

ΤΕΕ, Περιφερειακό Τμήμα Πελοποννήσου  
ΕΜΤΤ, Εργαστήριο Ω.Σ.

## Ημερίδα για τα πυρόπληκτα κτήρια

### “ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΤΡΕΖΟΣ

Μεγαλόπολη, 13 Οκτωβρίου 2007

1

## Μας ενδιαφέρουν οι ιδιότητες των υλικών:

- **Κατά την διάρκεια της έκθεσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες:** επηρεάζουν:
  - την πυρασφάλεια των κατασκευών (δυνατότητα διαφυγής των χρηστών) καθώς και
  - την ασφάλεια της ζωής των πυροσβεστών.
- **Μετά την απόψυξή τους και επαναφορά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος:** λαμβάνονται υπόψη για:
  - την αποτίμηση και
  - την επισκευή των κατασκευών μετά από μια πυρκαγιά.

2

## Σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς

- Βασική απαίτηση η προστασία:
  - των ατόμων,
  - της κοινωνίας,
  - της περιουσίας και
  - του περιβάλλοντος

3

## Σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς

- Κριτήρια για την ικανοποίηση των απαιτήσεων:
  - Κριτήριο R: Η εξασφάλιση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής για ένα χρονικό διάστημα (π.χ. 30min ή 60min κλπ)
  - Κριτήρια E & I (Exposure, Insulation): περιορισμός της ανάπτυξης και της επέκτασης της φωτιάς και του καπνού (
  - Δυνατότητα διαφυγής ή/και διάσωσης των Χρηστών
  - Μέριμνα για την ασφάλεια των διασωστών-πυροσβεστών

4

## Σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς

- Σχετικοί Ευρωκώδικες:
  - EN 1991-1-2: **Actions** on structures exposed to fire
  - EN 1992-1-2: Design of **concrete** structures - Structural fire design
  - EN 1993-1-2: Design of **steel** structures - Structural fire design
  - EN 1994-1-2: Design of **composite** steel and concrete structures - Structural fire design.
  - EN 1995-1-2: Design of **timber** structures - Structural fire design
  - EN 1996-1-2: Design of **masonry** structures - Structural fire design
  - EN 1999-1-2: Design of **aluminium** structures - Structural fire design

5

## ΥΛΙΚΑ

- Σκυρόδεμα
- Χάλυβας
- Ξύλο
- Τοιχοποιία

6

## Σκυρόδεμα

- Δεν καίγεται, έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, ενδόθερμες αντιδράσεις στον τσιμεντοπολτό
  - Αποφλοιώση υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής κυρίως λόγω
    - της αύξησης της πίεσης των πόρων που προκαλείται από τους υδρατμούς
    - της θερμικής διαστολής των αδρανών.
- Εξαρτάται από:
- το ποσοστό της υγρασίας,
  - την ταχύτητα της θέρμανσης,
  - το πορώδες και την περατότητα.
- Μειώνεται με:
- Ίνες προπυλενίου
  - Ψεκάσμο της επιφάνειας με υλικά που επιβραδύνουν την μετάδοση της θερμότητας
  - Τοποθέτηση επιφανειακής μονωτικής επίστρωσης (π.χ. σε σήραγγες)

7

## Σκυρόδεμα

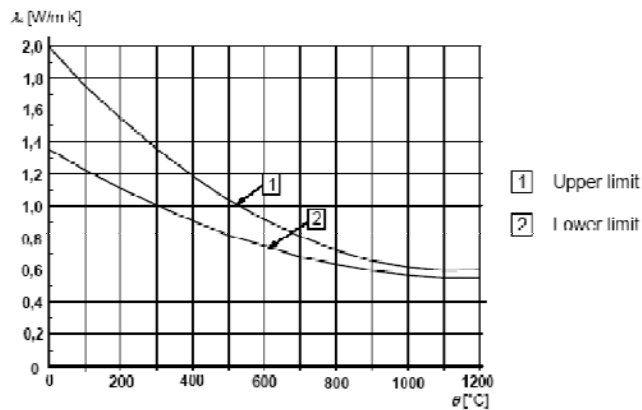
- Ελαφροσκυρόδεμα καλύτερη συμπεριφορά
- Σκυρόδεμα υψηλής αντοχής: εντονότερη αποφλοιώση (πυρκαγιά σε σήραγγες), μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση αντοχής
- Προεντεταμένο σκυρόδεμα:
  - Μεγαλύτερη ευαισθησία των χαλύβων προέντασης
  - Απώλεια συνάφειας στις περιπτώσεις προεντεταμένης κλίνης (προκατασκευασμένα στοιχεία)
- Ίνωπλισμένα σκυροδέματα: πρακτικώς μηδενική η αντοχή των επιφανειακών υφασμάτων έναντι πυρκαγιάς, αλλά η παραμένουσα αντοχή της υπόλοιπης διατομής είναι συνήθως επαρκής

8

## Σκυρόδεμα: θερμικές ιδιότητες

### ■ Θερμική αγωγιμότητα (Ευρωκώδικας 2):

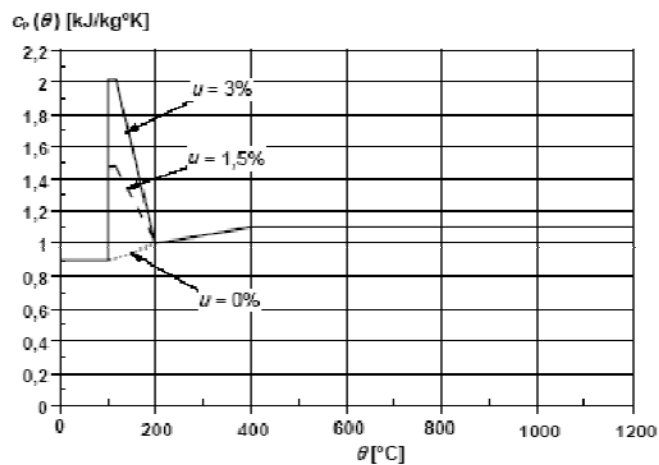
- Σκυρόδεμα  
~1/WmK
- Χάλυβας  
~45/WmK
- Ξύλο  
~0.1/WmK
- Τοιχοποιία  
~0.5-1.0/WmK



## Σκυρόδεμα: θερμικές ιδιότητες

### ■ Ειδική θερμότητα (Ευρωκώδικας 2):

- Σκυρόδεμα  
~1kJ/kgK
- Χάλυβας  
~1kJ/kgK
- Ξύλο  
~2kJ/kgK
- Τοιχοποιία  
~0.5-1.0kJ/kgK



## Σκυρόδεμα: μηχανικές ιδιότητες

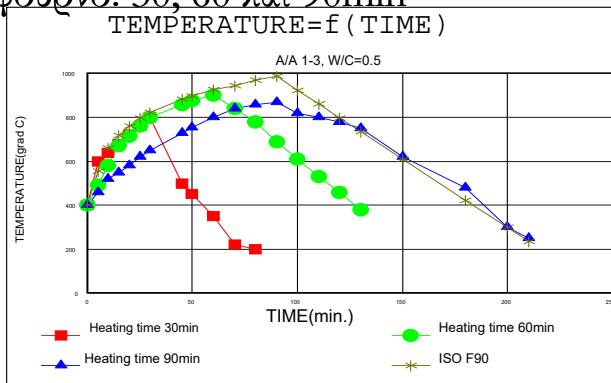
- Υπό υψηλές θερμοκρασίες (κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς): εν γένει υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών
- Μετά την επάνοδο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος (μετά την πυρκαγιά): οι μηχανικές ιδιότητες δεν επανέρχονται ή επανέρχονται σε μικρό ποσοστό (να αγνοείται)

11

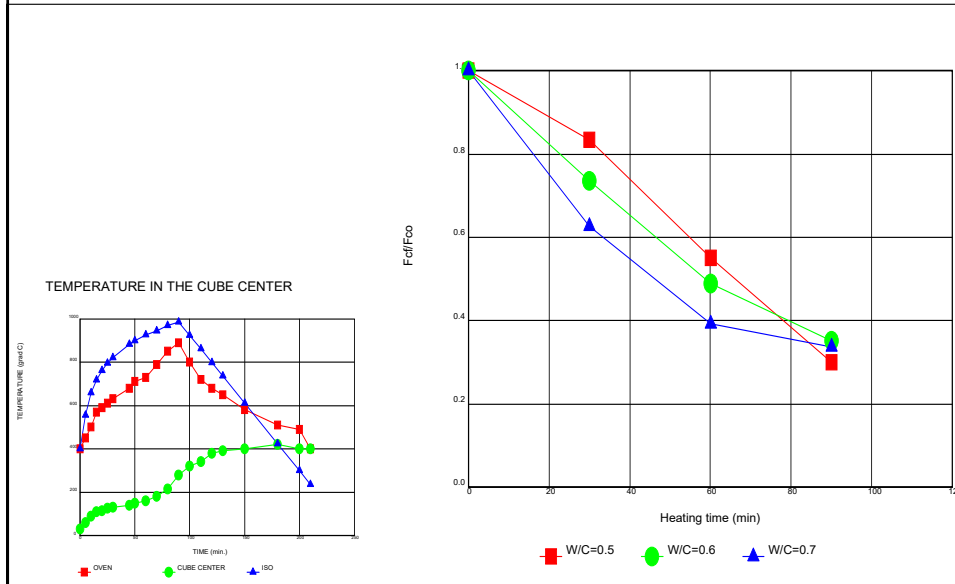
## Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Πειράματα:

- Κυβικά δοκίμια (15cm), διαφόρων συνθέσεων
- Θέρμανση σε φούρνο: 30, 60 και 90min



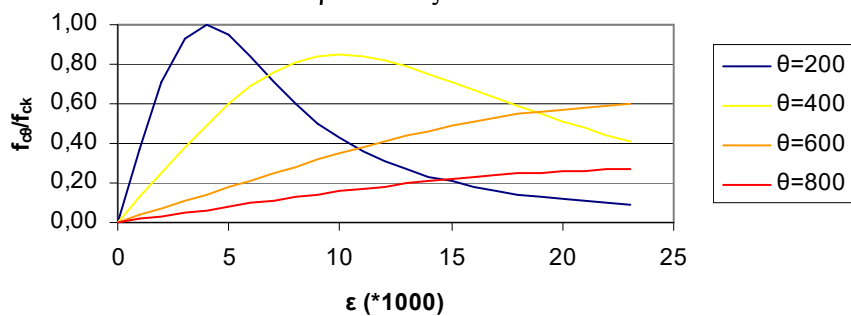
■ Μείωση της ανηγμένης αντοχής συναρτήσει της διάρκειας της πυρκαγιάς



Range	Stress $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\sigma_{c1,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)$
$\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu,\theta}$	For numerical purposes a descending branch should be adopted. Linear or non linear models are permitted.

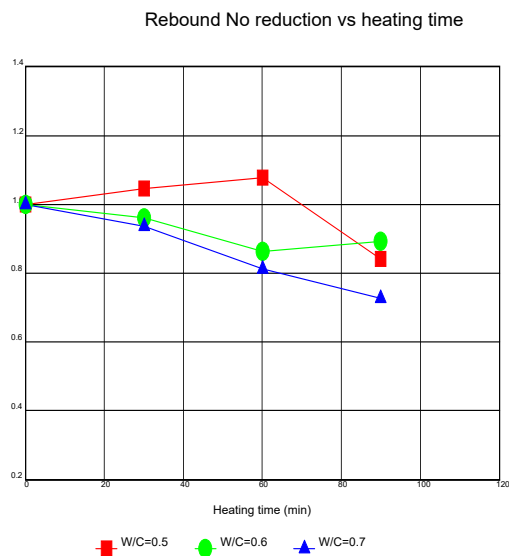
Διάγραμμα σ-ε υπό υψηλές θερμοκρασίες

Ευρωκώδικας 2



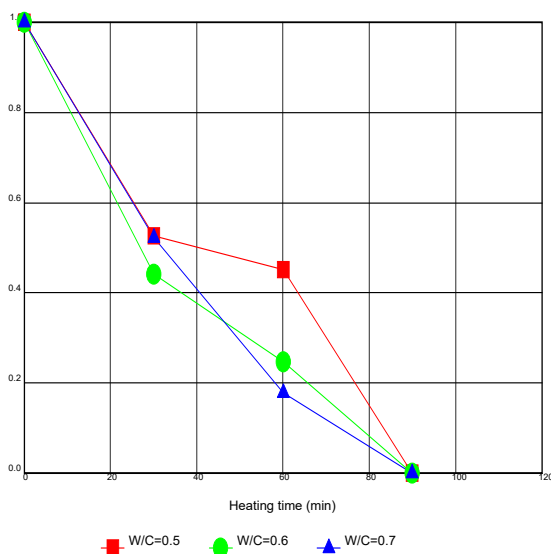
**Κρουσιμέτρηση** : όχι ουσιώδης μεταβολή συναρτήσει της διάρκειας της πυρκαγιάς (σε αντίθεση με την μείωση της αντίστοιχης αντοχής).

Αρα η κρουσιμέτρηση μετά από πυρκαγιά **υπερεκτιμά την αντοχή** (οι αντίστοιχες καμπύλες θα έπρεπε να μετατοπισθούν προς τα δεξιά)



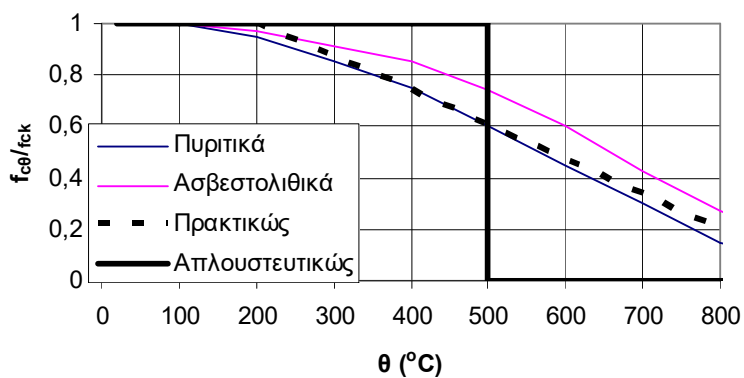
**Υπέρηχοι**: σημαντική μείωση (μεγαλύτερη της αντίστοιχης μείωσης της αντοχής) συναρτήσει της διάρκειας της πυρκαγιάς.

Αρα οι υπέρηχοι μετά από πυρκαγιά **υποεκτιμούν την αντοχή**. (οι αντίστοιχες καμπύλες θα έπρεπε να μετατοπισθούν προς τα αριστερά)



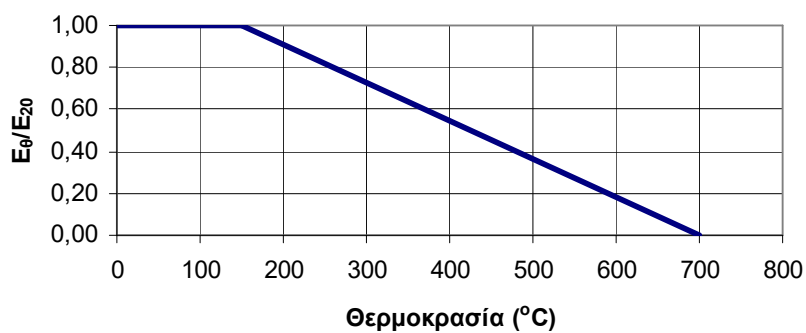


### Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος υπό υψηλές θερμοκρασίες (Ευρωκώδικας 2)



17

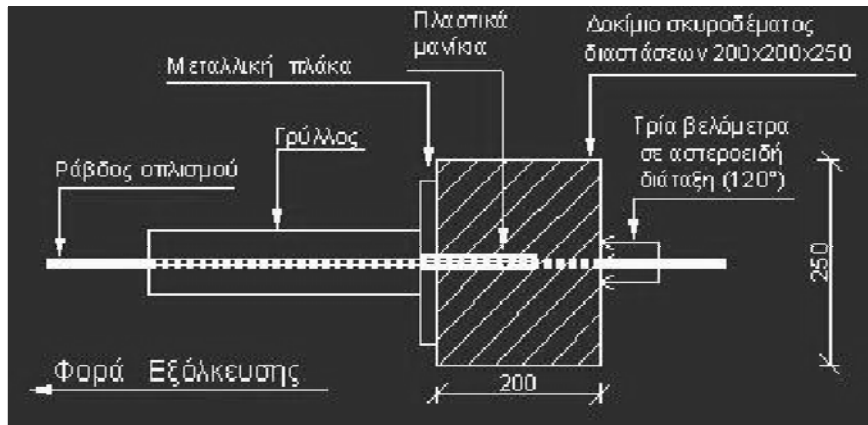
### Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας (BS 8110)



18

## ΣΥΝΑΦΕΙΑ

### Δοκιμή εξόλκευσης ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ



19

## ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

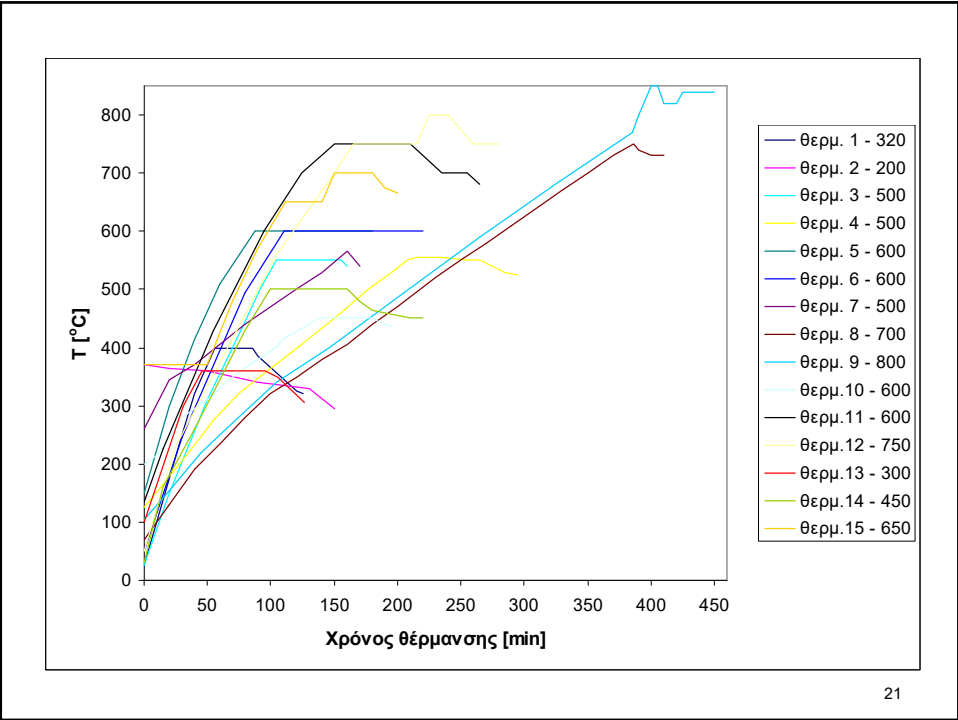
15 θερμάνσεις (200 °C - 800 °C)

40 δοκίμια ανά ζεύγη ή τριάδες

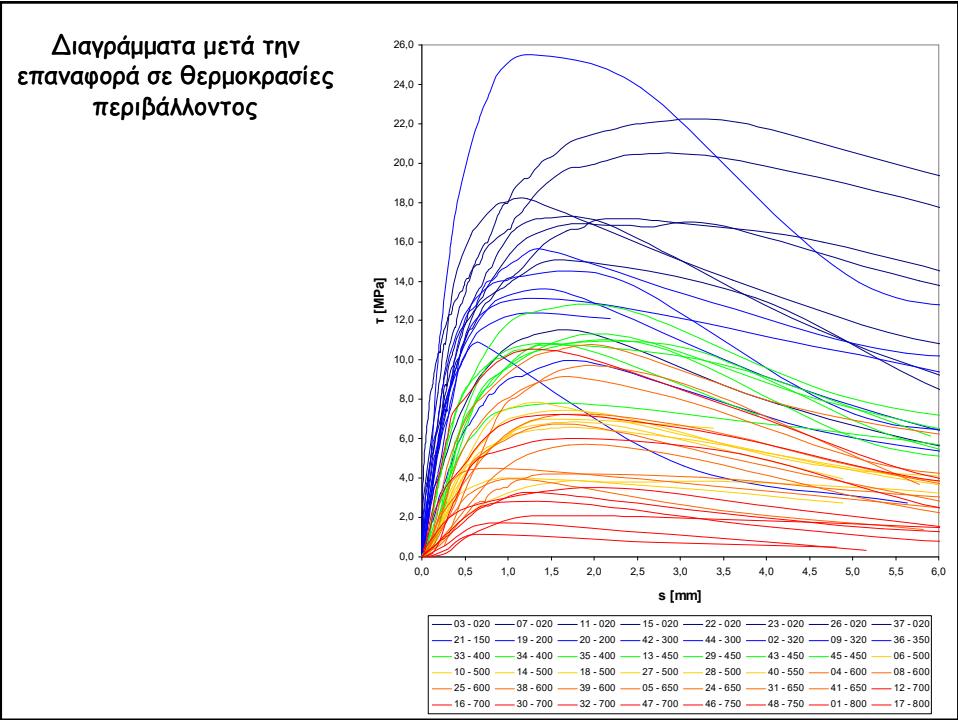
8 δοκίμια (Μάρτυρες), 4 για κάθε

διάμετρο οπλισμού,

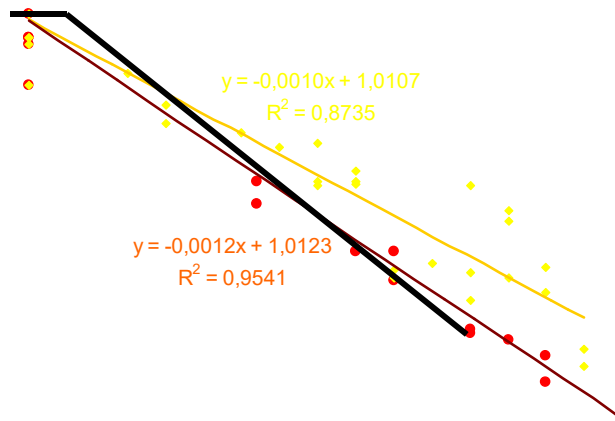
20



21



## Μεταβολή της μέγιστης τάσης σνάφειας συναρτήσει της θερμοκρασίας



23

## Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος

- Επηρεάζονται:
  - το όριο διαρροής,
  - η εφελκυστική αντοχή και
  - η παραμόρφωση θραύσεως.
- Επίσης ενδέχεται να εμφανισθούν:
  - ερπυσμός και χαλάρωση
  - μεταβολή της μικροδομής του χάλυβα

24

## Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος

- Η συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από:
    - Την θερμοκρασία της έκθεσης
    - Τον χρόνο της έκθεσης
    - Την σύσταση και την μέθοδο παραγωγής των χάλυβων
  - Μετά την επάνοδο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι μεταβολές:
    - είτε παραμένουν
    - είτε αίρονται (μερικώς ή ολικώς)
- ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής, την θερμοκρασία έκθεσης αλλά και με την διάρκεια έκθεσης

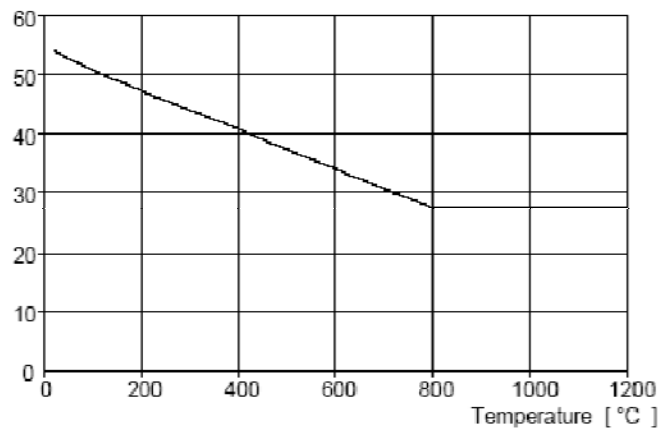
25

## Χάλυβας: θερμικές ιδιότητες

- Θερμική αγωγιμότητα (Ευρωκώδικας 3):

- Σκυρόδεμα  
~1/WmK
- Χάλυβας  
~45/WmK
- Ξύλο  
~0.1/WmK
- Τοιχοποιία  
~0.5-1.0/WmK

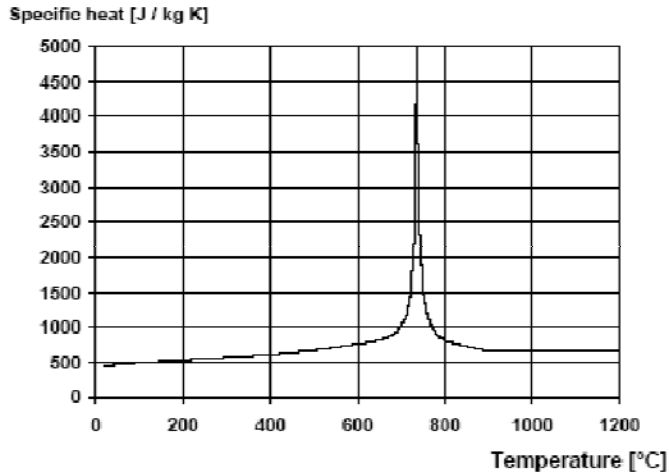
Thermal conductivity [ W / mK ]



## Χάλυβας: θερμικές ιδιότητες

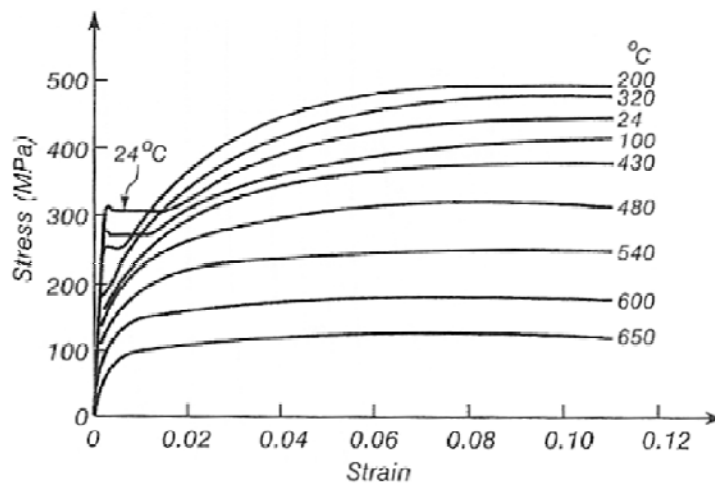
### ■ Ειδική θερμότητα (Ευρωκώδικας 3):

- Σκυρόδεμα  
~1kJ/kgK
- Χάλυβας  
~1kJ/kgK
- Ξύλο  
~2kJ/kgK
- Τοιχοποιία  
~0.5-1.0kJ/kgK

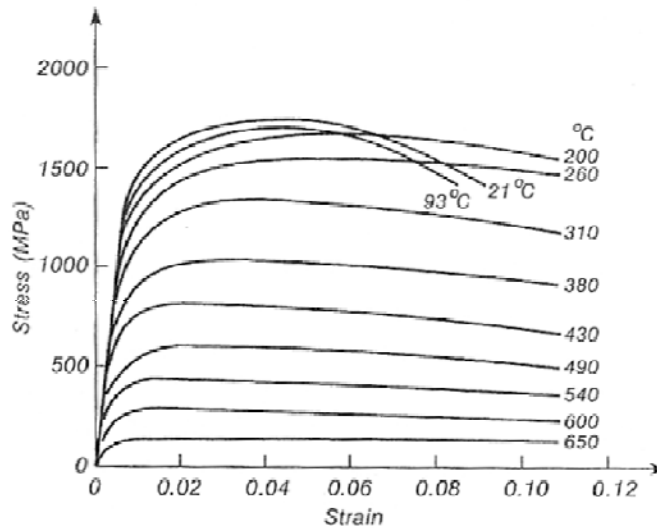


## Χάλυβας: μηχανικές ιδιότητες

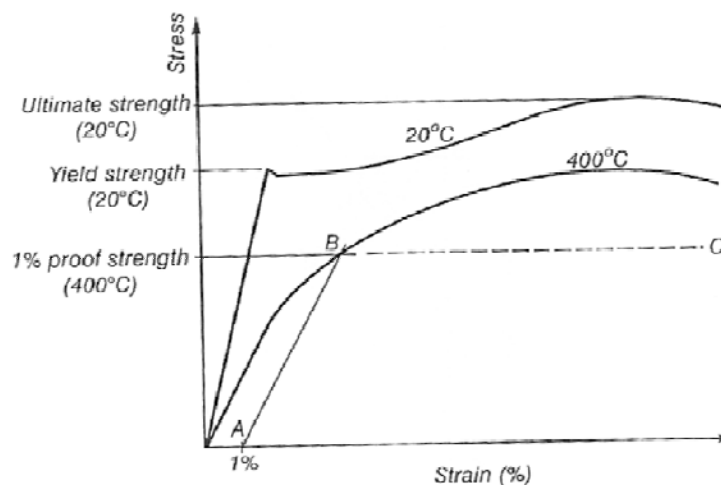
Διάγραμμα σ-ε χαλύβων θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες (Harmathy, 1993)



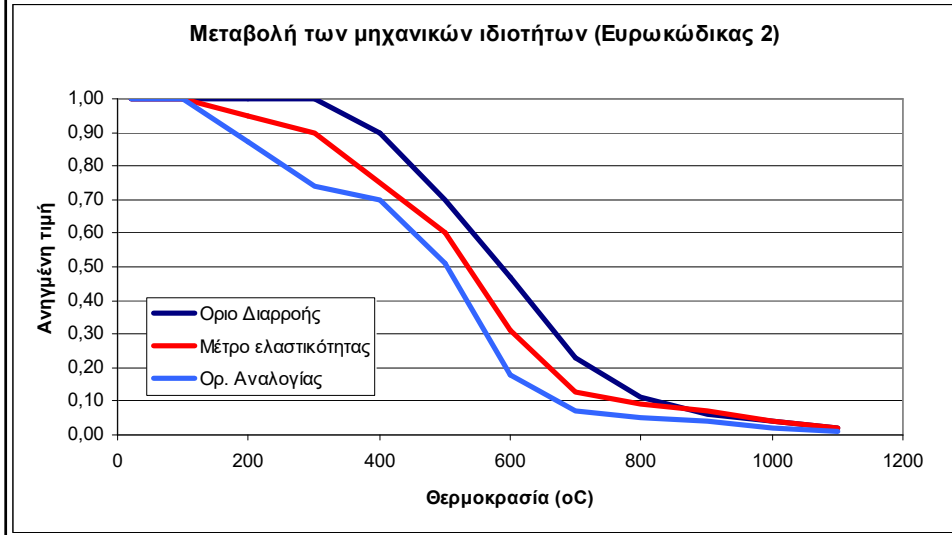
**Χάλυβας: μηχανικές ιδιότητες**  
**Διάγραμμα σ-ε χαλύβων προεντάσεως για διάφορες**  
**θερμοκρασίες (Harmathy, 1993)**



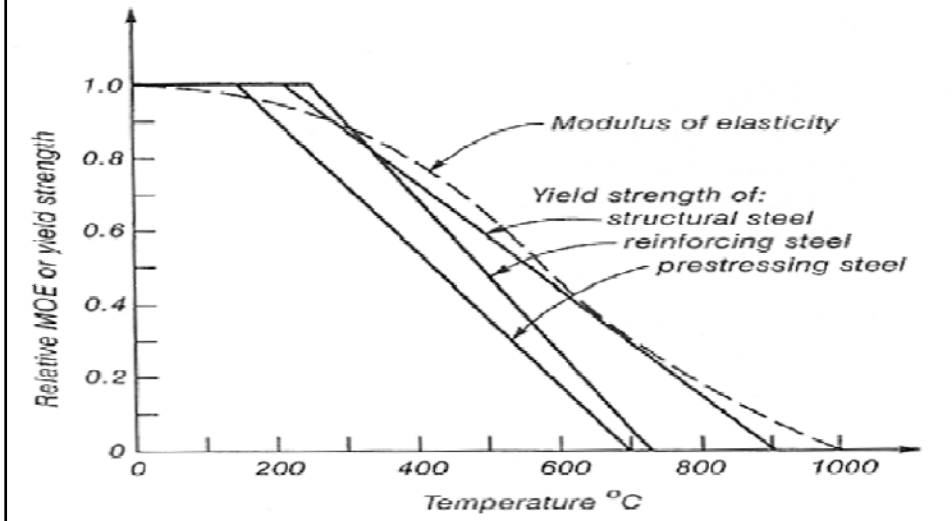
**Χάλυβας: μηχανικές ιδιότητες**  
**Συμβατικό όριο διαρροής σε υψηλές θερμοκρασίες**  
**(Buchanan, 2002)**



## Χάλυβας: μηχανικές ιδιότητες Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων (Ευρωκώδικες 2 και 3)



## Χάλυβας: μηχανικές ιδιότητες Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων (Νέα Ζηλανδία, Αυστραλία και Μ. Βρετανία)





## Χάλυβας: μηχανικές ιδιότητες μετά την επαναφορά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος

- Για θερμοκρασίες έκθεσης μέχρι 500°C:
  - Οι χάλυβες ΘΕ-Θ και ΘΕ-Χ όχι ουσιαστικές μεταβολές
  - Οι χάλυβες ΨΚ, ανάλογα με το βαθμό ψυχρής κατεργασίας, παρουσιάζουν μεγάλη μείωση της παραμόρφωσης θραύσης  $\epsilon_u$ .
- Για θερμοκρασίες από 500°C μέχρι 650°C
  - Οι ΘΕ-Θ χάνουν το 50% της αντοχής στους 650°C
  - Οι ΘΕ-Χ πρακτικώς δεν χάνουν την αντοχή τους
  - Οι χάλυβες ΨΚ, ανάλογα με το βαθμό ψυχρής κατεργασίας, μπορεί και να χάσουν όλη την επιπλέον αντοχή που είχαν αποκτήσει με την ψυχρή κατεργασία (να μεταπέσουν σε S200)
- Για θερμοκρασίες έκθεσης άνω των 650°C:
  - Μόνον οι ΘΕ-Χ πρακτικώς δεν χάνουν την αντοχή τους οι υπόλοιποι χάνουν ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό της αντοχής τους.

33

## Εύλο

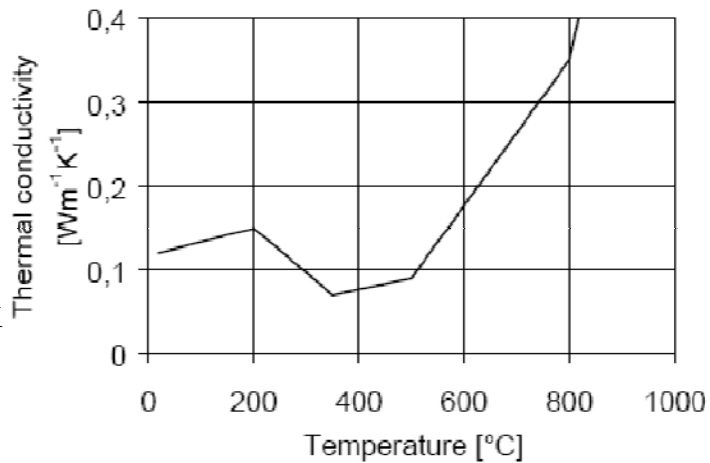
- Μεγάλες διασπορές τιμών
- Διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές διευθύνσεις
- Διαφορετική συμπεριφορά σε εφελκυσμό και θλίψη
- Επίδραση από το μέγεθος του στοιχείου και από την διάρκεια φόρτισης
- Επίδραση από την θερμοκρασία:
  - Στους 100°C: έντονη επίδραση από τον ατμό
  - Στους 200°C: πυρόλυση (θερμική αποσύνθεση)
  - Στους 300°C: απανθράκωση

34

## Εύλο: θερμικές ιδιότητες

### ■ Θερμική αγωγιμότητα (Ευρωκώδικας 5):

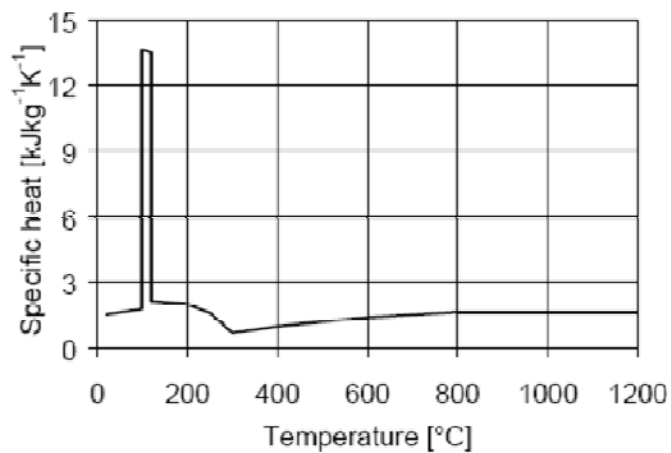
- Σκυρόδεμα  
~1/WmK
- Χάλυβας  
~45/WmK
- Εύλο  
~0.1/WmK
- Τοιχοποιία  
~0.5-1.0/WmK



## Εύλο: θερμικές ιδιότητες

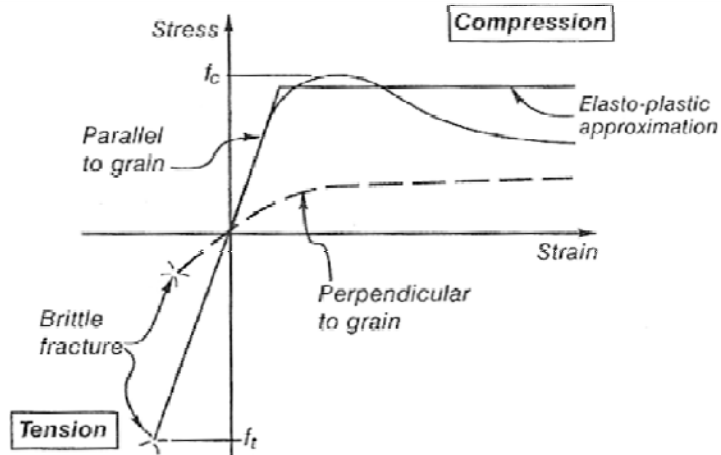
### ■ Ειδική θερμότητα (Ευρωκώδικας 5):

- Σκυρόδεμα  
~1kJ/kgK
- Χάλυβας  
~1kJ/kgK
- Εύλο  
~2kJ/kgK
- Τοιχοποιία  
~0.5-1.0kJ/kgK



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό συνήθεις θερμοκρασίες (Buchanan 2002)

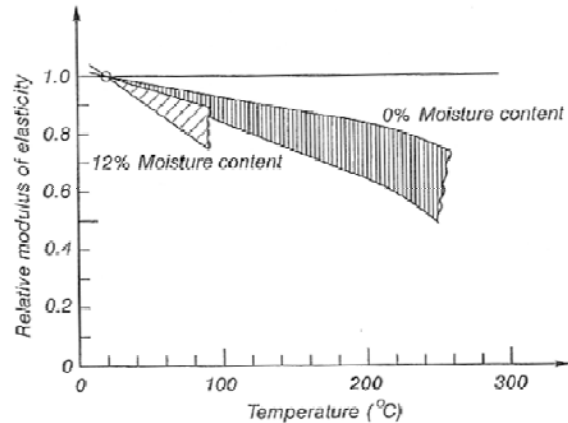


## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Η υγρασία, μαζί με την αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργεί συνθήκες ανάλογες με εκείνες της κατεργασίας του ξύλου με ατμό. Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, η υγρασία αποβάλλεται και το φαινόμενο σταματά. Επίδραση από το μέγεθος του στοιχείου.

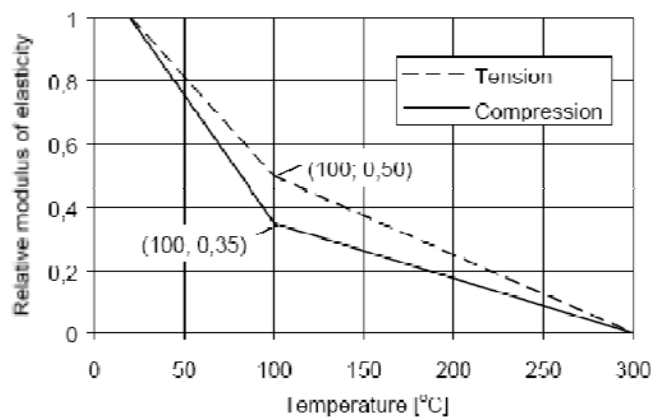
## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Το μέτρο ελαστικότητας παράλληλα προς τις ίνες (Wood handbook, 1987)



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

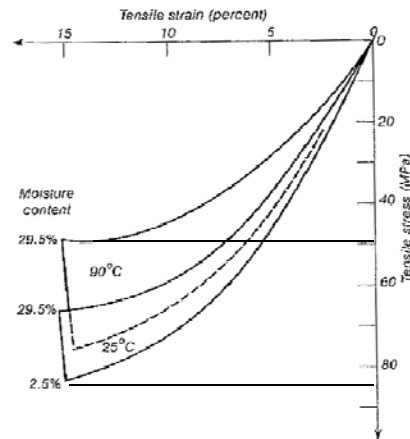
- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Το μέτρο ελαστικότητας παράλληλα προς τις ίνες (Ευρωκώδικας 5)



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

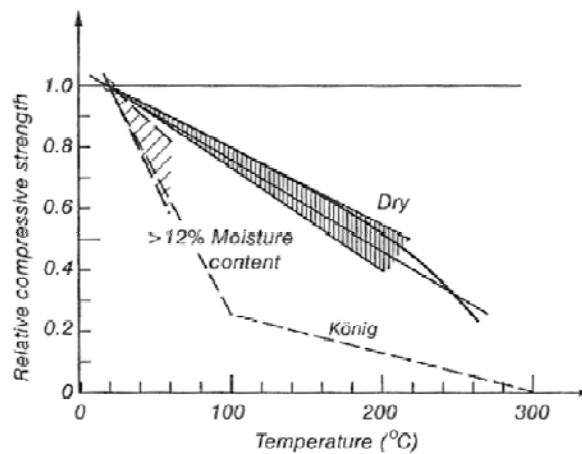
- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Εφελκυσμός παράλληλα προς τις ίνες (östman, 1985)

Στους 90°C με 29.5% υγρασία η αντοχή μειώνεται στο 60% της αντοχής του ξηρού ξύλου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

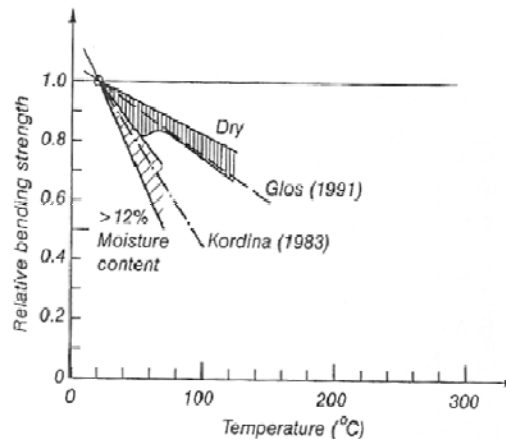
- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Θλίψη παράλληλα προς τις ίνες (Lau & Barrett, 1977)



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

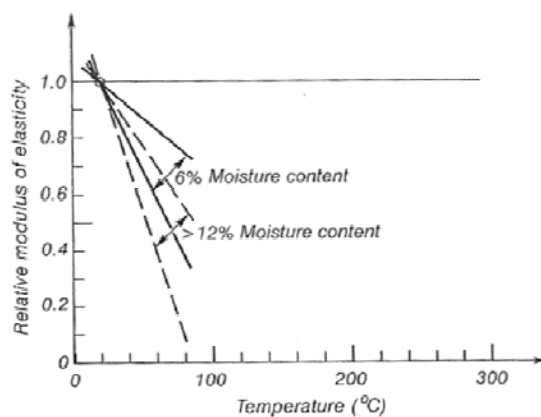
- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Κάμψη παράλληλα προς τις ίνες (Gerhards, 1982)

Συνδυασμός θλίψης και εφελκυσμού. Μετακίνηση του ουδέτερου άξονα



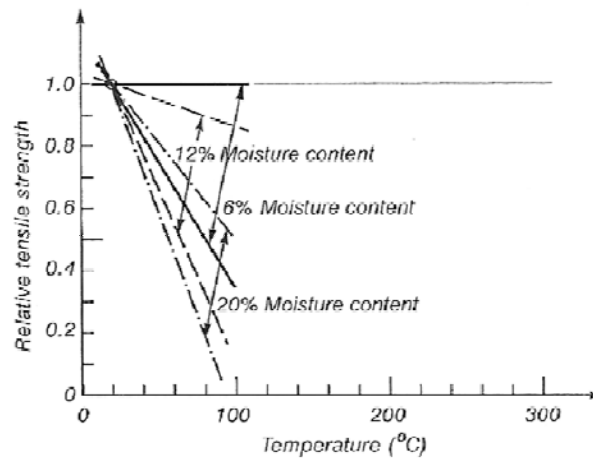
## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Το μέτρο ελαστικότητας κάθετα προς τις ίνες (Gerhards, 1982)



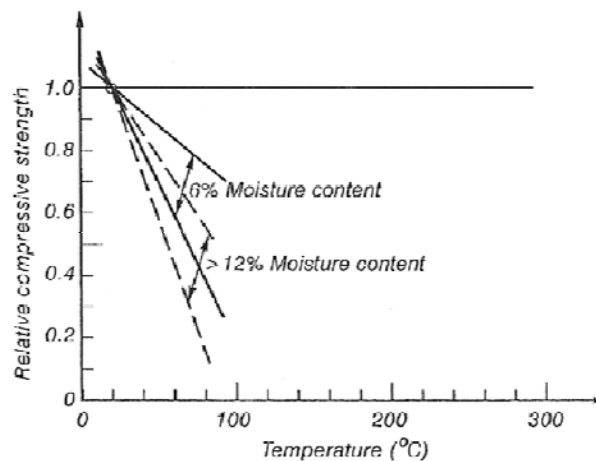
## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Εφελκυσμός κάθετα προς τις ίνες (Gerhards, 1982)



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

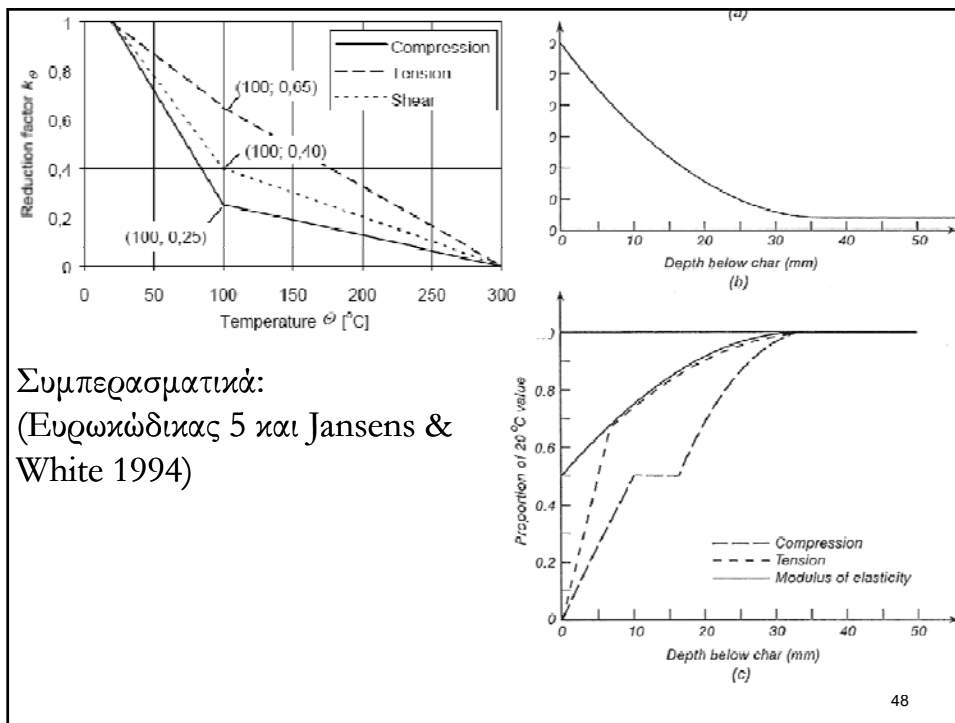
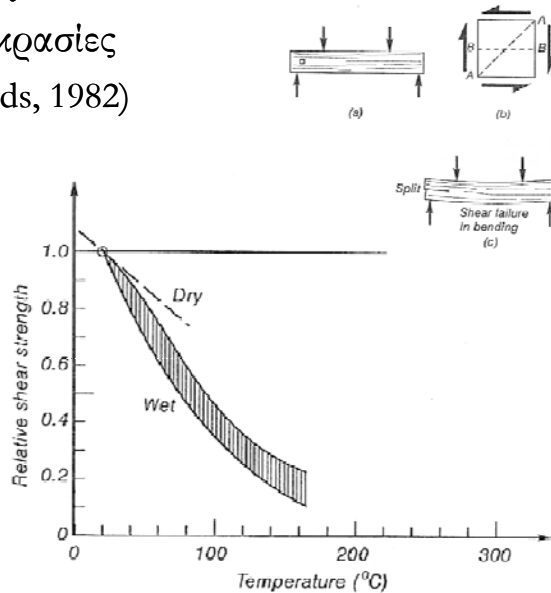
- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Θλίψη κάθετα προς τις ίνες (Gerhards, 1982)



## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Διάτμηση (Gerhards, 1982)

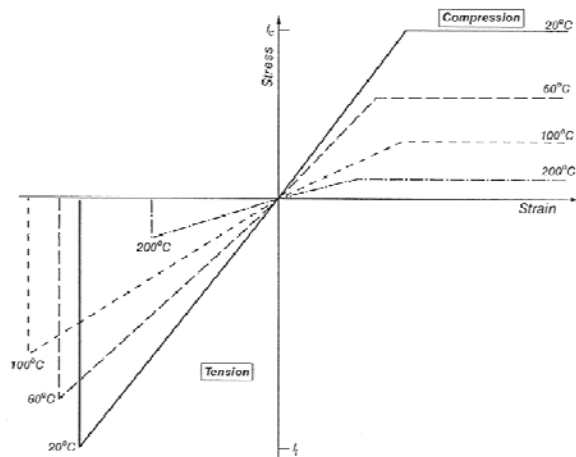
Λόγω της ορθότροπης συμπεριφοράς, η διαγώνια θλίψη δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί, οριζόντια απόσχιση





## Ξύλο: μηχανικές ιδιότητες

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες
  - Υπολογιστικά διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  (König – Walleij, 2000)

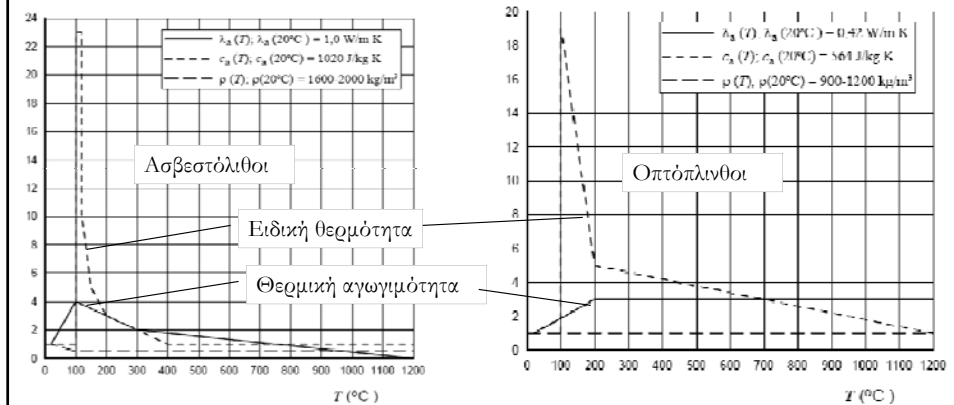


## Τοιχοποιία

- Δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία
- (Γτσιμεντο)κονιάματα: αναλογία προς το σκυρόδεμα

## Τοιχοποιία: θερμικές ιδιότητες

- Θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα (Ευρωκώδικας 6):



## Τοιχοποιία: μηχανικές ιδιότητες

- Διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  (Ευρωκώδικας 6):

a	20°C	f	550°C
b	150°C	g	650°C
c	250°C	h	750°C
d	350°C		
e	450°C		

