



# ESTRUCTURAS DE MADERA

## 2.3. Propiedades mecánicas

1. Propiedades mecánicas de la madera

2. Propiedades mecánicas en el cálculo estructural con madera

3. Factores que influyen en las propiedades mecánicas

2.3. PROPIEDADES  
MECÁNICAS

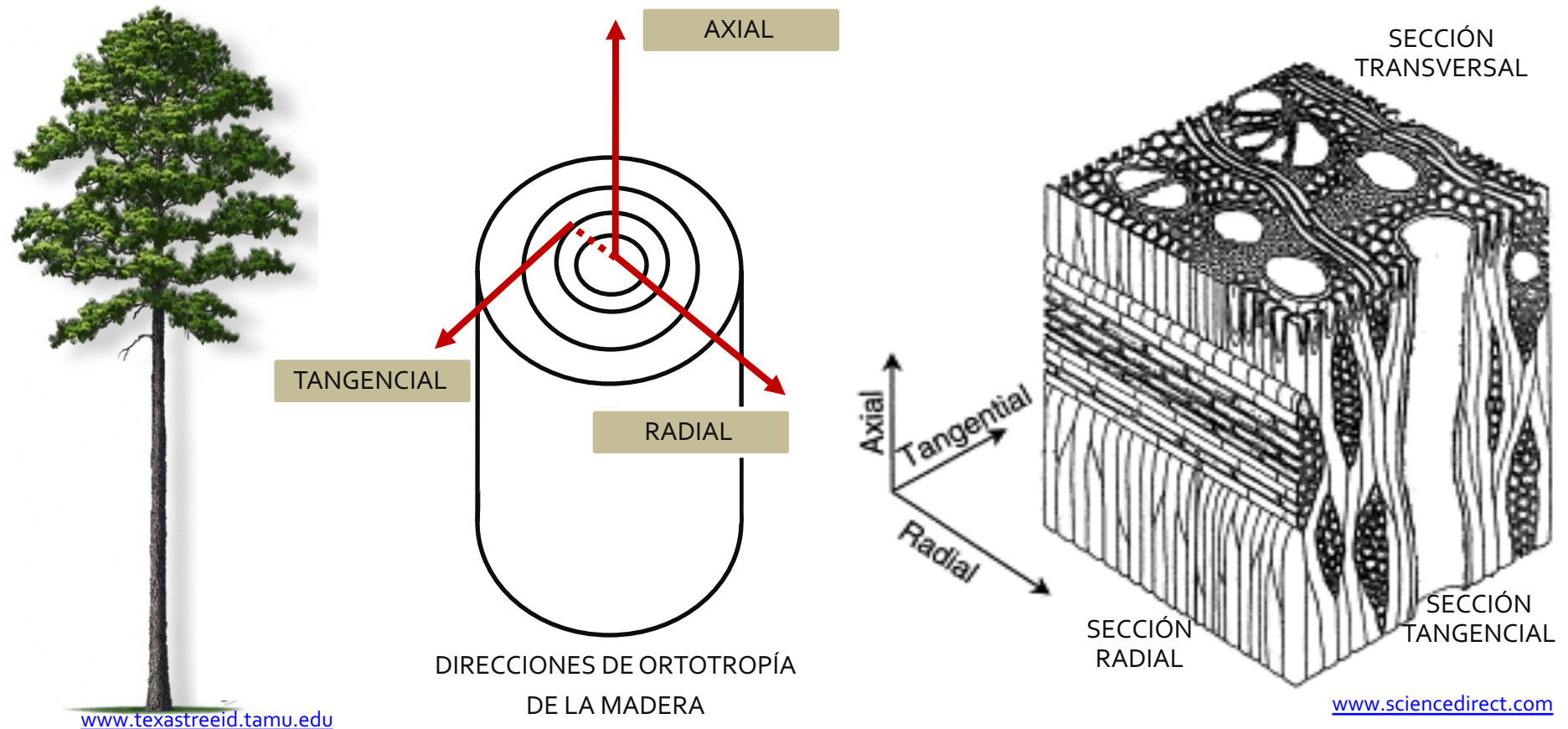
# Anisotropía de la madera

## ANISOTROPÍA

Las propiedades físicas y mecánicas de la madera varían en función de la dirección del esfuerzo con relación a la orientación de las fibras.

## ORTOTROPÍA

La madera presenta tres planos de simetría elástica perpendiculares entre sí.



# Elasticidad

## ELASTICIDAD

## CONSTANTES ELÁSTICAS

RELACIONES ENTRE TENSIONES Y DEFORMACIONES:

ISÓTROPO

MODULO ELASTICIDAD  
LONGITUDINAL :

E

MODULO ELASTICIDAD  
TRANSVERSAL O DE  
CORTANTE:

G

COEFICIENTES DE  
POISSON: $\nu$ 

$$G = E / 2 \cdot (1 + \nu)$$

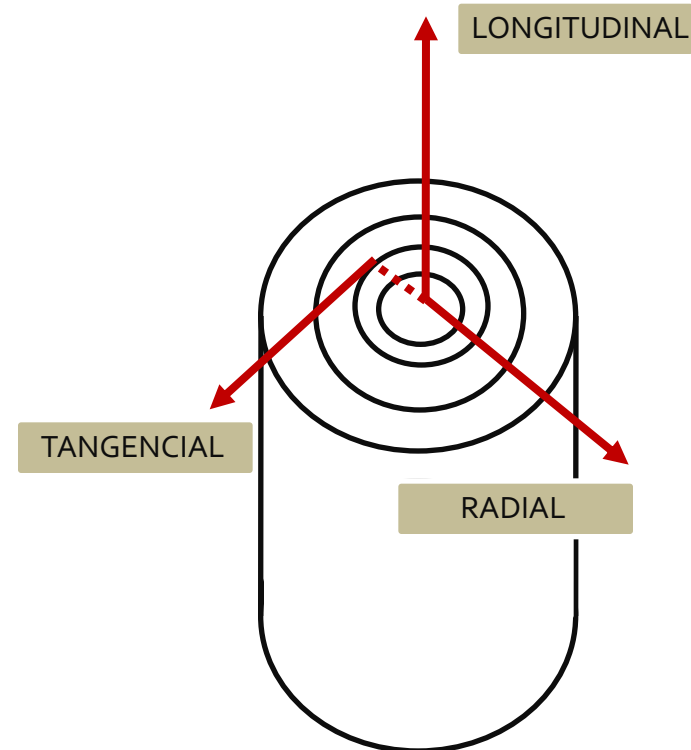
ORTÓTROPO

 $E_L, E_R, E_T$  $G_{TL}, G_{TR}, G_{RL}$  $\nu_{RT}, \nu_{TL}, \nu_{RL}$  $\nu_{TR}, \nu_{LT}, \nu_{LR}$ 

$$\nu_{TL} / E_T = \nu_{LT} / E_L$$

$$\nu_{RL} / E_R = \nu_{LR} / E_L$$

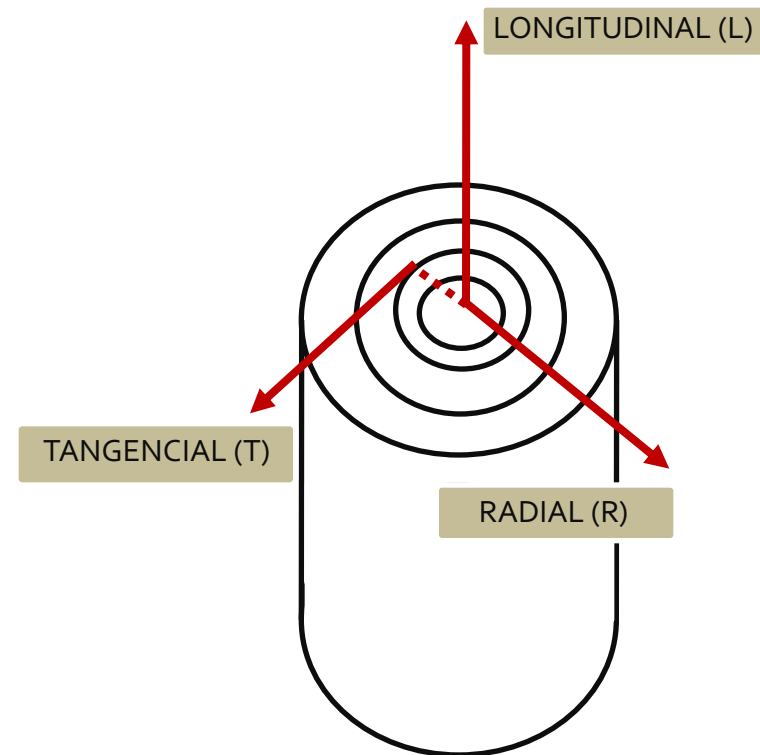
$$\nu_{RT} / E_R = \nu_{TR} / E_T$$



## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL ( $E_i$ ) $E_L, E_R, E_T$ 

Relación entre la tensión  $\sigma_i$  y el alargamiento unitario  $\varepsilon_i$  que se produce en la dirección  $i$

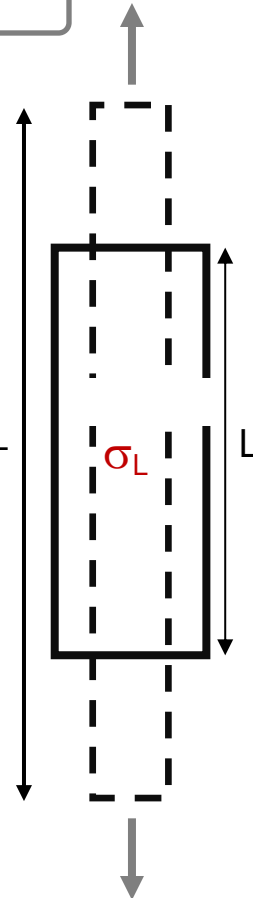


## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL ( $E_L$ ) $E_L, E_R, E_T$ Relación entre la tensión  $\sigma_i$  y el alargamiento unitario  $\varepsilon_i$  que se produce en la dirección  $i$  $E_L$ 

$$E_L = \sigma_L / \varepsilon_L$$

TRACCIÓN

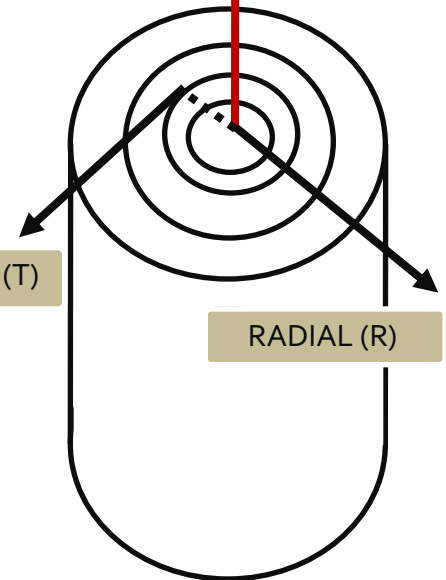
 $(1 + \varepsilon_i) \cdot L$  $\sigma_L$ 

L

TANGENCIAL (T)

RADIAL (R)

LONGITUDINAL (L)





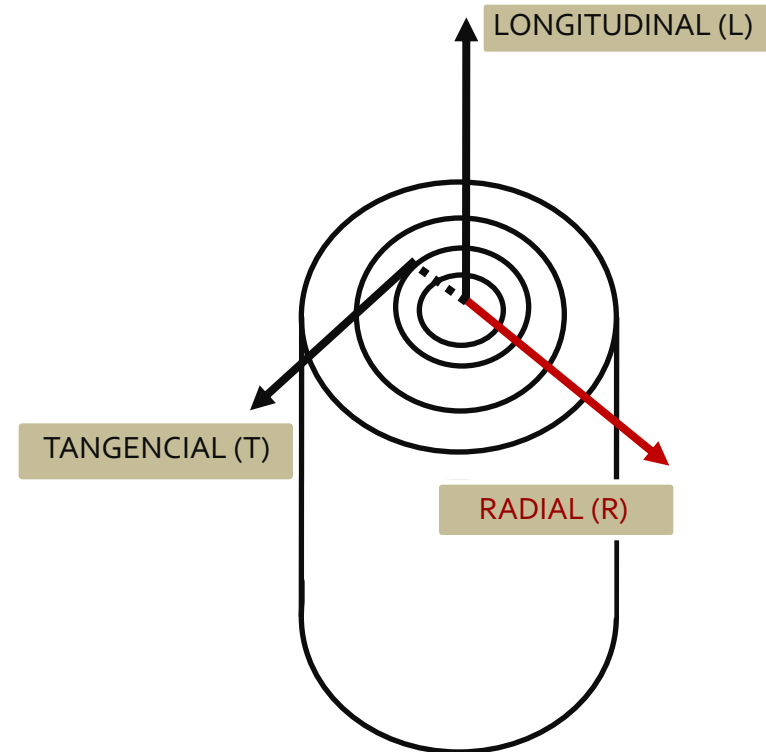
## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL ( $E_i$ ) $E_L, E_R, E_T$ Relación entre la tensión  $\sigma_i$  y el alargamiento unitario  $\varepsilon_i$  que se produce en la dirección  $i$  $E_L$ 

$$E_L = \sigma_L / \varepsilon_L$$

 $E_R$ 

$$E_R = \sigma_R / \varepsilon_R$$



## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL ( $E_i$ ) $E_L, E_R, E_T$ Relación entre la tensión  $\sigma_i$  y el alargamiento unitario  $\varepsilon_i$  que se produce en la dirección  $i$  $E_L$ 

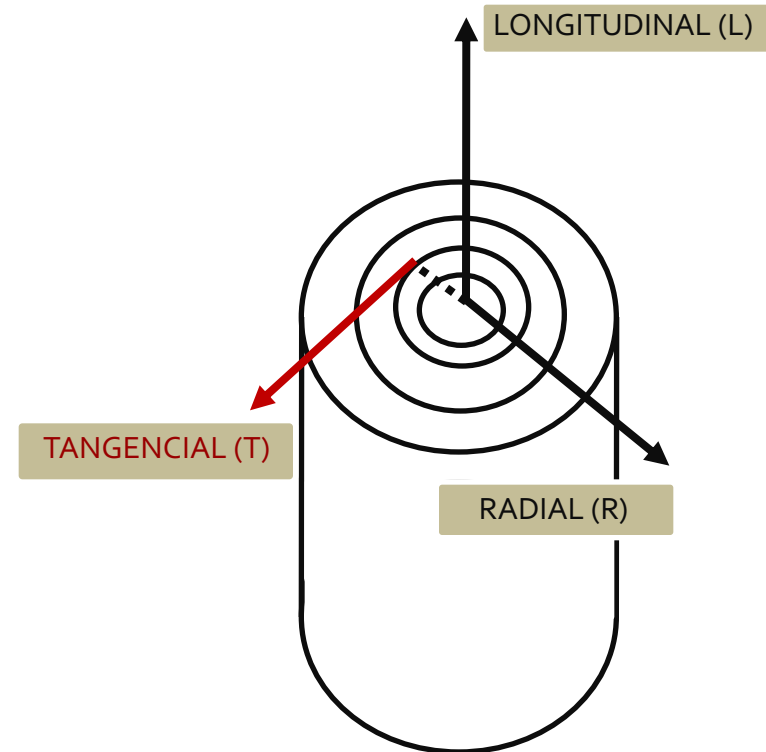
$$E_L = \sigma_L / \varepsilon_L$$

 $E_R$ 

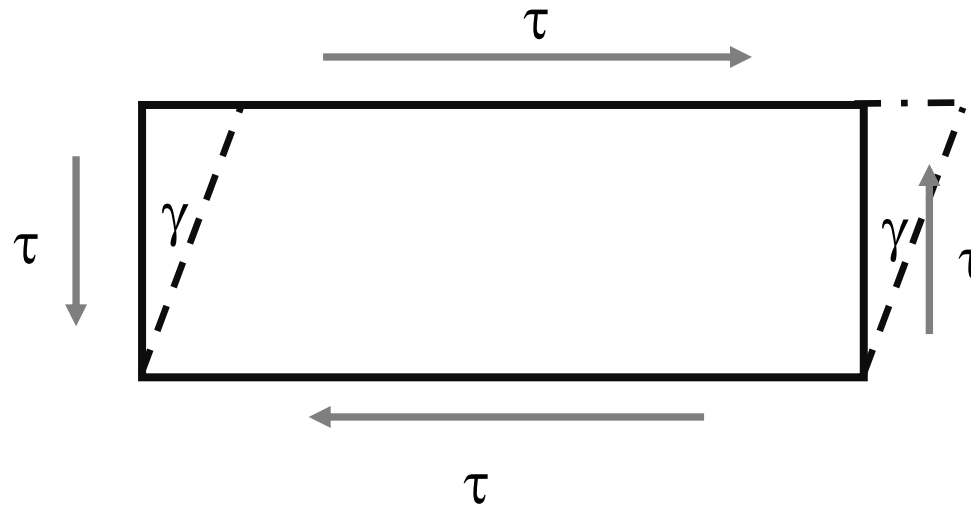
$$E_R = \sigma_R / \varepsilon_R$$

 $E_T$ 

$$E_T = \sigma_T / \varepsilon_T$$



## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL ( $G_{ij}$ ) $G_{LT}, G_{TR}, G_{RL}$ Relación entre la tensión tangencial  $\tau_{ij}$  y la distorsión  $\gamma_{ij}$ 

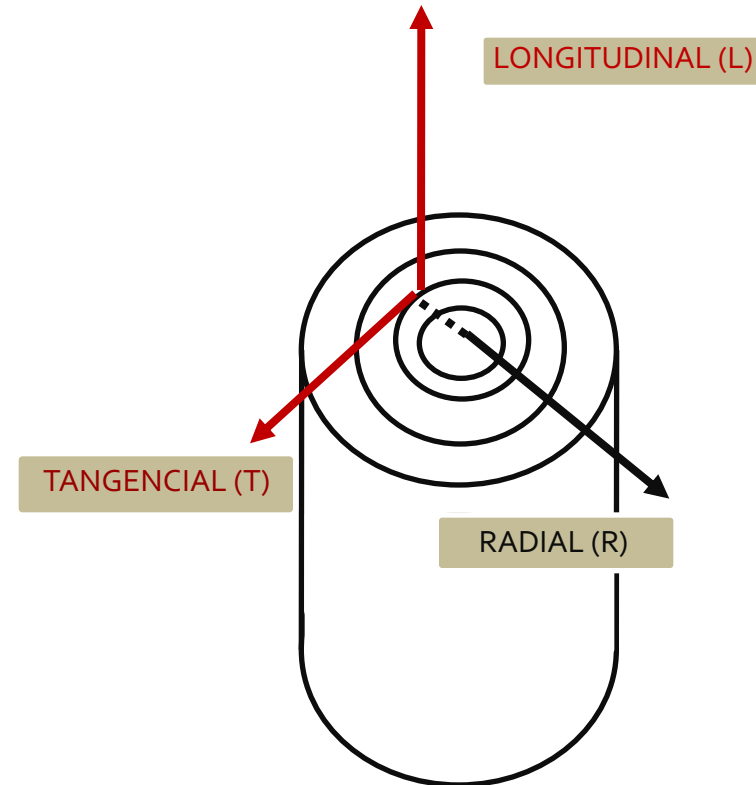
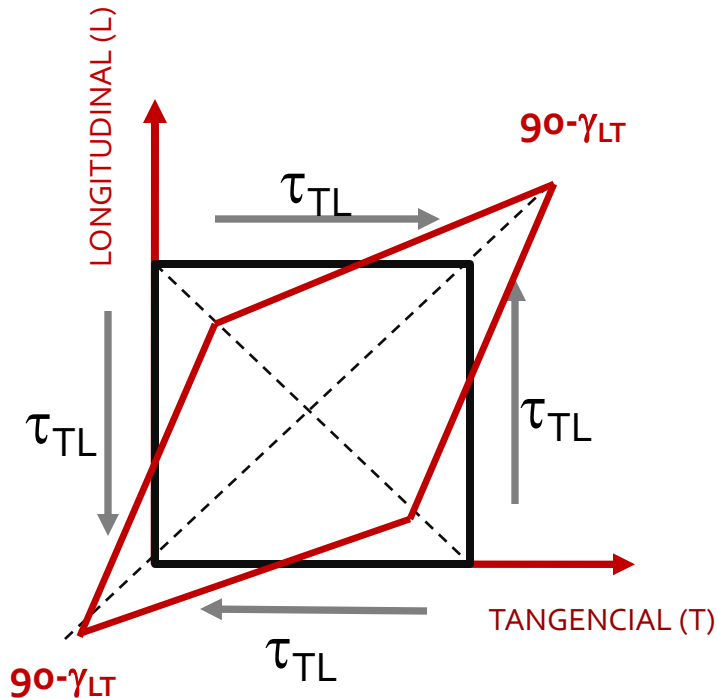
## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL ( $G_{ij}$ ) $G_{LT}, G_{TR}, G_{RL}$ Relación entre la tensión tangencial  $\tau_{ij}$  y la distorsión  $\gamma_{ij}$  $G_{LT}$ 

$$G_{LT} = \tau_{LT} / \gamma_{LT}$$

MÓDULO ELASTICIDAD TRANSVERSAL EN EL PLANO LONGITUDINAL-TANGENCIAL

DISTORSIONES ANGULARES EN EL PLANO LT:



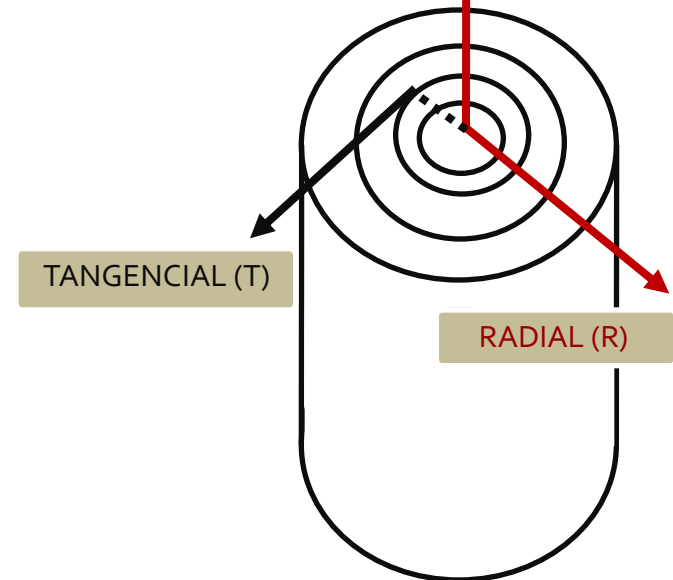
## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL ( $G_{ij}$ ) $G_{LT}$ ,  $G_{TR}$ ,  $G_{RL}$ Relación entre la tensión tangencial  $\tau_{ij}$  y la distorsión  $\gamma_{ij}$  $G_{LT}$ 

$$G_{LT} = \tau_{LT} / \gamma_{LT}$$

 $G_{RL}$ 

$$G_{RL} = \tau_{RL} / \gamma_{RL}$$

MÓDULO ELASTICIDAD TRANSVERSAL EN EL  
PLANO RADIAL-LONGITUDINAL

TANGENCIAL (T)

RADIAL (R)

LONGITUDINAL (L)

## ELASTICIDAD

MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL ( $G_{ij}$ ) $G_{LT}$ ,  $G_{TR}$ ,  $G_{RL}$ Relación entre la tensión tangencial  $\tau_{ij}$  y la distorsión  $\gamma_{ij}$  $G_{LT}$ 

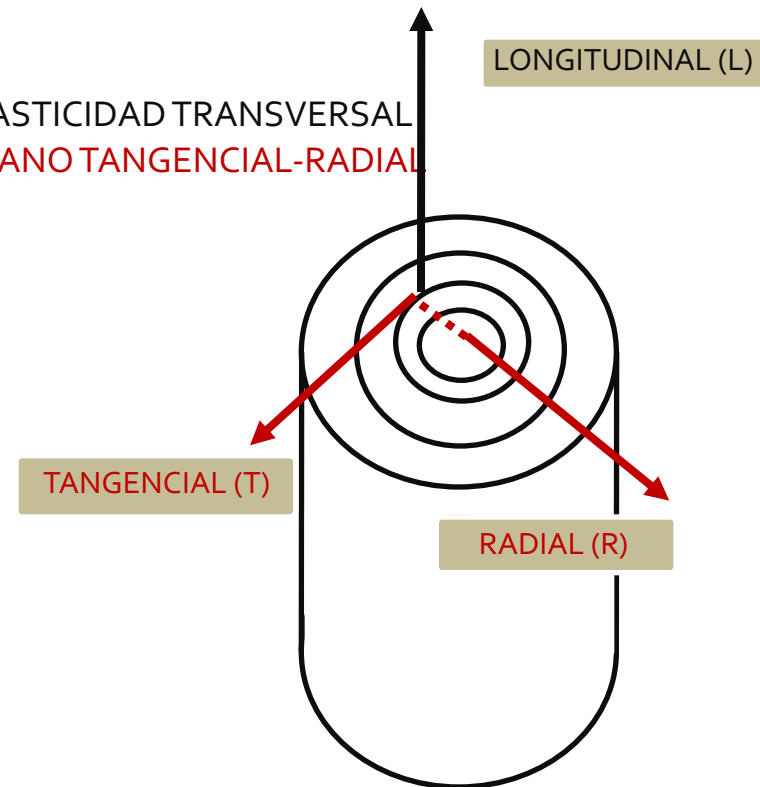
$$G_{LT} = \tau_{LT} / \gamma_{LT}$$

 $G_{RL}$ 

$$G_{RL} = \tau_{RL} / \gamma_{RL}$$

 $G_{TR}$ 

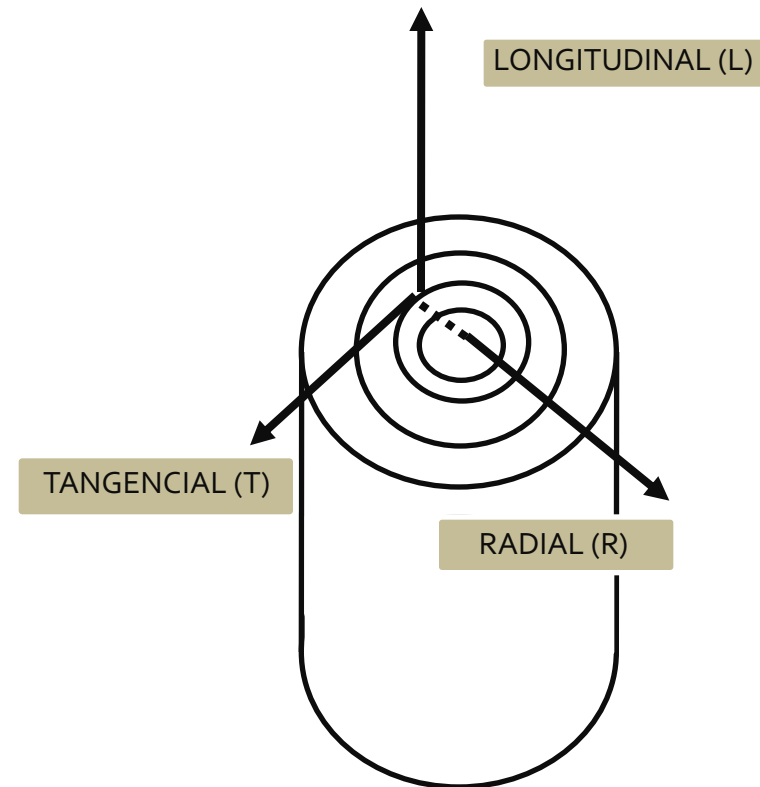
$$G_{TR} = \tau_{TR} / \gamma_{TR}$$

MÓD. ELASTICIDAD TRANSVERSAL  
EN EL PLANO TANGENCIAL-RADIAL

## ELASTICIDAD

COEFICIENTES DE POISSON( $\nu_{ij}$ ) $\nu_{TR}, \nu_{TL}, \nu_{RL}, \nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ 

Relación entre la deformación unitaria  $\varepsilon_i$  y la deformación unitaria en el plano perpendicular  $\varepsilon_j$



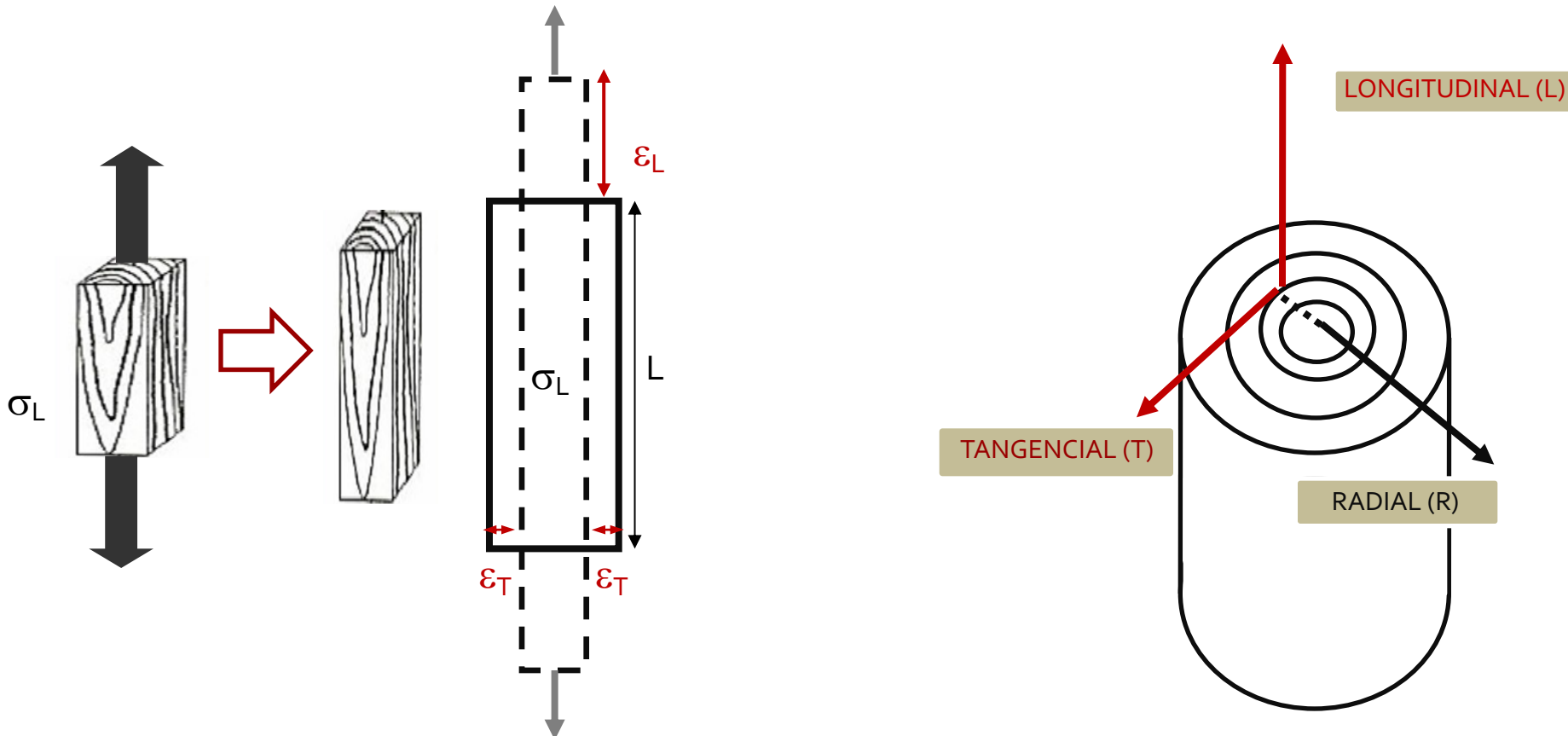
## ELASTICIDAD

COEFICIENTES DE POISSON ( $\nu_{ij}$ ) $\nu_{TR}, \nu_{TL}, \nu_{RL}, \nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ Relación entre la deformación unitaria  $\varepsilon_i$  y la deformación unitaria en el plano perpendicular  $\varepsilon_j$  $\nu_{LT}$ 

$$\nu_{LT} = -\varepsilon_T / \varepsilon_L$$

$$E_L = \sigma_L / \varepsilon_L$$

$$\nu_{LT} = -\varepsilon_T / (\sigma_L / E_L)$$

COEFICIENTE DE POISSON EN EL  
PLANO LONGITUDINAL-TANGENCIAL



## ELASTICIDAD

COEFICIENTES DE POISSON( $\nu_{ij}$ ) $\nu_{TR}, \nu_{TL}, \nu_{RL}, \nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ Relación entre la deformación unitaria  $\varepsilon_i$  y la deformación unitaria en el plano perpendicular  $\varepsilon_j$ 

$\nu_{LT}$	$\nu_{LT} = -\varepsilon_T / (\sigma_L / E_L)$	COEFICIENTE DE POISSON EN EL PLANO: LONGITUDINAL-TANGENCIAL
$\nu_{LR}$	$\nu_{LR} = -\varepsilon_R / (\sigma_L / E_L)$	LONGITUDINAL-RADIAL
$\nu_{TL}$	$\nu_{TL} = -\varepsilon_L / (\sigma_T / E_T)$	TANGENCIAL-LONGITUDINAL
$\nu_{TR}$	$\nu_{TR} = -\varepsilon_R / (\sigma_T / E_T)$	TANGENCIAL-RADIAL
$\nu_{RL}$	$\nu_{RL} = -\varepsilon_L / (\sigma_R / E_R)$	RADIAL-LONGITUDINAL
$\nu_{RT}$	$\nu_{RT} = -\varepsilon_T / (\sigma_R / E_R)$	RADIAL-TANGENCIAL

# ECUACIÓN MATRICIAL REFERIDA A LOS EJES DE ORTOTROPÍA

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_R \\ \epsilon_T \\ \epsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{RT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{RT} \end{Bmatrix}$$

Características  
elásticas

## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

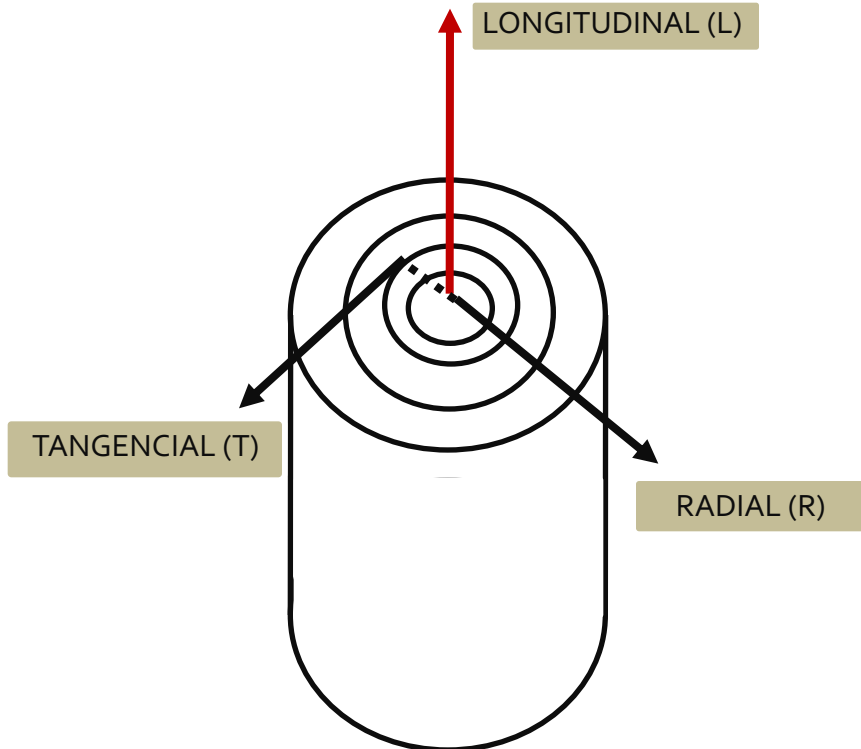
## MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (E)

 $E_L$ 

&gt;&gt;

 $E_R$ 

&gt;

 $E_T$ 

## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

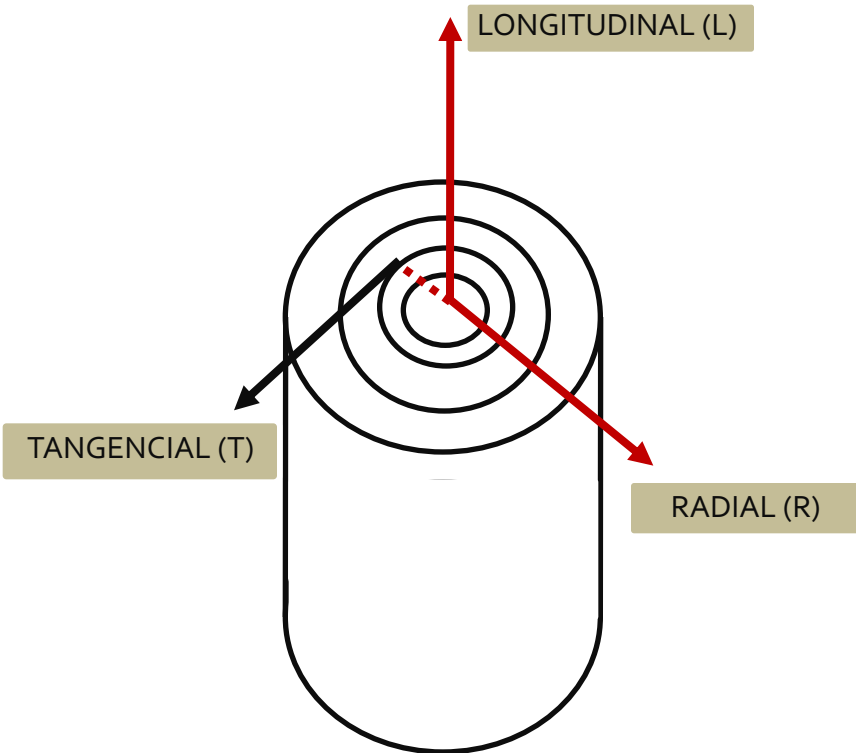
## MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL (G)

 $G_{LR}$ 

&gt;

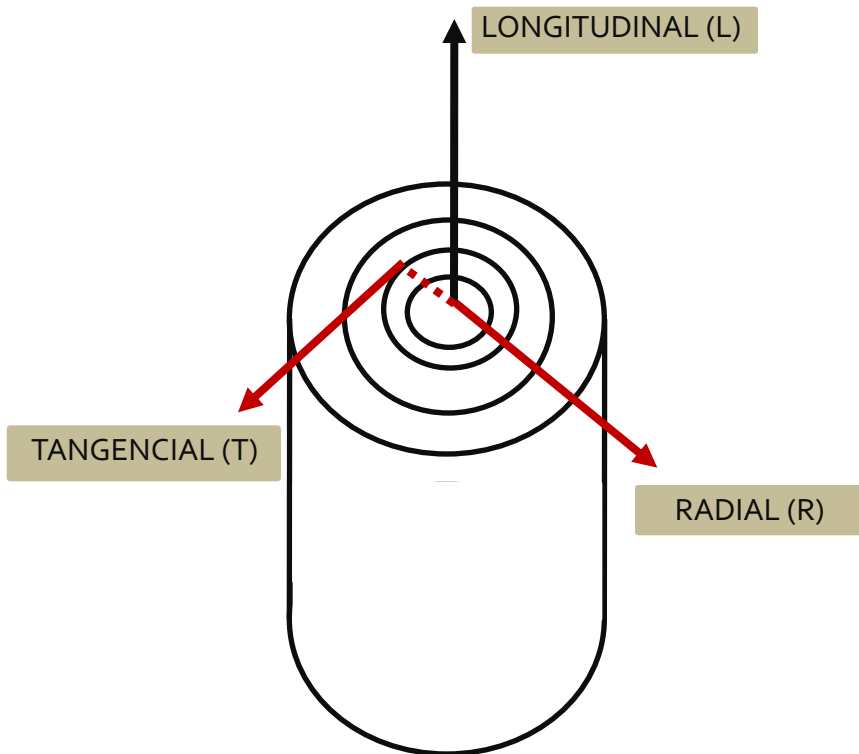
 $G_{TL}$ 

&gt;&gt;

 $G_{RT}$ 

# CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

## COEFICIENTES DE POISSON ( $\nu$ )

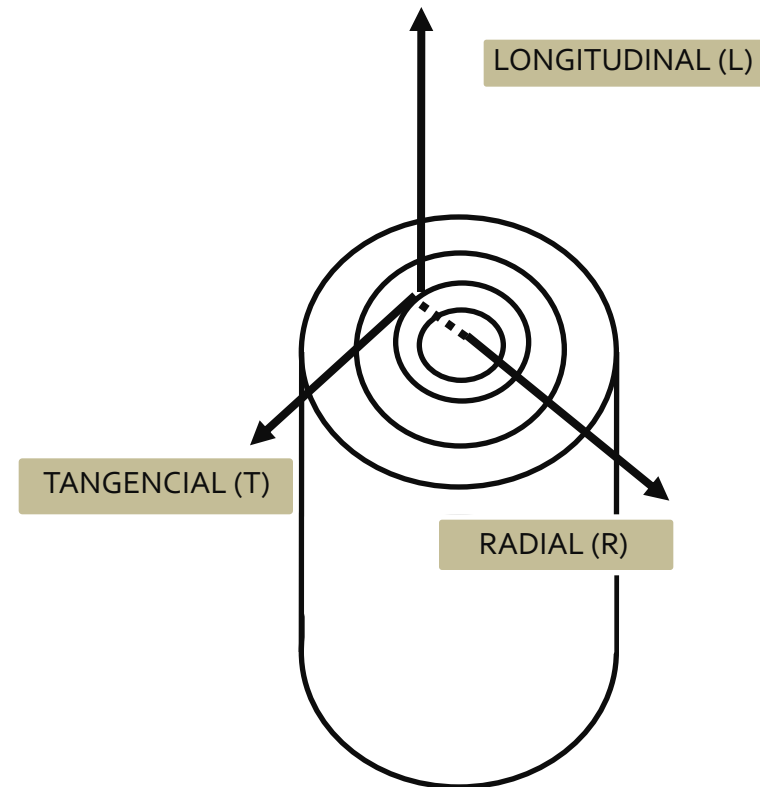


$$\nu_{RT} > \nu_{LT} > \nu_{LR} \approx \nu_{TR} \gg \nu_{RL} > \nu_{TL}$$

## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

## RELACIONES ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD (E)

	$E_L/E_R$	$E_R/E_T$	$E_L/E_T$
CONÍFERAS	13	1.6	21
FRONDOSAS	8	1.7	13.5



## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

### RELACIONES ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD (E)

	$E_L/E_R$	$E_R/E_T$	$E_L/E_T$
CONÍFERAS	13	1.6	21
FRONDOSAS	8	1.7	13.5

### RELACIONES ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL (G)

	$G_{LR}/G_{RT}$	$G_{TL}/G_{RT}$		
CONÍFERAS	10.3	8.9	$G_{TL}=E_L/17.25$	$G_{LR}=E_L/14.9$
FRONDOSAS	3.4	2.6		



## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

### RELACIONES ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD (E)

	$E_L/E_R$	$E_R/E_T$	$E_L/E_T$
CONÍFERAS	13	1.6	21
FRONDOSAS	8	1.7	13.5

### RELACIONES ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL (G)

	$G_{LR}/G_{RT}$	$G_{TL}/G_{RT}$		
CONÍFERAS	10.3	8.9	$G_{TL}=E_L/17.25$	$G_{LR}=E_L/14.9$
FRONDOSAS	3.4	2.6		

### VALORES APROXIMADOS DE COEFICIENTES DE POISSON ( $\nu$ )

	$\nu_{RT}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{TR}$	$\nu_{RL}$	$\nu_{TL}$
CONÍFERAS	0.51	0.43	0.39	0.31	0.03	0.02
FRONDOSAS	0.67	0.46	0.39	0.38	0.048	0.033

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

**Table 4–1. Elastic ratios for various species at approximately 12% moisture content<sup>a</sup>**

Species	$E_T/E_L$	$E_R/E_L$	$G_{LR}/E_L$	$G_{LT}/E_L$	$G_{RT}/E_L$
<b>Softwoods</b>					
Baldcypress	0.039	0.084	0.063	0.054	0.007
Cedar, northern white	0.081	0.183	0.210	0.187	0.015
Cedar, western red	0.055	0.081	0.087	0.086	0.005
Douglas-fir	0.050	0.068	0.064	0.078	0.007
Fir, subalpine	0.039	0.102	0.070	0.058	0.006
Hemlock, western	0.031	0.058	0.038	0.032	0.003
Larch, western	0.065	0.079	0.063	0.069	0.007
Pine					
Loblolly	0.078	0.113	0.082	0.081	0.013
Lodgepole	0.068	0.102	0.049	0.046	0.005
Longleaf	0.055	0.102	0.071	0.060	0.012
Pond	0.041	0.071	0.050	0.045	0.009
Ponderosa	0.083	0.122	0.138	0.115	0.017
Red	0.044	0.088	0.096	0.081	0.011
Slash	0.045	0.074	0.055	0.053	0.010
Sugar	0.087	0.131	0.124	0.113	0.019
Western white	0.038	0.078	0.052	0.048	0.005
Redwood	0.089	0.087	0.066	0.077	0.011
Spruce, Sitka	0.043	0.078	0.064	0.061	0.003
Spruce, Engelmann	0.059	0.128	0.124	0.120	0.010

<sup>a</sup>Wood Handbook, USDA,

## CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LA MADERA

**Table 4–2. Poisson’s ratios for various species at approximately 12% moisture content**

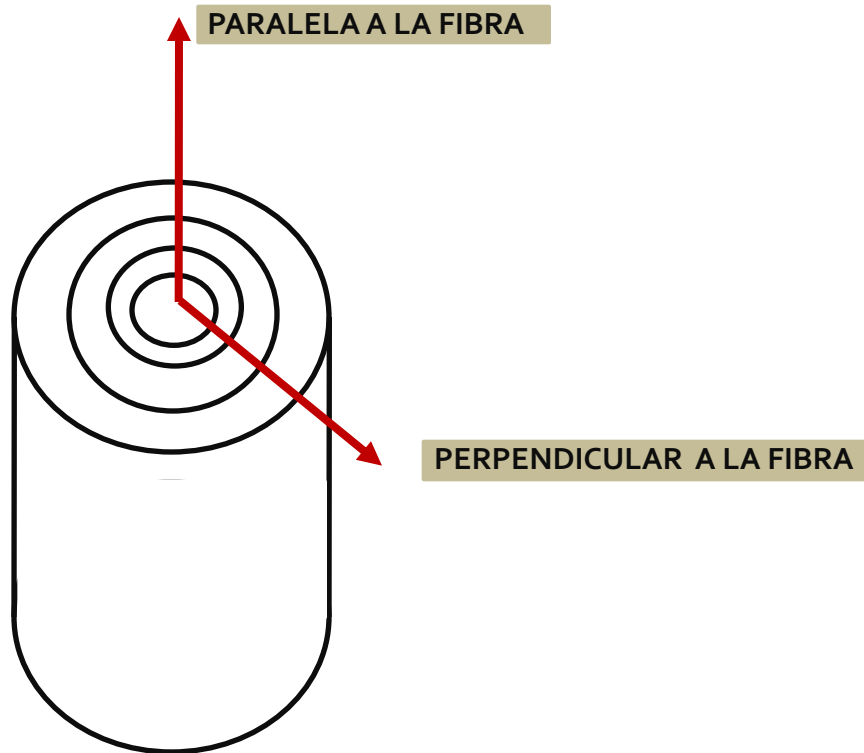
Species	$\mu_{LR}$	$\mu_{LT}$	$\mu_{RT}$	$\mu_{TR}$	$\mu_{RL}$	$\mu_{TL}$
<b>Softwoods</b>						
Baldcypress	0.338	0.326	0.411	0.356	—	—
Cedar, northern white	0.337	0.340	0.458	0.345	—	—
Cedar, western red	0.378	0.296	0.484	0.403	—	—
Douglas-fir	0.292	0.449	0.390	0.374	0.036	0.029
Fir, subalpine	0.341	0.332	0.437	0.336	—	—
Hemlock, western	0.485	0.423	0.442	0.382	—	—
Larch, western	0.355	0.276	0.389	0.352	—	—
Pine						
Loblolly	0.328	0.292	0.382	0.362	—	—
Lodgepole	0.316	0.347	0.469	0.381	—	—
Longleaf	0.332	0.365	0.384	0.342	—	—
Pond	0.280	0.364	0.389	0.320	—	—
Ponderosa	0.337	0.400	0.426	0.359	—	—
Red	0.347	0.315	0.408	0.308	—	—
Slash	0.392	0.444	0.447	0.387	—	—
Sugar	0.356	0.349	0.428	0.358	—	—
Western white	0.329	0.344	0.410	0.334	—	—
Redwood	0.360	0.346	0.373	0.400	—	—
Spruce, Sitka	0.372	0.467	0.435	0.245	0.040	0.025
Spruce, Engelmann	0.422	0.462	0.530	0.255	0.083	0.058

Wood Handbook, USDA,

Elasticidad:  
simplificación

## ELASTICIDAD: SIMPLIFICACIÓN A 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

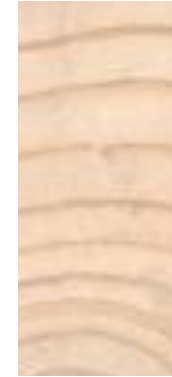
Debido a la dificultad de conseguir piezas de madera de un único tipo de corte, se simplifican las direcciones de la fibra a dos.



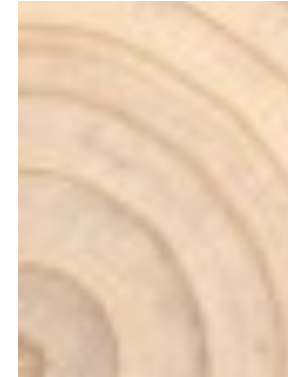
### MADERA ASERRADA



TANGENCIAL



RADIAL



MIXTO

### MADERA LAMINADA



## ELASTICIDAD: SIMPLIFICACIÓN A 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

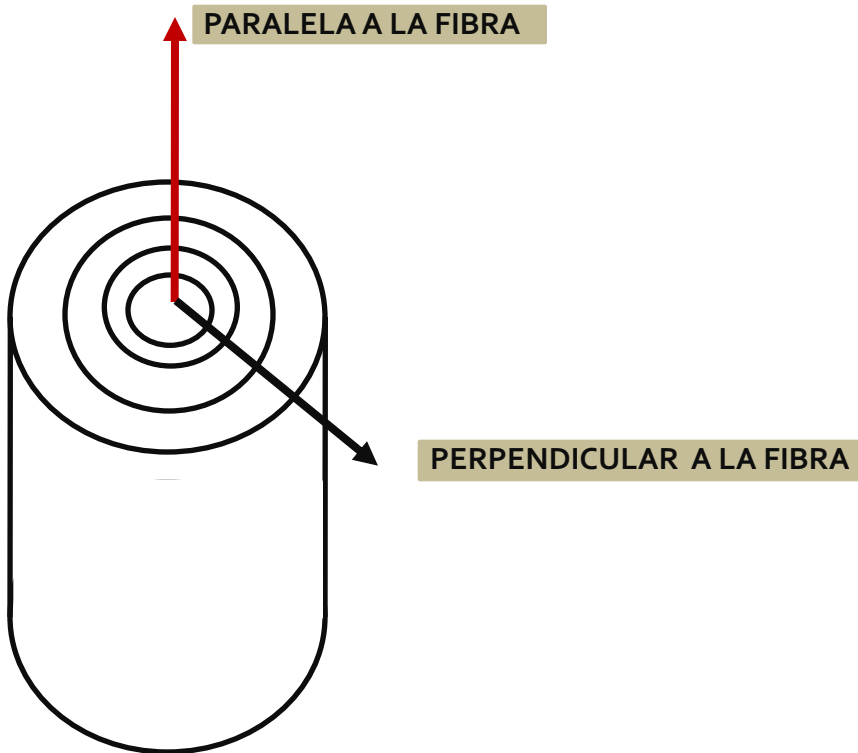
SIMPLIFICACIÓN: 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (E)

$$E_L \gg E_R > E_T$$



$$E_o$$

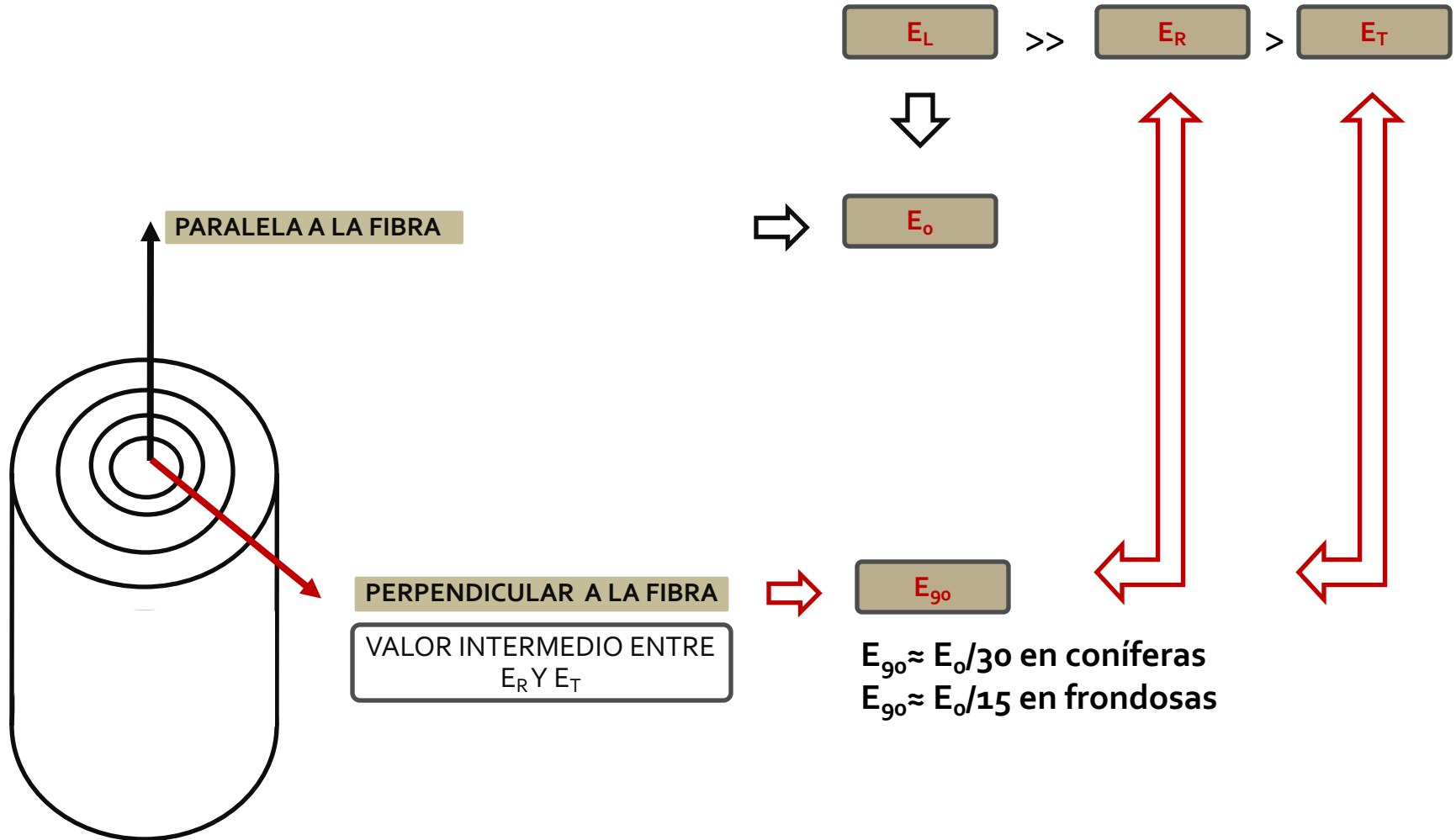


## ELASTICIDAD: SIMPLIFICACIÓN A 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

SIMPLIFICACIÓN: 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (E)



# ELASTICIDAD: SIMPLIFICACIÓN A 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

SIMPLIFICACIÓN: 2 DIRECCIONES DE LA FIBRA

MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL (G)

$$G_{LR} > G_{TL} \gg G_{TT}$$

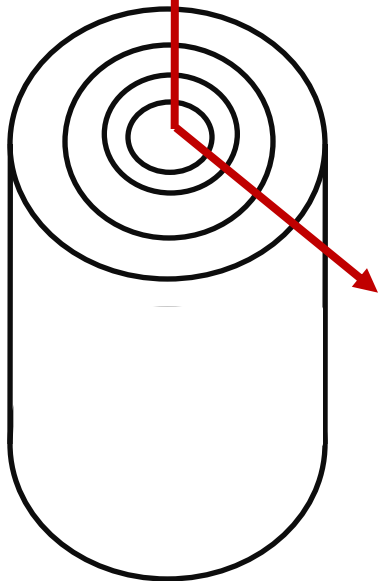


VALOR INTERMEDIO ENTRE  
 $G_{TL}$  Y  $G_{LR}$

$$G$$

$$G \approx E_o/16$$

PARALELA A LA FIBRA



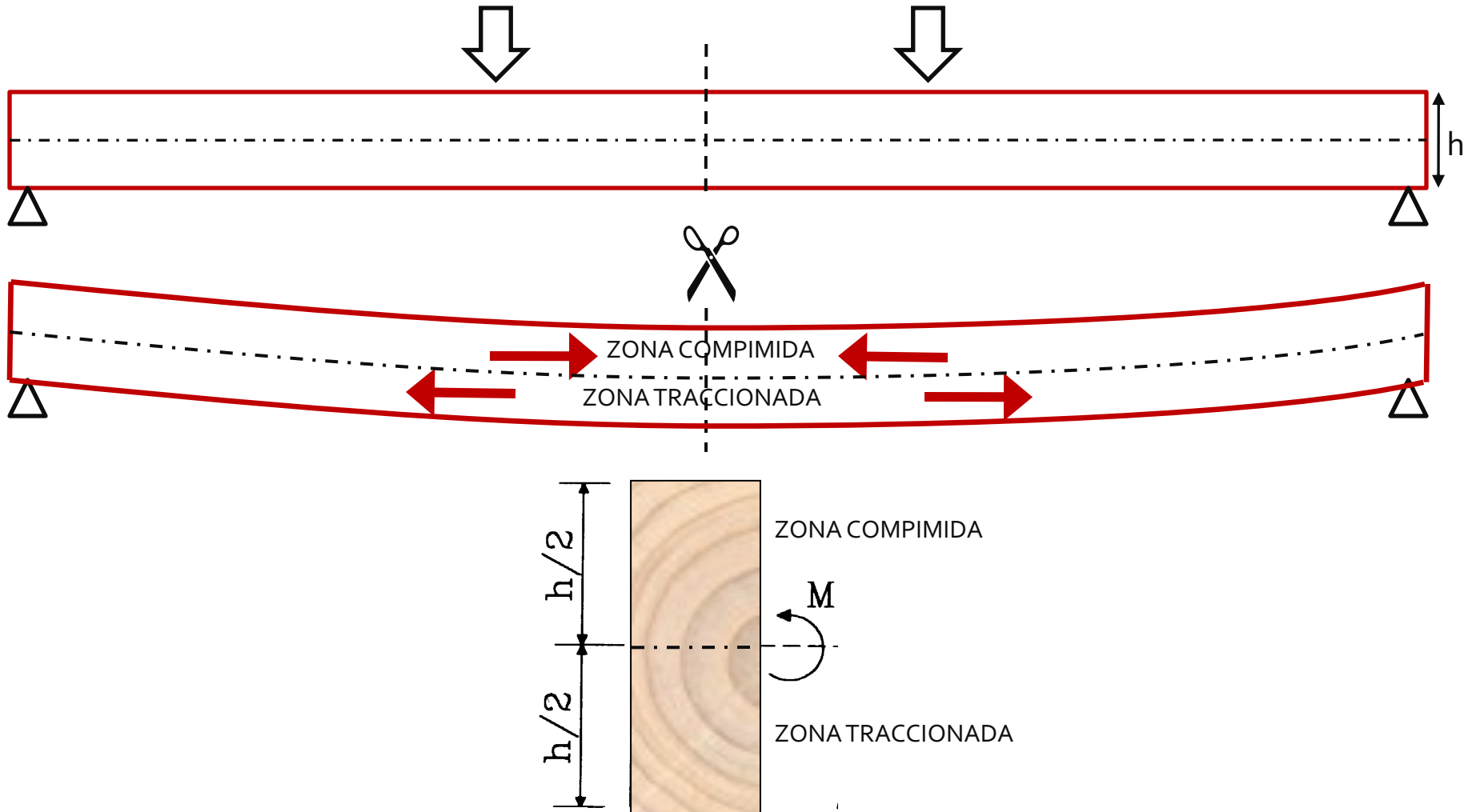
PERPENDICULAR A LA FIBRA



Ley constitutiva  
madera libre de  
defectos

## LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

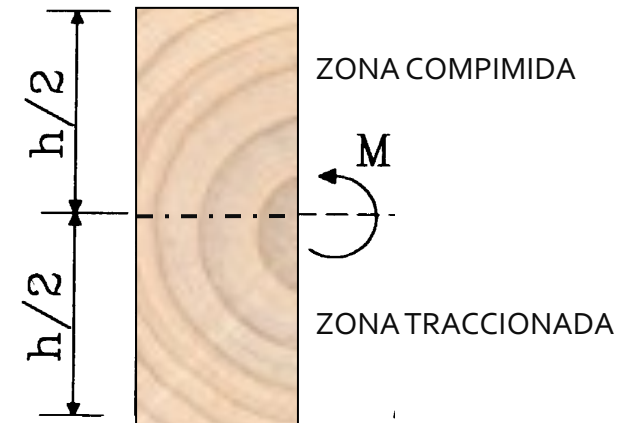
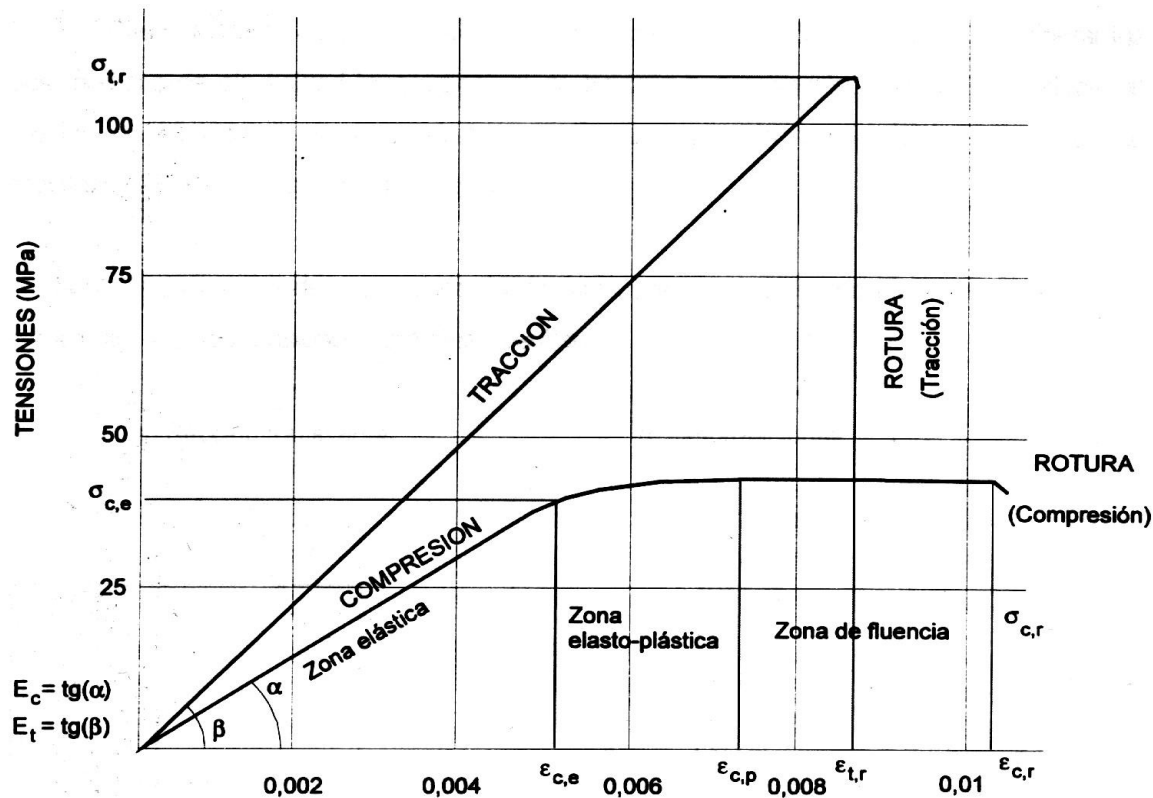
CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN VIGA A FLEXIÓN: PEQUEÑAS PROBETAS DE MADERA LIBRES DE DEFECTOS



# LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN VIGA A FLEXIÓN: PEQUEÑAS PROBETAS DE MADERA LIBRES DE DEFECTOS

Módulo de elasticidad a tracción diferente del de compresión

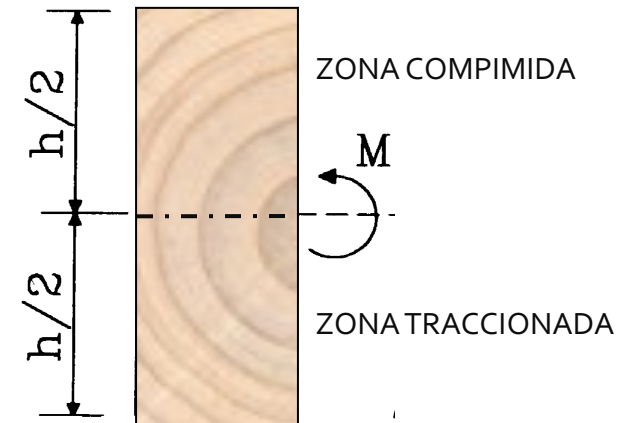
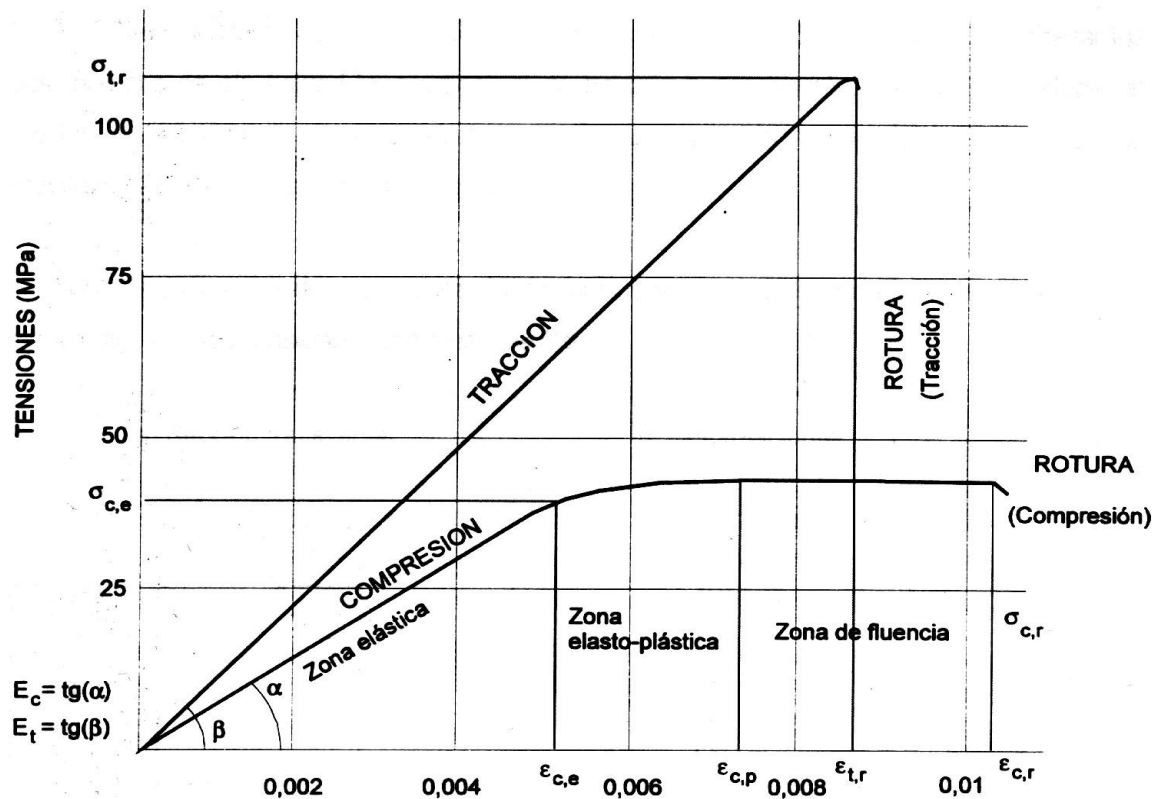


# LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN VIGA A FLEXIÓN: PEQUEÑAS PROBETAS DE MADERA LIBRES DE DEFECTOS

Módulo de elasticidad a tracción diferente del de compresión

Comportamiento elástico en tracción



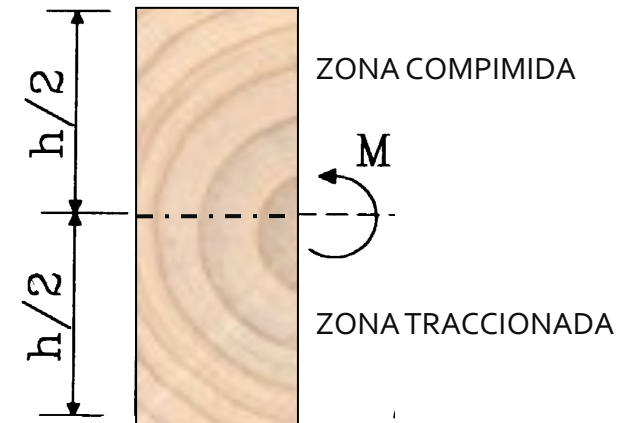
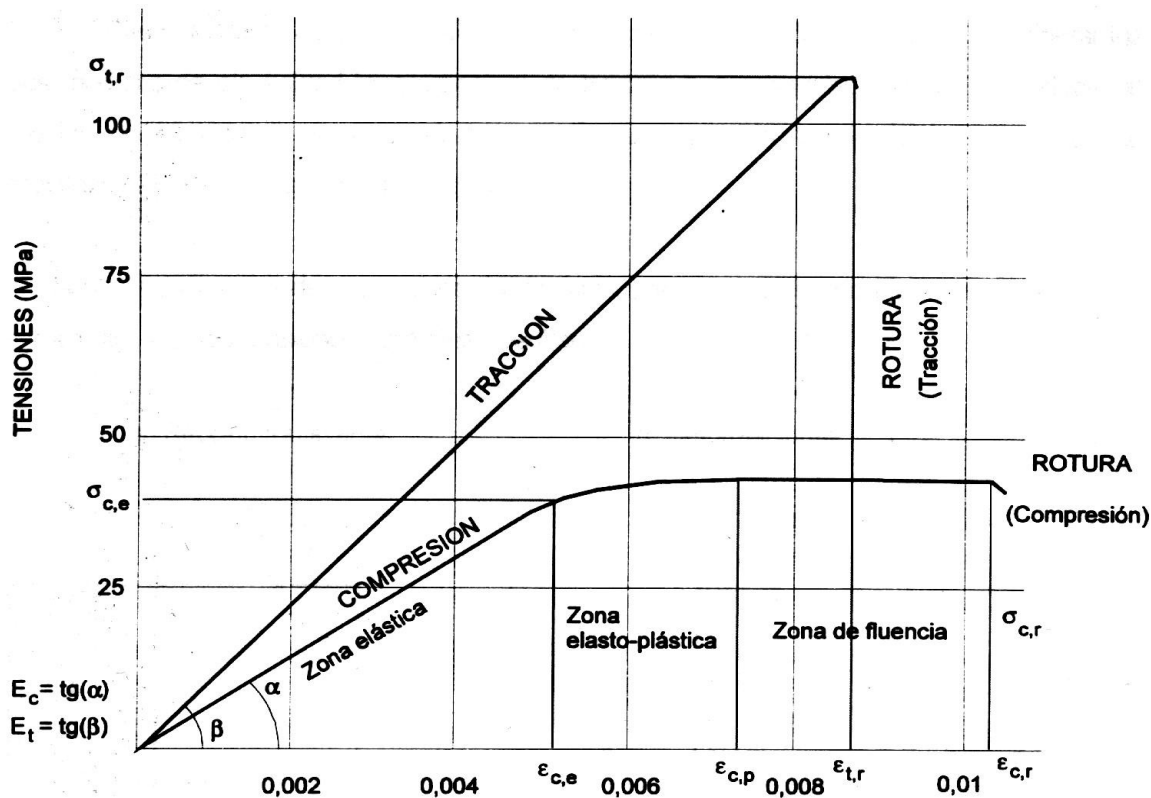
# LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN VIGA A FLEXIÓN: PEQUEÑAS PROBETAS DE MADERA LIBRES DE DEFECTOS

Módulo de elasticidad a tracción diferente del de compresión

Comportamiento elástico en tracción

Comportamiento elasto-plástico en compresión



# LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

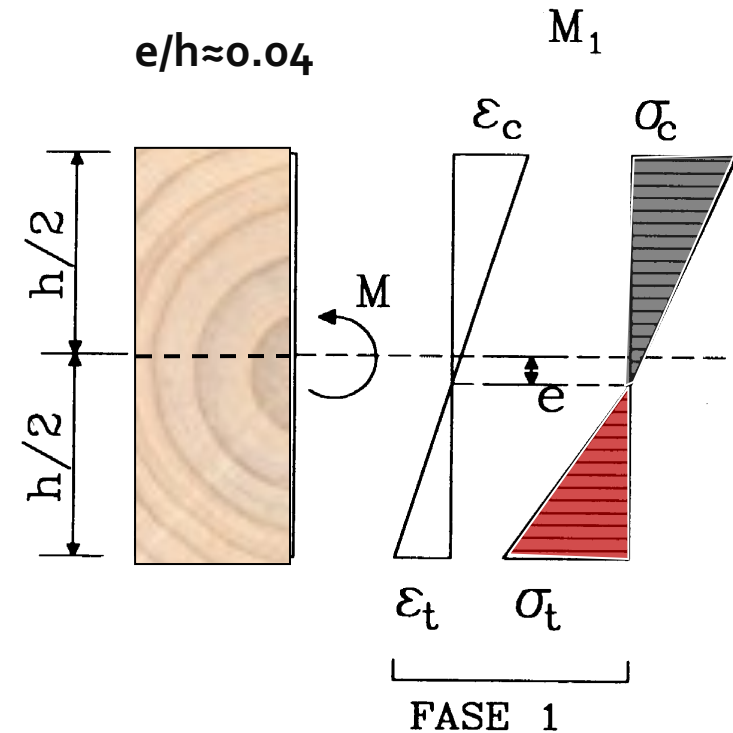
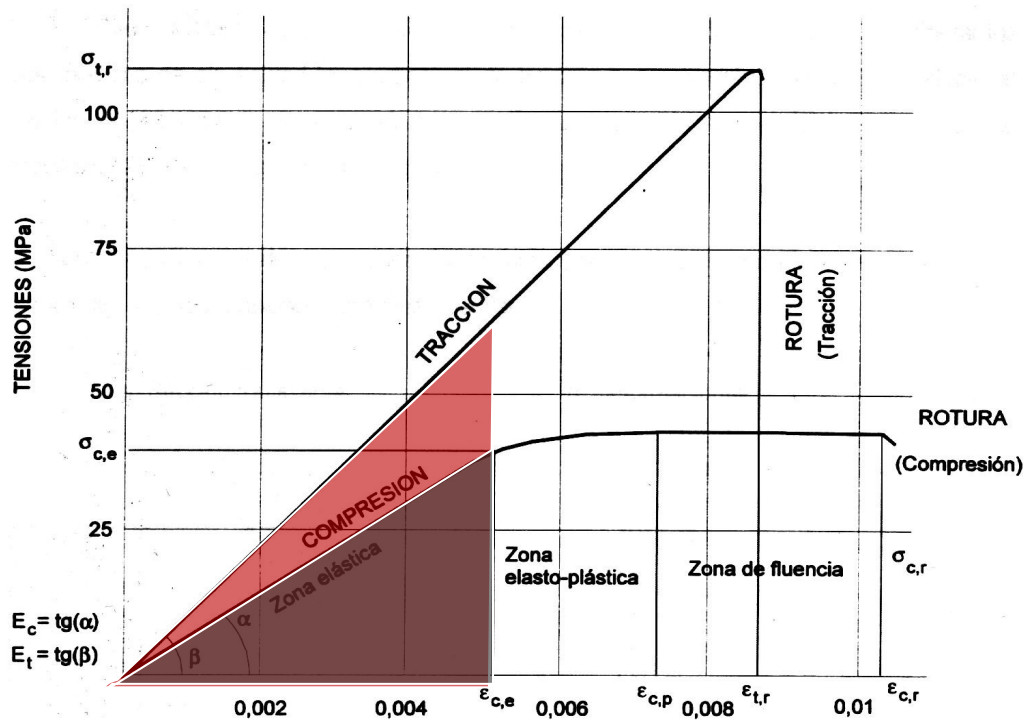
CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN:

FASES DE TENSIÓN HASTA ALCANZAR LA ROTURA

## FASE 1:

La diferencia entre valores de módulos de elasticidad a tracción y a compresión se traduce en diferentes pendientes de las rectas que los representan.

Del equilibrio de ambos volúmenes de tensiones se deduce la desviación de la fibra neutra.



FASE 1

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

## LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

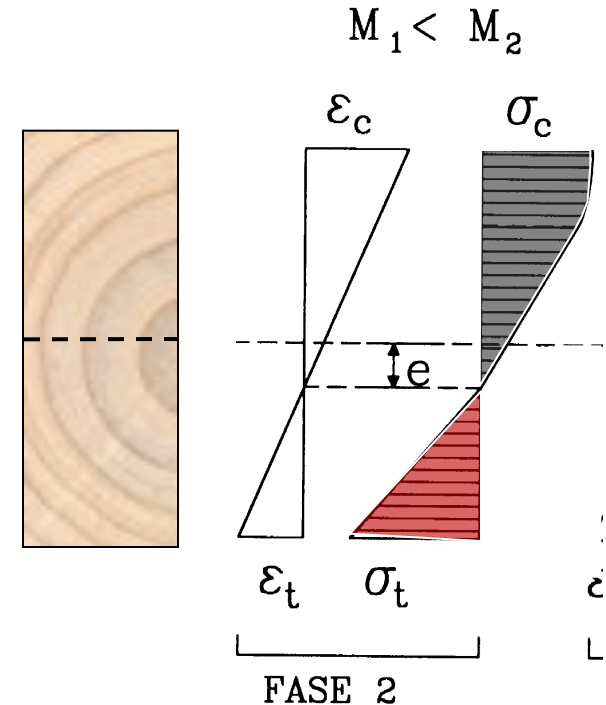
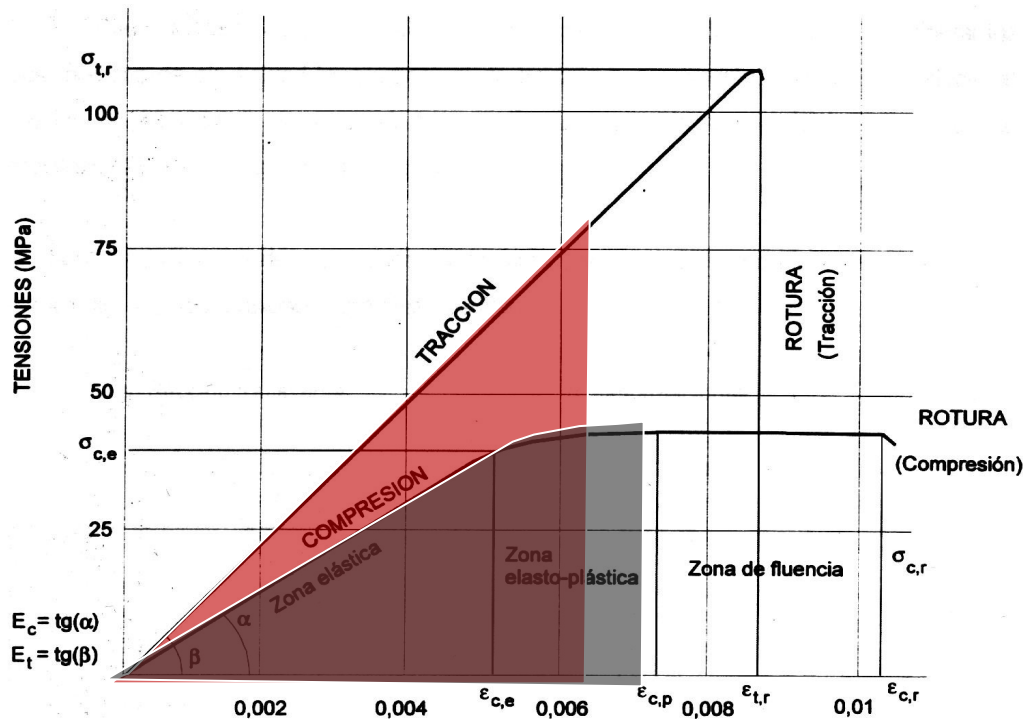
CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN:

FASES DE TENSIÓN HASTA ALCANZAR LA ROTURA

## FASE 2:

Las fibras comprimidas de la madera alcanzan tensiones y deformaciones en el tramo no lineal a compresión (tramo curvo)

Para que los volúmenes de tracción y de compresión se equilibren, se produce un aumento del descenso de la fibra neutra.



FASE 2

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

# LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN:

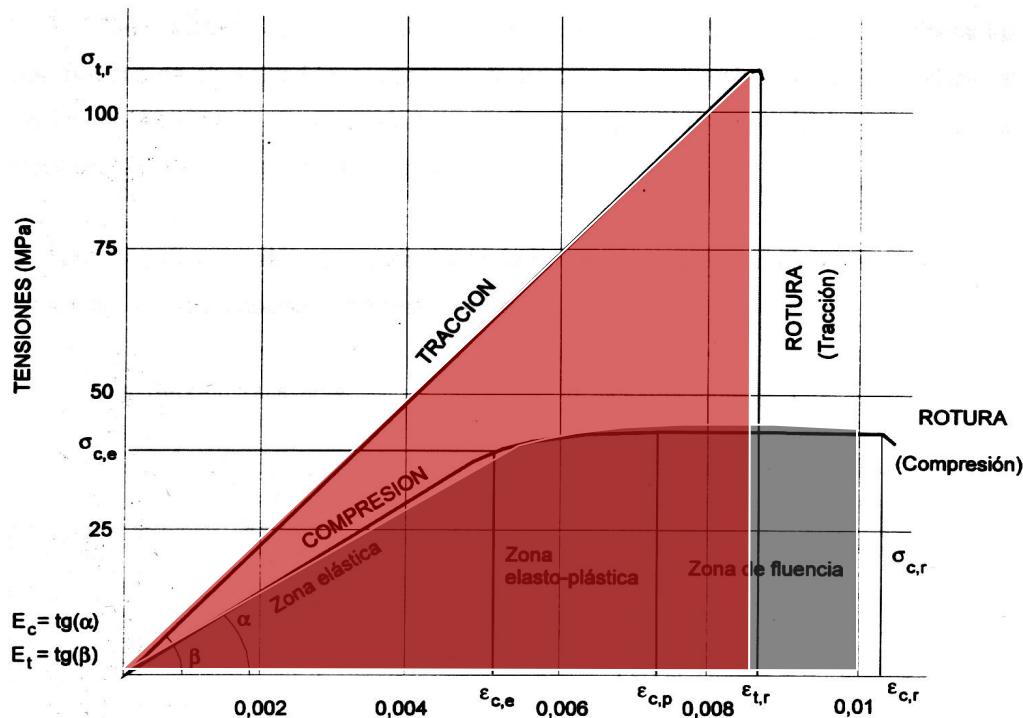
FASES DE TENSIÓN HASTA ALCANZAR LA ROTURA

## FASE 3:

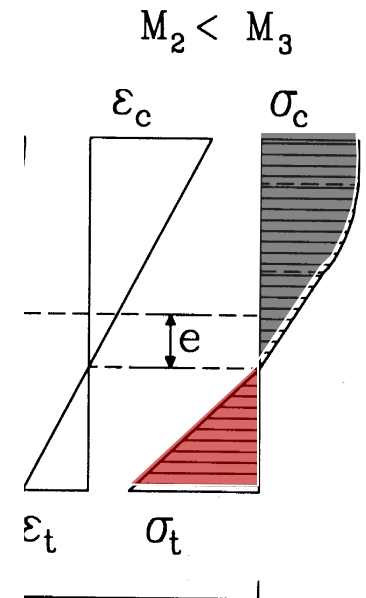
Se inicia la plastificación del borde comprimido de la pieza de madera.

La deformación de las fibras comprimidas aumenta sin que lo haga la tensión.

No se produce la rotura de la pieza, sino que sigue aguantando carga hasta que la rotura se produzca por tracción.



$e/h \approx 0.08$



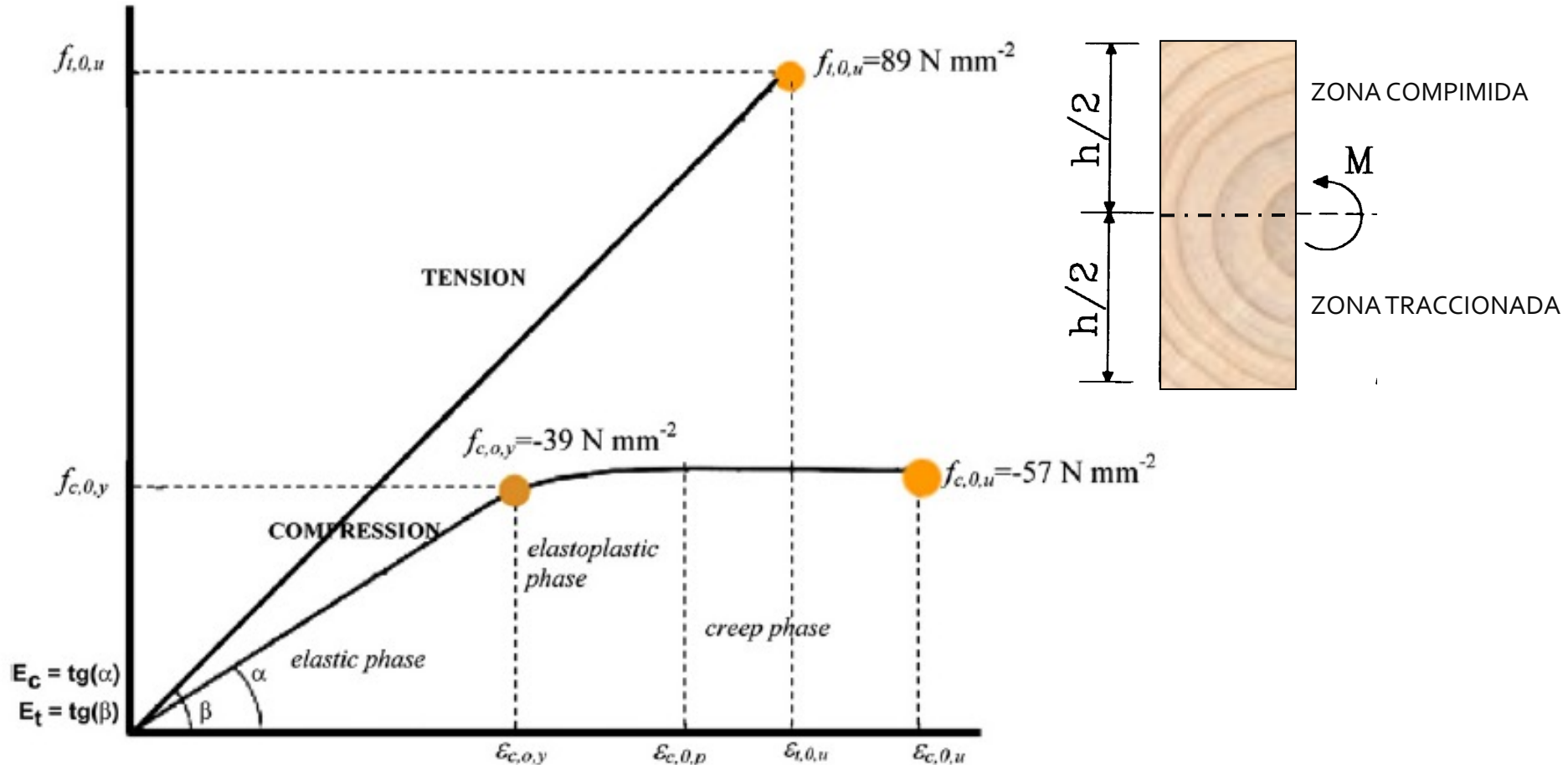
FASE 3

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996



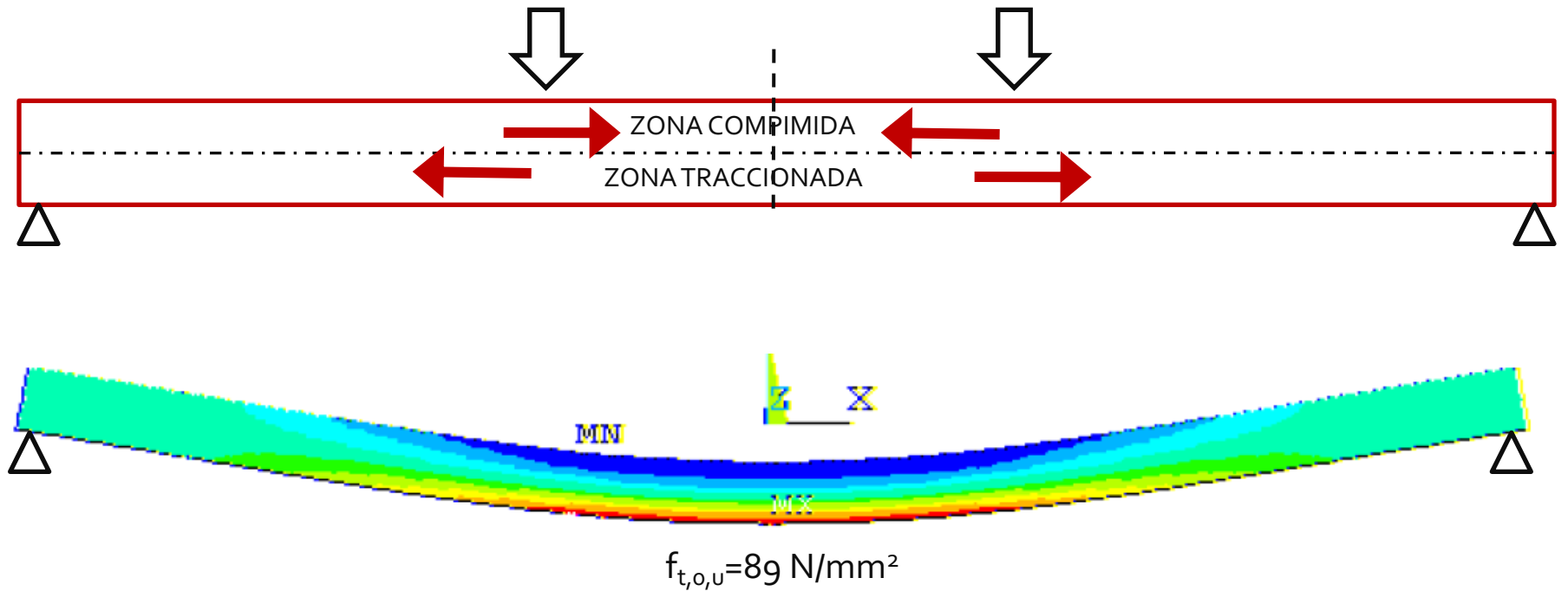
## LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN:

*Pinus sylvestris*Curva tensión-deformación para la madera de **Pino silvestre** de procedencia española

## LEY CONSTITUTIVA MADERA LIBRE DE DEFECTOS

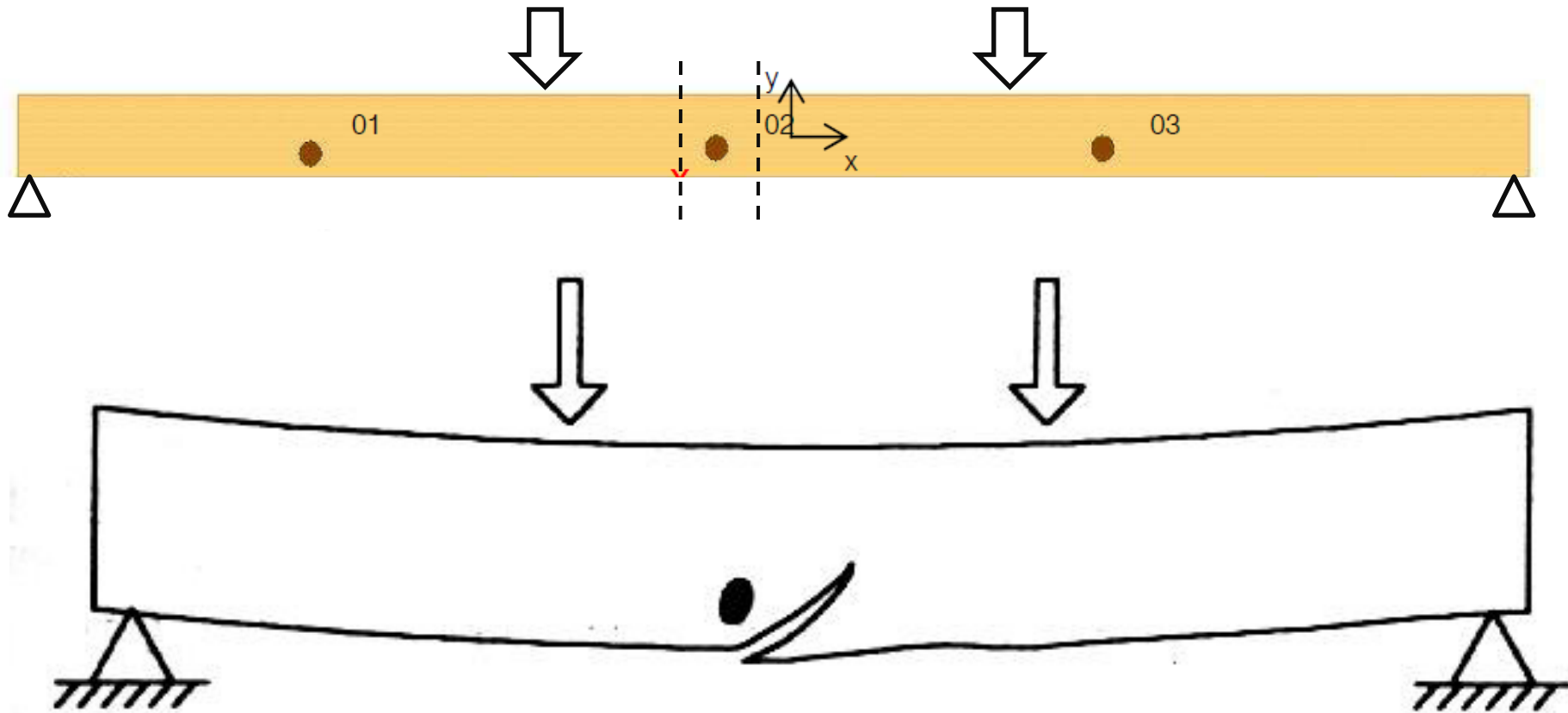
CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN:

*Pinus sylvestris*

Ley constitutiva  
madera estructural

# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)

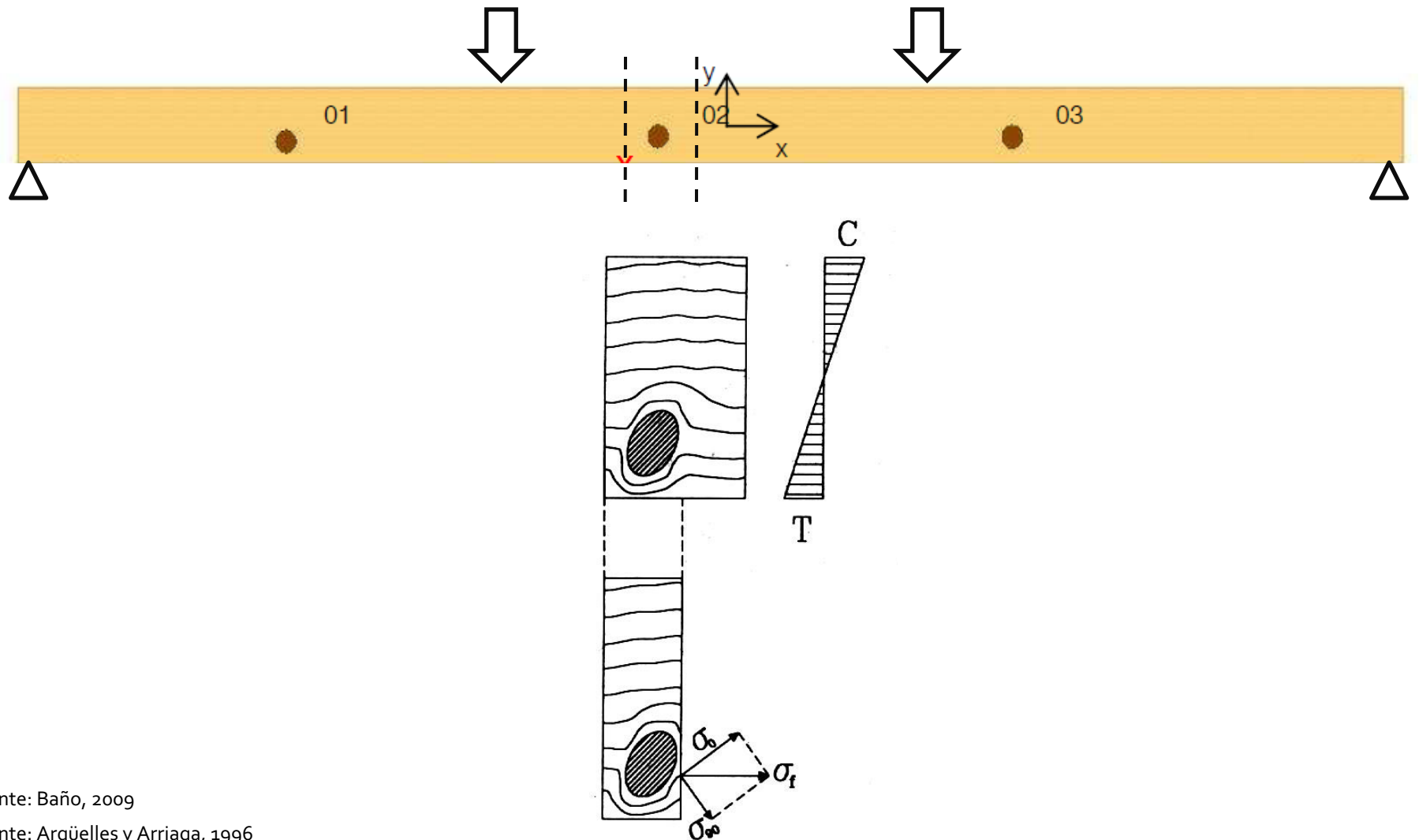


Fuente: Baño, 2009

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)



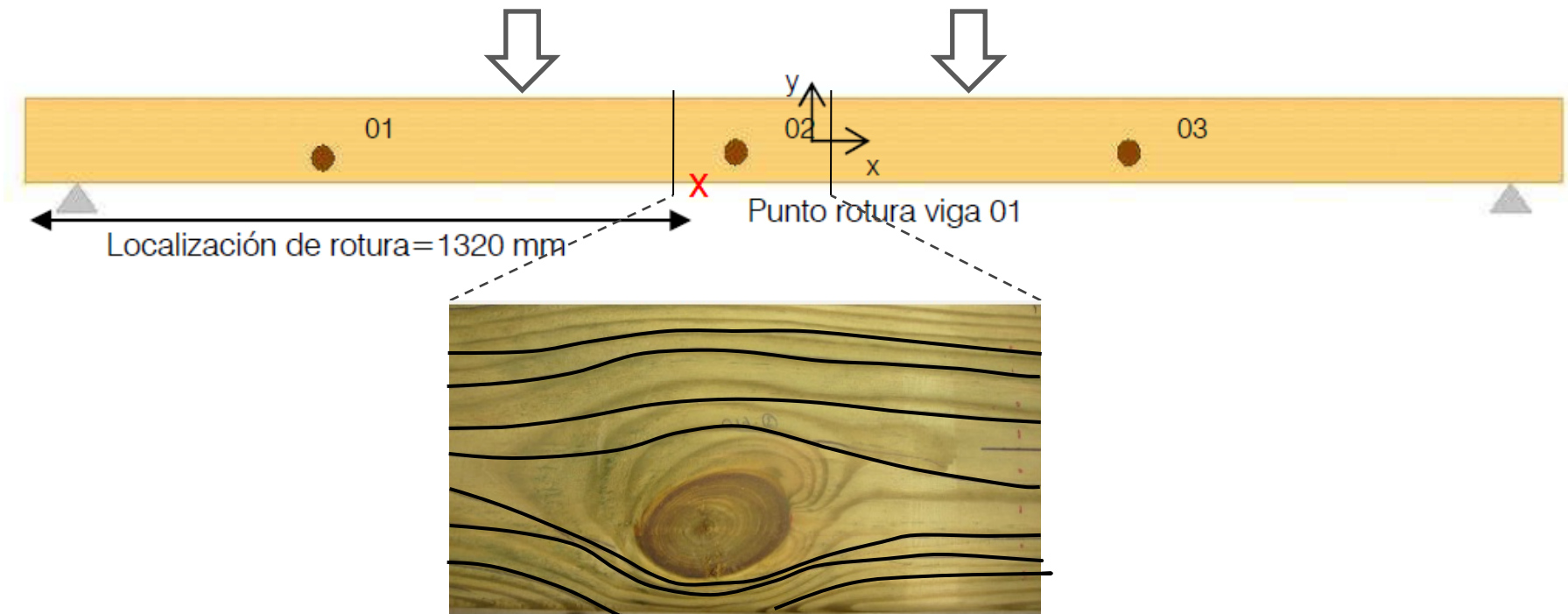
Fuente: Baño, 2009

Fuente: Argüelles y Arriaga, 1996

# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)

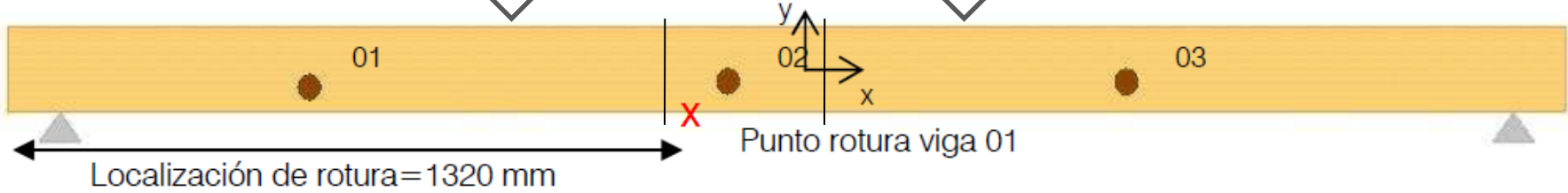
*Pinus sylvestris*



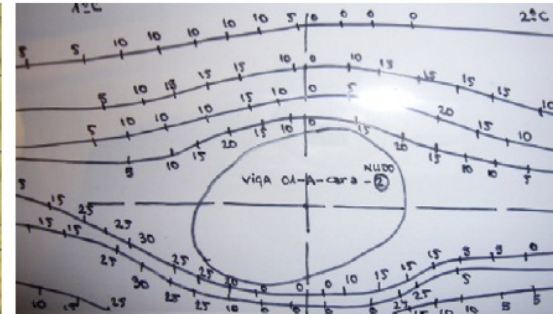
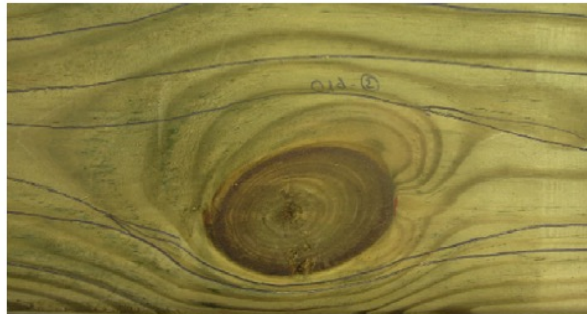
# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)

*Pinus sylvestris*



VIGA



FEM



# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)

*Pinus sylvestris*

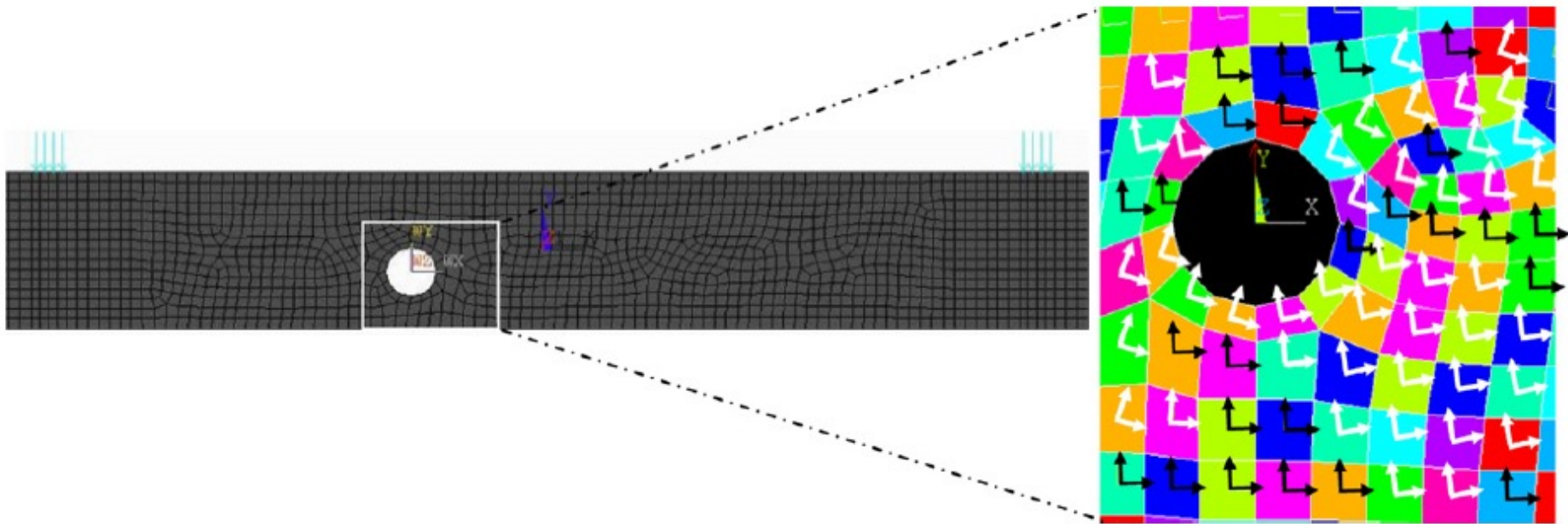


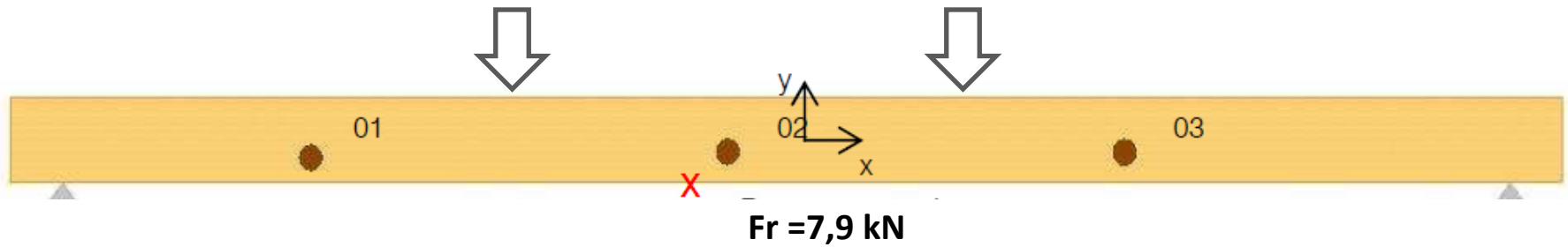
Fig. 8 – Simulation of slope of grain: local axis of main direction in each element of the mesh around knots.



# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)

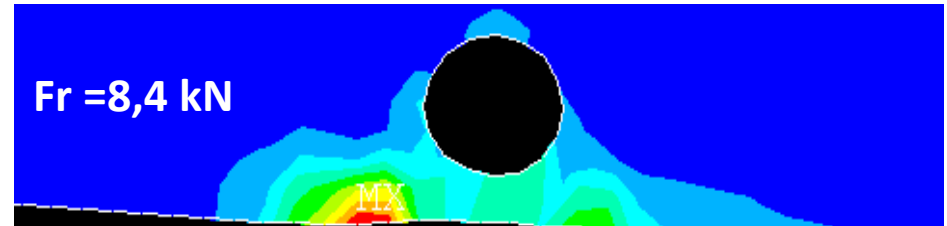
*Pinus sylvestris*



ensayo experimental



simulación numérica (FEM)



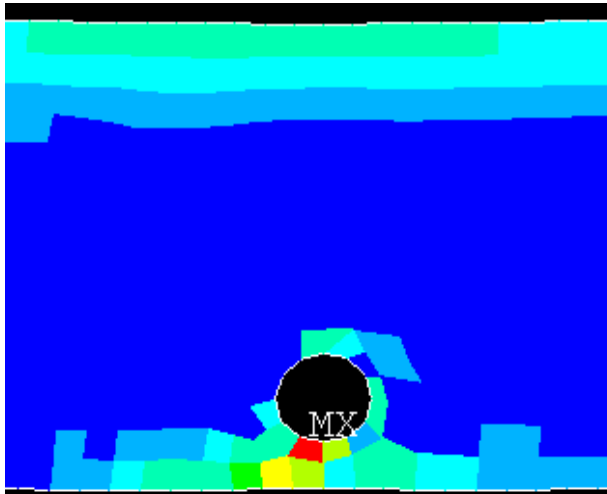
**criterio de rotura cuadrático a tracción**(Aicher and Klöck, 2001) :

$$(\sigma_{t,0} / f_{t,0})^2 + (\sigma_{t,90} / f_{t,90})^2 + (\tau / f_v)^2 = 1$$

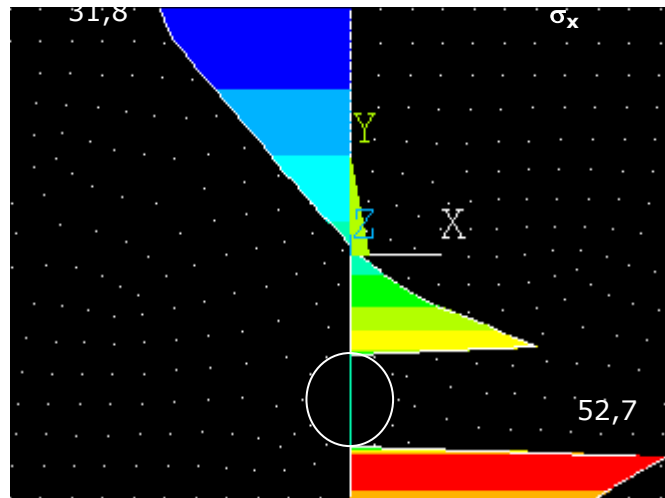
# LEY CONSTITUTIVA MADERA ESTRUCTURAL

MADERA ESTRUCTURAL DE TAMAÑO REAL CON DEFECTOS (NUDOS, DESVIACIÓN DE FIBRA, ETC)

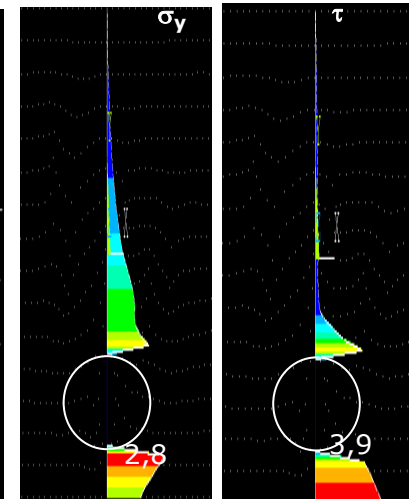
*Pinus sylvestris*



tensiones en los elementos



tensiones en la sección en las direcciones:  
paralela, perpendicular y cortante



**criterio de rotura cuadrático a tracción**(Aicher and Klöck, 2001) :

$$(\sigma_{t,0} / f_{t,0})^2 + (\sigma_{t,90} / f_{t,90})^2 + (\tau / f_v)^2 = 1$$

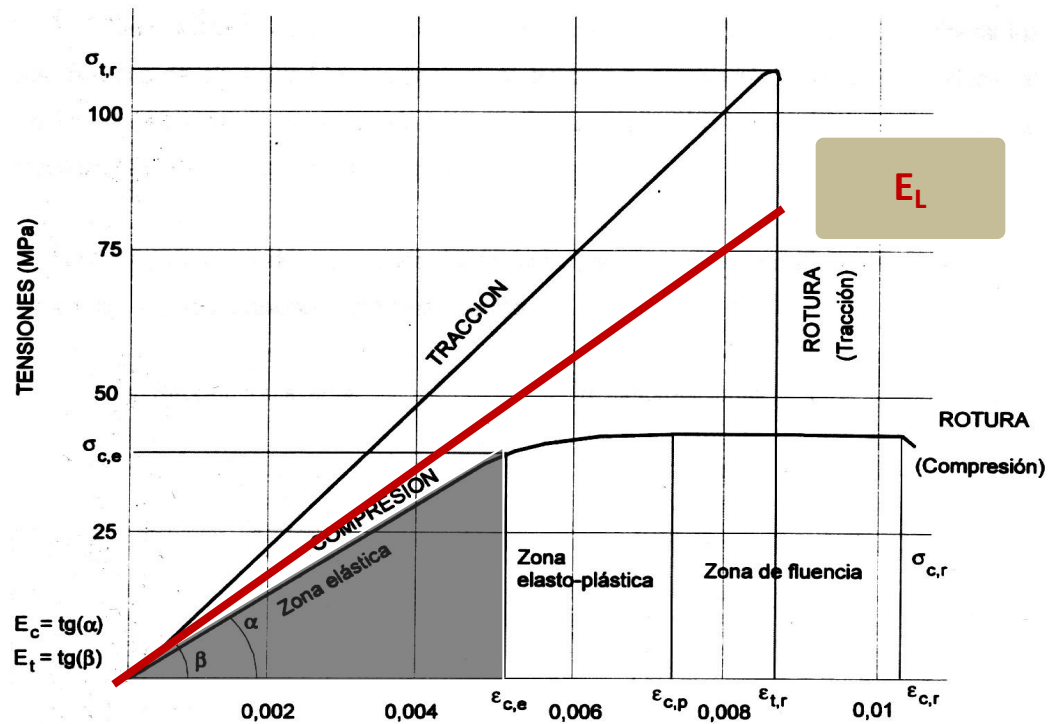
1. Propiedades mecánicas de la madera
2. Propiedades mecánicas en el cálculo estructural con madera
3. Factores que influyen en las propiedades mecánicas

## 2.3. Propiedades mecánicas

## SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

Se calcula en tramo elástico de comportamiento

Los módulos de elasticidad a tracción y a compresión en flexión se simplifican en uno sólo llamado módulo de elasticidad "aparente"



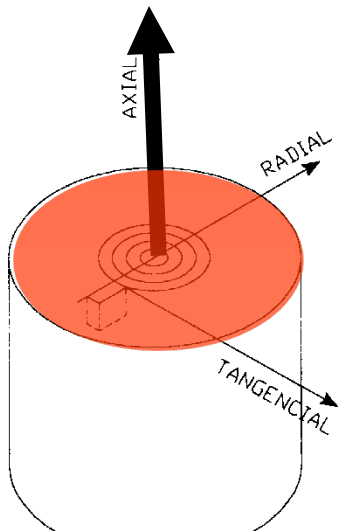
**SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL**

Se calcula en tramo elástico de comportamiento

Los módulos de elasticidad a tracción y a compresión en flexión se simplifican en uno sólo llamado módulo de elasticidad "aparente"

Se simplifica a dos direcciones de la fibra:

**Paralela** a la fibra (axial o longitudinal)



**Perpendicular** a la fibra (o transversal)



## SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

## RIGIDEZ (MÓDULOS DE ELASTICIDAD)

**Paralela a la fibra o longitudinal ( $E_L$ )**Módulo elasticidad paralelo:  $E_0$ Módulo elasticidad perpendicular:  $E_{90}$ **Transversal o de cortante ( $G$ )**Módulo elasticidad transversal:  $G$

Resistencia

SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

RESISTENCIAS

Flexión





SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

RESISTENCIAS

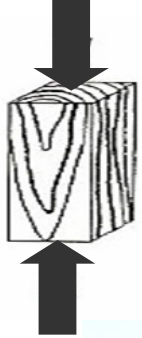
Tracción paralela a la fibra



SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

RESISTENCIAS

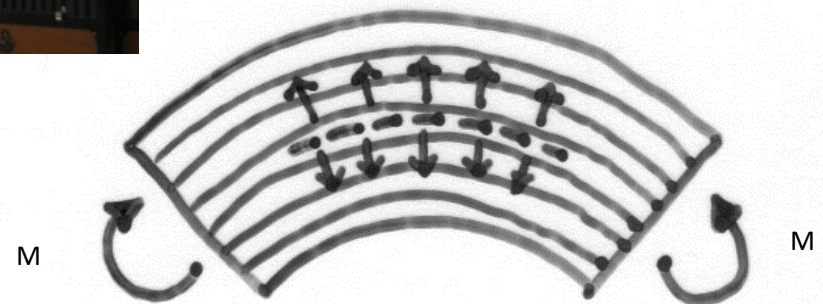
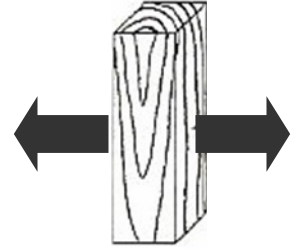
Compresión paralela a la fibra



SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

RESISTENCIAS

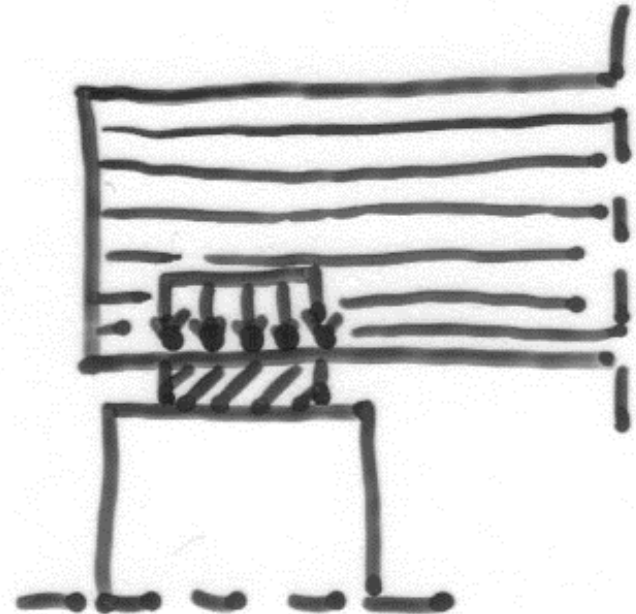
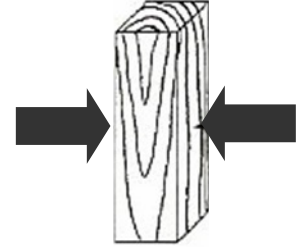
Tracción perpendicular a la fibra



## SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

## RESISTENCIAS

## Compresión perpendicular a la fibra

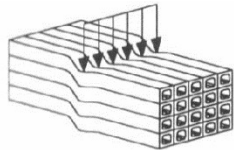


SIMPLIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

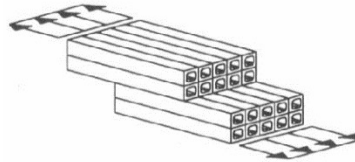
RESISTENCIAS

Cortante

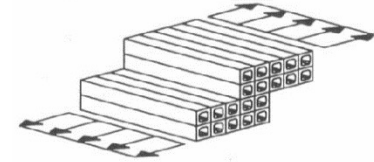
de cortadura



de deslizamiento



de rodadura



Comparación de propiedades mecánicas de la madera, el acero y el hormigón armado (N/mm<sup>2</sup>)

	Flexión	Tracción paralela	Tracción perpend.	Compres. paralela	Compres. perpend.	Cortante	Módulo elasticidad
Madera	18	11	0.4	18	4.8	2.0	11.000
Hormigón	-	1.8		20		0.6	25.000
Acero	240	240		240		140	210.000

Elevada resistencia a flexión comparada con su peso propio.

**La relación resistencia/peso es 1.3 veces superior a la del acero y 10 veces superior a la del hormigón**

Buena resistencia a tracción y a compresión paralela a la fibra

Escasa resistencia a cortante, similar a la del hormigón y menor que la del acero

Escasa resistencia tracción y compresión perpendicular a la fibra

Bajo módulo de elasticidad: mitad que el hormigón y 20 veces menos que el acero

## Comparación de propiedades mecánicas de la madera, el acero y el hormigón armado (N/mm<sup>2</sup>)

Elevada resistencia a flexión comparada con su peso propio.

**La relación resistencia/peso es 1.3 veces superior a la del acero y 10 veces superior a la del hormigón**

### Datos de entrada

L	6.0 m	
pp	25%	
scu	75%	
qser	10.0 kN/m	
qult	14.6 kN/m	
CS	2	
kmod	0.6	0.8
kdef	0.8	

### Solicitaciones

Vu	43.9 kN	
Mu	65.8 kN.m	
fmax . EI	169 kN.m <sup>3</sup>	

### Acero

Fy	248 MPa
E	200 GPa
Perfil	IPN 260
h	260 mm
tw	9.4 mm
Aw	24.4 cm <sup>2</sup>
A	53.3 cm <sup>2</sup>
Zx	514 cm <sup>3</sup>
Ix	5740 cm <sup>4</sup>
Vr	363.7 kN
Mr	114.7 kN.m
fmax . EI	172 kN.m <sup>3</sup>
G	41.9 kg/m

### Madera

Clase	C14
b	145 mm
h	585 mm
fm,k	14.0 MPa
fv,k	3.0 MPa
E0,m	7.0 GPa
A	848.3 cm <sup>2</sup>
Wx	8270 cm <sup>3</sup>
Ix	241910 cm <sup>4</sup>
Vr	97.9 kN
Mr	66.8 kN.m
fmax . EI	176 kN.m <sup>3</sup>
G	29.7 kg/m

### Hormigón

Cálculo aproximado

b	150 mm
h	600 mm
G	225.0 kg/m

### Resumen

Madera	29.7 kg/m
Acero	41.9 kg/m
Hormigón	225.0 kg/m

1. Propiedades mecánicas de la madera
2. Propiedades mecánicas en el cálculo estructural con madera
3. Factores que influyen en las propiedades mecánicas

## 2.3. Propiedades mecánicas



# FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad



contenido de humedad madera

(para contenido humedad < 30% = P.S.F.)



RESISTENCIA



MÓDULO DE ELASTICIDAD

ENSAYOS MECÁNICOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEADES MECÁNICAS:  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $65 \pm 5\%$

CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO CONÍFERAS  $\approx 12\%$

LA INFLUENCIA DEPENDE DE LA PROPIEDAD MECÁNICA:

RESISTENCIA A TRACCIÓN PARALELA

POCA INFLUENCIA EN MADERA CON MUCHOS DEFECTOS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA

MUY SENSIBLE AL CONTENIDO DE HUMEDAD

RESISTENCIA A FLEXIÓN

POCA INFLUENCIA EN VALORES CARACTERÍSTICOS

# FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

SE DEFINEN PARA ASIGNAR LOS VALORES RESISTENTES Y PARA EL CÁLCULO DE DEFORMACIONES BAJO UNAS CONDICIONES AMBIENTALES DETERMINADAS

## CLASE SERVICIO 1

Contenido de humedad de la  
madera:

$T^a : 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$

H.R. > 65% unas pocas semanas  
al año



H.E.H.  $\approx$  12%

## CLASE SERVICIO 2

Contenido de humedad de la  
madera:

$T^a : 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$

H.R. > 85% unas pocas semanas  
al año



H.E.H.  $\approx$  16%

## CLASE SERVICIO 3

Contenido de humedad de la  
madera:

H.R. > 85% habitualmente



H.E.H. > 20%

## FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

Duración  
carga



duración de la carga



RESISTENCIA

LA RESISTENCIA DE LA MADERA ANTE CARGAS PERMANENTES SON APROXIMADAMENTE EL 60% DE LA RESISTENCIA ANTE UNA CARGA DE CORTA DURACIÓN (ensayo de duración  $5 \pm 2$  min)

LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE PROPIEADES MECÁNICAS SE REALIZAN CON UNA DURACIÓN NORMALIZADA ENTRE 3-7 MINUTOS

## FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

**Duración  
carga**



duración de la carga



RESISTENCIA

**Tabla 2.1**  
**Clases de duración de la carga**

Clase de duración de la carga	Orden de duración acumulada de la carga característica
Permanente	más de 10 años
Larga	6 meses – 10 años
Media	1 semana – 6 meses
Corta	menos de una semana
Instantánea	

Fuente: EUROCÓDIGO 5

## FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

**Duración  
carga**

**Tabla 2.2**  
**Ejemplos de asignación de duración de la carga**

Clase de duración de la carga	Ejemplos de carga
Permanente	peso propio
Larga	almacenamiento
Media	sobrecarga de uso, nieve
Corta	nieve, viento
Instantánea	viento, acciones accidentales

Fuente: EUROCÓDIGO 5

## FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

Duración  
carga

$K_{mod}$ : factor de modificación que tiene en cuenta el efecto de la duración de la carga y del contenido de humedad en los valores resistentes

**Table 3.1 – Values of  $k_{mod}$**

Material	Standard	Service class	Load-duration class				
			Permanent action	Long term action	Medium term action	Short term action	Instantaneous action
Solid timber	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Glued laminated timber	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Fuente: EUROCÓDIGO 5

# FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

Duración  
carga

Calidad de  
la madera

ES EL FACTOR DE MAYOR RELEVANCIA EN LA RESISTENCIA DE LA MADERA



# FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

Duración  
carga

Calidad de  
la madera

Tamaño de  
la pieza



Volumen de madera



RESISTENCIA

TEORÍA DE LA ROTURA FRÁGIL: el material se asimila a una cadena con eslabones, donde el fallo de un eslabón supone el fallo de la cadena. Cuanto > el nº de eslabones, más probabilidad de fallo

MADERA ASERRADA

Canto = 150mm

FLEXIÓN  
TRACCIÓN PARALELA

MADERA LAMINADA

Canto = 600 mm

FLEXIÓN  
TRACCIÓN PARALELA  
TRACCIÓN PERPENDICULAR



$k_h$



## FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEADES MECÁNICAS

Contenido de  
humedad

Clase de  
servicio

Duración  
carga

Calidad de  
la madera

Tamaño de  
la pieza

Carga  
compartida



$k_{sys}$



GRACIAS POR  
LA ATENCIÓN

FACULTAD DE  
INGENIERIA

