

XUNTA
DE GALICIA

GUÍA TÉCNICA

CASTIÑEIRO VERDE NA CONSTRUCIÓN

XUNTA
DE GALICIA

Santiago de Compostela, 2025

AXENCIA GALEGA DA INDUSTRIA FORESTAL
Consellería de Economía e Industria

En colaboración coa **Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estrutural** (Pemade) da **Universidade de Santiago de Compostela** (USC)

Coordinación, deseño, recompilación e revisión de contido:

José Antonio Lorenzana Fernandez (Pemade)
M. Belén Feijóo Lombao (Pemade) *(in memoriam)*
María Portela Barral (Pemade)
Mônica Ruy (Pemade)
Manuel Guaita Fernandez (Pemade)

Depósito Legal: C 799-2026

GUÍA TÉCNICA

CASTIÑEIRO VERDE NA CONSTRUCIÓN

Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estrutural (Pemade) da Universidade de Santiago de Compostela

XUNTA DE GALICIA



ÍNDICE

01	**INTRODUCIÓN**	**7**
	Castanea sativa: Distribución e dispoñibilidade en Galicia	8
02	**O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL**	**10**
	Como coñecer as propiedades físicas e mecánicas da madeira	10
	Que método empregamos para comprobar a clase visual da madeira de castiñeiro?	12
	Singularidades e características que deben avaliarse	14
	Límites admisibles para cada calidade visual	18
	Consideración da humidade no proceso de clasificación visual	20
	Cal é o perfil resistente da madeira de castiñeiro?	22
	E se falamos de clases resistentes?	26
03	**MADEIRA E HUMIDADE**	**29**
	Madeira verde e punto de saturación da fibra	29
	Subministración de madeira de castiñeiro e relación coa humidade	30
04	**EXPERIENCIA PRÁCTICA: VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE**	**33**
	Condicións do estudo	33
	Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1	34
	Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1: Consecuencias do secado	36
	Variacións das propiedades mecánicas a medida que evoluciona o proceso de secado	44
	Evolución da deformación diferida baixo carga en vigas colocadas en verde	50
	Conclusións e recomendacións de aplicación	52
05	**APLICACIÓN DE CÁLCULO ESTRUTURAL**	**56**
	Trabe	56
	Trabe: uso de madeira verde	58
06	**BIBLIOGRAFÍA**	**60**



01

INTRODUCIÓN

O **Convenio Madeira en Valor II: Fomento do emprego do castiñeiro e a súa contribución á descarbonización do sector da construción (2023–2025)**, promovido pola Axencia Galega da Industria Forestal (Xera) en colaboración coa Universidade de Santiago de Compostela (USC) a través da Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estrutural (Pemade), enmárcase na estratexia da Xunta de Galicia orientada á promoción do uso da madeira como material construtivo.

Esta iniciativa dá continuidade ás accións dirixidas á valorización das especies forestais de crecemento en Galicia, mediante a xeración de coñecemento técnico e a transferencia de solucións que favorezan un uso eficiente, sustentable e competitivo da madeira no sector da construción. En particular, o convenio céntrase no impulso do emprego de frondosas autóctonas, como o castiñeiro, contribuíndo tanto á descarbonización do sector como á posta en valor do recurso local.

No marco deste proxecto desenvolvéronse diversas actuacións orientadas a facilitar a incorporación da madeira de castiñeiro á práctica profesional, entre as que destacan a ampliación da ferramenta gratuíta de cálculo estrutural **Trabe**, o deseño e análise de solucións mixtas madeira de castiñeiro–formigón, así como o estudo da evolución do material desde o seu estado verde. Os resultados recollidos no presente documento proceden da campaña de ensaios desenvolvida neste contexto, na que se analizaron tanto as propiedades físicas e mecánicas da madeira como o seu comportamento ao longo do proceso de secado.

A **Guía técnica: Castiñeiro verde na construción** ten como obxectivo principal recompilar, organizar e poñer a disposición do sector a información necesaria para o uso adecuado deste material, integrando tanto o coñecemento técnico existente como as evidencias experimentais obtidas ao longo da campaña experimental. O propósito é trasladar estes resultados ao ámbito profesional, de modo que poidan ser aplicados no deseño e cálculo de estruturas, contribuíndo a un uso máis seguro, eficiente e fundamentado deste material en futuros proxectos.

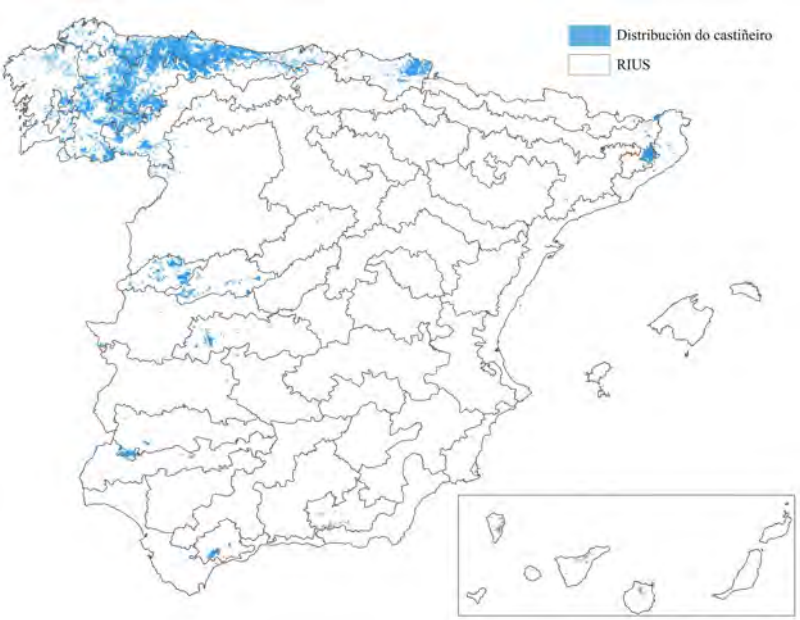
Castanea sativa

Distribución e dispoñibilidade en Galicia

O **castiñeiro** europeo (*Castanea sativa* Miller) é unha **frondosa** de distribución circunmediterránea, que se estende desde o Atlántico ata o mar Caspio, e considerada autóctona na Península Ibérica. En Europa ocupa superficies importantes en Francia, Italia, España, Portugal e Turquía, preferindo zonas con máis de 600 mm de precipitación anual, solos ácidos e ben drenados, e orientacións norte nos climas máis cálidos. É resistente ao frío do inverno e sensible ás xeadas de primavera, polo que presenta unha brotación tardía.

En España, a especie mostra unha distribución descontinua, máis concentrada na franxa con influencia atlántica entre Galicia e Navarra, que representa aproximadamente o 70 % da súa superficie. Está ausente na zona pirenaica, reaparecendo na montaña catalá. Cara ao sur esténdese por O Bierzo, Ávila, Salamanca e Estremadura, e presenta núcleos destacados en Andalucía (Serra de Aracena, Serra Nevada e Serranía de Ronda). Existen ademais pequenas masas nas illas Canarias occidentais.

A nivel evolutivo, estudos xenéticos sitúan a orixe histórica do castiñeiro no nordeste de Turquía e rexión do Cáucaso, explicando a súa distribución natural fragmentada e a súa **elevada capacidade de adaptación**.



Mapa de distribución da especie *Castanea sativa* en España. *FONTE: Centro de Investigación Forestal de Lourizán.*

Dentro de España, o castiñeiro aparece en tres formas principais:

- **soutos enxertados** orientados á produción de froito
- **monte baixo** destinado tradicionalmente á obtención de varas ou madeira delgada
- **monte alto silvestre**, xeralmente en combinación con outras frondosas e só de forma excepcional como especie dominante



En Galicia, o castiñeiro presenta unha dispoñibilidade notable tanto en masas forestais como en **soutos tradicionais**, **combinando usos madeireiros** e **frutícolas**.

Segundo o Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4, 2018-2021), a especie ocupa arredor de 12.500 ha en masas puras -onde o castiñeiro é a especie dominante- e aproximadamente 46.455 ha en formacións mixtas, nalgunha combinación con outras frondosas caducifolias. A estes montes súmanse os soutos de froito, que acadan arredor de 38.000 ha, constituíndo un elemento fundamental da paisaxe tradicional galega e un dos sistemas agrarios máis característicos da montaña de Lugo e Ourense.

A dispoñibilidade da especie reflíctese tamén no **uso madeireiro**: en 2024 cortáronse aproximadamente 22.000 m³ de madeira de castiñeiro en Galicia (IFCG, 2024), un volume relativamente modesto pero representativo dentro do conxunto das frondosas caducifolias galegas. Ademais, segundo diversas análises agronómicas, as plantacións de castiñeiro para madeira están a medrar en interese, especialmente en zonas de boa calidade de estación e con acceso a material xenético mellorado.

O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Como coñecer as propiedades físicas e mecánicas da madeira

A madeira é un material de gran complexidade debido á súa natureza orgánica e anisótropa, o que implica que as súas propiedades varían segundo a dirección da fibra e a peza analizada. Para o seu uso en enxeñaría e construción, é indispensable determinar tanto as súas **propiedades físicas** (como a densidade e o contido de humidade) como as **mecánicas** (resistencia e módulo de elasticidade).

A metodoloxía de avaliación divídese principalmente en dous bloques:

- as **técnicas destrutivas** e,
- as **técnicas non destrutivas (TND)**.

Mentres que as primeiras levan a peza ata o seu punto de rotura para obter valores exactos de resistencia, fundamentais para a investigación e o establecemento de normas, as técnicas non destrutivas permiten avaliar o material sen comprometer a súa integridade.

TÉCNICAS NON DESTRUTIVAS PARA A CLASIFICACIÓN DA MADEIRA

Métodos de inspección visual

Métodos de propagación de ondas acústicas

Método de Correlación Dixital de Imaxes (DIC)

> **AS TÉCNICAS DE CLASIFICACIÓN DA MADEIRA PERMITEN PREVER O COMPORTAMENTO DO MATERIAL BAIXO CARGA E GARANTIR A SEGURIDADE ESTRUTURAL, TRANSFORMANDO A VARIABILIDADE NATURAL EN PARÁMETROS TÉCNICOS PREDICIBLES.**

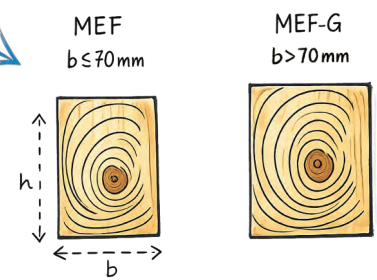
A clasificación visual consiste nun **proceso de inspección e medición das singularidades da madeira** (nós, fendas, desviación da fibra, deformacións, etc.) co obxectivo de estimar a súa capacidade resistente.

A partir desta avaliación asígnase unha **calidade visual**, que posteriormente pode asociarse a unha **clase resistente estrutural** segundo a normativa europea.

CALES SON AS CLASES VISUAIS DA MADEIRA DE CASTIÑEIRO?

Clase Visual	MEF	MEF-G
	b ≤ 70 mm	b > 70 mm

Clases visuais da madeira de castiñeiro. *FONTE: UNE 56546:2024.*



MEF: madeira estrutural de frondosas

MEF-G: madeira estrutural de frondosas de gran escuadría



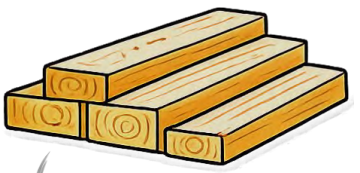
As **clases visuais** permiten chegar á asignación de clases resistentes. A relación entre calidades visuais e clases resistentes establécese na norma **UNE-EN 1912**, mentres que os valores mecánicos de referencia das clases resistentes están definidos en **UNE-EN 338**.

O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

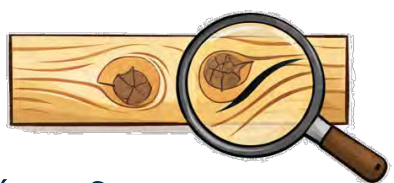
Que método empregamos para comprobar a clase visual da madeira de castiñeiro?

A clasificación visual da madeira de castiñeiro para uso estrutural en España realízase segundo a norma **UNE 56546:2024**, que establece os criterios para avaliar a calidade resistente da madeira serrada de frondosas. Esta norma define:

- as **singularidades e características** que deben avaliarse,
- **como se miden**,
- e os **límites admisibles** para cada calidade estrutural.



MADEIRA SERRADA



MEDICIÓN DAS SINGULARIDADES
(nós, fendas, desviación da fibra...)



COMPROBACIÓN DOS LÍMITES DA NORMA (UNE 56546)



ASIGNACIÓN DA CLASE VISUAL
(UNE 56546)



ASIGNACIÓN DA CLASE RESISTENTE
(UNE-EN 1912)



USO NO CÁLCULO ESTRUTURAL
(valores da UNE-EN 338)



Medición de singularidades presentes na madeira (*a*: nó de cara; *b*: fenda; *c*: desviación da fibra; *d*: nós agrupados).

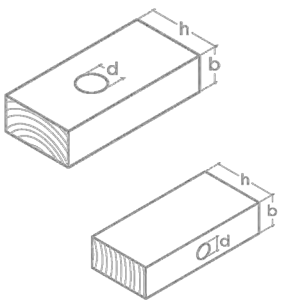
O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Singularidades e características que deben avaliarse

SINGULARIDADES LIGADAS Á ANATOMÍA DA MADEIRA

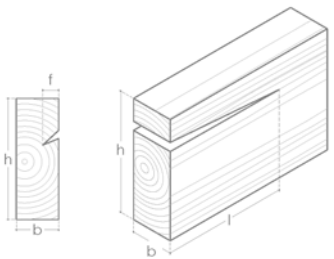
- **Nós de cara e de canto** (1)
- **Fendas** (2)
- **Acebolladuras** (3)
- **Desviación da fibra** (4)
- **Madeira de reacción** (5)
- **Anchura dos aneis de crecemento** (6)

(1)





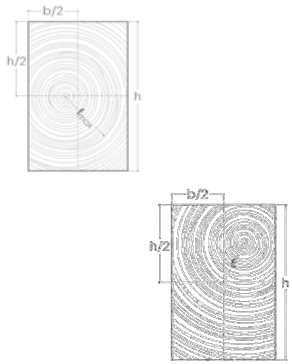
(2)





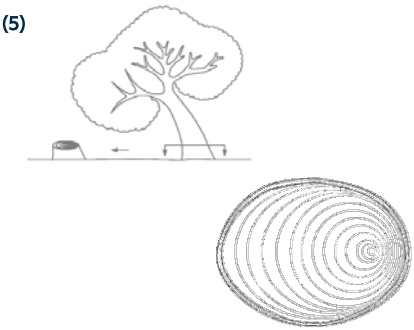


(3)

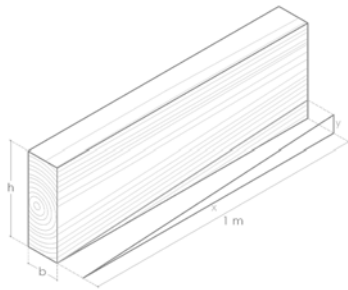


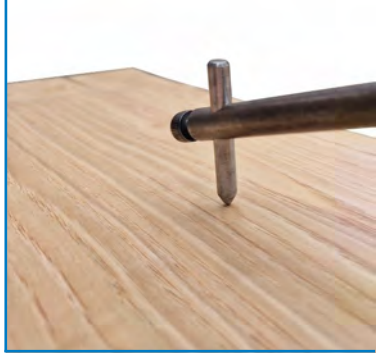


(5)



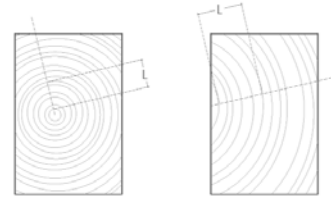
(4)







(6)



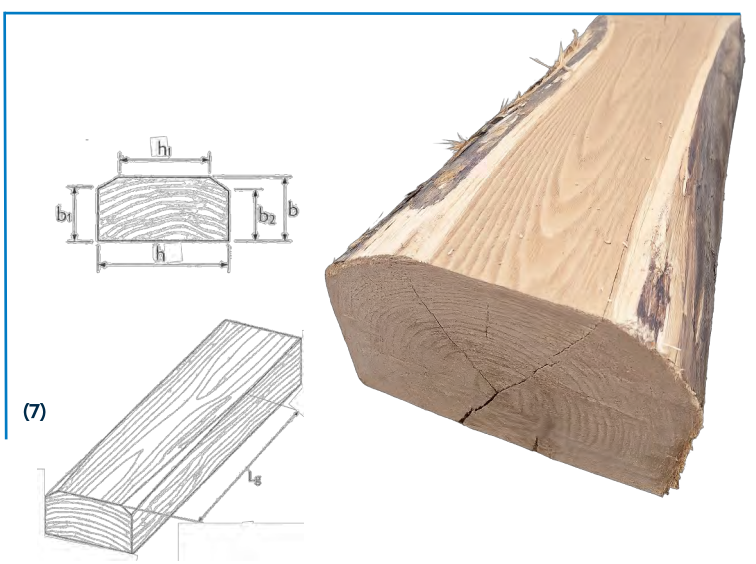
O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Singularidades e características que deben avaliarse

SINGULARIDADES LIGADAS AO SERRADO DAS PEZAS

Xemas (7)

Médula (8)



(7)





(8)

OUTRAS

Alteracións de tipo biolóxico (9)

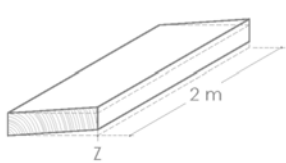
Deformacións das pezas:

- **Alabeo** (10)
- **Atellado** (11)
- **Curvatura de cara** (12)
- **Curvatura de canto** (13)

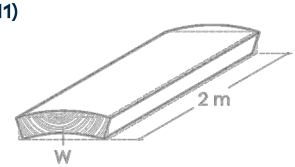
(9)



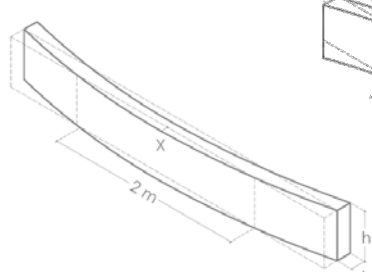
(10)



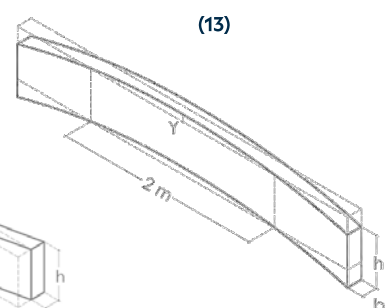
(11)



(12)



(13)



O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Límites admisibles para cada calidade visual

CLASIFICACIÓN PARA CALIDADE VISUAL: MEF (b ≤ 70 mm)

Criterio		Límite
NÓS	Diámetro de nós en cara	Diámetro ≤ 1/2 de "h"
	Diámetro de nós en canto	Diámetro ≤ 2/3 de "b"
FENDAS	Fendas de secado pasantes en testa	Lonxitude ≤ "h"
	Fendas de secado pasantes non en testa	Non admitidas
	Fendas de secado non pasantes	Profundidade < 1/2 de "b" ou "h"
	Fendas de raio	Non admitidas
	Fendas de xeada	Non admitidas
	Fendas por abatemento	Non admitidas
SEPARACIÓN ENTRE ANEIS DE CRECEMENTO		Radio máximo < b/3; excentricidade < b/6
MADEIRA DE TRACCIÓN		Admisible en 1/5 da sección ou en 1/5 da superficie externa da peza
DESVIACIÓN DA FIBRA		≤ 1:10 (10 %) (medida sobre 1 metro de lonxitude)
XEMAS	Xemas – lonxitude	Lonxitude ≤ 1/4 de "L"
	Xemas – dimensión relativa	Dimensión transversal ≤ 1/4 (na sección de máxima perda de arista)
MÉDULA		Admitida
ALTERACIÓNS BIOLÓXICAS	Pudricións	Non admitidas
	Insectos xilófagos	Non admitidos
	Coloracións	Admitida coloración avermellada/atabacada
DEFORMACIÓNS	Curvatura de cara	≤ 10 mm (para 2 m)
	Curvatura de canto	≤ 8 mm (para 2 m)
	Alabeo	≤ 2 mm (por cada 25 mm de "h") (para 2 m)
	Atellado	Sen limitación

FONTE: UNE 56546:2024.

CLASIFICACIÓN PARA CALIDADE VISUAL: MEF-G (b > 70 mm)

No caso da clasificación visual de madeira de castiñeiro de gran escuadría (MEF-G), teremos en conta os mesmos criterios e limitacións que para a pequena escuadría (MEF), salvo nos seguintes puntos:

Criterio		Límite
DESVIACIÓN DA FIBRA		≤ 1:6 (16.7 %) (medida sobre 1 metro de lonxitude)
XEMAS	Xemas – lonxitude	Lonxitude ≤ 1/2 de "L"
	Xemas – dimensión relativa	Dimensión transversal ≤ 1/4 (na sección de máxima perda de arista)
ALTERACIÓNS BIOLÓXICAS	Insectos xilófagos	Non admitidos ataques activos. Ataques inactivos, admitidos orificios de ata 2 mm de diámetro

FONTE: UNE 56546:2024.



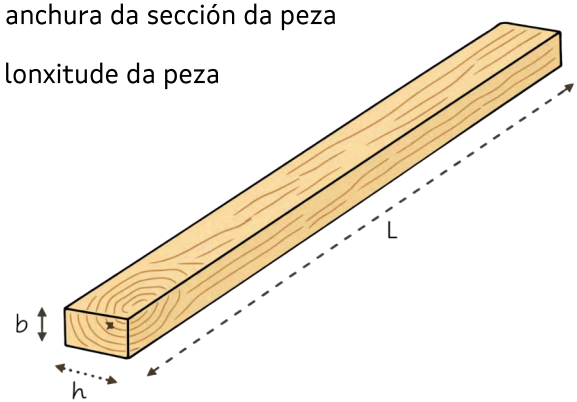
A regra fundamental da clasificación visual é:

- **A peza clasifícase segundo a singularidade máis desfavorable.**
- No caso de superar ao menos, un dos criterios establecidos, a peza clasifícase como **rexeitamento**.

b: espesor ou grosor da sección da peza

h: anchura da sección da peza

L: lonxitude da peza



O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

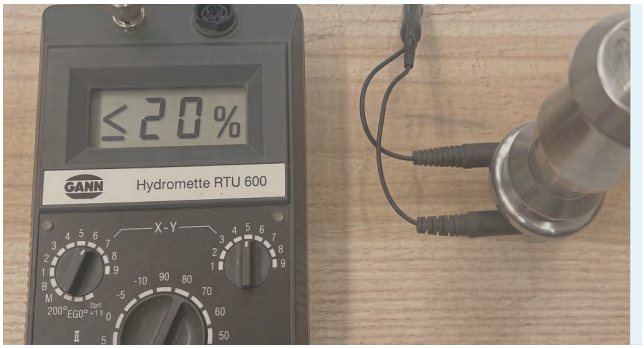
Consideración da humidade no proceso de clasificación visual

Un aspecto clave da clasificación visual é o **contido de humidade da madeira no momento da avaliación**.

MADEIRA CLASIFICADA EN SECO (DRY-GRADED)

Considérase madeira clasificada en seco cando: o **contido medio de humidade é ≤ 20 %** e ningunha medición individual supera o 24 %.

Neste caso **avalíanse todas as singularidades**, incluídas: fendas e deformacións.



CAL É O CONTIDO DE HUMIDADE DA MADEIRA?

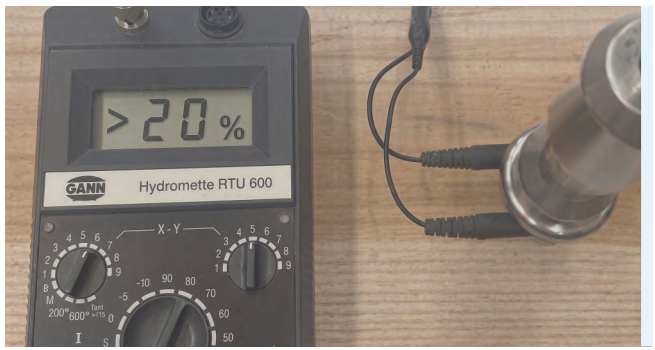
ESTA É A PRIMEIRA CUESTIÓN QUE DEBEMOS RESPONDER ANTES DE INICIAR O PROCESO DE CLASIFICACIÓN VISUAL.

No caso de madeira de castiñeiro clasificada en seco,
a clasificación reflicte o estado final da madeira en servizo.

Madeira clasificada en húmido (Wet-Graded)

Cando a madeira **supera o 20 % de humidade**, considérase clasificada en húmido.

Neste caso **non se avalían as fendas nin as deformacións**, porque estas aparecen principalmente durante o secado. Por este motivo, a clasificación en húmido require **especial atención na interpretación dos resultados**.



Ollo

A madeira pode desenvolver posteriormente **fendas ou deformacións maiores** ao secar, sen que iso implique necesariamente un incumprimento da clasificación inicial.

É recomendable:

Realizar unha **avaliación conservadora das singularidades**,

Prever **posibles cambios durante o secado**,

E garantir un **control posterior da madeira seca.**

A evolución da madeira verde de castiñeiro trátase no **capítulo 04**.

O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Cal é o perfil resistente da madeira de castiñeiro?

O perfil resistente da madeira defínese como o **conxunto de propiedades mecánicas e físicas** que describen o seu comportamento fronte ás accións estruturais e permiten a súa caracterización técnica para uso en construción.

No caso da madeira estrutural, estas propiedades exprésanse mediante valores característicos e medios, obtidos estatisticamente (habitualmente o percentil 5 %), que **garanten un nivel de seguridade axeitado** no dimensionamento segundo a normativa vixente.

> **PARA A MADEIRA DE CASTIÑEIRO DE PROCEDENCIA ESPAÑOLA EXISTEN EXPERIENCIAS DE CLASIFICACIÓN QUE PERMITIRON CHEGAR A UNS VALORES TABULADOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS E FÍSICAS DA ESPECIE.**

ALGUNHAS DESAS PROPIEDADES

Resistencia característica á flexión, á tracción e á compresión

Módulo de elasticidade medio paralelo á fibra e perpendicular á fibra

Densidade media e característica

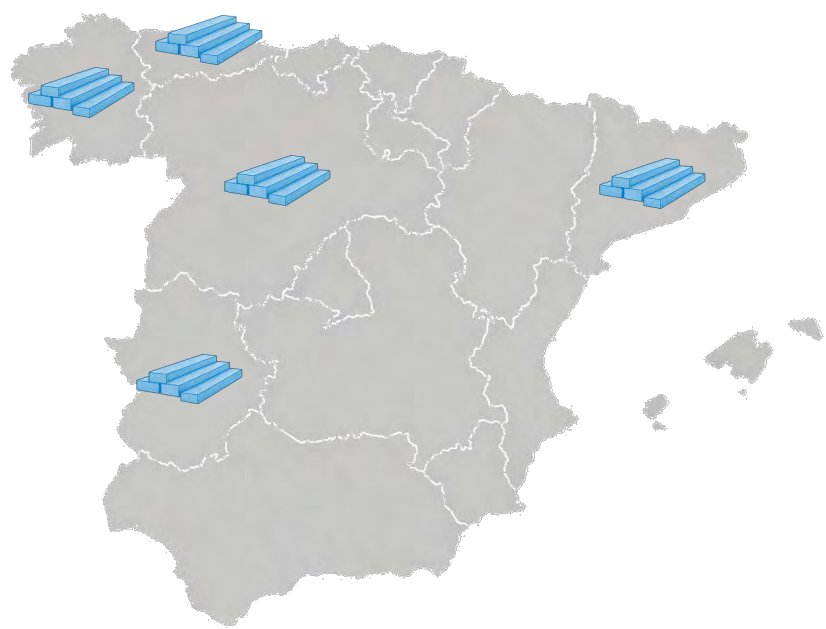


O proceso de clasificación seguido explícase en detalle na tese doutoral *Caracterización mecánica de la madera estructural de "Castanea sativa Mill" clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos,* e os resultados das propiedades mecánicas e físicas pódense consultar na norma UNE 56546:2024.

Para o proceso de clasificación da madeira de castiñeiro de orixe española seleccionáronse **5 rexións de procedencia do material**. Concretamente, as comunidades de Asturias, Estremadura, Castela e León, Cataluña e Galicia.

Os ensaios realizados consistiron en:

- Determinación do **contido de humidade**,
- Determinación da **densidade**,
- Procedemento de **clasificación visual**,
- **Ensaios mecánicos destrutivos** para a determinación do módulo de elasticidade global e local, módulo de elasticidade transversal e a resistencia á flexión.



Procedencia da mostraxe empregada no proceso de caracterización da especie *Castanea sativa* en España. *FONTE: Vega, 2013; Vega et al., 2014.*

O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Cal é o perfil resistente da madeira de castiñeiro?

A mencionada campaña experimental permitiu obter os resultados recollidos na seguinte táboa, **valores que definen o perfil resistente da madeira de castiñeiro de procedencia española** para as dúas calidades visuais estudadas.

Propiedade		MEF b ≤ 70 mm	MEF-G b > 70 mm
Resistencia característica á flexión (N/mm²)	$f_{m,k}$	28.1	26.8
Módulo de elasticidade medio paralelo á fibra a flexión (N/mm²)	$E_{m,0,mean}$	12290	10280
Módulo de elasticidade característico paralelo á fibra a flexión (N/mm²)	$E_{m,0,k}$	9320	8440
Densidade media (kg/m³)	ρ_{mean}	582	582
Densidade característica (kg/m³)	ρ_k	510	500

MEF: madeira estrutural de frondosas

MEF-G: madeira estrutural de frondosas de gran escuadría

Perfil resistente da madeira de castiñeiro. *FONTE: Adaptado de UNE 56546:2024.*



Os resultados da **calidade MEF do castiñeiro** proceden de ensaios á flexión realizados con probetas de dimensións transversais non superiores a **70 × 150 mm²**. Pola súa banda, os resultados da **calidade MEF-G do castiñeiro** proceden de ensaios á flexión realizados con probetas de dimensións transversais non superiores a **140 × 140 mm²**. Estes últimos, considéranse válidos para a clasificación de pezas de madeira con dimensións transversais non superiores a 160 × 160 mm².

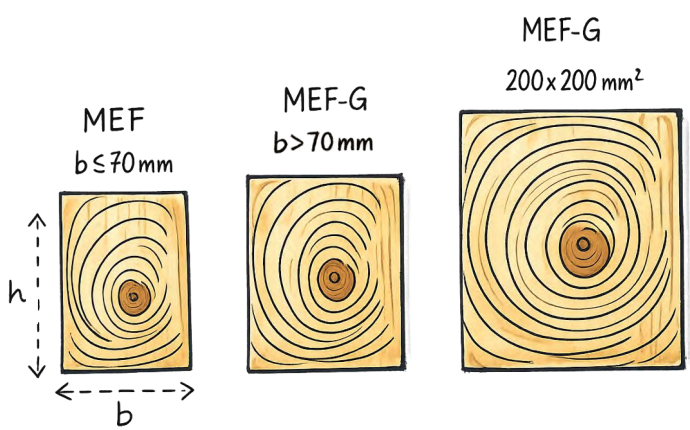
Ademais, na norma *UNE 56546:2024* podemos atopar resultados de ensaio sobre **pezas de castiñeiro cunha sección de 200 × 200 mm²**, aínda que nun número reducido (30 pezas clasificadas).

Propiedade		MEF-G 200 × 200 mm²
Resistencia característica a flexión (N/mm²)	$f_{m,k}$	16.5
Módulo de elasticidade medio paralelo á fibra a flexión (N/mm²)	$E_{m,0,mean}$	9990
Módulo de elasticidade característico paralelo á fibra a flexión (N/mm²)	$E_{m,0,k}$	-
Densidade media (kg/m³)	ρ_{mean}	616
Densidade característica (kg/m³)	ρ_k	526

Perfil resistente da madeira de castiñeiro de sección de 200 x 200 mm². *FONTE: Adaptado de UNE 56546:2024.*

OLLO

Estes valores teñen un carácter orientativo e temporal, mentres se completa a información dispoñible cun maior número de resultados experimentais.



O CASTIÑEIRO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

E se falamos de clases resistentes?

O sistema de **clases resistentes** constitúe o mecanismo fundamental para a normalización estrutural da madeira en Europa. A súa función é agrupar distintas especies, procedencias e calidades que presentan propiedades mecánicas semellantes, de maneira que poidan considerarse estruturalmente equivalentes e, polo tanto, intercambiables no cálculo.

Este enfoque permite que o proxectista non teña que traballar con valores específicos de cada especie concreta, senón que poida **especificar unha clase resistente determinada** (por exemplo, dentro das series C para coníferas ou D para frondosas) e empregar directamente os valores normalizados asociados a esa clase no deseño estrutural.

Segundo a norma UNE-EN 1912:2025, **a madeira de castiñeiro de procedencia española está clasificada como D27** para MEF **e D24** no caso de MEF-G.

	MEF b ≤ 70 mm	MEF-G b > 70 mm
Clase Resistente	**D27**	**D24**

Clases resistentes da madeira de castiñeiro. *FONTE: UNE-EN 1912:2025.*

QUE CERTEZA TEMOS NA ORIXE DO MATERIAL EMPREGADO?

> PARA O CÁLCULO ESTRUTURAL CON MADEIRA DE CASTIÑEIRO DE PROCEDENCIA ESPAÑOLA PODEMOS EMPREGAR OS VALORES DO PERFIL RESISTENTE INDICADOS NA **NORMA UNE-EN 56546** OU ASIGNARLLE A CLASE RESISTENTE **D27** OU **D24,** SEGUNDO CORRESPONDA.

Propiedade/Clase Resistente		D24	D27
Propiedades de resistencia en N/mm²			
Flexión	$f_{m,k}$	**24**	**27**
Tracción paralela á fibra	$f_{t,0,k}$	14	16
Tracción perpendicular á fibra	$f_{t,90,k}$	0.6	0.6
Compresión paralela á fibra	$f_{c,0,k}$	22	24
Compresión perpendicular á fibra	$f_{c,90,k}$	5.1	5.3
Cortante	$f_{v,k}$	3.8	3.9
Propiedades de rixidez en kN/mm²			
Módulo de elasticidade medio paralelo á fibra a flexión	$E_{m,0,mean}$	**10.0**	**10.5**
Módulo de elasticidade paralelo á fibra a flexión (5º percentil)	$E_{m,0,k}$	8.4	8.8
Módulo de elasticidade medio perpendicular á fibra	$E_{m,90,mean}$	0.67	0,7
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0.63	0.66
Densidade en kg/m³			
Densidade característica	ρ_k	**510**	**500**
Densidade media	P_{mean}	582	582

NOTA As propiedades recollidas nesta táboa son aplicables á madeira que presente un contido de humidade correspondente a unha temperatura de 20 °C e unha humidade relativa do 65 %, o que equivale a un contido de humidade do 12 % para a maior parte das especies.

Valores das propiedades mecánicas e físicas para a madeira das clases resistentes D24 e D27. *FONTE: UNE-EN 338:2016.*


20.6
GANN
Hydromette RTU 600
X-Y
B
M
200°
600°
Batt.
>7.5
I
°C

03

MADEIRA E HUMIDADE

Madeira verde e punto de saturación da fibra

A **madeira verde** defínese habitualmente como aquela recentemente serrada na que **as paredes celulares están completamente saturadas de auga**, e ademais pode existir auga adicional nos lúmens celulares.

O contido de humidade da madeira verde pode variar aproximadamente entre **o 30 % e máis do 200 %**, dependendo da especie.

No caso do castiñeiro, pódese considerar un contido de humidade medio en estado verde arredor do 120 %, mentres que o punto de saturación da fibra (PSF) se sitúa aproximadamente entre o 20 % e o 22 %.

FONTE: Ross, 2010; Dieste et al., 2013.

SECADO POR DEBAIXO DO PSF: EFECTOS

- **Variación dimensional**
- **Diminución da densidade aparente**
- **Aumento da resistencia e da rixidez**

A madeira é un material higroscópico que absorbe e libera vapor de auga ata acadar un estado de equilibrio co ambiente, denominado **humidade de equilibrio higroscópico**. Por riba do **punto de saturación da fibra (PSF)**, a auga ocupa só os lúmens celulares, sen afectar de forma significativa ás propiedades mecánicas. Pola contra, ao secar por debaixo do PSF, diminúe a auga ligada ás paredes celulares, producíndose cambios dimensionais e unha mellora das propiedades mecánicas.

MADEIRA E HUMIDADE

Subministración de madeira de castiñeiro e relación coa humidade

A madeira de castiñeiro foi tradicionalmente unha especie clave na configuración de vigas, mobles, carpintarías, postes e pequenas estruturas, como hórreos, debido á súa dispoñibilidade e durabilidade. Moitas construcións empregaron castiñeiro serrado para a execución dos seus forxados e estruturas de cuberta.

Preséntase en moitas ocasións a necesidade de incorporar, tanto en proxectos de rehabilitación como de obra nova, elementos estruturais de madeira de castiñeiro. Neste contexto xorde a dificultade de conseguir madeira serrada de grande escuadría seca.

Unha boa opción é a **recuperación de madeira antiga** que, mediante unha inspección axeitada das pezas, pode garantir o seu novo uso estrutural.

> **DIFERENTES ESTUDOS CONCLÚEN QUE A DIMINUCIÓN DAS PROPIEDADES MECÁNICAS É MÍNIMA OU INEXISTENTE NA MADEIRA BEN CONSERVADA.**
>
> *FONTE: Cavalli et al., 2016.*



Vigas de madeira recuperada no laboratorio de Pemade como parte do proxecto TiReX, que desenvolve técnicas de ensaio non destrutivo para fomentar a economía circular na construción.



Neste senso, é importante analizar posibles ataques biolóxicos nas vigas, así como realizar unha clasificación visual de cada peza e, mesmo unha análise mediante métodos non destrutivos.

Outro recurso, analizado nesta publicación, é a posibilidade de utilizar **madeira de gran escuadría recen serrada** como elemento estrutural. A subministración actual de madeira de castiñeiro de gran escuadría realízase na maioría dos casos cunha selección das árbores e serrado posterior no momento da compra, o que leva consigo a subministración da madeira en condicións de alto contido de humidade. O elemento de madeira irá secando ao longo do tempo ata alcanzar a humidade de equilibrio higroscópico co ambiente.



Serrado de madeira de castiñeiro no serradoiro Maderbar (Baralla, Lugo).

QUE É ESPERABLE QUE SUCEDA NESTES CASOS?

Ademais dos efectos comentados anteriormente en relación coas propiedades físicas e mecánicas, durante o secado natural da madeira de castiñeiro é esperable observar:

Unha deformación por fluencia superior á dunha viga seca.

A diminución das dimensións da sección, así como deformacións e a aparición de fendas.


5

EXPERIENCIA PRÁCTICA:
VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

Condicións do estudo

Un dos problemas detectados para o uso da madeira de castiñeiro serrada é a falta de dispoñibilidade de madeira seca e a dificultade que presenta o secado de vigas de gran volume. Polo tanto, a principal opción para o uso desta madeira é a súa colocación en obra sen pasar por un proceso previo de secado.

No marco do Convenio Madeira en Valor II lévase a cabo unha campaña experimental de ensaios de longo prazo sobre madeira de castiñeiro verde de gran escuadría. O obxectivo deste traballo de investigación é cuantificar os efectos do secado na madeira de castiñeiro. Os resultados obtidos neste traballo preséntanse neste capítulo.

O material empregado presenta as seguintes seccións:

- **120 x 150 mm** (análise 3)
- **150 x 200 mm** (análises 1, 2 e 3)
- **180 x 250 mm** (análises 2 e 3)

ANÁLISES REALIZADAS

1. Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1 (interior, con temperatura en torno aos 20º C e humidade relativa non superior ao 65%), cuantificando a diminución da sección así como a aparición de fendas.

2. Variación das propiedades mecánicas das vigas a medida que evoluciona o proceso de secado.

3. Evolución da deformación diferida baixo carga en vigas colocadas en verde.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

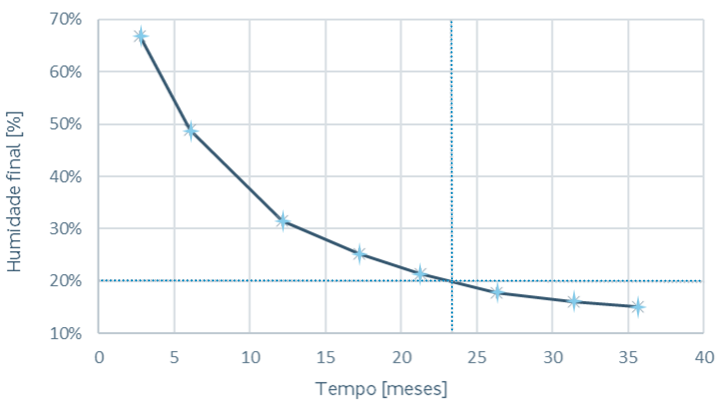
VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

1. Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1

Todas as vigas almacénanse en interior, con temperatura controlada, simulando unha clase de servizo 1 (20 °C e 65 % de humidade relativa). Polo tanto, prodúcese un proceso de secado natural, reproducindo un comportamento similar ao que experimentarían as vigas colocadas nunha estrutura en servizo.

O seguinte gráfico mostra a evolución da humidade en vigas de madeira de castiñeiro verde de sección 150 x 200 mm durante un período de 3 anos, determinada mediante pesadas sucesivas, aproximadamente cada 3 meses.

Algunhas pezas proceden de toradas previamente oreadas no serradorio durante períodos comprendidos entre 3 meses e 3 anos. Nos casos de maior duración do proceso de oreo, e como é de esperar, o contido de humidade inicial foi inferior.



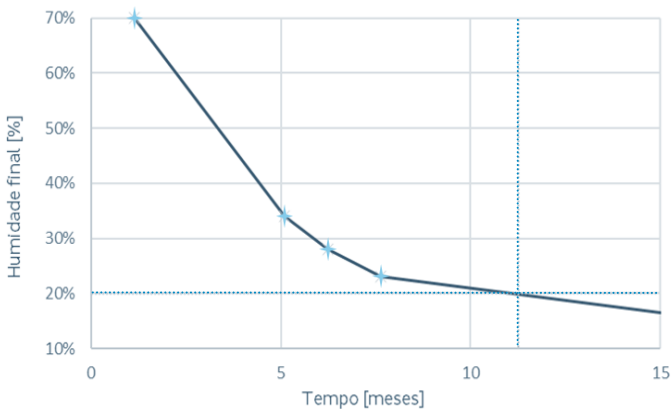
Evolución do contido de humidade (%) en pezas de 150 x 200 mm de madeira de castiñeiro.

AS VIGAS DE CASTIÑEIRO, DE SECCIÓN 150 X 200 MM, TARDARON ARREDOR DE 2 ANOS EN BAIXAR DO 20 % DE CONTIDO DE HUMIDADE.

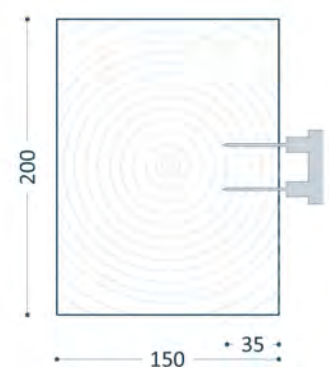
Para pezas de sección 120 x 150 mm lévase a cabo un seguimento do contido de humidade, neste caso determinado mediante xilohigrómetro de resistencia eléctrica.

Para esta sección menor obsérvase que, antes de chegar aos 12 meses, xa é posible acadar un contido de humidade inferior ao 20 %.

> **AS PEZAS DE MENOR SECCIÓN TARDARON AO REDOR DUN ANO EN BAIXAR DO 20 % DE CONTIDO DE HUMIDADE.**



Evolución do contido de humidade (%) en pezas de 120 x 150 mm de madeira de castiñeiro.



Medición do contido de humidade con xilohigrómetro de resistencia eléctrica.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

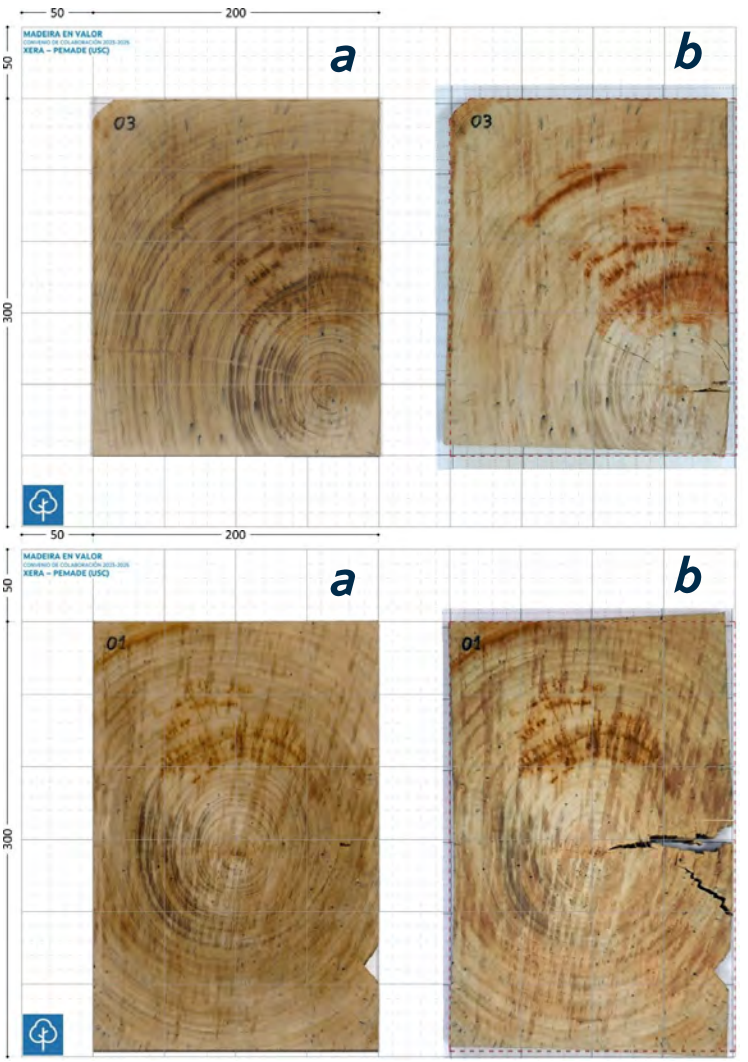
1. Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1: Consecuencias do secado

A primeira consecuencia do secado é a redución das dimensións da sección. Desde a primeira medición, cun contido de humidade en torno ao 70 % - 80 %, a redución das dimensións da sección (anchura e altura) ata acadar o 15 % de humidade é dun **2.4 %**. A sección media de 154 x 206 mm reduciuse ata 151 x 202 mm.

A redución da lonxitude da viga é mínima, situándose en torno ao 0.15 %, polo que pode considerarse desprezable na maioría dos casos.



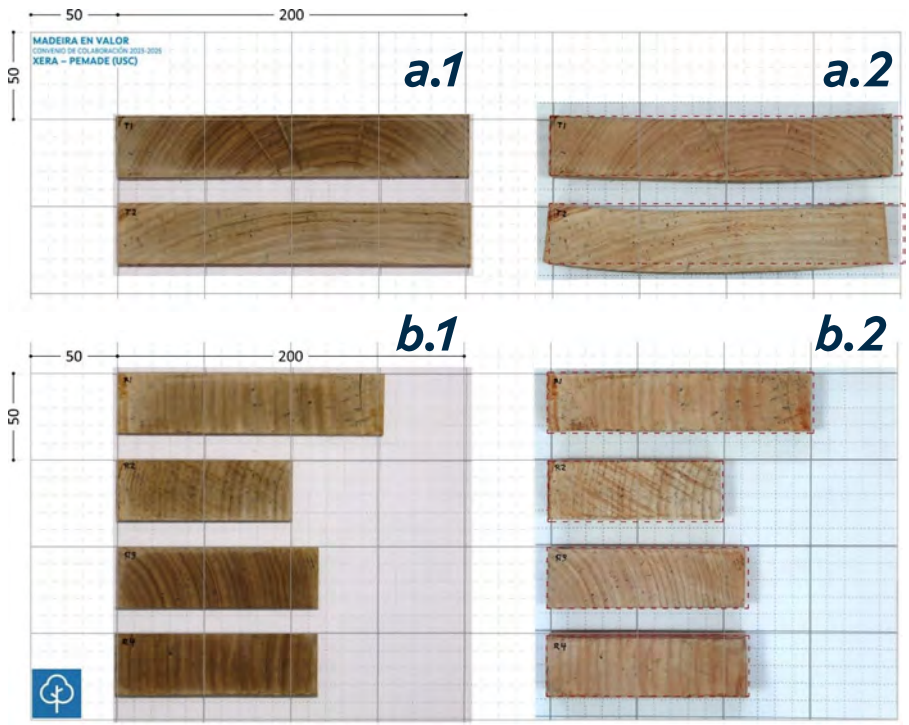
A redución da sección durante o proceso de secado é importante tela en conta á hora de introducir madeira verde nos proxectos, **prestando especial atención aos puntos de apoio e ás unións formuladas**.



Diminución da sección en pezas de madeira de castiñeiro (*a*: fotografía inicial, ao 70 % - 80 % de humidade; *b*: fotografía final coa madeira seca).

O tipo de corte formulado no proceso de serrado é fundamental á hora de prever os movementos da sección, sobre todo nos casos de serrado de táboas de pequena sección.

En mostras de 35 mm de espesor confírmase que o corte radial presenta unha diminución da sección mantendo a rectitude, fronte a un corte tanxencial, que presenta unha curvatura convexa cara ao interior da árbore.



Movemento da sección en táboas de 35 mm de espesor de madeira de castiñeiro (*a.1*: corte tanxencial, fotografía inicial, ao 70 % - 80 % de humidade; *a.2*: corte tanxencial, fotografía final coa madeira seca; *b.2*: corte radial, fotografía inicial, ao 70 % - 80 % de humidade; *b.2*: corte radial, fotografía final coa madeira seca).

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

1. Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1: Consecuencias do secado

A aparición de fendas nas pezas é un efecto intrínseco ao proceso de secado da madeira. Este fenómeno está relacionado coa natureza anisótropa da madeira, que presenta unha contracción diferente nas direccións radial e tanxencial, así como coa presenza de gradientes de humidade entre o exterior e o interior da peza durante o secado.

Neste estudo, observouse que as **fendas de testa** máis importantes aparecen nos primeiros seis meses do proceso de secado, cando as pezas de castiñeiro presentan entre un 40 % e un 50 % de contido de humidade. Estas fendas evolucionan ata que a madeira estabiliza o seu contido de humidade arredor do 15 %. Malia a súa visibilidade, **a súa aparición non supuxo o rexeitamento das pezas no proceso de clasificación visual.**

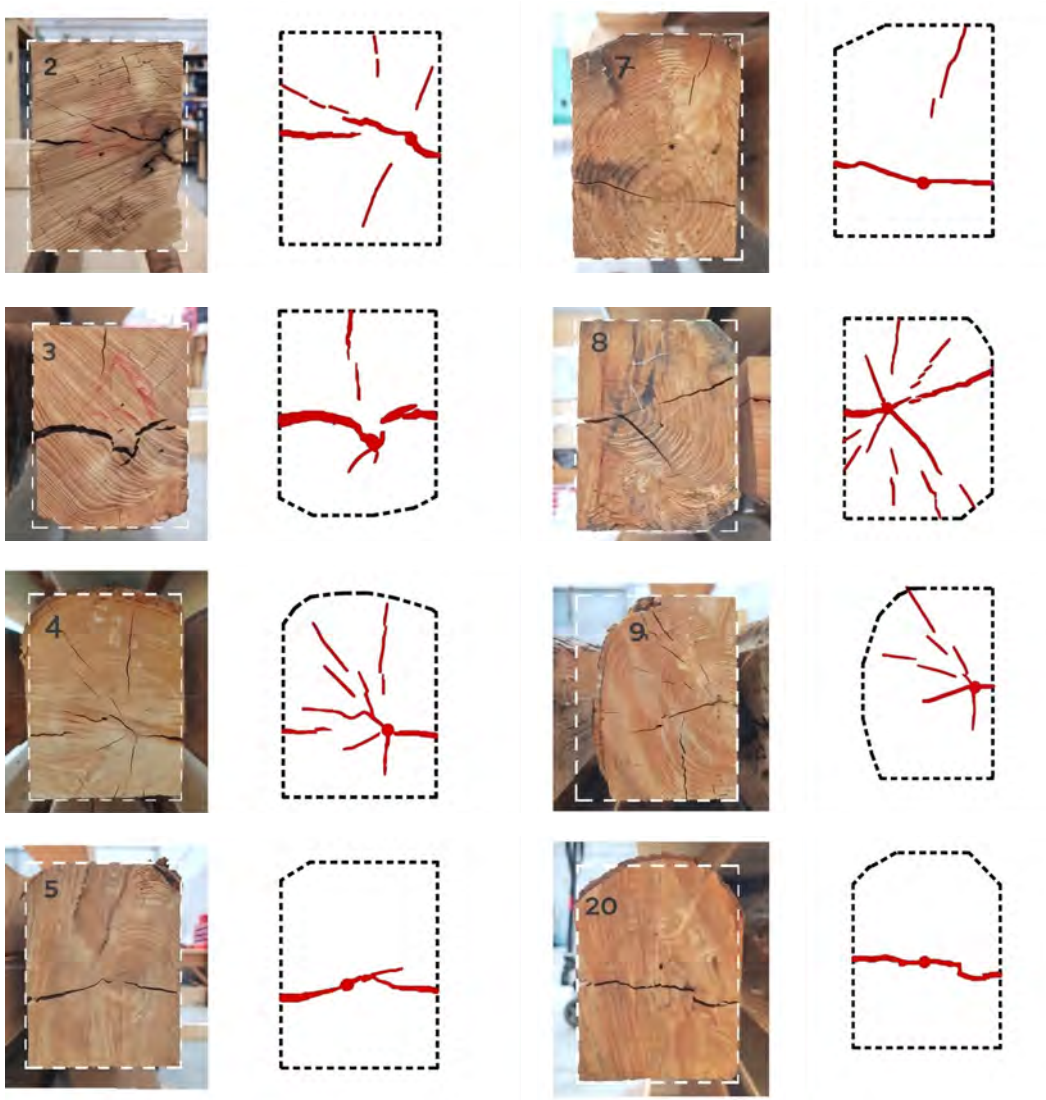
A distribución das fendas e a súa lonxitude varía entre as pezas en función, entre outros factores, da posición da médula.



Fenda de testa nunha peza de madeira de castiñeiro. O punto de cor gris representa a posición da médula.

A predisposición da madeira a fender dende a médula débese a que esta zona, composta por madeira xuvenil, presenta unha menor resistencia mecánica e unha maior inestabilidade dimensional.

A fenda adoita buscar o camiño máis curto para liberar a tensión. Se a médula está preto dunha cara da peza, a fenda abrirase nesa dirección.



Fendas de testa rexistradas nalgunhas das pezas analizadas. Imaxes tomadas ao finalizar o proceso de secado, cun contido de humidade da madeira arredor do 15 %.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

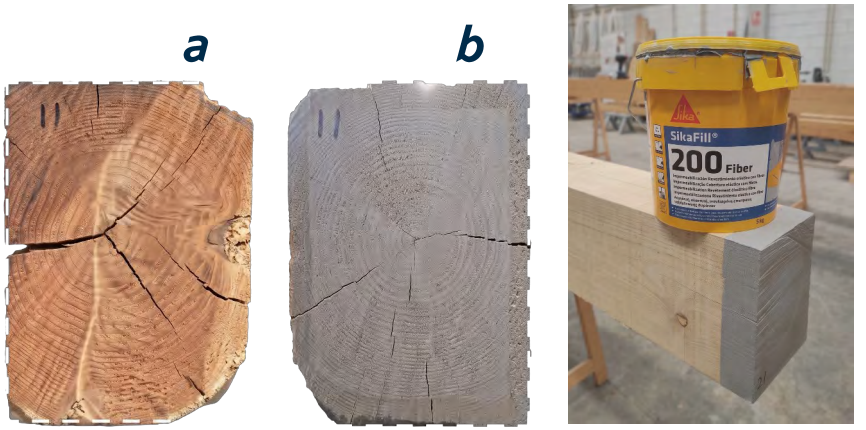
VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

1. Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1: Consecuencias do secado

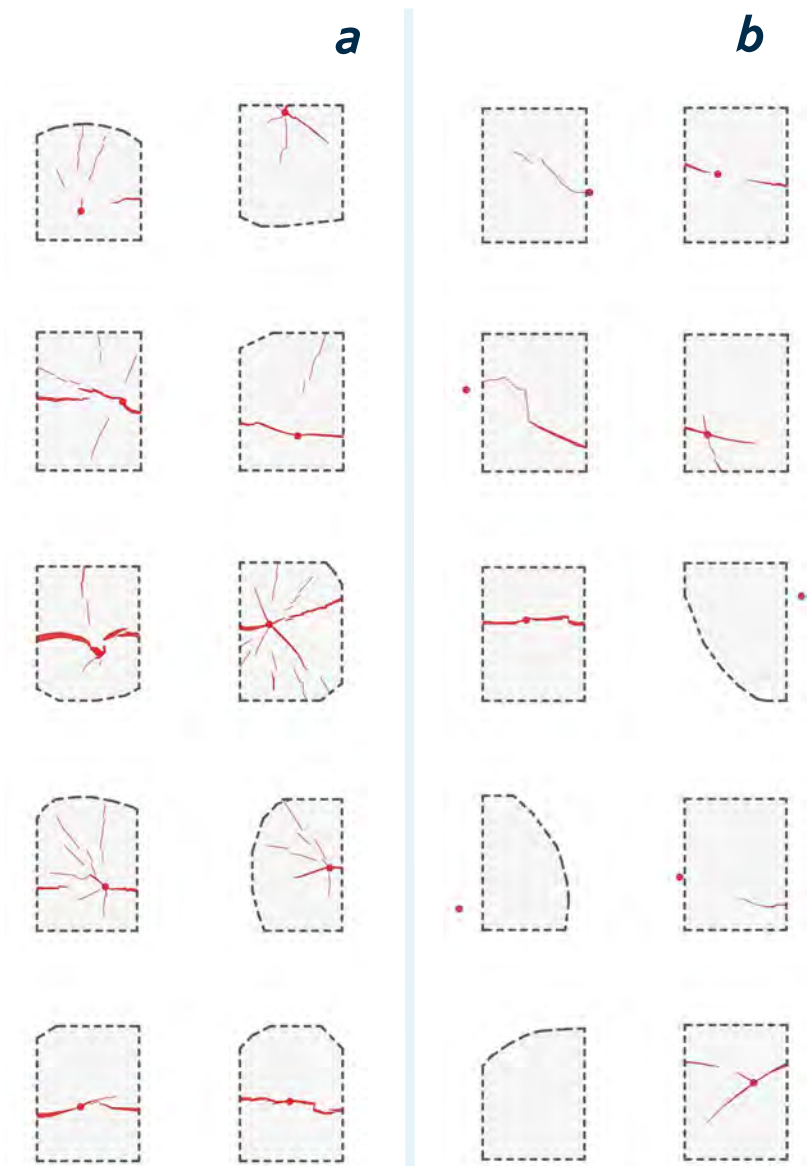
Nunha das testas das pezas aplicouse unha **membrana líquida acrílica** co fin de limitar a transpiración nestas superficies e analizar o seu efecto sobre a aparición de fendas. As testas constitúen as zonas de maior intercambio de humidade debido á orientación das fibras, polo que o secado é máis rápido nestes puntos, xerando gradientes de humidade entre a superficie e o interior da peza.

A aplicación desta membrana actúa como barreira parcial ao fluxo de vapor, retardando a perda de humidade polas testas e favorecendo un secado máis uniforme ao longo da peza.

A comparación entre testas tratadas e non tratadas permite avaliar a **eficacia desta medida**, observándose unha diminución significativa tanto no número como na dimensión das fendas nas zonas protexidas.



Aplicación de membrana líquida acrílica e imaxes das dúas testas da peza *11*, sen tratamento (*a*) e con tratamento (*b*).



Fendas de testa rexistradas nalgunhas das pezas analizadas, correspondentes a testas sen tratamento (*a*) e testas con tratamento (*b*). Imaxes tomadas ao finalizar o proceso de secado, cun contido de humidade da madeira arredor do 15 %.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

1. Evolución da humidade das pezas en clase de servizo 1: Consecuencias do secado

Nas caras das vigas van aparecendo diferentes fendas que, en xeral, non afectan ao comportamento estrutural a flexión, aínda que si teñen relevancia desde o punto de vista estético.

> **A CAMPAÑA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS REALIZADA SOBRE AS VIGAS CUN CONTIDO DE HUMIDADE DE ARREDOR DO 15 % DEMOSTRA QUE AS FENDAS APARECIDAS NON SUPUXERON UNHA DIMINUCIÓN DAS PROPIEDADES MECÁNICAS. OS RESULTADOS OBTIDOS MANTÉÑENSE EN CONFORMIDADE COS VALORES REFERENCIADOS PARA A MADEIRA DE CASTIÑEIRO NA NORMATIVA TÉCNICA DE APLICACIÓN.**

	MEF-G b > 70 mm (Norma EN 56546)	MEF-G b > 70 mm (Campaña experimental Convenio Madeira en Valor II)
Módulo de elasticidade medio (N/mm²)	**10280**	**11459**
Resistencia á flexión característica (N/mm²)	**26.8**	**29.1**

Valores do módulo de elasticidade medio e da resistencia característica a flexión da madeira de castiñeiro, segundo a norma UNE-EN 56546:2024 e os obtidos na campaña experimental realizada no marco do Convenio Madeira en Valor II.



Fendas de cara rexistradas nalgunhas das pezas analizadas. Imaxes tomadas ao finalizar o proceso de secado, cun contido de humidade da madeira arredor do 15 %.

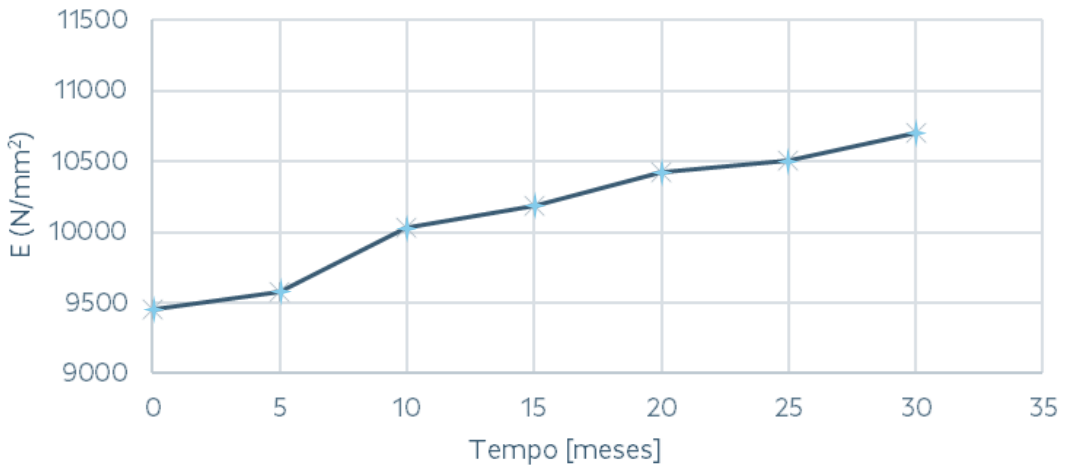
EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

2. Variacións das propiedades mecánicas a medida que evoluciona o proceso de secado

Durante o proceso de secado da madeira prodúcense dous efectos principais con influencia directa no comportamento estrutural das vigas: por unha banda, o **aumento do módulo de elasticidade**, e por outra, a **redución das dimensións da sección transversal**.

En termos xerais, canto menor é o contido de humidade da madeira, mellor é o seu comportamento mecánico, incrementándose o módulo de elasticidade (**E**). Este parámetro representa a capacidade do material para deformarse baixo carga, sendo maior canto máis ríxido é o material.



Evolución do módulo de elasticidade (E) (N/mm²) das pezas de madeira de castiñeiro a medida que avanza o proceso de secado.



Ensaio de flexión segundo a norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 para a determinación do módulo de elasticidade das pezas de madeira de castiñeiro.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

2. Variacións das propiedades mecánicas a medida que evoluciona o proceso de secado

No caso de vigas traballando a flexión, a rixidez global do elemento non depende unicamente do material, senón tamén da xeometría da sección. En particular, a rixidez a flexión vén dada polo produto **E · I**, onde **I** é o momento de inercia da sección transversal. Para unha sección rectangular, este parámetro calcúlase como:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

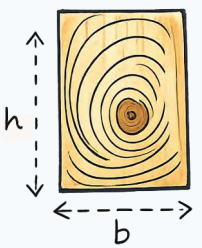
Sendo:

b a anchura da sección

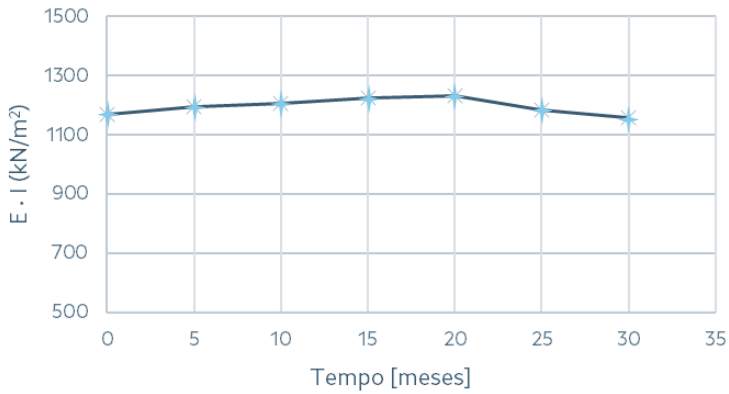
h a altura da sección

Durante o secado, a madeira experimenta unha merma que reduce as dimensións da sección, o que implica unha **diminución do momento de inercia** (I). Este efecto ten unha influencia negativa sobre a rixidez a flexión. Por outra banda, e como se comentou anteriormente, de forma simultánea, o **módulo de elasticidade** (E) **aumenta** ao diminuír o contido de humidade, compensando en gran medida a perda de inercia.

Pequenas reducións nas dimensión (b, h), especialmente na altura (h), poden provocar diminucións apreciables na rixidez da viga.



Os resultados experimentais amosan que estes dous efectos contrapostos tenden a equilibrarse ao longo do proceso de secado, de maneira que **a rixidez á flexión das vigas** (expresada como **E · I**) **se mantén practicamente constante.**



Evolución da rixidez (kN/m²) das pezas de madeira de castiñeiro a medida que avanza o proceso de secado.

Madeira Verde: contido de Humidade > 18%



De forma conservadora, **recoméndase a corrección dos valores** do módulo de elasticidade (E_0) e da resistencia á compresión ($f_{c,0}$) nos casos de madeira con alto contido de humidade, mediante as seguintes fórmulas.

A norma UNE-EN 384 establece o **18%** como valor de humidade de referencia cando o grao real de humidade da madeira supera esa porcentaxe.

Resistencia á compresión:

$$f_{c,0}(verde) = \frac{f_{c,0}}{1 + 0.03 \cdot (18 - 12)}$$

Módulo de elasticidade:

$$E_0(verde) = \frac{E_0}{1 + 0.01 \cdot (18 - 12)}$$

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

2. Variacións das propiedades mecánicas a medida que evoluciona o proceso de secado

As pezas obxecto de estudo ensaiáronse a flexión segundo a norma **UNE-EN 408** para determinar os módulos de elasticidade (global e local) e a resistencia á flexión. Os resultados desta campaña experimental recóllense na seguinte táboa, xunto co valor característico da resistencia á flexión e o valor medio do módulo de elasticidade.



Roturas dalgunhas das pezas de madeira de castiñeiro sometidas a ensaio de flexión segundo a norma EN 408:2011+A1 para a determinación da resistencia á flexión.

VIGA	b [mm]	h [mm]	Área sección [cm²]	a [mm]	l [mm]	F_{max} [kN]	E verde [N/mm²]	E [14%] [N/mm²]	f_m [N/mm²]	Humidade [%]
1	151	199	300	1200	3600	82.15	8683	**10354**	**49.5**	15%
2	150	201	302	1200	3600	83.05	9621	**10984**	**49.3**	13%
3	150	201	302	1200	3600	71.77	9144	**10047**	**42.6**	15%
4	149	200	298	1200	3600	62.61	8814	**10013**	**37.8**	17%
5	152	200	304	1200	3600	93.10	9473	**11122**	**55.1**	14%
6	151	200	302	1200	3600	44.79	9561	**10669**	**26.7**	15%
7	153	204	312	1200	3600	101.84	10243	**11940**	**57.6**	14%
8	151	206	311	1200	3600	73.03	10235	**11366**	**41.0**	15%
9	152	206	313	1200	3600	75.81	10023	**10240**	**42.3**	16%
10	183	253	462	1800	5000	72.48	9961	**11196**	**33.5**	15%
11	181	253	458	1800	5000	89.61	10593	**11609**	**41.8**	13%
12	150	205	308	1800	5000	45.06	10208	**12243**	**38.6**	13%
13	154	204	314	1800	5000	42.49	9171	**9926**	**35.8**	13%
14	152	201	305	1200	3600	62.42	10577	**12418**	**36.7**	13%
15	153	202	308	1200	3600	55.21	9052	**11109**	**31.9**	12%
16	118	150	177	1200	3600	34.64	9736	**12346**	**47.0**	11%
17	120	142	170	1200	3600	37.94	12477	**14361**	**56.7**	11%
19	150	203	305	1500	4200	57.43	9858	**11979**	**41.8**	14%
20	151	201	304	1200	3600	81.73	10836	**11979**	**48.2**	14%
22	117	147	171	1200	3600	28.61	10201	**12167**	**41.0**	13%
23	116	146	169	1200	3600	30.90	10408	**12563**	**45.0**	12%

Módulo de elasticidade medio [verde]			Resistencia á flexión media		
E_m	9946	N/mm²	$f_{m,med}$	42,9	N/mm²
Módulo de elasticidade medio [14%]			**Resistencia á flexión característica**		
E_m	**11459**	**N/mm²**	**$f_{m,k}$**	**29,1**	**N/mm²**

Resultados individuais, medios e característico do ensaio a flexión según UNE-EN 408 (b: anchura da peza; h: altura da peza; área da sección: b·h/100; a: distancia entre a carga e o apoio; l: luz de ensaio; F_{max}: forza máxima do ensaio; E_{verde}: módulo de elasticidade da peza en condicións de humidade; E [14%]: módulo de elasticidade da peza ao 14 % de contido de humidade; f_m: resistencia á flexión; Humidade: humidade da peza no momento do ensaio a flexión.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:

VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

3. Evolución da deformación diferida baixo carga en vigas colocadas en verde

A deformación diferida, tamén coñecida como fluencia, é o incremento progresivo da deformación dunha peza sometida a unha carga constante ao longo do tempo, especialmente relevante no caso da madeira debido ao seu comportamento viscoelástico e á influencia das condicións ambientais.

Este fenómeno depende de factores como o contido de humidade, a temperatura, o nivel de carga e o tempo de exposición. Para a súa avaliación emprégase o parámetro $\mathbf{k_{def}}$, que permite cuantificar o aumento da deformación diferida respecto da deformación instantánea inicial, sendo **fundamental para o cálculo das deformacións a longo prazo** en elementos estruturais de madeira.

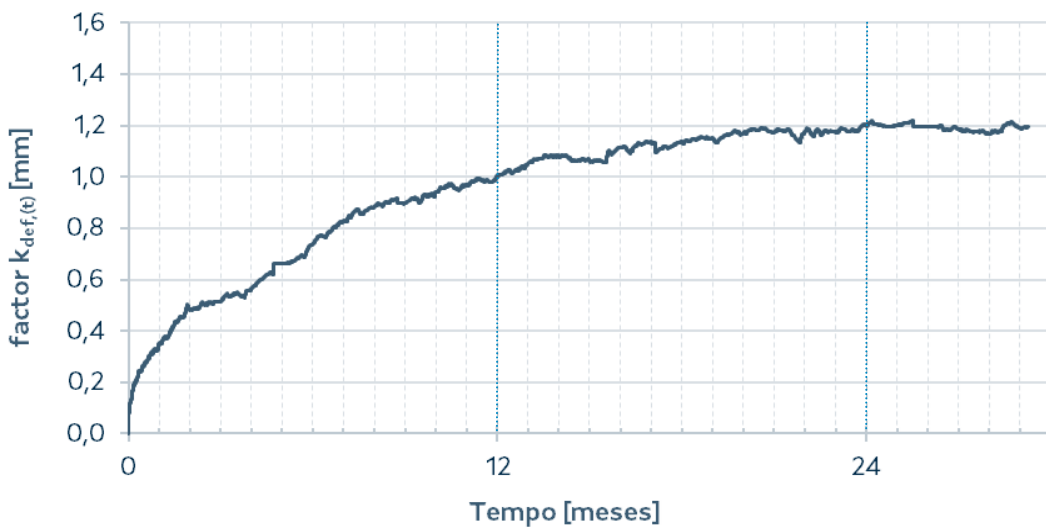




Ensaios de longo prazo sobre vigas de castiñeiro de diferentes seccións sometidas a unha carga estática constante, rexistrando a evolución da deformación en función do tempo, así como das condicións de temperatura e humidade durante o proceso de secado.

No caso de madeira colocada en verde, o efecto da fluencia vese intensificado, polo que, para efectos de cálculo, recoméndase incrementar en 1 unidade o valor do factor k_{def}, según indica a norma UNE-EN 1995-1-1:2016 (*Eurocódigo 5*). Así, para unha clase de servizo 1 en madeira serrada, adoptaríase un valor de **k_{def} = 1,6 (1 + 0,6)**.

O gráfico seguinte mostra a evolución deste factor ao longo do tempo para vigas de castiñeiro de distinta sección sometidas a carga permanente, permitindo analizar a influencia do secado e da xeometría no comportamento diferido do material. **O valor obtido na campaña experimental é coherente co valor esperado e indicado na normativa de referencia**.



Evolución do valor medio do factor k_{def} (mm) en pezas de madeira de castiñeiro ao longo do proceso de secado durante ensaios de longo prazo.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:
VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

Conclusións e recomendacións de aplicación

PROCESO DE SECADO

- **O proceso de secado da madeira verde en clase de servizo 1 é lento**. Unha sección de 150 × 200 mm tarda aproximadamente 2 anos en baixar do 20 % de humidade, mentres que unha sección menor, de 120 × 150 mm, tarda arredor dun ano.

- **O proceso de oreo das trozas resulta relevante**, xa que permite reducir a humidade libre das pezas no momento do serrado, acadando así un menor contido de humidade inicial. Do mesmo xeito, este proceso contribúe a diminuír as tensións internas das trozas, proporcionando maior estabilidade á peza serrada final.

- Obsérvase unha **diminución das dimensións da sección** asociada ao secado por debaixo do punto de saturación da fibra (20 – 22 %), cunha redución aproximada do 2,4 %. É importante ter en conta esta diminución da sección, prestando especial atención aos puntos de apoio e ás unións formuladas.

- As **fendas nas testa e nas caras aparecen maioritariamente nas fases iniciais do secado** (primeiros seis meses), iniciándose na médula e propagándose en dirección radial. Obsérvase que o seu desenvolvemento tende a estabilizarse ao acadar contidos de humidade próximos ao 15 %, **sen implicar o rexeitamento das pezas** segundo os criterios de clasificación visual.

- A aplicación dunha **membrana líquida acrílica** nas testas contribúe de maneira eficaz a **reducir a aparición de fendas** nestas zonas, ao limitar a perda rápida de humidade.

- **As fendas que aparecen durante o proceso de secado non supoñen unha diminución das propiedades mecánicas** da madeira. Este feito queda evidenciado polos resultados dos ensaios de flexión, que confirman a integridade estrutural das pezas malia a presenza destas fendas.

EXPERIENCIA PRÁCTICA:
VIGAS DE CASTIÑEIRO EN VERDE

Conclusións e recomendacións de aplicación

PROPIEDADES MECÁNICAS

- Os ensaios amosan unha tendencia ao **incremento do módulo de elasticidade a medida que diminúe o contido de humidade**, en coherencia co comportamento esperado da madeira por debaixo do punto de saturación da fibra.

- A evolución da rixidez reflicte o efecto combinado do incremento do módulo de elasticidade e da redución da sección. Nos resultados obtidos, o aumento do módulo de elasticidade (E) compensa parcialmente a diminución do momento de inercia (I), dando lugar a un **valor de rixidez practicamente constante**, o que simplifica o proceso de cálculo estrutural.

- A madeira colocada en verde presenta unha **maior deformación diferida** que a mesma peza seca. Para o seu cálculo, resulta suficiente incrementar en unha unidade o factor de fluencia k_{def}; así, en clase de servizo 1, pasaría de 0,6 a 1,6.

RECOMENDACIÓNS DE APLICACIÓN

- Cando se colocan vigas de madeira en verde en obra, resulta fundamental **permitir a evacuación da humidade interna**, garantindo unha ventilación adecuada da peza. Para iso, débese evitar o contacto continuo con superficies impermeables ou a súa oclusión mediante revestimentos que dificulten o intercambio higroscópico. O elemento estrutural debe permanecer ventilado, favorecendo un secado progresivo, natural e o máis homoxéneo posible, co fin de minimizar a aparición de gradientes de humidade que poidan xerar tensións internas, deformacións ou fendas.

- Así mesmo, cómpre ter en conta o **deseño construtivo**, garantindo detalles que faciliten a drenaxe da auga e eviten a acumulación de humidade, especialmente nas zonas de apoio e unións. Un secado controlado en servizo contribúe a mellorar o comportamento a longo prazo da madeira e a súa durabilidade.

- No que respecta aos elementos metálicos en contacto coa madeira, recoméndase o **uso de aceiros inoxidables**, preferiblemente dos tipos A2 ou A4, co fin de evitar procesos de corrosión favorecidos pola elevada humidade inicial da madeira e pola posible presenza de compostos extractivos. Esta medida resulta especialmente importante nas fases iniciais tras a posta en obra, cando o contido de humidade é máis elevado.

APLICACIÓN DE CÁLCULO ESTRUTURAL

Trabe

Esta aplicación para o cálculo estrutural desenvólvese no marco do Convenio Madeira en Valor II promovido pola Axencia Galega da Industria Forestal (Xera) en colaboración coa Universidade de Santiago de Compostela (USC) a través da Plataforma de Enxeñaría da Madeira Estrutural (Pemade).

Trátase dun recurso técnico orientado ao cálculo estrutural de produtos de madeira, que serve de apoio á toma de decisións por parte do prescritor, facilitando a definición de solucións construtivas en condicións de calidade e seguridade.

A aplicación permite o cálculo de elementos estruturais empregando as principais especies forestais galegas, contribuíndo así á promoción do uso de madeira local de calidade.

O acceso realízase a través de: https://trabe.pemade.com





Esta plataforma está composta por unha serie de módulos que permiten o cálculo de:

Cálculo forxado

Para o cálculo normativo de vigas de madeira como base dun forxado, permitindo a selección de madeira serrada de coníferas ou frondosas, madeira lamelada ou características personalizadas.

Cálculo cuberta

Para o cálculo de vigas de cuberta, incorporando accións como neve e vento, así como a inclinación da viga ou o xiro da sección.

Cálculo CLT

Para o dimensionamento de elementos de CLT (Cross Laminated Timber) sometidos a cargas perpendiculares ao plano, definindo a sección a partir da selección das clases resistentes das diferentes capas que o compoñen.

Columnas

Para o cálculo de columnas de madeira, incluíndo as verificacións de inestabilidade por pandeo.

Unións tipo pasador

Recurso de apoio para o cálculo de unións tipo pasador segundo o punto 8.3 do CTE.

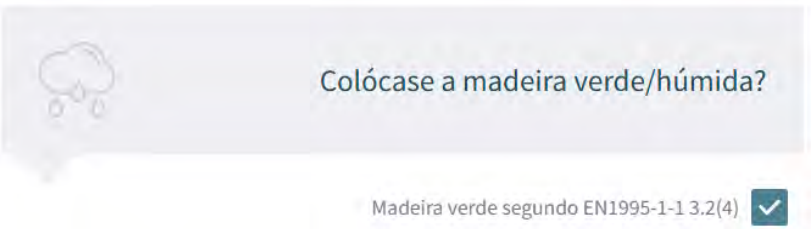
APLICACIÓN DE CÁLCULO ESTRUTURAL

Trabe: uso de madeira verde

O emprego de madeira de castiñeiro en estado verde -cun contido de humidade superior ao punto de saturación da fibra- é viable en aplicacións estruturais, como xa se indicou anteriormente nesta guía. Porén, cómpre **considerar o incremento das deformacións diferidas** derivado do proceso de secado baixo carga.

A este respecto, dado que o CTE DB SE-M non establece criterios específicos, resulta de aplicación o disposto na norma UNE-EN 1995-1-1 (apartado 3.2(4)). Esta normativa sinala que, para madeira instalada cun contido de humidade superior ou próximo ao punto de saturación e susceptible de secar baixo carga, os valores de k_{def} deben incrementarse en 1. De maneira práctica:

Deformación final = Deformación instantánea × (1+k_{def})



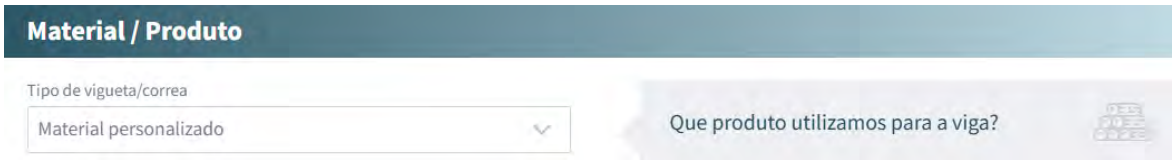
Material	Norma	Clase de servizo		
		1	2	3
Madeira maciza	EN 14081-1	0.60	0.80	2.00
Madeira verde	**-**	**1.60**	**1.80**	**3.00**

Valores de k_{def} para a madeira maciza seca e en condicións de saturación (verde). *Fonte: adaptado da EN 1995-1-1:2015.*

O coeficiente **k_{def}** actúa como un factor de amplificación para estimar as deformacións a longo prazo. Na madeira, a diferenza doutros materiais, a deformación total non se limita á resposta instantánea tras a carga, senón que inclúe unha compoñente adicional denominada **deformación diferida**, derivada do fenómeno da fluencia.

COMO INTRODUCIMOS AS PROPIEDADES DO MATERIAL?

Cando se utiliza madeira de castiñeiro de gran escuadría (**MEF-G**) **en estado verde**, é posible seleccionar unha clase resistente ou ben introducir un material personalizado para reflectir mellor as súas propiedades reais.



Debido a que a resistencia á compresión, o módulo de elasticidade e a densidade media dependen da humidade, as propiedades para o estado verde poden calcularse a partir da clase **D24 (EN 338)**, aplicando as **correccións indicadas na norma EN 384** (5.4.2).

	D24 [EN 338]
$f_{m,k}$	24.0 N/mm²
$f_{c,0,k}$	21.0 N/mm²
$f_{v,k}$	3.7 N/mm²
$E_{m,0,mean}$	10000 N/mm²
$E_{m,0,k}$	8400 N/mm²
G_{mean}	630 N/mm²
ρ_m	580 kg/m³

Resistencia á compresión:

$$f_{c,0}(verde) = \frac{f_{c,0}}{1 + 0.03 \cdot (\mathbf{18} - 12)}$$

Módulo de elasticidade:

$$E_0(verde) = \frac{E_0}{1 + 0.01 \cdot (\mathbf{18} - 12)}$$

Densidade:

$$\rho\,(verde) = \frac{\rho}{1 - 0.005 \cdot (\approx \mathbf{80} - 12)}$$

	D24 en verde
$f_{m,k}$	**24.0 N/mm²**
$f_{c,0,k}$	**17.8 N/mm²**
$f_{v,k}$	**3.7 N/mm²**
$E_{m,0,mean}$	**9434 N/mm²**
$E_{m,0,k}$	**7925 N/mm²**
G_{mean}	**630 N/mm²**
ρ_m	**879 kg/m³**

BIBLIOGRAFÍA

Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., e Sousa, H. S. 2016. A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. *Construction and Building Materials*, *114*, 681–687. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001

Centro de Investigación Forestal de Lourizán. *Castaño*. Consellería do Medio Rural. Xunta de Galicia. https://lourizan.xunta.gal/es/areas/area-de-silvicultura-y-mejora/recursos-geneticos/castano

Dieste, A., Rodríguez, K., e Baño, V. 2013. Wood–water relations of chestnut wood used for structural purposes. *European Journal of Wood and Wood Products*, *71*(1), 133–134. https://doi.org/10.1007/s00107-012-0627-6

IFCG (2024). *Inventario Forestal Continuo de Galicia*. Xunta de Galicia.

IFN4 (2018–2021). *Cuarto Inventario Forestal Nacional*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

Ross, R.J. (2010). *Wood handbook: wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190

TiReX Project. 2024. *Framework for smart condition reassessment of reclaimed timber to extend the service life of long-lived wood products using non-destructive testing and automated data postprocessing*. ForestValue2. https://www.tirex.info/

UNE 56546:2024. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas*. Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 1912:2025. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.* Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 1995-1-1:2016. *Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.* Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 338:2016. *Madera estructural. Clases resistentes.* Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 384:2016+A2:2023. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.* Asociación Española de Normalización.

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.* Asociación Española de Normalización.

Vega, A. 2013. *Caracterización mecánica de la madera estructural de Castanea sativa Mill., clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos* (Tese doutoral, Universidade de Santiago de Compostela).

Vega, A., Baño, V., Touza, M., Piñeiro, G., Gené, J., e Correal, E. 2014. *Report of the mechanical characterization of chestnut (Castanea sativa Mill.) sawn timber from Spain and strength class assignment according to EN 1912* (Informe TG1/201410/43rev). Comité CEN/TC124/WG2/TG1.



XUNTA
DE GALICIA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

Pemade
Plataforma de enxeñaría
da madeira estrutural