats i classificació qualitativa de la fusta de castanyer segons diàmetre i longitud del roll (Centellas et al. 2006)

Classe	Destí	Diàmetre (cm) ¹		Longitud (m)		Qualitat del tronc
		En peu	Mínim	Mínima	De tall	
Ia fusta (Grume)	<ul style="list-style-type: none"> • Fusta de serra: taulons, perfils laminats • Desenrotllament 	Ø > 38	Ø > 30	L > 3	Tota la llargada disponible per sota del primer nus important o grup de nusos	Tronc recte sense nusos Fusta poc acolorida Absència de defectes: roig o cor rodad
Ib fusta curta (Petites Grumes)	<ul style="list-style-type: none"> • Fusta de serra: parquet i panells enllistonats encolats 	Ø > 38	Ø > 30	L > 3	Tota la llargada disponible fins a diàmetre 30 cm	Tronc gruixut però tort o amb nusos Possibilitat d'obtenir peces de 60 cm mínim Absència de defectes: roig o cor rodad
II biga (Grumette)	<ul style="list-style-type: none"> • Fusta estructural: bigues escairades i perfils laminats encolats 	Ø > 30	Ø > 20	L > 5	Tota la llargada disponible fins a diàmetre 20 cm a la punta prima	Tronc recte i pocs nusos Absència de cor rodad
III biga curta (Bille)	<ul style="list-style-type: none"> • Fusta de serra: parquet, panells i perfils enllistonats encolats 	Ø > 20	Ø > 14	L > 2,5	2,5 m o múltiple de 2,5 m fins a diàmetre 14 cm a la punta prima	Tronc recte i pocs nusos Absència de roig i cor rodad
IV barres (Billon)	<ul style="list-style-type: none"> • Pals: estaques, tutors i tanques agrícoles • Trituració: bioenergia i tauler de partícules 	Ø < 20	12 > Ø > 8	L > 2	Entre 2 i 3,5 m segons comanda	Tronc recte i pocs nusos
Aspres	<ul style="list-style-type: none"> • Pals: tutors • Trituració: bioenergia i tauler de partícules 	Ø < 12	5 > Ø > 3	L > 2	Entre 2 i 3,5 m segons comanda	Tronc recte i pocs nusos
Bastons	<ul style="list-style-type: none"> • Pals: tutors • Trituració: bioenergia i tauler de partícules 	Ø < 20	3 > Ø > 1	L > 2	Entre 2 i 3,5 m segons comanda	Tronc recte i pocs nusos
Restes vegetals	<ul style="list-style-type: none"> • Trituració: bioenergia 	---	---	---	Sense restriccions	Sense restriccions

¹ Els troncs de diàmetre entre 12 i 14 cm i entre 5 i 8 cm no entren dins de cap classe, conseqüentment no tenen cap altra sortida al mercat que la trituració.

2. Objectius

Històricament la fusta de castanyer s'ha utilitzat en la construcció i en nombroses aplicacions amb excel·lents resultats. Tot i això, els coneixements tradicionals no són suficients per complir amb les garanties que el càlcul estructural modern requereix ni per optimitzar la seva utilització. El nou marc normatiu obliga a certificar les propietats de cada espècie i procedència i, per aquest motiu, en aquesta tesi s'escomet una caracterització completa de la fusta de castanyer (*Castanea sativa*) del Sistema Mediterrani Català. Aquest objectiu general s'assolirà a través del següents objectius específics:

- Anàlisi **diferencial** de les propietats de la **fusta roja i normal**.
- Estudi d'algunes **propietats químiques i microscòpiques** i determinació de les causes histològiques que provoquen el roig.
- Caracterització de les **propietats físiques i mecàniques de la fusta massissa lliure de defectes**.
- Caracterització de les **propietats resistents de la fusta massissa** de mida **estructural** proposant una metodologia de **classificació visual** i l'assignació de la **classe resistent** corresponent.
- Anàlisi de les **propietats mecàniques i potencial resistent de la fusta laminada encolada** fabricada amb aquesta espècie.

3. Bibliografia

ABELLA, I. (1996). *La magia de los árboles*. 2ª ed. Barcelona: Oasis. ISBN 84-7901-190-4.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (2012). Marque NF - Biocombustibles solides. NF 444. Paris: AFNOR.

ALÍA MIRANDA, R.; ALBA MONTFORT, N.; AGÚNDEZ LEAL, D.; IGLESIAS SAUCE, S. (2005). *Manual para la comercialización y producción de semillas y plantas forestales. Materiales de base y de reproducción*. Serie Forestal. Madrid: Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio De Medio Ambiente.

ÁLVAREZ ÁLVAREZ, P. [et al.] (2000). *Manual de selvicultura del castaño en Galicia*. Lugo: Escola Politécnica Superior de Lugo. ISBN 84-923583-5-1.

AMADES I GELATS, J. (1952). *Costumari català: el curs de l'any. Vol. V. Tardor*. 3ª ed. Barcelona: Salvat Editores S.A. ISBN 84-345-3673-1.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE IMPORTADORES DE MADERA (2007). *Las 75 especies de madera más utilizadas en España. Monográfico de AEIM nº. 2*. Madrid: AEIM.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1994). *Referencias bibliográficas: contenido, forma y estructura*. UNE 50104:1994. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997). *Madera aserrada y madera en rollo. Terminología. Parte 7: Términos relativos a la estructura anatómica de la madera*. UNE-EN 844-7. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999). *Documentación, tesis, presentación*. UNE 50136:1999. Madrid: AENOR.

BIOVERSITY INTERNATIONAL. EUFORGEN SECRETARIAT (2008, 30 de juny). *European Forest Genetic Resources Programme* [en línia]. [Maccarese [Itàlia]: Bioversity International]. [Consultat: 7 d'agost de 2009]. Disponible a Internet: <http://www.bioversityinternational.org/networks/euforgen/>.

BLANCO, A.; RUBIO, A.; SÁNCHEZ, O.; ELENA, R.; GÓMEZ, V.; GRAÑA, D. (2000). "Autoecología de los castaños de Galicia (España)". *Investigación agraria, sistemas y recursos forestales*, vol. 9, núm. 2: p. 337-361.

BOADA I JUNCÀ, M. (1989). *Els arbres de la regió el Montseny (I). La vida entorn de l'arbre Vol. I*. Barcelona: Publicacions de l'ICE. (Col·lecció Pau Vila; 10). ISBN 84-7665-362-X.

BOADA JUNCÀ, M. (2003). *Boscos de Catalunya: Història i actualitat del món forestal*. Figueres: Brau edicions. ISBN 84-95946-20-3.

BURRIEL, J.A. [et al.] (2000-2004). *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya*. Bellaterra [Barcelona]: CREAF. ISBN 84-931323-0-6.

CASTROVIEJO, S.; LAÍNIZ, M.; LÓPEZ GONZÁLEZ, G.; MONTSERRAT, P.; MUÑOZ GARMENDIA, F.; PAIVA, J.; VILLAR, L. (1990). *Flora Ibérica: Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. Vol. II. Platanaceae-Plumbaginaceae (partim)*. Madrid: Servicio de Publicaciones C.S.I.C.. ISBN 84-00-07034-8.

CATALÁN, G. [et al.] (1991). *Las regiones de procedencia de Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. subsp. Salzmannii (Dunal) Franco en España*. Madrid: ICONA. ISBN 84-8014-004-6.

CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I APLICACIONS FORESTALS (2009). *Mirabosc On Line* [en línia]: Consultes On Line de bases de dades forestals. VAYREDA, J.; IBÀÑEZ, J.J. Cerdanyola del Vallès (Barcelona): CREAF. Disponible a Internet: <http://natura.creaf.uab.es/mirabosc/>.

CENTELLAS CAPSADA, A.; RODRÍGUEZ BAYO, J.; VILA D'ABADAL CASTILLA, E.; PIQUÉ NICOLAU, M.; OBÓN LLEONART, B. (2006). Seguiment dels treballs de millora de castanyeredes durant l'any 2006: Parcs Naturals del Montseny i Montnegre-Corredor. Grup d'Aprofitaments Fusters i Biomassa, Àrea de Gestió Forestal Sostenible, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona. [www.ctfc.cat/docs].

CHIEJ, R. (1983). *Guía de plantas medicinales*. Barcelona: Grijalbo. ISBN 84-253-1506-9.

CIGALAT FIGUEROLA, E.; SOLER BURILLO, M. (2003). *Guía de las principales maderas y de su secado*. València: Ediciones Mundi-Prensa. ISBN 84-8476-149-5.

COBOS SUÁREZ, P. (1989). *Fitopatología del castaño (Castanea sativa Miller)*. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. (Boletín de sanidad vegetal; núm. 16).

COLLARDET, J.; BESSET, J. (1988). *Les bois commerciaux et leurs utilisations: Tome II. Bois feuillus des régions tempérées et froides*. Dourdan: Éditions H. Vial. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. ISBN 2-85-101-027-1.

CONEDERA, M.; KREBS, P.; TINNER, W.; PRADELLA, M.; TORRIANI, D. (2004). "The cultivation of *Castanea sativa* (Mill.) in Europe, from its origin to its diffusion on a continental scale". *Vegetation History and Archaeobotany*, vol. 13: p. 161-179.

CONSORCI FORESTAL DE CATALUNYA (2009). "El futur del castanyer". *Catalunya forestal*, núm. 96: p. 16-17.

CROUS BUSQUETS, J. (2010, 1 setembre). Entrevista personal amb el Gerent de Maderera Gerundense S.A. (MADEGESA).

DE BOLÓS, O.; VIGO, J.; MASALLES, R.M.; NINOT, J.M. (1990). *Flora manual dels Països Catalans*. 2ª ed. Barcelona: Pòrtic. ISBN 84-7306-400-3.

ECO, U. (1986). *Cómo se hace una tesis: técnicas y procedimientos de estudio, investigación y escritura*. 6ª ed. Barcelona: Gedisa. ISBN 84-743-2137-9.

ELVIRA MARTÍN, L. M. (1984). "Respuesta de la madera ante el fuego en la construcción". *Informes de la Construcción*, vol. 35, núm. 358: p. 63-72.

ESPAÑA (2003). Real Decreto 289/2003, de 7 de marzo, sobre comercialización de los materiales forestales de reproducción.

FAUVE-CHAMOUX, A. (2000). "Chestnuts". A: KIPLE, K.F.; CONEË ORNELAS, K. *The Cambridge history of food*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. Vol. I. p. 359-363. ISBN 9780521402163.

FENGEL, D.; WEGENER, G. (1989). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. 2nd ed. Berlin: De Gruyter. ISBN: 3-11-012059-3.

FELLNER, J.; TEISCHINGER, A.; ZSCHOKKE, W. (2007). *I volti del legno: aspetti, descrizioni e parametri di confronto*. Milano [Italia]: Promo legno. ISBN 978-3-902320-47-6.

FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; ALÍA, R. (2003). *Technical guidelines for conservation and use for chestnut (Castanea sativa)*. Maccaresse [Itàlia]: EUFORGEN. International Plant Genetic Resources Institute. ISBN 92-9043-606-9.

FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; ALÍA, R. (1999). "Chestnut (*Castanea sativa*)". A: *Noble hardwoods network. Report of the third meeting. 13-16 June 1998. Sagadi, Estonia*. Roma: International Plant Genetic Resources Institute. p. 21-27. ISBN: 92-9043-403-1.

TAYLOR, P. (1998). "A formal front garden for a country house". A: *Making gardens: essential guide to planning and planting*. Portland, Oregon: Timber Press. p. 24-27. ISBN 0-88192-420-2.

FONT QUER, P. (1980). *Plantas medicinales: El Dioscórides renovado*. 6^a ed. Barcelona: Labor. ISBN 84-335-6151-0.

FUNDACIÓ ENCICLOPÈDIA CATALANA (2008). *L'Enciclopèdia: Sistema Mediterrani Català* [en línia]. [Barcelona: Enciclopèdia Catalana, SAU]. [Consultat: 29 de juny de 2009]. Disponible a Internet: <http://www.enciclopedia.cat/>.

GALÁN CELA, P.; GAMARRA GAMARRA, R.; GARCÍA VIÑAS, J.I. (1998). *Árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares*. Madrid: Ediciones Jaguar. ISBN 84-89960-17-8.

GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA ORAMAS, C.; DE PALACIOS DE PALACIOS, P. (2003). *La madera y su anatomía*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. AiTiM. ISBN 84-86793-91-2.

GÉNOVA FERNÁNDEZ, R.; GRACIA ALONSO, C. (1984). "Anàlisi dendroclimatològic (*Castanea sativa* Mill.) en el macizo del Montseny". *Mediterrànea serie de estudios biològics*, núm. 7: p. 67-82.

GIORDANO, G. (1988). *Tecnologia del legno. Volume III: parte seconda. I legnami del commercio. Seconda edizione.* Torino [Itàlia]: Unione Tipografico-Editrice Torinese. ISBN: 88-02-04125-3.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA AGRARIA Y ALIMENTARIA (2008). *Monografía sobre Regiones de Procedencia en España.* Fichas. Madrid: INIA.

JACKSON, A.; DAY, D. (1998). *Guías CEAC de la madera. Clases de maderas.* Barcelona: Grupo Editorial CEAC. ISBN 84-329-7562-1.

KREBS, P.; CONEDERA, M.; PRADELLA, M.; TORRIANI, D.; FELBER, M.; TINNER, W. (2004). "Quaternary refugia of the sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.): an extended palynological approach". *Vegetation History and Archaeobotany*, vol. 13: p. 145-160.

LÓPEZ GONZÁLEZ, G. A. (2002). *Guía de los árboles y arbustos de la Península Ibérica y Baleares.* Madrid: Grupo Mundi-Prensa. ISBN 84-8476-050-2.

MADERERA GERUNDENSE S.A. (20??). *MADEGESA* [en línia]. [Santa Coloma de Farners: Madegesa]. [Consultat: 31 de març de 2011]. Disponible a Internet: <http://www.madegesa.com>.

MASALLES, R.M. [et al.] (1988). *Història Natural dels Països Catalans: Vol. 6. Plantes superiors.* Barcelona: Fundació Enciclopèdia Catalana. ISBN 84-7739-015-0.

MILITZ, H.; Busetto, D.; HAPLA, F. (2003). "Investigation on natural durability and sorption properties of Italian Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) from coppice stands". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 61, núm. 2: p. 133-141.

MUNDET, R.; CAPÓ, J. (2007). *Guia per a la classificació de la fusta en peu: Aplicacions i transformació de la fusta dels boscos catalans.* Santa Coloma de Farners: Consorci Forestal de Catalunya.

NAVARRO MAROTO, P. J.; RODRÍGUEZ BAYO, J. (2009). *Resum executiu d'anàlisi del mercat de l'espècie *Castanea sativa* (Mill.). Estudi tècnic.* [Solsona]. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.

PASTORINO, M. J.; GALLO, L. A. (2009). "Definición de regiones de procedencia para las especies nativas de mayor potencial de domesticación: resultados preliminares en Ciprés de la Cordillera". A: XIII WORLD FORESTRY CONGRESS. Buenos Aires [Argentina]: FAO. p. 1-7.

PERAZA SÁNCHEZ, F. [et al.]. (2004). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. Madrid: AITIM. ISBN 84-87381.

ROBIN, C.; CAPDEVIELLE, X.; MARTIN, M.; TRAVER, C.; COLINAS, C. (2009). "Cryphonectria parasitica vegetative compatibility type analysis of populations on south-western France and northern Spain". *Plant pathology*, vol. 58, núm. 3: p. 527-535.

ROVIRA I PASCUAL, N. (2006). "Les Castanyedes i el nou panorama forestal". *Catalunya Forestal*, núm. 78 : p. 1-2.

SOLER I AMIGÓ, J. (2005). *Tradicionari: Enciclopèdia de la cultura popular de Catalunya. Vol. 5. El calendari festiu*. Barcelona. Enciclopèdia Catalana. ISBN 84-393-7062-8.

SOLER BURILLO, M. (2006). *Mil maderas*. Valencia: Editorial UPV. ISBN 84-9705-972-7.

THOMÉ, O. W. (1895-1905). *Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz: in Wort und Bild für Schule und Haus. Band 2*. Gera-Untermhaus A: WIKIMEDIA COMMONS (2009, 6 d'agost). *Castanea sativa* [en línia]. [San Francisco]: Wikimedia Foundation. [Consultat 6 agost 2009]. Disponible a Internet: http://commons.wikimedia.org/wiki/Castanea_sativa.

ÜNSAL, Ö.; KANTAY, R. (2009). "Drying and using properties of chestnut wood". A: INTERNATIONAL WORKSHOP ON CHESTNUT MANAGEMENT IN MEDITERRANEAN COUNTRIES. Proceedings of the International Workshop on chestnut management in mediterranean countries. Problems and prospects. Leuven: International Society for Horticultural Science. (Acta horticultrae; 815). p. 179-184. ISBN 9789066051782.

WALKER, A. (2007). *Enciclopedia de la madera*. Barcelona: Art Blume S.L.. ISBN 978-84-9801-137-1.

Annexos

Annex fotogràfic



Figura 7. Fulles de castanyer a la primavera



Figura 8. Castanyer al Vilar de Sant Andreu a principis de novembre



Figura 9. Castanyers de la Serra de Prades a finals de novembre



Figura 10. Castanyes madures a principis de Novembre. El Vilar de Sant Andreu



Figura 11. Castanyer de fruit afectat per xancra en un bosc mixt mediterrani de Prades



Figura 12. Eriçó de castanyer a Viladrau



Figura 13. Xancre de castanyer afectat per hipovirulència



Figura 14. Castanyers de fruit abandonats i afectats per xancre a San Hilari Sacalm

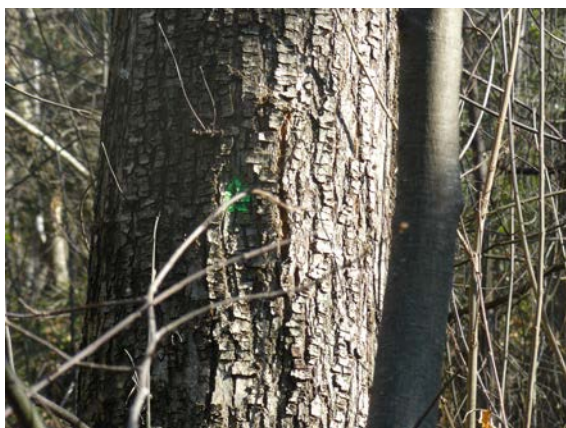


Figura 15. Tronc jove amb l'escorça llisa i vell amb l'escorça clivellada



Figura 16. Castanyerada del Vilar de Sant Andreu. Vilanova de Sau. Les Guilleries



Figura 17. Castanyerada de Can Preses. Sant Iscle de Vallalta. El Montnegre



Figura 18. Castanyerada de Can Prat. Gualba. El Montseny



Figura 19. Castanyerada de Can Planes.
Fontmartina. El Montseny



Figura 20. Marcatge de castanyers a
Can Prat



Figura 21. Aprofitament forestal a
Can Planes. El Montseny



Figura 22. Aprofitament forestal a
Can Planes. El Montseny



Figura 23. Perxada abatuda a la Rocassa.
Espinelves. Les Guilleries



Figura 24. Arbres duts a la pista forestal.
La Rocassa. Les Guilleries



Figura 25. Arbres abatuts. Rols de gran diàmetre a Can Planes. El Montseny



Figura 26. Pila de perxes a Can Preses. El Montnegre



Figura 27. Troncs del Vilar desemboscats fins Sant Hilari Sacalm



Figura 28. Castanyers rebrotats a Can Planes dos anys després de l'aprofitament



Figura 29. Roll marcat amb pintura biodegradable rentada després de dos anys a la intempèrie



Figura 30. Tanca de fusta de castanyer al Montseny

CAPÍTOL II

QUÍMICA I MICROSCÒPIA DE LA FUSTA

Índex

1. Introducció	65
1.1. Química de la resistència de la fusta	65
1.2. Descripció anatòmica de la fusta de castanyer	68
1.3. Principals patologies del xilema de castanyer	69
1.3.1. Tinta	69
1.3.2. Xancre del castanyer	71
1.3.3. Altres patologies fúngiques comuns	72
1.3.4. Roig	73
1.3.5. Cullerots	75
1.4. Efecte de la temperatura sobre les propietats de la fusta	77
2. Objectius	79
3. Materials i mètodes	81
3.1. Procedència de la fusta	81
3.2. Mostra experimental	84
3.3. Tècniques d'anàlisi	85
3.3.1. Determinació del contingut de cendres	85
3.3.2. Anàlisi de la composició elemental de les cendres	87
3.3.3. Determinació del poder calorífic	87
3.3.4. Determinació del pH i capacitat tampó de la fusta	88
3.3.5. Extracció de carbohidrats de baix pes molecular	89
3.3.6. Determinació de la lignina insoluble en àcid	90
3.3.7. Determinació dels extractius solubles no volàtils	91
3.3.8. Extracció de tanins i sòlids solubles en aigua	92
3.3.10. Anàlisi microscòpic	95
3.3.9. Modificació tèrmica: Canvi de color i massa	96
4. Resultats	99
4.1. Contingut de cendres	99
4.2. Composició elemental de les cendres	100
4.3. Poder calorífic	101
4.4. pH i capacitat tampó	101
4.5. Carbohidrats de baix pes molecular	102
4.6. Lignina insoluble en àcid	103
4.7. Extractius solubles no volàtils	104
4.8. Tanins i sòlids solubles en aigua	106
4.9. Anàlisi histològic	106
4.10. Efectes de la modificació tèrmica	111

5. Discussió	115
5.1. Consideracions segons tècnica d'anàlisi.....	115
5.1.1. Contingut de cendres.....	115
5.1.2. Composició elemental de les cendres.....	116
5.1.3. Poder calorífic.....	117
5.1.4. pH i capacitat tampó.....	119
5.1.5. Carbohidrats de baix pes molecular	120
5.1.6. Lignina insoluble en àcid	121
5.1.7. Extractius solubles no volàtils	121
5.1.8. Tanins i sòlids solubles en aigua.....	122
5.1.9. Aspectes histològics.....	122
5.1.10. Efectes del tractament tèrmic sobre el color i la massa.....	123
5.2. Consideracions generals.....	124
6. Conclusions.....	127
7. Bibliografia.....	129
Annexos	137
Annex fotogràfic	139

1. Introducció

Les propietats dels materials es poden dividir en macroscòpiques i microscòpiques i aquestes darreres, en el cas dels teixits vegetals, inclouen les químiques, les físiques i les anatòmiques. En els darrers trenta anys s'han dut a terme nombroses investigacions per relacionar aquestes amb el comportament físic i mecànic de la fusta, però malgrat alguns avenços, encara són desconeguts molts dels principis importants de base que governen aquests vincles. Cada espècie de fusta conté una quantitat i proporció específica de substàncies químiques i, conjuntament amb la morfologia dels teixits expliquen el seu comportament. Hi han diversos exemples. La densitat varia amb la quantitat d'espais buits dins la fusta i això està anatòmicament lligat al tipus de porositat. La longitud de les fibres condiciona fortament la resistència. La desviació que provoquen els radis a les fibres, visible en el pla tangencial, explica la morfologia dels trencaments vers esforços a compressió axial (Herrero Adán, 2012; Moore, 2011; Peraza *et al.* 2004; Rowell, 2005).

Per tant, és plausible que alteracions tant patents com el roig afectin les propietats resistents de la fusta. Determinar el grau d'incidència de la coloració i esbrinar si es tracta d'una modificació química, anatòmica o una patologia, permetria discernir quines són les possibilitats tecnològiques d'aquest material. A continuació es defineixen les propietats químiques i microscòpiques de la fusta de castanyer alhora que es repassen els factors que poden ajudar a explicar aquest canvi de color.

1.1. Química de la resistència de la fusta

La fusta és un material orgànic químicament complex i variable, la seva composició varia entre espècies i, fins i tot, dins d'un mateix individu. Les diferències són degudes a les adaptacions dels teixits dels arbres vers les funcions que han de desenvolupar i l'ambient que els envolta. Es poden esmentar alguns exemples. El duramen presenta una proporció d'extractius molt superior al de l'albeca. El nusos són molt més densos, molt més resinosos en les coníferes i tenen gran quantitat de fusta de reacció, o la fusta de reacció, que es diferencia de la resta del xilema perquè en coníferes (compressió) té una proporció de lignina superior, i en frondoses (tracció) la cel·lulosa hi és molt més abundant i cristal·lina (Barnett and Jeronimidis, 2003). Així doncs, cal tenir en compte que quan es parla de composició, generalment, hom es refereix a dades promig i sempre de fusta lliure de defectes.

Els compostos químics de la fusta són molt nombrosos, però essencialment es poden classificar en estructurals i no estructurals. Els primers són la cel·lulosa, la lignina i l'hemicel·lulosa, els tres polímers més abundants a la terra per aquest ordre. Ubicats a les parets cel·lulars, són macromolècules de cadena llarga insolubles en aigua i confereixen a la fusta la major part de les seves propietats físiques i mecàniques. La cel·lulosa és un homopolisacàrid de cadena llarga, lleugerament plegada amb fraccions cristal·lines i amorfes. Atès l'alt grau de polimerització lineal i a la seva orientació dins de la paret cel·lular, és altament responsable de la resistència dels elements fibrosos que conformen la fusta. Les hemicel·luloses són heteropolisacàrids que actuen com a matriu de les parets cel·lulars gràcies a la seva estructura ramificada. Les lignines són polímers polifenòlics complexos tridimensionals de gran pes molecular, estructura amorfa i comportament anisòtrop. Per extreure-les es requereixen processos químics o mecànics que les despolimeritzin i les solubilitzin parcialment. La seva funció és la de mantenir les fibres unides, actuant com adhesiu entre elements cel·lulars i ciment dins de les parets cel·lulars.

Les substàncies no estructurals, en canvi, són compostos minoritaris de baix pes molecular, alguns són polímers i la seva composició és molt variada. Aquest grup inclou substàncies solubles en dissolvents polars (aigua), com les sals minerals i les proteïnes, i altres que requereixen dissolvents apolars (orgànics) si es volen separar, com els greixos, les resines o els olis essencials. També s'inclouen les cendres, que no són res més que la fracció no volàtil de les sals minerals. Generalment, estan ubicats al lumen, a les cavitats o als canals cel·lulars i la seva funció no està directament relacionada amb les propietats mecàniques de la fusta. Tot i això, influeixen de forma significativa sobre la durabilitat, el pH o les propietats organolèptiques com el color, l'olor o el sabor, etc. (Barnett and Jeronimidis, 2003; Rowell, 2005) (Veure Taula 5 i Figura 31).

Taula 5. Composició química mitjana de les frondoses del sud-est dels Estats Units (Pettersen, 1984; Rowell, 2005)

Components químics				Composició (%)		
				Mitjana	Límits de la mitjana (95%)	
					Inferior	Superior
Carbohidrats	Holocel·lulosa	Cel·lulosa		41,15	41,04	41,67
		Hemicel·lulosa	Glucomanan	2,81	2,76	2,97
			Acetilglucoronoxilà	22,47	22,10	22,24
			Arabinogalactà	1,37	1,33	1,40
			Total	29,10	28,40	28,89
	Pectines		2,18	1,90	1,95	
Lignina				24,32	23,75	24,45
Extractius totals				5,02	4,63	4,91
Cendres				0,41	0,38	0,40

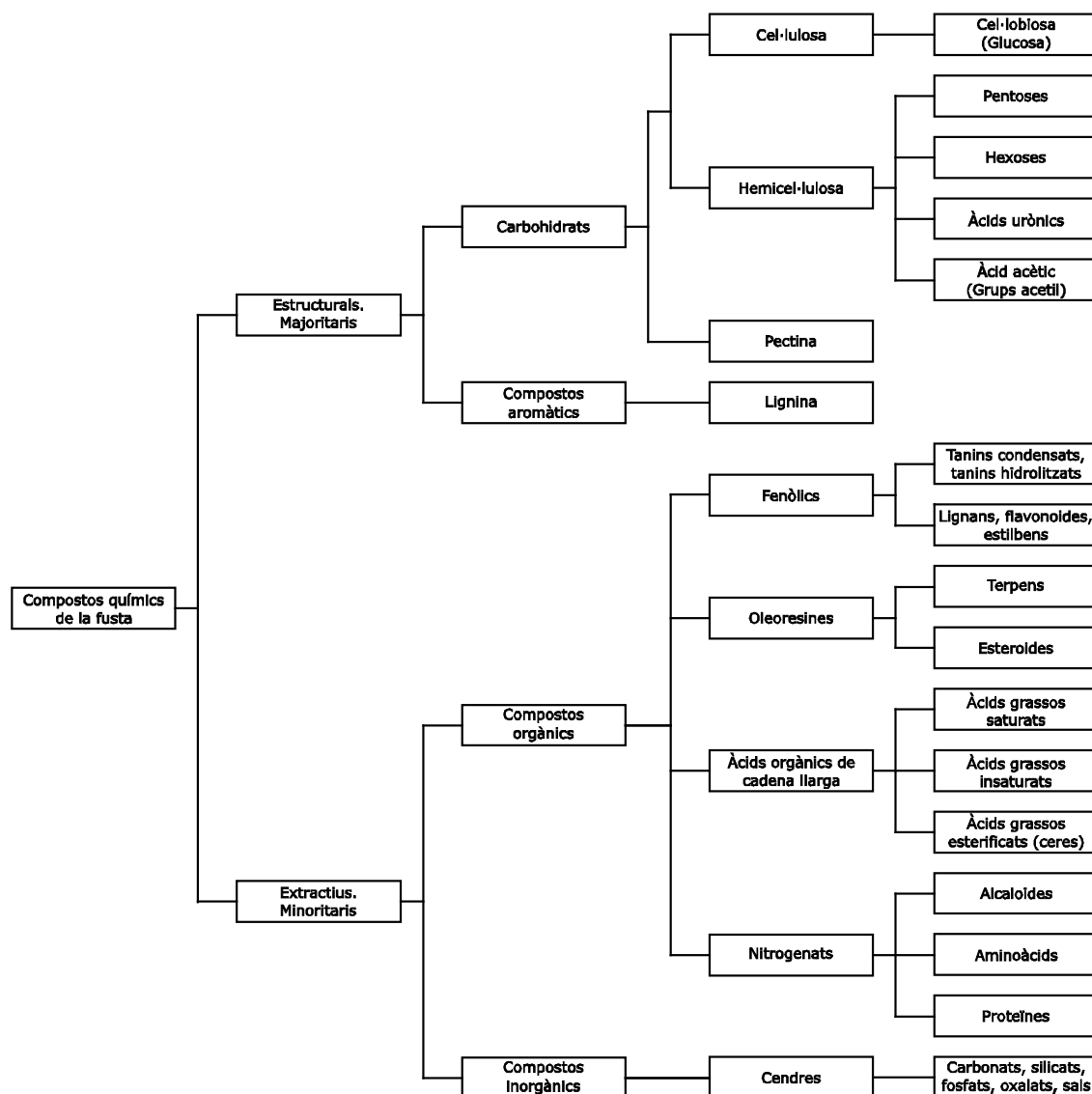


Figura 31. Compostos químics de la fusta (Barnett and Jeronimidis, 2003; Fengel and Wegener, 1989; Higuchi, 1997; Rowell, 2005; Sjöstrom, 1993)

Els elements químics continguts a la fusta són almenys una trentena, però, els que hi són amb major quantitat, són els que s'incorporen en la fotosíntesi: carboni, oxigen i hidrogen. El carboni n'és el més abundant i representa aproximadament la meitat del pes sec de la fusta (50-47%), l'oxigen suposa vora el 44-45% del pes, i el 6% restant és essencialment hidrogen. La resta d'elements són molt minoritaris i es classifiquen com a volàtils i cendres: s'incorporen a la fusta per altres vies metabòliques, provenen del sòl, sovint estan fortament relacionats amb les propietats singulars de cada fusta i, en conjunt, no acostumen a superar el 0,5%-1% del pes total. Els volàtils es gasifiquen en la combustió i, principalment, són el nitrogen i el sofre. Les cendres són el residu sòlid de les combustions i, majoritàriament, contenen calci, potassi, magnesi, fòsfor i manganès i, ja en quantitats molt baixes, altres compostos com clor, sodi, i ferro i metalls pesants

com cadmi, plom, crom, níquel, coure, zenc, silici, alumini o arseni (Burriel *et al.*, 2000-2004; Etiégni and Campell, 1990; Liodakis *et al.* 2009; Misra *et al.*, 1993; Passialis *et al.* 2008; Pettersen, 1984; Rowell, 2005; Serafimova *et al.* 2011).

1.2. Descripció anatòmica de la fusta de castanyer

En el tronc el duramen es diferencia clarament de l'albeca, que ocupa només els cinc o set darrers anells de creixement. El duramen és d'un color semblant al de la palla quan es torna daurada, però l'albeca és més blanquinosa. D'altra banda, la fusta de tardor es distingeix clarament de la de primavera i els anells es distingeixen clarament. El gra és mitjà i una mica bast. La fibra és recta encara que pot estar lleugerament ondulada. En els especejaments tangencials, els vasos de gran diàmetre donen a la fusta un aspecte flamejat malgrat no és tant vistós com el del roure. Desglossant la descripció anatòmica del xilema del castanyer en funció de les tres direccions principals de la fusta s'observen els següents elements (García Esteban *et al.*, 2003; Richter und Dallwitz, 2000; Schoch *et al.*, 2007):

- **Secció radial:** Radis de diàmetre homogeni, entre 9 i 14 per mm² i longitud fins 500-1000 µm. Radis exclusivament uniseriats, no se n'aprecien d'agregats. Radis compostats per un sol tipus de cèl·lula: homocèl·lulars i procumbents. Perforacions simples als vasos de primavera i perforacions escalariformes als vasos de fusta d'estiu. Presència ocasional de cèl·lules marginals quadrades i cristalls en els lleugerament allargats radis marginals. Cristalls prismàtics en cèl·lules del parènquima longitudinal. Presència de fibres libriformes de parets molt fines o d'espessor mitjana i longitud 600-1220-1570 µm, traqueides vasculars o vasicèntriques i absència de fibrotraqueides. Puntejadures radiovasculars arrodonides o angulars de grandària i tipus uniforme amb arèoles reduïdes i aparentment simples. Les puntejades de les fibres es restringeixen majoritàriament a les parets radials o són comuns a les parets radials i tangencials, simples, amb arèoles minúscules o clarament areolades. Fibres no septades. Existència d'idioblasts amb cristalls al parènquima radial.
- **Secció tangencial:** Radis uniseriats, rarament biseriats. Longitud mitjana dels radis: de 10 a 30 cèl·lules. Vaso de diàmetre tangencial mig aproximat de 150-215-250-(300) µm presenten plaques de perforació simples. Es diferencia d'altres fagals com roures o alzines (*Quercus*) per l'absència dels amples radis multiseriats.

- **Secció transversal o axial:** Anells de creixement de gruix irregular i netament diferenciats. Porus disposats en anell, especialment perquè el diàmetre dels vasos de primavera és marcadament superior als formats a la fusta d'estiu: en anells de creixement amples els porus de la fusta de tardor s'agrupen fent zig-zag (flamejat) en grups de 2 a 3 (4) vasos i en nombre superior a 40 mm². Als vasos del duramen els vasos de la fusta de primavera estan obstruïts per abundants tíl·lides de primes parets. Parènquima longitudinal en sèrie de dos tipus: un apotraqueal difús, amb línies curtes tangencials entre radis i l'altre amb bandes tangencials curtes i indistintament uniseriades. Presència ocasional de parènquima paratraqueal vasicèntric. Mitjana de cèl·lules per sèrie de parènquima axial: 2-5. Puntejadures intervasculars alternes de diàmetre mitjà entre 5 i 7 µm. Existència d'idioblasts amb cristalls al parènquima axial.

1.3. Principals patologies del xilema de castanyer

El xilema dels arbres pateix defectes i alteracions amb importants conseqüències tecnològiques a causa de l'acció de fenòmens climàtics severos, l'atac de patògens com nematodes, insectes i fongs, o per simple decaïment provocat per l'edat. El castanyer és un arbre que a les nostres contrades pateix alteracions i patologies com la tinta, el xancre, el roig o els cullerots; cada una d'elles presenta una dinàmica i efectes particulars. Conèixer aquests agents és necessari per tenir en compte en la investigació els factors que limiten la disponibilitat i qualitat de la fusta de castanyer.

1.3.1. Tinta

La malaltia de la tinta és una patologia fúngica radicular causada per fongs de la família de les pitiàcies del gènere *Phytophthora*. Aquest gènere, pertanyent a l'ordre peronosporals, comprèn més de 250 espècies majoritàriament paràsites d'altres saprobits o vegetals. Conté fongs de caire generalista capaços d'hostatjar-se en més de 3000 espècies, entre elles cultius com l'alvocat, la pinya, el préssec, la castanya o la macadàmia, i afecta a gèneres forestals importants com *Castanea*, *Juglans*, *Quercus* i *Betula* (Hardham, 2005; Llimona *et al.*, 1991; Torres Juan, 1993).

El fong es va detectar per primer cop a l'illa de Sumatra l'any 1922 en arbres de la canyella tot i que, es creu, que és originari de Papua Nova Guinea. Propagada per vectors com formigues, ocells i, sobretot, l'acció humana, en l'actualitat el gènere està estès per tot el món. Les espècies més esteses per Europa que afecten al castanyer són vuit: *P. megasperma*, *P. cryptogea*, *P. syringae*, *P. cactorum*, *P. gonapodyides*, *P. citricola*, *P. cambivora*, *P. cinnamomi*. D'aquestes, les tres darreres són les més virulentes, i *P. cambivora* i *P. cinnamomi* en són, de llarg, les més comuns a més de compartir l'àrea de distribució. *P. cinnamomi* fou originàriament detectada a la península Ibèrica a la localitat de Jarandilla (Sierra de Gredos) el 1726 i no fou fins mitjans del segle XIX que es detectà als Pirineus. *P. cambivora*, en canvi, aparegué per primer cop al Piemont (Itàlia) el 1842 propagant-se a continuació per França (Cobos Suárez, 1989; Hardham, 2005; Tainter & Baker, 1996; Vettraino *et al.*, 2007).

P. cinnamomi és capaç de sobreviure com a fong sapròfit en forma de clamidis o oospores en sòls humits fins a 6 anys però ràpidament aprofita les condicions favorables per produir espòrules en grans quantitats i infectar nous hostes. En pocs dies, després que les zoòspores mòbils envaeixin les arrels de la planta, les hifes ramifiquen a través dels teixits, formen esporangis a la superfície de la planta i amplifiquen el cicle de propagació (Álvarez *et al.* 2000; Cobos Suárez; 1989; Hardham, 2005). Inicialment la malaltia es confon amb estrès hídric o deficiència nutricional, però els símptomes més patents en estadis avançats són, per aquest ordre: decadència de l'arbre, clorosis, marciment foliar, aparició de xanques al tronc, disminució en quantitat i grandària dels fruits, podridura del sistema radicular, tinció intensa de la fusta de la base del fust amb exsudacions de color negre-blavós que la fa tecnològicament inservible (Álvarez *et al.* 2000, Hardham, 2005; Torres Juan; 1993). El control del patogen és complex i passa per integrar mesures químiques, culturals i biològiques.

El control químic directe a base de sals insolubles de coure i altres fungicides s'ha demostrat poc eficaç al marge de peus concrets. Per aquest motiu, hom lluita contra la tinta eliminant els peus afectats, realitzant treballs culturals per mantenir les plantes en bon estat nutricional, i amb els sòls correctament drenats. Ara bé, la mesura més efectiva és la de plantar peus resistents obtinguts per hibridació de *C. sativa* amb castanyers xinesos (*C. mollissima*) i japonesos (*C. crenata*) (Álvarez *et al.* 2000; Cobos Suárez; 1989).

1.3.2. Xancre del castanyer

Cryphonectria parasitica, anteriorment conegut com *Endothia parasitica*, és un fong ascomicet de la família de les gnomoniàcies, ordre dels sordarials, responsable de la malaltia comunament coneguda, a casa nostra, pel símptoma més palès que provoca en els arbres parasitats: el xancre. El miceli es propaga pels vasos conductors de saba obstruint-los. En un primer moment es manifesta en forma d'àrees rogenques o ataronjades a les branques joves per posteriorment provocar la mort de branques i tronc. L'arbre sovint produeix rebrots de reacció a la part baixa del tronc que contrasten amb les puntes seques de la copa, fet que atorga a aquests peus un aspecte desgavellat.

Els xancre són la conseqüència visible a l'escorça de l'hoste de la penetració i infecció del fong. Concretament són necrosis corticals del tronc i branques acompanyades d'hipertròfies i esquerdes longitudinals que deriven en malformacions i podridures al xilema. En cas que la malaltia segueixi el seu curs, els xancre anellen l'escorça, l'arbre es debilita i mor irremediament. La conseqüència més palesa de la presència d'aquestes ferides al tronc és la pèrdua de rendiment fuster dels arbres ja que, en eliminar la zona afectada, es redueix la longitud màxima útil aprofitable del canó (Cobos Suárez, 1989; Llimona *et al.* 1991).

La virulència sobre els castanyers és diferent segons l'espècie parasitada. Originari d'Àsia oriental, infecta els castanyers asiàtics (*Castanea crenata*) de forma poc virulenta gràcies a l'evolució conjunta amb l'hoste del que depèn. No és el cas del castanyer americà (*Castanea dentata*) i del castanyer nan americà (*Castanea pumila*), quasi eliminats de tota la distribució original del continent en menys de cinquanta anys a comptar des de la detecció del fong el 1904 al New York Zoological Park. En el cas del castanyer europeu (*Castanea sativa*) la incidència sobre els ecosistemes ha estat menor ja que la malaltia s'ha regulat per ella mateixa (Robin *et al.*, 2009; Tainter & Baker, 1996). A Europa se cita el xancre per primer cop el 1938 a Ligúria (Itàlia), però es creu que el fong havia arribat molt abans ja que en aquella data l'epidèmia ja estava ben establerta als boscos europeus (Robin *et al.*, 2009). La primera referència de l'entrada del fong a Espanya data del 1943 quan s'estengué la malaltia als boscos del país en introduir *C. crenata* contaminat provinent de França per lluitar contra la malaltia de la tinta (*Phytophthora cambivora*). El 1947 és detecta a Biscaia, el 1972 a Galícia, el 1978 al Bierzo i a principis de la dècada dels vuitanta la seva presència a Catalunya era

total (Cobos Suárez, 1989). A finals de la dècada dels 90 del segle XX la malaltia havia destruït completament boscos i horts sencers sense mostrar presència de soques hipovirulentes (Colinas i Uscuplic, 1999).

La lluita contra el fong està condicionada per la facilitat de propagació i supervivència que posseeix. Produeix milions de conidis adherents durant totes les estacions de l'any i utilitza com a vectors el vent, els insectes i, fins i tot, els animals vertebrats. Cal tenir en compte que, si no disposa d'hoste viu, és capaç de sobreviure com a sapròfit. En un primer moment les estratègies de lluita es van centrar en eliminar els peus afectats reiteradament fins aconseguir el rebrot de tanyes sans o, un cop donada per perduda la massa, hibridar els peus nadius amb castanyers asiàtics. Aquestes dues estratègies silvícoles, emprades als inicis de la lluita contra la malaltia, s'han demostrat cares i poc efectives.

Actualment el mètode que dona millors resultats és la lluita biològica amb soques hipovirulentes de *Cryphonectria parasitica*. La hipovirulència és una malaltia contreta pel fong que, en ser infectat per un hipovirus de RNA de doble cadena anomenat CHV1, provoca l'atenuació de la patogènesi en els castanyers i n'evita la mort (Robin *et al.*, 2009). D'aquesta forma el fong debilitat ja no ocasiona més lesions als arbres tractats, impedeix que entrin a la planta noves soques virulentes i, generalment, en alguns mesos els xancres preexistents evolucionen cap a la cicatrització (Cobos Suárez, 1989; Torres Juan, 1993). Ara bé, la lluita biològica és una estratègia dinàmica que ha d'evolucionar amb el patogen ja que cada una de les diverses soques virulentes s'ha de tractar específicament. A finals dels anys noranta es van detectar a Catalunya nou soques diferents de *Cryphonectria parasitica*, essent les més àmpliament esteses pel territori la EU-2 i la EU-5. Malauradament aquestes soques són molt agressives (Colinas i Uscuplic, 1999).

1.3.3. Altres patologies fúngiques comuns

S'han trobat dues plantes paràsites, una cinquantena d'insectes i més de cent fongs de vuit classes diferents que provoquen patologies a diferents parts del castanyer, entre elles el tronc. A més, de les patologies fúngiques descrites fins al moment, l'armillaria (*Armillaria mellea*) i l'antracnosi del castanyer (*Mycosphaerella maculiformis*) són relativament freqüents sobre castanyer. Les dues provoquen atacs poc virulents exceptuant individus prèviament debilitats. Els símptomes són poc específics i, generalment, es confonen amb estrès hídric o manca de nutrients.

En el cas de l'antracnòs, a més, es poden apreciar petites taques brunes de color groguenc a l'anvers de les fulles provocades per la fase imperfecta del fong. Existeixen molts altres fongs amb menor presència que també causen patologies en el castanyer a la península Ibèrica essent els més habituals *Coryneum modonium* i *Cytospora chrysosperma* i *Cylindrosporium castaneicolum*. Les espècies d'insectes més comuns que excaven galeries a la fusta del castanyer són *Lymantria dispar*, *Phalera bucephala* i *Lasiocampa quercus* (Álvarez *et al.* 2000; Cobos Suárez, 1989).

1.3.4. Roig

El cor roig és una tinció de la fusta que enrogeix el duramen del castanyer, i per tant, quasi tota la secció del roll exceptuant la petita franja d'albeca formada pels darrers 3-5 anells de creixement (Veure Figura 32 i Figura 33). Apareix a la base del tronc, especialment a la part que envolta la medulla o a llarg de velles branques atrapades a l'interior del tronc a còpia d'anys de créixer. La seva presència desapareix sovint a les parts intermèdies del canó. Aquesta coloració, fins i tot força intensa en fustes poc decaigudes, pot coincidir amb una aparença esponjosa del xilema en edats avançades, i és molt més comuna en peus d'edat avançada que en perxades joves. Pel que fa als textos de normalització tècnica només s'ha trobat una referència a aquest tipus de patologies. A la norma UNE-EN 844-7 es defineix el fals cor com la "zona interior de la fusta, de color anormal, sovint en una espècie que no presenta contrast de color marcat entre el duramen i l'albeca" (AENOR, 1997:5). Tot i això, tampoc es concreta més enllà.

El cor roig no mostra simptomatologia i aquesta és la raó perquè els arbres infectats poden vegetar durant anys sense aparent afectació o decaïment fins ser abatuts, a vegades, per una ventada o tempesta (Butin, 1995). La presència d'aquest defecte estètic motiva el rebuig tecnològic per part de les serradores, deixant com a únic gran consumidor d'aquest material la indústria de trituració per fer-ne taulers de partícules (Rovira, 2006).

La causa, els símptomes i el desenvolupament de la patologia no estan exhaustivament descrits. Per aquest motiu, és possible que en les descripcions dutes a terme fins al moment s'entengui com una mateixa patologia diferents causes que generen símptomes semblants o, fins i tot, que concorrin alhora diferents desencadenants. A nivell popular hom creu que la causa de l'aparició del cor roig són les sequeres que pateixen les masses de castanyer, opinió que podria

ser compatible amb l'atac fúngic, ja que, en ocasions, certes patologies necessiten sinèrgies amb els factors ambientals per manifestar-se. Un cas que podria ser similar és el del "cor roig del faig", on la tinció del tronc es deu a una irritació química de la fusta iniciada per un o diversos fongs i potenciada per les fredorades (Guindeo i Peraza, 1976).



Figura 32. Fusta raspallada de duramen de castanyer: sana (A) i afectada per roig (B)



Figura 33. Roll de castanyer afectat per roig. Albeca sana, duramen clarament enrogit

Una causa habitual de decaïment a la fusta són els fongs, ja que empen els constituents de les parets cel·lulars del xilema com a nutrients, essent els responsables del tancament del cicle del carboni al medi ambient (Tainter & Baker, 1996). Malauradament no existeix certesa sobre la implicació de fongs en l'aparició del cor roig; la informació és vaga i escassa, el patogen no ha estat mai aïllat i tampoc s'han dut a terme proves de patogenicitat. Només existeixen certs indicis per contrastar sobre la implicació de la gírgola groga *Laetiporus sulfureus* (Colinas, 2010). Aquest fong xilòfag ataca el duramen però no l'albeca i, molt temps després de parasitar l'arbre a través d'alguna ferida, desenvolupa diversos cossos fructífers comestibles de color groc sulfurós de 30 cm de grandària. Altres fongs comuns en el castanyer que podrien provocar la patologia són el fetge de vaca (*Fistulina hepatica*), d'acció molt lenta, i el *Phellinus torulosus*, un bolet de soca pertanyent a un gènere de fongs paràsits que provoquen tincions rogenques i brunes en coníferes i altres frondoses. Es creu que són els responsables del buidament del

tronc en exemplars vells (Castro *et al.* 2010; Cobos Suárez, 1989; Tainter & Baker; 1996).

1.3.5. Cullerots

Els arbres generalment alliberen les tensions internes del tronc mitjançant clivelles radials, però en el castanyer també és freqüent l'aparició de cullerots, també anomenat cor rodat. Aquest defecte apareix en rrelliscar dues capes contigües entre anells en contacte, per la diferència d'esforços interns que superen la resistència del material en aquella direcció. Aquestes ruptures locals ocorren en el pla tangencial de la fusta al llarg de l'eix longitudinal del fust de l'arbre reduint extraordinàriament la quantitat de fusta utilitzable d'un tronc i, en conseqüència, el seu valor econòmic (Fonti i Giudici, 2005; García Esteban *et al.*, 2003; Mutabaruka *et al.*, 2005). Les fractures apareixen principalment al llarg de la fusta de primavera on la presència de vasos de gran diàmetre és abundant. En tot cas, se sap que les espècies de porus en anell com el castanyer, tenen una resistència radial limitada. Altres espècies supleixen aquesta mancança gràcies a la presència de nombrosos radis, ben al contrari del castanyer, que els presenta petits, estrets, heterogenis i uniseriats (Fonti *et al.*, 2002a; García Esteban *et al.*, 2003).

Nombrosos investigadors defensen que les tensions internes estructurals del tronc són la causa principal dels cullerots. En primer lloc, prop de l'escorça existeixen tensions longitudinals i compressions tangencials grans, però no estrès radial. Per contra, prop de la medul·la existeix un alt nivell de compressió longitudinal, tangencial i radial. En segon lloc, en ocasions s'observa que la contracció lineal radial de la fusta de primavera i la de tardor és distinta. Les diferències són apreciables, especialment en anells estrets i en aquells on han aparegut cullerots en els quals la contracció lineal radial pot arribar a ser el doble de gran que la mitjana. Un altre factor determinant és la irregularitat del creixement anual de l'arbre, ja que deriva en una distribució de les forces internes poc equilibrada. Això explica perquè els cullerots tendeixen a aparèixer en els anells que es formaren l'any abans d'una aclarida de tanys o, bé, en arbres de creixement irregular (Fonti *et al.*, 2002b; Frascaria *et al.*, 1992; García Esteban *et al.*, 2003; Spina *et al.* 2009).

Els factors que desencadenen l'aparició dels cullerots són diversos. En primer lloc, poden ser provocats per grans esforços mecànics d'abatiment o l'assecat posterior de la fusta. Altres autors en canvi, pensen que ocorren quan l'arbre encara resta en

peu per esforços mecànics importants produïts per agents externs com el vent, la insolació, els incendis o les glaçades (García Esteban *et al.*, 2003). En aquest sentit, la tradició popular catalana creu que els cullerots es deuen a l'esclat del canviament provocat per la congelació de la saba quan s'esdevenen gelades primaverals tardanes. Aquesta afirmació es basa en la constatació que els lots de fusta provinents de les finques més pregones i fredes, i no pas les que estan a major altitud, són els que presenten una major afectació per aquest defecte. També s'explicaria la forta disminució de cullerots en els darrers trenta anys coincidint amb la suavització dels hiverns tot i la laxitud generalitzada en l'aplicació dels tractaments silvícoles a les castanyedes el país (Crous, 2010). Mutabaruka *et al.*, (2005) coincideixen amb aquesta observació afirmant que el cor rodat està clarament relacionat amb els arbres de brotada tardana i període vegetatiu curt. En tot cas, s'ha observat que el cor rodat és menys present en castanyeres amb bona disponibilitat de nutrients, sòls fèrtils lliures de calç, bona qualitat d'estació, absència de plagues i correcta gestió silvícola. Hom també creu que existeix certa predisposició genètica a patir cullerots, ja que el defecte es concentra en peus concrets i la resistència mecànica té cert component hereditari. Ara bé, la interacció amb els factors ambientals esmentats no ha permès demostrar-ho en els fenotips (Fonti *et al.*, 2002b; Frascaria *et al.*, 1992).

En qualsevol cas hom distingeix dos tipus de cullerots: els "traumàtics" i els "sans", essent aquests darrers els més comuns. Els primers (Overlay), són conseqüència de cicatrius o cèl·lules mortes i representen el 1% dels casos en el castanyer. Els segons sorgeixen en esclatar els vasos de la fusta de primavera immediatament després de l'abatiment i es divideixen en dues categories: despreniment (detachment-shake) i trencament (crack-form). El despreniment apareix en el 15% de les ocasions i és la làmina mitjana cel·lular la que cedeix. En el trencament, en canvi, són les parets cel·lulars les que es trenquen essent el cullerot més habitual amb el 84% dels casos. En tot cas, no es troben diferències anatòmiques significatives entre les ruptures anomenades sanes (Fonti i Macchioni, 2003).

També s'observa que la incidència dels cullerots s'incrementa amb l'edat dels peus (Spina *et al.* 2009). Mutabaruka *et al.* (2005) aconsellen no superar en cap cas els seixanta anys de torn per evitar incórrer en minves inacceptables que perjudiquen enormement el rendiment dels aprofitaments fusters. Sostenen que per sobre de cent vint anys la pràctica totalitat dels castanyers presenten cor rodat, entre els setanta i noranta anys la incidència baixa fins al 72-75%, i entorn als seixanta anys d'edat la patologia comença a estabilitzar-se entorn al 30-40%. En els arbres de

vint-i-cinc a cinquanta anys d'edat els cullerots arriben a afectar entre vint-i-cinc i trenta-cinc individus de cada cent (Mutabaruka *et al.*, 2005).

1.4. Efecte de la temperatura sobre les propietats de la fusta

L'aplicació de temperatures elevades a la fusta provoca un enfosquiment que, aplicat adequadament, pot resultar interessant per homogeneïtzar el color de fustes normals i roges. Si això fos possible, es podria comercialitzar els dos materials indistintament i s'incrementaria la productivitat de l'espècie. En la investigació de Todorović *et al.* (2012), les diferències de color entre l'albeca i duramen rogenc de faig resultaren molt minses després de sotmetre-les a temperatures entre 170°C i 190°C, i a 210°C esdevingueren inapreciables. Per altra banda, existeixen nombrosos estudis que relacionen el color de la fusta de conífera termotractada amb les seves propietats físiques i mecàniques, però mentre alguns autors consideren que el color és un bon indicador (Bekhta & Niemz, 2003; Brischke *et al.*, 2007; Schnabel *et al.*, 2007; Todorović *et al.*, 2012), altres no han trobat relacions tant sòlides (Johanson & Morén, 2006).

Temperatures al voltant de 200°C influeixen, significativament, sobre les propietats físiques, estructurals i químiques de la fusta. Els canvis més patents són el canvi de color i la pèrdua de massa. La disminució de massa s'inicia als 100°C, ja s'aprecia vora els 120°C (0,8%) i és molt substancial sobre els 200°C (8%-15%) (Fengel and Wegener, 1989). Els canvis químics també són importants, la proporció de carboni s'incrementa i la d'oxigen disminueix a mesura que es termodegrada la fusta fins als 350°C (Šušteršič *et al.*, 2009). Entre 100°C i 180°C les holocel·luloses es redueixen del 75% fins al 30%, altres polioses es redueixen a la meitat, les pentosanes quasi desapareixen i la lignina, al ser més estable, s'incrementa del 30% fins al 40%.

La cel·lulosa pateix diverses reaccions a temperatures elevades. Entre 120°C i 160°C incrementa el grau de cristallització, però a partir d'aquí creix significativament el seu caràcter amorf, ja que es trenquen enllaços químics en els sucres, i es succeeixen reaccions d'oxidació i deshidratació. A partir de 200°C aquestes reaccions progressen més ràpidament. La lignina, en canvi, és més estable, però atesa la seva estructura complexa i amorfa travessa primer el punt de transició vítria i esdevé més tova abans. Això explica perquè, malgrat es comença a

modificar per sobre de 100°C i per sobre de 150°C la variació és apreciable, a 400°C només ha perdut un 15% del seu pes. A partir de 200°C es comencen a trencar els enllaços entre les holocel·luloses i la lignina. Aquesta diferència en el comportament vers la temperatura de la cel·lulosa i lignina permet la separació de les fibres en els processos mecànics de fabricació de taulers de fibres, pasta i paper.

A nivell anatòmic el canvi més important és la minva i l'aparició de clivelles a les parets cel·lulars. Aquest comportament es deu a l'assecatge desigual de les tres capes de la paret secundària de les cèl·lules (Aydemir *et al.* 2011; Fengel and Wegener, 1989; Kocaefe *et al.* 2008; Windeisen *et al.* 2009).

El termotractament redueix la higroscopicitat, millora l'estabilitat dimensional, incrementa la durabilitat, però, per contra, pot perjudicar les propietats resistents, especialment la resistència a flexió (Bekhta & Niemz, 2003; Johansson & Morén, 2006; Kocaefe *et al.*, 2008; Kubojima *et al.* 2000; Shi *et al.*, 2007; Šušteršič *et al.*, 2009). Així doncs, considerem que termotractar la fusta de castanyer a 200°C pot ser una via per igualar el color de la fusta sana i roja tot conservant les propietats físiques i mecàniques en gran mesura.

2. Objectius

El capítol analitza les propietats químiques i anatòmiques de la fusta de castanyer procedent del Sistema Mediterrani Català per:

- Caracteritzar algunes propietats tecnològicament significatives.
- Conèixer les alteracions provocades pel roig.

3. Materials i mètodes

3.1. Procedència de la fusta

En la majoria de caracteritzacions de la fusta és habitual partir de taulons ja serrats, però en aquest estudi la selecció de la mostra es realitzà a bosc i sempre sobre fusta en roll. D'aquesta forma es disposa de gran quantitat d'informació sobre l'origen, estat silvícola i morfologia dels peus, i és millora el control sobre la variabilitat. Els següents factors determinaren la selecció de la mostra:

- Representativitat: Es van considerar els següents criteris per disposar d'una mostra suficientment representativa per dur a terme l'estudi.
 - Distribució geogràfica: la mostra es seleccionà entre els espais naturals del Sistema Mediterrani Català on més abunda el castanyer.
 - Estat de la massa: Es va tenir en compte el grau de maduresa i l'estat sanitari. Es van incorporar a la mostra peus procedents de masses de diverses edats i vigor ja que la presència de xancre i altres patologies com el roig són molt freqüents en aquesta espècie. La fusta analitzada sempre era lliure de defectes.
 - Morfologia del tronc: es van seleccionar arbres aptes per a ús estructural. Els rolls eren rectes i ben conformats, en aparença lliures de fusta de reacció, sense estreps ni la conicitat pròpia de la base, i no presentaven branques de gran diàmetre o altres defectes com podridures o xancre.
 - Grandària mostral: Es van escollir 12 arbres per finca. La resta es van emprar principalment en la caracterització estructural i en els altres estudis de la tesi. Al Vilar només es van sorgir 11 arbres roigs.
- Disponibilitat del material: La disponibilitat dels rolls està condicionada per les limitacions pressupostàries i els aprofitaments forestals que es realitzen en una anualitat d'acord a l'execució dels plans d'ordenació. A més, també està supeditada a la col·laboració dels propietaris forestals, a la demanda de fusta del mercat local i, fins i tot, a les condicions meteorològiques ja que poden arribar a impedir un aprofitament programat.

De la Taula 6 a la Taula 10 es descriuen la localització i els aspectes silvícoles de les forests i les mostres d'arbres que prengueren part en els capítols II, III i IV de la tesi. Veieu la localització de les finques a la Figura 34.

Taula 6. Procedència i característiques de la mostra: El Vilar

El Vilar		Descripció
Localització de la forest	Coordenades UTM	31T 455450E 4640675N
	Cota	950
	Indret	Vilar de Sant Andreu
	Municipi	Vilanova de Sau
	Espai natural	Espai natural de les Guillerries-Savassona
Aspectes silvícoles de la massa	Titularitat	Privada (Garolera)
	Orientació	Oest
	Estat de la massa	Massa madura i decaiguda
Mostra d'arbres	Tractament	Tallada final arreu
	Tria dels peus	A pati. Selecció dels peus més afectats per roig
	Nombre de peus	11 assajats de 11 disponibles
	Edat mitjana	40 anys
	Diàmetre mig	229 mm
	Creixement mitjà	5,7 mm/any
Estat del roll	Aparença sana però amb la fusta enrogida	

Taula 7. Procedència i característiques de la mostra: La Rocassa

La Rocassa		Descripció
Localització de la forest	Coordenades UTM	31T 451015E 4636875N
	Cota	907 m
	Indret	La Rocassa. Sot de Vernencs. Tortadès
	Municipi	Espinelves
	Espai natural	Massís de les Guillerries
Aspectes silvícoles de la massa	Titularitat	Privada (Tortadès)
	Orientació	Oest
	Estat de la massa	Massa madura. Bon estat sanitari. Bons creixements i bona conformació dels fusts
Mostra d'arbres	Tractament	Tallada final arreu
	Tria dels peus	A bosc. Arbres abatuts però no apilats
	Nombre de peus	12 assajats de 40 disponibles
	Edat mitjana	26 anys
	Diàmetre mig	217 mm
	Creixement mitjà	8,39 mm/any
Estat del roll	Fusta sana	

Taula 8. Procedència i característiques de la mostra: Can Preses

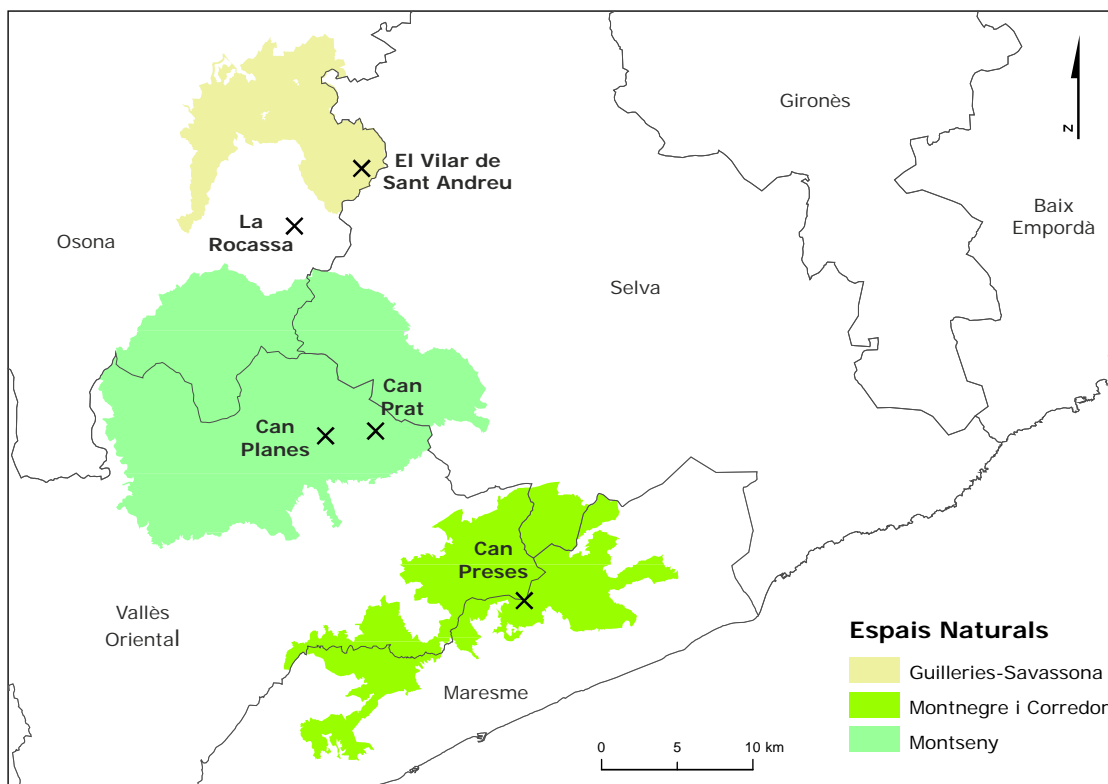
Can Preses		Descripció
Localització de la forest	Coordenades UTM	31T 466177E 4612139N
	Cota	640 m
	Indret	Santa Maria del Montnegre. Can Preses
	Municipi	Sant Iscle de Vallalta
	Espai natural	Parc del Montnegre i Corredor
Aspectes silvícoles de la massa	Titularitat	Pública (Diputació de Barcelona)
	Orientació	Nord
	Estat de la massa	Perxada jove, molt densa, encallada, creixements minsos i gran presència de xancre
Mostra d'arbres	Tractament	Aclarida de perxada. Selecció de tanys
	Tria dels peus	A bosc. Peus apilats a la pista de desembosc
	Nombre de peus	12 assajats de 55 disponibles
	Edat mitjana	18 anys
	Diàmetre mig	120 mm
	Creixement mitjà	6,6 mm/any
Estat del roll	Presència de xancre. Xancre exclosos de la mostra	

Taula 9. Procedència i característiques de la mostra: Can Planes

Can Planes		Descripció
Localització de la forest	Coordenades UTM	31T 453066E 4623022N
	Cota	900 m
	Indret	Can Planes. Pla de la pomera
	Municipi	Fogars de Montclús (Fontmartina)
	Espai natural	Parc Natural del Montseny
Aspectes silvícoles de la massa	Titularitat	Pública (Diputació de Barcelona)
	Orientació	Sud-Oest
	Estat de la massa	Massa vella decaiguda. Estat sanitari molt deficient. Presència de xancre, roig, escoltids i branques seques
Mostra d'arbres	Tractament	Tallada final arreu
	Tria dels peus	A bosc. Selecció i marcatge en peu
	Nombre de peus	12 assajats de 100 disponibles
	Edat mitjana	51 anys
	Diàmetre mig	401 mm
	Creixement mitjà	7,89 mm/any
Estat del roll	Fusta sana. També es van recollir branques	

Taula 10. Procedència i característiques de la mostra: Can Prat

Can Prat		Descripció
Localització de la forest	Coordenades UTM	31T 456345E 4623263N
	Cota	865 m
	Indret	Sot de la Penitenta. Baga d'en Corbera
	Municipi	Gualba
	Espai natural	Parc Natural del Montseny
Aspectes silvícoles de la massa	Titularitat	Privada (Can Prat)
	Orientació	Sud-Est
	Estat de la massa	Perxada jove en estat sanitari excel·lent
Mostra d'arbres	Tractament	Tallada final arreu
	Tria dels peus	A bosc. Selecció i marcatge en peu
	Nombre de peus	12 assajats de 100 disponibles
	Edat mitjana	23 anys
	Diàmetre mig	223 mm
	Creixement mitjà	9,58 mm/any
Estat del roll	Fusta sana	


Figura 34. Espais naturals i ubicació de les finques que han pres part a l'experiment

Les cinc castanyeredes escollides presentaven diferents característiques. Les perxades de Can Prat i La Rocassa eren dues masses regulars, de bona qualitat fustera, amb troncs ben conformats, en excel·lent estat sanitari, i es van aprofitar arreu.

La perxada de Can Preses era una massa jove, molta afectada per xancre, amb creixements minsos i una qualitat d'estació molt baixa a l'estar situada al límit de la distribució altitudinal. S'hi aplicà una aclarida per rebaixar l'alta densitat de perxes de rebrot i afavorir el creixement, però el petit diàmetre dels rolls i el poc vigor no la fan apta per a la producció de fusta de gran diàmetre. La presència del castanyer a tant baixa cota probablement tingui origen en antics aprofitaments fruiters (Cobos Suárez, 1989).

Els peus del Vilar de Sant Andreu pertanyien a un rodal de creixement mitjà discret amb castanyers envellits i presència d'arbres molt enrogits.

Can Planes era també una massa decaiguda, era la més vella i presentava problemes derivats de l'edat, incrementats pel fet d'estar travessada per un circuit senyalitzat del Parc Natural del Montseny on el trànsit de persones afavorí l'expansió del xancre entre els individus. La presència de branques mortes i rebrots de reacció al xancre era abundant.

3.2. Mostra experimental

La fusta examinada en aquest capítol prové en tots els casos de les finques esmentades a la Taula 11. Les mostres s'han seleccionat en funció dels requeriments i possibilitats de cada tècnica analítica. En conseqüència, cada experiment ha estudiat un conjunt de mostres específic.

Taula 11. Mostra de fusta analitzada en el Capítol II

Espai natural	Finca	Descripció de la mostra	Observacions
Montseny	Can Planes	Fusta sana de branques joves Arbre decaigut	Branques sorgides a menys de dos metres d'alçada del terra
		Fusta sana de tronc Arbre decaigut	Metre inferior de la base del tronc Estreps i zona cònica basal rebutjada
	Can Prat	Fusta sana de tronc Arbre jove	Metre inferior de la base del tronc Estreps i zona cònica basal rebutjada
Guilleries	La Rocassa	Fusta sana de tronc Arbre jove	Metre per sobre els 2,4 metres a contar des de la base Part inferior destinada a bigam
	El Vilar de Sant Andreu	Fusta sana de tronc Arbre decaigut	Metre inferior de la base del tronc Estreps i zona cònica basal rebutjada
Montnegre	Can Preses	Fusta sana de tronc Arbre jove amb xancre	Metre inferior de la base del tronc Xancre exclosos de la mostra

3.3. Tècniques d'anàlisi

S'ha escollit una combinació de tècniques diverses per caracteritzar les propietats químiques de la fusta de castanyer. Cal tenir en compte que la caracterització de materials que inclouen gran quantitat de substàncies químiques i diversitat de teixits és força complexa i cal efectuar-la emprant múltiples tècniques específiques que individualment no poden donar una descripció completa. Per aquesta raó, cal emprar diverses tècniques alhora i creuar tot els resultats per extraure'n la màxima quantitat d'informació.

Els procediments d'anàlisi químic permeten obtenir resultats de forma directa o indirecta. És a dir, poden aportar informació sobre una substància determinada o ajudar a deduir la resta a partir dels indicis que aporta el cruament de les dades aconseguides pel conjunt de les tècniques aplicades. A més, també es disposa de la informació bàsica abastament coneguda per interpretar els resultats.

3.3.1. Determinació del contingut de cendres

La determinació del contingut de substàncies inorgàniques no volàtils de la fusta es dugué a terme segons el procediment descrit a la norma TAPPI T 211 om-07 "Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C." (TAPPI, 2007a). Segons l'esmentada norma, la combustió de la cel·lulosa s'esdevé a 300°C i, també segons Misra *et al.* (1993), la quantitat de residus minerals és essencialment la mateixa per a mostres lliures de contaminants en combustions fins a 900°C. Així doncs, a 525°C s'assegura una correcta combustió de la mostra però no la volatilització dels compostos inorgànics.

Abans d'iniciar la combustió cal conèixer acuradament la humitat de la mostra per evitar comptabilitzar el pes de l'aigua com a fusta. La norma TAPPI T 264 cm-97 (Revision) "Preparation of wood for chemical analysis." (TAPPI, 2007c), indica que cal assecat durant dos hores a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ 2g de serradures garbellades en un sedàs de 0,4 mm de llum, fins que la diferència de pes de dues pesades successives separades per una hora sigui inferior al 0,1%. En l'assecat es va emprar una estufa Memmert 100-800. Les pesades es van realitzar en una balança Mettler Toledo XS204 un cop la mostra s'havia refredat en un dessecador.

El procés de combustió consta de dos parts. En la primera, els 2 g de serradures s'assecaren a l'estufa durant 48h a 70°C, es dipositaren en un gresol i, tot plegat, s'introduí en una mufla Carbolite CWF11/23 a 200°C durant 1 h. Treballant d'aquesta forma es va evitar que el material volàtil que s'hagués pogut dipositar a la seva superfície interferís amb les mesures. Un cop tarada la mostra i el gresol s'inicià la combustió. En la segona part del procés, la mostra es diposità en un gresol dins d'una mufla a 100°C i, tot seguit, s'incrementà la temperatura progressivament fins 525°C (Veure Taula 12). Es va evitar en tot moment l'aparició de flama. La mostra romangué a la mufla fins que les cendres foren totalment blanques. L'assaig no té limitacions específiques de temps i s'entén que la combustió s'ha completat totalment quan les cendres són completament blanques i no s'aprecien punts negres carbonitzats.

Taula 12. Rampes de combustió

Segment	Temperatura (°C)		Temps (min)	
	Inicial	Final	Duració	Acumulat
1	Ambient	150	10	10
2	150	180	30	40
3	180	200	20	60
4	200	250	10	70
5	250	300	10	80
6	300	350	10	90
7	350	400	10	100
8	400	450	10	110
9	450	500	120	330

Un cop la combustió fou total, es baixà la temperatura de la mufla fins 60-70°C. A continuació les cendres es traslladaren a un dessecador durant 30 minuts per evitar l'absorció d'humitat mentre es refredaven fins la temperatura ambient. Aquest procediment es va repetir fins que la diferència entre pesades fou inferior a $\pm 0,2$ mg. El percentatge de cendres de la fusta es determina amb l'expressió següent:

$$C = \frac{P_c}{P_0} \cdot 100 \quad (1)$$

On:

C = Percentatge de cendres (%)

P_c = Pes de les cendres (g)

P_0 = Pes anhidre (g)

S'analitzaren quatre mostres de fusta: branques sanes i troncs sans d'arbres decaiguts de Can Planes, troncs sans de Can Prat, i tronc afectat per roig del Vilar de Sant Andreu.

3.3.2. Anàlisi de la composició elemental de les cendres

Les mostres analitzades foren les mateixes sobre les quals es va determinar el contingut de cendres. Per conèixer la composició elemental de la fusta de castanyer, es va realitzar una digestió de cendres amb àcid fluorhídric en un gresol de platí (Veure 3.3.1. Determinació del contingut de cendres). Posteriorment, es va analitzar la mostra amb un equip de ICP-OES de la marca Horiba Jobin Yvon model Activa dels serveis Científicotècnics de la Universitat de Lleida. L'acrònim ICP-OES correspon a Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry, una tècnica analítica que utilitza plasma acoblat inductivament per excitar els àtoms de les mostres. La presència d'elements es determina perquè cada ió emet una radiació electromagnètica amb una longitud d'ona característica, i la intensitat de l'emissió és directament proporcional a la quantitat de l'element a la mostra.

3.3.3. Determinació del poder calorífic

La determinació del poder calorífic net es realitzà segons les especificacions de la norma UNE-EN 14918:2011 "Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico." (AENOR, 2011) mitjançant una bomba calorimètrica adiabàtica. En aquest assaig es mesura el increment de temperatura provocat per la combustió completa d'una mostra en una atmosfera rica en oxigen. La mida de partícula de la mostra es de 0,5 mm, i el seu grau d'humitat és el d'equilibri higroscòpic amb l'ambient. No és necessari que el combustible estigui en estat anhidre. Les mostres procedien de La Rocassa, Can Preses i El Vilar de Sant Andreu. La primera correspon a fusta de tronc d'arbre sa, la segona a fusta de tronc d'arbre afectat per xancre i la tercera a fusta de tronc roig.

En un segon pas, el contingut d'humitat de la mostra es determinà segons la norma UNE-EN 14774-3:2010 "Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general." (AENOR, 2010). D'aquesta forma es pot corregir el

poder calorífic incorporant l'energia consumida per l'evaporació de l'aigua continguda a la fusta.

3.3.4. Determinació del pH i capacitat tampó de la fusta

Per determinar el pH i la capacitat tampó de la fusta es va adaptar a la mostra de fusta la normativa TAPPI T 252 om-07 (TAPPI, 2007b) i la UNE 57032:1991 (UNE, 1991) sobre pasta, paper i cartró ja que eren les metodologies que millor s'adaptaven al nostre material. Per realitzar les valoracions necessàries per conèixer la capacitat tampó es va treballar de forma similar a Lee *et al.* (2001) i Passialis *et al.* (2008). El pH es va determinar en mostres de la Rocassa, Can Planes i el Vilar de Sant Andreu, i la capacitat tampó en mostres de Can Planes (branques i tronc), Can Prat i el Vilar de Sant Andreu (Veure Taula 11).

En primer lloc es tritura la fusta massissa fins obtenir estelles de diàmetre inferior a 1 mm. Les mostres de fusta, de 1,5 g cada una, s'introdueixen en un matràs de 250 ml omplert amb 150 ml d'aigua destil·lada que, prèviament, havia bullit durant 15 min escalfat per un placa calefactora elèctrica amb agitador IKA RCT-basic fins aconseguir un pH constant entre 6,2 i 7,3. La mescla d'aigua i serradures, després de 10 min bullint, es filtra amb paper de filtre per eliminar-ne les impureses. El filtrat es deixa refredar a temperatura ambient en un vas de precipitats de 100 ml. Un cop fred, es mesura el pH sobre 35 ml d'extracte amb un pH-metre portàtil Crison 507.

La capacitat tampó de la fusta es defineix com la capacitat del material per mantenir el seu pH en front la variació en la concentració d'ions d'hidroni en el medi. Per determinar aquesta propietat cal dur a terme dues valoracions àcid-base. Una per conèixer la inèrcia a canviar de pH quan el medi es torna àcid, i una segona per quan el medi esdevé bàsic. Les dues valoracions es van fer a partir de 35 ml del mateix extracte emprat per mesurar el pH de la fusta.

Per determinar la inèrcia de l'extracte de fusta respecte a una substància àcida es valorà amb una solució 0,01N ($f=0,9986$) d'àcid sulfúric (H_2SO_4) fins que el pH fou igual o inferior a 2. Prèviament, s'havia comprovat la normalitat de la solució d'àcid sulfúric amb una solució patró de carbonat de sodi (Na_2CO_3) a la qual se li havia afegit roig de metil com a indicador.

De forma anàloga, es comprovà la capacitat tampó de l'extracte respecte a una substància bàsica emprant una solució d'hidròxid de sodi (NaOH) 0,01N ($f=0,9435$), fins que el pH fou superior a 7,5. En aquest ocasió la solució de sosa càustica es valorà amb una solució de biftalat de potassi ($C_6H_4(COOH)(COOK)$) a la qual se li havia afegit fenolftaleïna a mode d'indicador.

3.3.5. Extracció de carbohidrats de baix pes molecular

Es va analitzar la solubilitat en hidròxid sòdic de la fusta de branca de Can Planes, de troncs joves de la Rocassa i de troncs fortament enrogits del Vilar de Sant Andreu. Les mostres de fusta es van preparar segons la norma TAPPI T 257 cm-02 "Sampling and preparing wood for analysis." (TAPPI, 2002c), es va seguir el procediment descrit a la norma TAPPI T 212 om-02 "One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp." (TAPPI, 2002b).

En aquest assaig es van enfrontar 10 g de serradures de fusta tamisades en un sedàs de llum 0,4 mm amb 100 ± 1 ml de solució de NaOH al 1%. La mescla es va escalfar en un bany d'aigua Stuart Científic SWB durant 60 min entre 97°C i 100°C . La mescla es va remoure durant 5 s als 10, 15, i 25 min. Un cop transcorreguda l'hora, el material es filtrà i es rentà amb 100 ml d'aigua. Finalment s'afegiren 25 ml d'àcid acètic al 10% i es deixà en remull durant 1 min. Aquest pas es va repetir un segon cop. L'àcid de la mostra es va netejar amb aigua calenta. Per acabar, la mostra es va assecar en una estufa Memmert 100-800 a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ fins aconseguir un pes constant, es va refredar en un dessecador, i es va pesar en una balança analítica Mettler Toledo XS204. El percentatge de solubilitat es calcula de la següent forma:

$$S = \frac{A - B}{A} \cdot 100 \quad (2)$$

On:

S = Percentatge de solubilitat (%)

A = Pes sec de la mostra abans de l'extracció (g)

B = Pes sec de la mostra després de l'extracció (g)

3.3.6. Determinació de la lignina insoluble en àcid

El contingut de lignina de la fusta de castanyer es va determinar seguint la norma TAPPI T 222 om-02 "Acid-insoluble lignin in wood and pulp." (TAPPI, 2002a) en fusta sana de tronc procedent de la Rocassa i fusta afectada per roig del Vilar de Sant Andreu. Aquesta tècnica aprofita el fet que la lignina, a diferència de la resta de compostos de la fusta, és insoluble en àcid sulfúric.

En aquest procediment es van enfrontar $5 \pm 0,1$ g de fusta anhidra assecada a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ en una estufa Memmert 100-800 amb 15 ml d'àcid sulfúric $24 \pm 0,1$ N dissolt al 72%. La mescla es va mantenir refrigerada en bany de gel a $2 \pm 1^\circ\text{C}$ per evitar l'escalfament provocat per l'acció de l'àcid. Per garantir una correcta dissolució de tots els compostos menys la lignina, la mescla es va mantenir en un bany d'aigua a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durant 2 h remoguda contínuament amb un agitador Agimatic E-7002431 per garantir la dissolució completa.

Per garantir una correcta precipitació de la fracció no soluble, s'afegiren en un primer moment 300 ml d'aigua destil·lada aconseguint un volum final de dilució de 575 ml. Aquesta solució es feu bullir durant 4 h tot mantenint el volum constant en un bany d'aigua Stuart Científic SWB. La lignina es diposità en un matràs inclinat i es filtrà al buit. Finalment, el residu fou assecat en estufa Memmert 100-800 a 103°C 2 h, refredat en un dessecador, i pesat amb una precisió de 0,1 g. El percentatge de lignina és calcula de la següent forma:

$$L = \frac{A}{W} \cdot 100 \quad (3)$$

On:

L = Proporció de lignina (%)

A = Pes sec de la lignina extreta (g)

W = Pes sec de la mostra de fusta (g)

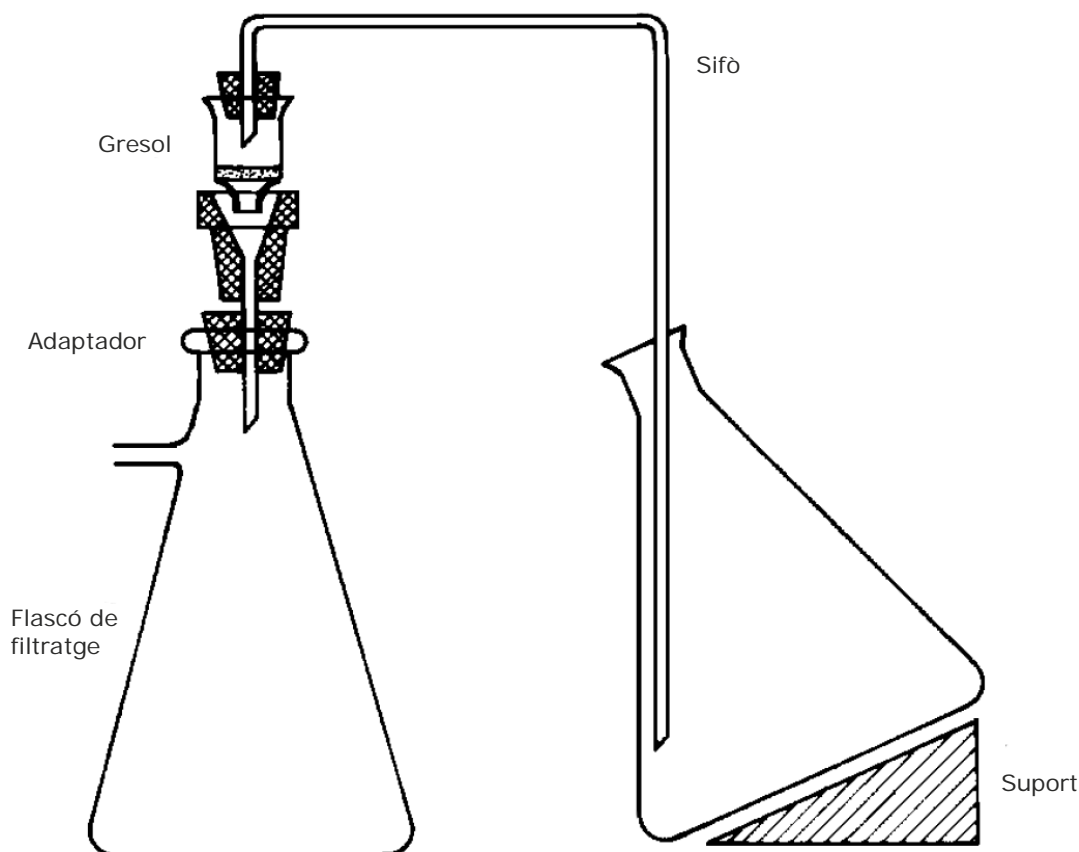


Figura 35. Aparell de filtració de lignina segons TAPPI T 222 om-02 (TAPPI, 2002a)

3.3.7. Determinació dels extractius solubles no volàtils

L'estàndard TAPPI T 204 cm-97 "Solvent extractives of wood and pulp." (TAPPI, 1997) utilitza dos dissolvents diferents per realitzar les extraccions ja que cap dissolvent orgànic és capaç d'arrossegar totes les substàncies no volàtils presents a la fusta, i cada combinació de dissolvents orgànics obté diferents quantitats i proporcions d'extractius. També cal tenir en compte que el contingut a la fusta d'aquestes substàncies està fortament condicionat per l'assecat i el condicionament sofert, però també podria variar amb les transformacions que succeeixen en el decaïment.

El primer dissolvent que proposa l'estàndard és el diclorometà o clorur de metil (CH_2Cl_2), ja que és capaç d'arrossegar ceres, greixos, resines, esterols de les parets cel·lulars i hidrocarburs no volàtils. En segon lloc, la norma proposa una mescla d'etanol-benzè, encara que en el present experiment es va substituir el benzè pel toluè (metilbenzè) al ser una substància semblant però molt menys tòxica. Aquesta solució arrossega carbohidrats de baix pes molecular, sals i altres components no solubles en aigua, i les que és capaç d'arrossegar el diclorometà.

L'extracció es va efectuar sobre 5 mg de serradures de fusta seca a l'aire garbellades en un sedàs de 0,4 mm de llum. El diclorometà tenia una puresa mínima del 98% i un residu després d'evaporació inferior al 0,002%. La mescla de dissolvents orgànics estava formada per 1 volum d'etanol per cada 2 volums de toluè purificat. Es va emprar un extractor Soxhlet de 250 ml de capacitat, i els escalfadors es van ajustar per proporcionar una taxa d'ebullició que provoqués almenys 24 cicles d'extracció (evaporació/condensació) en un període de 4-5 h. El residu es va assecar en un Rotavapor Büchi R-114 fins a la sequedat, i a continuació es va dessecar en estufa Memmert 100-800 fins la total evaporació dels dissolvents. L'extracte dissolt en el diclorometà es va assecar durant 1 h a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, mentre que l'extret amb la mescla d'etanol i toluè s'assecà durant 2 h a $115 \pm 5^\circ\text{C}$. En el cas de la mescla de dissolvents, la temperatura d'assecat es va incrementar ja que el toluè bull a $110,6^\circ\text{C}$. El percentatge d'extracte és calcula segons la següent expressió:

$$S = \frac{W_e - W_b}{W_p} \cdot 100 \quad (4)$$

On:

W_e = Pes sec en estufa de l'extracte (g)

W_p = Pes sec en estufa de la fusta (g)

W_b = Pes sec en estufa del residu generat pel dissolvent (impureses) (g)

Les mostres analitzades provenien de les finques de la Rocassa, el Vilar de Sant Andreu i Can Planes, per aquest ordre es corresponen els troncs amb fusta sana, troncs amb forta presència de roig i fusta de branques.

3.3.8. Extracció de tanins i sòlids solubles en aigua

L'extracció dels tanins i la determinació del seu contingut en la fusta de castanyer es va dur a terme al Centro Tecnológico de la Asociación de Investigación de las Industrias del Curtido y Anexas (AIICA, Igualada) mitjançant un adobament de prova sobre pols de pell. Aquesta metodologia, anomenada "mètode del filtre", és el procediment oficial de la Asociación Química Espanyola de la Industria del Cuero, i en ella la solució tànnica travessa una campana que conté pols de pell obtenint una solució d'extractes vegetals. L'extracció tànnica es realitzà durant dues hores en un autoclau a 136°C a partir d'una mescla de serradures i aigua, o bé, a partir

d'una mescla de serradures, aigua i metabisulfit sòdic. A partir de la solució, els diferents tipus de compostos s'obtenen de la següent forma (Adzet, 1990):

- **Solució analítica:** Es dissolen en aigua 5,5 g de mostra o els que siguin necessaris segons la riquesa tànnica prevista de l'extracte. La solució s'enrasa a 1000 ml. La dissolució es pot efectuar de forma ràpida amb aigua bullint, transferint la solució al matràs quan estigui freda. També es pot efectuar amb aigua freda, tenint la precaució d'agitar la solució durant el temps que sigui necessari.
- **Sòlids totals:** Sòlids solubles en aigua. Partint de 50 ml de solució, es posen en una estufa a 98,5-100°C fins que l'evaporació i assecat són complets. S'estima que el pes constant s'assoleix en una nit, i quan dues pesades consecutives no difereixen més de 2 mg. El residu es refreda en un dessecador i es pesa en una balança analítica. Per diferència de pes s'obtenen els sòlids totals.
- **Substàncies solubles en aigua:** Filtratge de la solució amb un filtre Millipore de 0,45 µm de mida de porus sota una pressió aproximada de 81060 Pa. Es recullen entre 120 i 150 ml després de descartar els primers 100 ml. Com en els sòlids totals es dessequen en estufa, refreden en dessecador i pesen.
- **No tanins:** Comprenen les matèries sòlides de l'extracte que no combinen químicament amb el col·lagen en les condicions de l'anàlisi. En una campana d'extracció es col·loquen sis grams de pols de pell compactats i distribuïts de forma uniforme per la campana. Es cobreix la part superior de la campana amb cotó per evitar l'obstrucció de l'orifici capil·lar de sortida. Cal mantenir un degoteig de 9-12 gotes/min, rebutjar els primers 30 ml de filtrat i, amb els 50 ml següents, obrar de la mateixa forma que amb els sòlids totals. Cal repetir l'extracció si han passat tanins, fet que s'observa amb l'aparició de precipitat negre en afegir clorur fèrric (Veure Figura 36).
- **Tanins:** Substàncies que combinen químicament amb la pols de pell en les condicions analítiques. Diferència de pes entre substàncies solubles i no tanins.
- **Substàncies insolubles en aigua:** Diferència entre sòlids totals i solubles. Fracció capturada pel filtre Millipore de 0,45 µm de mida de porus.

$$A = \frac{a}{b} \quad ; \quad C = \frac{c}{b} \quad ; \quad D = \frac{d}{b} \quad ; \quad I = A - C \quad ; \quad T = C - D \quad (5)$$

On:

A = Sòlids totals (%)

a = Residu (g)

b = Extracte contingut a la solució analítica (g)

C = Substàncies solubles (%)

c = Residu obtingut a les substàncies solubles (g)

D = No tanins (%)

d = No tanins (g)

I = Substàncies insolubles (%)

T = Tanins (%)

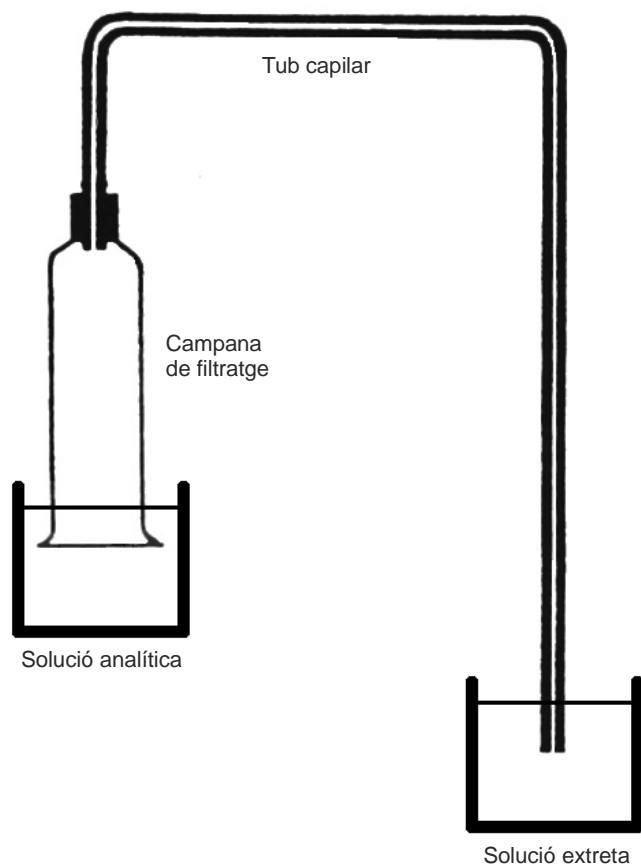


Figura 36. Campana per a filtratge (Adzet, 1990)

En aquest assaig la mostra de fusta normal procedia de Can Preses (Montnegre), i l'afectada per roig del Vilar de Sant Andreu (Guilleries).

3.3.10. Anàlisi microscòpic

L'observació microscòpica de la fusta permet observar l'estat dels teixits i detectar alteracions histològiques a nivell cel·lular. Així doncs, aquesta tècnica fa possible contrastar visualment les diferències entre la fusta normal i la roja a un nivell molt detallat.

Les mostres de partida feien 10×10×20 mm, i van ser preparades amb serres de disc i cinta per obtenir provetes orientades d'acord amb les fibres i radis. Generalment, es descarta obtenir les mostres per esqueixament ja que l'orientació de les fibres no segueix una línia recta, el pla resultant és irregular, i l'observació en el microscopi no resulta satisfactòria. Es van preparar mostres d'orientació radial, tangencial i axial.

Els talls es van estovar per ebullició en un condensador de reflux mitjançant aigua destil·lada mesclada amb algunes gotes de glicerina ($C_3H_8O_3$) per reduir la tensió superficial de l'aigua. La duració de l'ebullició fou variable en funció del grau de duresa de cada espècimen. Un cop estovades, les mostres s'introduïren en flascons de tap roscat reomplerts amb una solució 30% aigua 70% 2-Propanol. A continuació, les mostres de fusta es van seccionar mitjançant un microtom Leica SM 200 R en llesques de 16 a 20 μm . L'angle d'inclinació de la fulla fou de 5°, i el d'atac entre 40°C i 50°C. Les mostres es van banyar novament en una solució al 70% de 2-Propanol per evitar l'acció fúngica, desplaçar les bombolles d'aire i facilitar el seu estirament.

Per deshidratar totalment les mostres es submergiren successivament en solucions de concentració creixent d'etanol o 2-propanol: 50% (10 minuts), 70% (10 minuts), 80% (10 minuts), 90% (10 minuts) i 99% (10 minuts). La deshidratació es completà exposant els talls entre 5 i 10 minuts més a dos porcions de xilè. Finalment, les mostres s'assecaren amb paper dessecant durant 24h a temperatura ambient. En cas que es volgués conservar les mostres de forma permanent caldria muntar-les amb Euparal i assecar-les a l'estufa a 60°C durant almenys 4-6 setmanes. Les mostres es van tractar amb les següents tècniques:

- **Lliures de tinció:** S'aprecien els colors naturals. Els diferents components dels teixits no es diferencien amb claredat.
- **ACN:** Mètode de tinció en què s'empra Astra blue, crisoidina i neofucsina. Les mostres finalment es deshidraten amb isopropanol. La lignina es tenyeix de roig, la cel·lulosa resta sense tenyir, i els nuclis cel·lulars es poden tenyir de roig o blau. L'aspecte general del teixit és grana.
- **FCA:** Tinció tricromàtica a base de fucsina, crisoidina, Astra blue i àcid acètic. Les parets cel·lulars queden tenyides de rosa clar i el contingut cel·lular de color blau. L'aspecte general es rosat-blavós.
- **Kallichrom:** Tinció en què es combina violeta de cresil i auramina. La solució saturada pren un color roig cirera. No ha de tenir un color grogós o porpra. En teixits de plantes els nuclis cel·lulars es tornen blau fosc, el xilema i les fibres verds, i la cel·lulosa de roig a rosa.
- **Roeser:** Mètode de tinció que empra una solució aquosa de safranina al 1% associada amb fucsina i Astra blue (Roeser, 1972). El color de les tincions és porpra-rosat. Les fibres queden de color rosat i els radis de color porpra fosc.
- **Blau de toluidina:** Dissolució aquosa de blau de toluidina al 0,1-1%, un colorant derivat de l'aminotoluol. La cel·lulosa esdevé porpra, les parets lignificades es tenyeixen de blau o blau-verdós. Molt emprada en histologia per tenyir nuclis cel·lulars.

3.3.9. Modificació tèrmica: Canvi de color i massa

El comportament vers la degradació tèrmica de la fusta es va analitzar a partir del canvi de color i la pèrdua de massa. La fusta es va exposar durant 5 h a una temperatura de 200°C en una estufa d'aire forçat J.P. Selecta Digitronic 2005-161. No es va modificar l'atmosfera. Es van emprar sis provetes de fusta normal de dimensions 20x20x40 mm raspallades però no polides procedents de la Rocassa (Guilleries), i sis provetes roges del Vilar de Sant Andreu de la mateixa mida i acabat superficial.

El color es va mesurar amb un espectrofotòmetre Macbeth Color-Eye 3000. Aquest aparell consta d'una òptica esfèrica, utilitza llum de xenó i cobreix tot l'espectre visible essent capaç de fer mesures de reflectància i transmitància. La llum estàndard emprada fou la D75 (North Sky Daylight). Les mesures de color es van dur a terme sobre una superfície rectangular de 5x10 mm. Les dades de reflectància es van prendre dins l'espectre visible cada 20 nm, i es van processar

amb el software Optiview 1.2. KA per obtenir els paràmetres de l'espai de color CIELab.

La massa de les mostres es va prendre amb una bàscula GRAM precision Serie ST amb precisió de 0,01 g després d'assecar-les en estufa d'aire forçat a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ fins a l'estat anhidre, segons les especificacions de la norma UNE-EN 13183-1:2002 (AENOR, 2002).

4. Resultats

4.1. Contingut de cendres

El contingut de cendres de la fusta de castanyer ha estat el següent:

Taula 13. Contingut de cendra de la fusta de castanyer

Origen	Mostra	Estadístics	Cendra (%)	Humitat (%)
El Vilar de Sant Andreu	Tronc vell Fusta roja n=5	Mínim	0,090	6,7
		Màxim	0,120	8,4
		Mitjana	0,104	7,5
		Variància (n-1)	0,015	0,7
Can Prat	Tronc jove Fusta normal n=5	Mínim	0,060	6,9
		Màxim	0,110	7,3
		Mitjana	0,084	7,1
		Variància (n-1)	0,019	0,2
Can Planes	Tronc vell Fusta normal n=5	Mínim	0,080	7,1
		Màxim	0,100	7,8
		Mitjana	0,088	7,6
		Variància (n-1)	0,008	0,3
	Branca Fusta normal n=5	Mínim	0,470	8,6
		Màxim	0,610	10,4
		Mitjana	0,512	9,5
		Variància (n-1)	0,058	0,7
Total		Mitjana	0,197	7,89
		Variància (n-1)	0,189	1,06

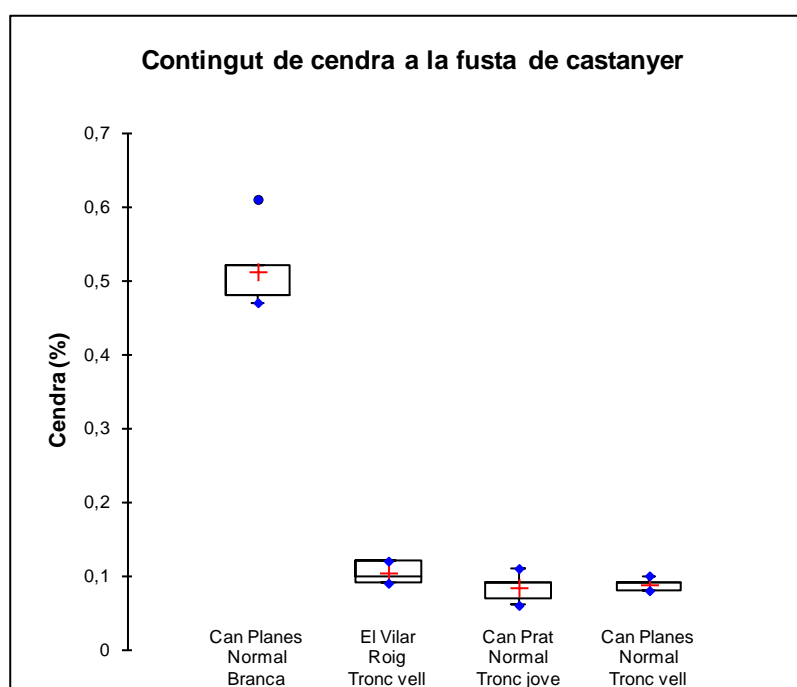


Figura 37. Diagrama de caixa del contingut de cendra

4.2. Composició elemental de les cendres

Tot seguit s'exposen els resultats obtinguts en l'anàlisi elemental de les cendres.

Taula 14. Composició elemental. El Vilar. Fusta de tronc roja

Element	El Vilar. Fusta de tronc roja (ppm)				
	Nombre de repeticions	Màxim	Mínim	Mitjana	Desv. estàndard
Calç (Ca)	5	400,00	294,12	345,58	49,94
Coure (Cu)	5	2,23	1,16	1,69	0,48
Ferro (Fe)	5	8,35	3,75	5,83	1,70
Potassi (K)	5	24,40	2,27	12,68	8,14
Magnesi (Mg)	5	71,64	52,50	60,51	8,53
Manganès (Mn)	5	11,93	4,34	8,45	2,77
Sodi (Na)	5	43,17	35,26	40,74	3,17
Fòsfor (P)	5	17,01	10,03	15,34	2,98
Plom (Pb)	5	0,93	0,39	0,56	0,21
Silici (Si)	5	57,50	23,15	31,74	14,47
Zinc (Zn)	5	2,66	1,02	1,97	0,63

Taula 15. Composició elemental. Can Prat. Fusta normal de tronc jove

Element	Can Prat. Fusta normal de tronc jove (ppm)				
	Nombre de repeticions	Màxim	Mínim	Mitjana	Desv. estàndard
Calç (Ca)	5	296,80	182,90	245,09	42,81
Coure (Cu)	5	1,94	1,51	1,75	0,19
Ferro (Fe)	5	6,90	4,16	5,16	1,05
Potassi (K)	5	15,25	0,00	7,10	6,77
Magnesi (Mg)	5	137,78	58,26	110,50	34,04
Manganès (Mn)	5	6,61	2,41	3,98	1,57
Sodi (Na)	5	47,11	28,48	41,39	7,40
Fòsfor (P)	5	16,83	8,36	15,05	3,74
Plom (Pb)	5	0,91	0,24	0,40	0,29
Silici (Si)	5	41,30	18,72	29,40	8,06
Zinc (Zn)	5	2,87	0,81	1,65	0,75

Taula 16. Composició elemental. Can Planes. Fusta normal de tronc vell

Element	Can Planes. Fusta normal de tronc vell (ppm)				
	Nombre de repeticions	Màxim	Mínim	Mitjana	Desv. estàndard
Calç (Ca)	5	332,11	204,31	251,71	52,33
Coure (Cu)	5	2,31	1,51	1,89	0,32
Ferro (Fe)	5	10,36	4,83	6,43	2,26
Potassi (K)	5	101,17	10,14	45,09	39,00
Magnesi (Mg)	5	151,54	61,94	100,56	36,60
Manganès (Mn)	5	8,60	2,34	4,93	2,56
Sodi (Na)	5	52,77	37,03	44,25	5,72
Fòsfor (P)	5	17,92	9,36	15,52	3,48
Plom (Pb)	5	0,84	0,41	0,61	0,18
Silici (Si)	5	57,22	20,78	33,01	14,23
Zinc (Zn)	5	2,27	1,49	1,83	0,30

Taula 17. Composició elemental. Can Planes. Fusta normal de branca

Element	Can Planes. Fusta normal de branca (ppm)				
	Nombre de repeticions	Màxim	Mínim	Mitjana	Desv. estàndard
Calç (Ca)	5	941,71	462,51	644,69	186,67
Coure (Cu)	5	3,22	1,95	2,51	0,51
Ferro (Fe)	5	13,31	4,93	7,82	3,25
Potassi (K)	5	1823,34	825,23	1396,81	364,04
Magnesi (Mg)	5	518,45	243,87	372,11	117,87
Manganès (Mn)	5	39,12	14,48	26,56	11,46
Sodi (Na)	5	55,36	36,06	44,33	6,95
Fòsfor (P)	5	266,36	122,34	160,46	60,34
Plom (Pb)	5	1,66	0,72	1,02	0,39
Silici (Si)	5	66,83	25,36	39,02	16,30
Zinc (Zn)	5	5,65	2,87	4,27	1,03

4.3. Poder calorífic

El poder calorífic de la fusta de castanyer s'exposa a continuació.

Taula 18. Poder calorífic de la fusta de castanyer

Espai Natural	Finca	Descripció	Poder calorífic (J/g)
Montnegre	Can Preses	Fusta normal. Tronc de peu amb xancre	19698,3
Guilleries	La Rocassa	Fusta normal. Tronc de peu sa	19154,3
	El Vilar	Fusta roja. Tronc de peu decaigut	21162,7
Mitjana			20005,1

4.4. pH i capacitat tampó

La Taula 19 mostra el pH de la fusta de castanyer i la Figura 38 la capacitat tampó.

Taula 19. pH de la fusta de castanyer

Origen	Mostra	Estadístics	pH
El Vilar de Sant Andreu	Tronc vell Fusta roja n=5	Núm. Observacions	5
		Mínim	3,12
		Màxim	4,09
		Mitjana	3,59
		Variància (n-1)	0,36
Can Prat	Tronc jove Fusta normal n=5	Núm. Observacions	5
		Mínim	4,23
		Màxim	4,82
		Mitjana	4,47
		Variància (n-1)	0,22
Can Planes	Tronc vell Fusta normal n=5	Núm. Observacions	5
		Mínim	3,78
		Màxim	4,15
		Mitjana	3,97
		Variància (n-1)	0,16
	Branca Fusta normal n=5	Núm. Observacions	5
		Mínim	6,03
		Màxim	6,86
		Mitjana	6,40
		Variància (n-1)	0,34

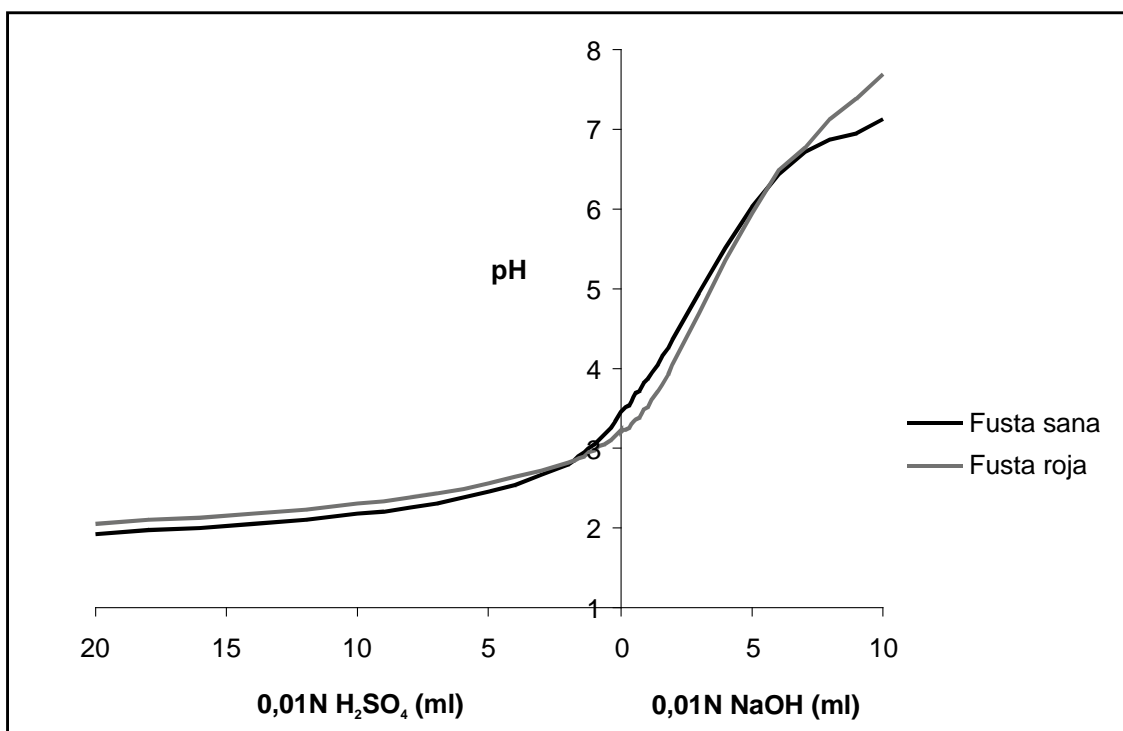


Figura 38. Capacitat tampó de la fusta de castanyer. Comportament enfront àcid i base

4.5. Carbohidrats de baix pes molecular

La solubilitat en sosa càustica dels carbohidrats de la fusta de castanyer ha estat la següent:

Taula 20. Solubilitat de la fusta en NaOH

Origen	Mostra	Estadístics	Solubilitat en NaOH (%)
El Vilar de Sant Andreu	Tronc vell Fusta roja n=10	Mínim	29,07
		Màxim	35,93
		Mitjana	32,60
		Variància (n-1)	2,56
La Rocassa	Tronc jove Fusta normal n=10	Mínim	27,63
		Màxim	33,10
		Mitjana	30,43
		Variància (n-1)	1,94
Can Planes	Branca Fusta normal n=22	Mínim	20,38
		Màxim	33,77
		Mitjana	26,98
		Variància (n-1)	4,05

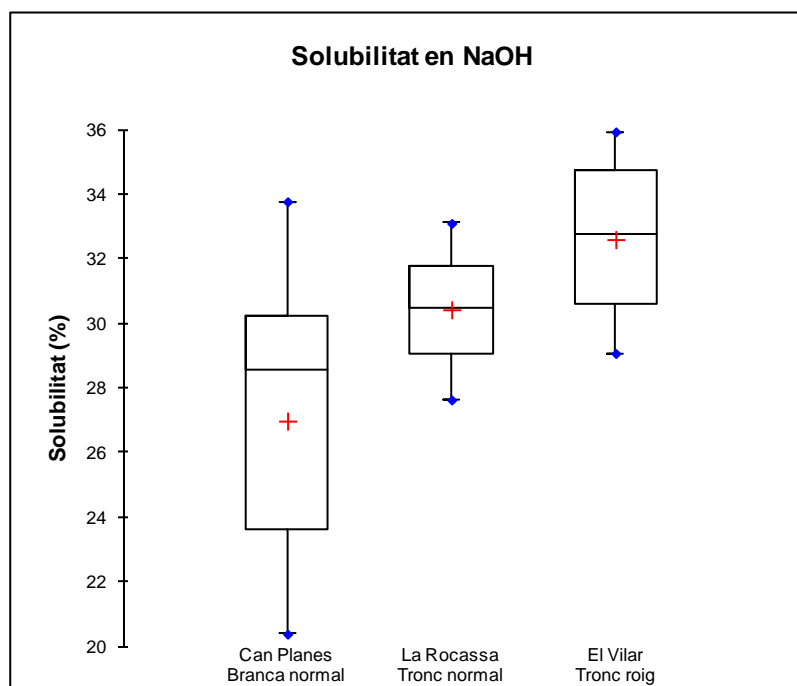


Figura 39. Solubilitat en NaOH de la fusta de castanyer

4.6. Lignina insoluble en àcid

La quantitat de lignina insoluble en àcid sulfúric es mostra a la Taula 21 i a la Figura 40.

Taula 21. Lignina insoluble en àcid

Origen	Mostra	Estadístics	Solubilitat en NaOH (%)
El Vilar de Sant Andreu	Tronc vell Fusta roja n=10	Mínim	23,13
		Màxim	26,49
		Mitjana	24,76
		Variància (n-1)	1,35
La rocassa	Tronc jove Fusta normal n=10	Mínim	18,84
		Màxim	22,14
		Mitjana	20,32
		Variància (n-1)	1,14

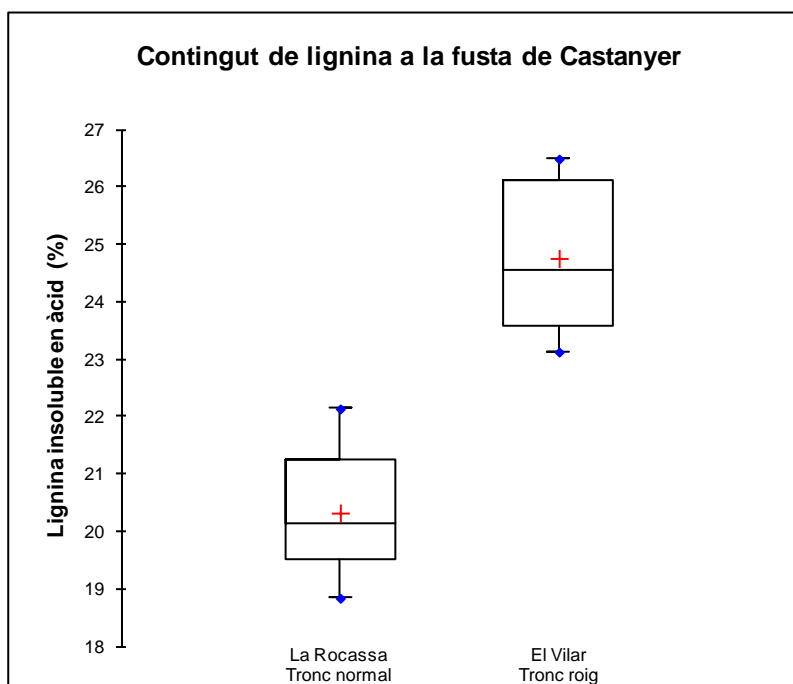


Figura 40. Contingut de lignina a la fusta de castanyer

4.7. Extractius solubles no volàtils

La quantitat de substàncies solubles en dissolvent orgànic ha estat la següent:

Taula 22. Extractius solubles no volàtils

Origen	Tipus	Estadístics	Extractius (%)	
			Diclorometà	Etanol-Toluè
El Vilar de Sant Andreu	Tronc vell Fusta roja n=10	Mínim	0,23	4,15
		Màxim	0,30	7,89
		Mitjana	0,26	5,99
		Variància (n-1)	0,02	1,16
La rocassa	Tronc jove Fusta normal n=10	Mínim	0,32	6,23
		Màxim	0,44	14,41
		Mitjana	0,38	10,09
		Variància (n-1)	0,04	3,40
Can Planes	Branca Fusta normal n=6	Mínim	0,07	5,04
		Màxim	0,14	6,48
		Mitjana	0,11	5,81
		Variància (n-1)	0,03	0,55

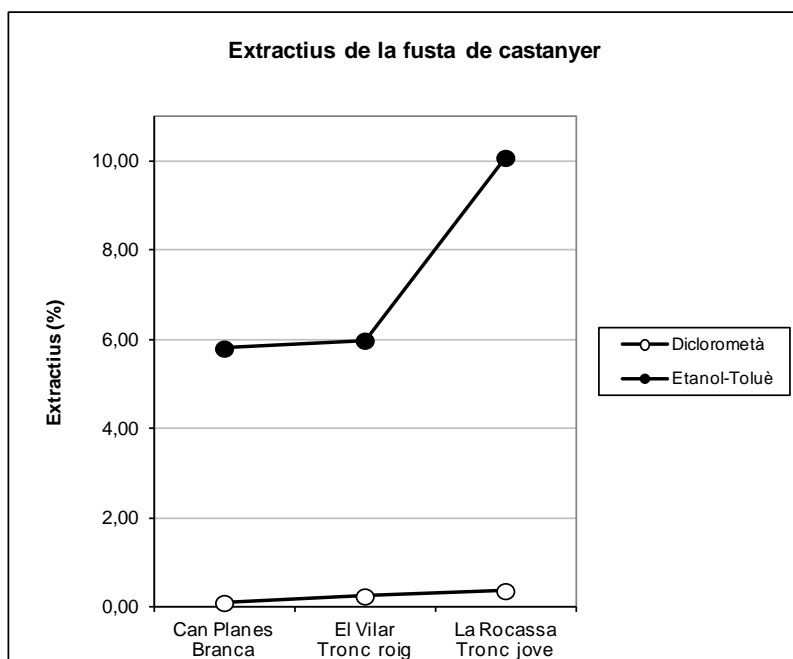


Figura 41. Extractius de la fusta de castanyer

Amb les dades disponibles s'observa que la fusta de tronc normal és la que presenta major quantitat d'extractius en els dos mètodes utilitzats, seguida de la fusta enrogida i finalment de la fusta de branca.

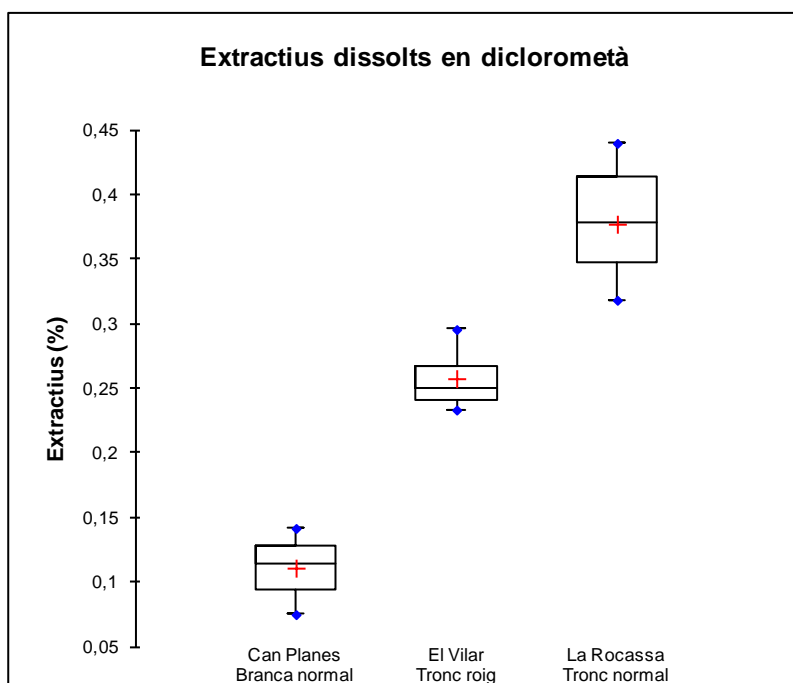


Figura 42. Extractius de la fusta de castanyer dissolts amb diclorometà

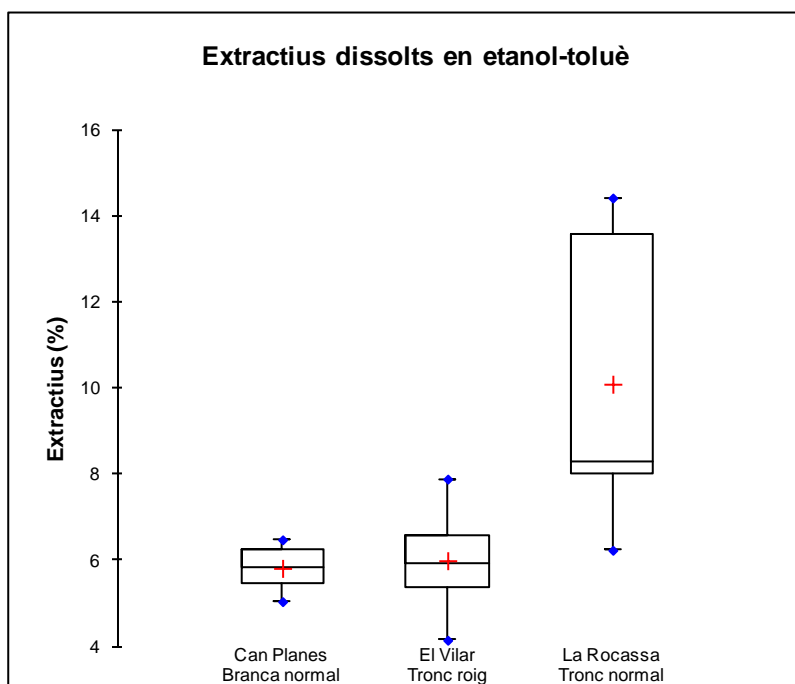


Figura 43. Extractius de la fusta de castanyer dissolts amb etanol-toluè

4.8. Tanins i sòlids solubles en aigua

La Taula 23 resumeix la proporció d'extracte sòlid present a la fusta normal de castanyer normal i l'afectada per roig.

Taula 23. Extracte sòlid de la fusta obtingut en autoclau

Extracte sòlid		Extracció amb aigua en autoclau		Extracció amb aigua i metabisulfit sòdic en autoclau	
		Can Preses. Fusta normal de tronc jove (%)	El Vilar. Fusta roja de tronc vell (%)	Can Preses. Fusta normal de tronc jove (%)	El Vilar. Fusta roja de tronc vell (%)
Sòlid soluble	Tanins	10,2	9,9	12,2	10,9
	No tanins	6,1	10,5	9,1	13,5
Sòlid insoluble		83,7	79,6	78,7	75,6
Sòlid total		100,0	100,0	100,0	100,0

4.9. Anàlisi histològic

A continuació s'exposen les seccions histològiques més representatives, entre les aconseguïdes amb les tècniques de tinció anteriorment descrites, per a la fusta normal i roja.



Figura 44. Castanyer normal. Pla axial.
Sense tenyir (Mies, 2013)



Figura 45. Castanyer normal. Pla radial.
Sense tenyir (Mies, 2013)



Figura 46. Castanyer normal. Pla tangencial.
Sense tenyir (Mies, 2013)

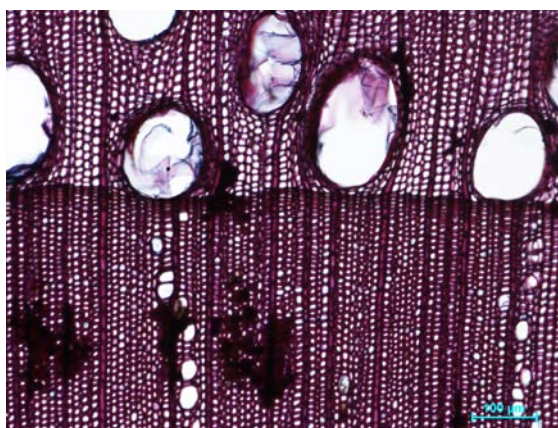


Figura 47. Castanyer normal. Pla axial.
Tinció ACN (Mies, 2013)

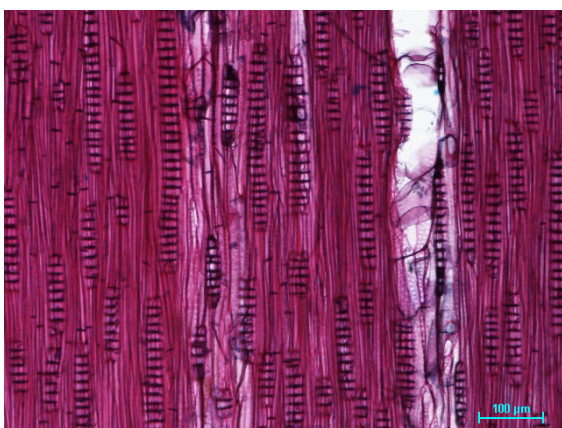


Figura 48. Castanyer normal. Pla radial.
Tinció ACN (Mies, 2013)

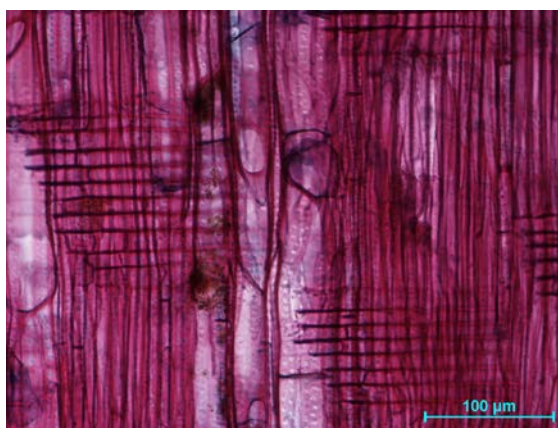


Figura 49. Castanyer normal. Pla tangencial.
Tinció ACN (Mies, 2013)

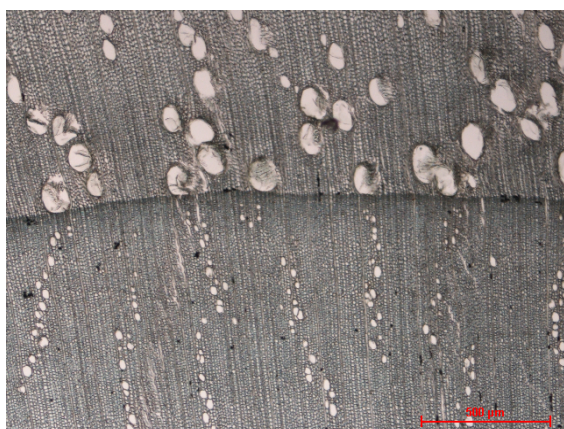


Figura 50. Castanyer normal. Pla axial.
Tinció Kallichrom (Mies, 2013)

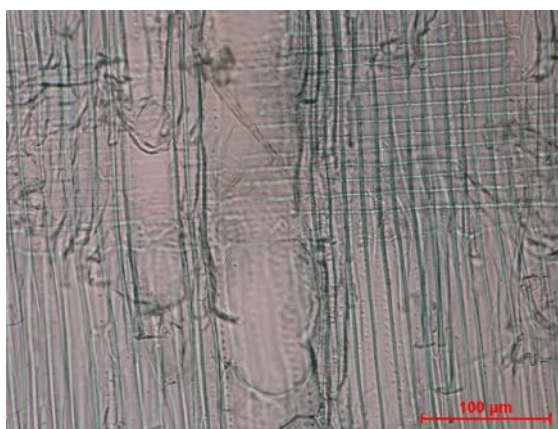


Figura 51. Castanyer normal. Pla radial.
Tinció Kallichrom (Mies, 2013)

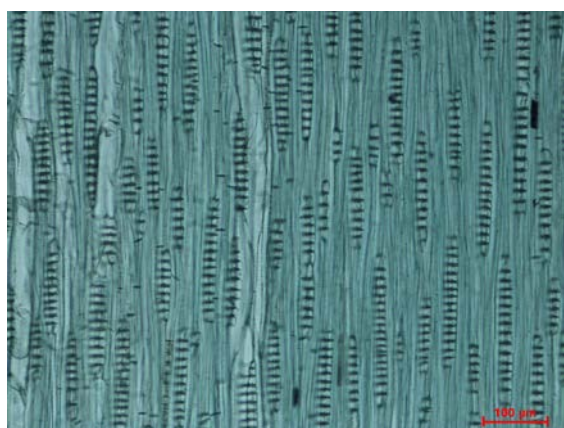


Figura 52. Castanyer normal. Pla tangencial.
Tinció Kallichrom (Mies, 2013)

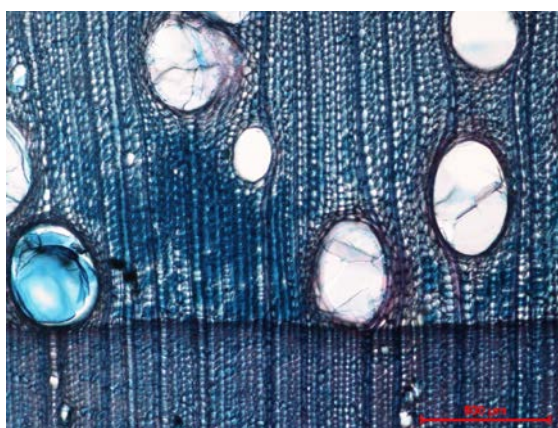


Figura 53. Castanyer normal. Pla axial.
Tinció Blau de toluïdina (Mies, 2013)



Figura 54. Castanyer normal. Pla radial.
Tinció FCA (Mies, 2013)

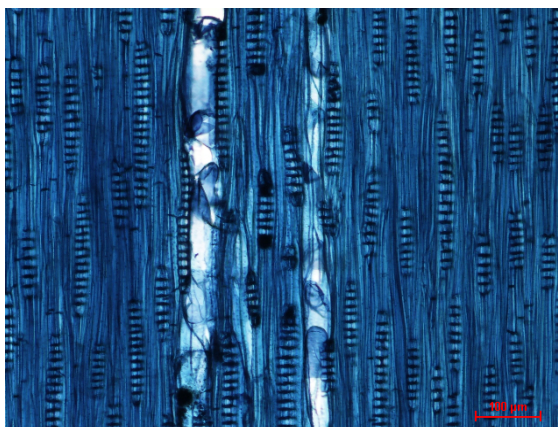


Figura 55. Castanyer normal. Pla tangencial.
Tinció Blau de toluïdina (Mies, 2013)

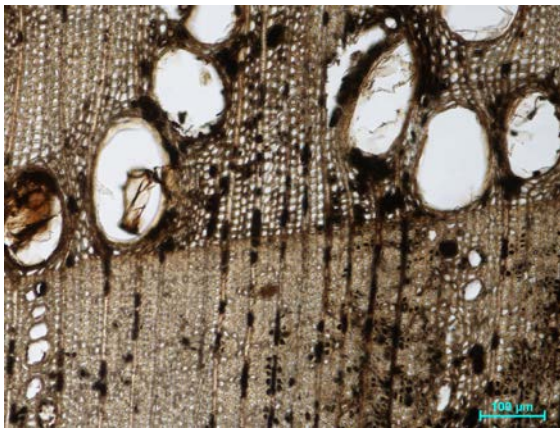


Figura 56. Castanjer roig. Pla axial.
Sense tenyir (Mies, 2013)

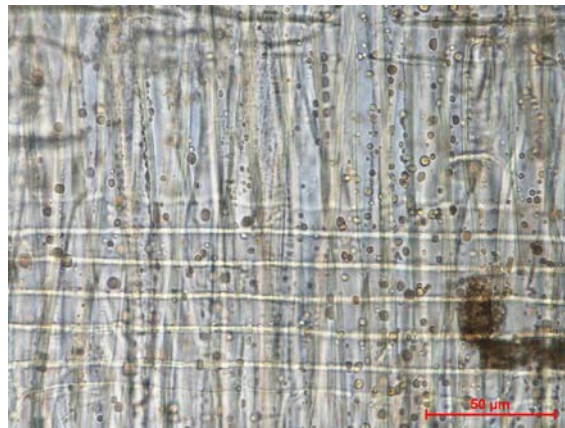


Figura 57. Castanjer roig. Pla radial.
Sense tenyir (Mies, 2013)

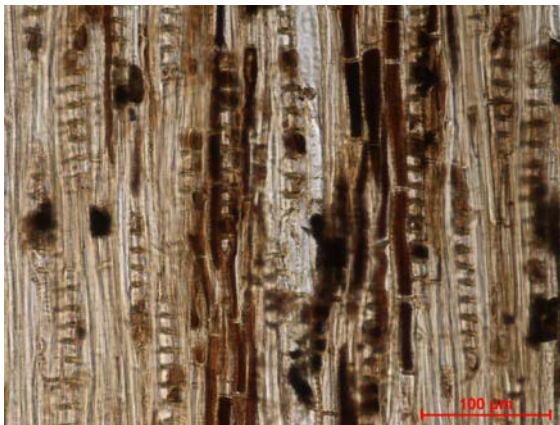


Figura 58. Castanjer roig. Pla tangencial.
Sense tenyir (Mies, 2013)

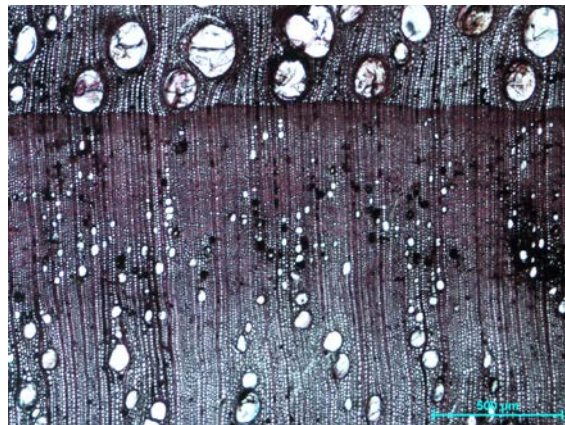


Figura 59. Castanjer roig. Pla axial.
Tinció ACN (Mies, 2013)

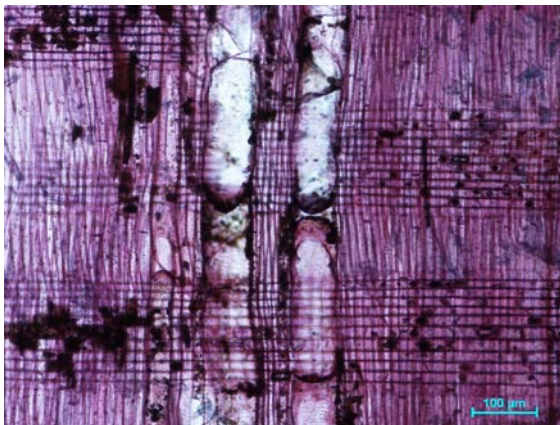


Figura 60. Castanjer roig. Pla radial.
Tinció ACN (Mies, 2013)



Figura 61. Castanjer roig. Pla tangencial.
Tinció ACN (Mies, 2013)

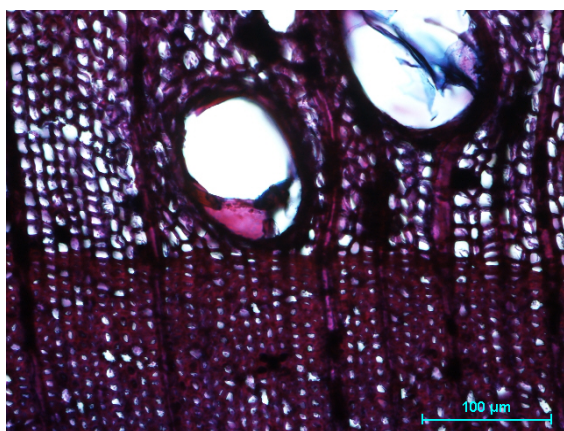


Figura 62. Castanyer roig. Pla axial.
Tinció Roeser (Mies, 2013)

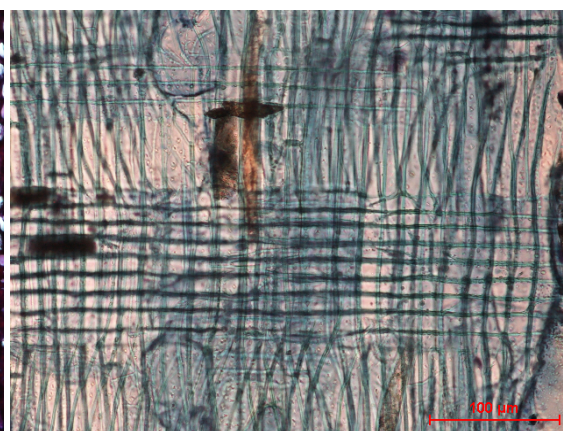


Figura 63. Castanyer roig. Pla radial.
Tinció Kallichrom (Mies, 2013)

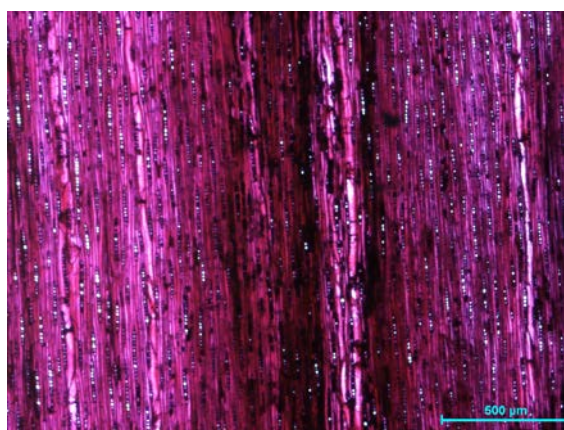


Figura 64. Castanyer roig. Pla tangencial.
Tinció Roeser (Mies, 2013)

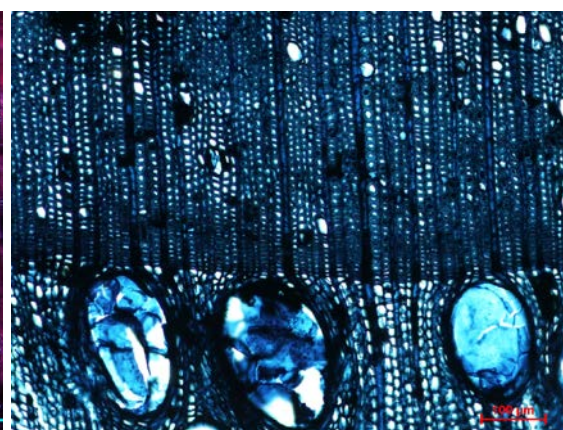


Figura 65. Castanyer roig. Pla axial.
Tinció Blau de toluídina (Mies, 2013)

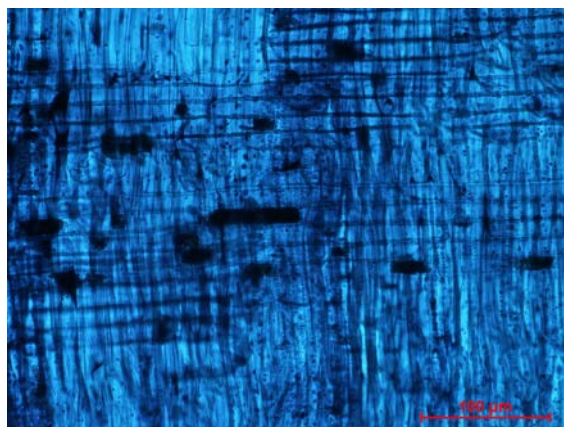


Figura 66. Castanyer roig. Pla radial.
Tinció Blau de toluídina (Mies, 2013)



Figura 67. Castanyer roig. Pla tangencial.
Tinció Blau de toluídina (Mies, 2013)

L'anàlisi histològic de les preparacions permet apreciar tots els elements dels teixits propis de la fusta de castanyer recollits en el punt 1.2. Descripció anatòmica de la fusta de castanyer. No s'observen hifes de fongs ni elements anatòmics degradats. Ara bé, de la Figura 56 a la Figura 67 s'observa que la fusta roja conté gran quantitat d'acumulacions de cristalls a l'interior dels lúmens cel·lulars del parènquima radial, i també en el longitudinal. A la Figura 56 i a la Figura 58, preparacions en que la fusta no s'ha tenyit, es pot apreciar clarament que el color d'aquestes acumulacions és del mateix color marró-rogenic que la fusta afectada pel roig.

Un aspecte que crida força l'atenció és la troballa d'acumulacions de substàncies citoplasmàtiques solidificades també en algunes preparacions de fusta normal. A la Figura 50, a la Figura 52 i a la Figura 53 s'observen petites inclusions semblants a les de la fusta roja, però és a la Figura 46, i sobretot a la Figura 47, on aquestes inclusions són més evidents.

4.10. Efectes de la modificació tèrmica

A la Taula 24 s'exposa el color i la massa CIELab de la fusta de castanyer sana i roja abans i després del tractament tèrmic, així com els canvis esdevinguts com a conseqüència de l'exposició a les altes temperatures.

Taula 24. Efectes de la degradació tèrmica sobre el color i el pes en provetes de 20×20×40 mm

Propietats		La Rocassa. Tronc jove. Fusta normal (n=6)			El Vilar. Tronc vell. Fusta amb roig (n=6)		
		Estat inicial	Termo-tractada	Variació	Estat inicial	Termo-tractada	Variació
Color CIELab	L*	68,01	33,07	-34,94	49,91	33,17	-16,74
	a*	6,93	6,78	-0,15	6,80	6,21	-0,59
	b*	22,37	10,71	-11,66	21,99	10,05	-11,94
Massa anhidra	Mitjana (g)	8,32	7,73	-0,59	9,95	9,21	-0,74
	Desv. est. (g)	0,23	0,20	---	0,61	0,55	---
	Proporció (%)	100,00	92,93	-7,07	100,00	92,55	-7,45

Normal - Natural	Roig - Natural	Normal - Termotractada	Roig - Termotractada
L*=68, a*=7, b*=22	L*=50, a*=7, b*=22	L*=33, a*=7, b*=11	L*=33, a*=6, b*=10

Figura 68. Color promig de la fusta de castanyer sana i roja abans i després del termotractament

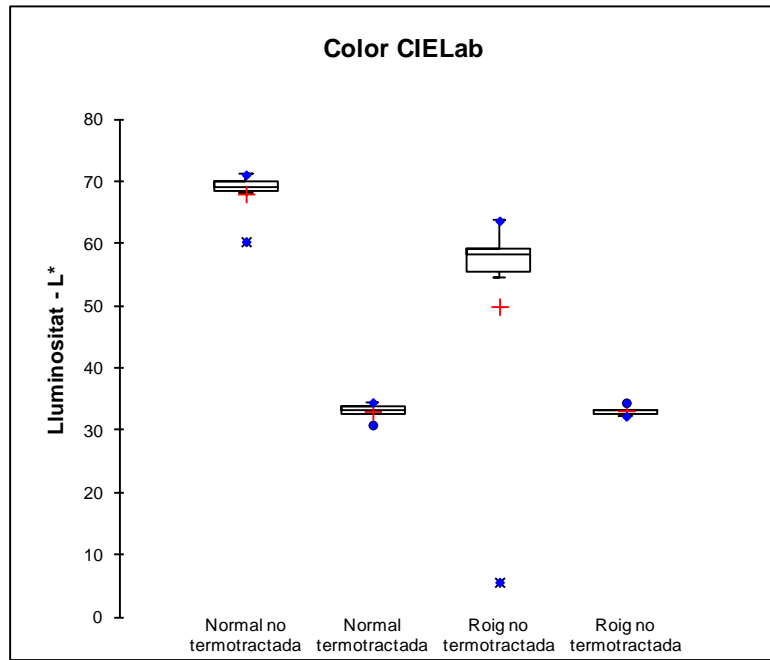


Figura 69. Luminositat (L*) CIELab. Fusta normal i roja. Variació amb el termotractament

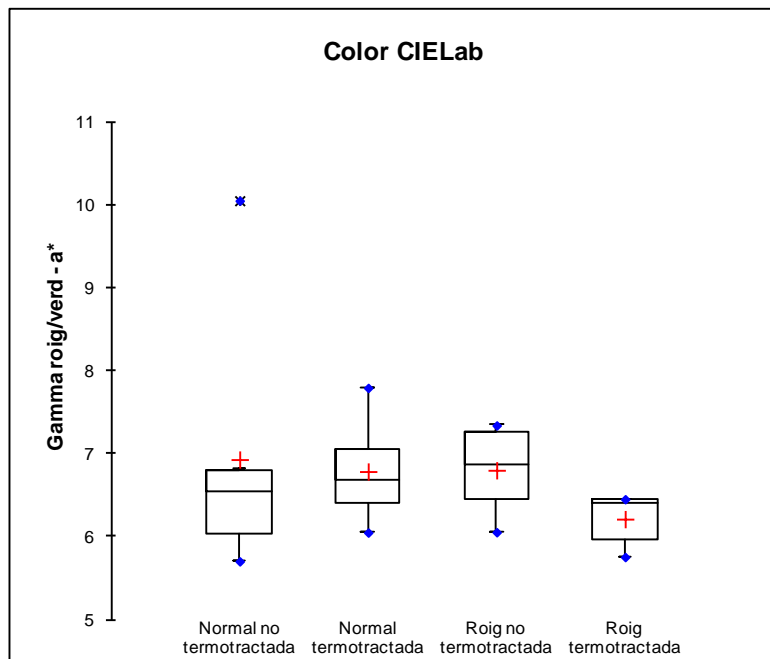


Figura 70. Gamma roig/verd (a*) CIELab. Fusta normal i roja. Variació amb el termotractament

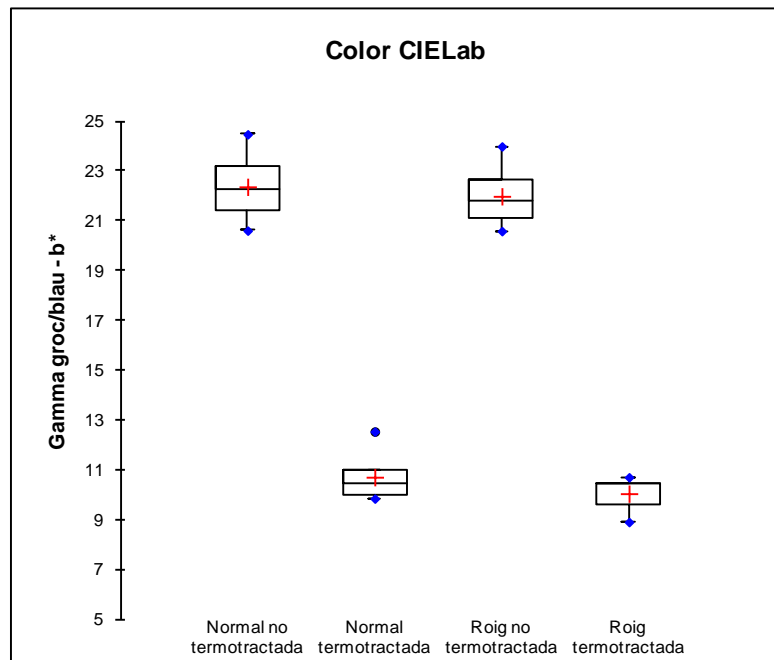


Figura 71. Groc/blau (b^*) CIELab. Fusta normal i roja. Variació amb el termotractament

5. Discussió

5.1. Consideracions segons tècnica d'anàlisi

5.1.1. Contingut de cendres

L'anàlisi estadístic de les dades mostra que les quatre mostres de fusta analitzades són normals segons el test de Lilliefors ($\alpha=0,05$) (Veure Taula 25). En canvi, el test de Bartlett trobà diferències en la variància de les quatre mostres ($p=0,003$), però no entre les tres pertanyents als troncs ($p=0,314$). Així doncs, per maximitzar la potència de l'anàlisi, es feu un ANOVA per comparar els troncs amb fusta normal i roja, i un test no paramètric de Kruskal-Wallis per contrastar amb els troncs amb la fusta de branca.

Taula 25. Prova de normalitat de Lilliefors. Contingut de cendres

Estadístics	Branca	Roig	Tronc Jove	Tronc Vell
D	0,309	0,254	0,221	0,231
D (estandarditzat)	0,692	0,569	0,494	0,515
p-valor	0,119	0,357	0,584	0,515
alfa	0,05	0,05	0,05	0,05

L'ANOVA no trobà diferències significatives entre la fusta roja de tronc i la normal de tronc jove o vell ($p=0,212$), mentre que el test de Kruskal-Wallis confirma que existeixen diferències significatives entre els quatre lots ($p=0,004$). Ara bé, els agrupaments de la prova bilateral de Dunn no separen la fusta de branca i la roja (Veure Taula 26), probablement per la menor potència dels testos no paramètrics. Per tant, la fusta de branca presenta una proporció major de cendres que la fusta de tronc, però la fusta normal de tronc no té una proporció significativament superior de sals minerals a la fusta roja de tronc. Això explica perquè les branques tenen un trànsit molt elevat de nutrients, a diferència del tronc duraminitzat de castanyer.

Taula 26. Comparacions múltiples per parells. Procediment de Dunn. Contingut de cendres

Mostra	Freqüència	Suma dels rangs	Mitjana dels rangs	Grups	
Tronc jove	5	31,000	6,200	A	
Tronc vell	5	33,500	6,700	A	
Tronc Roig	5	55,500	11,100	A	B
Branca	5	90,000	18,000		B

La quantitat de cendres que ha generat la fusta de castanyer del tronc ha esta molt inferior a la generada per les branques. Aquest resultats són coherents amb les funcions metabòliques que es desenvolupen a les branques, molt actives, i les que succeeixen al tronc duraminitzat, essencialment especialitzat en funcions de suport. Respecte altres espècies (Veure Taula 27), el castanyer és una espècie que genera molt poques cendres en condicions de laboratori. Aquest fet contrasta amb el comportament de la fusta en llars de foc i calderes, coneguda per generar molta quantitat de cendra i cremar de forma incompleta. Aquest resultat aparentment contradictori, s'explica perquè, quan el castanyer es crema fora de les condicions de laboratori habitualment no deu estar completament sec com a conseqüència de la lentitud i irregularitat del seu assecat. En el Capítol IV descriurem que les bigues de secció 135×135 mm, després de quasi dos anys d'assecat a l'aire, presentaven una humitat mitjana del 22,5%, una desviació estàndard del 6,7% i un rang d'humitats del 30,6%.

Taula 27. Contingut de cendres d'altres espècies del Sistema Mediterrani Català

Espècies del Sistema Mediterrani Català		Proporció de cendres ¹ (%)
<i>Castanea sativa</i>	Tronc	0,09
	Branca	0,51
<i>Fagus sylvatica</i>		0,49
<i>Juglans regia</i>		1,19
<i>Pinus halepensis</i>		0,52
<i>Pinus pinaster</i>		0,26
<i>Pinus radiata</i>		0,29
<i>Pinus sylvestris</i>		0,35
<i>Pinus uncinata</i>		0,27
<i>Populus nigra</i>		0,80
<i>Prunus avium</i>		0,49
<i>Quercus canariensis</i>		0,40
<i>Quercus cerrioides</i>		1,11
<i>Quercus ilex</i>		1,34
<i>Quercus petraea</i>		0,11
Mitjana		0,59
Desviació estàndard		0,40

¹Dades pròpies

5.1.2. Composició elemental de les cendres

L'element més abundant a les cendres de la fusta de castanyer és el calci, seguit del manganès amb la meitat de concentració que el primer. La resta d'elements són molt menys presents, amb l'excepció del la concentració del potassi i fòsfor a les branques provocat pel transport de nutrients procedent de les fulles. Crida força l'atenció que el tronc jove tingui menys contingut de potassi que el vell o l'enrogit.

Pel que fa a la fusta roja s'observa que, respecte als troncs sans, té una major concentració de calç i manganès. En canvi, té una quantitat sensiblement inferior de magnesi. La resta d'elements són presents en una quantitat sensiblement semblant. No s'aprecien diferències substancials respecte altres espècies i els resultats d'altres autors consultats (Etiégni and Campell, 1990; Liidakis *et al.* 2009; Misra *et al.*, 1993; Passialis *et al.* 2008). Les dades de Burriel *et al.* (2000-2004) també coincideixen en què el calci és el més abundant seguit del magnesi, i que el potassi és el més abundant a les branques (Veure Figura 72).

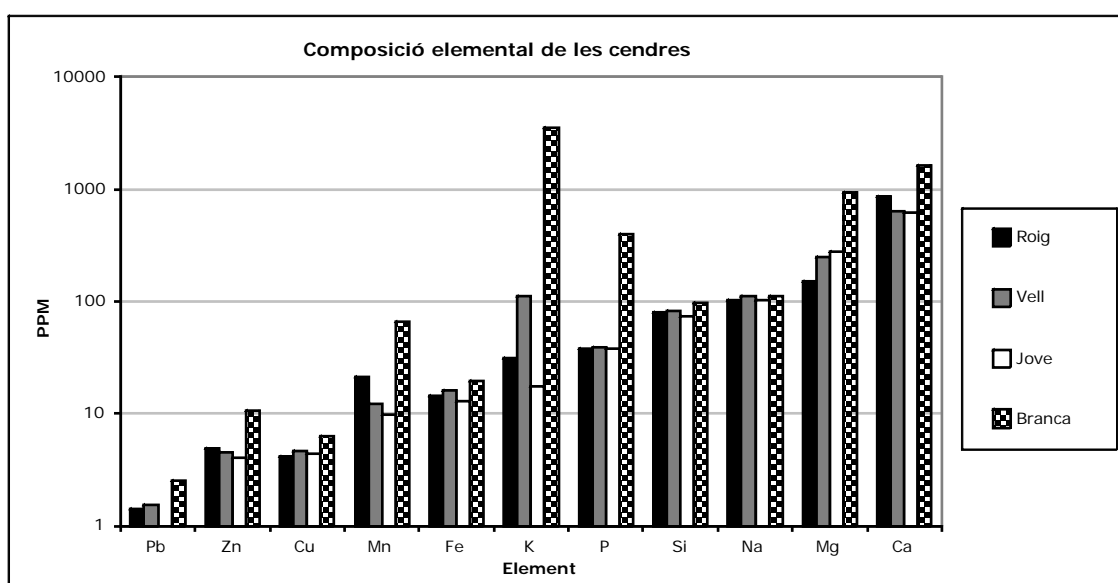


Figura 72. Composició elemental de les cendres de castanyer (PPM)

Taula 28. Composició elemental del castanyer (Burriel *et al.* 2000-2004)

Element	Fusta (g/100g)				Branques (g/100g)			
	Mínim	Mitjana	Màxim	Desviació	Mínim	Mitjana	Màxim	Desviació
C	44,29	48,42	53,17	2,46	41,68	47,94	49,7	1,46
N	0,07	0,13	0,29	0,05	0,39	0,63	1,20	0,20
P	0,00	0,01	0,03	0,01	0,03	0,07	0,21	0,04
S	0,00	0,01	0,08	0,01	0,02	0,04	0,07	0,01
Ca	0,01	0,07	0,22	0,05	0,51	1,20	2,80	0,52
Mg	0,01	0,06	0,12	0,03	0,06	0,14	0,24	0,04
K	0,02	0,07	0,12	0,03	0,18	0,44	1,54	0,27

5.1.3. Poder calorífic

Respecte la mostra de la Rocassa, la fusta de Can Preses ha resultat un 2,8% més calòrica i la del Vilar un 10,5%. Aquesta diferència està fortament lligada amb la densitat de la fusta tal com es pot veure a la Figura 73. Així doncs, el poder calorífic és proporcional a la densitat i, en conseqüència, tal com s'explicarà al Capítol III, és més alt en arbres de creixement lent. Per altra banda, no s'aprecia influència del

roig sobre el poder calorífic i, atesa l'alta correlació amb la densitat, es descarta la presència de fongs ja que aquests consumeixen part de la paret cel·lular. Segons Militz *et al.* (2003) la fusta de castanyer és durable als fongs, però segons l'espècie que causi l'atac, la pèrdua de massa pot estar entre el 0,9% i el 5,6%. Aquesta disminució seria suficient per reduir les diferències detectades.

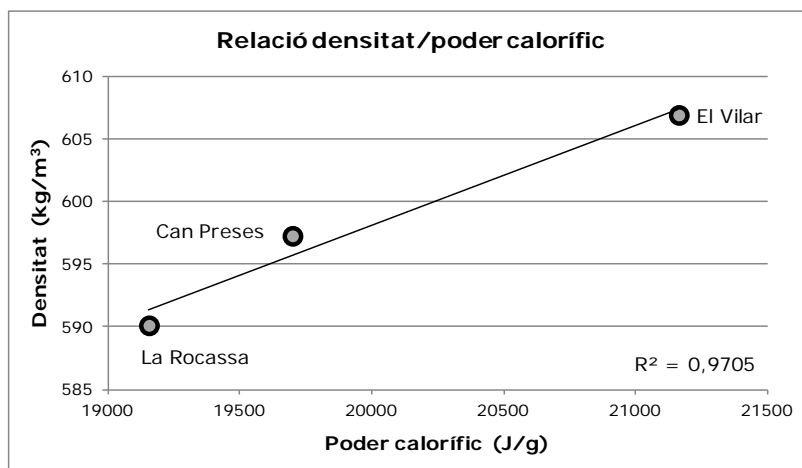


Figura 73. Relació entre densitat i poder calorífic a la fusta de castanyer

La fusta de castanyer ha mostrat un poder calorífic de 20005 J/g, un valor quasi igual als 19901 J/g que publica Elvira Martin (1984). Aquest valor és superior al de qualsevol frondosa del Sistema Mediterrani Català, probablement pel contingut en tanins, però inferior al de les coníferes ja que les resines són altament calòriques (Veure Taula 29). Per tant, la causa probable perquè a nivell popular es pensi que la fusta de castanyer és un combustible pobre no pot ser la manca de poder calorífic, sinó la relativa lleugeresa, i la irregularitat i lentitud d'assecat.

Taula 29. Poder calorífic d'altres espècies

Espècies del Sistema Mediterrani Català	Poder calorífic (J/g)	
	Dades pròpies	Vignote (2006)
<i>Castanea sativa</i>	20005,1	---
<i>Eucaliptus sp.</i>	---	19472,3
<i>Fagus sylvatica</i>	19709,4	19171,1
<i>Juglans regia</i>	18554,6	---
<i>Pinus halepensis</i>	19984,9	20372,0
<i>Pinus pinaster</i>	22083,2	20669,0
<i>Pinus pinea</i>	---	20171,1
<i>Pinus radiata</i>	19706,6	---
<i>Pinus sylvestris</i>	20844,7	---
<i>Pinus uncinata</i>	20313,3	---
<i>Populus nigra</i>	19823,8	---
<i>Prunus avium</i>	18567,5	---
<i>Quercus canariensis</i>	19472,3	---
<i>Quercus cerrrioides</i>	19161,3	18551,9
<i>Quercus ilex</i>	18953,5	19271,5
<i>Quercus petraea</i>	19792,3	---
Mitjana	19785,1	19668,4
Desviació estàndard	918,2	757,0

5.1.4. pH i capacitat tampó

El pH de les mostres de fusta de castanyer analitzades ha resultat força àcid. La que ho ha resultat més ha estat la roja, però amb un resultat molt semblant a la fusta de tronc vell. S'aprecia que com més jove és la fusta, menys àcida és, fins al punt que la fusta de branca té un pH quasi neutre. Pel que fa a la capacitat tampó, s'observa que la variació del pH, en front un àcid, és molt escassa i homogènia en tots els tipus de fusta analitzats. En canvi, la fusta de castanyer modifica el seu pH de forma important en front les bases. A la Figura 73 s'observa que, en front una base, la fusta de branca és la que menys capacitat tampó presenta. Les fustes de tronc presenten un comportament semblant entre elles, tot i que la fusta amb roig és la que té menys capacitat tampó de les tres.

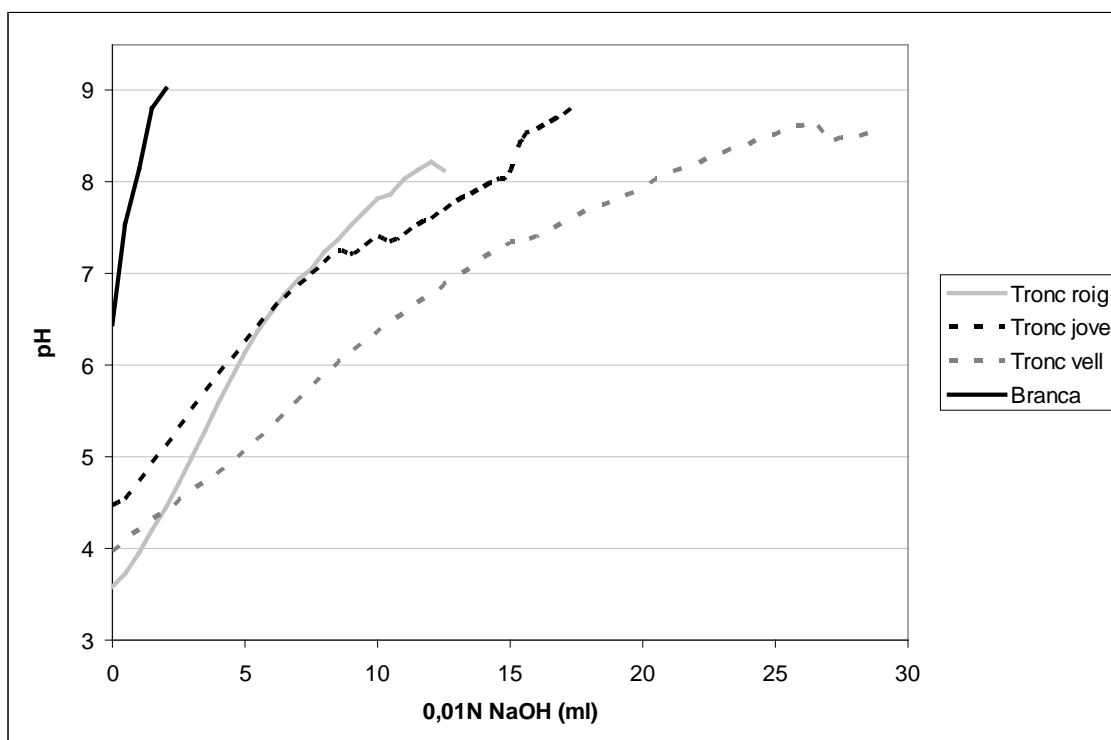


Figura 74. Capacitat tampó de la fusta de castanyer. Comportament enfront àcid i base

Per tant, si es vol encolar la fusta de castanyer és recomanable emprar un adhesiu àcid que estigui amb consonància amb el pH de la fusta. Si s'empra una cola alcalina, amb tota probabilitat, es canviaran les condicions d'adsorció de l'adhesiu i les unions no assoliran la resistència desitjada.

5.1.5. Carbohidrats de baix pes molecular

Les solucions alcalines calentes són capaces d'extreure els carbohidrats de baix pes molecular de la fusta, essencialment pectines, hemicel·lulosa i cel·lulosa degradada. Aquest principi és força conegut i, habitualment, s'empra per controlar la degradació d'aquests compostos en els processos de pastat i blanquejat en la producció de paper. De la mateixa forma, aquest mètode pot proporcionar informació sobre el grau de degradació de la fusta provocat per agents com els fongs, la calor, la llum, o processos d'oxidació diversos (TAPPI, 2002b; Villegas i Àrea, 2009). Ara bé, cal tenir en compte que el procés de dissolució és suficientment agressiu com per dissoldre substàncies prèviament no degradades, per la qual cosa no cal perdre de vista aquest factor alhora d'analitzar els resultats.

La solubilitat de la fusta de castanyer s'ha incrementat amb l'edat dels teixits de les mostres analitzades. La diferència entre la fusta de branca i la de tronc normal és del 12,8%, i amb la de tronc afectat per roig del 20,8%. Des d'un punt de vista estadístic, totes les mostres han resultat normals segons el test de Lilliefors (Veure Taula 30). En canvi, el test de Bartlett mostra que les tres mostres no resultaren homoscedàstiques entre elles ($p=0,04$), però que les mostres de tronc sí que tenien la mateixa variància ($p=0,416$).

Taula 30. Prova de normalitat de Lilliefors. Solubilitat en NaOH

Estadístics	Fusta de branca	Fusta normal	Fusta roja
D	0,203	0,115	0,173
D (estandarditzat)	0,954	0,364	0,546
p-valor	0,018	0,968	0,543
Alfa	0,01	0,01	0,01

En front d'aquesta situació es va aplicar la prova no paramètrica de Kruskal-Wallis, i es va observar que les mostres eren significativament diferents entre elles ($p=0,001$).

Taula 31. Comparacions múltiples per parells. Procediment de Dunn. Contingut de cendres

Mostra	Freqüència	Suma dels rangs	Mitjana dels rangs	Grups	
Branca	22	333,000	15,136	A	
Tronc normal	10	246,000	24,600	A	B
Tronc roig	10	324,000	32,400		B

Així doncs, existeix una gradació entre les mostres. La fusta de les branques conté una proporció significativament menor de carbohidrats de baix pes molecular que la roja, però en la normal no apareixen diferències significatives respecte cap de les dos.

5.1.6. Lignina insoluble en àcid

L'àcid sulfúric corrou la fusta, n'hidrolitza i solubilitza els carbohidrats, i deixa com a residu sòlid la lignina. Tot i això, existeix una petita porció de lignina que sí és soluble en àcid. S'estima que en coníferes aquesta proporció està entre el 0,2% i 0,5%, i en frondoses entre el 3% i el 5% (TAPPI, 2002a). Tenint en compte aquesta consideració prèvia, els resultats es van analitzar mitjançant un ANOVA ja que les dades foren normals segons el test de Lilliefors per a la mostra normal i roja ($p=0,689$; $p=0,087$), i homoscedàstiques segons la prova de Bartlett ($p=0,632$). L'anàlisi de variància determinà que la diferència del 4,4% en la proporció de lignina no soluble a favor de la fusta roja respecte la normal era altament significativa ($p<0,0001$).

5.1.7. Extractius solubles no volàtils

Un cop dutes a terme les extraccions, es va observar que la solució d'etanol-toluè va arrossegar unes vint-i-vuit vegades més quantitat de substàncies que el diclorometà. Així doncs, els extractius solubles no volàtils de la fusta de castanyer estan essencialment compostats per carbohidrats de baix pes molecular, sals i altres components no solubles en aigua.

La quantitat d'extractius solubles no volàtils de cada una de les tres mostres es va analitzar estadísticament. El resultat obtingut en l'extracció amb diclorometà foren normals segons el test de Lilliefors per a la fusta de branca ($p=0,588$), la fusta normal de tronc ($p=0,834$), i la fusta roja ($p=0,173$). D'acord amb la prova de Bartlett, la variància de les tres mostres fou la mateixa ($p=0,112$). En conseqüència, es decidí córrer un ANOVA que mostrà que les tres fustes tenien una concentració d'extractius solubles en diclorometà significativament diferent entre elles ($p<0,001$). El test de Tukey agrupà les tres mostres per separat. Per tant, a les branques és on menys presència de ceres, greixos, resines, esterols de les parets cel·lulars, i hidrocarburs no volàtils trobem, i al tronc normal on més s'hi

acumulen. Per tant, en el tronc roig es produeix una disminució d'aquestes substàncies.

Pel que fa a l'extracció realitzada amb etanol-toluè, les mostres de fusta de branca ($p=0,938$), fusta normal de tronc ($p=0,05$) i fusta roja ($p=0,956$), foren igualment normals segons el test de Lilliefors. Ara bé, a diferència dels resultats de l'extracció amb diclorometà, les dades resultaren heteroscedàstiques ($p<0,001$). Així doncs, mitjançant una prova de Kruskal-Wallis ($p=0,01$) i un agrupament de Dunn es va comprovar que la mostra de la Rocassa era significativament diferent a la resta. En aquest cas, es confirma també que les branques tenen molt poca presència d'extractius solubles volàtils en general, i que, en el tronc roig, han desaparegut a diferència del que passa en el tronc normal.

5.1.8. Tanins i sòlids solubles en aigua

Quan hom parla de tanins en general es refereix a dos tipus de compostos químics de naturalesa eminentment fenòlica: tanins hidrolitzables i tanins de condensació. Els tanins hidrolitzables es poden emprar, parcialment com a substituïts del fenol en adhesius de fenol-formaldehid. Els del castanyer són mesclades de fenols simples com l'àcid pirogàlic, l'àcid elàgic i els esters dels sucres, generalment glucosa, amb l'àcid gàl·lic i digàl·lic. Concretament, el 78% d'ells són els anòmers hidrolitzables vescalagina i castalagina (Fengel and Wegener, 1989; Pizzi *et al.*, 1983).

En els assaigs realitzats, la proporció d'extracte tànnic en la fusta normal i roja ha estat pràcticament la mateixa, quedant al voltant del 10,8% de mitjana. En les dues extraccions realitzades s'han arrossegat un 4,4% més de sòlids solubles en aigua en la fusta roja que en la fusta normal. Per tant, la substància causant de la coloració roja no s'ha de dissoldre en major quantitat en medi àcid que en medi neutre, i queda descartat que sigui deguda a una concentració anormalment elevada de tanins.

5.1.9. Aspectes histològics

Les imatges revelen que la fusta analitzada de color normal del Sistema Mediterrani Català no presenta cap alteració o patologia respecte les mostres de la mateixa espècie presentades per Collardet et Besset (1988), García Esteban *et al.* (2003),

Giordano (1981), Guindeo Casasús (1989), Johnston (1999), Schoch *et al.* (2007), Schweingruber (1990), i Schweingruber (2007). Inclús, a les imatges publicades per García Esteban *et al.* (2003) i García Esteban i Guindeo Casasús (1990), també apareixen acumulacions de substàncies citoplasmàtiques solidificades acumulades en els idioblasts del parènquima radial o axial. Aquestes matèries acostumen a ser materials de rebuig, pigments, minerals o reserves alimentàries. De tota forma, amb el conjunt de tècniques emprades no es pot precisar amb exactitud l'origen i la natura d'aquestes inclusions, pel que hauran de ser identificades en properes investigacions.

A diferència de la fusta normal, el nombre d'inclusions a la fusta roja és molt important, i això explica la coloració rogenca dels teixits. En aparença no existeixen altres causes com deformacions de les parets cel·lulars, presència de hifes o qualsevol altra patologia, que pugui causar la coloració de forma directa. A més, segons Schweingruber (2007), la presència de xancre quedaria descartada perquè els castanyers afectats únicament mostren acumulacions de substàncies de color fosc al llarg dels anells de creixement, i els teixits envaïts presenten importants alteracions morfològiques. En ells no apareixen grans porus en la fusta de primavera, i s'incrementa la proporció de parènquima a la zona de l'anell.

5.1.10. Efectes del tractament tèrmic sobre el color i la massa

Els efectes de la modificació tèrmica a 200°C han estat els esperats en la fusta normal i roja. En ambdós casos la fusta s'ha enfosquit de forma apreciable, i la pèrdua de massa ha estat al voltant del 7%. El test ANOVA no troba diferències significatives en la pèrdua de massa ($p=0,274$), i a ull nu hom no és capaç de distingir entre els dos tipus de fusta un cop s'han termotreatat. Aquests resultats són molt positius i indiquen que la fusta roja té el mateix comportament que la normal en front un termotreatament a 200°C. Per tant, aquesta tècnica pot ser una solució per trobar nous usos per a la fusta afectada per roig.

Ara bé, pel que fa a la fusta modificada tèrmicament, a priori queden descartats els usos estructurals per la disminució que provoca el termotreatament sobre la densitat, la resistència i l'elasticitat. Això es deu principalment a la degradació de les hemicel·luloses, a la menor ramificació de la lignina i al major grau de cristallinització de la cel·lulosa (Kocaefe; 2008; Bekhta and Niemz, 2003). En el mateix sentit, també caldria orientar la seva utilització a productes on l'encolat no

fos determinant. Cal tenir en compte que el termotractament disminueix el pH i la humectabilitat, i això provoca que la resistència de les unions encolades a esforç tallant i a delaminació sigui inferior al de la fusta natural (Sernek *et al.*, 2008).

5.2. Consideracions generals

La fusta roja és pobra en sals minerals no volàtils com correspon a tot teixit poc actiu metabòlicament. S'estima que el seu contingut en carboni és el mateix que el de la fusta normal, ja que ni s'ha detectat cap pèrdua de massa ni presenta un poder calorífic inferior. També, d'acord amb els anàlisis, està empobrida en ceres, greixos, resines, esterols de les parets cel·lulars i hidrocarburs no volàtils, ha mantingut la proporció de tanins, i ha incrementat significativament la proporció de sòlids solubles en aigua. Així doncs, la fusta enrogida té una major proporció de holocel·lulosa degradada, i aquest fet és coherent amb que tingui una proporció major de lignina. Per tant, considerant la presència patent de substàncies citoplasmàtiques solidificades acumulades en els idioblasts del parènquima radial i axial observables a les imatges microscòpiques, i havent de descartar que siguin minerals, substàncies de reserva o tanins, la possibilitat més raonable en base a la resta de resultats és que siguin substàncies de rebuig metabòlic de baix pes molecular, heterogènies i solubles que, acumulades de forma col·lateral, formen les tíl·lides que donen el típic color a aquesta fusta.

Així doncs, a la vista dels resultats, l'enrogiment de la fusta es pot considerar amb tota probabilitat un mecanisme de decaïment propi del castanyer que provoca l'oclusió dels vasos. Aquest fenomen es produeix durant la duraminització perquè la saba deixi de circular, el teixit abandoni les funcions de conducció, i compleixi únicament amb tasques de suport. Es necessita investigació addicional per determinar la naturalesa específica dels components acumulats. Amb les dades disponibles fins a la data, la composició general de la fusta de castanyer és la següent:

Taula 32. Composició química de la fusta de castanyer

Compost	Proporció (%)	
	Dades pròpies	Fengel and Wegener (1989)
Holocel·lulosa (Carbohidrats)	27-33	47,3 ¹
Lignina	23-30	31,8
Tanins	10-12	n.d.
Extractius no tanins solubles en aigua	6-13	16,7 ²
Extractius solubles en dissolvent orgànic no volàtils	6-10	4,7
Sals minerals no volàtils	0,2	0,4

¹Cel·lulosa; ²Pentosana; n.d.: no disponible

A partir dels resultats obtinguts, no és aconsellable allargar els torns de tallada si es volen destinar els rolls a ús estructural. Pel que fa a la fusta massissa, els troncs envellits són més proclius a presentar fusta lleugerament decaiguda, i això pot incrementar el percentatge de rebuig o disminuir les seves propietats característiques. A més, tallant arbres joves s'evita l'aparició de les coloracions lligades al decaïment, i també s'evita que els elements estructurals siguin descartats per aquest motiu. Si per contra la gestió silvícola s'orienta a la producció de fusta a reconstruir amb coles, tampoc és aconsellable allargar el temps de rotació en els rodals. Per una banda, no és imprescindible assolir grans diàmetres i el creixement anual mig minva amb l'edat, i per l'altra, l'acidificació de la fusta amb l'edat dificulta l'obtenció d'encolats de qualitat.

6. Conclusions

De l'anàlisi de les propietats químiques i microscòpiques de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català i de l'estudi del roig, se n'extreuen les següents conclusions:

- **El contingut de cendres** de la fusta de castanyer **és molt baix**: 0,09% en el tronc i 0,51% a les branques.
- El **poder calorífic** de la fusta de castanyer és 20005 J/g.
- **El pH** de la fusta de castanyer **s'acidifica amb l'edat**. En troncs oscil·la entre **3,6 i 4,5**, i a les branques és 6,4. La capacitat tampó és alta en front àcids però no en front bases.
- El **contingut de tanins** a la fusta de castanyer és del **10,8%**.
- **El termotractament homogeneïtza el color de la fusta normal i la fusta roja**. Els dos tipus de fusta es comporten de forma semblant en front la degradació tèrmica.
- **El roig és una til·losi de decaïment** provocada per l'acumulació de substàncies de rebuig metabòlic de baix pes molecular, heterogènies i solubles. **La fusta roja és pobra** amb extractius i té major presència de carbohidrats solubles. Es manifesta principalment en arbres d'edat avançada.

7. Bibliografia

ADZET, J. M. (1990). *II Symposium Internacional de Curtición Vegetal. Igualada: Escuela Superior de Tenería*. ISBN: 8460074706.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997). *Madera aserrada y madera en rollo. Terminología. Parte 7: Términos relativos a la estructura anatómica de la madera*. UNE-EN 844-7:1997. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002). *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general*. UNE-EN 13183-1:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2010). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: humedad de la muestra para análisis general*. UNE-EN 14774-3:2011. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2011). *Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico*. UNE-EN 14918:2011. Madrid: AENOR.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (2012). *Marque NF - Biocombustibles solides. NF 444*. Paris: AFNOR.

AYDEMIR, D.; GUNDUZ, G.; ALTUNTAS, E.; ERTAS, M.; TURGUT SAHIN, H.; HAKKI ALMA, M. (2011). "Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated hornbeam and uludag fir wood". *BioResources*, vol. 6, núm. 2: p. 1308-1321.

BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (2003). *Wood quality and its biological basis*. Oxford [Regne Unit]. Blackwell Publishing. ISBN: 1-84127-319-8.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. (2003). "Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood". *Holzforschung*, vol. 57: p. 539-546.

BRISCHKE, C.; WELBACHER, C.R.; BRANDT, K.; RAPP, A. O. (2007). "Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE L*a*b* color data on homogenized wood samples". *Holzforschung*, vol. 61, núm. 1: p. 19-22.

BURRIEL, J.A. [et al.] (2000-2004). *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya*. Bellaterra [Barcelona]: CREA. ISBN 84-931323-0-6.

BUTIN, H. (1995). *Tree diseases and disorders: causes, biology, and control in forest and amenity trees*. Oxford: Oxford University Press. ISBN 0-19-854932-5.

CASTRO, M.; JUSTO, A.; LORENZO, P. (2010). *Bolets*. Barcelona: Salvatella. ISBN: 978-84-8412-560-0.

COLINAS GONZÁLEZ, C. (2010, 2 febrer). Corazón rojo del castaño [en línia]. [Consultat: 3 de febrer 2010]. Missatge electrònic.

COLINAS GONZÁLEZ, C.; USCUPULIC, M. (1999). "Studies on chestnut blight (*Chryphonectria parasitica* (Murr.) Barr) in north-east Spain". A: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHESTNUT. Proceedings of the Second International Symposium on Chestnut. Bordeaux [France]: *ISHS Acta Horticulturae*. p. 495-500. ISBN 978-90-66059-41-2.

COLLARDET, J.; BESSET, J. (1988). *Les bois commerciaux et leurs utilisations: Tome II. Bois feuillus des régions tempérées et froides*. Dourdan: Éditions H. Vial. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. ISBN 2-85-101-027-1.

COLLARDET, J.; BESSET, J. (1988). *Les bois commerciaux et leurs utilisations: Tome II. Bois feuillus des régions tempérées et froides*. Dourdan: Éditions H. Vial. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. ISBN 2-85-101-027-1.

CROUS BUSQUETS, J. (2010, 1 setembre). Entrevista personal amb el Gerent de Maderera Gerundense S.A. (MADEGESA).

ELVIRA MARTÍN, L. M. (1984). "Respuesta de la madera ante el fuego en la construcción". *Informes de la Construcción*, vol. 35, núm. 358: p. 63-72.

ETIÉGNI, L.; CAMPBELL, A.G. (1991). "Physical and chemical characteristics of wood ash". *Bioresource Technology*, vol. 37: p. 173-178.

FENGEL, D.; WEGENER, G. (1989). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. 2nd ed. Berlin: De Gruyter. ISBN: 3-11-012059-3.

FONTI, P.; BRÄKER, O.; GIUDUCI, F. (2002a). "Relationship between ring shake incidence and earlywood vessel characteristics in chestnut wood". *IAWA Journal*, vol. 23, núm. 3: p. 287-298.

FONTI, P.; GIUDICI, F. (2005). "Reducing the risk of ring shake in chestnut". A: INTERNATIONAL CHESTNUT CONGRESS. Proceedings of the Third International Chestnut Congress. Chaves [Portugal]: *ISHS Acta Horticulturae*. p. 733-742. ISBN 978-90-66051-00-3.

FONTI, P.; MACCHIONI, N. (2003). "Ring shake in chestnut: Anatomical description, extent and frequency of failures". *Annals of Forest Science*, vol. 60: p. 403-408.

FONTI, P.; MACCHIONI, N.; THIBAUT, B. (2002b). "Ring shake in chestnut (*Castanea sativa* Mill.): State of the art". *Annals of Forest Science*, vol. 59: p. 129-140.

FRASCARIA, N.; CHANSON, B.; THIBAUT, B.; LEFRANC, M. (1992). "Génotypes et résistance mécanique radiale du bois de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.). Analyse d'un des facteurs explicatifs de la roulure". *Annals of Forest Science*, vol. 49, núm. 1: p. 49-62.

GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A. (1990). Anatomía de frondosas Españolas. Madrid: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM). ISBN 84-87381-04-9.

GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA ORAMAS, C.; DE PALACIOS DE PALACIOS, P. (2003). *La madera y su anatomía*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. AiTiM. ISBN 84-86793-91-2.

GIORDANO, G. (1981). *Tecnologia del legno. Volume I. La materia prima*. Seconda edizione. Torino [Itàlia]: Unione Tipografico-Editrice Torinese. ISBN: 88-02-03623-3.

GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA SÁNCHEZ, C. (1976). *Tecnología de la madera: La madera como materia prima. Vol. IV*. Madrid: Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. ISBN 84-400-1244-6.

HARDHAM, A. R. (2005). "Phytophthora cinnamomi". *Molecular plant pathology*, vol. 6, núm. 6: p. 589-604.

HERRERO ADÁN, D. (2012). "Comportamiento de las fibras en madera de coníferas ante el fallo a compresión axial". *Montes*, núm. 108: p. 12-17.

JOHANSSON, D.; MORÉN, T. (2006). "The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 64: p. 104-110.

JOHNSTON, D. R. (1999). *La madera. Clases y características*. Barcelona: Grupo Editorial CEAC. (Biblioteca de la madera y el mueble). ISBN 84-329-7516-8.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; BULOK Y. (2008). "Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen". *BioResources*, vol. 3, núm. 2: p. 517-537.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. (2000). "Bending strength and toughness of heat-treated wood". *Journal of Wood Science*, vol. 46: p. 8-15.

LEE, S.; WU, Q.; STRICKLAND, B. (2001). "The influence of flake chemical properties and zinc borate on gel time of phenolic resin for oriented strandboard". *Wood and Fiber Science*, vol. 33, núm. 3: p. 425-436.

LIODAKIS, S.; TSOUKALA, M.; KATSIKIANNIS, G. (2009). "Laboratory study of leaching properties of Mediterranean Forest Species Ashes". *Water, Air & Soil Pollution*, vol. 203: p. 99-107.

LLIMONA, X. [et al.] (1991). *Història Natural dels Països Catalans: Vol. 5. Fongs i líquens*. Barcelona: Fundació Enciclopèdia Catalana. ISBN 84-7739-267-6.

MIES, B. (2013). *Eduard's samples: sweet red chestnut*. Kuchl: Fachhochschule Salzburg GmbH. University of Applied Sciences. (Informe personal).

MILITZ, H.; BUSETTO, D.; HAPLA, F. (2003). "Investigation on natural durability and sorption properties of italian Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) from coppice stands". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 61: p. 133-141.

MISRA, M. K.; RAGLAND, K. W.; BAKER, A. J. (1993). "Wood ash composition as a function of furnace temperature". *Biomass and Bioenergy*, vol. 4, núm. 2: p. 103-116.

MOORE, J. (2011). *Wood properties and uses of Sitka spruce in Britain*. Edinburgh [Escòcia]: Forestry Commission. ISBN 978-0-85538-825-6.

MUTABARUKA, C.; WOODGATE, G. R.; BUCKLEY, G. P. (2005). "External and internal growth parameters as potential indicators of shake in sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.)". *Forestry*, vol. 78, núm. 2: p. 175-186.

NIEMZ, P.; HOFMANN, T.; RÉTFALVI, T. (2010). "Investigation of chemical changes in the structure of thermally modified wood". *Maderas y Science Tecnología*, vol. 12, núm. 2: p. 69-78.

PASSIALIS, C.; VOULGARIDIS, E.; ADAMOPOULOS, S.; MATSOUKA, M. (2008). "Extractives, acidity, buffering capacity, ash and inorganic elements of black locust wood and bark of different clones and origin". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 66, núm. 6: p. 395-400.

PERAZA SÁNCHEZ, F. [et al.]. (2004). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. Madrid: AITIM. ISBN 84-87381.

PETTERSEN, R. C. (1984). "The chemical composition of wood". A: *The chemistry of solid wood*. Washington: American Chemical Society. ISBN-10: 0841207968.

RICHTER, H. G.; DALLWITZ, M. J. (2000 en endavant). *Commercial timbers [en línia]: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*. (2000, 4 de maig). Hamburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut. [Consultat: 4 de setembre 2009]. Disponible a Internet: http://www.bfafh.de/inst4/41/intro_es.htm.

ROESER, K. R. (1972). "Die Nadel der Schwarzkiefer-Massenprodukt und Kunstwert der Natur". *Mikrokosmos*, núm. 61: p. 33-36.

ROWELL, R. M. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton [Florida, USA]. CRC Press. ISBN: 0-8493-1588-3.

SCHNABEL, T.; ZIMMER, B.; PETUTSCHNIGG, A.; SCHÖNBERGER, S. (2007). "An approach to classify thermally modified hardwoods by color". Forest Products Journal, vol. 57, núm. 9; p. 105-110.

SCHOCH, W.; HELLER, I.; SCHWEINGRUBER, F. H.; KIENAST, F. (2007, 12 de setembre). Wood anatomy of central European Species [en línia]. Birmensdorf [Confederació Helvètica]: Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Consultat: 5 de setembre 2009. Disponible a Internet: www.woodanatomy.ch.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1990). *Mikroskopische holzanatomie*. 3. Aufl. Birmensdorf [Confederació Helvètica]. Eidgenössische forschungsanstalt für Wald, Schnee und landschaft. ISBN: 3905620022.

SCHWEINGRUBER, F. H. (2007). *Wood structure and environment*. Berlin: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-48299-4.

SERAFIMOVA, E.; MLADENOV, M.; MIHAILOVA, I.; PELOVSKI, Y. (2011). "Study on the characteristics of waste wood ash". Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, vol. 46, núm. 1: p. 31-34.

SERNEK, M.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; DESPRES, A; GÉRARDIN, P. (2008). "Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives". *Holz als Roh- und Werkstoff*, núm. 66: p. 173-180.

SHI, J.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. (2007). "Mechanical behavior of Quebecwood species heat-treated using ThermoWood process". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 65: 255-259.

SHI, J.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. (2007). "Mechanical behavior of Quebecwood species heat-treated using ThermoWood process". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 65: p. 255-259.

SJÖSTROM, E. (1993). *Wood chemistry: fundamentals and applications*. 2nd ed. San Diego: Academic Press. ISBN: 0-12-647481-8.

SPINA, S.; AGRUMI, M.; BISTONI A.; RADOCCIA, C.; ROMAGNOLI M. (2009). "Contributo alla conoscenza della cipollatura nel legno di castagno in alcuni siti del Lazio". A: III CONGRESSO NAZIONALE DI SELVICOLTURA. *Per la conservazione e il miglioramento dei boschi*. Taormina [Italia]: Accademia Italiana di Scienze Forestali. p. 1544-1549. ISBN 978-88-87553-16-1.

ŠUŠTERŠIĆ, Ž.; MOHAREB, A.; CHAOUCH, M.; PÉTRISSANS, M.; PETRIĆ, M.; GÉRARDIN, P. (2010). "Prediction of the decay resistance of heat treated wood on the basis of its elemental composition". *Polymer Degradation and Stability*, vol. 95: p. 94-97.

TAINTER, F.H.; BAKER, F.A. (1996). *Principles of forest pathology*. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-12952-6.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (1997). *Solvent extractives of wood and pulp*. T 204 cm-97. Norcross, Georgia: TAPPI.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (2002a). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. T 222 om-02. Norcross, Georgia: TAPPI.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (2002b). *One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*. T 212 om-02. Norcross, Georgia: TAPPI.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (2002c). *Sampling and preparing wood for analysis*. T 257 cm-02. Norcross, Georgia: TAPPI.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (2007a). *Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C*. T 211 om-07. Norcross, Georgia: TAPPI.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (2007b). *pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard*. T 252 cm-07. Norcross, Georgia: TAPPI.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (2007c). *Preparation of wood for chemical analysis*. T 264 cm-97 (Revision). Norcross, Georgia: TAPPI.

TODOROVIĆ, N.; POPOVIĆ, Z.; MILIĆ, G.; POPADIĆ, R. (2012). "Estimation of heat-treated beechwood properties by color change". *BioResources*, vol. 7, núm. 1: p. 799-815.

TORRES JUAN, J. (1993). *Patología forestal: Principales enfermedades de nuestras especies forestales*. Madrid: Mundi-Prensa. ISBN 84-7114-442-5.

VETTRAINO, A. M.; MOREL, O.; PERLEROU, C.; ROBIN, C.; DIAMANDIS, S.; VANNINI, A. (2007). "Ink Disease of Chestnut and Distribution of Phytophthora Species in Europe". A: 1ST BALKAN REGIONAL WORKSHOP. *Sustainable management of sweet chestnut ecosystems*. Sofia [Bulgaria]: Bulgarian Academy of Sciences. p. 153-167. ISBN 978-954-457-046-0.

VILLEGAS, M. S.; AREA, M. C. (2009). "Caracterización de la madera de Salix. 2: Relaciones entre propiedades ópticas y otros atributos del leño". *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 18, núm. 2: p. 204-212.

WINDEISEN, E., BÄCHLE, H., ZIMMER, B., WEGENER, G. (2009). "Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood". *Holzforschung*, vol. 63: p. 773-778.

Annexos

Annex fotogràfic



Figura 75. Branca de castanyer escorçada llesta per ser triturada



Figura 76. Rodanxa de castanyer de Can Preses. Escorça, albca i duramen



Figura 77. Serradures de fusta preparades per ser assecades en estufa



Figura 78. Cendres calcinades de fusta de castanyer



Figura 79. Tanins dissolts en aigua



Figura 80. Rotavapor Büchi R-114



Figura 81. Extractor Soxhlet



Figura 82. Provetes termotractades refredant-se en el dessecador



Figura 83. Espectrofotòmetre Macbeth Color-Eye 3000



Figura 84. Mostres de fusta. Normal, roja, normal termotractada, i roja termotractada



Figura 85. Provetes roges i normals abans del termotractament



Figura 86. Provetes roges i normals després del termotractament

CAPÍTOL III

FUSTA LLIURE DE DEFECTES

Índex

1. Introducció	147
1.1. Propietats bàsiques de la fusta	147
1.1.1. Control de la higroscopicitat	148
1.1.2. Control de l'anisotropia en fusta lliure de defectes	148
1.2. Propietats físiques i mecàniques de la fusta	149
2. Objectius	151
3. Materials i mètodes	153
3.1. Disseny experimental i anàlisi estadístic	153
3.1.1. Nombre de repeticions	153
3.1.2. Factors d'estudi i anàlisi estadístic	154
3.2. Preparació de la mostra	156
3.2.1. Aprofitament forestal i transformació industrial	156
3.2.2. Elaboració de les provetes d'assaig	158
3.2.3. Condicionament de les provetes d'assaig	160
3.3. Assaigs físico-mecànics de fusta lliure de defectes	161
3.3.1. Densitat i humitat	161
3.3.2. Contracció volumètrica	162
3.3.3. Higroscopicitat	164
3.3.4. Duresa	165
3.3.5. Resistència a compressió axial	166
3.3.6. Resistència a flexió estàtica	167
3.3.7. Resistència a tracció perpendicular a les fibres	168
4. Resultats	169
4.1. Densitat	169
4.2. Contracció volumètrica	170
4.2.1. Contracció volumètrica	170
4.2.2. Coeficient de contracció volumètrica	171
4.3. Higroscopicitat	172
4.4. Duresa	173
4.5. Resistència a compressió axial	174
4.6. Resistència a flexió estàtica	175
4.7. Resistència a tracció perpendicular a les fibres	176
5. Discussió	179
5.1. Anàlisi estadístic dels resultats	179
5.1.1. Independència, homoscedasticitat i normalitat mostral	179
5.1.2. Anàlisi dels factors d'estudi	180

5.1.3. Anàlisi de components principals	183
5.2. Contrast de resultats	187
5.3. Anàlisi silvícola de la mostra	190
5.4. Observacions metodològiques.....	191
5.4.1. Control de la humitat de la fusta	191
5.4.2. Densitat i pes específic	192
5.4.3. Resistència a tracció perpendicular a les fibres.....	193
6. Conclusions.....	197
7. Bibliografia.....	199
Annexos	205
Annex: Mitjana acumulada i repeticions.....	207
Annex fotogràfic	211

1. Introducció

La fusta és un material fibrós i heterogeni amb presència de singularitats com nusos o clivelles entre altres. El seu estudi a nivell macroscòpic es duu a terme sobre fusta lliure de defectes de petita dimensió o sobre fusta de grandària estructural segons si s'inclouen o no aquestes imperfeccions. Per tant, per emprendre la caracterització d'una espècie de fusta hom ha d'escollir, en primer lloc, a quina escala de detall vol treballar. Aquest capítol se centra en la determinació de les propietats de la fusta sense les imperfeccions que minven el potencial resistent de les fibres. Dit d'una altra forma, es determinarà les característiques de la fusta de castanyer lliure de defectes.

Els assaigs de les propietats físiques i mecàniques es realitzaren seguint les normes elaborades pel "Comité Tecnológico de Normalización (CTN): 56 Madera y Corcho" de la "Asociación Española de Normalización y Certificación" (AENOR). Es decidí seguir aquesta metodologia per obtenir resultats estandarditzats i comparables als d'altres lots i espècies analitzades per la comunitat científica. En els testos també es van controlar la higroscopicitat i l'anisotropia al ser les qualitats més influents sobre les propietats de la fusta un cop eliminades les singularitats.

1.1. Propietats bàsiques de la fusta

La naturalesa i estructura fibrosa de la fusta fa que sigui un material intrínsecament anisòtrop, higroscòpic i polar. La influència a nivell macroscòpic de la polaritat química sobre les propietats físiques i mecàniques de la fusta és insignificant, però no ho és ni la quantitat d'aigua continguda, ni el percentatge, ni la severitat dels defectes presents. Per tant, per minimitzar la variabilitat dels resultats experimentals i fer-los homologables, cal referir les característiques físico-mecàniques d'una espècie de fusta a un contingut d'humitat, escala d'observació i nivell de defectes determinat.

1.1.1. Control de la higroscopicitat

La fusta és un material porós capaç d'absorbir o cedir humitat a l'ambient que l'envolta en funció del gradient hídric existent, de tal forma que la direcció i velocitat d'aquest trànsit d'aigua depèn de la humitat, temperatura i pressió atmosfèrica, per una banda, i del contingut d'aigua, relació superfície/volum i porositat de la mostra per l'altra. Per tant, com que la quantitat d'aigua dins la fusta pot variar en el temps i aquesta afecta significativament a les propietats físiques i mecàniques del material, cal referir totes les seves característiques a un contingut d'aigua estàndard. A la norma UNE 56528:1979 (AENOR, 1979c) aquest contingut d'humitat d'equilibri es defineix com aquell a què s'arriba quan l'ambient es troba a 20°C i 65% d'humitat. Segons els àbacs de Keylwerth (1949) i Kollmann (1936) aquestes condicions corresponen a un 12% d'humitat de la fusta.

El xilema viu pot arribar a encloure més pes d'aigua que el pes sec de la fusta que la conté. Un cop l'arbre és abatut, el contingut d'aigua descendeix progressivament fins arribar al punt de saturació de les fibres situat al voltant del 30% aproximadament. Superat aquest lílindar canvien les condicions internes originals i es desencadenen una sèrie de processos que fan recomanable un assecat acurat i progressiu per minimitzar els canvis dimensionals de la fusta, controlar l'alliberament de les tensions internes responsables de l'aparició de clivelles, i prevenir l'aparició d'atacs fúngics (Conde y Fernández-Golfín, 2007).

1.1.2. Control de l'anisotropia en fusta lliure de defectes

Tal com s'ha vist a la descripció anatòmica (Veure Capítol II), la disposició cel·lular a la fusta varia amb la direcció axial, tangencial o radial i, per tant, cal treballar amb mostres d'una grandària suficient per incloure equilibradament l'efecte dels diferents plans. Per aquest motiu, totes les provetes de propietats físico-mecàniques emprades en els assajos tenen una mida en la qual queden definides la direcció de les fibres dins les provetes i, algunes d'elles, fins i tot tenen especificada l'orientació i la curvatura dels anells de creixement. Per contra, si s'incrementés massa la grandària de les provetes s'hi inclourien inevitablement defectes com nusos, clivelles, semes, fibres desviades, medul·la, etc., que farien augmentar la variabilitat del material i impedirien valorar el potencial resistent. Com a conseqüència de tot l'anterior, les normes espanyoles sobre característiques físico-

mecàniques de la fusta consideren idoni estudiar la majoria de propietats de la fusta sense defectes amb provetes paral·lelepípediques de secció 20×20 mm i longitud variable segons l'assaig entre 25 i 300 mm.

1.2. Propietats físiques i mecàniques de la fusta

Les propietats físiques d'un material són aquelles que poden ser observades i mesurades sense que es produeixi cap canvi en la composició molecular de la matèria, mentre que les propietats mecàniques descriuen el comportament dels materials sota una càrrega o esforç. En el cas de la fusta, les propietats més rellevants a nivell macroscòpic són aquelles que estan relacionades amb la seva densitat, el seu comportament en vers l'aigua, i la capacitat de resistir esforços.

Taula 33. Propietats físico-mecàniques de la fusta de castanyer caracteritzada

Tipus de propietat	Propietat	Definició	Norma UNE
Física	Densitat (kg/m ³)	Relació entre la massa i el volum de la fusta	UNE 56531:1977 ¹
	Contracció volumètrica (%)	Variació volumètrica d'una fusta en passar del punt de saturació de les fibres fins l'estat anhidre	UNE 56533:1977
	Coefficient de contracció volumètrica (%)	Variació volumètrica d'una fusta que es troba per sota del punt de saturació de les fibres en canviar un 1% la seva humitat	UNE 56533:1977
	Higroscopicitat (kg/m ³)	Variació de la densitat de la fusta quan el seu contingut d'humitat varia un 1%	UNE 56532:1977
Mecànica	Duresa (mm ⁻¹)	Resistència que oposa una fusta a la penetració d'un cos	UNE 56534:1977
	Resistència a la compressió axial (kg/cm ²)	Capacitat de la fusta de suportar càrregues estàtiques en sentit paral·lel a la fibra	UNE 56535:1977
	Resistència a la flexió estàtica (kg/cm ²)	Capacitat de la fusta de suportar deformació sota càrrega	UNE 56537:1979
	Resistència a la tracció perpendicular a les fibres (kg/cm ²)	Capacitat de la fusta de suportar tensió perpendicular a la direcció de les fibres	UNE 56538:1978

¹ Veure 5.4.2. Densitat i pes específic

La duresa és un cas especial entre les propietats ja que, malgrat ser una propietat mecànica (Capuz, 2005; Peraza *et al.*, 2004), per determinar-la no es mesura l'esforç aplicat per unitat de superfície sinó que es fa indirectament a partir de la deformació que aquest provoca sobre el material. Per aquesta raó la resistència a la penetració s'expressa en unitats de longitud.

2. Objectius

Els objectius del Capítol III “Propietats físico-mecàniques de la fusta sense defectes de castanyer” són:

- **Determinar les propietats de la fusta lliure de defectes** de *Castanea sativa* del Sistema Mediterrani Català:
 - Propietats físiques: densitat, higroscopicitat i contracció volumètrica.
 - Propietats mecàniques: duresa, resistència a compressió axial, resistència a flexió estàtica i resistència a tracció perpendicular a les fibres.

- Estudiar la variabilitat **del comportament de la fusta lliure de defectes** de castanyer en funció de:
 - Creixement anual dels individus.
 - Estat sanitari de l'arbre.
 - Finca o rodal de procedència dels arbres.
 - Arbre del qual prové la fusta.

3. Materials i mètodes

3.1. Disseny experimental i anàlisi estadístic

Les fusta analitzada procedia de rollis aprofitats a les finques descrites al Capítol II: el Vilar, la Rocassa, Can Preses, Can Planes i Can Prat (Veure Taula 34). Tot seguit s'explica com s'han tractat matemàticament els factors d'estudi per caracteritzar les propietats de la fusta lliure de defectes tenint en compte la seva variabilitat.

Taula 34. Descripció de la mostra de fusta analitzada

Finca	Descripció de la mostra	
	Arbres	Part del tronc
El Vilar	11	Metre inferior de la base del tronc. Estreps i zona cònica basal rebutjada
La Rocassa	12	1 metre a partir de 2,4 metres a contar des de la base. Part inferior destinada a bigam
Can Preses	12	Metre inferior de la base del tronc. Estreps i zona cònica basal rebutjada
Can Planes	12	Metre inferior de la base del tronc. Estreps i zona cònica basal rebutjada
Can Prat	12	Metre inferior de la base del tronc. Estreps i zona cònica basal rebutjada

3.1.1. Nombre de repeticions

En experiments amb gran nombre de repeticions és possible obtenir amb precisió el valor d'estadístics com la mitjana, però en mostres reduïdes podem trobar dos fonts d'incertesa: l'error intrínsec del mostreig aleatori i la incapacitat d'esbrinar la distribució d'una mostra en no ser suficientment gran. Per aquest motiu, en un gran nombre de casos s'assumeix que la població amb què es treballa s'ajusta a la normal, ja que sempre és millor assumir que una mostra segueix una distribució coneguda de propietats ben definides i tabulades (Student, 1908).

Quan una població presenta una distribució normal és possible determinar els seus paràmetres a partir de les dades extrems d'una mostra i, aplicant la distribució t-Student, es pot acotar un interval d'error. En el cas de les propietats físico-mecàniques de la fusta de castanyer, s'ha comprovat prèviament, gràcies a l'anàlisi de les dades presentades a la tesi doctoral de Méndez Lodos (1996), que la distribució dels resultats s'assimila a una normal. Així doncs, s'ha arribat a una solució de compromís per resoldre el dilema entre la precisió a assolir i el temps i

els recursos econòmics disponibles. Els criteris emprats per determinar la quantitat de repeticions a dur a terme han estat els següents:

- **Mitjana acumulada:** la mitjana de tota variable tendeix a estabilitzar-se en acumular un cert nombre de repeticions. Per conèixer quan s'assoleix aquest punt s'analitzaren les dades de la tesi doctoral de Méndez Lodos (1996). En ella s'aprecia com la mitjana acumulada s'estabilitza raonablement entre les 50 i les 70 repeticions per a la majoria de propietats físico-mecàniques (Veure Annex: Mitjana acumulada i repeticions).
- **Graus de llibertat de t-Student:** La distribució t-Student depèn únicament dels graus de llibertat un cop definit el nivell de significació (α) amb què es vol treballar: en el nostre cas $\alpha=0,95$. Observant la probabilitat acumulada per aquest nivell de confiança s'observa que, a partir de les 6 repeticions, el valor t deixa de decreixer amb celeritat.
- **Mostra disponible:** malauradament la disponibilitat del material experimental està condicionat per nombrosos factors no controlables i cal adaptar l'experiment a les possibilitats d'obtenir-lo.
- **Eficiència mostral:** establir una grandària de mostra tant reduïda com sigui possible permet alliberar recursos i, arribat el cas, destinar esforços a l'estudi d'altres fonts de variabilitat de la mostra.

Per tant, tenint en compte aquestes consideracions, es realitzaren sis repeticions de cada propietat físico-mecànica per cada arbre que prengué part a l'estudi, obtenint per a cada factor al voltant de setanta assaigs. Cal dir que es descartà el mètode recollit a la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978c) per determinar el nombre mínim de provetes en no adaptar-se a l'estructura de l'anàlisi plantejat. En primer lloc, aquesta norma tracta la mostra com a un únic lot sense considerar altres factors d'estudi, a més, necessita experiències prèvies per estimar l'interval de confiança i, finalment, proposa coeficients de variació lleugerament diferents respecte als observats per l'autor en anteriors experiències (Correal Mòdol i Vilches Casals, 2012).

3.1.2. Factors d'estudi i anàlisi estadístic

L'anàlisi estadístic es duu a terme a nivell paramètric i factorial amb l'objectiu de descriure i resumir les dades obtingudes als experiments i conèixer algunes de les fonts que generen variabilitat. A nivell descriptiu s'utilitzen mesures de posició

(mitjana, quartils, percentils) i dispersió (desviació estàndard, rang). Pel que fa a la variabilitat s'ha fet el control de les següents variables quantitatives i qualitatives:

- **Creixement:** Covariable. Creixement mitjà de l'arbre de què s'ha extret la proveta d'assaig (mm/any). No és el gruix dels anells de les provetes.
- **Estat:** Factor categòric fix. Descripció qualitativa de l'estat sanitari de l'arbre d'on s'ha tret la fusta: sa, decaigut o roig. Un arbre sa prové d'una massa vigorosa, un decaigut de finques amb forta presència de xancre o individus en estat sanitari no òptim, i un peu roig presenta tota la fusta vermellosa. La fusta de petita dimensió utilitzada, malgrat pugui provenir d'arbres decaiguts, es troba lliure de defectes exceptuant la coloració.
- **Finca:** Factor categòric fix. Rodal de procedència dels arbres: El Vilar, La Rocassa, Can Preses, Can Planes i Can Prat.
- **Arbre:** Factor categòric aleatori. Es considera aleatori ja que el nombre d'individus existent és conceptualment infinit. De cada arbre s'han extret sis provetes.

Els procediment lineal general (PROC GLM) no és capaç de considerar factors aleatoris, per aquest motiu l'anàlisi dels factors d'estudi s'ha realitzat mitjançant un model lineal mixt (PROC MIXED). S'han elaborat dos models que es diferencien únicament per la inclusió de la covariable creixement amb l'objectiu de contrastar la seva influència sobre els factors categòrics (Veure Figura 87 i Figura 88). El model s'ha executat amb el software SAS/STAT 9.0.

```
Proc mixed data = work.castanyer covtest;
  Class Estat Finca Arbre;
  Model Densitat = Creix Estat Finca(Estat)/ Htype=1 Outp=Residus;
  Random Arbre*Finca*Estat;
  Lsmeans Estat / Pdiff Cl Adjust=Tukey Alpha = 0.05;
  Lsmeans Finca(Estat)/ Pdiff Cl Adjust=Tukey Alpha = 0.05;
  Contrast "Sa versus Resta" estat +1 +1 -2;
  Contrast "Roig versus Resta" estat +1 -2 +1;
Run;
```

Figura 87. Model C+: Sintaxi del procediment mixt incloent la covariable creixement.

Factors: creixement, estat, finca i arbre. Model exemplificat per a densitat

```
Proc mixed data = work.castanyer covtest;
  Class Estat Finca Arbre;
  Model Densitat = Estat Finca(Estat)/ Htype=1 Outp=Residus;
  Random Arbre*Finca*Estat;
  Lsmeans Estat / Pdiff Cl Adjust=Tukey Alpha = 0.05;
  Lsmeans Finca(Estat)/ Pdiff Cl Adjust=Tukey Alpha = 0.05;
  Contrast "Sa versus Resta" estat +1 +1 -2;
  Contrast "Roig versus Resta" estat +1 -2 +1;
Run;
```

Figura 88. Model C-: Sintaxi del procediment mixt excloent la covariable creixement.

Factors: estat, finca i arbre. Model exemplificat per a densitat

En els models, el factor finca està jerarquitzat a l'estat sanitari de la finca, i l'arbre interacciona amb la finca i l'estat sanitari de la massa. També es duen a terme els contrastos de la fusta sana i roja amb la resta de provetes per conèixer si existeixen diferències entre tipus de fusta. A partir de la sentència "Outp", el procediment elabora els residus sobre els quals s'analitza la independència, la normalitat, i la homoscedasticitat de la mostra. La independència de les dades s'avalua amb el gràfic de residus estandarditzats, la distribució de les dades s'analitza mitjançant el test de Lilliefors, una adaptació del test de Kolmogorov-Smirnov, i la igualtat de variàncies entre mostres és verificada aplicant els tests de Levene i de Bartlett. El test d'aquestes tres propietats s'ha dut a terme amb el software XLStat 2009 (1995-2009).

S'han executat els tests de Levene i el de Bartlett per valorar l'homoscedasticitat. El primer és més versàtil al ser insensible a la manca de normalitat, però Bartlett és més potent si la mostra és normal. Així doncs, Levene és més adequat quan la hipòtesi de normalitat és fràgil i la mostra és força gran. Donada l'amplitud dels residus es va decidir eliminar aquells resultats que generaven residus extrems, per així millorar la qualitat de l'anàlisi al treballar amb una mostra normal i homoscedàstica.

3.2. Preparació de la mostra

3.2.1. Aprofitament forestal i transformació industrial

L'aprofitament dels castanyers s'ha dut a terme seguint la tradició forestal, això és durant la parada vegetativa, període comprès entre la caiguda de la castanya i la rebrotada primaveral i en lluna minvant. Hom creu que procedint d'aquesta forma es facilita l'assecat i es milloren les propietats de la fusta (Villasante *et al.* 2010; Zürcher, 1999; Zürcher *et al.* 2010). Exceptuant la mostra del Vilar de Sant Andreu, que s'escollí al pati, la resta de mostres es trien a bosc. Els rolls de La Rocassa i de Can Preses es seleccionaren ja abatuts en el decurs de l'aprofitament, mentre que els de Can Planes i Can Prat es marcaren en peu. Tots els treballs forestals es dugueren a terme de forma convencional i, exceptuant l'aclarida de Can Preses, les tallades foren arreu. Acabats els aprofitaments, els rolls es transportaren fins al pati de la serradora MADEGESA a Santa Coloma de Farners. En el nostre cas, es pintà completament la secció transversal de la base i la testa

dels rolls seguint una combinació preestablerta de colors per garantir la traçabilitat durant l'emmagatzematge, desdoblament i transport fins a laboratori.

Els rolls s'amidaren, cubicaren, triaren, identificaren i emmagatzemaren en el parc on restaren apilats a la intempèrie fins que assoliren la humitat adequada per ser serrats. Es procedí d'aquesta forma perquè el castanyer requereix un assecat suau per minimitzar l'aparició de clivelles. El període d'assecat resultà força variable. Mentre un roll de gran secció per a bigam ha de romandre a sol i serena entre 2 i 3 anys abans d'assecar-se, un roll de petit diàmetre destinat a productes menuts pot restar apilat solament uns pocs dies. En el cas dels elements estructurals, és habitual realitzar un assecat previ dels rolls abans d'eliminar-ne els costers i, posteriorment, condicionar les bigues fins l'equilibri higroscòpic apilant-les sota cobert per evitar l'acció directa del sol i les remullades de la pluja (Conde y Fernández-Golfín, 2007).

Segons la norma UNE 56528:1979 (AENOR, 1979c), la fusta de les provetes lliures de defectes es pot extreure directament d'un roll o, en cas que ja estigui serrada, es pot obtenir de taulons. En el nostre cas, l'obtenció dels taulons s'inicià amb el troncat dels rolls. Els troncs de petit diàmetre és tallaren a 1000 mm de longitud i serraren en una serra cinta de carro manual. En canvi, a causa de les especificacions de la maquinària, el rolls de grans dimensions es desdoblaren en una serra cinta equipada amb un carro automàtic que no admetia peces més curtes de 1700 mm. En ambdós casos els taulons tenien un gruix de 25 mm i l'amplada en funció del diàmetre de l'arbre (Figura 89).

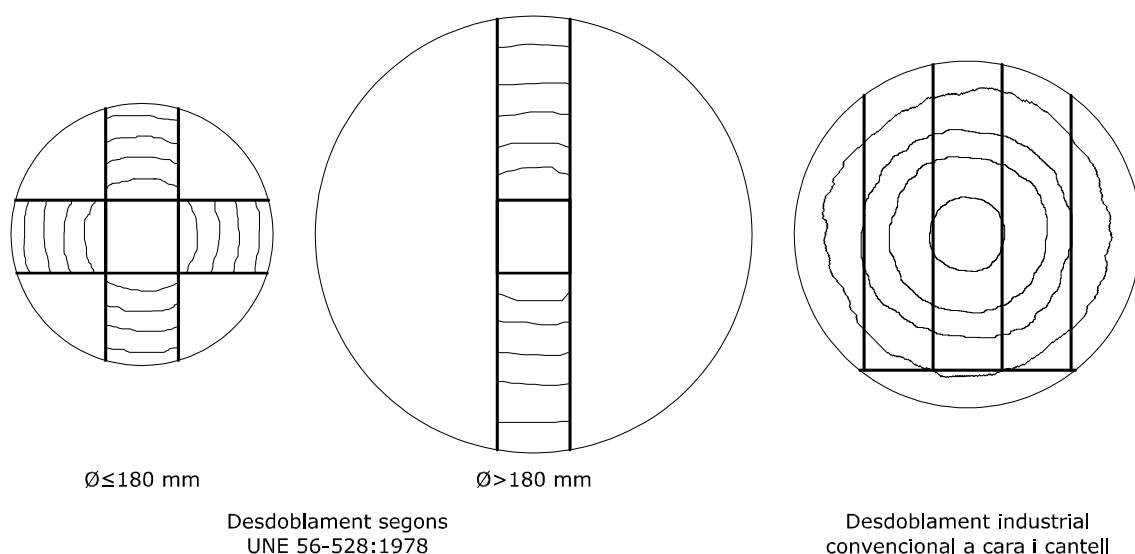


Figura 89. Espejament industrial del roll segons UNE 56528: 1979c

La fusta de castanyer és molt propensa a l'aparició de clivelles d'assecat. Ünsal & Kantay (2009) recomanen aplicar una temperatura màxima al voltant de 43°C mentre la fusta encara conté aigua lliure. D'acord amb aquestes recomanacions, els taulons s'assequen al pati a l'aire lliure fins que assoleixen una humitat inferior al punt de saturació de les fibres. Arribat aquest punt en què l'assecatge s'alenteix pel poc gradient existent entre la fusta i l'ambient, la fusta s'introdueix a l'assegador industrial per accelerar i controlar el procés. En el nostre cas la fusta es sotmeté, durant tres setmanes, al programa d'assecat número 3 del CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement) anomenat "assecat lent i curós":

Taula 35. Programa d'assecat núm. 3 CTBA (Cigalat y Soler, 2003; Conde y Fernández-Golfín, 2007)

Humitat de la fusta (%)	Temperatura (°C)		Humitat relativa de l'aire (%)	Humitat d'equilibri higroscòpic de la fusta (%)	Quocient d'assecat
	Seca	Humida			
Verda	50,0	47,0	85,0	17,0	---
35,0	50,0	45,0	75,0	13,0	---
30,0	50,0	44,0	70,0	11,5	2,6
25,0	60,0	52,0	65,0	9,5	2,6
20,0	60,0	47,5	50,0	7,5	2,7
15,0	65,0	47,0	37,0	5,5	2,7

3.2.2. Elaboració de les provetes d'assaig

Les provetes d'assaig de fusta lliure de defectes tenen forma paral·lelepípedica i, tal com demana la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978c), no poden contenir medul·la, cal que els anells de creixement siguin sensiblement perpendiculars a dues de les cares del paral·lelogram, i han de presentar una curvatura molt petita. Prenent avantatge del fet que totes les provetes tenen la mateixa secció (Veure Taula 36) la preparació de les provetes consisteix en elaborar llistons de secció 20×20 mm en sentit longitudinal a la fibra que, posteriorment, es tallen a la longitud indicada per obtenir les provetes.

Taula 36. Característiques de les provetes d'assaig de fusta massissa lliures de defectes

Norma UNE	Assaig físic o mecànic	Característiques de la proveta		
		Secció (mm)	Longitud (mm)	Direcció de les fibres
56531:1977	Densitat	20×20	30	Longitudinal
56532:1977	Higroscopicitat	20×20	40	Longitudinal
56533:1977	Contracció volumètrica	20×20	40	Longitudinal
56534:1977	Duresa	20×20	>30	Longitudinal
56535:1977	Compressió axial	20×20	60	Longitudinal
56538:1978	Tracció perpendicular	20×20	70	Longitudinal
56537:1979	Flexió estàtica	20×20	300	Longitudinal

El procés de fabricació dels llistons comença aclimatant els taulons provinents de la serradora a l'atmosfera controlada del laboratori. Cada tauló, de longitud igual o superior a 1000 mm, gruix aproximat 25 mm, i ample determinat pel diàmetre de l'arbre, es tronca en trossos de 550 mm de longitud tenint cura d'eliminar els defectes (Figura 90). Tallar a la fusteria els taulons a 550 mm de llarg permet tenir un bon compromís entre operativitat i productivitat, seguretat en el treball i representativitat de la mostra. Els llistons com més curts són, més regulars resulten i menys treball costa preparar-los, però per contra, si la mida és molt curta és insegur manipular-los per les limitacions de llargària imposades per les especificacions de seguretat de les màquines-eina disponibles. A continuació, els taulons es raspallen a cara i cantell per garantir un correcte escairament de les cares de les futures provetes i es serren a l'escairadora fins obtenir llistons quadrats de 23 mm de costat. Posteriorment, els llistons es regruixen uns pocs mil·límetres fins assolir la mida de 20×20×550 mm per finalment troncar-los a la longitud desitjada i obtenir les provetes d'assaig (Taula 36).

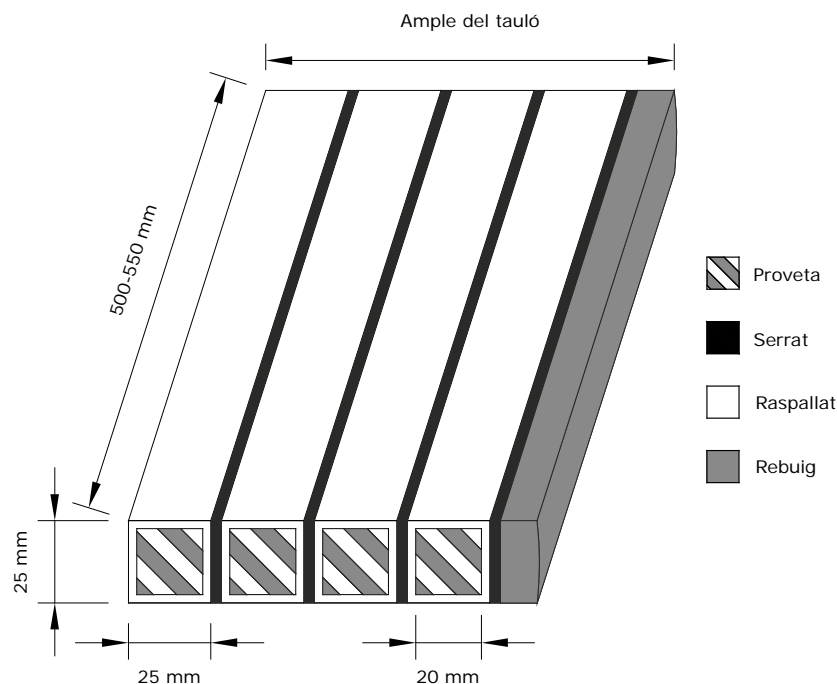


Figura 90. Espejament dels taulons per obtenir llistons de secció 20×20 mm

Finalment, de cada llistó se n'extreu una proveta de cada tipus d'assaig. D'aquesta forma, les provetes dels diversos assaigs conserven al màxim la correlació entre elles i l'estudi estadístic de les diferents propietats resulta més acurat (Figura 91). Les provetes es fabricaren amb una troncadora (Virutex TM 33-L), una escairadora (Electra Beckum PKF 255 V8) i una màquina combinada per raspallar i regruixar (Casadei PFS41).

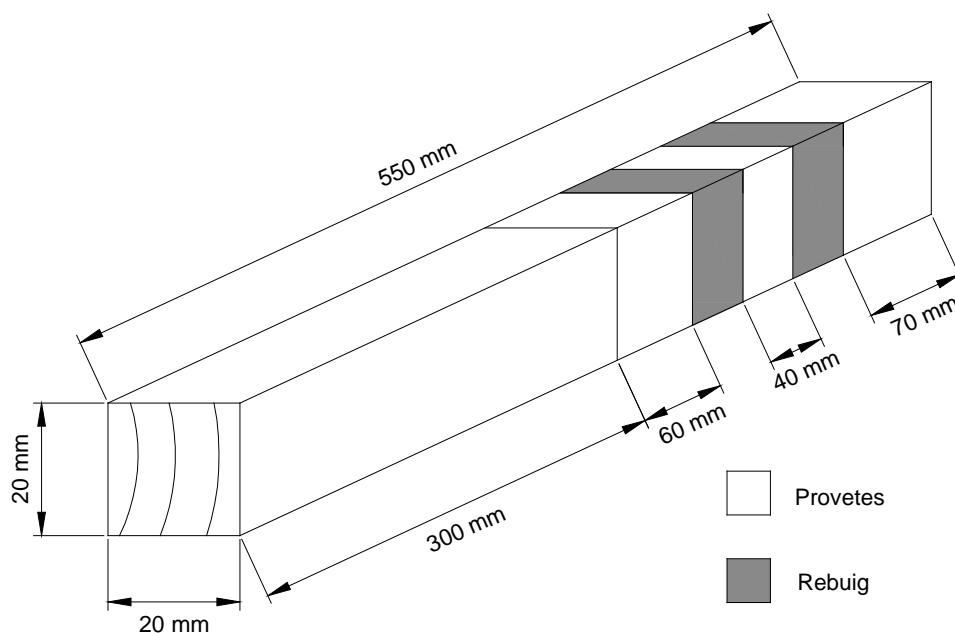


Figura 91. Provetes extretes d'un llistó de 20×20×550 mm

3.2.3. Condicionament de les provetes d'assaig

Segons indica la norma UNE 56528:1978 "Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos." (AENOR, 1978c: 2), les provetes

"es col·locaran en ambient a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura i $65\pm 3\%$ d'humitat relativa fins que assoleixin la humitat d'equilibri, el que es comprovarà mitjançant pesades successives. Es considerarà que ha arribat a l'equilibri quan dues pesades consecutives, separades per un interval de 24h, difereixin menys de $1/200$ de la primera d'elles. En cas que no es disposi d'ambient amb les condicions citades, s'homogeneïtzaran a l'atmosfera del laboratori fins assolir igualment la humitat d'equilibri".

La humitat d'equilibri higroscòpic, que es defineix com aquella a què tendeix i estabilitza la fusta en unes condicions ambientals fixes d'humitat i temperatura (Cigalat y Soler, 2003), determinarà la quantitat d'aigua present en una mostra afectant-ne al seu pes específic. Per tant, per garantir condicions d'assaig homogènies en totes les provetes experimentals, cal condicionar-les en la mateixa atmosfera controlada fins que totes les peces de fusta ni cedeixin ni absorbeixin humitat de l'ambient.

Amb l'objectiu de controlar exhaustivament el procés de condicionament ambiental es va comptar amb el suport d'una cambra climàtica Dycometal CCK -40/300

dissenyada per controlar amb gran precisió la temperatura entre -40°C i 150°C i la humitat del aire entre 0% i 100%. Aquest equip s'enclavà a les condicions esmentades anteriorment les quals, segons els diagrames de Keylwerth (1949) i Kollmann (1936), duen la fusta a equilibrar-se a un contingut d'humitat al voltant del 12%.

3.3. Assaigs físico-mecànics de fusta lliure de defectes

Els assaigs per determinar les propietats físico-mecàniques de la fusta massissa sense defectes del castanyer s'han realitzat seguint les normes elaborades pel "Comité Tecnológico de Normalización (CTN): 56 Madera y Corcho" de la "Asociación Española de Normalización y Certificación" (AENOR).

3.3.1. Densitat i humitat

La densitat de la fusta és una propietat física que varia en gran mesura amb la presència d'aigua a les fibres, per aquest motiu és necessari referir-la a una humitat concreta. La norma UNE 56531:1977 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico." (AENOR, 1977a) defineix dos densitats en funció de la humitat de la fusta:

- Densitat anhidra: La fusta anhidra és aquella que té un contingut d'aigua lliure del 0%. Aquest estat s'assoleix quan, després d'assecar-se durant almenys 24 h a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, la diferència de massa entre dues pesades successives realitzades en un interval de dues hores és menor del 0,1%. Aquest procediment operatiu es descriu a la norma UNE-EN 13183-1 "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa." (AENOR, 2002). En condicions anhidres la fusta té unes condicions d'humitat altament homogènies.
- Densitat en el moment de l'assaig: fusta seca a l'aire i en equilibri higroscòpic amb l'ambient que es troba sota condicions normals d'utilització (20°C i 65% d'humitat). En aquest estat la fusta està idealment al 12% d'humitat (Keylwerth, 1949; Kollmann, 1936). La resta de propietats físiques i mecàniques estudiades a la tesi s'han determinat amb la fusta al 12% d'humitat.

Segons les especificacions de la norma UNE 56531:1977 (AENOR, 1977a), la determinació de la densitat de la fusta es realitza pesant i mesurant provetes de 20×20 mm de secció i 25±5 mm de longitud paral·lela a les fibres. Ara bé, per optimitzar el procediment operatiu global de la tesi, la densitat s'ha determinat alhora amb la contracció volumètrica segons la norma UNE 56533:1977 (AENOR, 1977b) i, per aquest motiu, s'ha treballat amb provetes de 40 mm de longitud (Veure 3.3.2. Contracció volumètrica i 5.4.2. Densitat i pes específic). Cal tenir en compte que, quan hom determina la contracció volumètrica, les provetes de fusta s'aclimaten, mesuren i pesen de la mateixa forma que es fa amb la densitat. L'efecte hipotètic d'emprar provetes més llargues per calcular la densitat s'ha considerat menyspreable ja que, en tot cas, els resultats serien més homogenis al influir en menor mesura la grandària i la posició relativa dels anells (Fernández-Golfín, 1995). La densitat de la fusta a una humitat determinada és defineix com:

$$\rho_H = \frac{P_H}{V_H} \quad (6)$$

On:

ρ_H = Densitat a la humitat "H" (kg/m³)

P_H = Pes a la humitat "H" (kg)

V_H = Volum a la humitat "H" (m³)

3.3.2. Contracció volumètrica

La fusta té la capacitat de captar i cedir humitat a l'ambient, i com a conseqüència de la variació del seu contingut varien les dimensions del material. Concretament, quan la fusta capta humitat s'infla, i quan s'asseca minva. Aquest fenomen només succeeix si la fusta es troba entre l'estat anhidre i el punt de saturació de les fibres, grau d'humitat en què les parets cel·lulars estan completament saturades però el lumen cel·lular encara no conté aigua lliure.

Aquest fenomen es deu a què l'espai existent entre les microfibrilles disminueix quan baixa el contingut d'aigua i augmenta quan s'incrementa el contingut d'aigua de la fusta. Al variar la grandària d'aquest espai, també varia el gruix de la paret cel·lular, el de la cèl·lula, i amb ell el de la fusta (Vignote y Martínez, 2006). Per tant, per observar aquest fenomen cal sotmetre la fusta a un procés de saturació i assecat per determinar quin és el seu comportament en front les variacions

d'humitat. Les provetes cal preparar-les segons la norma UNE 56528:1977 (AENOR, 1978c). De forma paral·lelepèdica, la seva secció és quadrada de 20 mm de costat i longitud paral·lela a la direcció de la qual es vol determinar la contracció igual a 40 mm.

La norma UNE 56533:1977 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica." (AENOR, 1977b) demana, en primer lloc, submergir la fusta 24h en aigua a temperatura ambient fins que la fusta assoleixi la humitat de saturació, en segon, deixar-la a l'atmosfera ambient (20°C i 65% d'humitat) fins que arribi a la humitat d'equilibri higroscòpic (12% en el nostre cas) i, finalment, dur-la fins a l'estat anhidre d'acord a la norma UNE-EN 13183-1:2002 (AENOR, 2002). En cada un d'aquests estats la proveta prismàtica es pesarà fins que el seu pes es mostri estable, fet que es considera assolit quan la diferència de pes entre pesades realitzades cada 24h no supera 1/200 el pes de la proveta. En aquest moment es mesuren les dimensions del paral·lelepípede amb aproximació de 0,1 mm per calcular el seu volum. Els equips emprats en els assaigs segueixen les especificacions de la normativa i han estat els següents:

- Cambra climàtica: Dycometal CCK-300 enclavada a 20°C i 65% per sotmetre les provetes a condicions ambientals normals de forma estable en el temps.
- Estufa: J.P. Selecta Digitronic enclavada a 103±2°C almenys durant 24 h.
- Bàscula de precisió: GRAM precision Serie ST amb precisió de 0,01 g.
- Peu de rei electrònic: Mitutoyo Supercaliper IP67 amb precisió 0,01 mm.

En el present estudi la determinació de la contracció volumètrica total s'ha realitzat amb provetes amb les fibres orientades longitudinalment (AENOR, 1977b). La contracció volumètrica total es defineix com:

$$C_v = \frac{V_s - V_o}{V_o} \cdot 100 \quad (7)$$

On:

C_v = Contracció volumètrica total (%)

V_s = Volum saturat de la fusta (cm³)

V_o = Volum anhidre de la fusta (cm³)

El coeficient de contracció volumètrica es defineix com la variació volumètrica d'una fusta que es troba per sota del punt de saturació de les fibres en canviar un 1% la seva humitat (%). Es calcula respecte la humitat d'equilibri higroscòpic:

$$v = \frac{V_H - V_0}{V_0 \cdot H} \cdot 100 \quad (8)$$

On:

H = Humitat d'equilibri higroscòpic (%)

v = Coeficient de contracció volumètrica (%)

V_H = Volum a la humitat d'equilibri higroscòpic (cm^3)

3.3.3. Higroscopicitat

Un material és higroscòpic quan presenta avidesa per la humitat i això el duu a absorbir-la fins que s'equilibra amb l'entorn que l'envolta. La norma UNE 56532:77 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la higroscopicidad." (AENOR, 1977c) defineix aquesta propietat com la variació del pes específic de la fusta quan el seu contingut d'humitat varia en un 1 per 100, i es calcula amb la següent fórmula:

$$h = \frac{(1 - v) \cdot r_{12}}{100} \quad (9)$$

On:

h = Higroscopicitat (kg/m^3)

r_{12} = Pes específic al 12% d'humitat (kg/m^3)

v = Coeficient de contracció volumètrica (%)

Tenint en compte que la higroscopicitat és una magnitud física derivada i que la norma UNE 56532:77 (AENOR, 1977c) no defineix les dimensions de les provetes ni el procediment operatiu, s'utilitzaran les dades obtingudes durant la determinació de la contracció volumètrica. La única condició rau en haver condicionat la fusta al 12% en la determinació de la densitat.

3.3.4. Duresa

L'assaig de duresa de Monnin és un test on es mesura la marca que deixa a la fusta un cilindre de 30 mm de diàmetre carregat amb 100 kg de pes per cm lineal d'amplada durant 5 segons. En el nostre cas es va aplicar una càrrega de 200 kg en una proveta de secció 20×20 mm i longitud 40 mm (Figura 92), longitud superior als 30 mm mínims que exigeix la normativa.

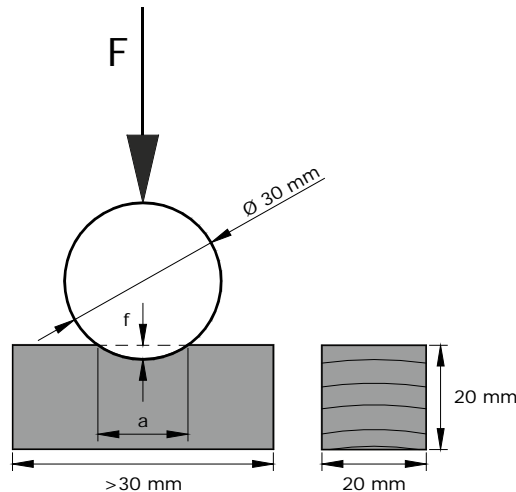


Figura 92. Assaig de duresa segons UNE 56534:1977 (AENOR, 1977d)

La norma UNE 56534:1977 (AENOR, 1977d) descriu com en funció de l'amplada de la marca deixada pel cilindre metàl·lic es pot conèixer la profunditat de penetració de l'empremta i, per tant, la duresa de la fusta assajada:

$$f = 15 - 0,5 \cdot \sqrt{900 - a^2} \quad ; \quad N = \frac{1}{f} \quad (10)$$

On:

a = Amplada de la marca (mm)

f = Fletxa de penetració de la marca (mm)

N = Duresa. Mesurada amb precisió 0,01 mm⁻¹ (mm⁻¹)

Per executar aquest assaig s'ha emprat una premsa multiassaig "Incotecnic MUTC-200" equipada amb un útil específic que garanteix l'aplicació ortogonal de la càrrega sobre la proveta. D'aquesta forma s'evita realització de petjades còniques per la desigual penetració no perpendicular del cilindre a la fusta. L'ample de la penetració es mesurà en dos punts amb un microscopi digital USB PCE-MM 200 associat a un software capaç de mesurar amb precisió de centèsima de mm.

3.3.5. Resistència a compressió axial

L'assaig de resistència a compressió axial avalua l'esforç en direcció paral·lela a les fibres que és capaç de suportar una proveta de fusta de secció 20×20 mm i 60 mm d'alçada. Per complir amb les indicacions de la norma UNE 56535:1977 (AENOR, 1977e), a les provetes se'ls hi ha aplicat una velocitat de càrrega constant de 17,4 kg/s. L'assaig s'ha dut a terme en una premsa multiassaig "Incotecnic MUTC-200" equipada amb dos plats plans d'acer d'alta duresa disposats paral·lelament (Figura 93).

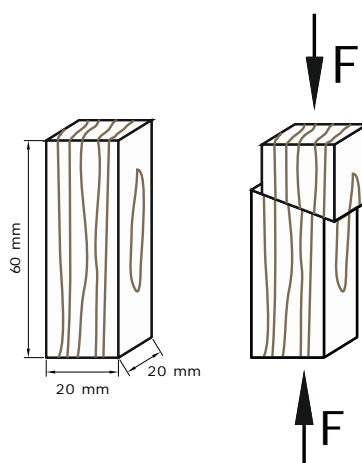


Figura 93. Assaig de resistència a compressió axial segons UNE 56535:1977 (AENOR, 1977e)

La resistència a compressió axial es calcula:

$$C_H = \frac{C_S}{S} \quad (11)$$

On:

C_H = Càrrega a compressió axial. Mesurada amb precisió 1 kg/cm² (kg/cm²)

C_S = Càrrega de trencament de la proveta (kg)

S = Secció de la proveta. Mesurada amb precisió 0,1 mm (cm²)

3.3.6. Resistència a flexió estàtica

L'assaig a flexió es defineix a la norma UNE 56537:1979 "Característiques físico-mecàniques de la maderà. Determinación de la resistència a la flexió estàtica." (AENOR, 1979). La proveta de fusta massissa, de secció 20×20 mm i longitud 300 mm en la direcció de les fibres, se sotmet a una càrrega constant de 5 mm/min fins que esdevé el trencament. Aquesta dada cal mesurar-la amb una aproximació de 0,1 kg. L'esforç s'aplica a la part central de la proveta mitjançant un cilindre de radi 15 mm mentre aquesta descansa sobre dos cilindres del mateix diàmetre separats 240 mm. Les provetes s'han testat en una premsa multiassaig "Incotecnic MUTC-200". Per evitar que els cilindres penetrin en la fusta i evitar l'aparició d'esforços tallants es protegeix la proveta amb contraxapat de 20×20×5 mm (Figura 94).

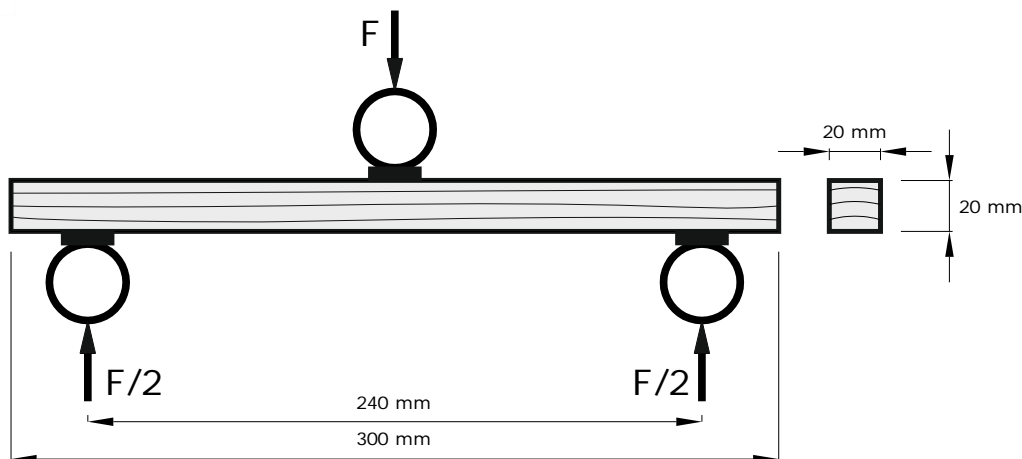


Figura 94. Assaig de resistència a flexió estàtica segons UNE 56537:1979 (AENOR, 1979)

La resistència a flexió estàtica es calcula segons la següent expressió:

$$\sigma_H = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (12)$$

On:

σ_H = Resistència a flexió estàtica (kg/cm²)

b = Amplada de la proveta (cm)

h = Gruix o cantell de la proveta (cm)

l = Longitud entre suports (cm)

P = Càrrega de trencament (kg)

3.3.7. Resistència a tracció perpendicular a les fibres

La valoració de la resistència a tracció perpendicular a les fibres es realitza aplicant una càrrega de 400 kg/min segons el principi mecànic descrit a la norma UNE 56538:1978 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras." (AENOR, 1978a) però utilitzant provetes lleugerament diferents i útils d'assaigs anàlegs als proposats (Veure 5.4.3. Resistència a tracció perpendicular a les fibres). La càrrega s'aplica gràcies a l'acció simultània de quatre barnilles paral·leles que en separar-se generen un esforç tractiu. El test s'ha dut a terme en una premsa multiassaig "Incotecnic MUTC-200". Les provetes d'assaig, orientades radialment, presenten la següent geometria:

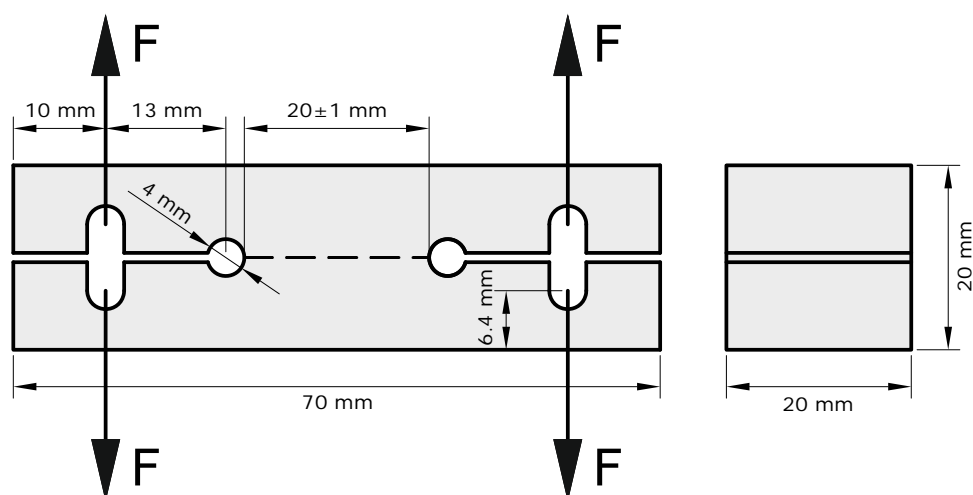


Figura 95. Assaig de tracció perpendicular a les fibres

La resistència a tracció perpendicular a les fibres es defineix com:

$$\sigma_H = \frac{P_r}{S} \quad (13)$$

On:

σ_H = Resistència a tracció perpendicular (kg/cm²)

P_r = Càrrega de trencament (kg)

S = Àrea de la secció recta central sotmesa a tracció perpendicular (cm²)

4. Resultats

Tot seguit es mostren els resultats agrupats per propietats exposant els paràmetres estadístics descriptius més importants i contrastant-los amb el criteri de la norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b). En total s'han dut a terme dos mil vuit-cents trenta-dos assaigs, fruit de l'anàlisi de cinquanta-nou arbres, cinc emplaçaments, i set propietats físico-mecàniques.

4.1. Densitat

Atenent-nos a la classificació establerta a la norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b) la fusta de castanyer de totes les mostres estudiades és semipesada i pràcticament totes les provetes assajades s'inclouen dins d'aquesta categoria (510 a 700 kg/m³).

Taula 37. Estadística descriptiva: densitat normal (H=12%)

Paràmetres estadístics	Densitat normal (H=12%) (kg/m ³)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	472,251	500,428	522,962	474,081	473,916	472,251
Màxim	821,532	714,322	724,007	730,502	658,861	821,532
Amplitud	349,281	213,894	201,045	256,421	184,945	349,281
Cinquè percentil (P ₅)	513,433	531,321	535,796	507,687	506,386	504,299
Primer Quartil (P ₂₅)	555,595	570,633	559,104	565,877	541,472	548,834
Mediana (P ₅₀)	584,171	605,677	582,741	593,064	566,293	572,090
Tercer Quartil (P ₇₅)	616,742	638,928	605,449	625,329	588,973	611,466
Mitjana (\bar{X})	587,044	606,948	590,132	597,285	564,798	577,717
Desviació típica (n-1)	49,610	47,469	43,494	53,859	37,816	53,635

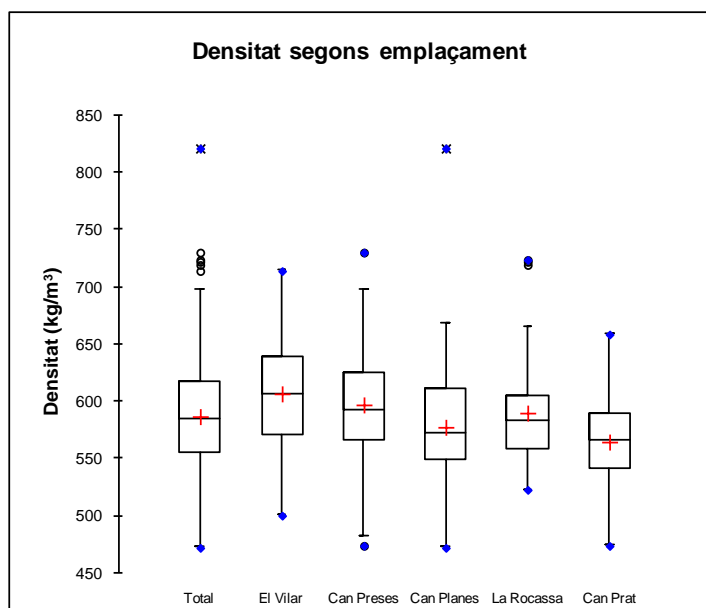


Figura 96. Diagrama de caixa: densitat

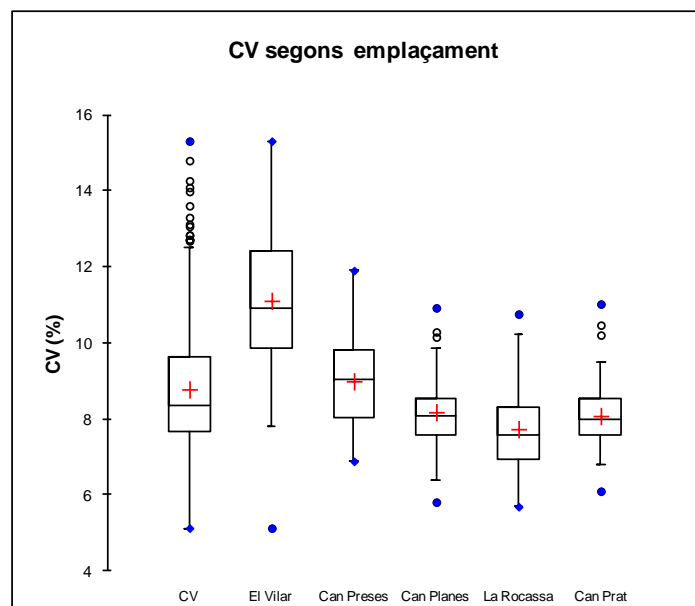
4.2. Contracció volumètrica

4.2.1. Contracció volumètrica

La contracció volumètrica de les mostres de La Rocassa, Can Preses, Can Prat i Can Planes és semblant i classificable com a petita ja que la gran majoria de valors es mouen entre el 5% i el 10%. En canvi, la mostra de fusta roja del Vilar presenta resultats entre un 2% i 3% superiors. En aquest darrer cas, tot i que la major part de la fusta seria classificable com a de petita contracció, hi haurien mostres que presentarien contraccions volumètriques mitjanes segons la norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b).

Taula 38. Estadística descriptiva: contracció volumètrica

Paràmetres estadístics	Contracció volumètrica (%)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	5,122	5,122	5,685	6,879	6,093	5,806
Màxim	15,303	15,303	10,753	11,897	11,017	10,917
Amplitud	10,181	10,181	5,067	5,018	4,923	5,111
Cinquè percentil (P ₅)	6,746	8,923	6,302	7,365	6,879	6,794
Primer Quartil (P ₂₅)	7,665	9,834	6,930	8,027	7,561	7,576
Mediana (P ₅₀)	8,348	10,895	7,577	9,051	8,002	8,081
Tercer Quartil (P ₇₅)	9,643	12,410	8,301	9,810	8,512	8,544
Mitjana (\bar{X})	8,772	11,100	7,726	8,985	8,072	8,171
Desviació típica (n-1)	1,684	1,818	1,082	1,085	0,851	0,972

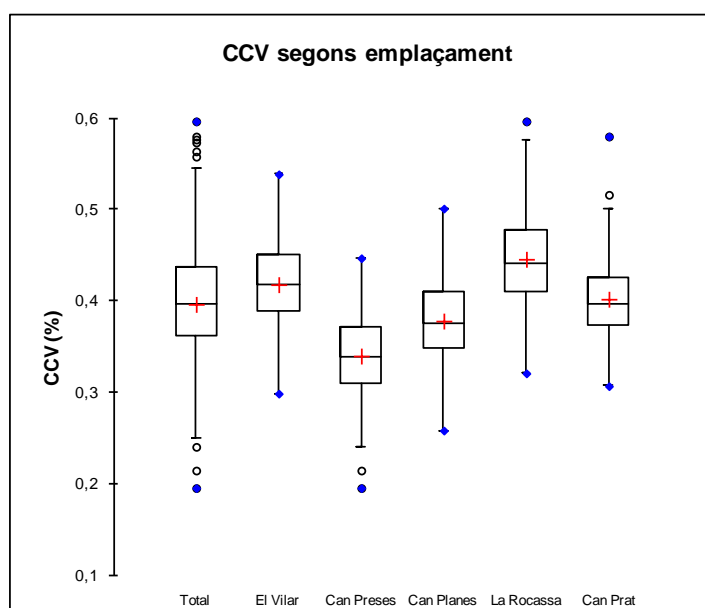
**Figura 97.** Diagrama de caixa: contracció volumètrica

4.2.2. Coeficient de contracció volumètrica

Les mostres estudiades han presentat un comportament al guany d'humitat mitjanament nerviós tot i que en la part baixa d'aquesta categoria tal com queda definida a la norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b). Crida l'atenció que la mostra més jove i amb uns creixements més travats, la de Can Preses, sigui la que ha mostrat un comportament més noble. En general, però, el comportament és mitjanament nerviós.

Taula 39. Estadística descriptiva: coeficient de contracció volumètrica

Paràmetres estadístics	Coeficient de Contracció volumètrica (%)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	0,195	0,298	0,321	0,195	0,307	0,258
Màxim	0,596	0,539	0,596	0,447	0,580	0,501
Amplitud	0,401	0,240	0,276	0,252	0,273	0,243
Cinquè percentil (P ₅)	0,299	0,327	0,374	0,263	0,332	0,289
Primer Quartil (P ₂₅)	0,361	0,389	0,410	0,309	0,374	0,347
Mediana (P ₅₀)	0,395	0,419	0,441	0,339	0,397	0,376
Tercer Quartil (P ₇₅)	0,436	0,451	0,478	0,371	0,426	0,411
Mitjana (\bar{X})	0,396	0,418	0,446	0,340	0,402	0,378
Desviació típica (n-1)	0,062	0,050	0,055	0,049	0,047	0,051


Figura 98. Diagrama de caixa: coeficient de contracció volumètrica

4.3. Higroscopicitat

Totes les provetes assajades, al marge d'un valor clarament outlier del lot de Can Planes, han mostrat una higroscopicitat al voltant de $0,0035 \text{ kg/m}^3$. Aquest valor és proper al considerat com a normal per la norma 56540:1978 (AENOR, 1978b). La fusta de Can Preses (Montnegre) resulta lleugerament més higroscòpica que la resta però sense mostrar grans diferències. De fet, s'observa com la diferència entre la mitjana i el cinquè percentil és molt curta doncs es troba al voltant de $0,0029 \text{ kg/m}^3$.

Taula 40. Estadística descriptiva: higroscopicitat

Paràmetres estadístics	Higroscopicitat (kg/m ³)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	0,0023	0,0029	0,0023	0,0031	0,0026	0,0030
Màxim	0,0059	0,0041	0,0042	0,0049	0,0042	0,0059
Amplitud	0,0036	0,0013	0,0019	0,0018	0,0016	0,0029
Cinquè percentil (P ₅)	0,0029	0,0031	0,0026	0,0033	0,0028	0,0032
Primer Quartil (P ₂₅)	0,0032	0,0033	0,0030	0,0036	0,0031	0,0033
Mediana (P ₅₀)	0,0035	0,0035	0,0032	0,0038	0,0033	0,0035
Tercer Quartil (P ₇₅)	0,0037	0,0037	0,0035	0,0042	0,0036	0,0037
Mitjana (\bar{X})	0,0035	0,0035	0,0032	0,0039	0,0033	0,0035
Desviació típica (n-1)	0,00043	0,0003	0,0004	0,0004	0,0003	0,0004

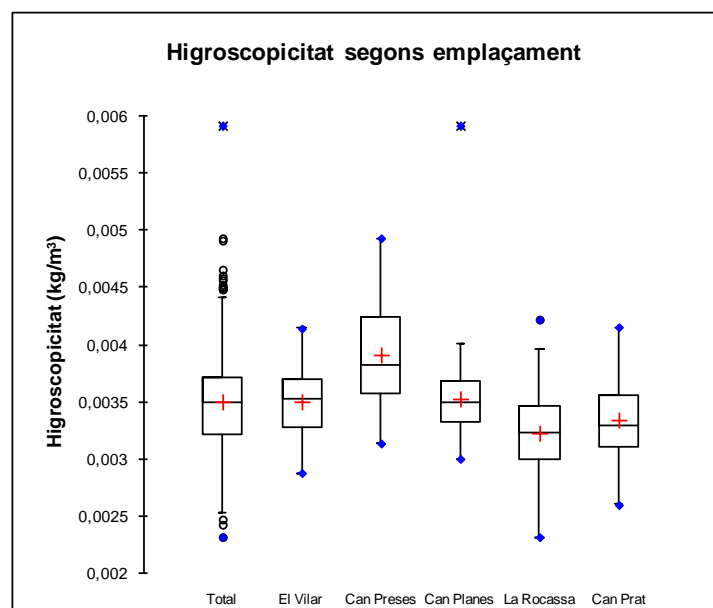


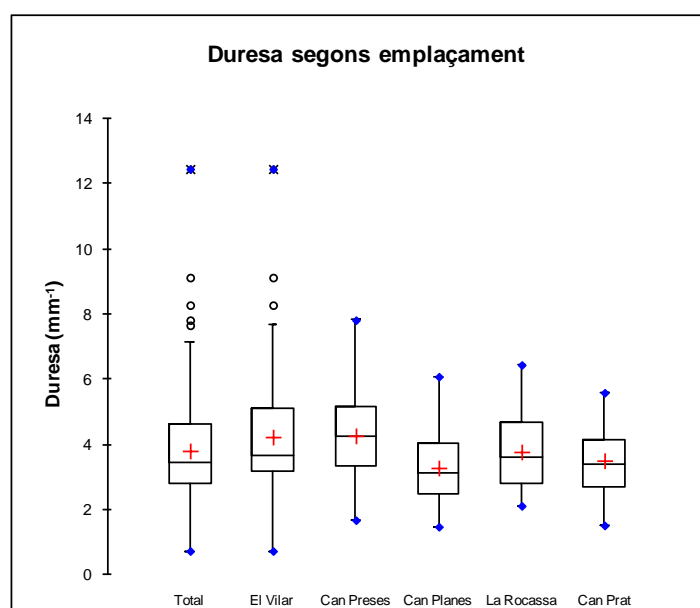
Figura 99. Diagrama de caixa: higroscopicitat

4.4. Duresa

La duresa mitjana de la fusta de castanyer de tots els emplaçaments estudiats és 3,8 mm⁻¹. Aquest valor està entre 3 mm⁻¹ i 6 mm⁻¹ i això significa, d'acord amb la norma 56540:1978 (AENOR, 1978b), que les provetes tenen un comportament semidur. A nivell general s'observa com més del 50% dels resultats obtinguts al llarg de l'experiment queden inclosos de forma força centrada dins d'aquesta categoria. Tot i això, l'amplitud dels valors fa que algunes provetes puguin ser considerades com a dures. La presència d'espècimens tous és anecdòtica.

Taula 41. Estadística descriptiva: duresa

Paràmetres estadístics	Duresa (mm^{-1})					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	0,731	0,731	2,117	1,677	1,516	1,476
Màxim	12,454	12,454	6,441	7,816	5,589	6,081
Amplitud	11,723	11,723	4,325	6,139	4,073	4,605
Cinquè percentil (P_5)	2,120	2,131	2,388	2,102	2,076	1,877
Primer Quartil (P_{25})	2,815	3,172	2,822	3,307	2,691	2,496
Mediana (P_{50})	3,449	3,640	3,581	4,259	3,362	3,113
Tercer Quartil (P_{75})	4,614	5,116	4,677	5,159	4,155	4,018
Mitjana (\bar{X})	3,803	4,229	3,771	4,266	3,504	3,280
Desviació típica (n-1)	1,870	3,605	1,279	1,859	0,977	1,128

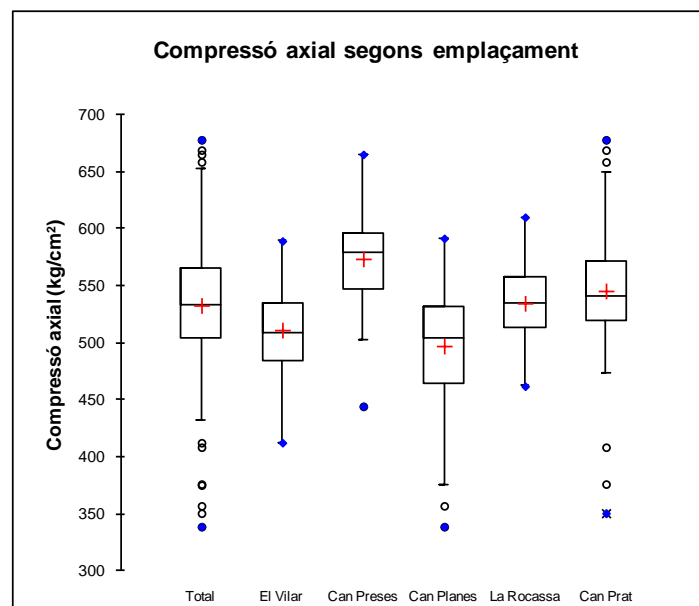

Figura 100. Diagrama de caixa: duresa

4.5. Resistència a compressió axial

La norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b) classifica qualitativament la resistència a compressió axial de la fusta lliure de defectes segons la seva densitat mitjana, i diferencia entre coníferes i frondoses. En el cas dels lots de castanyer analitzats, la resistència mitjana que se'ls hi assigna és alta en tots els casos ja que són semipesats. Pel que fa a la classificació individual de cada una de les provetes, la gran majoria han demostrat una resistència alta o mitjana, i només algunes es poden considerar de baixa resistència.

Taula 42. Estadística descriptiva: resistència a compressió axial

Paràmetres estadístics	Resistència a compressió axial (kg/cm ²)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	338,753	412,353	461,872	444,249	350,551	338,753
Màxim	677,948	589,230	610,100	665,138	677,948	591,558
Amplitud	339,196	176,877	148,228	220,889	327,397	252,805
Cinquè percentil (P ₅)	445,190	443,666	489,286	512,022	481,663	432,422
Primer Quartil (P ₂₅)	504,539	484,339	512,932	546,846	519,704	463,460
Mediana (P ₅₀)	532,550	508,073	534,271	578,327	540,462	504,067
Tercer Quartil (P ₇₅)	565,577	535,063	557,968	596,129	572,064	531,694
Mitjana (\bar{X})	532,707	511,104	534,594	573,507	545,407	497,122
Desviació típica (n-1)	50,941	38,553	30,175	39,802	54,812	49,689

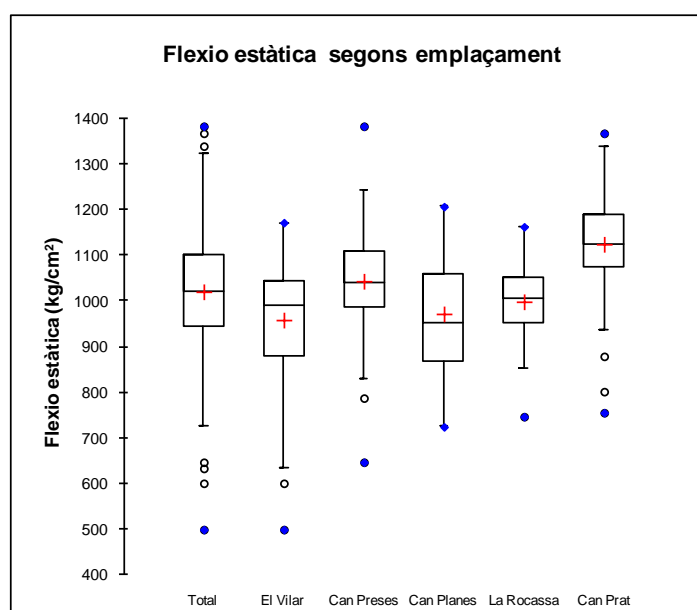
**Figura 101.** Diagrama de caixa: resistència a compressió axial

4.6. Resistència a flexió estàtica

D'acord amb la norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b) la resistència mitjana a flexió estàtica de totes les mostres assajades és baixa, excepte la de Can Prat que és mitjana. Tot i això, la gran majoria de resultats es mouen entre la banda alta de la categoria inferior i la banda baixa de la categoria intermèdia.

Taula 43. Estadística descriptiva: resistència a flexió estàtica

Paràmetres estadístics	Resistència a flexió estàtica (kg/cm ²)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	499,271	499,271	746,741	646,840	755,419	724,328
Màxim	1383,237	1172,024	1162,918	1383,237	1367,821	1207,086
Amplitud	883,966	672,753	416,176	736,397	612,402	482,758
Cinquè percentil (P ₅)	802,025	739,406	889,283	899,395	940,899	789,241
Primer Quartil (P ₂₅)	945,633	880,097	953,622	987,392	1072,818	867,609
Mediana (P ₅₀)	1019,965	990,253	1006,870	1040,372	1125,353	953,137
Tercer Quartil (P ₇₅)	1099,433	1045,320	1052,726	1109,951	1188,929	1059,663
Mitjana (\bar{X})	1020,493	958,516	998,582	1043,602	1124,648	971,951
Desviació típica (n-1)	125,878	131,507	72,824	107,027	114,568	122,777

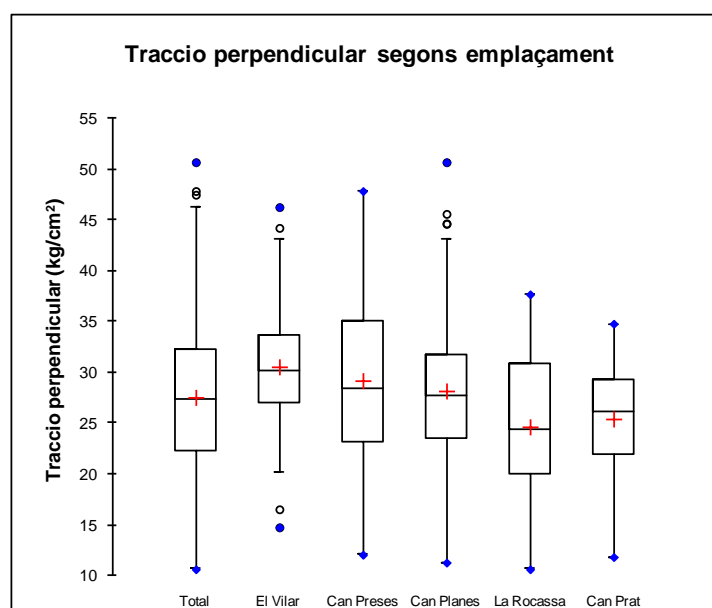

Figura 102. Diagrama de caixa: resistència a flexió estàtica

4.7. Resistència a tracció perpendicular a les fibres

La classificació de la resistència a tracció perpendicular de la fusta lliure de defectes de la norma UNE 56540:1978 (AENOR, 1978b) estableix que entre 25 i 45 Kg/cm² la resistència és mitjana. Així doncs, la fusta de castanyer és mitjanament resistent a la tracció perpendicular a les fibres. Cal dir però, que la majoria de resultats se situen a la part baixa o intermèdia d'aquesta àmplia categoria i que existeixen molt pocs espècimens altament resistents (>45 kg/cm²).

Taula 44. Estadística descriptiva: resistència a tracció perpendicular a les fibres

Paràmetres estadístics	Resistència a tracció perpendicular a les fibres (kg/cm ²)					
	Total	El Vilar	La Rocassa	Can Preses	Can Prat	Can Planes
Nombre d'observacions	354	66	72	72	72	72
Mínim	3,639	14,769	10,642	12,071	11,844	11,299
Màxim	50,682	46,265	37,686	47,848	34,794	50,682
Amplitud	47,043	31,496	27,045	35,777	22,950	39,383
Cinquè percentil (P ₅)	13,245	20,993	15,976	17,853	15,864	16,767
Primer Quartil (P ₂₅)	22,009	26,963	19,967	23,080	21,968	23,508
Mediana (P ₅₀)	27,074	30,226	24,444	28,444	26,053	27,788
Tercer Quartil (P ₇₅)	32,166	33,742	30,776	35,105	29,367	31,791
Mitjana (\bar{X})	27,057	30,558	24,653	29,196	25,427	28,180
Desviació típica (n-1)	7,890	6,504	49,296	8,281	5,237	7,666

**Figura 103.** Diagrama de caixa: resistència a tracció perpendicular a les fibres

5. Discussió

5.1. Anàlisi estadístic dels resultats

5.1.1. Independència, homoscedasticitat i normalitat mostral

L'anàlisi de l'estructura dels resultats passa per examinar la variabilitat continguda en les dos mil vuit-centes trenta-dos observacions repartides entre les set propietats analitzades durant el procés experimental. Abans però, cal conèixer l'estructura de les dades per triar adequadament l'eina estadística que ens proporcioni la major i més robusta quantitat d'informació. Així, per determinar si és pot aplicar un model de regressió lineal general i obtenir-ne conclusions sòlides, és necessari determinar si els residus de les observacions són independents, homoscedàstics i normals.

La independència de les mostres s'ha comprovat qualitativament amb els gràfics de residus estandarditzats. A més, cal tenir en compte que la influència d'unes mostres sobre les altres, més enllà de la lògica jerarquització, no existeix, és menyspreable o no es pot demostrar en no existir relació aparent entre lots. A més, el procediment d'assaig aplicat tampoc no ha generat cap tendència. La normalitat i l'homoscedasticitat no han resultat inicialment satisfactòries per al conjunt dels resultats atesa la gran dispersió que apareix habitualment en les propietats físiques i mecàniques de la fusta. Així doncs, ha estat necessari obviar els valors més extrems i, en alguns casos, aplicar la transformació Box-Cox a les dades per aconseguir una estructura adequada. Sobre les dades rectificades, la normalitat de la mostra ha estat acceptada pel test de Lilliefors amb un nivell de significació del 5% ($\alpha=0,05$) per a totes les propietats menys a la higroscopicitat ($p=0,017$) on el nivell de significació s'ha disminuït fins al 1% ($\alpha=0,01$). Els resultats dels testos d'homoscedasticitat han estat satisfactoris per a totes les propietats menys en la contracció volumètrica on l'acceptació del test de Bartlett està al límit. Tot i això, s'ha preferit córrer el risc de patir un error en l'anàlisi estadístic per manca d'estructura de les dades abans que treballar amb proves no paramètriques ja que són menys potents des d'un punt de vista estadístic (Veure Taula 45).

Taula 45. Estructura dels residus de les propietats físico-mecàniques de la fusta de castanyer

Propietat	Transformació dels residus ¹	Normalitat	Homoscedasticitat	
		Test de Lilliefors	Test de Levene	Test de Bartlett
Densitat	Eliminació del 2 percentil extrem	p=0,191	p=0,018	p=0,125
Contracció volumètrica	Eliminació del 5 percentil extrem i Box-Cox	p=0,087	p=0,003	p=0,009
Coefficient de contracció volumètrica	Eliminació del 2 percentil extrem	p=0,554	p=0,033	p=0,611
Higroscopicitat	Eliminació del 2 percentil extrem	p=0,017	p=0,001	p=0,467
Duresa	Eliminació del 2 percentil extrem i Box-Cox	p=0,260	p=0,011	p=0,419
Resistència a compressió axial	Eliminació del 2 percentil extrem	p=0,429	p=0,006	p=0,600
Resistència a flexió estàtica	Eliminació del 2 percentil extrem	p=0,247	p=0,002	p=0,051
Resistència a tracció perpendicular	No necessària	p=0,724	p=0,275	p=0,668

5.1.2. Anàlisi dels factors d'estudi

A partir dels dos models lineals mixts descrits al punt 3.1.2. Factors d'estudi i anàlisi estadístic, s'obtenen els resultats que es recullen a la Taula 46.

Taula 46. Resultats del procediment lineal mixt ($P > F$) incloent i excloent la covariable creixement

Propietat de la fusta	Model lineal mixt ¹	Nivell de significació ($P > F$) ²				
		Test d'efectes fixos tipus 1			Contrasts	
		Covariable	Factors fixos			
			Creixement	Estat	Finca (Estat)	Sa vs resta
Densitat	C+	p=0,0054	p=0,7329	p=0,5078	p=0,3757	p=0,3932
	C-	---	p=0,0257	p=0,3662	p=0,1059	p=0,3737
Contracció volumètrica	C+	p<0,0001	p=0,0282	p<0,0001	p=0,0034	p=0,0235
	C-	---	p<0,0001	p<0,0001	p<0,0001	p=0,0242
Coefficients de contracció volumètrica	C+	p=0,0998	p<0,0001	p<0,0001	p=0,1147	p=0,0671
	C-	---	p=0,0003	p<0,0001	p=0,0001	p=0,0826
Higroscopicitat	C+	p<0,0001	p<0,0001	p=0,0048	p=0,0427	p=0,8919
	C-	---	p<0,0001	p=0,0009	p<0,0001	p=0,9801
Duresa	C+	p=0,0491	p=0,0240	p=0,5740	p=0,6119	p=0,0093
	C-	---	p=0,0042	p=0,6015	p=0,8602	p=0,0092
Resistència a compressió axial	C+	p=0,4879	p<0,0001	p=0,0028	p=0,3993	p=0,0009
	C-	---	p=0,0020	p<0,0001	p=0,0523	p=0,0006
Resistència a flexió estàtica	C+	p=0,0019	p=0,0191	p=0,0005	p=0,0171	p=0,0401
	C-	---	p=0,0030	p<0,0001	p=0,0005	p=0,0176
Resistència a tracció perpendicular	C+	p<0,0001	p=0,2275	p=0,5574	p=0,2211	p=0,3843
	C-	---	p=0,0003	p=0,5048	p=0,0003	p=0,5233

¹ C+: Model de la Figura 87, inclou el creixement. C-: Model de la Figura 88, no inclou el creixement

² Caselles en gris indiquen $p > 0,05$

Pel que fa a la inclusió o exclusió de la covariable creixement en els models s'observa que:

- Considerant un nivell de significació $\alpha=0,05$, el rang de creixement estudiat influeix significativament sobre totes les propietats exceptuant el coeficient de contracció volumètrica, on cal incrementar el nivell de significació fins a $\alpha=0,10$, i la resistència a compressió axial on la influència queda clarament descartada.
- La influència del creixement sobre les propietats de la fusta sota diferents estats sanitaris és, en general, baixa. Només en la densitat i la resistència a la tracció perpendicular s'observa que la inclusió de la covariable creixement en el model fa que les diferències atribuïdes entre estats sanitaris deixin de ser significatives.
- El factor finca és indiferent a la inclusió de la covariable creixement.
- En el contrast entre fusta sana i la resta, s'observa que al considerar la influència del creixement sobre les propietats de la fusta, p s'incrementa en tots els casos menys en la duresa. Tot i això, les diferències en la duresa no són significatives en cap dels dos models. Per tant, el creixement explica part de la variabilitat de les propietats de la fusta sana ja que les masses decaigudes són les més velles, i aquestes són les que tenen un creixement mig més baix.
- En el cas del contrast entre fusta roja i la resta, les diferències entre el model que inclou el creixement i el que l'exclou no resulten significatives.

Analitzant els resultats agrupant-los per propietats de la fusta veiem que:

- **Densitat:** El creixement influeix sobre la densitat. La mostra no és heterogènia pel que fa a la densitat ($Sa=Decaigut=Roig$).
- **Contracció volumètrica:** El creixement influeix sobre la contracció volumètrica. La fusta procedent de masses sanes presenta menor contracció volumètrica que la procedent de masses decaigudes i aquesta menor que la roja ($Sa>Decaigut>Roig$).
- **Coefficient de contracció volumètrica:** El nerviosisme de la fusta no es veu influït pel creixement, ni existeixen diferències significatives entre els diferents estats sanitaris dels arbres ($Sa=Decaigut=Roig$).
- **Higroscopicitat:** La higroscopicitat de la fusta es veu influïda pel creixement, i mentre la fusta d'arbres sans és més higroscòpica que la resta, la roja no resulta significativament més higroscòpica ($Sa<Decaigut=Roig$).

- **Duresa:** La duresa és veu influïda pel creixement. La duresa de la fusta d'arbres sans no és significativament diferent a la resta, però la fusta roja sí que és significativament més tova (Sa=Decaigut>Roig).
- **Resistència a compressió axial:** No s'ha trobat una influència significativa del creixement sobre la resistència a compressió de la fusta. La fusta roja és significativament menys resistent (Sa=Decaigut>Roig).
- **Resistència a flexió estàtica:** El creixement influeix significativament la resistència. La fusta més resistent ha resultat ser la procedent d'arbres decaiguts, en segon lloc d'arbres roigs i, finalment, els sans (Decaigut>Roig>Sa).
- **Resistència a tracció perpendicular:** El creixement influeix sobre la resistència. No apareixen diferències significatives entre tipus de fusta en els lots estudiat (Sa=Decaigut=Roig).

Així doncs, atesos els resultats de l'anàlisi estadístic, els resultats s'agrupen en funció de les similituds i diferències trobades entre lots:

Taula 47. Estadístics de les propietats físico-mecàniques agrupats segons factors significatius

Propietat	Agrupació	Mínim	Màxim	Percentils				Mitjana	Desviació típica (n-1)
				P ₅	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅		
Densitat normal (kg/m ³) ¹	Global	472,25	821,53	513,43	555,60	584,17	616,74	587,04	49,61
Contracció volumètrica (%) ⁴	Sa	5,12	15,30	6,59	7,52	8,93	10,79	9,29	2,21
	Decaigut	5,81	11,90	6,88	7,69	8,22	9,23	8,47	1,12
	Roig	6,75	10,92	7,01	7,73	8,15	8,61	8,29	0,90
Coefficient de contracció volumètrica (%) ¹	Global	0,195	0,596	0,299	0,361	0,395	0,436	0,396	0,062
Higroscopicitat (%) ²	Sa	0,0023	0,0044	0,0028	0,0031	0,0034	0,0036	0,0034	0,00037
	Decaigut i roig	0,0026	0,0059	0,0030	0,0033	0,0035	0,0038	0,0036	0,00045
Duresa (mm ⁻¹) ³	Sa i decaigut	0,731	12,454	2,074	2,882	3,742	4,693	3,896	1,421
	Roig	1,714	6,081	2,166	2,649	3,152	4,103	3,399	1,020
Resistència a compressió axial (kg/cm ²) ³	Sa i decaigut	338,75	677,95	462,11	509,76	536,95	572,68	538,99	51,07
	Roig	431,85	591,56	439,98	473,00	505,77	535,37	505,29	40,46
Resistència a flexió estàtica (kg/cm ²) ⁴	Sa	499,27	1172,02	782,02	932,06	1000,22	1046,22	977,34	108,17
	Decaigut	755,42	1383,24	881,26	1010,15	1089,09	1163,11	1081,76	118,84
	Roig	724,33	1207,09	786,17	879,31	989,49	1071,83	980,96	123,32
Resistència a tracció perpendicular (kg/cm ²) ¹	Global	10,64	50,68	15,98	22,26	27,29	32,32	27,55	7,33

¹ Diferències no significatives entre fusta d'arbres sans, decaiguts i roigs

² Diferències significatives entre fusta d'arbres sans i la resta (decaiguts i rojos)

³ Diferències significatives entre fusta d'arbres roigs i la resta (sans i decaiguts)

⁴ Diferències significatives entre fusta d'arbres sans, decaiguts i roigs

Per tant, no existeixen diferències significatives entre la fusta procedent d'arbres sans, decaiguts o rojos pel que fa a la densitat, el coeficient de contracció volumètrica i la resistència a tracció perpendicular. En la resta de propietats, la fusta sana és menys higroscòpica, més dura, més resistent a compressió axial, però

menys resistent a flexió estàtica. Aquest darrer resultat concorda amb el fet que els arbres joves són més elàstics que els vells.

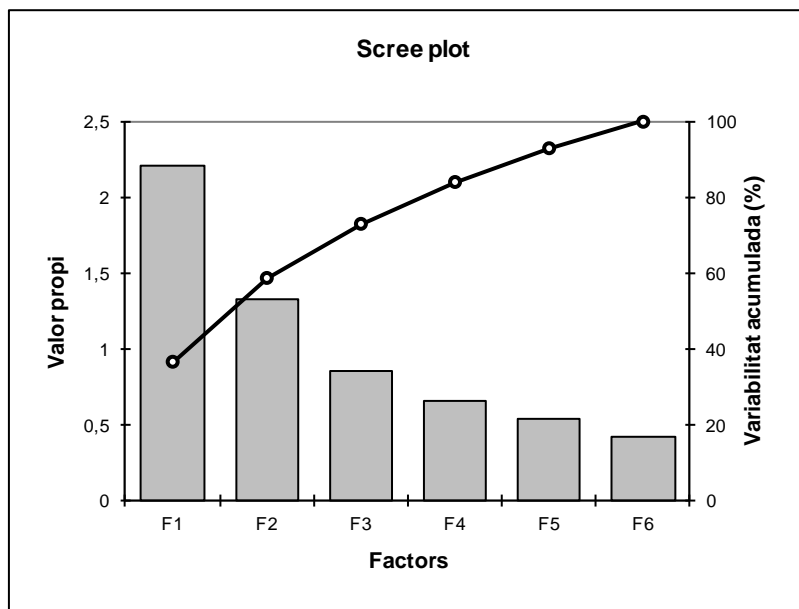
5.1.3. Anàlisi de components principals

L'anàlisi de components principals (ACP) és una tècnica estadística multivariant d'anàlisi de la variabilitat que és útil en conjunts de dades molt grans. Capaç de reduir la dimensionalitat del conjunt de dades de forma significativa, conserva una fracció important de la variabilitat característica original. En els ACP, les dades s'estructuren en valors propis (eigenvalues) jerarquitats segons la quantitat de variabilitat que incorporen. Al seu torn, els valors propis s'integren per tants factors com fonts de variabilitat efectiva (variables) incorpora l'anàlisi. Finalment, a partir dels factors es generen els vectors propis (eigenvectors): segments amb els quals s'elabora una representació espacial compacta de les correlacions entre els conjunts de dades de les diverses variables. Els vectors propis generalment es representen en un espai euclidià bidimensional per la senzillesa i claredat del gràfic. En aquests vectors, el mòdul representa la variabilitat continguda, i la direcció i sentit informen sobre el comportament de la variabilitat entre variables d'estudi. D'aquesta forma, a la major part dels ACP només es té en compte la variabilitat associada als dos factors més rellevants (F1 i F2).

Així doncs, per maximitzar la variabilitat incorporada a l'ACP cal incloure tants factors com sigui possible a l'anàlisi, però també cal tenir en compte que un excés d'informació irrellevant pot generar soroll innecessari i dificultar la seva interpretació. Per aquest motiu s'han descartat les variables dependents o derivades d'altres propietats com la higroscopicitat i el coeficient de contracció volumètrica. Per incrementar la potència de l'anàlisi gràfic s'ha treballat amb tres factors enlloc de dos i, per aquest motiu, ha calgut representar els vectors en un espai euclidià tridimensional. D'aquesta forma s'ha incrementat la variabilitat que s'ha incorporat, ha passat del 58,8% al 73,1%. El descens en el contingut de variabilitat a partir de F3 és força lineal existint poca diferència entre F3 i la resta de factors (Veure Taula 48 i Figura 104). L'ACP s'ha realitzat amb el software XLStat 2009 (1995-2009) i la representació tridimensional mitjançant un software de CAD.

Taula 48. Valors propis (Eigenvalues)

Estadístics	Factors					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propis	2,20	1,33	0,86	0,66	0,53	0,42
Variabilitat (%)	36,71	22,10	14,27	11,04	8,90	6,97
Variabilitat acumulada (%)	36,71	58,82	73,08	84,12	93,03	100,00


Figura 104. Scree plot. Variabilitat recollida pels factors

La variabilitat de cada propietat és reparteix entre els diversos factors. Com més variabilitat d'una propietat conté un factor més relacionats estaran aquests i més relacionat estarà el seu eix. D'aquesta forma, s'observa que F1 és el factor que més quantitat de variabilitat recull per a la densitat, la duresa i la compressió. Malauradament, F4 no entrarà a l'anàlisi gràfic final deixant d'incorporar el factor més important per a la variable Contracció Volumètrica. Afortunadament, F4 només representa un 11,04% de la variabilitat total (Veure Taula 49 i Taula 50).

Taula 49. Cosinus quadrats de les variables

Variables	Factors					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Densitat	0,670	0,020	0,038	0,015	0,002	0,255
CV	0,219	0,370	0,013	0,391	0,000	0,006
Duresa	0,481	0,066	0,227	0,082	0,004	0,140
Compressió	0,346	0,338	0,001	0,016	0,295	0,005
Flexió	0,202	0,507	0,001	0,054	0,231	0,004
Tracció	0,286	0,025	0,574	0,104	0,002	0,008

*En negreta els valors de cada variable on el cosinus quadrat és el més gran

Taula 50. Variabilitat continguda a cada factor

Variables	Factors					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Densitat	30,40%	1,47%	4,49%	2,27%	0,36%	60,99%
CV	9,94%	27,89%	1,57%	59,11%	0,01%	1,48%
Duresa	21,81%	4,96%	26,58%	12,34%	0,80%	33,52%
Compressió	15,69%	25,50%	0,07%	2,42%	55,18%	1,14%
Flexió	9,17%	38,26%	0,17%	8,09%	43,26%	1,04%
Tracció	12,98%	1,91%	67,12%	15,77%	0,40%	1,82%

*En negreta els valors de cada variable on el cosinus quadrat és el més gran

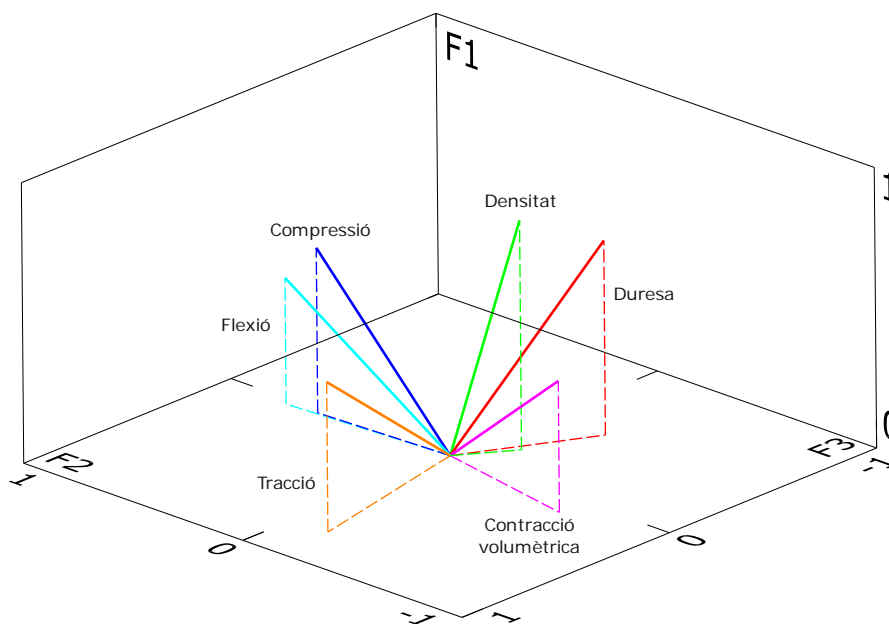
A partir dels vectors propis i la seva càrrega factorial s'elabora el gràfic tridimensional de variabilitat que farà possible determinar la correlació entre les propietats de la fusta analitzades. La correlació es calcula amb el cosinus de l'angle α entre vectors (Veure Taula 51, Taula 52 i Figura 105).

Taula 51. Vectors propis (Eigenvectors). En gris factors seleccionats

Variables	Factors					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Densitat	0,551	-0,121	-0,212	-0,151	-0,060	0,781
CV	0,315	-0,528	0,125	0,769	0,008	-0,122
Duresa	0,467	-0,223	-0,516	-0,351	-0,089	-0,579
Compressió	0,396	0,505	0,026	0,156	0,743	-0,107
Flexió	0,303	0,619	0,042	0,284	-0,658	-0,102
Tracció	0,360	-0,138	0,819	-0,397	-0,063	-0,135

Taula 52. Càrrega factorial dels vectors (Coordenades). En gris factors seleccionats

Variables	Factors					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Densitat	0,818	-0,140	-0,196	-0,123	-0,044	0,505
CV	0,468	-0,608	0,116	0,626	0,006	-0,079
Duresa	0,693	-0,257	-0,477	-0,286	-0,065	-0,375
Compressió	0,588	0,582	0,024	0,127	0,543	-0,069
Flexió	0,450	0,712	0,039	0,231	-0,481	-0,066
Tracció	0,535	-0,159	0,758	-0,323	-0,046	-0,087


Figura 105. Gràfic de vectors propis. Correlació entre variables i factors

Taula 53. Angle α entre vectors

Graus	Densitat	CV	Duresa	Compressió	Flexió	Tracció
Densitat	0°	---	---	---	---	---
CV	48°	0°	---	---	---	---
Duresa	22°	51°	0°	---	---	---
Compressió	56°	97°	70°	0°	---	---
Flexió	69°	109°	81°	13°	0°	---
Tracció	67°	53°	87°	72°	79°	0°

Taula 54. Cosinus de l'angle α entre vectors (Correlació)

Graus	Densitat	CV	Duresa	Compressió	Flexió	Tracció
Densitat	1	---	---	---	---	---
CV	0,669	1	---	---	---	---
Duresa	0,927	0,629	1	---	---	---
Compressió	0,559	-0,122	0,342	1	---	---
Flexió	0,358	-0,326	0,156	0,974	1	---
Tracció	0,391	0,602	0,052	0,309	0,191	1

Els resultats de l'ACP mostren una correlació molt alta entre la duresa i la densitat, i entre la resistència a compressió axial i la resistència a flexió estàtica. Les fustes denses contenen més matèria dins del seu volum i això n'incrementa la dificultat de penetració (duresa). També és conegut que en una proveta sotmesa a flexió estàtica les fibres situades per sobre de la línia neutra treballen a compressió. Per tant, és lògic que la resistència a flexió estàtica tingui relació amb la força a compressió axial.

L'anàlisi mostra relacions elevades i positives entre la densitat i la contracció volumètrica. També s'observa com l'alta densitat afavoreix la resistència a compressió axial. La contracció volumètrica també està lligada positivament amb la duresa de la fusta i la resistència a la tracció perpendicular. Probablement la connexió entre la contracció volumètrica i la duresa vingui donada per la densitat.

Per últim, l'anàlisi mostra una gran relació positiva entre la contracció volumètrica i la resistència a tracció perpendicular, indicant que fustes molt resistents seran dimensionalment poc estables. Aquest resultat és equívoc ja que la no inclusió del factor F4, que conté el 59% de la variabilitat de la contracció volumètrica, en el gràfic tridimensional desemboca en un resultat enganyós. Aquesta hipòtesi s'ha corroborat corrent un ACP bidimensional addicional entre el factor F1 i el F4. Observant la Figura 106 es veu que la contracció volumètrica i la tracció perpendicular són quasi perpendiculars i, per tant, la correlació entre aquestes dues propietats és molt menor del que indica el gràfic tridimensional. En general, la resistència a tracció perpendicular a les fibres ha obtingut poca correlació amb la resta de propietats.

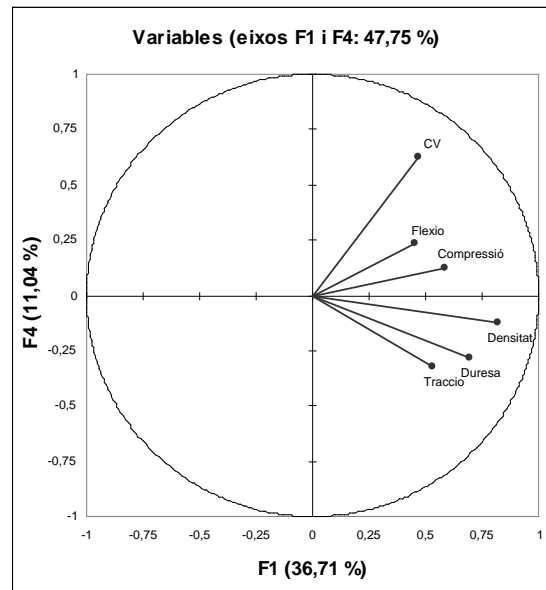


Figura 106. Gràfic de vectors propis.
Correlació entre variables i factors

La resta de correlacions entre propietats han estat molt baixes, fins i tot entre la resistència a tracció perpendicular i la resta de propietats mecàniques.

5.2. Contrast de resultats

El contrast de resultats es duu a terme entre les dades publicades per altres autors i els valors de fusta sana obtinguts a la investigació. En cas que no hagin aparegut diferències significatives entre la fusta sana, la fusta decaiguda i la fusta amb roig es tindran en compte totes les mostres analitzades en conjunt.

Taula 55. Densitat segons diversos autors

Font	Densitat (kg/m ³)				
AEIM (2007)	590				
Cigalat y Soler (2003)	590				
Collardet et Besset (1988)	550-750				
Fellner <i>et al.</i> (2007)	563				
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	541				
Giordano (1988)	370-580-700				
Koukos (1997)	0,482-0,542-0,571-(0,730)				
Kyuchukov & Gruevski (2009)	560-600-660				
Louzada <i>et al.</i> (2008)	575 (1 ^{er} torn Portugal) – 539 (1 ^{er} torn França) – 558 (Hort Portugal)				
Méndez Lódos (1996)	578				
Peraza <i>et al.</i> (2004)	540-590-650				
Romagnoli <i>et al.</i> (2009)	619-617-583				
Soler (2006)	660				
Ünsal & Kantay (2009)	630				
Vignote <i>et al.</i> (2000)	661 (mínim) -665 (mitjana) -671 (màxim)				
UNE 56540 (AENOR, 1978b) (Fronzoses)	Molt lleugera	Lleugera	Semi-pesada	Pesada	Molt pesada
	<350	350-500	510-700	750-950	>950
Correal-Mòdol, E.	587,04				

Taula 56. Higroscopicitat segons diversos autors

Font	Higroscopicitat (kg/m ³)		
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	0,0028		
Méndez Lódos (1996)	0,0032		
Vignote <i>et al.</i> (2000)	0,0033(mínim)-0,0036(mitjana)-0,0039(màxim)		
UNE 56540 (AENOR, 1978b)	Dèbil	Normal	Forta
	0,0015	0,0030	0,0050
Correal-Mòdol, E.	0,0035		

Taula 57. Contracció volumètrica segons diversos autors

Font	Contracció volumètrica (%)		
Cigalat y Soler (2003)	13		
Collardet et Besset (1988)	13-14		
Fellner <i>et al.</i> (2007)	11,6		
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	12,9		
Koukos (1997)	12,31-(11,64)		
Louzada <i>et al.</i> (2008)	15,0 (1 ^{er} torn Portugal) – 14,0 (1 ^{er} torn França) – 14,9 (Hort Portugal)		
Méndez Lódos (1996)	11,86		
Peraza <i>et al.</i> (2004)	8,2-11,9		
Ünsal & Kantay (2009)	11,3		
Vignote <i>et al.</i> (2000)	8,2(mínim)-10,8(mitjana)-13,7(màxim)		
UNE 56540 (AENOR, 1978b)	Petita	Mitjana	Gran
	5-10	10-15	15-20
Correal-Mòdol, E.	9,29		

Taula 58. Coeficient de contracció volumètrica segons diversos autors

Font	Coeficient de contracció volumètrica (%)			
AEIM (2007)	0,39			
Collardet et Besset (1988)	0,40-0,45			
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	0,40			
Méndez Lódos (1996)	0,41			
Peraza <i>et al.</i> (2004)	0,31-0,41			
Vignote <i>et al.</i> (2000)	0,31(mínim)-0,40(mitjana)-0,49(màxim)			
UNE 56540 (AENOR, 1978b)	Poc nerviosa	Mitjanament nerviosa	Nerviosa	Molt nerviosa
	0,15-0,35	0,35-0,55	0,55-0,75	0,75-1
Correal-Mòdol, E.	0,396			

Taula 59. Duresa segons diversos autors

Font	Duresa (mm ⁻¹)				
AEIM (2007)	2,5				
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	2,2				
Méndez Lódos (1996)	2,017				
Peraza <i>et al.</i> (2004)	2,1				
Vignote <i>et al.</i> (2000)	2,11(mínim)-2,28(mitjana)-2,40(màxim)				
UNE 56540 (AENOR, 1978b) (Fronzoses)	Molt tova	Tova	Semidura	Dura	Molt dura
	0,2–1,5	1,5-3	3-6	6-9	9-20
Correal-Mòdol, E.	3,896				

Taula 60. Resistència a compressió axial segons diversos autors

Font	Resistència a compressió axial (kg/cm ²)		
AEIM (2007)	460		
Cigalat y Soler (2003)	720		
Fellner <i>et al.</i> (2007)	500		
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	411		
Louzada <i>et al.</i> (2008)	531 (1 ^{er} torn Portugal) – 459 (1 ^{er} torn França) – 406 (Hort Portugal)		
Giordano (1988)	219-520-653		
Kyuchukov & Gruevski (2009)	490-551-633		
Méndez Lódos (1996)	428,8		
Peraza <i>et al.</i> (2004)	408-530		
Romagnoli <i>et al.</i> (2009)	587-516-453		
Ünsal & Kantay (2009)	500		
Vignote <i>et al.</i> (2000)	472(mínim)-521(mitjana)-558(màxim)		
UNE 56540 (AENOR, 1978b) (Fronzoses semipesades)	Baixa	Mitjana	Alta
	275-375	375-475	475-600
Correal-Mòdol, E.	538,99		

Taula 61. Resistència a la flexió estàtica segons diversos autors

Font	Resistència a la flexió estàtica (kg/cm ²)		
AEIM (2007)	710		
Cigalat y Soler (2003)	950		
Fellner <i>et al.</i> (2007)	816		
Fernández-Golfín <i>et al.</i> (1995)	881		
Giordano (1988)	510-1082-1429		
Kyuchukov & Gruevski (2009)	735-816-918		
Méndez Lódos (1996)	804,2		
Peraza <i>et al.</i> (2004)	642-806		
Romagnoli <i>et al.</i> (2009)	1168-854-726		
Ünsal & Kantay (2009)	775,5		
Vignote <i>et al.</i> (2000)	1331 (mínim) - 1441 (mitjana) - 1503 (màxim)		
UNE 56540 (AENOR, 1978b)	Baixa	Mitjana	Alta
	<1100	1100-1800	>1800
Correal-Mòdol, E.	977,34		

Taula 62. Resistència a la tracció perpendicular a les fibres segons diversos autors

Font	Resistència a la tracció perpendicular a les fibres (kg/cm ²)		
Vignote <i>et al.</i> (2000)	24		
UNE 56540 (AENOR, 1978b)	Baixa	Mitjana	Alta
	<25	25-45	>45
Correal-Mòdol, E.	27,55		

És àmpliament conegut que multitud de factors generen variabilitat sobre les propietats de la fusta. Aquests són els responsables de la diversitat de valors publicats pels diversos autors citats. Malauradament, el desconeixement de l'estructura i característiques d'aquelles mostres impedeix un contrast a fons de resultats. Tot i això, es pot afirmar que els resultats són semblants als valors publicats.

La resistència a flexió estàtica i la resistència a compressió axial es mouen per la banda superior del rang de dades però són semblants a la resta. Pel que fa a la resistència a la penetració, la fusta analitzada ha resultat molt més dura que als altres estudis. De tota forma, cal tenir en compte que la duresa és la propietat més variable entre les estudiades. Finalment, la resistència a la tracció perpendicular a les fibres és similar a l'única referència trobada, però són necessàries més referències per valorar-ho millor.

Així doncs, la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català té en general característiques intermèdies. És semipesada, presenta una avidesa per l'aigua normal, i una tendència petita a deformar-se en variar el contingut d'humitat. Semidura, les seves característiques mecàniques són força bones, fins i tot la resistència a flexió.

5.3. Anàlisi silvícola de la mostra

Analitzar les característiques dels cinc forests d'on s'han obtingut les mostres, permet aportar informació complementària sobre les característiques de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català. Tenint en compte que els rodals tenen diferent edat, creixement mitjà, estat sanitari, maneig silvícola, i grandària d'individus, s'ha optat per representar mitjançant gràfiques de dispersió edat/diàmetre els lots estudiats per fer visibles les semblances i diferències existents entre ells.

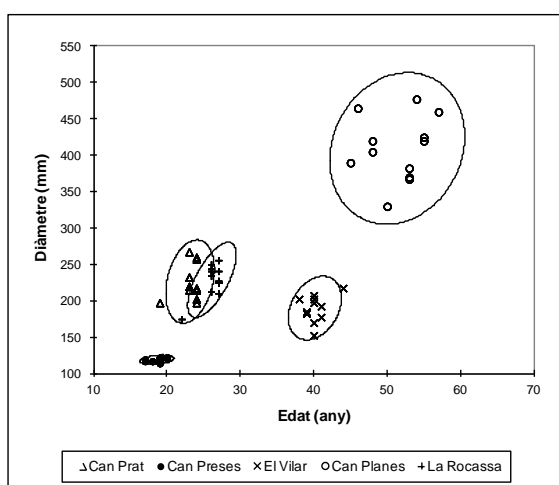


Figura 107. Població agrupada per rodals: el·lipse de confiança 95%

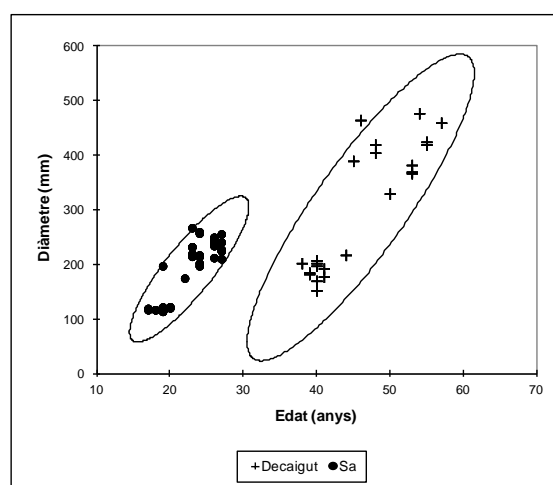


Figura 108. Població agrupada segons estat sanitari: el·lipse de confiança 95%

A la Figura 107 les mostres estan agrupades per procedència, i la forma de les el·lipses mostra la relació entre el diàmetre i l'edat dels arbres del rodal. La forma allargada de l'el·lipse de Can Preses, amb l'eix principal força paral·lel a l'eix de les abscisses (Edat), indica que tots els arbres tenien pràcticament el mateix diàmetre independentment de l'edat. Aquest fet s'explica per la joventut, petit diàmetre i l'alta densitat de tanyes que presentava el rodal. En canvi, els rodals de Can Prat i La Rocassa són masses força similars (coetànies, amb bons creixements, diàmetres semblants, densitat adequada i estat sanitari satisfactori), en què l'eix principal de l'el·lipse és força paral·lel a les ordenades (Diàmetre). La diferència en el diàmetre indica que al llarg del torn han existit diferències substancials entre individus en la capacitat de captar recursos. La castanyerada d'El Vilar té diàmetres similars a Can Preses i La Rocassa, però és entre quinze i vint anys més vella que aquelles dues, i crida l'atenció els seu baix creixement mitjà.

A la Figura 108 els rodals s'han agrupat segons l'estat sanitari, separant els que presentaven bon estat dels que presentaven algun grau de decaïment. Es pot observar que, malgrat el castanyer és un arbre molt longeu, a les masses apareixen problemes de decaïment al voltant dels quaranta anys.

5.4. Observacions metodològiques

5.4.1. Control de la humitat de la fusta

Les propietats físiques i mecàniques de la fusta varien amb el contingut d'aigua. Per tant, és necessari referir les característiques del material a una humitat determinada, i de retruc minimitzar la variabilitat que aquesta provoca. Malauradament, la variabilitat pròpia de la fusta, la histèresis, la inèrcia durant l'aclimatació, i la tolerància de la normativa fa que el grau d'humitat del condicionament sigui difícil d'ajustar amb precisió.

En primer lloc, la humitat es calcula en base a la massa anhidra, i la determinació d'aquest valor té certa tolerància perquè la norma UNE-EN 13183-1:2002 (AENOR, 2002) considera que la fusta està seca quan la diferència de pes entre dues pesades successives realitzades en un interval de 2 hores és inferior al 0,1%. En segon lloc, en l'aclimatació de la fusta s'introdueix encara més inexactitud, ja que la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978c) considera que les provetes s'estabilitzen amb l'ambient quan, en dues pesades successives separades per un interval de 24 hores, la diferència de pes respecte la primera d'elles és inferior al 0,5% (1/200). A més, la definició de les condicions ambientals tampoc és totalment precisa ja que en la temperatura i en la humitat s'admet cert marge: $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i $65\pm 3\%$. Per tant, si tenim en compte que les toleràncies s'acumulen de forma sinèrgica, l'error que s'acumula en el procediment es multiplica.

Segons els diagrames de Keylwerth (1949), elaborat amb fusta de *Picea sitchensis* i *Fagus sylvatica*, i el de Kollmann (1936), elaborat a partir de fusta de dimensions $12\times 100\times 200$ mm, a 20°C i 65% d'humitat ambiental, la fusta s'equilibra a 12% d'humitat, la mateixa que es requereix per determinar la higroscopicitat de la fusta segons la norma UNE 56532:1977 (AENOR, 1977c). Ara bé, segons Rijdsijk & Laming (1994) el castanyer no es comporta igual que el faig o l'avet de Sitka en front els canvis d'humitat, ja que presenta una histèresi força més pronunciada i en

el valor del punt de saturació de les fibres del castanyer existeix certa variabilitat: Vignote *et al.* (2000) afirmen que està “al voltant del 28%”, i Collardet i Beset (1988) li atorguen un interval entre el 25% i el 30%.

Per aquestes raons, es va creure adient fer una verificació prèvia del comportament higroscòpic de la fusta de castanyer amb les 354 provetes de dimensions 20×20×40 mm amb les quals es van caracteritzar la densitat, la contracció volumètrica, i la higroscopicitat. Els espècimens es van aclimatar en una cambra climàtica a 20°C i 65% d’humitat i, posteriorment, es van dur a l’estat anhidre seguint les indicacions de la norma UNE-EN 13183-1:2002 (AENOR, 2002). El resultat del control mostrà un comportament molt similar al dels diagrames de Keylwerth (1949) i Kollmann (1936), però diferí del 12% mitjà teòric (Veure Taula 63).

Taula 63. Humitat de la fusta de castanyer a 20°C i 65% d’humitat ambiental

Paràmetres estadístics	Humitat d’equilibri(%)
Nombre d’observacions	354
Mínim	9,77
Màxim	15,18
Amplitud	5,41
Cinquè percentil (P ₅)	12,62
Primer Quartil (P ₂₅)	13,08
Mediana (P ₅₀)	13,68
Tercer Quartil (P ₇₅)	14,16
Mitjana (\bar{X})	13,63
Desviació típica (n-1)	0,68

5.4.2. Densitat i pes específic

També es vol fer esment sobre els conceptes “pes específic” i “densitat”. En la nostra llengua a nivell col·loquial s’empra indistintament un i altre terme ja que els dos fan referència a la massa continguda en un volum, però des d’un punt de vista estricte no són el mateix. Mentre la densitat és la relació entre la massa i el volum d’un cos i és mesura en kg/m³, el pes específic és adimensional i es defineix com la relació de la densitat d’un material respecte la densitat de l’aigua.

Per tant, la norma UNE 56531:1977. “Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico.” (AENOR, 1977a) en realitat mesura la densitat perquè determina el volum de les peces per mesura directa del cantell de les provetes. En canvi, la norma ASTM D143-09 “Standard Test Methods for Small

Clear Specimens of Timber.” (ASTM, 2009) sí que determina el pes específic (*Specific gravity*) de la fusta ja que determina aquesta propietat per immersió segons el principi d'Arquímedes.

5.4.3. Resistència a tracció perpendicular a les fibres

La normativa espanyola sobre característiques físico-mecàniques de la fusta lliure de defectes fou redactada i aprovada a finals de la dècada dels anys setanta. Des de llavors, el gruix d'aquestes normes no ha estat actualitzat, a diferència del succeït amb la norma americana ASTM D 143-09 (ASTM, 2009) amb la qual comparteix nombrosíssimes semblances. Una de les principals diferències entre els dos textos és la mida de les provetes: la norma dels Estats Units empra provetes de secció quadrada de dues polzades (≈ 50 mm) de cantell, o d'una (≈ 25 mm) si la grandària de la mostra no ho permet, mentre que les només UNE empen quasi únicament la secció de 20×20 mm. Treballar amb una secció més petita facilita l'obtenció de provetes lliures de defectes, sobretot si els arbres són de petit diàmetre, però en ocasions pot dificultar la realització dels assaigs. Aquest és el cas de la resistència a la tracció perpendicular a les fibres de la norma UNE 56538:1978 (AENOR, 1978a), en la qual les provetes són difícilment mecanitzables per les seves petites dimensions i forma complexa (Veure Figura 109).

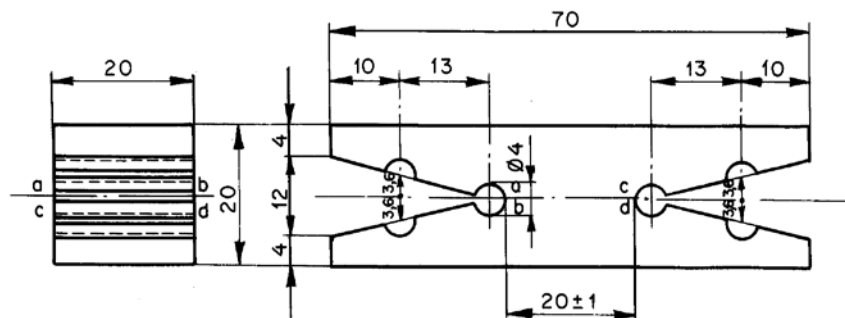


Figura 109. Proveta de tracció perpendicular segons norma UNE 56538:1978 (AENOR, 1978a)

Una alternativa és el mètode proposat a la norma ASTM D 143-09 (ASTM, 2009) en què les provetes tenen 2 polzades (50,8 mm) de costat i les mordasses d'assaig són força robustes (Veure Figura 110). Segons Fernández-Golfín *et al.* (1995) aquest mètode està menys influenciat per la grandària de la proveta i la posició relativa de l'anell i permet obtenir resultats més homogenis. Tot i això, el mètode europeu i l'americà no són directament comparables i necessiten una conversió d'acord a coeficients que haurien de ser prèviament calculats. A més, en un estudi

sobre la resistència a tracció perpendicular a la fibra de fusta de pi roig realitzat per Grekin & Surini (2008) també es detectaren mancances en aquest mètode. Els autors sostenen que els resultats que s'obtenen són un terç inferiors als reals, perquè en realitat aquest és un assaig de doble esqueixament on els trencaments tendeixen a orientar-se en la direcció radial. Per solucionar aquestes mancances els autors desenvoluparen una proveta alternativa derivada de l'americana. Per aquests motius, i per treballar amb una secció diferent a 20×20 mm, es va descartar emprar aquest mètode.

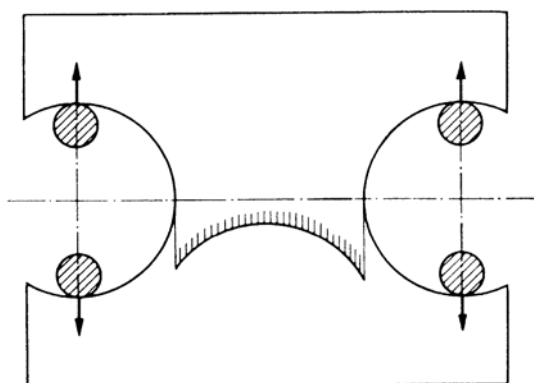


Figura 110. Alçat de la proveta proposada a la norma ASTM D 143-09 (ASTM, 2009) i distribució de les forces d'esqueixament (Grekin & Surini, 2008)

Així doncs, la complexitat en la caracterització de la propietat ha dut a diversos autors a plantejar-se solucions alternatives a les proposades a la normes establertes. Per exemple, Frascaria *et al.* (1992) estudien la cohesió dels anells de creixement per relacionar-ho amb els cullerots trencant a flexió provetes encastades en voladís. Un altre exemple de la dificultat de l'assaig el trobem a l'obra "Especies de maderas" de Peraza Sánchez *et al.* (2004) on malgrat recollir exhaustivament les propietats físiques i mecàniques de més de 200 espècies de tots els continents, no citen per a cap espècie de fusta la resistència a la tracció perpendicular a les fibres, tot i descriure la propietat en la metodologia.

Amb l'objectiu de solucionar els punts crítics d'escassa resistència mostrats a la Figura 112, es va optar per evolucionar l'útil que proposa la norma UNE 56538:1978 (AENOR, 1978a) presentat a la Figura 111. La fragilitat de l'instrument pot comprometre la precisió dels assaigs si es deforma, fet probable ja que els esforços es transmeten únicament a quatre seccions de 2 mm de gruix i 20 mm de profunditat al ser aquest l'ample de les provetes. A més, en el cas probable que la geometria de les provetes o la disposició de les mordasses no fos perfecta, l'esforç es repartiria de forma desigual i la capacitat de tracció del mecanisme abans de

trencar-se encara seria menor. Finalment, també cal tenir en compte que la fabricació de l'eina d'assaig és molt complicada.

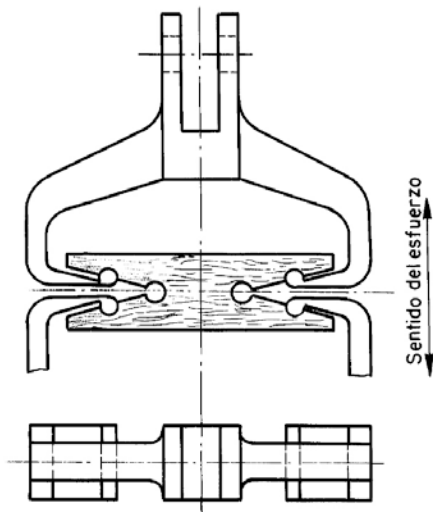


Figura 111. Mordassa de tracció segons norma UNE 56538:1978 (AENOR, 1978a)

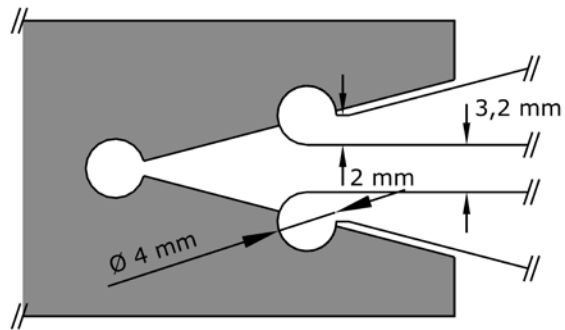


Figura 112. Punt crític de les mordasses de la norma UNE 56538:1978 (AENOR, 1978a)

Emprant la proveta de la Figura 109, les mordasses no es poden fer més robustes: tot mecanisme necessita certa folga per ajustar-se, la secció del punt crític no pot superar el radi del punt d'aplicació a la proveta, i la mordassa no es pot fer més gruixuda doncs no entrarien a les provetes. En front aquesta situació, s'optà per desenvolupar un nou útil de tracció i dissenyar noves provetes respectant la secció sotmesa a esforç, i la secció de 20x20 mm emprat a la resta d'assaigs mecànics. La nova proveta elimina el fresat triangular dels extrems per un colís del mateix diàmetre de les osques originals més un tall longitudinal que penetra fins a la perforació central. D'aquesta forma, la secció sotmesa a tracció perpendicular és exactament la mateixa, i els punts d'aplicació de la càrrega segueixen conservant les cotes originals (Veure Figura 113). L'útil d'assaig està format per dues pinces que traccionen quatre barnilles passants de 4 mm de diàmetre.

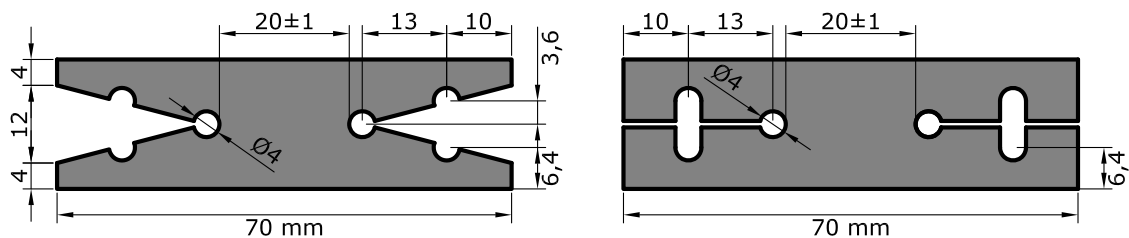


Figura 113. Alçat de les provetes proposades a la norma UNE 56538:1978 (AENOR, 1978a) (esquerra) i les emprades (dreta)

6. Conclusions

Les propietats físiques i mecàniques de la fusta de castanyer lliure de defectes del Sistema Mediterrani Català són les següents:

- La **densitat mitjana** és de 565-**587**-606 kg/m^3 . És una fusta de frondosa **semipesada**.
- La **contracció volumètrica** mitjana és 7,7-**9,3**-11,1 %. És una fusta que pateix canvis de grandària **petita** amb la variació d'humitat.
- El **coeficient de contracció volumètrica** mitjà és 0,34-**0,40**-0,45 %. La fusta és **mitjanament nerviosa**.
- La **higroscopicitat** mitjana és 0,0032-**0,0035**-0,0039 kg/m^3 . L'avidesa per l'aigua és **normal**.
- La **duresa** mitjana és 3,3-**3,4**-4,3 mm^{-1} . És una fusta de frondosa **semidura**.
- La **resistència mitjana a compressió axial** és 497-**539**-574 kg/cm^2 , i és considera que la seva resistència és **alta**.
- La **resistència mitjana a flexió estàtica** és 959-**977**-1125 kg/cm^2 , i és classifica com a **baixa**.
- La **resistència mitjana a tracció perpendicular a les fibres** és 24,7-**27,1**-30,6 Kg/cm^2 i es defineix com a **mitjana**.

Pel que fa als factors estudiats i el seu efecte sobre les propietats de la fusta, es pot afirmar que:

- El creixement influeix significativament sobre totes les propietats exceptuant la resistència a la compressió axial. Tot i això, la seva influència és baixa.
- L'estat sanitari dels arbres afecta les propietats de la fusta, però aquesta influència és en part deguda a les diferències de creixement de les masses joves i vigoroses respecte masses envellides i/o decaïgues.
- La fusta sana és més densa, menys higroscòpica, més dura, més resistent a compressió axial, però menys resistent a flexió estàtica que la fusta roja. Tot i això, les diferències són petites.

Pel que fa a la correlació entre propietats de la fusta de castanyer, s'ha observat que:

- La correlació entre les propietats la densitat i la contracció volumètrica és elevada ($\text{Cos}(\alpha)=0,669$).
- Les correlacions més altes les trobem entre la duresa i la densitat ($\text{Cos}(\alpha)=0,927$), i entre la resistència a compressió axial i la resistència a flexió estàtica ($\text{Cos}(\alpha)=0,974$).
- La resistència a tracció perpendicular a les fibres ha obtingut poca correlació amb la resta de propietats.

Pel que fa als problemes de decaïment:

- La presència de roig i **decaïment** en les masses de castanyer és molt patent passats els **quaranta anys d'edat**. Cal tenir en compte aquesta limitació productiva si es volen gestionar rodals per produir fusta de gran secció.

Pel que fa a les consideracions normatives:

- És necessari millorar la redacció de la norma UNE 56531:1977 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico." (AENOR, 1977a) per corregir l'equívoc entre "pes específic" i "densitat".
- La norma UNE 56538:1978 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras." (AENOR, 1978a) no és pot executar amb fiabilitat. Cal modificar el procediment operatiu.

7. Bibliografia

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (2009). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM D 143-09 (Reapproved 2009). West Conshohocken [Pennsylvania, USA]: ASTM International.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE IMPORTADORES DE MADERA (2007). *Las 75 especies de madera más utilizadas en España: 2007/2008. Monográfico de AEIM nº. 2.* Madrid: AEIM.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977a). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico.* UNE 56531:1977. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977b). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica.* UNE 56533:1977. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977c). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la higroscopicidad.* UNE 56532:1977. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977d). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la dureza.* UNE 56534:1977. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977e). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la compresión axial.* UNE 56535:1977. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1978a). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras.* UNE 56538:1978. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1978b). *Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los ensayos de los resultados.* UNE 56540:1978. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1978c). *Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos*. UNE 56528:1978. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1979). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática*. UNE 56537:1979. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997). *Madera aserrada y madera en rollo. Terminología. Parte 4: Términos relativos al contenido en humedad*. UNE-EN 844-4:1977. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002). *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa*. UNE-EN 13183-1:2002. Madrid: AENOR.

CAPUZ LLADRÓ, R. (2005). *Materiales orgánicos: maderas*. València: Editorial Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 84-9705-839-9.

CIGALAT FIGUEROLA, E.; SOLER BURILLO, M. (2003). *Guía de las principales maderas y de su secado*. València: Ediciones Mundi-Prensa. ISBN 84-8476-149-5.

COBOS SUÁREZ, P. (1989). *Fitopatología del castaño (Castanea sativa Miller)*. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. (Boletín de sanidad vegetal; núm. 16).

COLLARDET, J.; BESSET, J. (1988). *Les bois commerciaux et leurs utilisations: Tome II. Bois feuillus des régions tempérées et froides*. Dourdan: Éditions H. Vial. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. ISBN 2-85-101-027-1.

CONDE GARCÍA, M.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I.; (2007). *Manual técnico de secado de maderas*. Madrid: AITIM. ISBN 84-87381-37-5.

CORREAL MÒDOL, E.; VILCHES CASALS, M. (2012). "Properties of clear wood and structural timber of Pinus halepensis from north-eastern Spain". A: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING. Challenges and Solutions. Auckland, New Zealand 15-19 de juliol, 2012. Wellington: Timber Design Society Incorporated.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I., GUTIÉRREZ OLIVA, A., BAONZA MERINO, M. V., DÍEZ BARRA, M.R. (1995). "Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española". *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 4, núm. 2: p. 251-261.

FRASCARIA, N.; CHANSON, B.; THIBAUT, B.; LEFRANC, M. (1992). "Genetic diversity and wood mechanical properties of chestnut (*Castanea sativa*). Analysis of one factor concerning ring shake". *Annales des Sciences Forestieres*, vol. 49, núm. 1 : p. 49-62.

GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA ORAMAS, C.; DE PALACIOS DE PALACIOS, P. (2003). *La madera y su anatomía*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. AiTiM. ISBN: 84-86793-91-2.

GIORDANO, G. (1988). *Tecnologia del legno. Volume III: parte seconda. I legnami del commercio*. Seconda edizione. Torino [Itàlia]: Unione Tipografico-Editrice Torinese. ISBN: 88-02-04125-3.

GREKIN, M.; SURINI, T. (2008). "Shear strength and perpendicular-to-grain tensile strength of defect-free Scots pine wood from mature stands in Finland and Sweden". *Wood Science and Technology*, vol. 42, num. 1: p. 75-91.

JIMÉNEZ PERIS, F.J. (1999). *La madera: propiedades básicas*. Madrid: Grupo Estudios Técnicos (GET). ISBN: 84-922283-9-3.

KEYLWERTH, R. (1949). "Grundlagen der Hochtemperaturtrocknung des Holzes". *Holz-Zentralblatt*, vol. 75: p. 953-954.

KEYLWERTH, R. (1969). "Praktische Untersuchungen zum Holzfeuchte-Gleichgewicht". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 27, núm. 8: p. 285-290.

KOLLMANN, F. (1936). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer Verlag.

KOUKOS, P. K. (1997). "Some physical properties of sweet chestnut wood grown in Greece". A: *Holz als Roh- und Werkstoff*. Vol. 55, Núm. 2-4: p. 127-129.

KYUCHUKOV, B.; GRUEVSKI, G. (2009). "Strength characteristic of *Castanea sativa* Mill. wood from Belasitsa mountain in R. Macedonian". A: SECOND SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE. INNOVATIONS IN WOODWORKING INDUSTRY AND ENGINEERING DESIGN. Yundola, Bulgària 6-8 de novembre, 2009. Yundola: Universitat de Forests. Escola d'Indústries Forestals.

LOUZADA, J.L.; SILVA, M.E.; CASTRO, S.B.; OLIVEIRA, S.P.; MORAIS, J. (2008). "Comparative study of chestnut wood quality (*Castanea sativa* Mill.)". A: *Proceedings of the second iberian congress on chestnut*. Vila Real [Portugal]: International society for horticultural science. ISBN: 978-90-66052-20-8.

MÉNDEZ LODOS, M. (1996). *Análisis de las propiedades físico-mecánicas de la madera de castaño (*Castanea sativa*), aserrada en la provincia de Lugo*. P. Merino Gómez (dir); PORTO ARCEO, E. (dir). Vigo: Servicio de publicaciones. Tesi doctoral. Universidad de Vigo. ISBN 8481580414.

PERAZA SÁNCHEZ, F. [et al.]. (2004). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. Madrid: AITIM. ISBN 84-87381.

RIJSDIJK, J.F.; LAMING, P.B. (1994). *Physical and related properties of 145 timbers: information for practice*. Dordrecht [Països Baixos]: Kluwer Academic Publishers. ISBN: 0-7923-2875-2.

ROMAGNOLI, M.; SPINA, S.; AGRUMI, M.; DI TOMASO, S.; ORTENSI, E.; LODI, P.; LUDOVISI, R. (2009). "Valorizzazione del legno di castagno nel Lazio: provenienze a confronto". A: *Atti del terzo congresso nazionale di selvicoltura per il miglioramento e la conservazione dei boschi italiani*. Taromina (Messina): Accademia Italiana di Scienze Forestali. Vol. 3: p. 894-901.

SAS/STAT 9.0. (2002). Cary [North Carolina, USA]: SAS Institute Inc.

SEALY GOSSET, W. com a STUDENT (1908). "The probable error of a mean". *Biometrika*, vol. 6, núm. 1: p. 1-25.

ÜNSAL, Ö; KANTAY, R. (2009). "Drying and using properties of chestnut wood". A: *International Workshop on Chestnut Management in Mediterranean Countries - Problems and Prospects*. Leuven: International Society for Horticultural Science. (Acta horticulturae; 815). ISBN 978-90-66051-78-2.

VIGNOTE PEÑA, S.; MARTÍNEZ ROJAS, I. (2006). *Tecnología de la madera*. 3ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 84-8476-263-7.

VIGNOTE PEÑA, S.; PICOS MARTÍN, J; ZAMORA PANIAGUA, R. (2000). *Características de las principales maderas utilizadas en Bizkaia: Tecnología y aplicaciones*. Bilbao: Bizkaiko Foru Aldundia. Nekazaritza Saila. ISBN: 84-7752-304-5.

VILLASANTE, A.; VIGNOTE, S.; FERRER, D. (2010). "Influence of the Lunar Phase of Tree Felling on Humidity, Weight Densities, and Shrinkage in Hardwoods: (*Quercus humilis*)". *Forest Products Journal*, vol. 60, núm. 5: p. 415-419.

XLStat 2009.4.02 (1995-2009). New York [New York, USA]: Addinsoft SARL.

ZÜRCHER, E. (1999). "Lunar rhythms in forestry traditions: Lunar-correlated phenomena in tree biology and wood properties". *Earth, moon, and planets*, vol. 85-86, núm. 0: p. 463-478.

ZÜRCHER, E.; SCHLAEPFER, R.; CONEDERA, M.; GIUDICI, F. (2010). "Looking for differences in wood properties as a function of the felling date: lunar phase-correlated variations in the drying behavior of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) and Sweet Chestnut (*Castanea sativa* Mill.)". *Trees: Structure and Function*, vol. 24, núm: 1: p. 31-41.

Annexos

Annex: Mitjana acumulada i repeticions

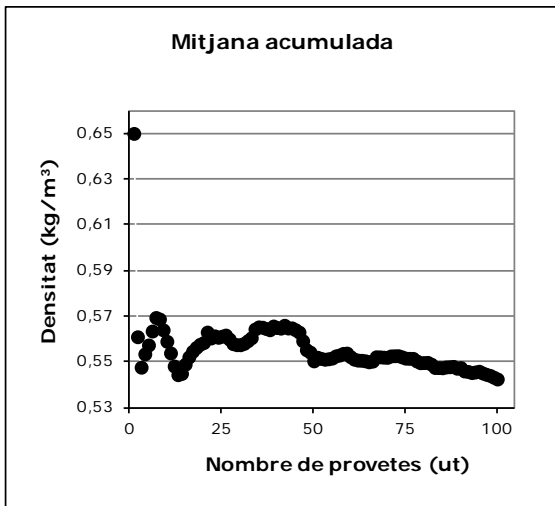


Figura 114. Mitjana acumulada.
Densitat

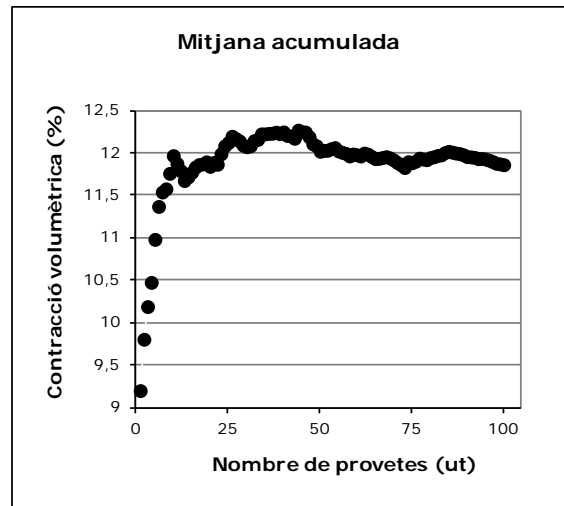


Figura 115. Mitjana acumulada.
Contracció volumètrica

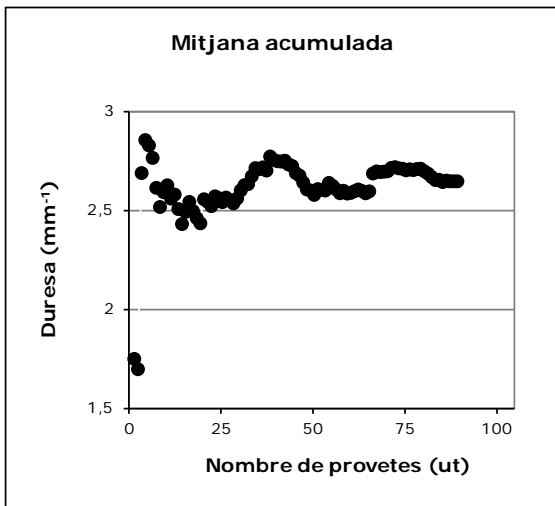


Figura 116. Mitjana acumulada.
Duresa

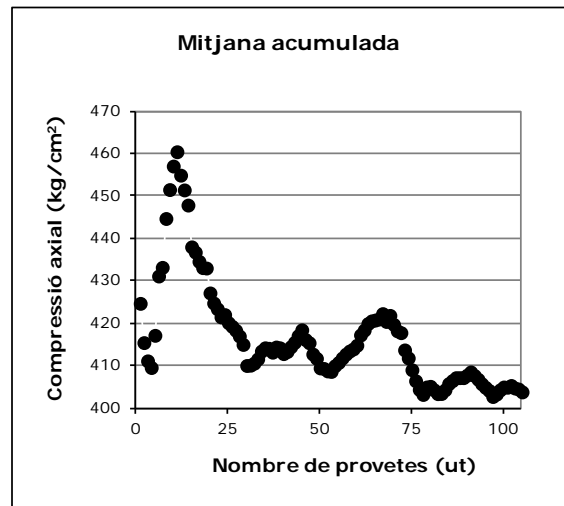


Figura 117. Mitjana acumulada.
Resistència a compressió

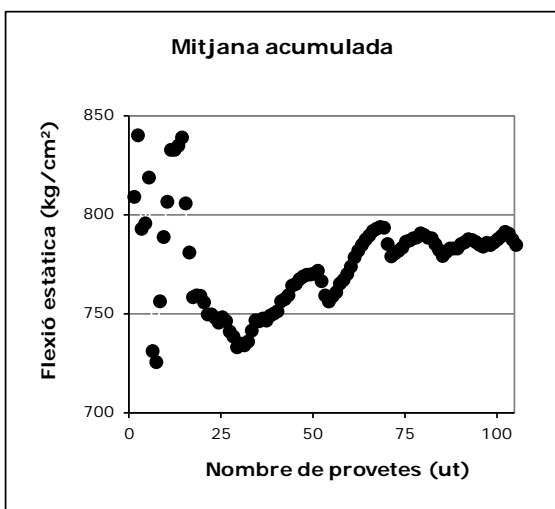


Figura 118. Mitjana acumulada.
Resistència a flexió

Annex fotogràfic



Figura 119. Identificació dels rolls



Figura 120. Roll afectat per roig procedent del Vilar de Sant Andreu



Figura 121. Extracció d'una rodanxa de la base del tronc per controlar l'edat i l'excentricitat



Figura 122. Raspallat de les rodanxes de castanyer



Figura 123. Troncs de Can Preses obrats.
Detall dels anells de creixement



Figura 124. Rolls de la Rocassa identificats segons color



Figura 125. Rols de Can Preses abans de ser desdoblats



Figura 126. Desdoblament d'un tronc per obtenir els taulons



Figura 127. Desdoblament d'un tronc afectat per roig



Figura 128. Taulons de Can Preses identificats i preparats per extreure'n les provetes



Figura 129. Serrat de les provetes lliures de defectes. Troncadora



Figura 130. Serrat de les provetes lliures de defectes. Escairadora



Figura 131. Provetes de castanyer en aigua.
Assaig de contracció volumètrica



Figura 132. Condicionament de les
provetes en cambra climàtica



Figura 133. Mesura de les dimensions de les
provetes. Assaig de densitat i contracció



Figura 134. Assaig de resistència
a flexió estàtica



Figura 135. Detall del suport amb contraxapat per
evitar la penetració del suport a la proveta

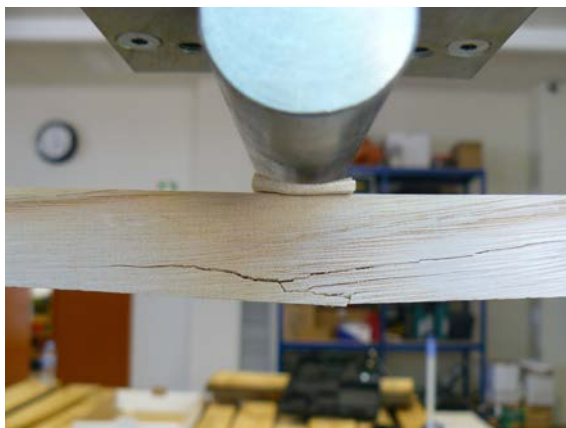


Figura 136. Trencament de la proveta a flexió
estàtica. Fusta normal

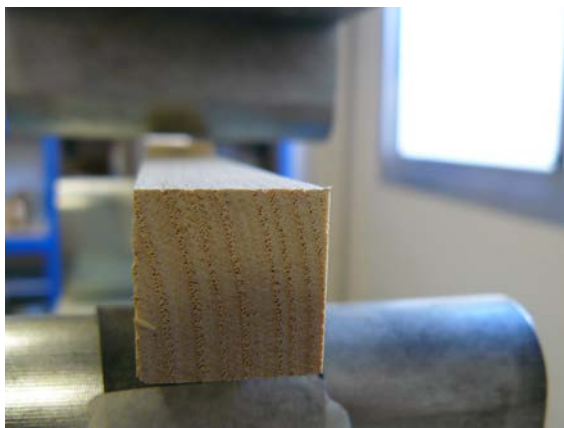


Figura 137. Detall de la secció de la proveta a flexió estàtica



Figura 138. Assaig de resistència a compressió axial



Figura 139. Detall de diferents trencaments a compressió axial



Figura 140. Proveta de resistència a tracció perpendicular



Figura 141. Proveta trencada de resistència a tracció perpendicular



Figura 142. Conjunt de provetes procedents d'un mateix roll

CAPÍTOL IV

FUSTA MASSISSA ESTRUCTURAL

Índex

1. Introducció	221
1.1. Classificació de la fusta estructural	221
1.2. Singularitats de la fusta estructural	223
1.3. Poblacions d'estudi i classes visuals	224
2. Objectius	227
3. Materials i mètodes	229
3.1. Mostra experimental, assecat i condicionament	231
3.2. Descripció dels elements estructurals	231
3.3. Procediments d'assaig	233
3.3.1. Dimensions, pes i densitat	233
3.3.2. Flexió estàtica: MOR i MOE	234
3.3.3. Humitat	238
3.4. Definició dels criteris de classificació visual	239
3.5. Càlcul dels valors característics i la classe resistent	239
3.5.1. Resistència a flexió característica	240
3.5.2. Mòdul d'elasticitat característic	242
3.5.3. Densitat característica	242
3.5.4. Assignació de la classe resistent	243
3.5.5. Càlcul d'altres propietats mecàniques	243
4. Resultats	245
4.1. Classificació visual	245
4.1.1. Proporció de rebuig	245
4.1.2. Causa de la ruptura	246
4.1.3. Criteris de classificació visual	246
4.2. Valors característics i classe resistent	248
4.2.1. Mòdul de resistència	248
4.2.2. Mòdul d'elasticitat	248
4.2.3. Densitat	249
4.2.4. Humitat	249
4.2.5. Classe resistent i altres propietats mecàniques	250
5. Discussió	251
5.1. Qualitat de la mostra i nombre de classes visuals	251
5.1.1. Qualitat de la mostra	251
5.1.2. Nombre de classes visuals	252
5.2. Anàlisi dels valors característics i la classe resistent	252
5.3. Anàlisi de les diferències en les propietats dels lots	254

5.4. Correlació entre la densitat de la llesca i la de la biga	257
5.5. Correlació entre MOR, MOE i densitat	258
6. Conclusions.....	261
7. Bibliografia.....	263
Annexos	269
Annex fotogràfic.....	271

1. Introducció

La fusta massissa és el material tradicional estructural per excel·lència. La forma de treballar amb aquest material al llarg dels segles es basava en els costums i l'experiència, però en l'actualitat l'Eurocodi 5 regula els projectes d'estructures de fusta en la construcció. La norma UNE-EN 1995-1-1. "Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación." (AENOR, 2006; AENOR, 2010c), exigeix que la fusta massissa emprada en estructures compleixi amb la norma UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011 "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales." (AENOR, 2011c). Així doncs, si es vol emprar fusta massissa de secció rectangular en una edificació, cal que estigui caracteritzada per poder realitzar els càlculs estructurals necessaris i predir el seu comportament. En l'actualitat, la fusta de castanyer d'Espanya no està inclosa ni a la norma espanyola UNE 56546:2011 (AENOR, 2011b), ni a la norma europea UNE-EN 1912:2012 (AENOR, 2012c). En conseqüència, per homologar aquesta espècie per a finalitats estructurals, cal elaborar criteris de classificació específica.

1.1. Classificació de la fusta estructural

La norma europea UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011 estableix els requisits que ha de complir la fusta serrada estructural de secció transversal rectangular classificada per la seva resistència. Existeixen dos metodologies per classificar lots de fusta i poder-los comercialitzar per a ús estructural (AENOR, 2011c: 8-9):

- **Classificació visual resistent:** Procés en el qual elements de fusta estructural de qualitat semblant s'agrupen en una mateixa classe i se'ls hi assignen valors de resistència, rigidesa i densitat.
- **Classificació mecànica de la resistència:** Procés mitjançant el qual es pot classificar una peça de fusta amb una màquina que detecta, de forma no destructiva i amb el control visual que eventualment es pugui precisar, una o més propietats de la fusta en qualitats a les quals es pugui assignar valors de resistència, rigidesa i densitat.

La classificació visual valora la qualitat de la fusta en funció dels defectes visibles a ull nu. És una metodologia de classificació bàsica, que requereix poc equipament,

es pot realitzar pràcticament en qualsevol emplaçament, i és competitiva en lots de poques unitats. Per contra, està bastant sotmesa a la subjectivitat del classificador essent necessari disposar de personal ben qualificat i ensinistrat. A més, al ser un sistema de criteris tancats és poc flexible, en conseqüència pot generar una quantitat de rebuig elevada en poblacions de característiques poc comuns, i tampoc permet assignar qualitats excepcionals de forma individualitzada fora de les classes visuals definides (Conde, 2003; Esteban, 2003; Hermoso, 2001). Les relacions entre la qualitat visual i la classe resistent per a les espècies de procedència europea i del Canadà les proposen els comitès tècnics de cada país, i estan recollides a la norma UNE-EN 1912:2012 (AENOR, 2012c). La definició de les classes resistents es troba a la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a). A nivell espanyol, les normes de classificació visual són la UNE 56544:2011 (AENOR, 2011a) per a coníferes, i la UNE 56546:2011 (AENOR, 2011b) per a frondoses, i en l'actualitat només consideren el pi roig, la pinassa, el pi insigne, el pinastre i l'eucaliptus blau.

La classificació mecànica valora l'aptitud de la fusta avaluant la densitat i el comportament elàstic mitjançant tècniques no destructives. És un sistema automatitzat, ajustat a cada tipus d'element estructural, no depèn de la subjectivitat de cap operari, força eficient en lots amb moltes unitats, i genera menys quantitat de rebuig. Conde (2003) afirma que en el cas de la pinassa, la classificació mecànica millora l'eficiència del procés classificatori entre el 30% i el 40%. Per contra, els grans equips de classificació són estàtics, el seu funcionament està basat en models matemàtics complexos que requereixen un gran esforç d'investigació, i estan elaborats a partir de l'observació del comportament del material. Aquests inconvenients expliquen perquè la normativa de classificació visual està força més desenvolupada que la mecànica. Els requisits normatius complementaris per a aquest procediment es recullen a la norma UNE-EN 14081-2:2010+A1:2013 (AENOR, 2013).

A Europa es diferencien dos sistemes de classificació mecànica que es coneixen com a "control de producció" i "màquina controlada". El primer està estandarditzat a la norma UNE-EN 14081-3:2012 (AENOR, 2012a) i el segon a la EN 14081-4:2009 (AENOR, 2009). En els dos textos es fa referència a equips que són capaços de predir la classe resistent d'elements de secció rectangular sense haver-los de trencar. Existeixen moltes i diverses tècniques no destructives que serveixen per estimar la resistència, rigidesa i densitat de la fusta, i sovint es combinen entre elles per maximitzar l'ajust dels models. Les més habituals són les proves parcials

de càrrega, els ultrasons de propagació i els d'atenuació, les ones d'impacte, les vibracions, la mesura de la humitat amb higròmetres capacitius o de resistència, i l'estimació de la densitat a partir del pes. Altres mètodes són el penetròmetre, el arrencament de caragol, la resistografia, les microones, la termografia, els raigs ics, els raigs gamma, la ressonància magnètica, etc. (Íñiguez González, 2007).

1.2. Singularitats de la fusta estructural

Els elements de fusta serrada estructural de secció transversal rectangular són peces de grans dimensions que inevitablement contenen les singularitats pròpies dels troncs dels arbres. S'entén com a singularitat qualsevol alteració de les fibres de fusta que pugui provocar una disminució de la resistència potencial (Veure Figura 143).

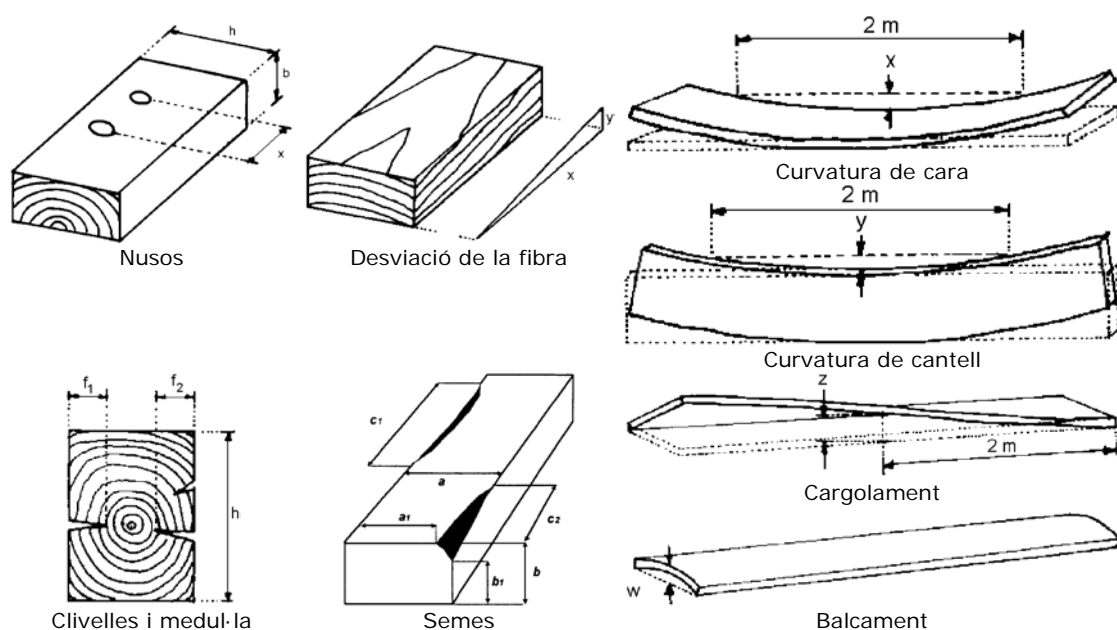


Figura 143. Algunes singularitats de la fusta segons UNE-EN 1310:1997 (AENOR, 1997b) i UNE-EN 56546:2011 (AENOR, 2011b)

En la classificació visual d'un lot es controla la humitat, i multitud de singularitats i característiques de la fusta: nusos, bosses de resina (en coníferes), desviació de la fibra, coeficient de creixement, escorça atrapada, quantitat d'albeca, presència de semes, profunditat i tipologia de clivelles i cullerots, deformacions d'assecat, presència de fusta de reacció (difícilment detectable a ull nu), alteracions biològiques com el vesc, fongs cromògens, podridures, galeries d'insectes, així com qualsevol tipus de defecte rar o poc freqüent.

1.3. Poblacions d'estudi i classes visuals

La norma UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011 defineix la població en els següents termes:

“Fusta d’una procedència coneguda i pertanyent a una espècie o combinació d’espècies, que sigui, o que es pretengui que sigui, classificada segons la seva resistència i subministrada com a producte comercialment definit” (AENOR, 2011c: 9).

Aquest concepte permet que a nivell europeu existeixin nombroses poblacions, i que una mateixa espècie pugui tenir diverses classes visuals semblants però no iguals segons el país d’origen. A tall d’exemple, la norma francesa NF B 52-001:2007 (AFNOR, 2007) arriba a definir fins a quatre classes visuals diferents per als pins (*Pinus sp.*), tres per al làrix (*Làrix decidua.*), la píceca (*Picea abies*) o l’avet Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), dos per a la píceca de Sitka (*Picea sitchensis*), o només una per a les espècies de territoris d’ultramar com la mandioqueira (*Qualea albiflora*) o el basralocus (*Dicorynia guianensis*). Aquest fet es deu a la necessitat d’adaptar cada espècie a diferents situacions específiques, conegudes i acceptades:

- Espècie o grups d’espècies.
- Procedència geogràfica.
- Requisits dimensionals.
- Requisits variats segons l’aplicació.
- Qualitat del material disponible.
- Pràctica històrica o costums.

Per aquest motiu, la norma UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011 (AENOR:2011c) descriu els requisits generals de classificació visual i, en un segon nivell, les normes nacionals s’adapten específicament a les particularitats de les espècies locals. Les dues normes de classificació visual de fusta estructural vigents en l’actualitat al Regne d’Espanya només permeten classificar algunes espècies fusteres comuns. La norma UNE 56544:2011 (AENOR, 2011a) sobre coníferes, descriu tres qualitats visuals (ME-1, ME-2 i MEG) en funció de la qualitat i secció de la fusta per a quatre espècies de pins: *Pinus radiata*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* i *Pinus nigra*. Paral·lelament, la norma UNE 56546:2011 (AENOR, 2011b) sobre frondoses, proposa una única qualitat visual (MEF) per a la fusta d’*Eucalyptus globulus* de secció inferior a 60×200 mm.

Molts autors han estudiat aquestes relacions en diverses espècies, i el punt clau en tots els estudis rau en la presa de decisions sobre els criteris de classificació a adoptar (Adell Almazan *et al.*, 2008; Calderoni *et al.*, 2006; Carballo *et al.*, 2009; Díez *et al.*, 2000; Díez y Fernández-Golfín, 1997; Esteban Herrero, 2003; Fernández-Golfín *et al.*, 1997; Fernández-Golfín *et al.* 2001; Fernández-Golfín *et al.*, 2007; Hermoso, 2001; Hermoso *et al.*, 2002a; Hermoso *et al.*, 2002b; Hermoso *et al.* 2007; Íñiguez González, 2007; Montón Lecumberri, 2012; Vega *et al.*, 2011). Ara bé, cal que el sistema sigui pràctic i eficient, i per aquest motiu els autors busquen un compromís acceptable entre els següents factors:

- **Acotament de la població caracteritzada:** cal concretar l'espècie o grup d'espècies, i la procedència geogràfica de la fusta. En general, a mesura que s'amplia la grandària de la regió, també s'incrementa la heterogeneïtat del material i la classe resistent se'n ressent.
- **Optimització de les dimensions dels elements:** en classificar elements de petita secció és habitual trobar des de peces completament lliures de singularitats fins altres que en contenen de molt importants. En canvi, a mesura que s'incrementa la secció, cada cop és més difícil trobar-ne de qualitat excel·lent i de qualitat molt deficient. Per tant, com que en canviar la grandària de la secció, la importància de les singularitats i la seva influència sobre la resistència no és la mateixa, és important concretar les dimensions de les peces a les que s'aplica la classificació visual. Així es pot minimitzar la quantitat de rebuig i maximitzar la classe resistent.
- **Definir específicament les singularitats:** les singularitats limiten la resistència dels elements, però no totes minven la resistència de la mateixa forma ni amb la mateixa intensitat. Generalment, els nusos i la desviació de la fibra són les que minven en major mesura la resistència de les peces, encara que això és relativament variable segons la població. També cal tenir en compte que no totes les singularitats són presents a totes les espècies. Les bosses de resina només són presents a les coníferes, els xilòfags ataquen de forma selectiva segons la fisiologia dels teixits, etc. Per exemple, l'albeca de castanyer és especialment sensible a *Hesperophanes pubescens*. En conseqüència cal ajustar els criteris de classificació de forma específica per a cada població. També cal que els criteris definits siguin entenedors i àgils d'aplicar.

- **Minimitzar la quantitat de rebuig:** com més laxos són els criteris de classificació més quantitat de fusta s'accepta, però el material presenta més defectes, la classe resistent minva i, amb ella, el valor de mercat. Cal arribar a un equilibri entre la quantitat de rebuig i la qualitat del material considerat de qualitat estructural per reduir al màxim la fusta no acceptada, maximitzar la rendibilitat dels aprofitaments forestals, i el posterior serrat industrial.
- **Maximitzar la classe resistent:** és necessari maximitzar la classe resistent d'una població per millorar-ne la utilitat i el valor de mercat, no només per competir amb altres materials estructurals sinó també respecte la resta d'espècies i poblacions ja caracteritzades. Com més alta és la classe resistent assignada, menys fusta es necessita per realitzar una estructura i, per tant, resultarà més econòmica. A més, també es maximitzen les possibilitats constructives.
- **Minimitzar el nombre de classes:** definir un nombre elevat de classes visuals minimitza la quantitat de rebuig, però incrementa la dificultat en la classificació i els costos de maneig. També cal tenir en compte que, si existeixen moltes classes, el mercat identifica les d'inferior resistència com a de baixa qualitat i tendeix a rebutjar-les.

2. Objectius

La caracterització de la resistència estructural de la fusta massissa de castanyer procedent del Sistema Mediterrani Català té com a objectius específics:

- Definir un **sistema de classificació visual** per a la fusta serrada d'ús estructural de secció rectangular.
- Assignar una **classe resistent** segons la **classe visual** de la fusta.
- Obtenir un **sistema de classificació equilibrat** entre la qualitat resistent de les peces aptes i la quantitat de rebuig que es genera.

3. Materials i mètodes

La creació d'un sistema de classificació de fusta serrada de secció rectangular estructural per classes de qualitat visual és un procés en què es defineixen criteris de selecció dels elements estructurals en funció de la quantitat i gravetat de les singularitats que no es considerin admissibles. Els passos seguits per elaborar aquests criteris han estat els següents:

- **Selecció dels peus i aprofitament** (Veure Capítol II). La tria acurada dels peus incideix sobre la quantitat de rebuig i la resistència del lot. Cal triar troncs aptes per a ús estructural.
- **Serrat, assecat i condicionament**. Durant la transformació dels rolls en fusta serrada de secció rectangular és quan els elements obtenen les seves característiques definitives de servei. El serrat sovint provoca semes, durant l'assecat apareixen les clivelles i les deformacions, és en aquesta part del procés quan la fusta assoleix el seu aspecte i dimensions definitives en equilibrar la seva humitat amb la de l'ambient.
- **Descripció de les dimensions i singularitats** de les bigues dels lots a assajar (Veure 3.2. Descripció dels elements estructurals).
- **Assaig a flexió estàtica de les provetes** segons la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2011b). Anàlisi del comportament resistent i elàstic, i determinació de la densitat i la humitat dels elements testats.
- **Anàlisi de la morfologia del trencament** de les bigues sotmeses a esforços de flexió estàtica observant el comportament de la biga durant la càrrega, la forma del trencament, i quines singularitats han condicionat la ruptura. Control de la densitat i humitat a partir d'una llesca de la biga.
- **Definició preliminar dels criteris de classificació visual**. Cal respectar els requisits i limitacions definits a l'Annex A de la norma UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011 (AENOR, 2011c) sobre característiques reductores de la resistència, especificacions geomètriques, alteracions biològiques i altres. També s'han tingut en compte els criteris de la norma italiana UNI 11035-2 (ENIdU, 2010b) sobre classificació visual de castanyer, a més d'altres experiències pròpies i alienes realitzades amb anterioritat en el camp de la classificació visual.
- **Càlcul dels valors característics** segons UNE-EN 384:2010 (AENOR, 2010b) i assignació de la classe resistent d'acord amb la UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a).

- **Valoració de la classe resistent resultant respecte a la quantitat de rebuig.** Acceptació o revisió dels criteris de classificació prèviament definits. Quan els criteris arriben a un compromís acceptable entre resistència i rebuig, s'accepten definitivament els criteris de qualitat definits.
- **Assignació de la classe resistent** a la població un cop calculats els valors característics considerant únicament els elements que han superat els criteris de qualitat definits.

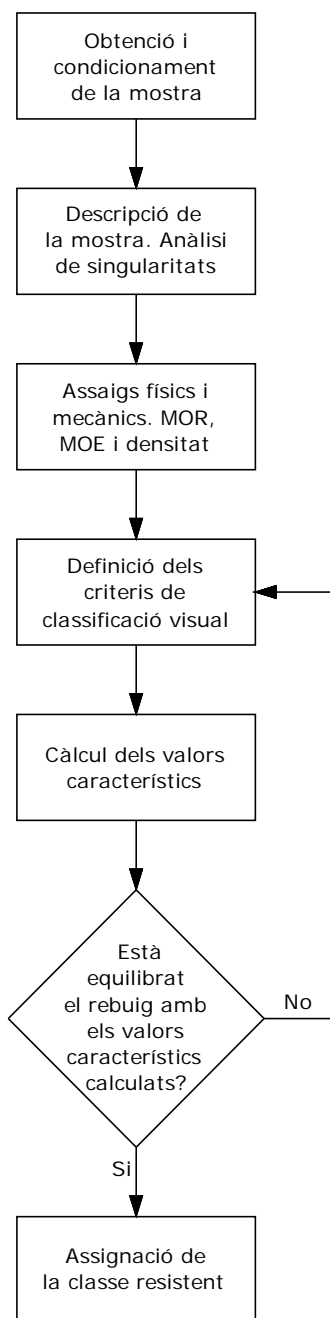


Figura 144. Procés de definició dels criteris de classificació visual per a una població i assignació de la classe resistent

3.1. Mostra experimental, assecat i condicionament

Els elements estructurals caracteritzats provenen dels mateixos boscos i arbres que les provetes lliures de defectes estudiades al Capítol II. Concretament, són de les finques de la Rocassa (Guilleries), Can Prat (Montseny) i Can Planes (Montseny). Els arbres de Can Preses (Montnegre) es van descartar per ser massa petits, i els del Vilar (Guilleries) per disposar únicament d'onze peus.

Taula 64. Mostres de fusta estructural de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Mostra			Descripció dels elements				
			Dimensions nominals (mm)			Amplada anells (mm)	
Origen	Lot	Nombre de bigues	Cantell	Gruix	Longitud	Mitjana	Límit de la mitjana 95%
Guilleries	120×65	40	120	65	2280	8,39	8,05 - 8,74
Montseny	80×80	64	80	80	1520	9,58	9,09 - 10,08
	95×95	62	95	95	1805		
	135×135	75	135	135	2565	7,89	7,49 - 8,30

La fusta de castanyer allibera lentament la humitat i necessita assecat-se sense pressa per evitar el seu col·lapse, minimitzar l'aparició de clivelles d'assecat o deformacions indesitjades. Per aquestes raons, la fusta es va assecat a l'aire ja que aquest procediment presenta un gradient d'humitat petit amb l'ambient. Els rolls de castanyer romangueren al pati de MADEGESA al voltant d'un més abans de ser escairats i, posteriorment, les bigues es van apilar, separar amb travessers, cobrir i assecat al pati de la serradora (Veure Figura 145). La duració del període d'assecat a l'aire depengué del gruix del bigam:

- Bigues de la Rocassa (Guilleries): assecades a l'aire durant quinze mesos des de març de 2009 fins al maig de 2010.
- Bigues de Can Prat (Montseny) i Can Planes (Montseny): assecades a l'aire durant dinou mesos entre gener de 2010 i juliol de 2011.

Abans dels assaigs, les bigues es condicionaren almenys durant un mes en l'atmosfera climatitzada del laboratori per homogeneitzar la humitat de la fusta.

3.2. Descripció dels elements estructurals

Un cop la fusta serrada ha assolit la humitat adequada per ser emprada estructuralment, el següent pas a dur a terme és la descripció acurada de les seves

dimensions i singularitats abans d'assajar-la. Car, s'ha de tenir en compte que per valorar correctament la geometria, les deformacions, la presència de clivelles o cullerots o la desviació de la fibra de les bigues, és necessari que elements estructurals no hagin patit cap alteració. La mesura de les dimensions, singularitats i degradacions biològiques s'ha dut a terme segons les següents normes:

- UNE-EN 336:2003 "Madera estructural. Dimensiones y tolerancias."
 - Dimensions de la secció i longitud de l'element.
- UNE-EN 1309-1:1997 "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las dimensiones. Parte 1: Madera aserrada."
 - Dimensions de la secció i longitud de l'element.
- UNE-EN 1310:1997 "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades."
 - Presència de nusos: dimensions i posició (cara o cantell).
 - Clivelles: longitud, profunditat i posició dins l'element estructural. Es distingeix entre clivelles passants i no passants, i si les clivelles són d'assecat o provocades per abatiment, gelada o altres factors.
 - Cullerots: grandària i morfologia.
 - Desviació global i local de la fibra de l'element estructural: Es considera l'angle general de la fibra i les variacions locals provocades per nusos o altres defectes.
 - Deformacions: cargolament, balcament i curvatura de cara i cantell.
 - Anells de creixement: amplada, excentricitat.
 - Presència de fusta de tracció.
 - Semes: secció disminuïda i longitud afectada.
 - Plantes paràsites: vesc.
 - Altres singularitats: presència de medul·la, cops, entre escorça, altres defectes rars (cossos estranys, fusta carbonitzada, fals cor, ...).
- UNE-EN 1311:1998 "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las alteraciones biológicas."
 - Fongs: coloracions, podridures, decaïment, xancre.
 - Insectes xilòfags: galeries, atacs actius o no.
 - Altres degradacions.



Figura 145. Elements estructurals assecant-se a l'aire lliure

3.3. Procediments d'assaig

Tot seguit es descriuen, per ordre d'execució, els assaigs realitzats a cada un dels elements estructurals. El procés consistí en mesurar el pes i les dimensions de les bigues, trencar-les a flexió estàtica i extreure'n una llesca per determinar la densitat i la humitat de la fusta. A partir de la densitat, el comportament elàstic i la resistència és determina la classe resistent.

3.3.1. Dimensions, pes i densitat

Un cop aclimatades, les bigues es mesuraren segons les especificacions de la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b). La longitud de la cara i el cantell es va prendre almenys a 150 mm de la testa, amb una precisió superior al 1%, i per fer-ho es va emprar un peu de rei "Mitutoyo Supercaliper IP67". La longitud dels elements es va determinar amb una cinta mètrica mil·limetrada convencional. Complementàriament, es va determinar el pes total de les bigues pesant-les senceres amb una balança "GRAM WLC 60/C2/R" de seixanta quilograms de capacitat i una precisió de $\pm 1g$.

La densitat de la fusta es va calcular per a cada element de dos formes diferents amb l'objectiu d'estudiar la correlació de les dues metodologies. Abans de l'assaig a flexió, es va calcular la densitat mitjana global de cada biga amb les dimensions i el

pes de l'element sencer. Després del trencament, es va fer mitjançant una llesca estreta de la secció completa de la biga segons indica a la norma 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b). En aquest darrer procediment s'extreu una llesca de la secció completa de la biga tan a prop com sigui possible de la zona de trencament, tenint cura que estigui lliure de nusos i altres defectes, i se'n determinen les dimensions i el pes. S'emprà la fórmula següent:

$$\rho_H = \frac{P_H}{V_H} \quad (14)$$

On:

ρ_H = Densitat a la humitat "H" (kg/m³)

P_H = Pes a la humitat "H" (kg)

V_H = Volum a la humitat "H" (m³)

La llesca també s'utilitza per conèixer la humitat de la fusta en el moment de l'assaig. Segons la norma UNE-EN 384:2010 (AENOR, 2010b) cal corregir la densitat de la fusta quan no es troba al 12% d'humitat. Si la fusta està més humida, la densitat s'ha de disminuir un 0,5% per cada increment del 1% en el contingut d'aigua respecte al valor de referència. De la mateixa forma, si la fusta està més seca, la densitat s'ha d'incrementar un 0,5% per cada 1% de desviació.

3.3.2. Flexió estàtica: MOR i MOE

Els elements estructurals se situen al pòrtic de tal forma que la cara sigui paral·lela al terra, aplicant la càrrega als terços de la llum, i amb una llum total igual a divuit vegades el cantell de la proveta. La determinació de la resistència a flexió axial i del mòdul d'elasticitat global a flexió es realitzà sota aquestes condicions en tots els casos. La proveta es va recolzar sobre rodets metàl·lics de 40 mm de diàmetre, i es guià amb dos topalls laterals per prevenir el bolc i assegurar l'ortogonalitat de l'aplicació de la càrrega. La col·locació dels elements estructurals en el pòrtic d'assaig ha de ser aleatòria deixant a l'atzar la part de la secció sotmesa a tracció i a compressió (Veure Figura 146).

Els assaigs es dugueren a terme en un pòrtic d'assaig a flexió "HOYTOM CM-DF 300/A1500" capaç d'assolir càrregues de trencament de fins a trenta tones, i admetre elements estructurals de fins sis metres de longitud i un metre i quaranta

centímetres d'amplada. L'equip, controlat pel software de control HOYWIN 32 RS, recull de forma contínua les dades de càrrega i deformació en la secció central de la proveta durant tot el cicle d'assaig gràcies a un extensòmetre magnètic. D'aquesta forma es genera automàticament una gràfica càrrega/deformació on es visualitza en temps real la càrrega aplicada, el comportament elàstic i el punt de trencament (Veure Figura 147).

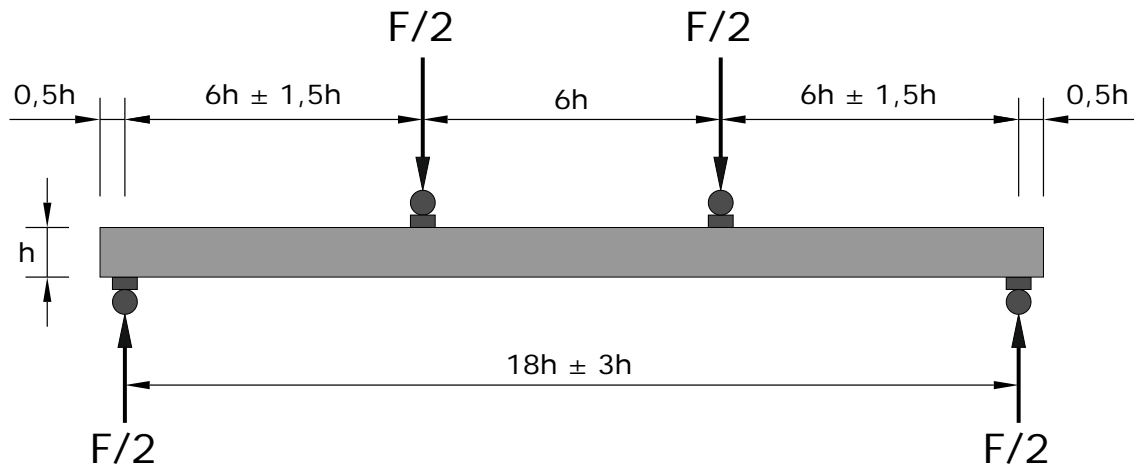


Figura 146. Assaig de resistència a flexió estàtica segons norma 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b)

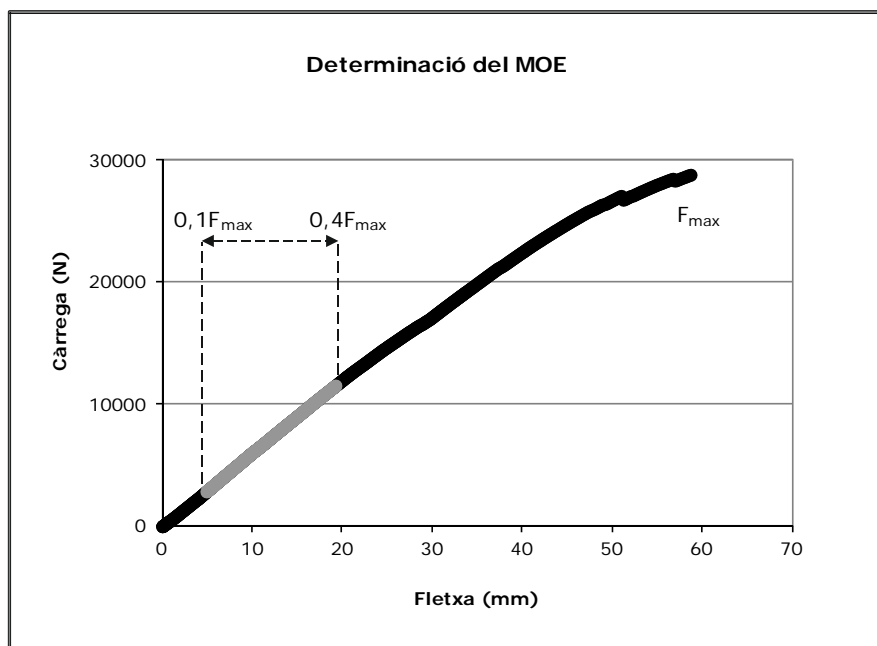


Figura 147. Corba càrrega/fletxa. Càrrega de ruptura. Tram elàstic

La norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b) considera procediments separats per calcular el mòdul d'elasticitat global (MOE) i la resistència a la flexió axial (MOR). Ara bé, gràcies a les característiques tècniques del pòrtic és possible determinar les dues propietats simultàniament respectant les especificacions dels dos assaigs. Treballar d'aquesta forma té diversos avantatges:

- Observar sense interrupcions el comportament de la peça fins la ruptura.
- Visualitzar tota la corba càrrega/deformació permet seleccionar completament el tram de dades on la correlació és lineal i així s'optimitza el càlcul del MOE.
- Una proveta sotmesa a un sol cicle de càrrega no pot haver estat malmesa en una càrrega anterior per valorar la rigidesa.
- Es possible apreciar la influència dels trencaments parcials sobre la resistència i rigidesa de la biga.

En aquest sentit també cal dir que durant la realització de la tesi van estar en vigor tres edicions de la norma UNE-EN 408 (Veure Taula 65). Com es pot observar, la velocitat de càrrega en l'assaig del MOR es va modificar a l'edició del 2011. Aquesta modificació no va comportar diferències en l'execució dels assaigs entre lots, ja que des de l'inici de l'estudi sempre es va treballar amb una velocitat de càrrega adequada per determinar simultàniament el MOR i el MOE. A més, la velocitat d'assaig va determinar en base a l'experiència prèvia d'anteriors caracteritzacions dutes a terme per l'autor (Correal Mòdol, E.; Vilches Casals, M., 2012).

Taula 65. Condicions d'aplicació de la càrrega segons UNE-EN 408

Norma	Condicions d'aplicació de la càrrega ¹	
	Determinació del MOE	Determinació del MOR
UNE-EN 408:2004	$V \leq 0,003 \cdot h \text{ mm/s}$	$t = 300 \pm 120 \text{ s}$
UNE-EN 408:2011	$V \leq 0,003 \cdot h \text{ mm/s}$	$V \leq 0,003 \text{ h mm/s}$
UNE-EN 408:2011+A1:2012	$V \leq 0,003 \cdot h \text{ mm/s}$	$t = 300 \pm 120 \text{ s}$

¹h = Cantell de la biga (mm) ; t = temps de ruptura

3.3.2.1 Càlcul del mòdul d'elasticitat global (MOE)

El mòdul d'elasticitat global (MOE) és una constant física que ens informa de la rigidesa d'un material. Aquest mòdul relaciona la deformació provocada per una càrrega en un element estructural en funció de la seva geometria. Per determinar-lo cal mesurar la fletxa al centre de l'element dins del rang elàstic, això és sense ruptures ni comportament plàstic. Es prenen les dades de càrrega/deformació compreses entre el 10% i el 40% de la càrrega de trencament, amb la condició que almenys inclogui el tram entre el 20% i el 30% (Veure Figura 147). Les càrregues per sobre d'aquest rang s'eliminen per evitar incloure dades corresponents al comportament plàstic, i les dades per sota no es consideren per eliminar possibles interferències amb l'assentament de la peça. De fet, la fletxa es calcula menyspreant l'aixafament local que puguin patir els suports i els punts de càrrega. Finalment, es busca el tram més llarg dins d'aquest rang de càrrega que tingui un

coeficient de correlació igual o superior a 0,99. En el nostre cas, al disposar de totes les dades des de l'inici de la càrrega fins al trencament, és possible determinar amb exactitud el 10% i el 40% de la càrrega de ruptura. La fórmula de càlcul, tal com recull la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b), és la següent:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (15)$$

On:

a = Distància entre el punt de càrrega i el suport més proper (mm)

b = Amplada de la secció transversal de la proveta (mm)

$E_{m,g}$ = Mòdul d'elasticitat global (N/mm²)

F_i = Càrrega en el punt "i" de la part recta de la corba càrrega/deformació (N)

G = Mòdul d'elasticitat transversal mitjà. Tendeix a infinit si es desconeix (N/mm²)

h = Cantell de la secció transversal de la proveta (mm)

l = Llum de la proveta (mm)

w_i = Fletxa en el punt "i" de la part recta de la corba càrrega/deformació (mm)

3.3.2.2. Càlcul de la resistència a flexió estàtica (MOR)

La resistència a flexió estàtica d'un element estructural es calcula aplicant la següent expressió de la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b):

$$f_m = \frac{a \cdot F_{\max}}{2W} \quad (16)$$

On:

a = Distància entre el punt de càrrega i el recolzament més pròxim (mm)

f_m = Resistència a la flexió estàtica (N/mm²)

F_{\max} = Càrrega de ruptura (N)

W = Mòdul o moment resistent de la secció (mm³)

El mòdul resistent és una magnitud física que varia amb la forma i grandària de la secció dels elements estructurals sotmesos a flexió. En el cas de les bigues amb secció quadrada o rectangular:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (17)$$

On:

b = Base o gruix de la secció de la biga (mm)

h = Cantell o alçada de la secció de la biga (mm)

3.3.3. Humitat

La humitat modifica les propietats físiques i resistents de la fusta. Per aquest motiu, els elements estructurals en el moment de l'assaig han d'estar a una humitat de referència corresponent a una temperatura de l'aire de 20°C i una humitat relativa del 65%. Si aquest precepte no és compleix, serà necessari corregir els resultats experimentals del mòdul d'elasticitat i la densitat. Per controlar l'assecat final de les bigues i assegurar que havien assolit l'equilibri higroscòpic amb l'ambient del laboratori, se'n van anar pesant algunes al llarg del seu condicionament fins que el seu pes fou estable.

La humitat de la fusta es va calcular segons la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b) la qual deriva a la norma UNE-EN 13183-1:2002 (AENOR, 2002). En aquest procediment, la humitat es determina a partir d'una llesca extreta el més a prop possible del punt de trencament de l'element estructural; el gruix de la llesca ha de ser com a mínim de 20 mm, i la fusta s'ha d'assecar a 103±2°C fins que la diferència de pes entre dues pesades successives en un interval de dues hores sigui inferior al 0,1%. És necessari pesar la proveta immediatament després de l'assaig i immediatament després de treure-la de l'estufa. S'emprà una estufa "J.P. Selecta Digitronic 2005-161" i una balança "GRAM Serie ST" amb precisió de centèsima de gram. La humitat es determina aplicant la següent expressió:

$$H = \frac{P_H - P_O}{P_O} \cdot 100 \quad (18)$$

On:

H = Humitat de la fusta (%)

P_H = Pes a la humitat "H" (kg)

P_O = Pes en estat anhidre (kg)

3.4. Definició dels criteris de classificació visual

Tal com s'ha dit, la fusta de castanyer d'origen espanyol no disposa actualment d'estàndard específic de classificació visual. Per aquest motiu, cal definir els criteris que estableixin quines singularitats són acceptables i quines no són admissibles. La definició dels criteris bàsics està pautada per la norma UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011 (AENOR, 2011c). Alhora, existeixen altres textos de classificació visual de fusta que són obligada referència en aquest estudi:

- UNI 11035-1 (ENIdU, 2010a) i UNI 11035-2 (ENIdU, 2010b): Itàlia. Castanyer, roure, pollancre, vern, faig, robínia, freixe, om, i altres coníferes.
- UNE-EN 56546:2011 (AENOR, 2011b): Espanya. Frondoses. Actualment només contempla l'eucaliptus.
- NF B52-001 (AFNOR, 2007): França. Coníferes i frondoses. La única frondosa que considera és el pollancre.
- DIN 4074-5:2008-12 (DIN, 2008a): Alemanya. Frondoses. Pollancre, faig, plàtan fals, freixe de fulla gran, freixe americà, roure de fulla gran, i roure pèrol.

També s'han consultat altres estàndards de classificació visual de fusta de conífera que s'han considerat rellevants:

- UNE-EN 56544:2011 (AENOR, 2011a): Espanya. Coníferes. Actualment *Pinus*.
- DIN 4074-1:2008-12 (DIN, 2008a): Alemanya. Coníferes.

3.5. Càlcul dels valors característics i la classe resistent

Un cop duts a terme els assaigs i calculades les propietats físiques i mecàniques de cada una de les provetes, cal extrapolar els resultats individuals a tota la població a què pertanyen les mostres. Per fer-ho cal obtenir els valors característics de resistència (MOR), elasticitat (MOE), i densitat. L'obtenció d'aquests valors és un procés en el qual s'apliquen nombrosos factors de correcció: representativitat estadística, ajust respecte a les condicions de referència d'humitat i geometria, i seguretat estructural. Aquest procediment es duu a terme segons les especificacions de la norma UNE-EN 384:2010 "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad." (AENOR, 2010b).

3.5.1. Resistència a flexió característica

Per calcular la resistència a flexió d'una mostra no cal corregir els valors individuals dels elements estructurals en funció del contingut d'humitat. La geometria d'assaig de referència correspon a un cantell de 150 mm i una distància entre suports igual a divuit cops el cantell. Si això no es compleix és necessari corregir el cinquè percentil de cada mostra:

$$f_{05} = \frac{p_{05}}{k_h \cdot k_l} \quad (19)$$

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \quad (20)$$

$$k_l = \left(\frac{48h}{l_{et}}\right)^{0,2} = \left(\frac{48h}{l + 5a_f}\right)^{0,2} \quad (21)$$

On:

a_f = Distància entre els dos punts de càrrega més interns (mm)

f_{05} = Cinquè percentil corregit de la mostra (N/mm²)

h = Cantell de la proveta (mm)

k_h = Factor de correcció de p_{05} si h és diferent de 150 mm (adimensional)

k_l = Factor de correcció de p_{05} si la llum és diferent de 18h (adimensional)

l = llum (mm)

l_{et} = llum efectiva del procediment d'assaig (mm)

p_{05} = Cinquè percentil de la mostra (N/mm²)

Un cop calculat f_{05} per a una mostra, el següent pas és obtenir la mitjana ponderada per a totes les mostres:

$$\bar{f}_{05} = \frac{\sum f_{05j}}{m} \quad (22)$$

On:

\bar{f}_{05} = Mitjana dels valors corregits al 5^e percentil per a cada mostra (N/mm²)

f_{05j} = Cinquè percentil corregit de la mostra "j" (N/mm²)

m = Nombre de mostres (ut)

Llavors, la resistència característica de la població es calcula mitjançant l'equació:

$$f_k = \bar{f}_{05} \cdot k_S \cdot k_V \quad (23)$$

On:

f_k = Valor característic de la població (N/mm²)

k_S = Factor de correcció segons el nombre i grandària de les mostres (adimensional)

k_V = Factor de correcció segons el mètode de classificació emprat (adimensional)

k_V és un factor que té en compte la variabilitat entre mostres que generen els mètodes de classificació. k_V és igual a 1,0 per a totes les classificacions visuals i les classificacions mecàniques on la resistència característica de la mostra és superior a 30 N/mm². k_V és igual a 1,12 si la resistència característica de la mostra classificada mecànicament és menor o igual a 30 N/mm². En el nostre cas k_V sempre ha estat igual a 1,0.

En canvi, k_S és un factor de correcció en funció del nombre i grandària de les mostres. A la Figura 148 s'observa que els lots de bigues d'una mateixa secció han de tenir com a mínim quaranta provetes, contràriament un conjunt de provetes no pot constituir un lot. Cada lot pot tenir una secció diferent, i el rang de dimensions acotará les mesures al qual seran aplicables les regles de classificació. A partir de cinc mostres no es millora estadísticament l'estudi de la població.

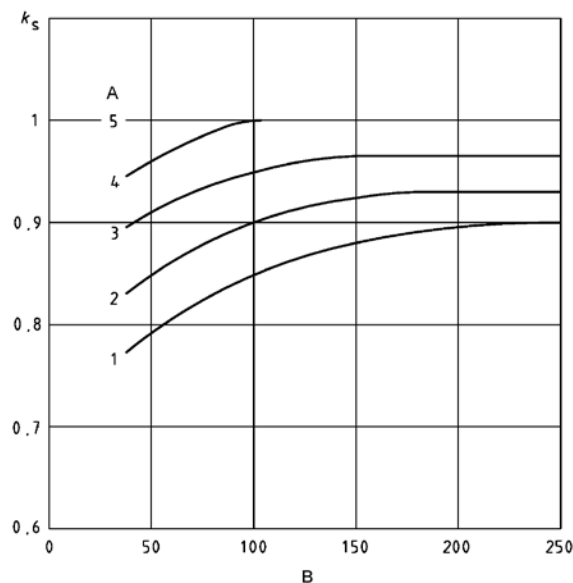


Figura 148. Influència del nombre i grandària dels lots sobre el coeficient k_S (AENOR, 2010b).

A: Número de mostres. B: Número de provetes per lot

3.5.2. Mòdul d'elasticitat característic

Abans de començar amb el càlcul del mòdul d'elasticitat característic, cal corregir el mòdul elàstic individual de les provetes si no han estat assajades a una humitat del 12%. Si aquesta està compresa entre el 8% i el 18%, cal aplicar una correcció del 1% per cada 1% de desviació en el contingut d'humitat. Si la humitat resulta superior al 18% es calcularà com si fos del 18%. En acabat, cal aplicar una segona correcció matemàtica per obtenir el mòdul d'elasticitat pur i lliurar-lo de la deformació a tallant inherent a l'assaig a flexió:

$$\bar{E} = 1,3 \cdot \frac{\sum E_i}{n} - 2690 \quad (24)$$

On:

\bar{E} = Valor mitjà del mòdul d'elasticitat de la mostra (N/mm²)

E_i = Valor del mòdul d'elasticitat de la proveta "i", des de 1 fins a n (N/mm²)

n = nombre de provetes d'una mostra (ut)

Addicionalment, en cas que a la caracterització hi hagi més d'una mostra, cal ponderar els seus valors en funció del nombre de provetes de cada mostra. L'expressió és la següent:

$$E_{0,mitja} = \frac{\sum \bar{E}_j n_j}{\sum n_j} \quad (25)$$

On:

$E_{0,mitja}$ = Valor característic del mòdul d'elasticitat de la població (N/mm²)

\bar{E}_j = Valor mitjà del mòdul d'elasticitat de la mostra "j" (N/mm²)

n = Nombre de provetes de la mostra "j" (ut)

3.5.3. Densitat característica

La densitat de cada proveta s'ha de corregir en funció de la seva humitat. En cas que el contingut d'humitat sigui més gran del 12%, la densitat s'ha de disminuir un 0,5% per cada variació del 1% d'humitat. En cas contrari la densitat s'incrementarà

en la mateixa proporció. A continuació, el càlcul del valor característic de la densitat es realitza ponderant el cinquè percentil de cada una de les mostres analitzades en funció del nombre de provetes de cada una de les mostres:

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} n_j}{\sum n_j} \quad (26)$$

On:

ρ_k = Densitat característica de totes les mostres (kg/m^3)

$\rho_{05,j}$ = Cinquè percentil de la densitat per a la mostra j (kg/m^3)

n_j = Nombre de provetes per a la mostra j (ut)

3.5.4. Assignació de la classe resistent

Per assignar una classe resistent a la població estudiada cal contrastar els valors característics de resistència, rigidesa, i densitat de la població caracteritzada amb la "Tabla 1. Clases resistentes. Valores característicos." de la norma UNE-EN 338:2010 "Madera estructural. Clases resistentes." (AENOR, 2010a). En aquesta norma s'indica que

"una població de fusta es pot assignar a una classe resistent si els valors característics de la resistència a la flexió i densitat són iguals o més grans que els valors establerts a la Taula 1 per a dita classe resistent, i si el valor característic del mòdul d'elasticitat és més gran o igual que el 95% del valor indicat a la Taula 1 per a dita classe resistent" (AENOR, 2010: 9).

Per tant, la propietat característica més limitant condicionarà la classe resistent de la població.

3.5.5. Càlcul d'altres propietats mecàniques

Un cop assignada la classe resistent a partir dels tres valors característics, la resta de propietats físiques i mecàniques es poden determinar a partir dels valors tabulats a les classes resistentes de la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a), o deduir aplicant les expressions matemàtiques de la norma UNE-EN 384:2010 (AENOR, 2010b):

$$f_{t,0,k} = 0,6 \cdot f_{m,k} \quad (27)$$

$$f_{c,0,k} = 5 \cdot (f_{m,k})^{0,45} \quad (28)$$

$$f_{v,k} \Rightarrow \text{Taula 1 de la Norma UNE-EN 338:2010} \quad (29)$$

$$f_{t,90,k} = 0,6 \quad (30)$$

$$f_{c,90,k} = 0,015 \cdot \rho_k \quad (31)$$

$$E_{0,05} = 0,84 \cdot E_{0,\text{mitjà}} \quad (32)$$

$$E_{90,\text{mitjà}} = E_{0,\text{mitjà}} / 15 \quad (33)$$

$$G_{\text{mitjà}} = E_{0,\text{mitjà}} / 16 \quad (34)$$

$$G_{\text{mitjà}} = E_{0,\text{mitjà}} / 16 \quad (35)$$

$$\rho_{\text{mitjana}} = 1,2 \cdot \rho_k \quad (36)$$

On:

$E_{0,05}$ = Valor característic del percentil 5 del mòdul d'elasticitat paral·lel a la fibra (N/mm²)

$E_{0,\text{mitjà}}$ = Valor característic mitjà del mòdul d'elasticitat paral·lel a la fibra (N/mm²)

$E_{90,\text{mitjà}}$ = Valor característic mitjà del mòdul d'elasticitat perpendicular a la fibra (N/mm²)

$f_{c,0,k}$ = Valor característic de la resistència a la compressió paral·lela a la fibra (N/mm²)

$f_{c,90,k}$ = Valor característic de la resistència a la compressió perpendicular a la fibra (N/mm²)

$f_{m,k}$ = Valor característic de la resistència a flexió (N/mm²)

$f_{t,0,k}$ = Valor característic de la resistència a tracció paral·lela a la fibra (N/mm²)

$f_{t,90,k}$ = Valor característic de la resistència a tracció perpendicular a la fibra (N/mm²)

$f_{v,k}$ = Valor característic de la resistència a esforç tallant (N/mm²)

$G_{\text{mitjà}}$ = Valor característic mitjà del mòdul d'elasticitat transversal (N/mm²)

ρ_k = Densitat característica. Cinquè percentil (kg/m³)

ρ_{mitjana} = Densitat mitjana (kg/m³)

4. Resultats

A continuació es presenten els resultats ordenats segons el procediment descrit a la Figura 144. Per tant, en primer lloc s'exposen els criteris de classificació visual aplicats, en segon els procediments de càlcul del MOR, MOE, la densitat, i finalment, l'assignació de la classe resistent.

4.1. Classificació visual

4.1.1. Proporció de rebuig

Després de dur a terme el procés iteratiu per ajustar els criteris de selecció visual, i arribar a un compromís equilibrat entre la quantitat de rebuig i l'assoliment d'una classe resistent el més alta possible, la quantitat de bigues no admeses com a estructurals ha estat molt variable en funció de la qualitat dels lots. El lot 120×65 es va seleccionar prèviament al pati d'assecat escollint únicament individus de característiques excepcionals.

Taula 66. Lots d'assaig i quantitat de rebuig

Resultat de la classificació	Lot										
	120×65 (mm)		80×80 (mm)		95×95 (mm)		135×135 (mm)		Total		
	Ut	%	Ut	%	Ut	%	Ut	%	Ut	%	
Quantitat total ¹	40	100	64	100	62	100	75	100	241	100	
Acceptades	40	100	42	65,6	49	79,0	40	53,3	171	71,0	
Rebuig	Nusos ²	0	0,0	15	23,4	0	0,0	3	4,0	18	7,5
	Clivelles ²	0	0,0	1	1,5	9	14,5	16	21,3	26	10,8
	Semes ²	0	0,0	4	6,2	0	0,0	11	14,7	15	6,2
	Total	0	0,0	22	33,5	13	16,4	35	65,6	70	29,0

¹ Bigues classificades i assajades

² Una biga pot contenir més d'una singularitat limitant. Quantitats no acumulables

Els motius pels quals es rebutgen els elements poden ser diversos y concórrer individualment o alhora. Per aquest motiu, quantificar el rebuig que provoca cada singularitat en un lot pot provocar inexactituds en el recompte global. Tenint en compte això, la singularitat que tingué més incidència en el lot de secció 80×80 mm fou la presència de nusos i, en canvi, en el lot de secció 95×95 les clivelles foren el defecte més limitant. En aquest darrer lot, ni els nusos ni les semes tingueren una incidència destacable però aparegué un 3,1% de defectes biològics i

un 3,1% de bigues amb escorça interna. En el lot de secció 135×135 mm es rebutjà un 10,6% del bigam per defectes biològics.

4.1.2. Causa de la ruptura

A continuació es mostren els percentatges de trencament en funció de la tipologia de la ruptura. Només s'han considerat les cent setanta-una provetes que han superat els criteris de qualitat establerts en el punt 4.1.3. Criteris de classificació visual.

Taula 67. Forma de trencament dels elements estructurals no rebutjats

Causa de trencament de les peces acceptades	Lot									
	120×65 (mm)		80×80 (mm)		95×95 (mm)		135×135 (mm)		Total	
	Ut	%	Ut	%	Ut	%	Ut	%	Ut	%
Nusos	30	75,0	30	71,4	21	42,9	26	65,0	107	62,6
Clivelles	4	10,0	0	0,0	4	8,2	0	0,0	8	4,7
Tracció ¹	6	15,0	12	28,6	21	42,9	10	25,0	49	28,7
Altres ²	0	0,0	0	0,0	3	6,1	4	10,0	7	4,1
Total	40	100,0	42	100,0	49	100,0	40	100,0	171	100,0

¹ Cap singularitat visible ha minvat la resistència. Les fibres han arribat al seu límit resistent

² Majoritàriament desviació de la fibra i alguns cullerots

En la classificació visual s'han descartat elements per la presència de tot tipus de singularitats: nusos, clivelles, podridures, galeries de corcs, presència d'escorça entre les fibres, semes o cullerots. S'ha detectat que les clivelles minven a mesura que la secció augmenta, i que els defectes provocats per decaïment o xilòfags guanyen presència a mesura que els elements estructurals guanyen amb secció ja que els arbres són més vells.

4.1.3. Criteris de classificació visual

Tot seguit es presenten els criteris de classificació visual proposats per a la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català (Veure Taula 68).

Taula 68. Especificacions per la classificació visual de peces de secció rectangular de fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Criteri de qualitat	Especificacions de la classe visual	Observacions
Rang dimensional	$65 \leq b \leq 135 \text{ mm}$ $80 \leq h \leq 135 \text{ mm}$ $6400 \leq S \leq 18225 \text{ mm}^2$	b = Gruix de la secció de la biga (mm) h = Cantell de la secció de la biga (mm) S = Secció de la biga (mm^2)
Diàmetre dels nusos sobre la cara (h)	$\emptyset \leq 1/2h$	\emptyset = Diàmetre del nus (mm)
Diàmetre dels nusos sobre el cantell (b)	$\emptyset \leq 2/3b$	\emptyset = Diàmetre del nus (mm)
Amplada dels anells de creixement	Sense limitacions	Creixement dels lots: 4-10 mm
Clivelles	Passants a la testa: $l \leq 2h$ en una testa No passants: $f \leq 1/2 b$ Clivelles per raig, gelada o abatiment no admeses	l = Longitud de la clivella (mm) b = Gruix de la secció de la biga (mm) h = Cantell de la secció de la biga (mm) f = Profunditat de la clivella (mm) Aquest criteri no es considera si es classifica en moll Referides a un 20% de contingut d'humitat No es tenen en compte aquelles clivelles que tinguin una longitud inferior a la menor dimensió de les dues següents: 1/4 de la longitud de la peça i 1 m
Cullerots	$R_{\text{MAX}} > b/3$ $E > b/6$	R_{MAX} = Radi màxim del cullerot considerant la medul·la com el centre de la circumferència E = Excentricitat. Distància entre la medul·la i el centre geomètric del cullerot b = Gruix de la secció de la biga (mm)
Fusta de tracció	Admissible en 1/5 de la secció o en un 1/5 de la superfície externa de la peça	
Desviació de la fibra	1:6 (16,7%)	No es consideren les desviacions locals provocades per nusos
Semes	Longitud $\leq 1/2 L$ Secció $g \leq 1/4 S$	L = Longitud de la biga (mm) g = Dimensió relativa de la secció (mm^2) S = Secció de la biga
Alteracions biològiques	Podridura no admesa S'admet coloració rogenca Galeries d'insectes xilòfags: atacs actius no admesos. S'admeten orificis de fins 2 mm de diàmetre <i>Viscum album</i> no admès	
Deformació màxima admissible	Curvatura de cara: 20 mm en 2m de longitud Curvatura de cantell: 12 en 2m de longitud Cargolament: 2 mm / 25 mm d'amplada Balcament: Sense limitació	Aquest criteri no es considera si es classifica en moll Referides a un 20% de contingut d'humitat Es poden acceptar deformacions majors sempre que no afecti a l'estabilitat de la construcció (perquè es poden corregir durant la fase de muntatge) i existeixi acord explícit entre el subministrador i el client
Altres singularitats	S'accepta la medul·la Cops no admesos Entre escorça no admesa No es contempla cap altre defecte rar	

4.2. Valors característics i classe resistent

4.2.1. Mòdul de resistència

La Taula 69 mostra els paràmetres estadístics corresponents a la resistència a flexió de la fusta de castanyer. Es distingeix entre elements estructurals que han superat la classificació visual (OK) dels considerats rebutjats (NOK), i també s'inclou el valor característic a partir del qual es calcula la classe resistent.

Taula 69. MOR de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Estadístics	Mòdul de resistència (N/mm ²)										
	Lot 120×65		Lot 80×80		Lot 95×95		Lot 135×135		Total		
	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	
Nombre de repeticions	40	0	42	22	49	13	40	35	171	70	
Mínim	35,3	0	25,3	34,8	28,8	32,5	26,2	20,3	25,3	20,3	
Màxim	75,5	0	79,7	79,4	80,3	69,9	63,8	63,1	80,3	79,4	
Amplitud	40,2	0	54,5	44,6	51,4	37,4	37,6	42,8	55,0	59,1	
Percentils	P ₅	36,4	0	36,3	35,3	36,1	32,6	28,8	21,0	33,4	21,5
	P ₂₅	50,0	0	47,2	47,4	46,6	37,0	34,5	31,8	43,4	35,6
	P ₅₀	59,4	0	58,8	54,1	55,6	46,8	43,5	39,0	53,5	46,4
	P ₇₅	63,0	0	69,4	61,1	61,1	63,3	48,6	49,6	62,0	54,1
Desviació típica (n-1)	10,6	0	14,0	11,0	12,5	14,1	9,5	11,5	13,1	13,6	
Mitjana	56,4	0	58,3	54,7	54,7	49,3	43,2	39,5	53,3	46,1	
Valor característic UNE-EN 384:2010	35,0	---	31,9	---	33,0	---	28,2	---	30,2	---	

¹ OK: Bigues de qualitat estructural

² NOK: Bigues rebutjades

4.2.2. Mòdul d'elasticitat

De la mateixa forma que la Taula 69, la Taula 70 mostra el mòdul d'elasticitat de la fusta de castanyer.

Taula 70. MOE de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Estadístics	Mòdul d'elasticitat (N/mm ²)										
	Lot 120×65		Lot 80×80		Lot 95×95		Lot 135×135		Total		
	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	
Nombre de repeticions	40	0	42	22	49	13	40	35	171	70	
Mínim	9457,4	0	6763,8	8491,2	9126,3	8701,2	8533,7	8763,2	6763,8	8491,2	
Màxim	13727,5	0	13972,6	14941,0	14584,4	12078,5	13026,3	12303,7	14584,4	14941,0	
Amplitud	4270,1	0	7208,8	6449,9	5458,1	3377,3	4492,6	3540,5	7820,6	6449,9	
Percentils	P ₅	9618,8	0	9469,0	8869,7	9336,7	9681,5	8664,6	9026,8	9029,6	8910,4
	P ₂₅	10622,6	0	10522,9	9785,6	10318,7	10571,5	9378,2	9432,9	10255,2	9698,3
	P ₅₀	11431,1	0	11339,3	10729,9	11268,8	10864,9	10557,3	10277,6	11142,5	10524,3
	P ₇₅	12136,6	0	12313,8	11583,6	11945,7	11634,0	11234,0	10773,5	11948,3	11339,6
Desviació típica (n-1)	1163,7	0	1404,6	1491,8	1247,4	912,0	1232,5	1001,9	1316,2	1187,6	
Mitjana	11402,9	0	11337,5	10840,3	11278,7	10982,7	10405,4	10293,2	11117,9	10593,2	
Valor característic UNE-EN 384:2010	14578,1	---	14736,1	---	14659,6	---	13524,4	---	14393,8	---	

¹ OK: Bigues de qualitat estructural

² NOK: Bigues rebutjades

4.2.3. Densitat

La Taula 71 recull la densitat calculada pel mètode de la llesca tal com demana la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012b). En aquesta taula es distingeix entre llesques obtingudes de bigues de qualitat estructural i llesques obtingudes d'elements rebutjats per poder calcular el valor característic correctament. En canvi, a la Taula 72 es diferencia entre densitat calculada a partir de la llesca i pesant la biga sencera per, posteriorment, determinar la correlació entre les dues metodologies.

Taula 71. Densitat de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català. Mètode de la llesca

Estadístics	Densitat (kg/m ³)										
	Lot 120×65		Lot 80×80		Lot 95×95		Lot 135×135		Total		
	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	OK ¹	NOK ²	
Nombre de repeticions	40	0	42	22	49	13	40	35	171	70	
Mínim	509,8	0	485,9	463,8	473,7	502,5	549,0	503,9	473,7	463,8	
Màxim	707,2	0	689,2	676,1	608,0	636,9	889,8	791,6	889,8	791,6	
Amplitud	197,4	0	203,3	212,3	134,3	134,4	340,8	287,7	416,0	327,8	
Percentils	P ₅	519,9	0	500,3	478,1	484,5	507,4	565,7	556,5	498,1	482,7
	P ₂₅	552,3	0	522,0	499,2	510,8	519,0	615,5	614,3	534,6	530,9
	P ₅₀	582,7	0	554,5	512,0	535,8	543,8	674,2	675,5	575,2	595,5
	P ₇₅	606,4	0	584,4	564,5	571,9	569,5	729,5	722,6	614,7	675,9
Desviació típica (n-1)	40,9	0	48,0	62,0	39,1	38,6	81,3	72,8	75,9	90,2	
Mitjana	582,4	0	559,5	538,7	541,5	549,8	681,1	669,7	588,1	606,3	
Valor característic UNE-EN 384:2010	519,9	---	504,9	---	486,3	---	556,7	---	515,2	---	

¹ OK: Bigues de qualitat estructural

² NOK: Bigues rebutjades

Taula 72. Densitat de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català. Llesca i biga sencera

Estadístics	Densitat (kg/m ³)										
	Lot 120×65		Lot 80×80		Lot 95×95		Lot 135×135		Total		
	Llesca ¹	Biga ²	Llesca ¹	Biga ²	Llesca ¹	Biga ²	Llesca ¹	Biga ²	Llesca ¹	Biga ²	
Nombre de repeticions	40	40	64	64	62	62	75	75	241	241	
Mínim	515,0	520,6	468,0	499,9	477,1	449,4	503,5	509,9	468,0	449,4	
Màxim	712,6	746,4	692,1	750,3	638,7	635,8	771,0	765,4	771,0	765,4	
Amplitud	197,6	225,8	224,1	250,4	161,6	186,4	267,6	255,5	303,0	316,0	
Percentils	P ₅	524,5	536,2	486,7	514,9	492,0	500,5	555,4	563,6	498,4	517,5
	P ₂₅	557,9	577,7	513,0	549,8	515,0	531,2	598,3	587,4	536,4	559,6
	P ₅₀	587,6	593,5	552,4	589,5	540,1	556,9	645,5	637,0	578,3	587,1
	P ₇₅	611,9	618,2	587,7	628,0	574,1	573,5	682,8	669,9	625,3	632,1
Desviació típica (n-1)	40,9	37,4	53,3	60,7	38,5	32,6	56,8	52,8	63,1	57,3	
Mitjana	587,2	594,5	556,6	593,9	545,3	552,7	640,7	635,0	584,9	596,2	

¹ Llesca: Densitat calculada a partir d'una llesca segons UNE-EN 408:2011+A1:2012

² Biga: Densitat calculada a partir de l'element sencer abans del trencament

4.2.4. Humitat

La humitat dels elements estructurals, calculada a partir d'una llesca de la secció estreta el més a prop possible del punt de trencament, ha estat la següent:

Taula 73. Humitat dels lots de fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Estadístics	Humitat (%)				
	Lot 120×65	Lot 80×80	Lot 95×95	Lot 135×135	Total
Nombre de repeticions	40	64	62	75	241
Mínim	9,9	9,8	10,3	12,2	9,8
Màxim	10,8	11,5	12,4	42,8	42,8
Amplitud	0,9	1,7	2,1	30,6	33,0
Percentils	P ₅	9,9	10,0	10,6	14,4
	P ₂₅	10,1	10,2	11,0	16,9
	P ₅₀	10,4	10,3	11,2	22,4
	P ₇₅	10,5	10,6	11,4	26,2
Desviació típica (n-1)	0,3	0,3	0,4	6,7	6,6
Mitjana	10,3	10,4	11,2	22,5	14,4

4.2.5. Classe resistent i altres propietats mecàniques

A partir dels resultats dels assaigs físico-mecànics, els criteris de qualitat visual proposats, l'aplicació del procediment de càlcul resistent recollit a la norma UNE-EN 384:2010 (AENOR, 2010b), i la definició de les classes resistents de la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a), es proposa per a la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català una classe resistent D24 (Veure Taula 74). A partir d'aquesta assignació, al castanyer li corresponen els valors característics de la Taula 75.

Taula 74. Classe resistent assignada a partir dels valors característics. UNE-EN 338:2010

Propietats característiques	Valors característics de la població estudiada	UNE-EN 338:2010		
		Valor característic immediatament inferior	Classe resistent immediatament inferior	Classe resistent assignada
MOR (N/mm ²)	30,2	30	D30	D24
MOE (kN/mm ²)	14,4	14	D50	
Densitat (kg/m ³)	515,2	485	D24	

Taula 75. Valors característics de la fusta de castanyer

Propietat		Valors característics		
		UNE-EN 338:2010. Valors tabulats per a D24	UNE-EN 384:2010. Valors calculats	
Resistència (N/mm ²)	Flexió característica	f _{m,k}	24	30,2
	Tracció paral·lela a la fibra	f _{t,0,k}	14	18,12
	Tracció perpendicular a la fibra	f _{t,90,k}	0,6	0,60 ¹
	Compressió paral·lela a la fibra	f _{c,0,k}	21	23,17
	Compressió perpendicular a la fibra	f _{c,90,k}	7,8	7,73
	Esforç tallant	f _{v,k}	4	4,0 ²
Mòdul d'elasticitat (kN/mm ²)	Paral·lel a la fibra mitjà	E _{0,mitjà}	10	14,4
	Paral·lel a la fibra 5è percentil	E _{0,05}	8,5	12,1
	Perpendicular a la fibra mitjà	E _{90,mitjà}	0,67	0,96
	Transversal mitjà	G _{mitjà}	0,62	0,90
Densitat (kg/m ³)	Densitat característica 5è percentil	ρ _k	485	515,2
	Densitat mitjana	ρ _{mitjà}	580	618,2 ³

¹ Valor constant

² Valor tabulat segons UNE:EN 338:2010

³ Valor calculat segons UNE:EN 338:2010

5. Discussió

5.1. Qualitat de la mostra i nombre de classes visuals

5.1.1. Qualitat de la mostra

La qualitat d'una mostra de fusta estructural està determinada per les singularitats que presenta, i això es reflexa en la quantitat de rebuig i en el comportament resistent de la fusta acceptada.

La proporció de rebuig i forma de trencament de les peces és molt variable entre lots ja que influeixen de forma significativa diversos factors: l'espècie, la qualitat silvícola de la massa d'on prové la fusta (estat sanitari, diàmetre dels rolls), la tecnologia de processat (serrat i assecat), geometria i secció de les peces, forma i moment d'adquisició de la fusta (a bosc, serradora, o distribuïdor de fusta), els criteris de classificació visual emprats, circuit de comercialització, etc. A més, també caldria especificar si la quantitat de rebuig ha està calculada sobre el lot adquirit, el classificat o sobre el total de rolls aprofitats a bosc. Per tant, es necessita molta informació per comparar amb propietat la quantitat de rebuig generada entre lots de diverses procedències.

En canvi, si que es poden establir comparacions més fiables entre els elements que superen uns criteris de qualitat determinats. En l'estudi de Vega *et al.* (2011) elaborat amb fusta estructural de petita escairada i procedència espanyola, el 44% dels elements van trencar per un nus, el 16% per desviació de la fibra, el 6% per altres singularitats, i el 34% a tracció, és a dir, els elements es van trencar pel col·lapse mecànic de les fibres. En el cas del castanyer del Sistema Mediterrani Català, els nusos també van ser la singularitat més crítica (63%), seguida a molta distància de les clivelles (5%) i la resta de singularitats (5%). El 29% de les provetes van trencar a tracció. Així doncs, la causa dels trencaments són raonablement semblants en els dos casos exceptuant la incidència de la desviació de la fibra. En els lots de Catalunya, aquesta singularitat no hi té tanta incidència perquè els arbres seleccionats en la caracterització tenien molt bon port.

5.1.2. Nombre de classes visuals

Pel que fa a les propietats característiques, ha resultat ser una espècie molt rígida en comparació a la seva resistència i molt resistent en comparació a la seva lleugeresa. Tant és així que la classe resistent potencial de cada un dels tres valors característics és molt dispar: elasticitat (D50), resistència (D30) i densitat (D24). Això fa pensar que el sistema de classes resistents ha estat pensat per a frondoses més pesades que el castanyer i, en conseqüència, la poca densitat de la fusta és contraproduent respecte un altre escenari normatiu que fos més favorable. Així doncs, per més estrictes que siguin els criteris de classificació de singularitats no s'incrementarà la classe resistent ja que la densitat la penalitza. Desafortunadament per al castanyer, la densitat resulta un factor limitant donat que és la propietat sobre la qual no es pot influir en una classificació visual.

En conseqüència, és raonable decantar-se per criteris de classificació d'ampli rang generosos amb l'admissió de defectes per, almenys, minimitzar el rebuig i/o facilitar la classificació. A més, definint una sola classe visual es simplifica la comercialització i s'eviten reticències per part dels compradors sobre les classes visuals d'inferior qualitat. En conseqüència, tal com es va fer a la norma italiana UNI 11035-2:2010 (UNI, 2010b), s'ha optat per proposar una única classe visual.

5.2. Anàlisi dels valors característics i la classe resistent

Méndez Lodos (1996) va fer una primera aproximació a la caracterització resistent de la fusta de castanyer de Galicia amb elements de dimensions 100×50×1900 mm. En aquell moment, la normativa no estava tant desenvolupada com en el present i els assaigs es van basar en la prEN 408:1990 (AENOR, 1990). Les bigues s'assecaren durant un mes en una cambra d'assecat industrial:

“observant-se una certa dispersió en els valors d'humitat resultants” i posteriorment es van “mecanitzar (...) amb una regruixadora de gran bancada, una serra de disc i una regruixadora de precisió amb control numèric” (Méndez Lodos, 1996: 3.15).

La classificació visual es va fer seguint quatre normes ara ja anul·lades: UNE 56520 (AENOR, 1972a), UNE 56521 (AENOR, 1972b), UNE 56522 (AENOR, 1972c) i UNE 56523 (AENOR, 1972d).

Aplicant el mètode de càlcul vigent a les dades del MOR i MOE disponibles als annexos de la tesi de Méndez Lodos (1996), s'obté un MOR característic de 15,65 N/mm² i un MOE característic de 12511,73 N/mm² (Veure Taula 76). Malauradament, les dades de densitat no estan disponibles. Analitzant les dades, s'observa que els valors obtinguts per l'autor són clarament inferiors als de la classificació que ens ocupa, però tot i així, el valor màxim del MOE i el del P₇₅ és pràcticament idèntic per als dos lots. Això sembla indicar que el potencial elàstic de la fusta de castanyer que va analitzar Méndez Lodos (1996) és semblant a la del Sistema Mediterrani Català, però, per contra, els criteris de qualitat visual dels dos experiments foren molt diferents.

Taula 76. MOE de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català

Estadístics		Mòdul de resistència (N/mm ²)		Mòdul d'elasticitat (N/mm ²)	
		Méndez Lodos (1996)	Correal Mòdul	Méndez Lodos (1996)	Correal Mòdul
Observacions		48	171	48	171
Mínim		11,3	25,3	3624,8	6763,8
Màxim		67,7	80,3	14286,0	14584,4
Amplitud		56,4	55,0	10661,2	7820,6
Percentils	P ₅	17,0	33,4	4999,0	9029,6
	P ₂₅	29,4	43,4	7146,2	10255,2
	P ₅₀	41,4	53,5	10326,8	11142,5
	P ₇₅	50,0	62,0	11928,0	11948,3
Desviació típica (n-1)		14,1	13,1	2876,1	1316,2
Mitjana		39,9	53,3	9626,5	11117,9
Valor característic UNE-EN 384:2010		15,6	30,2	12511,7	14393,8

Peraza *et al.* (2004) també citen assaigs a flexió en provetes de mida estructural realitzats amb castanyer peninsular. Aquelles provetes obtingueren un MOR mitjà de 39 N/mm², un MOE mitjà de 10400 N/mm² i un coeficient de variació del 37,5%. Les dades són molt semblants a les de Méndez Lodos (1996) pel que fa a la resistència, però 1000 N/mm² superiors en rigidesa. Tractant-se de valors mitjos, mancants la densitat, i desconeixent la qualitat visual de les bigues, no és possible establir majors comparacions més enllà d'entreveure en aquell lot una qualitat visual inferior a la considerada en l'estudi que ens ocupa. El mateix succeeix amb les dades de l'article de Vázquez de Parga Salleras *et al.* (1997) sobre el MOE del castanyer de Galícia, on no es proporcionen més dades que la rigidesa de l'espècie. En aquest cas el valor mitjà del MOE és 11117 N/mm² i el característic 59886 N/mm². Cal destacar que el valor característic en aquest cas ha estat molt baix.

Existeixen dues referències més sòlides que les citades anteriorment: la norma UNI 11035-2 (ENIdU, 2010b) per a fusta de gruix inferior a 100 mm i l'estudi dut a

terme per Vega *et al.* (2011) realitzat amb fusta de castanyer Asturià de secció 40×100 mm i 40×150 mm. En aquests dos estudis i en les dades que ara s'analitzen, la propietat limitant ha estat la densitat de la fusta i, d'acord amb el criteri de la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a), la fusta ha estat molt rígida respecte la seva resistència (Veure Taula 77). Per tant, aquests són uns resultats molt bons ja que les estructures realitzades amb fusta de castanyer seran lleugeres i alhora deformaran molt poc.

Taula 77. Comparació dels valors característics obtinguts

Propietat característica	Classe resistent D24	Fusta massissa estructural de castanyer		
	UNE-EN 338:2010	UNI 11035-2:2010	Vega <i>et al.</i> , 2011	Correal Mòdol, E.
MOR (N/mm ²)	24	28	26,3	30,2
MOE (kN/mm ²)	10	10,5	12,6	14,4
Densitat (kg/m ³)	485	485	499,9	515,2
Classe resistent ¹	D24	D24	D24	D24

¹En negreta valors que limiten l'assignació d'una classe resistent superior

Malauradament, la redacció de la UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a) penalitza les frondoses lleugeres. El castanyer es queda amb una classe resistent D24 per la seva baixa densitat, tot i tenir una resistència semblant a una D30, i demostrar una rigidesa equiparable a una D50. Aquest perjudici és molt palès a la normativa europea UNE-EN 1912:20012 (AENOR, 2012c) sobre assignació de qualitats visuals i espècies. En ella la màxima classe resistent assignada a una espècie és la D70, però la fusta de castanyer obté la classe resistent D24, essent la més baixa entre els planifolis.

Un cas semblant encara que més accentuat és el del gènere *Populus*. Per posar-hi remei la classe resistent s'assigna com si fos una conífera tot i no ser-ho. El resultat és que classifica entre la C27 i C22. Si al castanyer se'l tractés de la mateixa forma assoliria una C30. No deixa de ser paradoxal que, mentre certes qualitats d'una fusta tant lleugera com la del pollancre assoleix C27 (380 kg/m³), la del castanyer no pot superar la classe D24 per manca de densitat (485 kg/m³).

5.3. Anàlisi de les diferències en les propietats dels lots

La qualitat d'un lot de fusta serrada de secció rectangular per a ús estructural depèn de la quantitat de bigues que compleixen els criteris de classificació i de les seves propietats característiques. Des del punt de vista de la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010b), els quatre lots han resultat suficientment homogenis ja

que la mitjana dels valors corregits del cinquè percentil de la resistència (MOR) de la mostra ha estat inferior a 1,2 vegades el valor corregit del lot menys resistent. Tot i això, des d'un punt de vista estadístic existeixen algunes consideracions a tenir en compte. Totes les mostres analitzades foren normals ($\alpha \leq 0,05$) per a les quatre propietats segons el test de Lilliefors, però no totes foren homoscedàstiques segons el test de Bartlett. Veure taules i gràfics següents:

Taula 78. Humitat dels lots assajats

Lot	Humitat	
	Mitjana	Límit de la mitjana (95%)
80×80 mm	10,42	10,34 - 10,51
95×95 mm	11,23	11,13 - 11,33
120×65 mm	10,33	10,25 - 10,41
135×135 mm	22,53	20,99 - 24,07

Taula 79. Comparació estadística entre lots. MOR

MOR	Normalitat (Lilliefors)	Homoscedasticitat (Bartlett)	Comparació (ANOVA)	Agrupacions (Dunn)
80×80	$\alpha=0,647$	$\alpha=0,08$	$\alpha<0,0001$	B
95×95	$\alpha=0,858$			
120×65	$\alpha=0,140$			
135×135	$\alpha=0,416$			A

Taula 80. Comparació estadística entre lots. MOE

MOE	Normalitat (Lilliefors)	Homoscedasticitat (Bartlett)	Comparació (ANOVA)	Agrupacions (Dunn)
80×80	$\alpha=0,890$	$\alpha=0,674$	$\alpha<0,0001$	B
95×95	$\alpha=0,475$			
120×65	$\alpha=0,535$			
135×135	$\alpha=0,652$			A

Taula 81. Comparació estadística entre lots. Densitat

Densitat	Normalitat (Lilliefors)	Homoscedasticitat (Bartlett)	Comparació (Kruskall-Wallis)	Agrupacions (Dunn)
80×80	$\alpha=0,330$	$\alpha<0,0001$	$\alpha<0,0001$	A ; B
95×95	$\alpha=0,515$			A
120×65	$\alpha=0,508$			B
135×135	$\alpha=0,889$			C

Taula 82. Comparació estadística entre lots. Humitat

Humitat	Normalitat (Lilliefors)	Homoscedasticitat (Bartlett)	Comparació (Kruskall-Wallis)	Agrupacions (Dunn)
80×80	$\alpha=0,382$	$\alpha<0,0001$	$\alpha<0,0001$	A
95×95	$\alpha=0,203$			B
120×65	$\alpha=0,725$			A
135×135	$\alpha=0,628$			C

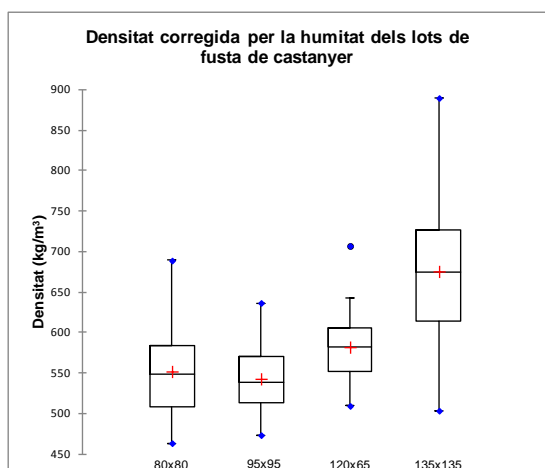


Figura 149. Densitat dels lots estructurals de fusta de castanyer

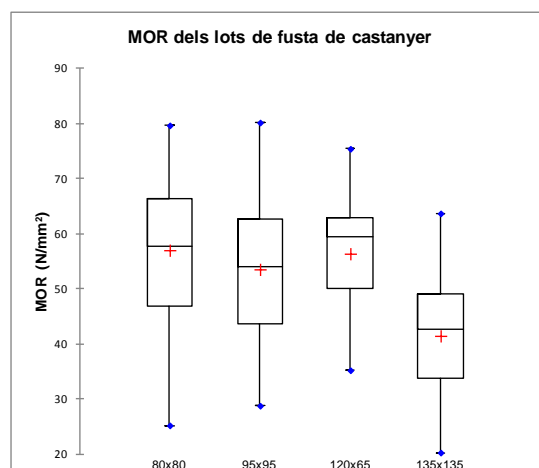


Figura 150. Resistència a flexió dels lots estructurals de fusta de castanyer

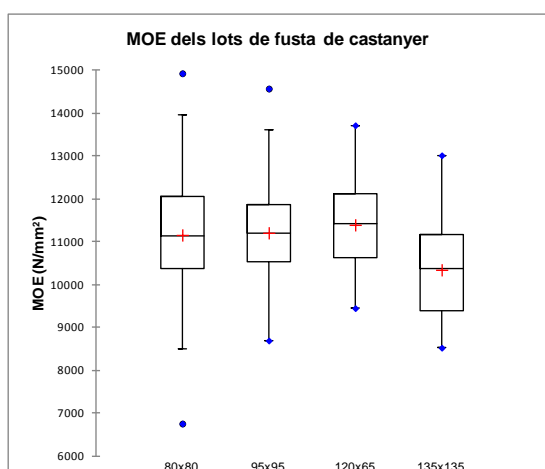


Figura 151. Elasticitat dels lots estructurals de fusta de castanyer

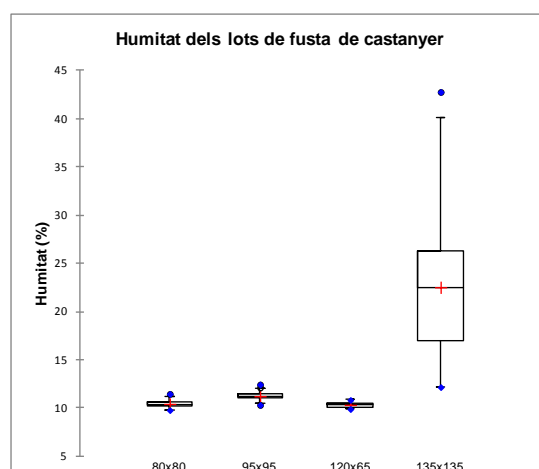


Figura 152. Humitat dels lots en el moment de l'assaig

A la vista dels resultats s'observa que, en el moment de l'assaig, l'alta humitat del lot 135×135 genera una distorsió important en les dades que influeix especialment sobre la densitat. Així doncs, el lot de secció 135×135 mm és sempre significativament diferent a la resta: és significativament menys resistent, menys rígid, més dens i humit. Cal tenir en compte que els peus de Can Planes (135×135 mm) eren més vells, el creixement mitjà era el més petit, tenien el diàmetre més gran, i en provetes de gran escairada les classes resistents assignades tendeixen a menors que les de les fustes de petita secció (AENOR, 2012c).

També s'aprecia que el gruix de les peces allarga l'assecat ja que les humitats són significativament més altes quan més ampla és la peça. S'observa que, després d'un assecat a l'aire perllongat al voltant de dos anys, les bigues de secció més petita arribaren a l'equilibri higroscòpic amb l'ambient (10-11%). En canvi, les provetes de secció 135×135 mm s'assecaren fins una humitat mitjana al voltant del 22% presentant una variabilitat molt acusada en el contingut d'aigua. Aquest fet

demostra la lentitud i irregularitat en l'assecat de la fusta de castanyer essent un inconvenient a tenir en compte en grans seccions (Veure Figura 152).

5.4. Correlació entre la densitat de la llesca i la de la biga

La hipòtesi de normalitat no es compleix per al conjunt de dades corresponent a la densitat calculada amb el mètode de la llesca ($p=0,005$), ni per a la densitat calculada a partir de la biga sencera ($p<0,001$). En canvi, els dos grups de dades presenten la mateixa variància segons el test de Bartlett ($p=0,139$) tot i que el rang de resultats és més gran en la densitat calculada a partir de la llesca. Per altra banda, el p-valor del test no paramètric de Mann-Whitney és 0,026, si es considera un nivell de significació $\alpha=0,01$, les diferències no són significatives. De fet, la diferència entre mitjanes és tant sols del 1,9% (Veure Figura 153).

La correlació entre els dos mètodes emprats per calcular la densitat fou del 75% (Veure Figura 154). Per tant, pesar tota la biga pot ser una alternativa adequada si es necessita analitzar la densitat d'un lot de fusta del qual no es pot extreure una llesca. Aquest seria el cas de la classificació visual o de lots de fusta aprofitada de construccions antigues o rehabilitacions. Es pot afirmar que la metodologia serà més fiable com més regular sigui l'assecat i menys importants i abundants siguin els defectes del bigam.

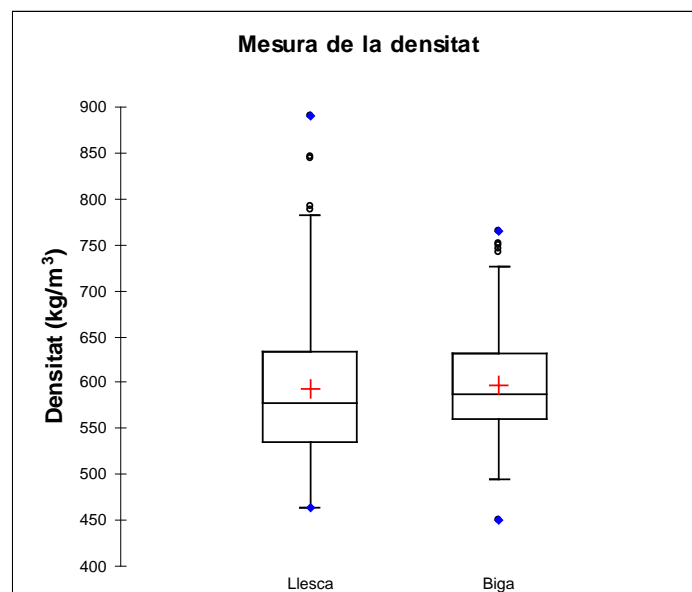


Figura 153. Comparació metodològica de la mesura de la densitat

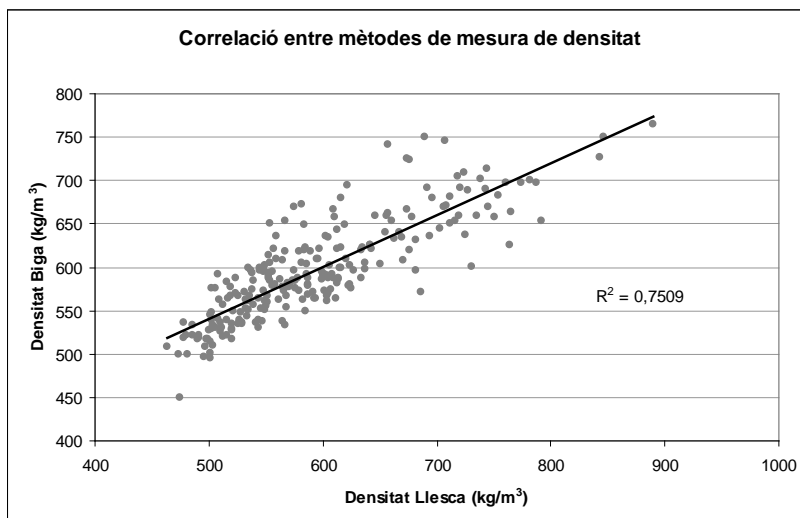


Figura 154. Correlació entre les metodologies de mesura de densitat

5.5. Correlació entre MOR, MOE i densitat

La correlació entre el MOR, el MOE i la densitat es va analitzar mitjançant un anàlisi de components principals. En aquest cas, la tècnica generarà tres factors i tots ells s'inclogueren en l'anàlisi ja que F3 encara conté el 14,1% de la variabilitat (Veure Taula 83 i Figura 155).

Taula 83. Valors propis (Eigenvalues)

Estadístics	Factors		
	F1	F2	F3
Valor propis	1,59	0,99	0,42
Variabilitat (%)	52,89	33,00	14,10
Variabilitat acumulada (%)	52,89	85,89	100,00

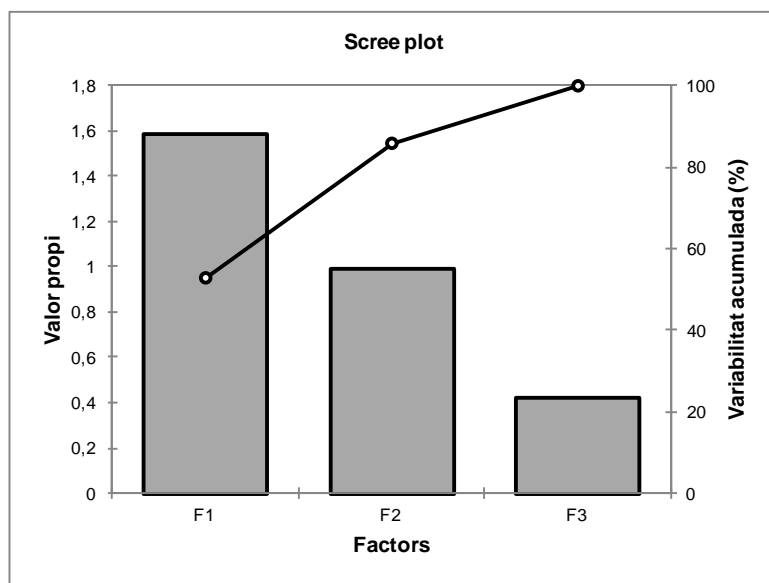


Figura 155. Scree plot. Variabilitat recollida pels factors

F1 és el factor que conté més informació sobre el MOR i el MOE, mentre que F2 representa la densitat. F3 quasi no aporta informació sobre la densitat i tant en F1 com en F3 la variabilitat es reparteix a parts iguals entre el MOE i el MOR (Taula 84, Taula 85). Tot i això, la càrrega factorial dels vectors F3 es contrària en el MOR respecte el MOE (Taula 86, Taula 87). La Figura 156 mostra gràficament la correlació entre variables i factors.

Taula 84. Cosinus quadrats de les variables

Variables	Factors		
	F1	F2	F3
MOR	0,786	0,001	0,213
MOE	0,75	0,047	0,203
Densitat	0,052	0,941	0,007

*En negreta els valors de cada variable on el cosinus quadrat és el més gran

Taula 85. Variabilitat continguda a cada factor

Variables	Factors		
	F1	F2	F3
MOR	49,49%	0,09%	50,35%
MOE	47,23%	4,65%	47,99%
Densitat	3,27%	93,06%	1,65%

*En negreta els valors de cada variable on el cosinus quadrat és el més gran

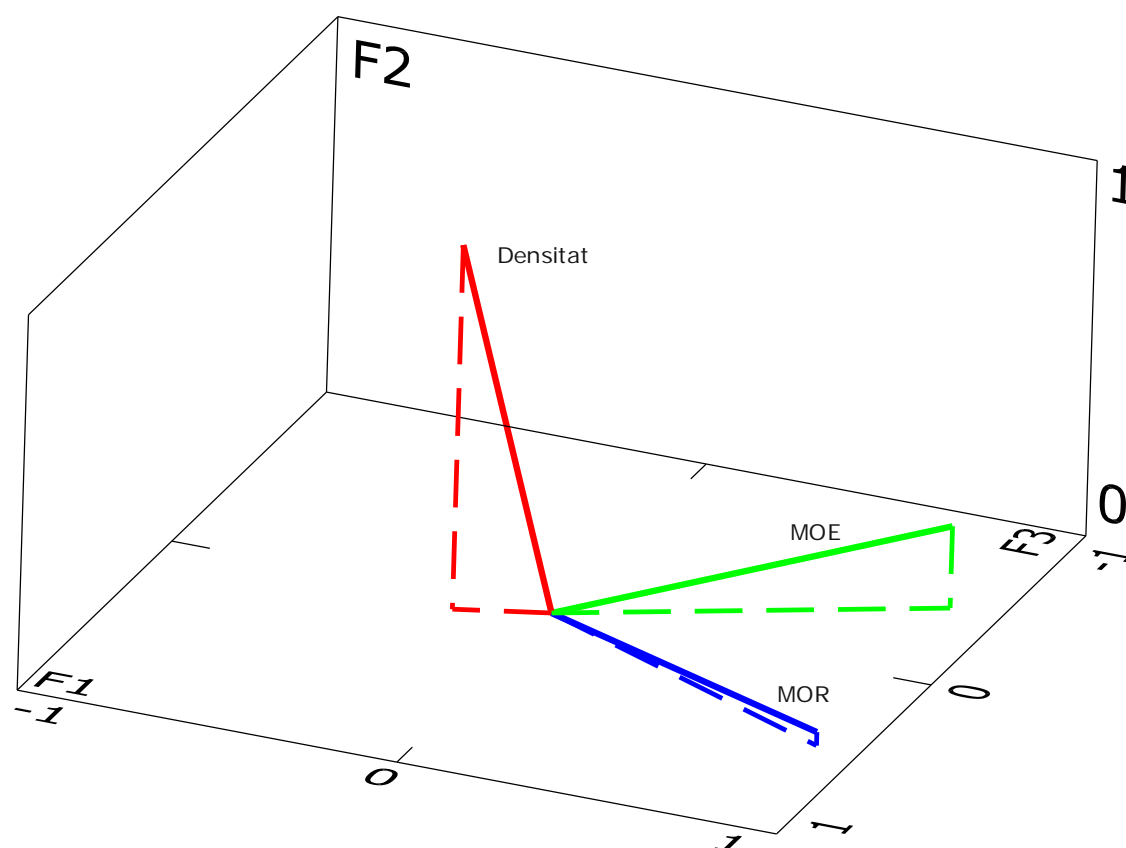
Taula 86. Vectors propis (Eigenvectors)

Variables	Factors		
	F1	F2	F3
MOR	0,704	0,036	0,710
MOE	0,687	0,219	-0,693
Densitat	-0,180	0,975	0,129

Taula 87. Càrrega factorial dels vectors

Variables	Factors		
	F1	F2	F3
MOR	0,886	0,036	0,462
MOE	0,866	0,218	-0,451
Densitat	-0,227	0,970	0,084

*Coordenades de la Figura 156


Figura 156. Gràfic de vectors propis. Correlació entre variables i factors

Els resultats mostren que la correlació entre la densitat i els mòduls de resistència i elasticitat és pràcticament nul·la. Per tant, la densitat d'un element estructural de castanyer no és un bon predictor de la resistència o la rigidesa. També s'observa que la correlació entre el MOR i el MOE és mitjana i positiva, per tant, la resistència augmenta amb la rigidesa i viceversa (Taula 88, Taula 89).

Taula 88. Angle entre vectors

Variables	Factors		
	F1	F2	F3
MOR	---	---	---
MOE	55°	---	---
Densitat	97°	91°	---

Taula 89. Cosinus de l'angle entre vectors

Variables	Factors		
	F1	F2	F3
MOR	---	---	---
MOE	0,573	---	---
Densitat	-0,122	-0,017	---

*Correlació entre propietats

6. Conclusions

La fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català és apta per a ús estructural i presenta les següents característiques:

- Les singularitats que redueixen més significativament la resistència de la fusta estructural de castanyer són els nusos i les clivelles d'assecat.
- En base a la tipologia i abundància de les singularitats, s'ha definit **una sola qualitat visual** per a la fusta estructural.
- Aplicant els criteris de classificació proposats, **la quantitat de rebuig és molt variable entre lots**. De mitjana es rebutja quasi un de cada tres elements.
- A partir dels criteris de classificació visual adoptats, el valor característic resultant per al **MOR és 30,2 N/mm²**, per al **MOE és 14393,8 N/mm²**, i per a la **densitat és 515,2 kg/m³**.
- En base als valors característics calculats i al sistema de classes resistents, a la fusta de castanyer apta per a ús estructural se li assigna una **classe resistent D24**.
- Per tant, en relació a la seva resistència, la fusta de castanyer és molt rígida i relativament lleugera. El sistema de classes resistents vigent limita l'assignació d'una classe resistent superior.
- L'assecat de la fusta de castanyer és delicat, lent i irregular, especialment en grans seccions. Aquesta característica la deixa en desavantatge respecte altres fustes d'utilització estructural.
- Existeix una correlació del 75% entre la densitat de la biga completa i la densitat de la llesca de secció completa extreta el més a prop possible del punt on ha esdevingut el trencament a flexió.
- La correlació entre la densitat i els mòduls de resistència i elasticitat (MOR i MOE) de la fusta assajada és quasi inexistent.

7. Bibliografia

ADELL ALMAZÁN, F.J.; HERMOSO PRIETO, E.; ARRIAGA MARTITEGUI, F.; RICHTER, C. (2008). "Comparison of the Spanish visual strength grading standard for structural sawn timber (UNE 56544) with the German one (DIN 4074) for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from Germany", *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 66, p. 253-258.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1972a). *Defectos y anomalías de la madera aserrada. Fendas y acebolladuras*. UNE 56520:1972. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1972b). *Defectos y anomalías de la madera aserrada. Nudos*. UNE 56521:1972. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1972c). *Defectos y anomalías de la madera aserrada. Gema*. UNE 56522:1972. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1972d). *Medida de la desviación de las fibras en la madera aserrada*. UNE 56523:1972. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1990). *Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Madera estructural y madera laminada encolada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. prEN 408:1990. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997a). *Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las dimensiones. Parte 1: Madera aserrada*. UNE-EN 1309-1:1997. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997b). *Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades*. UNE-EN 1310:1997. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997c). *Madera aserrada y madera en rollo. Terminología. Parte 4: Términos relativos al contenido en humedad.* UNE-EN 844-4. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1998). *Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las alteraciones biológicas.* UNE-EN 1311:1998. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002). *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.* UNE-EN 13183-1:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2006). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. UNE-EN 1995-1-1:2006. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2009). *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 4: Machine grading. Grading machine settings for machine controlled systems.* EN 14081-4:2009. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2010a). *Madera estructural. Clases resistentes.* UNE-EN 338:2010. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2010b). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.* UNE-EN 384:2010. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2010c). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. UNE-EN 1995-1-1:2006/A1:2010. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2011a). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.* UNE-EN 56544:2011. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2011b). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas*. UNE-EN 56546:2011. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2011c). *Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: requisitos generales*. UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2012a). *Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 3: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para el control de producción en fábrica*. UNE-EN 14081-3:2012. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2012b). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. UNE-EN 408:2011+A1:2012. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2012c). *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de clases visuales y especies*. UNE-EN 1912:2012. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2013). *Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: clasificación mecánica*. UNE-EN 14081-2:2010+A1:2013. Madrid: AENOR.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (2007). *Règles d'utilisation du bois dans la construction. Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus*. NF B52-001:2007. La Plaine Saint-Denis: AFNOR.

CALDERONI, C.; DE MATTEIS, G.; GIUBILEO, C.; MAZZOLANI, F.M. (2006). "Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation", *Engineering structures*, vol. 28, núm. 5, p. 729-744.

CARBALLO, J.; HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, I. (2009). "Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*)". *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 18, núm. 2, 152-158.

CONDE GARCÍA, M. (2003). Caracterización de la madera estructural de *Pinus nigra* Subsp. *salzmannii*. FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I. (dir.). Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Departamento de Ingeniería Forestal.

CORREAL MÒDOL, E.; VILCHES CASALS, M. (2012). "Properties of clear wood and structural timber of *Pinus halepensis* from north-eastern Spain". A: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING. Challenges and Solutions. Auckland, New Zealand 15-19 de juliol, 2012. Wellington: Timber Design Society Incorporated.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2008a). *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1: Nadelschnittholz*. DIN 4074-1:2008. Berlin: DIN.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2008b). *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 5: Laubschnittholz*. DIN 4074-5:2008. Berlin: DIN.

DÍEZ, M.R.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I. (1997). "Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L.". *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, vol. 7, núm:1-2: p. 41-51.

DÍEZ, R.; CONDE, M.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; ROSSKOPF, S. (2000). "Clasificación visual de madera estructural de pino laricio (*Pinus nigra* Arn.): comparación de resultados usando las normas UNE 56.544 y DIN 4074", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 9, núm. 2, p. 375-380.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE (2010a). *Legno strutturale. Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica. Parte 1: Terminologia e misurazione delle caratteristiche*. UNI 11035-1:2010. Milano-Roma: UNI.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE (2010b). *Legno strutturale. Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica. Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale*. UNI 11035-2:2010. Milano-Roma: UNI.

ESTEBAN HERRERO, M. (2003). Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera. ARRIAGA MARTIGEGUI, F. (dir.). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. I.; DÍEZ, R.; HERMOSO, E.; BASO, C.; CASAS, J. M.; GONZÁLEZ, O. (2007). "Caracterización de la madera de *Eucalyptus globulus* para uso estructural", *Boletín del CIDEU*, núm. 4, p. 91-100.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; DÍEZ, M.R.; BAONZA, M.V.; GUTIÉRREZ, A.; HERMOSO, E.; CONDE, M.; VAN DEN EYNDE, V. (2001). "Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (*Pinus nigra* Arn. *Salzmannii*)", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 10, núm. 2, p. 311-331.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; DÍEZ, M.R.; GUTIÉRREZ, A. (1997). "Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico mediante probetas de tamaño estructural", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 6, núm. 1 y 2, p. 183-214.

HERMOSO, E. (2001). Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I. (dir.). Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Departamento de Industrias Forestales.

HERMOSO, E.; CARBALLO, J.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. (2007). "Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del País Vasco (España) acorde a las modificaciones normativas", *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 9, núm.3, p. 223-232.

HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; DÍEZ, M.R. (2002a). "Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 11, núm. 2, p. 425-440.

HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; DÍEZ, M.R. (2002b). "Análisis del factor de altura k_h en la madera aserrada estructural de pino silvestre", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 11, núm. 2, p. 441-448.

ÍÑIGUEZ GONZÁLEZ, G. (2007). "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural". ARRIAGA MARTITEGUI, F. [Tutor]. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Departamento de Construcción y Vías Rurales.

MÉNDEZ LODOS, M. (1996). *Análisis de las propiedades físico-mecánicas de la madera de castaño (Castanea sativa), aserrada en la provincia de Lugo*. P. Merino Gómez (dir); PORTO ARCEO, E. (dir). Vigo: Servicio de publicaciones. Tesis doctoral. Universidad de Vigo. ISBN 8481580414.

MONTÓN LECUMBERRI, J. (2012). Clasificación estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural. ARRIAGA MARTITEGUI, F. (dir). AVELLANEDA I DIAZ-GRANDE, J. (dir). Tesis Doctoral. Barcelona: Universitat Politècnica de Barcelona. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona.

VÁZQUEZ DE PARGA SALLERAS, A. ; MÉNDEZ LODOS, M.; GONZÁLEZ VÁZQUEZ, X. P.; CARREIRA PÉREZ, Z.C. (1997) "Caracterización y estudio del modulo de elasticidad en la madera de castaño (*Castanea sativa*) aserrada en Galicia". A: I CONGRESO FORESTAL HISPANOLUSO. II CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL. IRATI 97. Montes del futuro: Respuestas ante un mundo en cambio. Pamplona, 23-27 de juny, 1997. Pamplona: Gobierno de Navarra, Tomo VI, mesa 7, p. 351-356.

VEGA CUETO, A.; BAÑO GÓMEZ, V.; MAJADA GUIJO, J.; FERNÁNDEZ PARRADO, I; GUAITA FERNÁNDEZ, M. (2011). "Caracterización de la madera de *Castanea sativa* Mill. De procedencia española". A: CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO. Libro de resúmenes del 1^{er} congreso Ibero-LatinoAmericano de la madera en la construcción. Sesión 28: Propiedades de la madera y derivados. Coimbra, Portugal 7-9 de juny, 2011. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da FCTUC. p. 317-318. ISBN: 978-898-96461-2-4.

Annexos

Annex fotogràfic



Figura 157. Dos-cents castanyers procedents del Montseny



Figura 158. Bigues de castanyer identificades assecant-se al pati de la serradora



Figura 159. Classificació visual de fusta massissa estructural de secció rectangular



Figura 160. Pòrtic d'assaig a flexió



Figura 161. Pòrtic d'assaig, premsa multiassaig. Fusta de castanyer en primer terme



Figura 162. Biga de fusta massissa de castanyer



Figura 163. Biga trencada a flexió estàtica.
Detall del flexòmetre per determinar la fletxa



Figura 164. Biga trencada per un nus



Figura 165. Biga de castanyer trencada per
un cullerot



Figura 166. Especejament de la biga i obtenció
de la llesca després de l'assaig a flexió



Figura 167. Llesques de fusta de castanyer



Figura 168. Restes de les bigues de castanyer
després de l'assaig a flexió i extreure'n la llesca

CAPÍTOL V

FUSTA LAMINADA ENCOLADA

Índex

1. Introducció	279
1.1. Fusta	280
1.1.1. Espècie fustera	280
1.1.2. Característiques de les làmines	281
1.1.3. Unions dentades: geometria i especificacions.....	282
1.2. Adhesius	284
1.2.1. Tipus d'adhesius segons la seva formulació	284
1.2.2. Tipus d'adhesiu segons les condicions climàtiques	288
1.2.3. Principals factors que condicionen l'encolat	289
2. Objectius	295
3. Materials i mètodes	297
3.1. Requisits normatius de la fusta laminada encolada	297
3.2. Descripció dels prototips assajats.....	299
3.2.1. Làmines de fusta.....	300
3.2.2. Prototips de fusta laminada encolada.....	301
3.3. Assaigs de caracterització	301
3.3.1. Resistència a flexió estàtica de les unions dentades.....	302
3.3.2. Resistència a flexió estàtica de les bigues prototip.....	303
3.3.3. Resistència a esforç tallant de la línia de cola.....	303
3.3.4. Resistència a la delaminació de les línies d'adhesiu.....	305
4. Resultats	307
4.1. Resistència a flexió estàtica de les unions dentades.....	307
4.2. Resistència a flexió estàtica de les bigues prototip.....	308
4.3. Resistència a esforç tallant de la línia de cola.....	308
4.4. Resistència a la delaminació de les línies de cola.....	309
5. Discussió	311
5.1. Consideracions sobre els prototips analitzats	311
5.1.1. Resistència a flexió estàtica de les unions dentades.....	311
5.1.2. Resistència a flexió estàtica de les bigues prototip.....	312
5.1.3. Resistència a esforç tallant de la línia de cola.....	313
5.1.4. Resistència a la delaminació de les línies de cola	315
6. Conclusions.....	317
7. Bibliografia.....	319
Annexos	327
Annex de fitxes tècniques.....	329
Cola de Melamina Urea Formaldehid	331

Cola de poliuretà	335
Annex fotogràfic	337

1. Introducció

La fusta laminada encolada és un material estructural compost, format per làmines de fusta massissa amb les fibres disposades longitudinalment i unides amb adhesiu, capaç de superar les limitacions dimensionals i resistents de la fusta serrada. L'inventor d'aquest material, Karl Friedrich Otto Hetzer, evolucionà les estructures existents fins aleshores de làmines de fusta armades amb ferramentes i patentà el 1890 un nou material constructiu per utilitzar-lo en l'aixecament del Reichstag de Berlín. Otto feu servir coles de caseïna per muntar bigues de deu metres de llum (García Esteban *et al.*, 2002; Rhude, 1996; Somoza Veiga, 1986). Durant la segona guerra mundial es va millorar la resistència i durabilitat dels adhesius (p.e. resorcina) i la fusta laminada encolada es va emprar en camps com l'aviació. Tant és així, que el *Spruce Goose*, un dels avions més grans mai fabricats, es va construir amb fusta laminada encolada. Més tard es va emprar en edificació, ponts, automoció, i construcció naval (Rowell, 2005).

Amb el pas de les dècades, la tecnologia dels adhesius ha evolucionat enormement i, malgrat que els principis bàsics de fabricació del material segueixen sent els mateixos, les possibilitats i les exigències sobre el material s'han incrementat en la mateixa mesura. Actualment, les especificacions de la fusta laminada encolada a Espanya queden definides per la norma d'origen europeu UNE-EN 14080:2006 "Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Requisitos." (AENOR, 2006a), a més d'altres normes indispensables per a la seva aplicació (Veure 3.1.). Ara bé, la previsió és que tots aquests textos es refonguin en el projecte de norma prEN 14080 que està elaborant el Comitè Europeu de Normalització CEN/TC 124 sota la secretaria d'AFNOR.

La fusta laminada encolada millora les prestacions de la fusta massissa en eliminar les singularitats més crítiques (nusos, clivelles, gemmes, deformacions, ...) aconseguint un producte més homogeni, resistent i també estèticament millorat. Per aconseguir-ho, primer es saneja la fusta per després reconstruir-la amb adhesius tenint cura que les unions entre peces siguin més fortes que el propi material de partida. En cas contrari, incorporariem tants punts febles com unions encolades existissin en l'element estructural. Per tant, un cop definits els criteris de qualitat per eliminar les singularitats no acceptables, la qualitat del material es determina controlant la resistència de l'adhesiu (Figura 169). Així doncs, aquest és un material amb un comportament i propietats específiques i, per aquest motiu, té

un sistema de classes resistents propi. La norma UNE-EN 1194:1999 (AENOR, 1999) les anomena GL acompanyant-ho amb "h" si totes les làmines d'un element són de qualitat homogènia i d'una "c" si es combinen làmines de diferent resistència.

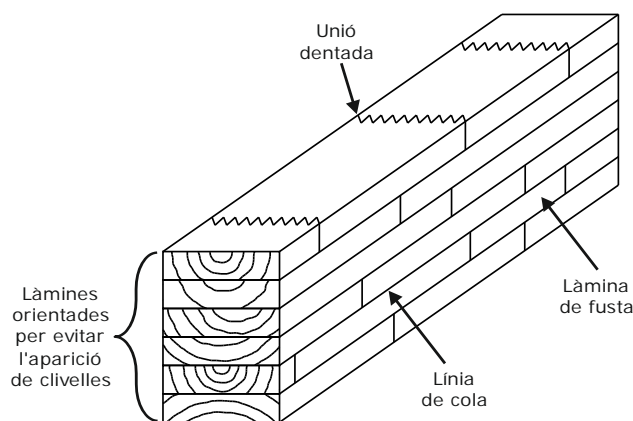


Figura 169. Fusta laminada encolada

1.1. Fusta

La fusta és el material essencial amb el qual es fabriquen les bigues laminades, les seves característiques condicionen les propietats dels elements estructurals. Per tant, la major o menor qualitat de la fusta determinarà els atributs del material.

1.1.1. Espècie fustera

Les espècies forestals més emprades a Europa actualment per fabricar fusta laminada encolada són la Picea (*Picea abies*) i l'abet (*Abies alba*). En segon lloc trobem el pi roig (*Pinus sylvestris*), per la seva abundància i la bona resposta davant els tractaments d'impregnació amb productes químics que permeten la seva utilització a l'exterior. Altres espècies que s'empen sovint són l'abet Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), el làrix (*Larix decidua*), altres espècies de pins com el pi insigne (*Pinus radiata*) o frondoses com el roure (*Quercus sp.*).

La norma marc vigent sobre fusta laminada encolada, la UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a), no cita explícitament espècies fusteres, però de forma implícita està pensada per normalitzar l'ús de la fusta de conífera. En canvi, l'esborrany de la futura norma prEN 14080 (AFNOR, 2011) recull explícitament les següents

espècies: *Picea abies*, *Abies alba*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii*, *Tsuga heterophylla*, *Pinus nigra*, *Larix decidua*, *Larix sibirica*, *Pinus pinaster*, *Populus robusta*, *Populus alba*, *Pinus radiata*, *Picea sitchensis*, *Pinus palustris*, *Thuja plicata* i *Chamaecyparis nootkatensis*. Com es pot apreciar, els pollancrecs són les úniques frondoses incloses provisionalment a la llista, essent els planifolis més similars en comportament resistent a les coníferes. En canvi, el castanyer n'està exclòs.

La publicació explícita de la llista s'explica perquè habitualment s'empren coníferes per fabricar fusta laminada encolada. Això és així perquè les frondoses són relativament escasses ens els principals països productors del Centre i Nord d'Europa, i també perquè són més difícils d'encolar. Un altre factor que ho explica és que aquest tipus de fusta sovint es destina a usos en els quals el preu de mercat és superior. Així doncs, amb el marcatge CE vigent des de l'1 de desembre de 2011, si hom vol comercialitzar fusta laminada encolada de castanyer caldrà que s'aculli a un DITE (Document d'Idoneïtat Tècnica Europeu) tal com s'especifica a la Directiva 89/106/CEE de productes de la construcció (Comunitat Econòmica Europea, 1989).

1.1.2. Característiques de les làmines

Les làmines de fusta laminada encolada són paral·lelepípedes que han de tenir un gruix entre 6 i 45 mm no existint limitacions pel que fa al llarg ni a l'ample (AENOR, 2002d). Un cop eliminades les singularitats inacceptables és clar que, com menys especejada estigui la fusta, més eficient i econòmic serà el procés de fabricació al estalviar temps de serrat i quantitat de cola. El muntatge de les làmines es pot dur a terme de diverses formes: es poden disposar horitzontalment o verticalment, distribuir-se segons la seva qualitat en cas que existeixi fusta de diferents espècies o propietats resistents (GLh o GLc), o encolar per l'anvers o el revers segons l'orientació dels anells (Veure Figura 170).

Al desdoblar un tronc per obtenir làmines de fusta l'orientació dels extrems serà sempre perpendicular a la direcció de les fibres, mentre que l'orientació de la cara i del cantell, respecte als radis, serà paral·lela, tangent o bé estarà en un terme mig en funció de la posició de la làmina en el tronc (Figura 171). Històricament s'havia considerat que l'orientació relativa de les fibres de les cares de les dues làmines a unir (tangencial/tangencial, radial/radial o tangencial/radial) podia fer variar la resistència de l'encolat. Contràriament, en estudis recents s'ha vist com l'evolució i

millora de les coles superat aquest condicionant, no apareixent diferències significatives en cap de les combinacions efectuades entre els adhesius i les espècies de fusta més comunes (Özçifçi & Yapici, 2008). En l'estudi dut a terme per Follich *et al.* (2007) amb cola de Poliuretà i Melamina-urea-formaldehid també es corrobora aquesta hipòtesi.

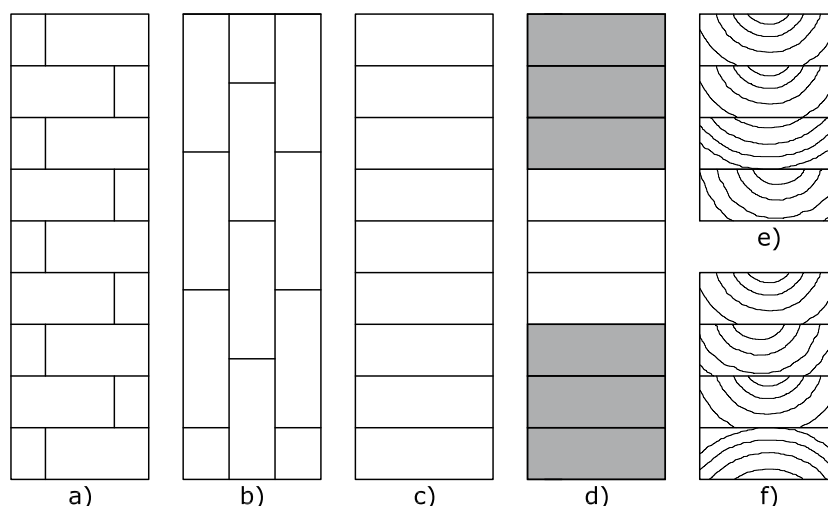


Figura 170. Tipus de fusta laminada encolada segons la disposició de les làmines. Seccions transversals mostrant la posició normal de les línies de cola. a) Horitzontal b) Vertical c) Homogènia d) Combinada e) Orientació general. Classe de servei 1 i 2. f) Orientació per a classe de servei 3.

UNE-EN 386:2002 (AENOR, 2002e) i UNE-EN 1194:1999 (AENOR, 1999)

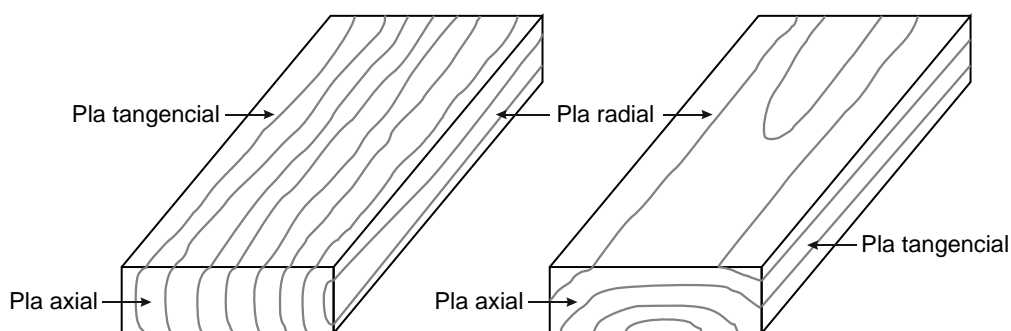


Figura 171. Plans axial, radial i tangencial de les làmines de fusta

1.1.3. Unions dentades: geometria i especificacions

La norma UNE 385:2002 (AENOR, 2002d) defineix les unions dentades encolades, o finger joints en anglès, com

“empalmaments realitzats mitjançant mecanització d’un nombre determinat d’entalladures iguals i simètriques, a les testes de les peces de fusta que són encolades posteriorment” (AENOR, 2002d: 7).

La seva geometria és diversa i la normativa distingeix segons la seva grandària. Si la longitud del dentat és inferior a 45 mm és d'aplicació la norma UNE-EN 385:2002 (AENOR, 2002d), i, si és més gran, cal seguir l'estàndard UNE-EN 387:2002 (AENOR, 2002f) sobre unions dentades de grans dimensions. Cal que la fusta de la unió dentada estigui lliure de defectes que puguin condicionar la resistència dels empalmaments. La norma UNE-EN 385:2002 (AENOR, 2002d) no admet nusos a una distància inferior a menys de tres vegades el seu diàmetre, ni gemmes amb una superfície major del 1% de la secció. El criteri respecte als nusos varia lleugerament al prEN 14080 (AFNOR, 2011), perquè admet nusos propers fins a una vegada i mitja el seu diàmetre sempre que no existeixi desviació de la fibra en una distància igual a tres vegades el diàmetre. Les dimensions recomanades i la geometria d'aquestes unions es recullen a la Taula 90 i la Figura 172.

Taula 90. Geometria recomanada de les unions dentades encolades

Norma	Orientació	Longitud (mm)	Pas (mm)	Punta (mm)
UNE-EN 385:2002	Dents visibles a la cara	10	3,7	0,6
		15	3,8	0,42
		20	6,2	1,0
	Dents visibles al cantell	20	6,2	1,0
		35	6,2	1,0
prEN 14080	Sense especificar	15	3,8	0,42
		20	5,0	0,5
		20	6,2	1,0
		30	6,2	0,6

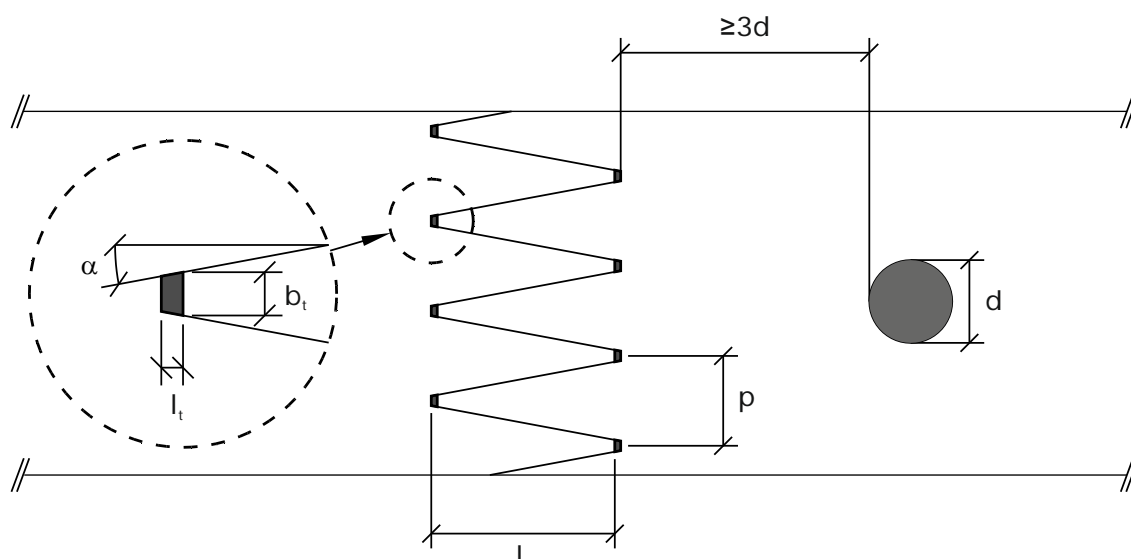


Figura 172. Geometria de les unions dentades segons la norma UNE-EN 385:2002 (AENOR, 2002d).

b_t = amplada de la punta; d = diàmetre d'un nus; l = longitud de la dent; l_t = folga de la punta;
 p = pas; α = angle de la dent

També cal tenir en compte que, almenys des d'un punt de vista teòric, la resistència de les làmines ja empalmades ha de ser semblant a la de la fusta massissa amb les seves singularitats. Per aquesta raó, les unions per testa es comproven mitjançant assaigs a flexió estàtica segons la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012). En aquests tests es controla la forma del trencament i la resistència assolida, en la valoració dels resultats es té en compte que els empalmaments no deixen de ser una nova singularitat que s'ha introduït per superar les limitacions longitudinals de la fusta massissa.

1.2. Adhesius

1.2.1. Tipus d'adhesius segons la seva formulació

Els adhesius són substàncies capaces de mantenir unides les superfícies de dos sòlids en contacte gràcies a forces intermoleculars d'adherència entre la substància i el sòlid i a la seva pròpia cohesió. Concretament, apareixen tres tipus de forces entre l'adhesiu i les molècules de cel·lulosa de la fusta: les forces de van der Waals (20 kJ/mol), els ponts d'hidrogen dels grups hidroxils (60 kJ/mol) i els enllaços químics entre l'adhesiu i la fusta (100-1200 kJ/mol) (Custódio *et al.*, 2008a). La seva formulació química pot incloure fins a cinc famílies de components funcionals: extensors de cadena (extenders), càrregues i reforços (fillers), catalitzadors (catalysts) i enduridors (hardeners), tampons i estabilitzadors (buffers) i tensioactius (surfactants). D'adhesius n'existeixen de molts tipus i formulacions, però els permesos per la normativa per a ús estructural s'agrupen en quatre grups principals.

Coles de caseïna: Primers adhesius emprats en la fabricació de fusta laminada encolada van assolir gran popularitat a principis del segle XX al poder ser aplicats en fred. La seva base és la caseïna una fosfoproteïna precipitada a partir de llet desnatada que, en mesclar-se amb altres reactius, s'empra com adhesiu per a la fusta. El seu origen orgànic i la seva capacitat relativa d'adhesió només la fan apta en fustes de densitat inferior a 750 kg/m³, instal·lada en interiors calefactats i ventilats, on la temperatura no passi de 50°C, i la fusta s'estabilitzi al voltant del 20% d'humitat (AENOR, 2002a; Giordano, 1983).

Coles fenòliques (F) / resorcinòliques (RF): Resines derivades de la policondensació del fenol, els seus homòlegs o derivats, amb aldehids o cetones. La cola de resorcina és la cola que millor resposta ha donat tradicionalment a la intempèrie al ser insensible a la humitat, als agents químics i resistent al foc. És la més utilitzada pels fabricants malgrat que les línies de cola són força antiestètiques per la seva coloració fosca (García Esteban *et al.* 2002; AENOR, 2008a).

Coles aminoplàstiques (UF/MF/MUF): Resina sintètica termoestable derivada de la policondensació d'un compost que conté grups urea o melamina amb aldehid (generalment formaldehid). Actualment, és el tipus d'adhesiu més comú a la indústria de la fusta laminada europea per la bona relació cost/poder adhesiu. Les més emprades són la urea-formaldehid (UF), la melamina-formaldehid (MF) i, sobretot, la melamina-urea-formaldehid (MUF) (AENOR, 2008a). La melamina-formaldehid és un adhesiu molt resistent a la humitat i amb un temps de premsat més curt que les resines de fenol-formaldehid. Aquestes dues propietats fan de la melamina-formaldehid un adhesiu molt interessant per emprar-la en processos industrials com la fabricació de taulers de partícules. Malauradament, el cost de la melamina-formaldehid és més elevat que el de la urea-formaldehid i que el del fenol-formaldehid (Pizzi *et al.*, 1983). Per assolir l'equilibri entre les propietats mecàniques superiors de la melamina-formaldehid i el preu competitiu de la urea-formaldehid es van desenvolupar els adhesius de melamina-urea-formaldehid combinant la melamina amb la urea en una proporció igual o superior a 40/60. Aquesta formulació es pot aconseguir mesclant resines d'urea-formaldehid i melamina-formaldehid o condensant, conjuntament, la melamina i la urea amb el formaldehid. Actualment, existeix una ampla gamma d'aquestes resines formulades amb additius específics o modificacions químiques particulars (Pizzi *et al.*, 1983).

Coles de poliuretà (PUR): Producte de reacció d'un poliisocianat, generalment diisocianat aromàtic i alifàtic, i un poliòl en el qual es repeteix el grup uretà (MDI). Es presenten en format monocomponent i bicomponent. Els primers són adhesius que curen amb la humitat ambiental i/o la de la fusta i es proporcionen llestos per ser emprats. Els segons estan constituïts per l'adhesiu base i l'enduridor per separat i cal mesclar-los perquè reaccionin (AENOR, 2008a). S'apliquen en fred i l'enduridor determina la velocitat de curat. Un cop endurida, la cola presenta una alternança particular entre parts toves i amorfes i parts dures i d'estructura fortament reticulada. Per aquest motiu les coles de poliuretà són elàstiques, mal·leables i molt resistents a la intempèrie, fet que els hi confereix un excel·lent comportament estructural (Cognard, 2000; Elbez, 1991; Giordano, 1983).

A més, per a unir fusta també s'empren satisfactòriament altres tipus de cola amb finalitats molt diverses:

Resines epoxi: Polímers sintètics termoenduribles que contenen grups epoxi. Família d'adhesius molt extensa que abasta gran varietat de formulacions i en la qual, generalment, es presenten per separat els co-reactius i/o els catalitzadors. Permeten encolar la fusta amb gran varietat de materials. De propietats molt diverses, són els més emprats en reparacions *in situ* ja que no necessiten pressió durant l'encolat ni el curat, són molt tolerants amb les condicions ambientals, poc exigents amb el gruix de la línia de cola, molt resistents i tenen gran capacitat de rebliment. Per contra, el seu cost és elevat i el seu temps de vida curt (AENOR, 2008a; Custódio *et al.*, 2008a; Giordano, 1983).

Coles viníliques: Polímers termoplàstics produïts mitjançant polimerització d'acetat de vinil com a monòmer únic o principal (AENOR; 2008a). Les més populars són les d'acetat de polivinil (PVAC) en emulsió o dispersió. Anomenada popularment "cola blanca de fuster" és un dels adhesius més emprats amb finalitat no estructural per la indústria de la fusta pel seu baix cost, facilitat d'aplicació en materials porosos, relatives bones prestacions, i tenir un temps de vida llarg al voltant de vint-i-quatre hores. Sensibles a l'aigua, són particularment idònies per a interior, però emprant un enduridor poden arribar a funcionar satisfactòriament en front humectacions importants o fins i tot intempèrie (AENOR, 2002b, Giordano, 1983).

Aquesta família de productes químics és molt àmplia i variada i pot classificar-se considerant molts i diferents criteris: composició, presentació, origen dels seus components (sintètics o natural), ús, procés de curat, comportament en front les condicions ambientals, etc. A la Figura 173 es mostren ordenats segons la seva composició química els adhesius més habituals per encolar fusta-fusta independentment de l'espècie (frondosa o conífera) o de la mida del material (fibres, partícules, tires, xapes o fusta massissa).

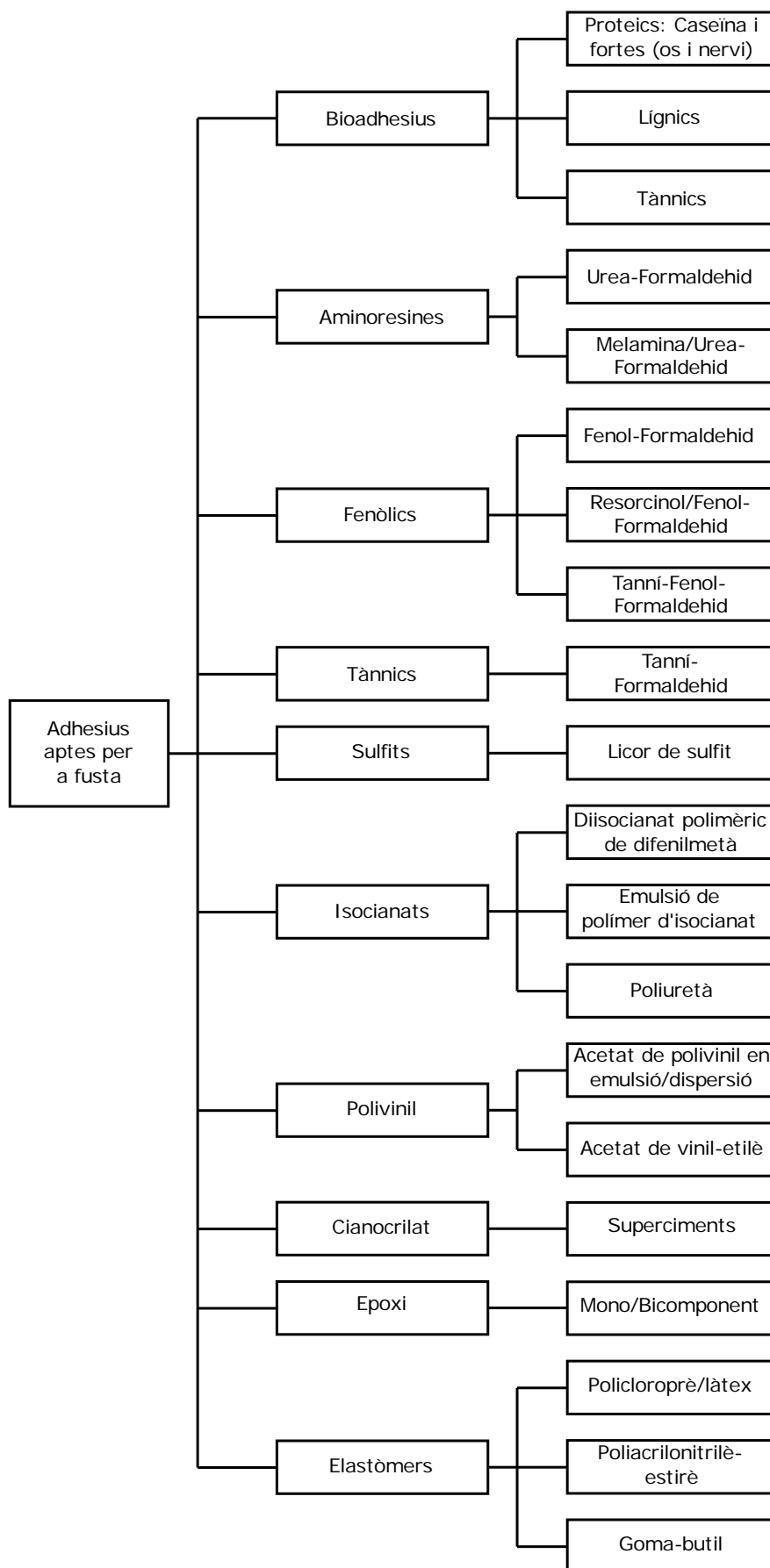


Figura 173. Adhesius habitualment emprats per encolar fusta (Elbez, 1991; Giordano, 1983; Pizzi *et al.*, 1983; Rowell, 2005)

1.2.2. Tipus d'adhesiu segons les condicions climàtiques

Les variacions d'humitat que pateix la fusta sota condicions ambientals canviants generen tensions interiors en el material. En el cas de la fusta laminada, aquests esforços es traslladen als plans d'encolat i, si les unions no tenen resistència suficient, es poden separar les làmines. Per tant, si sotmetem la fusta a gradients d'humitat extrems el material envella de forma prematura. Així doncs, l'elecció d'un adhesiu no només depèn del tipus de material a encolar, sinó que també està en funció de les condicions que haurà de suportar durant la seva vida útil, i de la resistència que hagi de garantir. Des d'aquest punt de vista, la normativa distingeix entre adhesius aptes per a ús estructural i la resta. Els adhesius no estructurals es classifiquen a les normes UNE-EN 204:2002 (AENOR, 2002c) i UNE-EN 12765:2002 (AENOR, 2002b) segons la seva durabilitat:

Taula 91. Descripció de les classes de durabilitat dels adhesius no estructurals

Classe de durabilitat		Condicions climàtiques i camps d'aplicació
Adhesius termoplàstics. UNE-EN 204:2002	Adhesius termoenduribles. UNE-EN 12765:2002	
D1	C1	Interior. La humitat de la fusta no supera el 15%
D2	C2	Interior. Exposicions curtes ocasionals a aigua corrent o condensada i/o humitat alta ocasional. La humitat de la fusta no supera el 18%
D3	C3	Interior amb exposicions curtes freqüents a l'aigua corrent o condensada i/o alta exposició a alta humitat. Exterior no exposat a la meteorologia
D4	C4	Interior amb exposicions llargues freqüents a aigua corrent o condensada. Exterior exposat a la meteorologia però amb la protecció d'un recobriments superficial adequat

Per la seva banda, els adhesius estructurals també es classifiquen en funció de la seva resistència a les condicions climàtiques. Les coles de caseïna per a ús estructural tenen un rang ambiental d'utilització molt concret, ja que tal com queda establert a la norma UNE-EN 12436:2002 (AENOR, 2002a), només es poden emprar en condicions d'interior en edificis amb calefacció i ventilats. En canvi, les coles fenòliques, aminoplàstiques i les de poliuretà monocomponent són molt més versàtils i responen satisfactòriament a un ventall d'ambients molt més ampli. Per aquesta raó, a les normes UNE-EN 301:2007 (AENOR, 2007) i UNE-EN 15425:2008 (AENOR, 2008b) es defineixen dos classes d'adhesius en funció del seu comportament vers la temperatura i la humitat (Veure Taula 92).

Taula 92. Tipus d'adhesius per a ús en diferents condicions climàtiques

Tipus d'adhesiu ¹	Temperatura	Equivalència climàtica ²	Exemples	Classe de servei ³
I	>50°C	No especificada	Exposició perllongada a temperatura elevada	1, 2, 3
	≤ 50°C	HR > 85% a 20°C	Exposició total a la intempèrie	1, 2, 3
II	≤ 50°C	HR ≤ 85% a 20°C	Edificis amb calefacció i ventilació. Exterior protegit de la intempèrie. Períodes curts d'exposició a la intempèrie	1, 2

¹ Segons UNE-EN 301:2007 (AENOR, 2007) i UNE-EN 15425:2008 (AENOR, 2008b)

² Una humitat relativa del 85% a 20°C produirà un contingut d'humitat aproximat del 20% a les coníferes i a la majoria de frondoses, i un contingut d'humitat inferior en els taulers derivats de la fusta

³ Equivalència amb les classes de servei de l'Eurocodi 5. UNE-EN 1995-1-1:2006 (AENOR, 2006b)

La classe de servei de la norma UNE-EN 1995-1-1:2006 (AENOR, 2006b) és un concepte que va lligat a les condicions ambientals que ha de suportar una estructura de fusta en el seu conjunt, i que està bàsicament pensat per a l'assignació de valors de resistència i càlcul de deformacions. Tot i això, aquelles són les condicions amb què haurà de conviure l'adhesiu estructural.

- **Classe 1:** Contingut d'humitat en els materials corresponent a una temperatura de 20°C i una humitat relativa de l'aire superior al 65% només unes poques setmanes a l'any. El contingut d'humitat mitjà de la majoria de les coníferes no excedeix el 12%.
- **Classe 2:** Contingut d'humitat en els materials corresponent a una temperatura de 20°C i una humitat relativa de l'aire superior al 85% només unes poques setmanes a l'any. El contingut d'humitat mitjà de la majoria de les coníferes no excedeix el 20%.
- **Classe 3:** Contingut d'humitat en els materials superior a la definida per a la classe 2.

1.2.3. Principals factors que condicionen l'encolat

Per aconseguir un encolat satisfactori i resistent cal emprar una cola adequada i aplicar-la correctament. Els factors més rellevants que influeixen sobre la qualitat de l'encolat es descriuen a continuació.

1.2.3.1. Temps d'encolat

El procediment d'encolat d'una línia de cola s'inicia amb la seva aplicació i acaba quan les unions assoleixen la resistència definitiva. Aquest procés es divideix en

diverses fases de durada determinada segons la formulació de l'adhesiu emprat i la temperatura i humitat ambientals.

Taula 93. Temps d'encolat. Definicions segons UNE-EN 923:2006+A1:2008 (AENOR, 2008a)

Temps d'encolat		Definició	
Període de conservació		Temps d'emmagatzematge, en condicions controlades, durant el que s'espera que un adhesiu conservi les seves condicions d'aplicació	
Vida útil (Pot life)		Període de temps en el que un adhesiu multicomponent pot ser emprat un cop hagin estat mesclats els components, i segueix mantenint totes les seves propietats	
Temps d'acoblament	Temps d'aplicació	Període de temps necessari per estendre un adhesiu sobre les superfícies a recobrir	
	Temps obert	Interval mínim de temps després de l'aplicació de la capa adhesiva a partir del qual aquesta és capaç de mantenir l'acoblament unit	
	Temps d'unió	Temps tancat	Interval de temps entre l'acoblament de la unió adhesiva i el inici del tractament de calor o pressió per assolir l'enduriment de la zona d'encolat
		Temps de premsat	Interval de temps durant el que es sotmet a pressió la zona d'encolat
Temps d'enduriment		Període de temps que necessita un adhesiu per endurir sota les condicions especificades	
Temps de condicionament		Interval de temps entre el final de l'aplicació de calor o pressió a una unió i el moment quan s'assoleix les propietats d'adhesió desitjades	

1.2.3.2. Humectació i condicions ambientals durant l'encolat

La humectabilitat d'una superfície es defineix com l'atracció d'un sòlid vers un líquid i és funció de la composició química de l'adhesiu, la textura del material i l'energia dels enllaços químics a la superfície. En la unió de fustes mitjançant adhesius, bé sigui entre elles, bé sigui amb un altre material, la naturalesa higroscòpica de la fusta controla i condiciona l'elecció de l'adhesiu i la forma de realitzar la unió. Una fusta amb un alta humitat pot provocar una excessiva absorció durant la unió i que resti poca cola al pla d'encolat. Per contra, si la fusta està molt seca la humectació serà pobra i la penetració baixa (Liesa & Bilurbina, 1990). Les característiques dels adhesius que es modifiquen amb els canvis d'humitat són (Elbez, 1991):

- Viscositat: una humitat massa alta dilueix la cola i incrementa el risc d'obtenir unions defectuoses. Una humitat deficient crea un descens de la tensió superficial per excés d'absorció.
- Temps d'encolat: és menor si la humitat està entre el 12-14%.
- Temps de premsat: depèn directament del temps d'encolat.
- Comportament enfront els elements a encolar.

En la major part dels casos, és necessari assecar la fusta fins assolir una humitat entre el 6% i el 16% per obtenir acoblaments satisfactoris (Elbez, 1991). Sota una humitat d'equilibri higroscòpic del 12%, les coles de poliuretà curen molt més ràpidament que les de melamina-urea-formaldehid gràcies al seu contingut en isocianat. En canvi, si el contingut d'aigua puja fins al 22% o la fusta és verda, en ambdós casos és necessari mantenir la fusta premada fins que la fusta s'assequi si volen aconseguir juntes que compleixin amb els estàndards establerts (Properzi *et al.*, 2003).

En general els adhesius que curen amb la humitat prefereixen un rang d'humitat entre el 8-12% mentre que els que endureixen perden-la toleren humitats entre el 6% i el 8% (Davis, 1997). El mateix fenomen explica perquè l'excés d'adhesiu comporta una reducció de la penetració i la tensió superficial com a conseqüència d'una humectació no uniforme de la cola (Liesa & Bilurbina, 1990).

També cal tenir en compte que la temperatura ambient afecta al procés d'encolat ja que modifica la viscositat de l'adhesiu i, segons Davis (1997), és essencial que aquest s'estengui fàcilment per aconseguir un contacte íntim amb la lignina i la cel·lulosa. Mentre temperatures inferiors a 5°C retarden el temps de curat, temperatures per sobre dels 30°C provoquen una disminució artificial del temps d'encolat en activar els enduridors prematurament (Elbez, 1991). Paral·lelament, la temperatura ambiental modifica la humitat atmosfèrica i, en conseqüència, la humitat d'equilibri higroscòpic de la fusta. Per tot això, és necessari tenir controlades les condicions climàtiques de la sala d'encolat durant la fabricació de la fusta laminada encolada.

1.2.3.3. Inactivació de la superfície per interferència química

La fusta recent treballada és una superfície químicament molt activa i envelleix amb el pas del temps per contaminació pròpia, externa, o simplement per oxidació química. La redistribució de les substàncies internes de la fusta i la deposició de contaminants atmosfèrics són els principals causants d'aquest procés (Custódio *et al.*, 2008a). Per aquest motiu, es recomana encolar les làmines tant aviat com sigui possible i mai passades més de vint-i-quatre hores després de la seva preparació (García Esteban *et al.*, 2002).

En general la contaminació pròpia és més important en les coníferes que en les frondoses, doncs les primeres tenen major quantitat de substàncies extractives com la resina. En els pins i avets, la resina genera incompatibilitats amb la cola (Liesa & Bilurbina, 1990; Custódio *et al.*, 2008a) i és recomanable eliminar-la, per exemple, mitjançant una dissolució al 10% de NaOH (Davis, 1997). Altres solucions són la utilització de solucions detergents, dissolvents orgànics, o bé, adhesius amb un dissolvent orgànic ja incorporat. Els tractaments químics de les superfícies d'encolat s'empren, prioritàriament, en unions estructurals i en aplicacions crítiques on no es pot permetre la més mínima possibilitat de fallada en la unió (Liesa & Bilurbina, 1990). En el cas del castanyer cal tenir en compte la presència abundant de tanins i extractius en general.

Altres causes importants d'inactivació són els additius ignifugants, biocides i protectors que hom afegeix a la fusta per millorar-ne la seva durabilitat i comportament al foc. La resistència a esforç tallant de la fusta laminada encolada disminueix a mesura que s'incrementa la retenció de producte protector. Aquesta reducció pot arribar a ser del 12% en els mòduls d'elasticitat i rigidesa en cas que els biocides continguin substàncies olioses o similars (Davis, 1997; Yildiz *et al.*, 2004; Uysal, 2005). Per tant, és recomanable trobar la millor combinació possible entre la fusta, el tractament protector i l'adhesiu si es vol obtenir fusta laminada encolada i protegida de qualitat (Lee *et al.*, 2006). Afortunadament la fusta de castanyer és altament durable ja que els tanins que incorpora de forma natural actuen com a protectors naturals (AENOR, 1995b; Militz *et al.*, 2003).

1.2.3.4. pH i capacitat tampó de la fusta i la cola

Totes les fustes són, generalment, àcides però no totes ho són en el mateix grau. El pH de la fusta habitualment oscil·la entre 3 i 5,5, i el valor mig està al voltant de 4,7 a causa del contingut en grups acetil, la presència d'extractius àcids, i els cations compresos a les cendres (Rowell, 2005). Habitualment graus d'acidesa elevada al voltant de 3,5, com la del roure, poden comportar dificultats d'encolat, especialment si es combinen amb taxes d'humitat elevades. Per exemple, en coles de resorcina la combinació d'aquests dos factors retarda la reticulació de l'adhesiu (Elbez, 1991). Cognard (2000) també afirma que les solucions amb pHs àcids o molt alcalins ràpidament delaminen les juntes encolades sota tensió independentment del tipus de polímer: epoxy, fenòlic, poliuretànic, polibutadiè o neoprè. Això és deu a la hidròlisi de les unions amides, uretàniques, i ureaformaldehid, i a l'augment de la pressió osmòtica. Per aquest motiu és

necessari controlar el pH de la fusta, la seva capacitat tampó, i emprar una cola que sigui compatible (Lee *et al.*, 2001; Albert *et al.*, 1999; Passialis *et al.*, 2008). Cal tenir en compte que en posar en contacte la fusta i l'adhesiu el sistema tendirà a equilibrar el pH i, si la variació és elevada, el curat i la resistència final de la unió se'n veuran afectats.

1.2.3.5. Densitat de la fusta i porositat de la superfície

Segons Elbez (1991), la densitat de la fusta és el principal factor a tenir en compte a l'hora de fabricar fusta laminada encolada, i Carmona *et al.* (1998) conclouen que, en *Pinus radiata*, a major densitat menor és l'adherència de l'adhesiu. Cal prendre algunes precaucions:

- Densitat inferior a 650 kg/m³: no són necessàries mesures específiques.
- Densitat entre 650 i 800 kg/m³: controlar el curat de la cola de forma acurada, especialment si la secció supera els 40 cm². Respectar el grau i homogeneïtat de la humitat a la fusta, i controlar que la mecanització de la fusta no altera la humectabilitat de la superfície.
- Densitat superior a 800 kg/m³: emprar coles d'alt rendiment mecànic, raspallar la superfície amb un abrasiu de gra gruixut, aplicar l'encolat a les dues cares de la junta, i respectar estrictament el temps obert d'encolat.

La densitat també està molt relacionada amb la porositat, una propietat de la fusta que també cal tenir en compte durant l'encolat. L'adhesiu penetra a la fusta a través dels lúmens de les cèl·lules formant una unió solidària entre cola i fusta, més resistent com més grans i abundants siguin aquestes cavitats (Davis, 1997). Ara bé, porositats excessives requereixen adhesius viscosos per evitar absorcions excessives, i que la superfície a encolar no acumuli el gramatge de cola suficient. Afortunadament, segons hem pogut determinar en capítols anteriors, la fusta de castanyer és una fusta lleugera amb una densitat per sota de 600 kg/m³ i la seva porositat encara que irregular presenta vasos de gran diàmetre.

1.2.3.6. Acabat de la superfície

Si es volen obtenir juntes d'encolat d'elevada resistència és essencial que l'acabat de les superfícies de les làmines a unir sigui l'adequat independentment del mètode d'aplicació de la cola i del tipus d'adhesiu. És molt important treballar amb eines

ben esmolades ja que la regularitat de la superfície de contacte té una gran influència sobre el gruix de la junta, la regularitat de la disposició de l'adhesiu sobre la làmina, i les relacions interfacials entre adhesius i substrats. Superfícies correctament preparades faciliten l'absorció, fenomen en el qual la cola penetra físicament dins de la fusta, i d'adsorció, procés d'equilibri en el que els àtoms o molècules de l'adhesiu es fixen sobre les superfícies a unir (Liesa & Bilurbina, 1990; Elbez, 1991).

Les superfícies han de ser planes per oferir la màxima superfície de contacte possible. Una fusta guexada o de gruix irregular comporta una pressió de contacte no uniforme i una penetració irregular de l'adhesiu derivant en juntes insuficientment premsades que tendeixen a desencolar-se. Les superfícies no uniformes, rugoses i amb presència d'ondulacions no permeten una aplicació regular i econòmica de la cola. Les cares i cantells de les làmines cal que siguin llises i sense les irregularitats pròpies del serrat. Raspallant la fusta s'aconsegueixen unions més ben acabades que faciliten una correcta distribució de la cola (Liesa & Bilurbina, 1990; Elbez, 1991; Custódio *et al.*, 2008a).

Segons Özçifçi & Yapici (2008) existeixen diferències significatives en funció de la qualitat d'acabat amb què han estat fabricades les làmines de fusta. La major resistència a esforç tallant s'obté quan les fustes han estat obrades, després si es desdoblen amb serres de disc (-13%) i, per últim, quan la fusta s'especeja amb serra cinta (-32%). A més, Custódio *et al.* (2008a) i Davis (1997), afegeixen que obrar la fusta amb ganivetes romes o amb una velocitat de pas de les fulles massa lenta (poques revolucions per minut) també afecta negativament la qualitat d'encolat.

En darrer lloc cal tenir molt present que les operacions de mecanitzat i els processos de pressió en calent poden assecar superficialment la fusta provocant una humectació dèbil de la zona de contacte. En aquests casos cal aplicar com a tractament corrector, previ a l'encolat, un lleuger polit superficial per activar de nou la superfície (Custódio *et al.*, 2008a; Elbez, 1991). Ara bé, si el polit és massa intensiu, aquest tipus de mecanització genera una nova superfície de fibres matxucades i lúmens parcialment obturats per la pols de la fusta que impedeixen la penetració de l'adhesiu (Davis, 1997).

2. Objectius

L'estudi es marca com a objectiu desenvolupar fusta laminada encolada amb castanyer del Sistema Mediterrani Català que sigui apta per al seu ús a les condicions d'intempèrie, d'acord amb les especificacions tècniques de la normativa europea de normalització. S'avaluaran els següents aspectes del material:

- **Avaluació de la qualitat d'encolat:**
 - Resistència mecànica de les unions dentades encolades.
 - Resistència mecànica i qualitat de la unió dels plans d'encolat.
 - Resistència a la intempèrie dels plans d'encolat.
- **Caracterització resistent:** Determinació de la classe resistent de la fusta laminada encolada de castanyer.

3. Materials i mètodes

3.1. Requisits normatius de la fusta laminada encolada

La norma UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a) especifica els requisits que ha de complir la fusta laminada encolada per tal de ser utilitzada en estructures portants. Conceptualment, el procés de caracterització d'acord amb la norma es pot dividir en dos blocs. En primer lloc, les propietats mecàniques i resistents dels elements i de les unions encolades. En segon lloc, la durabilitat, la protecció enfront atacs biològics, la reacció al foc i les emissions de formaldehid (Veure Taula 94). El text considera tres casos diferents per avaluar la conformitat del material:

- Definició dels requisits de prestació del producte o fase de desenvolupament del material.
- Assaigs de tipus inicial en la posta en marxa d'una línia de producció.
- Control de producció en fàbrica un cop endegada la fabricació del bigam.

En el desenvolupament del material, cas que ens ocupa a partir d'ara, la primera condició que cal tenir en compte és la norma UNE-EN 390:1995 "Madera laminada encolada. Dimensiones y tolerancias." (AENOR, 1995c). En ella s'estableixen les toleràncies dimensionals que cal que tinguin els prototips a assajar, així com el contingut d'humitat de referència a què s'han de fer les mesures. També s'han tingut en compte les especificacions i requisits aplicables a les unions dentades segons la norma UNE-EN 385:2002 (AENOR, 2002d), i no les de la UNE-EN 387:2002 (AENOR, 2002f), donat que s'han utilitzat unions dentades de petita dimensió de longitud inferior a 50 mm.

La caracterització mecànica es basa principalment en la norma UNE-EN 1194:1999 "Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos." (AENOR, 1999), i en la UNE-EN 386:2002 "Madera laminada encolada. Especificaciones y requisitos de fabricación." (AENOR, 2002e). La primera d'elles està limitada a la fusta laminada encolada de conífera i, al no considerar el castanyer, no és pot aplicar el procés de conformitat basat en càlculs (Epígraf 6.3.). Per tant, cal cenyir-se al procediment empíric (Epígraf 6.2.) i als procediments als quals fa referència explícita l'estàndard UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a).

També s'ha tingut en compte el projecte de norma prEN 14080 (AFNOR, 2011) ja que l'entrada en vigor d'aquest text canvia el marc normatiu en alguns aspectes. Per aquest motiu, i perquè aquest és un estudi d'investigació, s'han realitzat els mateixos assaigs de caracterització que es realitzarien sobre fusta laminada encolada de conífera:

- UNE-EN 408:2011+A1:2012 "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas." (AENOR, 2012): Determinació de la resistència a flexió estàtica i de les unions dentades i de les bigues prototip.
- UNE-EN 392:1995 "Madera laminada encolada. Ensayo de esfuerzo cortante en líneas de adhesivo." (AENOR, 1995d): Determinació de la qualitat de l'encolat dels plans de cola entre làmines.
- UNE-EN 391:2002 "Madera laminada encolada. Ensayo de delaminación de líneas de adhesivo." (AENOR, 2002g): Determinació de la resistència dels plans d'encolat a les tensions provocades per gradients d'humitat.

La norma 14080:2006 (AENOR, 2006a) també fa referència a altres propietats no mecàniques que es poden conèixer gràcies a l'existència d'altres estàndards on es detallen aquestes característiques:

- UNE-EN 350-1:1995 "Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: Guía para los principios de ensayo y clasificación de la durabilidad natural de la madera." (AENOR, 1995a): Procediment per determinar la durabilitat natural de la fusta.
- UNE-EN 350-2:1995 "Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: Guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa." (AENOR, 1995b): Classificació de les espècies de fusta més comuns segons la seva durabilitat natural.
- UNE-EN 15228:2009 "Madera estructural. Madera estructural tratada con un producto protector contra los ataques biológicos." (AENOR, 2009): Penetració i retenció dels protectors de la fusta, i requisits generals de la fusta estructural tractada.
- UNE-EN 717-1:2006 "Tableros derivados de la madera. Determinación de la emisión de formaldehído. Parte 1: Emisión de formaldehído por el método de la cámara." (AENOR, 2006c): Valoració de les emissions de formaldehid procedents de l'adhesiu.

Taula 94. Requisits de prestació a caracteritzar segons UNE-EN 14080 (AENOR, 2006a)

Propietats a caracteritzar segons UNE-EN 14080:2006		Normes a les que deriva la UNE-EN 14080:2006		Nombre d'assaigs
		Norma	Observacions	
Propietats resistents de la fusta laminada encolada partint d'assaigs (4.2.2.)	Resistència a flexió	UNE-EN 1194:1999 (6.2.)	Assaig a flexió estàtica: UNE-EN 408:2011. Secció: $h \approx 600$ mm ; $b \approx 150$ mm Incloure almenys un dentat amb tracció màxima	30 elements de mínim 3 lots
	Mòdul d'elasticitat			
	Resistència a compressió	UNE-EN 1194:1999 (6.2.)	El valors característics s'extreuen de la definició de les classes resistents GLh (Taula 1) a partir de les propietats resistents bàsiques (flexió estàtica i MOE)	Valor tabulat
	Resistència a tracció			Valor tabulat
Resistència a tallant	Valor tabulat			
Resistència de l'encolat de les unions dentades (4.2.2. i 4.5.2)	Empalmaments per unió dentada entre làmines	UNE-EN 1194:1999 (6.3.2.b)	Assaig a flexió estàtica segons UNE-EN 408:2011. Valor característic a tracció segons classes resistents GLc (Taula 1) $b \approx 150$ mm (6.2.) $h \leq 35$ mm (UNE-EN 386:2002. Taula 3)	200 (100) provetes de 3 lots mínim
Resistència de l'encolat de les línies de cola (4.5.3)		UNE-EN 386:2002 (5.5.)	Classe de servei 1 i 2 Resistència a tallant per línia de cola segons UNE-EN 392:1995; o bé, Delaminació segons Cicle A de la UNE-EN 391:2002	Mostra representativa: 1 per lot (1 per biga)
			Classe de servei 3 Delaminació: Cicle A segons UNE-EN 391:2002	Mostra representativa: 1 per lot (1 per biga)
Durabilitat natural (4.4.1.)		UNE-EN 350-1:1995 UNE-EN 350-2:1995	Classe de durabilitat natural de les espècies de fusta ja definida a les normes	Valor tabulat
Fusta laminada tractada enfront atacs biològics (4.4.2.)		UNE-EN 15228:2009	No aplicable. No es protegirà la fusta de castanyer	No aplicable
Reacció al foc (4.6.)	Annex E. Taula E.1.	---	Sense assaigs complementaris	Valor tabulat
Emissió de formaldehid (4.7.)		UNE-EN 717-1:2006	Només si l'adhesiu té formaldehid: a) Sense assaig inicial \Rightarrow Classe E2 b) Amb assaig inicial \Rightarrow Classe E1/E2	Valor tabulat o assaig

3.2. Descripció dels prototips assajats

La fabricació de prototips de fusta laminada encolada de dimensions reals és quelcom complex perquè és necessari disposar de maquinària de grans dimensions. Per aquest motiu els prototips es van fabricar en una fusteria industrial de forma semblant als productes potencials de sèrie i sempre segons la normativa vigent. D'aquesta forma s'evita la variabilitat dels processos de fabricació característics dels treballs al laboratori, però, per contra, es perd part del control sobre els factors de producció, i hom està subjecte a les limitacions imposades pel fabricant.

El subministrament industrial només fou capaç de proporcionar un nombre limitat de bigues de dos tipus diferents que s'han anomenat MUF 5/15 i MUF 6/10. MUF fa referència a la cola de melamina-urea-formaldehid emprada a la unió dentada, el primer dels números indica el nombre de plans d'encolat del prototip, i el segon la longitud en mil·límetres de les unions dentades (Veure Figura 172). En els plans d'encolat es va emprar cola de poliuretà (PUR). La raó per la qual es van emprar dos tipus de cola en la fabricació dels prototips rau en les limitacions tècniques de la maquinària industrial incapaç d'emprar poliuretà en l'aplicador de cola de les unions dentades (Annex de fitxes tècniques). En la fabricació només es va emprar fusta procedent del Sistema Mediterrani Català.

3.2.1. Làmines de fusta

Es va treballar amb làmines de fusta massissa i làmines empalmades per testa per comparar la resistència a flexió estàtica de les unions dentades. En els dos casos la geometria de les peces era semblant a la dels prototips de fusta laminada encolada (Veure Taula 95):

- Làmines amb unió dentada: Empalmament situat al centre de la peça. Es van analitzar les geometries MUF 5/15 i MUF 6/10.
- Làmines de fusta massissa: Aprofitant els criteris de classificació elaborats en el Capítol IV es van assajar les làmines pràcticament lliures de defectes (Primera qualitat), i làmines amb presència de defectes acceptables des d'un punt de vista estructural (Segona qualitat).

Taula 95. Característiques de les làmines de fusta de castanyer i els seus elements

Element	Característiques		Fusta massissa		Fusta empalmada	
			Primera qualitat	Segona qualitat	MUF 5/15	MUF 6/10
Làmina	Dimensions nominals	Cantell (mm)	22	22	22	22
		Amplada (mm)	90	90	90	105
		Longitud entre suports (mm)	396	396	396	396
		Longitud total (mm)	418	418	418	418
Unió dentada	Geometria de la dent ¹	Orientació	---	---	Vertical	Vertical
		Longitud (l) (mm)	---	---	15	10
		Pas (p) (mm)	---	---	3,8	3,4
		Amplada de la punta (b _i) (mm)	---	---	1	1
	Adhesiu bicomponent	AkzoNobel MUF 1242	---	---	×	×
		AkzoNobel Enduridor 2542	---	---	×	×
	Encolat	Pressió d'empalmament (N/mm ²)	---	---	1	1
		Quantitat de cola (g/m ²)	---	---	150	150
		Temps de premsat (s)	---	---	20	20
		Temps de reticulat (h)	---	---	24	24
Nombre d'assaigs			40	40	40	100

¹Veure Figura 172

3.2.2. Prototips de fusta laminada encolada

Les bigues es muntaren amb làmines dels tipus descrits al punt anterior i la longitud original dels prototips voltava els 3500 mm. En total eren uns 900 mm més llargues del necessari per tenir longitud suficient i evitar la presència de defectes de premsat en els extrems. Aquest material sobrer dels extrems es va tallar abans dels assaigs a flexió, i se'n va extreure provetes d'esforç tallant i delaminació de la part més central. D'aquesta forma s'eviten possibles interaccions entre assaigs pels esforços de cisalla que apareixen en els plans d'encolat durant l'esforç a flexió i la ruptura. Concretament, les característiques de la fusta laminada encolada són les següents:

Taula 96. Característiques de les bigues de fusta laminada encolada

Element	Descripció	MUF 5/15	MUF 6/10	
Lames	Unions (Veure Taula 95)	MUF 5/15	MUF 6/10	
	Gruix	22	20	
	Quantitat per secció	6	7	
	Orientació de les lames ¹	Classe de servei 3	Classe de servei 3	
Biga	Dimensions nominals	Cantell (mm)	132	137
		Amplada (mm)	90	90
		Longitud ² (mm)	3500	3500
Plans d'encolat	Adhesiu	Kleiberit PUR 501	Kleiberit PUR 501	
	Unions encolades	5	6	
	Pressió de premsat (N/mm ²)	1,2	1,2	
	Quantitat de cola (g/m ²)	150	150	
	Temps de premsat (min)	60	60	
	Temps de reticulat (h)	120	120	
Nombre d'assaigs	Resistència a flexió estàtica	12	18	
	Resistència a esforç tallant de les línies de cola	72	126	
	Resistència a la delaminació	12	18	

¹Segons UNE-EN 386:2002

²La longitud inclou les provetes de flexió, tallant i delaminació. Les provetes de tallant i delaminació s'extragueren abans dels assaigs de flexió. Es rebutjaren els extrems.

3.3. Assaigs de caracterització

El control de la conformitat de la fusta laminada de castanyer s'ha realitzat segons el procediment empíric descrit a l'epígraf 6.2. de la norma UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a), ja que el procés de conformitat basat en càlculs de l'epígraf 6.3. d'aquella norma no és aplicable a frondoses. Per aquest motiu s'ha optat per caracteritzar les làmines empalmades, les bigues prototip, els plans d'encolat i les unions empalmades comprovant la seva resistència i contrastar les seves propietats resistents amb les de la fusta massissa per determinar l'efectivitat de l'encolat.

3.3.1. Resistència a flexió estàtica de les unions dentades

Segons la norma UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a) cal assajar dues-centes provetes a flexió o tracció per avaluar la resistència de les unions dentades encolades i, en aquest cas, s'ha optat per la primera opció. Ara bé, la quantitat de mostra es pot reduir fins a cent repeticions en cas que la resistència dels acoblaments sigui superior al vint per cent del valor previst a la següent fórmula de la fórmula UNE-EN 1194:1999 (AENOR, 1999):

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 \cdot f_{t,0,1,k} \quad (37)$$

On:

$f_{m,j,k}$ = Resistència característica a flexió de les unions dentades (N/mm²)

$f_{t,0,1,k}$ = Resistència característica a tracció de les làmines (N/mm²)

En el nostre cas, $f_{m,j,k}$ es determinà experimentalment i $f_{t,0,1,k}$ s'obtingué a partir del valor tabulat a la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a). Això fou possible ja que prèviament en el Capítol IV s'havia assignat la classe resistent D24 a la fusta massissa de castanyer. En total, es van assajar a flexió estàtica cent unions dentades tipus MUF 6/10 i només quaranta MUF 5/15 per limitacions en el subministrament. Per contrastar els resultats, es va caracteritzar un lot de quaranta làmines de fusta massissa de primera qualitat, i un altre lot de quaranta làmines de segona qualitat segons s'indica a la norma UNE-EN 384:2010 (AENOR, 2010b). L'assaig de resistència a flexió s'efectuà segons norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012) en una premsa multiassaig Incotecnic MUTC-200 (Veure Figura 174).

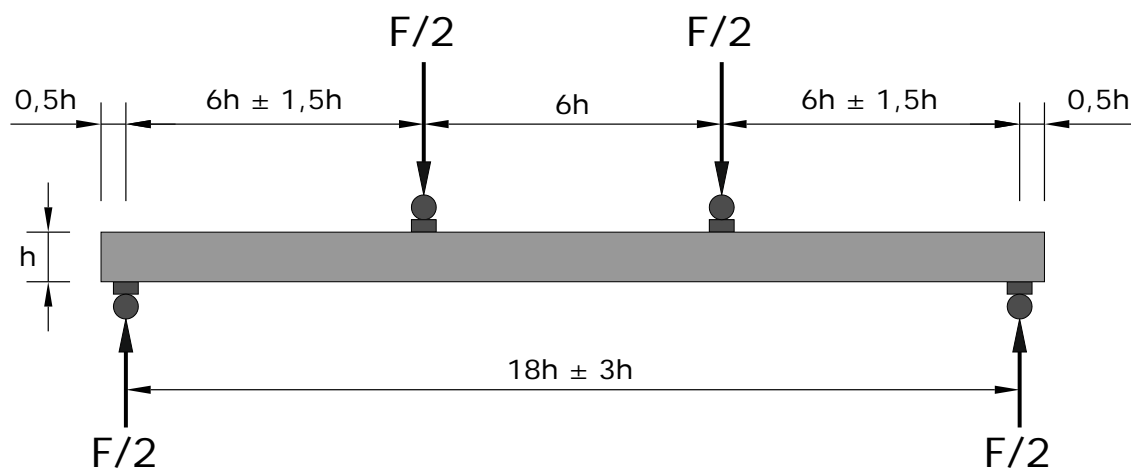


Figura 174. Assaig de resistència a flexió estàtica segons norma 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012).

$$h_{\text{MUF } 5/15} = 132 \text{ mm}; h_{\text{MUF } 6/10} = 137 \text{ mm}$$

3.3.2. Resistència a flexió estàtica de les bigues prototip

Com en la fusta massissa, la classe resistent s'assigna quan les propietats característiques no són menors que els valors característics determinats per a una classe resistent específica (AENOR, 1999). Les propietats a determinar són la resistència a la flexió estàtica (MOR) i el mòdul d'elasticitat (MOE). La resistència característica a flexió, tal com s'especifica a la norma UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a), es defineix com el cinquè percentil de la mostra, mentre que el mòdul d'elasticitat s'obté a partir del valor mitjà.

Segons aquest procediment, la resistència a flexió característica i el mòdul d'elasticitat d'una població es determinen amb elements de fusta laminada encolada de 600 mm de cantell que tinguin un contingut d'humitat corresponent al d'un ambient de 20°C i 65% d'humitat relativa de l'aire. Els assaigs cal efectuar-los seguint la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 (AENOR, 2012) (Veure Figura 174) i, en el cas que les bigues disponibles tinguin un cantell diferent a 600 mm i un gruix altri que 150 mm, cal corregir els resultats tal com s'indica a la norma UNE-EN 1194:1999 (AENOR, 1999). En aquest cas, els prototips tenen una secció de 132×90 mm i 137×90 mm:

$$k_{\text{grandaria}} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0,05} \left(\frac{h}{600}\right)^{0,1} = \left(\frac{90}{150}\right)^{0,05} \left(\frac{132}{600}\right)^{0,1} = 0,83782 \quad (38)$$

$$k_{\text{grandaria}} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0,05} \left(\frac{h}{600}\right)^{0,1} = \left(\frac{90}{150}\right)^{0,05} \left(\frac{137}{600}\right)^{0,1} = 0,84094 \quad (39)$$

Els assaigs es van realitzar en un pòrtic de flexió HOYTOM CM-DF 300/A1500.

3.3.3. Resistència a esforç tallant de la línia de cola

La norma UNE-EN 392:1995 (AENOR, 1995d) descriu com determinar la resistència a esforç tallant dels plans d'encolat entre làmines, i el percentatge de trencament per fusta acceptable d'aquestes unions paral·leles a les fibres de la fusta. L'experiment es va dur a terme amb provetes prismàtiques de secció entre 40×40 mm i 50×50 mm i longitud i nombre de línies de cola igual al cantell de les bigues. Els espècimens d'assaig es van carregar durant almenys vint segons a una velocitat

constant fins assolir el trencament. Es va emprar una premsa multiassaig Incotecnic MUTC-200 de precisió superior al 3% (Figura 175).

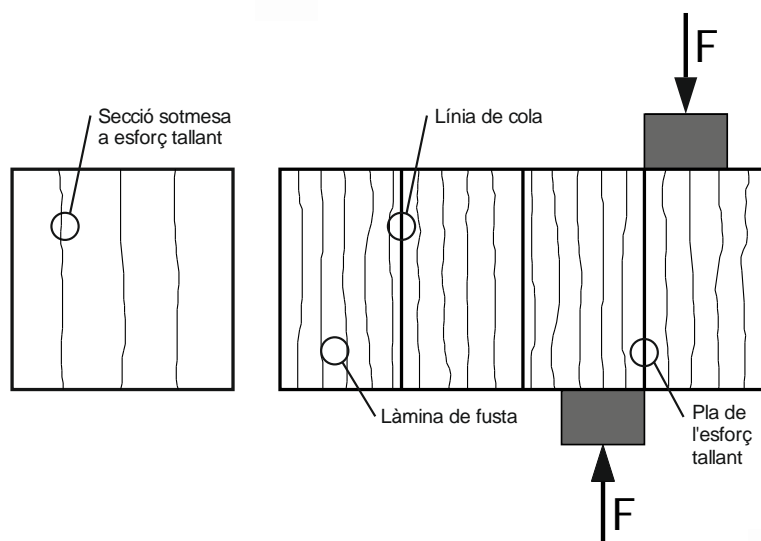


Figura 175. Assaig de resistència a esforç tallant dels plans d'encolat

La resistència a esforç tallant es calcula segons l'expressió:

$$f_v = k \cdot \frac{F_u}{A} ; k = 0,78 + 0,0044 \cdot t \quad (40)$$

On:

f_v = resistència a esforç tallant (N/mm^2)

F_u = càrrega màxima (N)

A = superfície del pla sotmesa a esforç tallant (mm^2)

k = factor de correcció si $t < 50$ mm (adimensional)

t = gruix de la proveta en direcció paral·lela a la fibra (mm)

La resistència a tallant de cada pla d'encolat ha de ser de $6,0 N/mm^2$, només s'accepten resistències mínimes de fins $4,0 N/mm^2$ en cas que la fusta sigui de conífera o pollancre i la ruptura sigui totalment per fusta. Ara bé, a més de conèixer la resistència de la unió cola/fusta també cal determinar la morfologia del trencament. El grau de fallada per fusta s'estima en forma de percentatge sobre la superfície total del pla d'encolat, i es realitza de forma visual arrodonint els resultats en múltiples de cinc tal com indica la norma UNE-EN 386:2002 (AENOR, 2002e). Cal tenir en compte que es pretén que la ruptura succeeixi per fusta i no pas per l'adhesiu, donat que la unió encolada demostraria ser més feble que el material en qüestió (Veure Taula 97).

Taula 97. Relació entre la resistència a esforç tallant i la fallada per fusta (UNE-EN 386:2002)

Propietat	Percentatge de fallada per fusta (PFF) permès en funció de la resistència a esforç tallant (f_v) de la unió encolada					
	Valors mitjans			Valors individuals		
f_v (N/mm ²)	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v \leq 11$	6	$f_v \geq 10$
PFF _{min} (%)	90	72	45	100	74	20
Relació entre PFF i f_v	PFF = 144 · 9 f_v			Si $f_v \geq 6 \Rightarrow$ PFF = 153,3 · 13,3 · f_v		

3.3.4. Resistència a la delaminació de les línies d'adhesiu

La norma UNE-EN 391:2002 (AENOR, 2002g) defineix els cicles "A" i "B" per avaluar el comportament vers les condicions climàtiques dels adhesius classificats com a tipus I, segons s'ha exposat al punt 1.2.2. Tipus d'adhesiu segons les condicions climàtiques. Per valorar l'aptitud d'aquests adhesius per a estructures sota classe de servei 3, els assajos de delaminació s'han de realitzar d'acord amb el mètode "A" tal com indica la norma UNE-EN 386:2002 (AENOR, 2002e) (Veure Taula 98). El mètode "B" és una alternativa si es realitzen controls de qualitat rutinaris. De cada biga prototip es van extreure una proveta de delaminació tal com es mostra a la Figura 176. La delaminació es va mesurar i avaluar a les seccions transversals de les provetes segons els criteris establerts a la norma UNE-EN 302-2:2005 (AENOR, 2005). Únicament es comptabilitzen les clivelles que afecten la línia d'encolat:

$$D_{\text{total}} = \frac{L_{\text{tot,delam}}}{L_{\text{tot,lineacola}}} \cdot 100 \quad (41)$$

$$D_{\text{max}} = \frac{L_{\text{màx,delam}}}{2 \cdot L_{\text{lineacola}}} \cdot 100 \quad (42)$$

On:

D_{total} = Delaminació total de la proveta (%)

D_{max} = Delaminació màxima d'una línia de cola (%)

$L_{\text{tot,delam}}$ = Suma de les longituds de delaminació de totes les línies d'adhesiu (mm)

$L_{\text{tot,lineacola}}$ = Longitud total de les línies d'adhesiu d'una proveta (mm)

$L_{\text{màx,delam}}$ = Longitud màxima de delaminació d'una línia d'adhesiu (mm)

$L_{\text{lineacola}}$ = Longitud de la línia d'adhesiu (mm)

Taula 98. Cicle de delaminació "Tipus A" segons UNE-EN 391:2002 (AENOR, 2002f)

Factors d'assaig	Segments del cicle A				
	Immersiò sota buit	Immersiò sota pressió	Immersiò sota buit	Immersiò sota pressió	Assecat
Segment	1	2	3	4	5
Pressió absoluta (kPa)	15 a 30	600 a 700	15 a 30	600 a 700	Atmosfèrica
Duració (min)	5	60	5	60	1260 a 1320
Humitat relativa (%)	Immersiò en aigua	Immersiò en aigua	Immersiò en aigua	Immersiò en aigua	15
Temperatura (°C)	10 a 20	10 a 20	10 a 20	10 a 20	60 a 70
Velocitat de l'aire (m/s)	---	---	---	---	2 a 3
Disposició de les provetes	Separades per rastells. En total contacte amb l'aigua	Separades per rastells. En total contacte amb l'aigua	Separades per rastells. En total contacte amb l'aigua	Separades per rastells. En total contacte amb l'aigua	Superfícies d'avaluació paral·leles a l'aire i separades almenys 50 mm

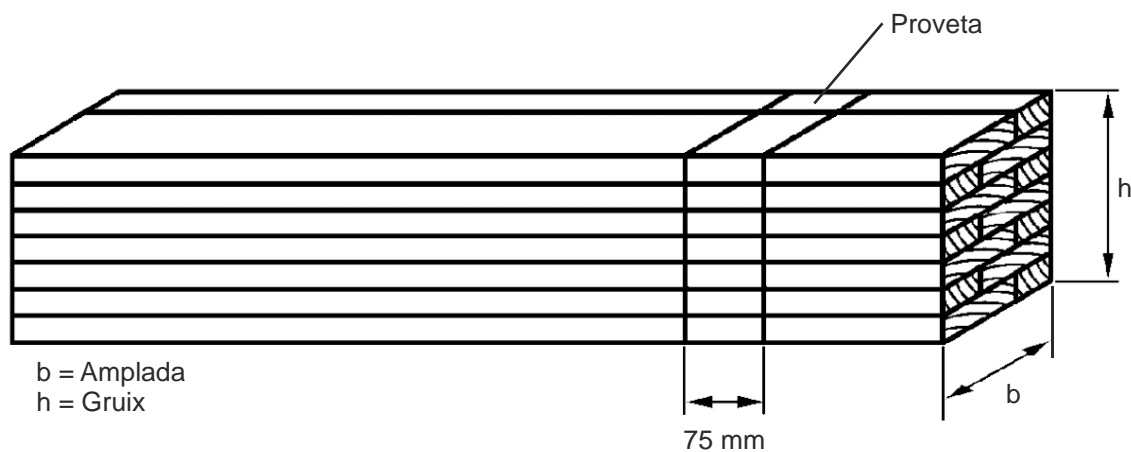


Figura 176. Proveta de delaminació segons UNE-EN 391:2002 (AENOR, 2002g)

4. Resultats

4.1. Resistència a flexió estàtica de les unions dentades

D'acord amb la classe resistent assignada a la fusta massissa al Capítol IV, segons la norma UNE-EN 338:2010 (AENOR, 2010a) la resistència característica a tracció paral·lela a les fibres és 14 N/mm^2 . Per tant, la resistència característica a flexió de les unions dentades almenys ha de complir que:

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 \cdot f_{t,0,1,k} = 8 + 1,4 \cdot 14 = 27,6 \text{ N/mm}^2 \quad (43)$$

Per valorar experimentalment aquesta propietat segons els criteris de la norma UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a), cal observar si la resistència dels empalmaments està dins del 20% del valor previst per l'equació anterior. Com que fou així, només calgué efectuar cent assaigs enlloc de dos-cents. Els resultats dels assaigs es mostren a la Taula 99.

Taula 99. Resistència a flexió de les làmines de castanyer segons UNE-EN 408:2011

Provetes		Fusta massissa		Fusta empalmada	
		Primera qualitat	Segona qualitat	MUF 5/15	MUF 6/10
Quantitat (ut)		40	40	40	100
Resistència MOR (N/mm ²)	Mínim	42,17	30,33	37,46	38,25
	Màxim	108,34	102,72	72,77	71,74
	Desviació estàndard	13,57	15,83	8,86	6,90
	Cinquè percentil ¹	63,79	45,54	43,11	43,90
	Mitjana	89,65	75,57	58,62	52,78

¹ Resistència característica de les unions dentades

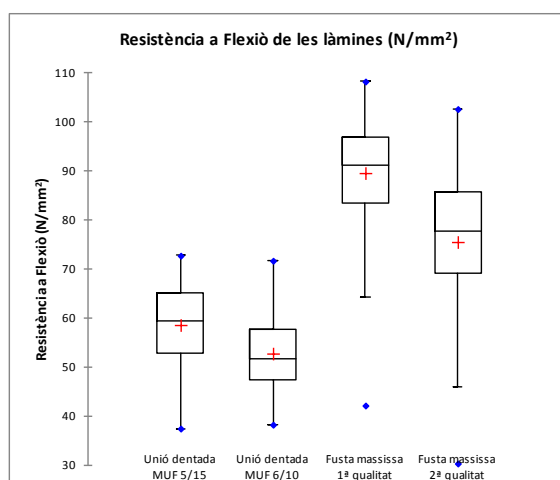
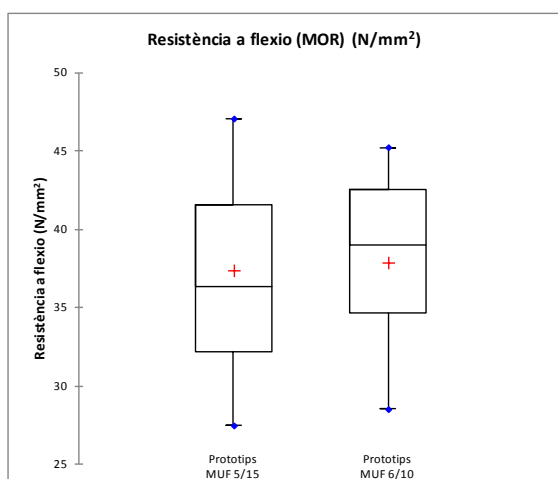
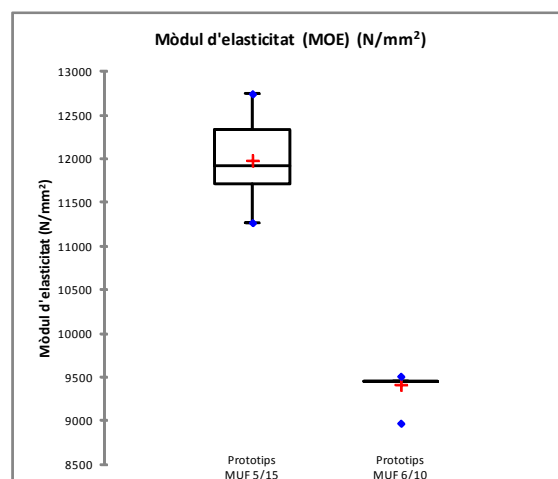


Figura 177. Resistència a flexió de les làmines de fusta massissa i empalmada

4.2. Resistència a flexió estàtica de les bigues prototip

Taula 100. Classe resistent dels prototips segons UNE-EN 1194:1999

Provetes		Prototips	
		MUF 5/15	MUF 6/10
Quantitat (ut)	Bigues	12	18
Resistència. MOR (N/mm ²)	Mínim	27,46	28,50
	Màxim	47,06	45,23
	Desviació estàndard	6,40	5,41
	Cinquè percentil	29,98	29,31
	Mitjana	37,37	37,86
	Classe resistent	GL 36	GL 36
Rigidesa. MOE (N/mm ²)	Mínim	11274,6	8976,2
	Màxim	12750,6	9514,2
	Desviació estàndard	419,3	117,1
	Cinquè percentil	11448,1	9273,7
	Mitjana	11987,5	9419,1
	Classe resistent	GL 24	Fora de rang
Classe resistent resultant		GL 24	Fora de rang


Figura 178. Resistència a flexió de les línies bigues prototip

Figura 179. Mòdul d'elasticitat de les bigues prototip

4.3. Resistència a esforç tallant de la línia de cola

Taula 101. Resistència a esforç tallant: UNE-EN 386:2002 i UNE-EN 392:1995

Provetes		Prototips	
		MUF 5/15	MUF 6/10
Quantitat (ut)	Bigues	12	18
	Tallants	60	108
Resistència (N/mm ²)	Mínim	2,61	3,20
	Màxim	9,25	11,23
	Desviació estàndard	1,37	1,56
	Cinquè percentil	3,82	5,02
	Mitjana	5,83	7,93
	Valor mínim requerit	6	6
Fallada per fusta (%)	Mínim	15	5
	Màxim	100	100
	Desviació estàndard	15,25	18,13
	Cinquè percentil	84,50	56,75
	Mitjana	95,28	91,90
	Valor mínim requerit ¹	91,5	72,63
Compliment		Manca resistència	Sí

¹ Si la resistència és inferior a 6 N/mm² la fallada per fusta ha de ser del 100%

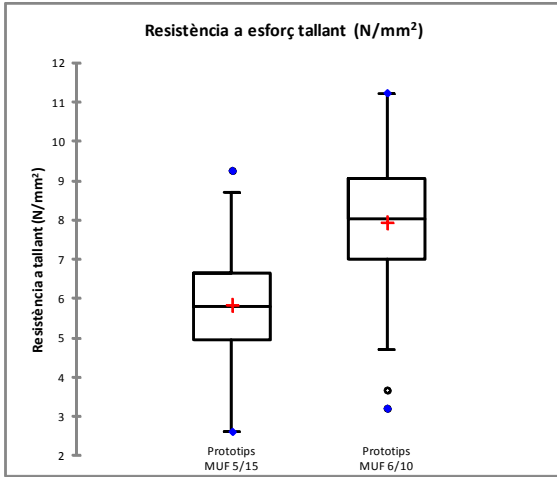


Figura 180. Resistència a esforç tallant de les línies de cola

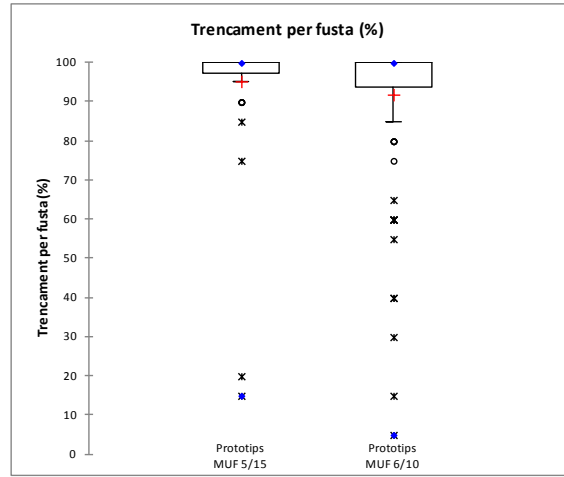


Figura 181. Percentatge de trencament per fusta de les línies de cola

4.4. Resistència a la delaminació de les línies de cola

Taula 102. Resistència a la delaminació segons UNE-EN 302-2:2005

Delaminació		Prototips			
		MUF 5/15	MUF 6/10	Total	
Provetes. Secció completa	Secció completa (ut)	12	18	30	
	D _{total} (%)	Mínim	26,0	19,0	19,0
		Màxim	84,9	59,6	84,9
		Desviació estàndard	17,3	13,8	18,8
		Cinquè percentil	30,2	22,4	23,0
Mitjana	58,6	35,9	44,9		
Línies de cola	Línia de cola (ut)	60	108	168	
	D _{max} (%)	Mínim	47,2	40,0	40,0
		Màxim	100,0	86,7	100,0
		Desviació estàndard	18,6	14,2	18,4
		Cinquè percentil	52,4	46,1	47,2
Mitjana	83,0	64,0	71,6		

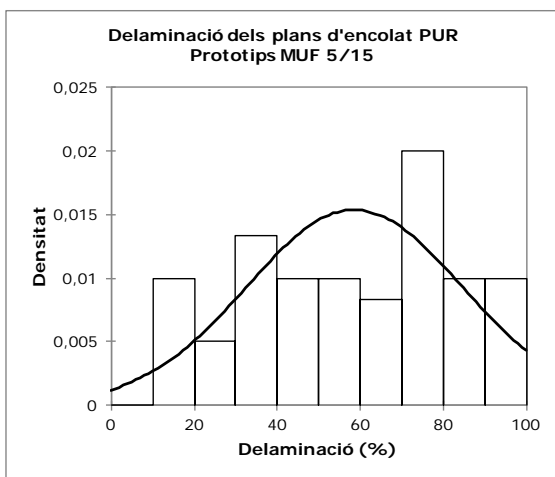


Figura 182. Resistència a delaminació dels prototips MUF 5/15

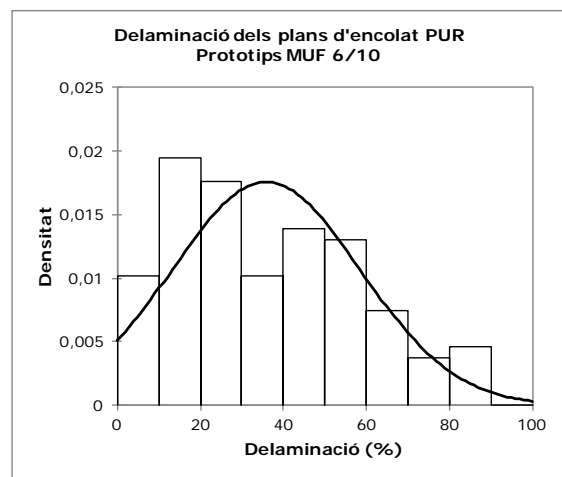


Figura 183. Percentatge de trencament per fusta de les línies de cola MUF 6/10

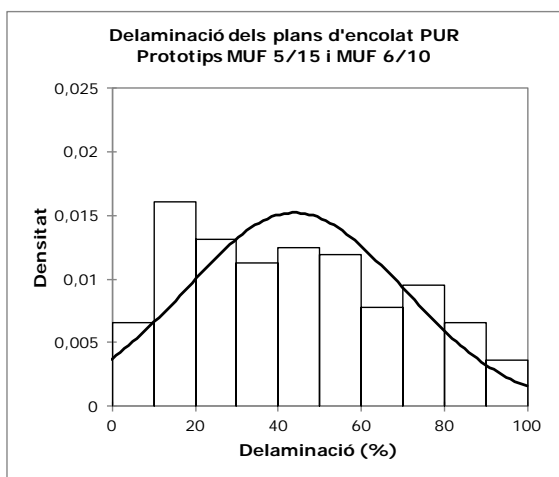


Figura 184. Percentatge de delaminació dels prototips MUF 5/15 i MUF 6/10

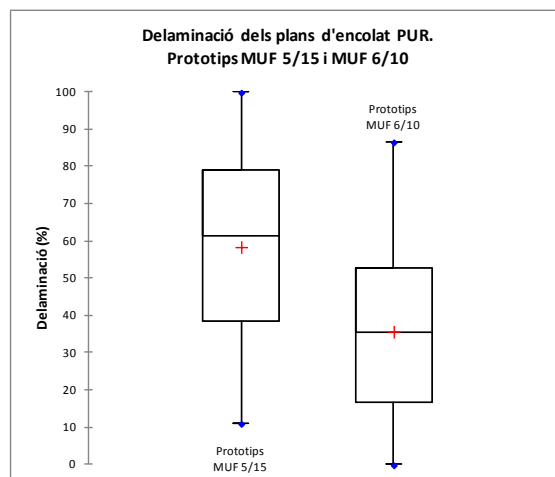


Figura 185. Percentatge de delaminació dels prototips MUF 5/15 i MUF 6/10

5. Discussió

5.1. Consideracions sobre els prototips analitzats

5.1.1. Resistència a flexió estàtica de les unions dentades

Quan es reconstrueix la fusta per eliminar-ne les singularitats, idealment hauria d'assolir una resistència semblant a la de la fusta lliure de defectes. Ara bé, l'empalmament de les làmines mitjançant unions dentades no deixa de ser una nova singularitat que, en tot cas, hauria de resultar almenys més resistent que les que s'han eliminat. Per analitzar aquesta hipòtesi s'ha contrastat la resistència dels lots de fusta massissa amb els de fusta empalmada.

En primer lloc s'ha comprovat la normalitat de les quatre mostres. Totes han resultat normals per a un nivell de significació $\alpha=0,05$, exceptuant la mostra de fusta massissa de primera qualitat que ho ha estat a un nivell de significació $\alpha=0,01$. Ara bé, com que les mostres no presentaren la mateixa variància segons el test de Bartlett i no es van poder transformar les dades de forma satisfactòria, es va recórrer a un test F de Fischer i a un anàlisi de variància per maximitzar la potència de l'anàlisi. El resultat indica que els dos lots de fusta massissa, per una banda i els dos lots de fusta empalmada, per l'altra, tenen igual variància entre ells.

Taula 103. Comparacions de variància per parells F de Fischer

Grups	Comparació de la variància			
	Primera qualitat	Segona qualitat	MUF 5/15	MUF 6/10
Primera qualitat	---	Igual	Diferent	Diferent
Segona qualitat	Igual	---	Diferent	Diferent
MUF 5/15	Diferent	Diferent	---	Igual
MUF 6/10	Diferent	Diferent	Igual	---

$\alpha=0,05$

Així doncs, es van córrer dos ANOVA: un entre els dos lots de fusta massissa i un altre entre els dos lots de fusta empalmada. La fusta massissa de primera qualitat resultà significativament més resistent que la fusta massissa de segona qualitat ($p<0,0001$), concretament la diferència mitjana voltà el 19%. Pel que fa a les diferències entre els prototips de fusta empalmada, també resultaren significatives ($p<0,0001$). Els lots MUF 5/15 foren un 11% més resistents que els MUF 6/10. La

resistència dels empalmaments respecte la fusta massissa assolí, com a mínim, un 59% de la resistència de la fusta massissa de primera qualitat.

5.1.2. Resistència a flexió estàtica de les bigues prototip

La capacitat resistent dels dos lots és pràcticament igual, però el mòdul d'elasticitat dels prototips MUF 5/15 és de mitjana més de 2500 N/mm² superior als MUF 6/10. La manca de rigidesa limita la classe resistent que es pot assignar als prototips, especialment en el cas dels MUF 6/10, en els quals, fins i tot, és impossible assignar-ne cap (Veure Taula 100).

Comprovats per al MOR els supòsits de normalitat amb el test de Lilliefors ($p=0,637$) i d'homoscedasticitat amb el test de Levene ($p=0,552$), l'anàlisi de variància indica que no existeixen diferències significatives entre el lot MUF 5/15 i MUF 6/10 ($p=0,820$). En canvi, en el cas del MOE, malgrat els resultats dels dos lots segueixen una distribució normal ($p=0,870$), les dades no són homoscedàstiques ($p<0,0001$). En aquest cas, la prova de Mann-Whitney indica que els dos lots es van comportar de forma diferent ($p<0,0001$).

Els prototips assajats han demostrat una classe resistent potencial GL 36h, però no l'ha assolit malgrat reduir la variabilitat en el comportament del material respecte la fusta massissa. Es pot dir que les bigues prototip MUF 5/15 són tan resistents com les MUF 6/10, però el MOE de les bigues MUF 5/15 és molt superior a les MUF 6/10. Comparant els resultats obtinguts amb els de les làmines lliures de defectes i amb la fusta massissa estructural caracteritzada al Capítol IV, el comportament de les unions dentades i les làmines explica la manca de millora de la capacitat resistent de la dels prototips de fusta laminada encolada (Veure Taula 104).

Taula 104. Comparació de la resistència característica a flexió

Material		Resistència característica a flexió		Mòdul d'elasticitat característic	
		N/mm ²	Diferència amb D24 (%)	N/mm ²	Diferència amb D24 (%)
Fusta massissa estructural D24 ¹		33,4	0,0	11118	0,0
Làmines lliure de defectes	Primera qualitat	63,8	91,0	---	---
	Segona qualitat	45,5	36,2	---	---
	MUF 5/15	43,11	29,1	---	---
	MUF 6/10	43,11	29,1	---	---
Fusta laminada encolada	MUF 5/15	29,98	-10,2	11987	7,8
	MUF 6/10	29,31	-12,2	9419	-15,3

¹ Capítol IV

La resistència de les unions dentades ha influït molt significativament sobre la resistència a flexió estàtica de tot l'element. A la part de la secció per sota de la fibra neutra, les làmines treballen a tracció i si falla la unió l'element es trenca. Per aquest motiu la unió afecta, principalment, sobre el MOR. Les làmines amb unió dentada superen en 13 N/mm^2 la resistència a flexió de les bigues, i això indica que els empalmaments no van funcionar de la mateixa forma en els dos casos.

El gruix de les làmines afecta a la flexibilitat de forma significativa. De fet, és sabut que com més fines són les làmines, més elàstiques són les bigues laminades i més es poden corbar. Segons Sanchez Mazaría (1992) les làmines de gruix inferior a 25 mm s'empren per fabricar bigues corbades, i s'estima que el radi de curvatura màxim està entre cent i cent vint-i-cinc cops el gruix de la làmina (Bergman *et al.*; 2010). Això concorda amb el fet que la rigidesa de les provetes de petita dimensió de castanyer és un 50% inferior a les de mida estructural segons l'article publicat per Vázquez de Parga *et al.* (1997). Per tant, el gruix de 20 mm de les làmines de les bigues prototip MUF 6/10 ha provocat una davallada molt important en la rigidesa de les bigues respecte les làmines de gruix 22 mm, i això sembla indicar un possible límit pel que fa al gruix de les làmines de castanyer per fabricar bigues rectes de fusta laminada encolada.

Malauradament, amb els experiments duts a terme, no es podria recórrer a un DITE per homologar els prototips amb l'estàndard UNE-EN 14080:2006 (AENOR, 2006a), ja que la mostra assajada no seria suficientment representativa. La norma demana que el nombre mínim d'elements sigui trenta i que hagin estat seleccionats entre almenys tres lots. En el nostre cas, les bigues encomanades pertanyien només a dos lots i, inesperadament e inexplicablement, presentaven característiques diferents. Així doncs, seria necessari repetir aquesta part del procés experimental si es vol caracteritzar el material. Ara bé, la informació recollida serveix de base per elaborar nous prototips de característiques superiors.

5.1.3. Resistència a esforç tallant de la línia de cola

Des d'un punt de vista normatiu la resistència a tallant dels dos lots ha resultat ser diferent. Mentre el lot MUF 5/15 no supera els 6 N/mm^2 requerits per considerar vàlida la unió encolada, el lot MUF 6/10 els supera àmpliament. En canvi, en els dos casos el percentatge de fallada per fusta és acceptable. Per analitzar la qualitat dels

plans d'encolat cal tenir en compte el percentatge de fallada per fusta i la càrrega de ruptura (Veure Figura 186).

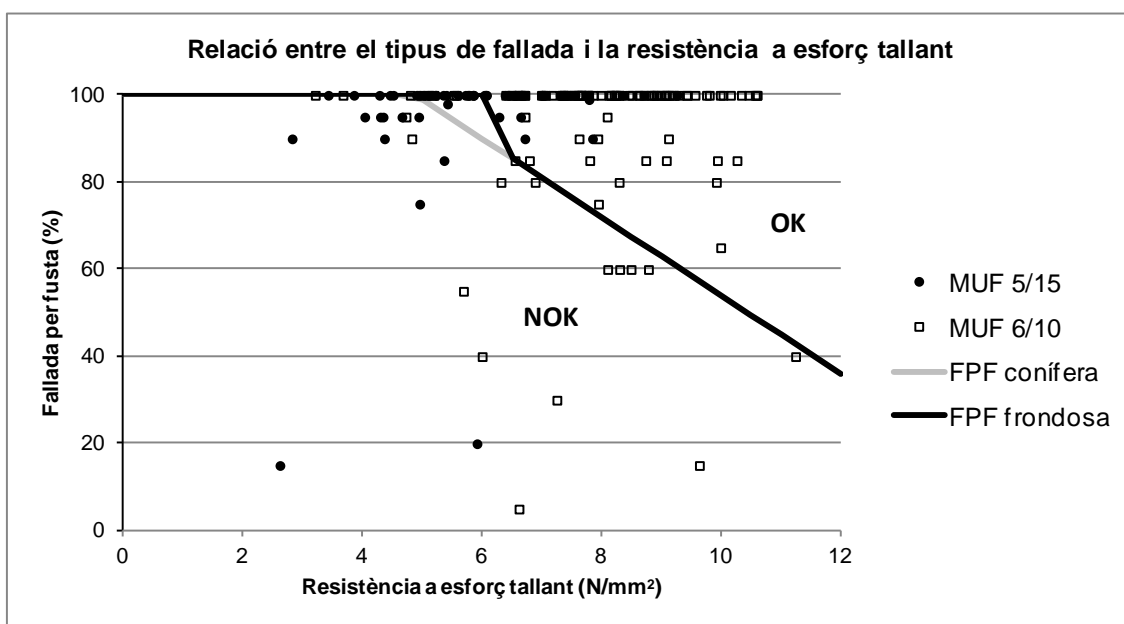


Figura 186. Resistència a esforç tallant i tipus de fallada. Les unions encolades de sobre les línies FPF (Fallada per fusta) són aptes (OK), mentre que les situades per sota demostren un comportament deficient (NOK). FPF correspon al llindar de fallada per fusta permès a coníferes i frondoses

La distribució de les dades de fallada per fusta no segueix una distribució normal ($p < 0,0001$), i el test no paramètric de Mann-Whitney determinà que no existeixen diferències significatives en la morfologia dels trencaments entre els prototips MUF 5/15 i MUF 6/10 ($p = 0,614$). En canvi, pel que fa a la resistència a esforç tallant, el test de Lilliefors considera les mostres com a normals ($p_{\text{MUF5/15}} = 0,75$; $p_{\text{MUF6/10}} = 0,472$), i també homoscedàstiques ($p = 0,303$). El test ANOVA trobà diferències molt significatives en la resistència a favor del lot MUF 6/10 ($p < 0,0001$).

Per esbrinar el perquè d'aquest comportament, es va analitzar per separat la resistència assolida per les provetes que havien trencat únicament per fusta. És a dir, les que la cola no havia tingut cap influència en la ruptura. D'aquesta forma s'elimina la influència de l'adhesiu i es pot estimar el potencial resistent de la fusta. El resultat d'aquest càlcul mostra que la resistència a tallant del castanyer amb què es van fabricar els prototips MUF 6/10 estigué al voltant de $7,9 \text{ N/mm}^2$, i aquest valor concorda amb els publicats per Peraza Sánchez *et al.* (2004) ($7,7\text{-}9,3 \text{ N/mm}^2$), Fernández-Golfín *et al.* (1995) ($8,82\text{-}10,5 \text{ N/mm}^2$), i Ünsal & Kantay (2009) ($8,0\text{-}9,5 \text{ N/mm}^2$) tot i estar per la banda baixa del rang. En canvi el lot MUF 5/15 presenta un problema de resistència de la fusta i supera per molt poc els 6 N/mm^2 exigits per la normativa (Veure Taula 105).

Taula 105. Resistència a esforç tallant segons la fallada per fusta

Tipus de provetes segons fallada per fusta	Prototip					
	MUF 5/15			MUF 6/10		
	Proporció de provetes (%)	Resistència		Proporció de provetes (%)	Resistència	
Mitjana (N/mm ²)		Increment ¹ (%)	Mitjana (N/mm ²)		Increment ¹ (%)	
Fallada entre 0% i 100%	100	5,83	3,44	100	7,93	0,13
Fallada només 100%	71,7	6,07		72,2	7,94	

¹ Increment de la resistència al descartar les provetes que fallaren per cola

La diferència d'incloure o excloure provetes que han fallat per cola en el càlcul de l'esforç tallant és molt petita en els dos casos i, per tant, els encolats han funcionat raonablement bé. De fet, els resultats mostren que com més gran ha estat la resistència a tallant, major ha estat el percentatge de fallada per cola, i això significa que com més elevada ha estat la càrrega de ruptura, més a prop ha estat el pla d'encolat al límit d'adherència. Ara bé, els prototips MUF 5/15 presenten un problema important derivat de la manca de resistència a esforç tallant de la fusta. Cal tenir en compte que la normativa permet valors de resistència entre 4 i 6 N/mm² per a coníferes i pollanques sempre que no apareguin fallades per cola, i només s'accepten fallades per cola si es superen els 6 N/mm² de mitjana. Per tant, caldria un mètode d'adhesió molt efectiu per superar el llindar que exigeix la norma UNE-EN 386:2002 (AENOR, 2002e), això no és senzill ja que el castanyer és una fusta que presenta certes dificultats en l'encolat per la presència de tanins, l'acidesa elevada, la densitat mitjana i l'assecat lent i irregular (Elbez, 1991).

5.1.4. Resistència a la delaminació de les línies de cola

La resistència mitjana a la delaminació dels plans d'encolat ha resultat més elevada en els prototips MUF 6/10 que en els MUF 5/15, però en els dos s'han observat percentatges de delaminació molt variables i, fins i tot, han arribat a ser totals en algunes provetes MUF 5/15. La distribució dels valors al llarg de la funció de densitat ha estat força regular (Veure figures de la pàgina 309). El coeficient de variabilitat de les línies de cola ha estat del 22,4% en els prototips MUF 5/15, del 22,2% en els MUF 6/10 (Veure Taula 102).

Els resultats dels dos lots presenten una distribució normal segons la prova de Lilliefors ($\alpha=0,01$), són homoscedàstics segons la F de Fischer ($\alpha=0,05$), i la suma de quadrats tipus III de l'ANOVA realitzat indica que els dos lots són significativament diferents entre ells ($p<0,0001$). Així doncs, és pot afirmar que els plans de cola del lot MUF 5/15 són significativament menys resistents que els del

lot MUF 6/10. Per tant, tenint en compte que els dos lots estan fabricats amb la mateixa fusta i adhesiu, es pot pensar que altres factors aliens als materials han influït significativament en la resistència de la unió.

En les provetes assajades s'observen delaminacions de totes les intensitats: pocs plans han superat el cicle de delaminació sense clivellar-se, en la majoria s'observen desencolats de poca profunditat, i en dos d'ells fins i tot apareixen separacions completes provocades per clivelles pregones. Per valorar la resistència al estrès provocat pels canvis d'humitat i temperatura es tingueren en compte els següents criteris:

- **UNE-EN 301:2007:** Per a adhesius tipus I, la màxima delaminació de cada proveta ha de ser inferior al 5%.
- **ÖNORM-EN 14080:2005:** El percentatge de delaminació total permès en una proveta després dos cicles tipus "A" o "B" no pot ser superior al 5%. Si s'excedeix aquest valor, cal efectuar un tercer cicle i el resultat final no pot superar el 10%. El percentatge màxim de delaminació d'una sola línia de cola d'una proveta ha de ser inferior o igual al 40%.
- **Kemmsies & Lind (2002):** Els autors consideren que els plans d'encolat superen el cicle tipus B si la delaminació de les provetes és inferior al 4% després d'un cicle i del 8% després de dos cicles. Si compleix aquest requisits el producte es pot comercialitzar.

Així doncs, la resistència a la delaminació dels plans d'encolat ha resultat molt deficient i els prototips no poden suportar amb garanties suficients les condicions d'intempèrie. Per tant, cal emprar un altre sistema d'encolat si es vol aprofitar la durabilitat natural del duramen de castanyer tal com està recollida a la norma UNE-EN 350-2:1995 (AENOR, 1995b).

6. Conclusions

Arran del que s'ha exposat s'obtenen les següents conclusions:

- **Les unions dentades** assajades presenten una **resistència suficient** segons les exigències de la normativa, però la pèrdua de resistència en els empalmaments respecte la fusta massissa de primera qualitat pot arribar a ser del 41%.
- La **fusta laminada encolada de castanyer** potencialment pot assolir una classe resistent **GL36** si es resolen els problemes de flexibilitat detectats al emprar làmines excessivament fines.
- La **resistència a esforç tallant** de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català està entre **6,0 N/mm²** i **7,9 N/mm²**. Per aquest motiu, cal emprar un encolat que resisteixi almenys 6 N/mm² en tots els casos.
- El **sistema d'encolat aplicat** no supera el test de delaminació, i **no** pot ser emprat amb garanties a la **intempèrie**. Cal cercar un adhesiu compatible amb el castanyer que sigui capaç de suportar humectacions extremes si es vol emprar aquest material estructural a l'exterior.

En conseqüència, caldria centrar futures línies d'investigació en millorar el disseny del material, optimitzant la geometria de les unions dentades, la resistència de l'encolat de les línies de cola, el comportament en vers als canvis d'humitat i el gruix de les làmines per obtenir un MOE equilibrat amb el MOR, i així maximitzar la classe resistent del material.

7. Bibliografía

ALBERT, L.; NÉMETH, Z. I.; HALÁSZ, G.; KOLOSZÁR, J.; VARGA, S.; TAKÁCS, L. (1999). "Radial variation of pH and buffer capacity in the red-hartwooded beech (*Fagus sylvatica* L.) wood". *Holz als Roh- und Werkstoff*, núm. 57: p. 75-76.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995a). *Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: guía para los principios de ensayo y clasificación de la durabilidad natural de la madera*. UNE-EN 350-1:1995. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995b). *Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa*. UNE-EN 350-2:1995. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995c). *Madera laminada encolada. Dimensiones y tolerancias*. UNE-EN 390:1995. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995d). *Madera laminada encolada. Ensayo de esfuerzo cortante en líneas de adhesivo*. UNE-EN 392:1995. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999). *Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos*. UNE-EN 1194:1999. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002a). *Adhesivos para estructuras resistentes de madera. Adhesivos de caseína. Clasificación y requisitos de aptitud a la función*. UNE-EN 12436:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002b). *Clasificación de adhesivos termoendurecibles para madera de uso no estructural*. UNE-EN 12765:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002c). *Clasificación de adhesivos termoplásticos para madera de uso no estructural*. UNE-EN 204:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002d). *Empalmes por unión dentada en madera estructural. Especificaciones y requisitos mínimos de fabricación*. UNE-EN 385:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002e). *Madera laminada encolada. Especificaciones y requisitos de fabricación*. UNE-EN 386:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002f). *Madera laminada encolada. Empalmes mediante uniones dentadas de grandes dimensiones. Especificaciones y requisitos mínimos de fabricación*. UNE-EN 387:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002g). *Madera laminada encolada. Ensayo de delaminación de líneas de adhesivo*. UNE-EN 391:2002. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005). *Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación de la resistencia a la delaminación*. UNE-EN 302-2:2005. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2006a). *Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Requisitos*. UNE-EN 14080:2006. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2006b). *Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación*. UNE-EN 1995-1-1:2006. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2006c). *Tableros derivados de la madera. Determinación de la emisión de formaldehído. Parte 1: Emisión de formaldehído por el método de la cámara*. UNE-EN 717-1:2006. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2007). *Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento*. UNE-EN 301:2007. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2008a). *Adhesivos. Términos y definiciones*. UNE-EN 923:2006+A1:2008. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2008b). *Adhesivos de poliuretano de un componente para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento*. UNE-EN 15425:2008. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2009). *Madera estructural. Madera estructural tratada con un producto protector contra los ataques biológicos*. UNE-EN 15228:2009. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2010a). *Madera estructural. Clases resistentes*. UNE-EN 338:2010. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2010b). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. UNE-EN 384:2010. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2012). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. UNE-EN 408:2011+A1:2012. Madrid: AENOR.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (2011). *Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber*. prEN 14080:2011. La Plaine Saint-Denis Cedex: AFNOR.

AUSTRIAN STANDARDS PLUS GMBH (2005). *Holzbauwerke - Brettschichtholz – Anforderungen*. ÖNORM-EN 14080:2005. Wien: Austrian Standards Plus.

BERGMAN, R.; CAI, Z.; CARLL, C. G.; CLAUSEN, C. A.; DIETENBERGER, M. A.; FALK, R. H.; FRIHART, C. R.; GLASS, S. V.; HUNT, C. G.; IBACH, R. E.; KRETSCHMANN, D. E.; RAMMER, D. R.; ROSS, R. J.; STARK, N. M. (2010). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Centennial Edition. Madison [Wisconsin, USA]. United States Department of Agriculture (USDA). Forest Products Laboratory.

COGNARD, J. (2000). *Science et technologie du collage*. Lausanne [Confederació Helvètica]: Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 2-88074-410-5.

COMUNITAT ECONÒMICA EUROPEA (1989). Directiva del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción (89/106/CEE).

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. (2008a). "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Article in Press, Corrected Proof.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H.; HUTCHINSON, A. (2008b). "A review of adhesion promotion techniques for solid timber substrates". *The Journal of Adhesion*, núm. 84: p. 502-529.

DAVIS, G. (1997). "The performance of adhesive for structural timbers". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 17, núm. 3: p. 247-255.

ELBEZ, G. (1991). *Le collage du bois*. Paris [França]: Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. ISBN 2-85684-003-5.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I., GUTIÉRREZ OLIVA, A., BAONZA MERINO, M. V., DÍEZ BARRA, M.R. (1995). "Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española". *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 4, núm. 2: p. 251-261.

FOLLRICH, J.; TEISCHINGER, A.; GINDL, W.; MÜLLER, U. (2007). "Effect of grain angle on shear strength of glued end grain to flat grain joints of defect-free softwood timber". *Wood Science and Technology*, vol. 41, núm. 6: p. 501-509.

GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA ORAMAS, C.; DE PALACIOS DE PALACIOS, P. (2002). *La madera y su tecnología*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. AITIM. ISBN 84-8476-036-7.

GIORDANO, G. (1983). *Tecnologia del legno. Volume II: parte prima. Le utilizzazioni industriali*. Seconda edizione. Torino [Italia]: Unione Tipografico-Editrice Torinese. ISBN: 88-02-03872-4.

JIMÉNEZ PERIS, J.; CUEVAS ESPINOSA, I.; MORALES MÉNDEZ, E. (2006). *Madera laminada encolada estructural (MLE): resistencia al fuego y características mecánicas*. Badajoz: Editorial @becedario. ISBN: 84-96560-06-6.

KEMMSIES, M.; LIND, P. (2002). *Delamination performed on glulam according to prEN 391-method B*. Casco Products. Norsk Treteknisk Institutt.

LEE, D.; LEE, M.J.; SON, D.; PARK, B. (2006). "Adhesive performance of woods treated with alternative preservatives". *Wood Science and Technology*, vol. 40, núm. 3: p. 228-236.

LEE, S.; WU Q.; STRICKLAND, B. (2001). "The influence of flake chemical properties and zinc borate on gel time of phenolic resin for oriented strandboard". *Wood and Fiber Science*, vol. 33, núm. 3: p. 425-436.

LIESA, F.; BILURBINA, L. (1990). *Adhesivos industriales*. Barcelona: Marcombo S.A.. ISBN: 84-267-0785-8.

MILITZ, H.; BUSETTO, D.; HAPLA, F. (2003). "Investigation on natural durability and sorption properties of italian Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) from coppice stands". *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 61: p. 133-141.

ÖZÇİFÇİ, A.; YAPICI, F. (2008). "Effects of machining method and grain orientation on the bonding strenght of some wood species". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 202, núm. 1: p. 353-358.

PASSIALIS, C.; VOULGARIDIS, E.; ADAMOPOULOS, S.; MATSOUKA, M. (2008). "Extractives, acidity, buffering capacity, ash and inorganic elements of black locust wood and bark of different clones and origin". *Holz als Roh- und Werkstoff*, núm. 66: p. 395-400.

PERAZA SÁNCHEZ, F. [et al.]. (2004). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. Madrid: AITIM. ISBN 84-87381.

PIZZI, A.; DINWOODIE, J. M.; FRISCH, K. C.; GOULDING, T. M.; HORST, H. N.; RUMAO, L. P. (1983). *Wood adhesives: chemistry and technology. Volume 1*. 10th ed. New York [New York, USA]. Marcel Dekker Inc. ISBN: 0-8247-1579-9.

PROPERZI, M.; PIZZI, A.; UZIELLI, L. (2003). "Comparative wet wood glueing performance of different types of glulam wood adhesives". *Holz als Roh- und Werkstoff*, núm. 61: p. 77-78.

RHUDE, A.J. (1996). "Structural glued laminated timber: History of its origins and early development". *Forest Products Journal*. Vol: 46, núm. 1: p. 15-22.

ROWELL, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton [Florida, USA]. CRC Press. ISBN: 0-8493-1588-3.

SÁNCHEZ MAZARÍA, A. (1992). *La madera laminada encolada*. Madrid: Editorial Fundación Escuela de edificación. ISBN 84-86957-44-3.

SOMOZA VEIGA, L. (1986). "La madera laminada encolada: historia y definición". *Boletín Académico. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña*, núm. 5: p.41-45.

ÜNSAL, Ö; KANTAY, R. (2009). "Drying and using properties of chestnut wood". A: *International Workshop on Chestnut Management in Mediterranean Countries - Problems and Prospects*. Leuven: International Society for Horticultural Science. (Acta horticultrae; 815). ISBN 978-90-66051-78-2.

UYSAL, B. (2005). "Influence of Pretreatment on Shear Strength of Various wood species". *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 100, núm. 1: p. 245-252.

VÁZQUEZ DE PARGA SALLERAS, A. ; MÉNDEZ LODOS, M.; GONZÁLEZ VÁZQUEZ, X. P.; CARREIRA PÉREZ, Z.C. (1997) "Caracterización y estudio del modulo de elasticidad en la madera de castaño (*Castanea sativa*) aserrada en Galicia". A: I CONGRESO FORESTAL HISPANOLUSO. II CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL. IRATI 97. Montes del futuro: Respuestas ante un mundo en cambio. Pamplona, 23-27 de juny, 1997. Pamplona: Gobierno de Navarra, Tomo VI, mesa 7, p. 351-356.

YILDIZ, U. C.; TEMIZ, A.; GEZER, E. D.; YILDIZ, S. (2004). "Effects of the wood preservatives on mechanical properties of yellow pine (*Pinus sylvestris* L.) wood". *Building and Environment*, núm. 39: p. 1071-1075.

Annexos

Annex de fitxes tècniques

Cola de Melamina Urea Formaldehid

Casco Adhesives
Market Support

Hoja Técnica



AkzoNobel
Tomorrow's Answers Today

Sistema de Viga Laminada MUF 1242 / 2542

- Largo tiempo de almacenaje

Sistema de luz coloreada para vigas laminadas y "Finger Joints" (empalmes de uniones dentadas) en madera estructural. Aplicación de mezcla de cola y endurecedor.

Especificación del Producto

	1242			2542		
Producto	Cola MUF			Endurecedor		
Aspecto	Líquido			Líquido		
Color	Opaco/Bianco			Crema (amarillo claro)		
Viscosidad <i>(en el momento de la producción)</i>	10000 - 20000mPas <i>(Brookfield LVT, sp 4, 12 rpm, 25°C / 77°F)</i>			10000 - 20000 mPas <i>(Brookfield LVT, sp 4, 12 rpm, 25°C / 77°F)</i>		
pH <i>(en el momento de la producción)</i>	9,5 – 11,0 (a 25°C / 77°F)			0,8 – 1,5 (a 25°C / 77°F)		
Extracto Seco	66 - 69%			N.a.		
Tiempo de almacenaje (meses)	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F
	---	8 meses	4 meses	---	6 meses	---
Condiciones de almacenaje	Temperatura de almacenaje: +15°C / 59°F a +25°C / 77°F. Se permiten únicamente exposiciones de corta duración con temperaturas por debajo a +10°C / 50°F o superiores a +30°C / 86°F. Si este producto se congelara no puede ser descongelado y utilizado debido a cambios irreversibles en sus propiedades.			Temperatura de almacenaje: +15°C / 59°F a +25°C / 77°F. Se permiten únicamente exposiciones de corta duración con temperaturas por debajo a +10°C / 50°F o superiores a +30°C / 86°F. Este producto congelado o descongelado no puede ser utilizado debido a cambios irreversibles en sus propiedades.		
Información del Formaldehído	Formaldehído libre <0,7%			N.a.		
Densidad	Aprox. 1250 kg/m ³			Aprox. 1340 kg/m ³		
Propiedades de la junta de cola	Cumplen con las exigencias de las normas EN 301 (para los tipos de cola I y II, clases de servicio 1, 2 y 3), y DIN 68141.					
Certificaciones	La cola MUF 1242 con el endurecedor 2542 ha sido aprobada por la Norsk Treteknis Institutt (NTI), Noruega, Materialprüfungsanstalt					

Versión: 04 (2009.03.05)

Razón del cambio: Información sobre el finger-joint

Casco Adhesives

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
High Point, USA +1 336 841 5111
Singapore +65 6762 2088
www.cascoadhesives.com

1



Universität Stuttgart,- Otto - Graf - Institut (MPA), Alemania, y SKH/KOMO (DHBC No.32389), Holanda para la producción de construcciones que soportan carga.

La cola 1242 con el endurecedor 2542 cumple con las condiciones de la norma EN 301 para la cola de tipo I, clase de servicio 1, 2, 3 según la norma EN 386 así como las condiciones DIN 68141 para la producción de construcciones que soportan carga según la DIN 1052.

Información sobre las operaciones de encolado

Aplicaciones Vigas Laminadas

Tipo de prensa Prensa Caliente, Prensa Fría

Temperatura de prensa La temperatura mínima de la prensa es de 20°C / 68°F.

Tiempo de prensado	Temperatura de la junta de cola	Ratio de mezcla 100:20
	20°C / 68°F	10h
	30°C / 86°F	3h
	Temperatura de la junta de cola	Ratio de mezcla 100:25
20°C / 68°F	9h	
30°C / 86°F	2h 45'	

Vida útil de la mezcla	Ratio de mezcla	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F
	100:20	2h30'	1h40'	50'
	100:25	2h	1h20'	40'

Presión
 Mínimo 0,5 MPa para madera conifera.
 Mínimo 1,0 MPa para madera frondosa.
 En producción de vigas laminadas:
 Mínimo 0,7 MPa para lamellas de 33 mm
 Mínimo 0,9 MPa para lamellas de 45 mm

Tiempo de ensamblaje (20°C / 68°F)	Condiciones de encolado	Ratio de mezcla	Max. cerrado
	250 g/m ² / 51 lbs/1000 ft ²	100:20	1h20'
	400 g/m ² / 82 lbs/1000 ft ²	100:20	1h50'
	250 g/m ² / 51 lbs/1000 ft ²	100:25	1h10'
	400 g/m ² / 51 lbs/1000 ft ²	100:25	1h40'

Ratio de mezcla (por peso) 100:22 o 25 (cola: endurecedor)
 La exactitud de la cantidad del endurecedor deberá ser ±1 ppp junto

Versión: 04 (2009.03.05)

Razón del cambio: Information sobre el finger-joint

Casco Adhesives
 Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
 High Point, USA +1 336 841 5111
 Singapore +65 6762 2088
www.cascoadhesives.com



	cuando la cola y el endurecedor están utilizados en aplicación separada o como mezcla de cola.
Cantidad de cola	170 – 450 g/m ² , para vigas laminadas 250 - 450 g/m ²
Contenido de la humedad de la madera	8 – 15%, para vigas laminadas; 10-12%
Preparación de la madera	Para conseguir el mejor resultado, la madera debe cepillarse cuidadosamente. Para obtener una fuerza máxima de la adhesión, la operación del encolado debe efectuarse dentro de las 24 horas siguientes a la preparación.
Temperatura de la madera	Para cumplir con los tiempos indicados de prensa, la temperatura de la madera no debe ser inferior a +20°C/68°F.
Post curado	Hasta 5 días a 20°C / 68°F. Después del tiempo de prensado, el encolado tiene suficiente fuerza para manipular la construcción. No obstante la fuerza máxima se conseguirá pasado un tiempo, dependiendo del tiempo de prensado y de la temperatura del mismo.

Información sobre la operación de encolado para los empalmes de juntas de las lamellas para la construcción que soporta carga

General	Para la producción de los empalmes de juntas para productores controlados por el Otto-Graf-Institut (MPA), deben seguirse la norma DIN 68140-1:1998-02.
Equipamiento para la aplicación	Con la mezcla de cola: Rodillo perfilado o equipamiento similar.
Contenido de la humedad de la madera	El contenido de la humedad deberá ser similar al contenido de la humedad para la construcción en uso. Ver también DIN 68140-1.
Aplicación de cola y endurecedor	<u>Mezcla de cola:</u> Aplicación a doble cara con 125-150 g/m ² en cada parte. La mezcla de cola debe cubrir como mínimo ¾ de la longitud de los empalmes. Durante la producción deben tomarse diariamente muestras de las juntas encoladas con cola y endurecedor. Estas muestras deben marcarse con la fecha y guardarse para su control por las autoridades. Además, debe documentarse el consumo de cola y endurecedor por día y línea de producción.
Temperatura de la madera	Durante el encolado de las lamellas, la temperatura de la madera no debe ser inferior a 18°C / 64 °F.
Ratio de mezcla	Para el encolado de lamellas en las vigas laminadas también está aprobada la siguiente mezcla :

Versión: 04 (2009.03.05)

Razón del cambio: Information sobre el finger-joint

Casco Adhesives

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
 High Point, USA +1 336 841 5111
 Singapore +65 6762 2088
 www.cascoadhesives.com

3



	1242	100 partes por peso (ppp)
	2542	20 partes por peso (ppp)
	Agua	0 - 5 partes por peso (ppp)
	La exactitud del endurecedor deberá ser \pm 1ppp.	
Vida de almacenaje	Un 5 ppp de agua aumentará la vida de almacenaje de un 10% aprox.	
Tiempo de prensa	La temperatura mínima de prensa deberá ser 20°C / 68°F.	
Encolado sin la prensa HF	La temperatura para los empalmes de juntas de las lamellas para paneles de madera debe ser mínimo de 20°C / 68°F.	
Encolado en IF con precalentamiento	La temperatura en la zona de empalmes de juntas deberá alcanzar un mínimo de 60°C / 140°F.	
Encolado en IF sin precalentamiento	La temperatura en la zona de empalmes de juntas deberá alcanzar un mínimo de 85°C / 185°F.	
Tiempo de curado	Con una temperatura de línea de adhesión a 60°C / 140°F, el tiempo de curado es de 2 horas. A 20°C / 68°F el tiempo de curado es de 5 días.	
Procesos posteriores al encolado de las juntas	Las lamellas pueden procesarse directamente después del encolado, siempre que su manipulación y traslado no suponga exponer las juntas a sobrecargas.	

Versión: 04 (2009.03.05)

Razón del cambio: Information sobre el finger-joint

Casco Adhesives

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
 High Point, USA +1 336 841 5111
 Singapore +65 6762 2088
www.cascoadhesives.com

4

Cola de poliuretà



KLEIBERIT PUR 501

Tiempo de prensado:

Los tiempos de encolado dependen de la temperatura y de la acción de la humedad. Como valores aproximados valen:

- a 20 °C aprox. 60 minutos
- a 40 °C aprox. 30 minutos
- a 60 °C aprox. 10 minutos

Los tiempos de prensado exactos deben ser determinados en función de las aplicaciones y de las condiciones de trabajo.

Tiempo de consolidación:

Las piezas encoladas se pueden trabajar pasadas unas 2 - 3 horas. El encolado alcanza su resistencia final al cabo de 24 horas.

Medidas de seguridad:

Nocivo para la salud en caso de inhalación. Irrita los ojos y la piel. Posible sensibilización en caso de inhalación y contacto con los ojos, lavar con agua abundante y consultar con su médico. En caso de contacto con la piel, lavar inmediatamente con mucha agua y jabón. En caso de combustión o aireación insuficiente, utilizar una mascarilla de protección adecuada. En caso de malestar, consultar con su médico. Cuando el producto está expuesto a temperaturas superiores a 40 °C se forman vapores nocivos para la salud. En tal caso se deberá disponer de una adecuada aireación, y si ésta no fuera suficiente llevar una mascarilla de protección. El adhesivo reacciona químicamente en contacto con el agua, por lo que es necesario evitar cualquier contacto con los ojos, la boca y las mucosas.

Limpieza

Los utensilios de trabajo deben ser limpiados **inmediatamente** después de su utilización con KLEIBERIT C 820. La cola reseca solo se puede quitar mecánicamente.

Envases

caja / 12 botellas	0,5 kg neto
Lata de	6 kg
Lata de	32 kg
Bidón de	220 kg

Almacenaje

KLEIBERIT PU 501 puede ser almacenado a 20 °C durante aproximadamente 9 meses en su embalaje cerrado herméticamente en lugar fresco y seco. La cola debe estar bien protegido contra la humedad. Los embalajes abiertos deben ser utilizados rápidamente.

Ki 0301 sustituye a la hoja de fecha anterior

ELIMINACION DE LOS RESIDUOS

Los residuos de cola y sus recipientes deben ser eliminados de acuerdo con las normas de autoridad locales y estatales. Nuestros embalajes están hechos de material reciclable.

SERVICIO

Pueden consultar sin compromiso alguno a nuestro departamento de Aplicaciones en cualquier momento. Las manifestaciones efectuadas están basadas en experiencias que hemos tenido hasta la fecha. Deben ser consideradas como información sin compromiso. Por favor, hagan la prueba y establezcan Uds. mismos si nuestros productos son interesantes para sus propósitos. Ninguna responsabilidad, excediendo del valor de nuestro producto, puede derivarse de las anteriores declaraciones. Pueden recurrir al Servicio Asesor Técnico, el cual les atenderá libre de ningún cargo y sin ningún compromiso.



KLEIBERIT PUR 501

KLEIBERIT PU 501 es una cola monocomponente a base de poliuretano autoendurecedora, con máxima resistencia al agua y altas temperaturas; supera el test D 4 según DIN/EN 204.

Posibilidades de aplicación

- Encolado de ventanas y de puertas (por ej.: encolado de láminas en la fabricación de ventanas y de juntas en la fabricación de puertas)
- Encolado de capas de madera y aglomerados de madera
- Encolado de juntas para la utilización exterior
- Encolado de juntas de placas de MDF
- Encolado de paneles de fibras minerales
- Encolado de cerámicas, de hormigón y de espumas rígidas

Ventajas

- Cola monocomponente – sin el problema del tiempo de vida
- Fácil de aplicar
- Tiempo de endurecimiento relativamente corto

Propiedades del encolado

- La junta de cola duroplástica es altamente resistente al calor y muy sólida
- Excelente resistencia a la intemperie
- Calidad de encolado D 4 según DIN / EN 204 (Report-No. 505 26095 del 08.10.2002)
- Certificado según WATT 91

Propiedades del adhesivo

Base: isocianado
Color: marrón-amarillento
Peso específico: aprox. 1,13 g / cm³
Viscosidad (Haake VT 180)8.000 ± 1.500 mPa·s
Consistencia: de viscosidad media
Identificación: sometido a una identificación según las normas en vigor en Alemania. Contiene 4,4' difenilmetanodiisocianado.

Aplicación

Condiciones para la aplicación:

La temperatura ideal de trabajo es de 20 °C, la humedad ideal de la madera es de 8 - 12 %. No trabajar a una temperatura inferior a +5 °C. Las superficies a encolar deben estar limpias, exentas de grasa y secas. Eliminar el antiadherente en las superficies sintéticas.

Métodos de aplicación:

Con rodillo manual, espátula o botella

Aplicación de la cola:

Es suficiente aplicar en una sola cara, pero en la cara a encolar menos porosa.

Cantidad a aplicar:

100 - 200 g / m² según el material.

Tiempo abierto:

20 - 25 minutos a aprox. 20 °C. Este tiempo es reducido si la temperatura ambiente, la humedad del aire o la acción de la humedad aumenta.

Endurecimiento:

El endurecimiento de la cola se efectúa por la acción de la humedad (aire, material) formando una película de cola semidura resistente al agua y a los disolventes. Al añadir humedad (por pulverización de agua, aprox. 20 g / m²) o por temperaturas más altas (de 50 °C hasta máx. 70 °C) la reticulación es más rápida.

Prensado de las piezas:

El proceso de reticulación tendrá lugar bajo presión para garantizar un contacto suficiente de la superficie encolada. Las superficies a prensar deben estar protegidas del adhesivo que pueda caer con papel de silicona. La presión necesaria depende de la forma y las dimensiones de las piezas; las juntas deben estar bien ajustadas. En el caso de encolado de láminas o de juntas la presión no debe ser inferior a 0,6 N / mm². Cuanto más intensiva sea la reticulación del adhesivo debajo presión, más alta será la capacidad de carga final.

Annex fotogràfic



Figura 187. Pòrtic de flexió



Figura 188. Testes extreïdes de les bigues per no sotmetre-les a esforços de cisalla durant la flexió



Figura 189. Bigues de fusta laminada encolada de castanyer



Figura 190. Detall de la cola de poliuretà dels plans d'encolat



Figura 191. Col·locació d'una biga de fusta laminada encolada al pòrtic de flexió



Figura 192. Ajust del pòrtic de flexió previ al inici de l'assaig a flexió estàtica



Figura 193. Biga de fusta laminada encolada sota càrrega durant l'assaig a flexió estàtica



Figura 194. Unió dentada de la part inferior de la biga. Ruptura a tracció incorrecta



Figura 195. Unions dentades en mal estat després de la ruptura. Unions massa juntes



Figura 196. Unions dentades trencades per fusta



Figura 197. Trencament per línia de cola. Plans d'encolat trencats a cisalla



Figura 198. Biga de fusta laminada encolada desmuntada per l'esforç a flexió



Figura 199. Assaig a flexió. Biga laminada de castanyer. Trencament per fusta



Figura 200. Assaig a flexió. Biga laminada de castanyer. Trencament per fusta

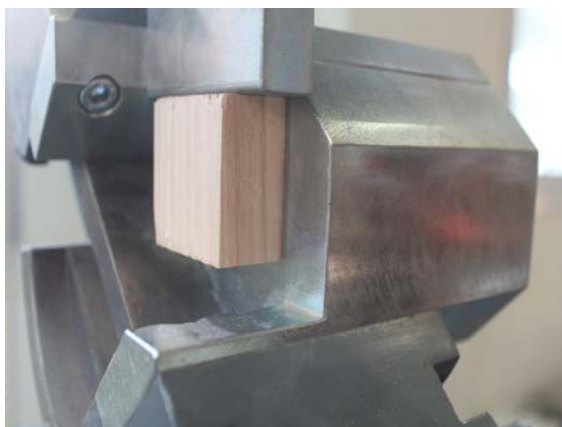


Figura 201. Assaig d'esforç tallant del pla d'encolat



Figura 202. Provetes d'esforç tallant abans i després de l'assaig



Figura 203. Làmines de castanyer empalmades per testa



Figura 204. Detall de la unió dentada abans de l'assaig



Figura 205. Assaig de flexió de les làmines encolades per testa amb unió dentada

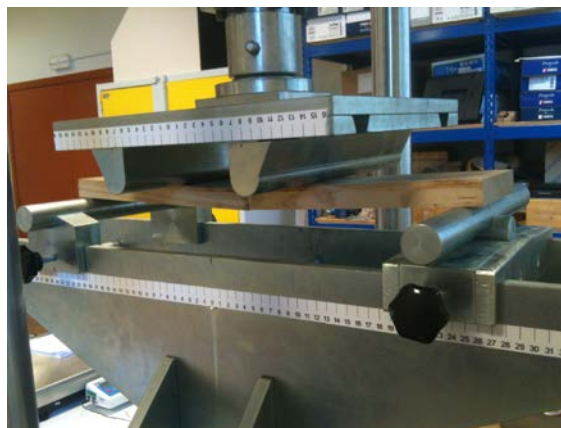


Figura 206. Assaig de flexió de les làmines encolades per testa amb unió dentada



Figura 207. Unió dentada amb trencament mixt fusta/unió dentada



Figura 208. Unió dentada trencada completament per fusta



Figura 209. Provetna de delaminació. Lupa per observar les clivelles de delaminació



Figura 210. Provetna delaminada. Clivelles de delaminació indicades en verd

CAPÍTOL VI
CONCLUSIONS

Índex

1. Consideracions finals	347
1.1. Anàlisi agregat.....	347
1.2. Futures línies d'investigació.....	349
1.3. Noves perspectives	350

1. Consideracions finals

1.1. Anàlisi agregat

L'estudi realitzat ha permès tenir una àmplia visió de les característiques de la fusta de castanyer del Sistema Mediterrani Català, estimar el potencial de l'espècie per a ús estructural, i confirmar l'aptitud per a la transformació industrial. Els diferents nivells en què s'ha dut a terme la investigació han evidenciat, que les singularitats, la intrínseca variabilitat del material i l'aplicació dels coeficients de seguretat fan que les propietats que es consideren pròpies del material variïn amb les dimensions del material. Així doncs, s'ha vist que la resistència de la fusta lliure de defectes de castanyer ha estat aproximadament fins a quatre cops superior a la massissa de la grandària estructural, i també que la fusta laminada encolada, amb un potencial GLc36, és capaç de millorar les propietats resistents de la fusta massissa estructural a la qual se li ha assignat una classe resistent D24 al resultar lleugera, resistent, i molt rígida. Ara bé, perquè la fusta laminada encolada assoleixi la màxima resistència, cal optimitzar la geometria de les làmines i de les unions dentades.

En aquest sentit, també caldrà veure l'evolució de les futures normes sobre les classes resistents de la fusta massissa estructural i la fusta laminada encolada. Per una banda, cal tenir en compte que la norma UNE-EN 338:2010 penalitza la lleugeresa del castanyer, i per altra, que en aquest moment la norma 1194:1999 està limitada a fusta de conífera. A la Figura 211 s'observa que les actuals classes resistents GL són molt menys restrictives que les D pel que fa a la densitat, però alhora ho són més que les C. Això s'explica perquè s'entén que les làmines de conífera que s'utilitzen per fabricar fusta laminada encolada són de bona qualitat i, per tant, relativament més denses. Així doncs, segons es redactessin les especificacions per a la fusta de frondosa, el potencial resistent de les frondoses lleugeres, com el castanyer, es podria quedar de nou força limitat.

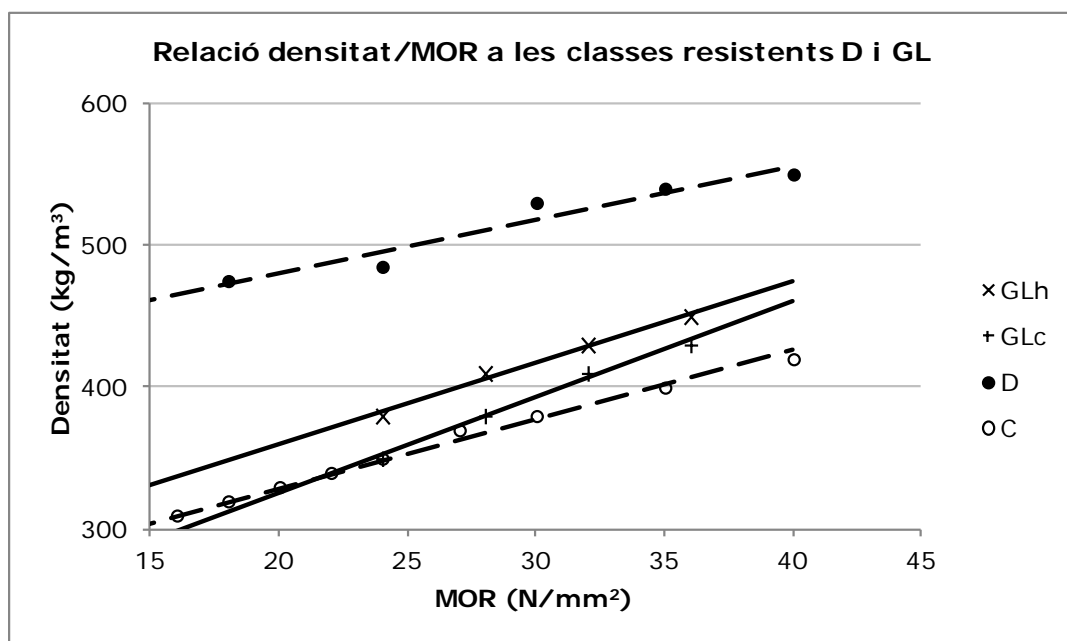


Figura 211. Relació entre la densitat i el MOR a la norma UNE-EN 338:2010 i UNE-EN 1194:1999

Més enllà de les consideracions resistents, la fusta laminada permet aprofitar les fortaleses de la fusta de castanyer i minimitzar algunes de les seves debilitats. Tal com s'ha demostrat en els capítols anteriors, és durable i la seva contracció volumètrica és petita. Per tant, com que és resistent a l'atac de xilòfags i els canvis d'humitat ambiental no generen canvis dimensionals que puguin comprometre l'estabilitat de les unions encolades, es podria desenvolupar fusta laminada encolada fins i tot per a classe d'ús 3 tal com es defineix a la norma UNE-EN 335:2013 sobre durabilitat de la fusta i els seus productes derivats. Tot i això, caldria disposar d'un sistema d'encolat capaç d'obtenir unions més resistents.

La dificultat d'assecat que s'ha observat a la fusta massissa estructural de gran secció és un handicap important alhora de comercialitzar aquest material. La fusta laminada encolada permet superar aquesta limitació. Mentre grans seccions s'assequen molt lentament i necessiten mesos per equilibrar la seva humitat amb la de l'ambient, les làmines, al ser més fines, es poden assecar amb relativa facilitat. A més, la fusta laminada encolada garanteix que els elements han estat condicionats a una humitat equilibrada amb l'ambient, ja que les làmines a encolar cal que tinguin una humitat al voltant el 12%.

L'estudi també ha demostrat que la pèrdua de resistència de la fusta roja és mínima respecte la normal, i que l'origen de la coloració és un decaïment i no una podridura. Per tant, és possible aprofitar aquest material com a material massís estructural, incorporar-lo a l'interior de la fusta laminada encolada per tal que no es vegin les taques o termotractar-lo per homogeneïtzar el seu color.

De totes formes, el més aconsellable és aprofitar els arbres al voltant dels vint-i-cinc anys per evitar l'aparició d'aquesta coloració, els processos de decaïment i problemes fitosanitaris tant comuns com el xancre. Això implica obtenir diàmetres relativament petits, que afavoreixen la producció de fusta laminada encolada enfront la fusta massissa estructural. L'aprofitament en torns de tallada curts té avantatges tecnològics afegits, sobretot pel que fa a l'encolat. La fusta dels peus joves és menys densa, menys àcida, presenta menys extractius, i això facilita l'adhesió de la cola. A més, els arbres de mitjana edat presenten creixements més alts, troncs més rectes, menys brancom que els vells, el volum de fusta rebutjada és menor i la rendibilitat més profitosa.

1.2. Futures línies d'investigació

Tal com s'ha desenvolupat la tesi i a la vista de les conclusions obtingudes, és clar que s'ha aprofundit en el coneixement de la fusta de castanyer, però l'assoliment de noves fites també ha suposat obrir les portes a nous reptes.

La troballa d'una via per homogeneïtzar el color de la fusta roja amb la normal fa plantejar la possibilitat d'aplicar la tècnica a nivell industrial. A partir d'aquest moment caldria desenvolupar un procés de transformació que combinés la temperatura i la humitat de forma òptima per minimitzar despeses energètiques maximitzant la transformació del color. També caldria tenir sempre present la tendència a l'aparició de clivelles del castanyer per la qual cosa els programes haurien de ser el màxim de suaus possible.

Per altra banda, la definició d'un sistema de criteris de classificació visual de la fusta de castanyer per a ús estructural, suposa que des d'un punt de vista tècnic i científic el següent pas a realitzar sigui el desenvolupament d'un sistema de classificació mecànica. Ara bé, la implantació d'aquesta metodologia a nivell industrial dependrà essencialment de la demanda futura d'aquest material i del cost de la tecnologia.

Finalment, és important destacar que per obtenir fusta laminada encolada cal aprofundir en el material per superar les limitacions demostrades pels prototips assajats. Investigacions futures hauran de cercar la geometria òptima de les làmines per minimitzar la quantitat de fusta rebutjada, l'especejament dels rolls i la quantitat de cola a emprar per reconstruir els elements estructurals. També caldrà ajustar el gruix de les làmines per aconseguir una rigidesa òptima, però sobretot, caldrà fer recerca per desenvolupar un sistema d'encolat que sigui prou resistent i que suporti les condicions d'intempèrie satisfactòriament.

1.3. Noves perspectives

Actualment els usos tradicionals a què es destinava majoritàriament la fusta de castanyer estan en franc declivi, la caracterització mecànica a nivell estructural de l'espècie és un pas imprescindible per incrementar la demanda d'aquesta fusta, dinamitzar la cadena forestal i la indústria transformadora associada.

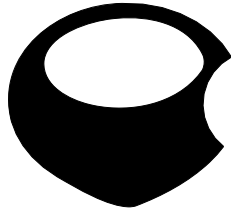
Des d'aquest punt de vista, la importància i oportunitat d'aquest estudi s'ha incrementat notòriament pel fet que des de l'1 de desembre de 2011 és obligatori que la fusta laminada encolada disposi del marcatge CE per ser comercialitzada, i des de l'1 d'octubre de 2012 succeeix el mateix amb la fusta massissa estructural. A més, l'1 de juliol de 2013 s'ha derogat la Directiva 89/106/CEE i ha entrat en vigor el reglament 305/2011 sobre comercialització de productes de la construcció. En conseqüència, l'obligatorietat del marcatge CE ha passat a ser d'eficàcia directa i d'abast general a tots els Estats de la Unió Europea de forma immediata des del moment de l'entrada en vigor del reglament. Respecte al desenvolupament de la tesi, cal reconèixer que el moment concret d'entrada en vigor d'aquest reglament ha estat conjuntural, però això no significa que la redacció d'una disposició d'aquesta natura fos previsible al ser molt necessària.

Conseqüentment, si es vol que els elements estructurals tinguin el marcatge CE, és necessari assignar-los una classe resistent, i això no és possible si no es disposa d'un sistema de classificació adaptat a l'espècie. Un cop adoptada la decisió de desenvolupar un sistema de classificació visual per tenir una eina útil adaptada a les característiques de la indústria catalana, calia elaborar criteris de classificació visual adaptats a les particularitats de la fusta pertanyent a la regió de procedència espanyola. Arribats a aquest punt, cal destacar la propera inclusió de les dades d'aquest estudi en la futura norma UNE 56546 sobre classificació visual de fusta estructural de frondosa.

En aquest moment el estàndard UNE 56546:2011 només inclou l'eucaliptus blau (*Eucalyptus globulus*). Aquesta espècie a Catalunya té unes existències de fusta amb escorça de 78000 m³, mentre que el castanyer amb 534000 m³ quasi les multiplica per set. Per tant, la inclusió del castanyer suposarà donar un gran salt des del punt de vista qualitatiu en el volum de fusta de frondosa potencialment utilitzable per a ús estructural a Catalunya.

Si les previsions es compleixen, sembla que en el nostre país la fusta assolirà un major protagonisme en la construcció del futur que en la segona meitat del segle XX. La caracterització duta a terme a diferents nivells pot ser de gran utilitat per desenvolupar nous materials fusters derivats del castanyer. Els coneixements adquirits sobre les propietats químiques i la fusta lliure de defectes poden servir de base per desenvolupar o optimitzar productes derivats de la fusta, la recerca endegada amb la fusta laminada és útil com a base per optimitzar el producte, i els coneixements adquirits sobre la fusta massissa permeten relançar la presència d'aquesta espècie en l'ús estructural.

Altres productes menys elaborats, que poden tenir un increment de la demana en un futur i que es poden veure beneficiats de retruc per la informació obtinguda en la caracterització física i mecànica duta a terme, són les aspres i les tanques fabricades amb fusta de castanyer. En aquest cas conèixer la resistència del material no és imprescindible, però aquesta informació pot esdevenir un argument clau de venda, sobretot respecte altres materials com el formigó i els metalls amb els quals ha de competir en el mercat. Respecte altres espècies de fusta, com els pins en què és necessari incorporar sals de coure perquè esdevinguin durables, és previsible que l'acceptació del producte s'incrementi ja que cada cop estan més valorats els productes biodegradables, lliures de contaminants i respectuosos al màxim amb el medi ambient.



eThesis

352P

PhD dissertation by Eduard Correal Developed in Catalonia
Chemical, physical, mechanical and strength properties of the clear wood,
the structural timber and the glulam of the Catalan Mediterranean System
Model No. ECM-2013 We need more wood Timber! Timber!

