

# Σκυρόδεμα

Δρ Ουρανία Τσιούλου

Pithos containing lime-plaster  
Ancient Akrotiri, Thera  
MM III A - MM III B,  
17th. cent. BC  
Museum of Prehistoric Thera, Santorini



Minoan, Mycenae, Troy - Archaeology

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο δομικό υλικό που κατασκευάζεται κυρίως με

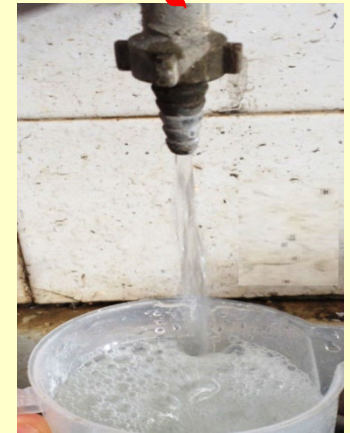
**Τσιμέντο**



**Αδρανή**



**Νερό**



συν χημικά πρόσμιχτα (πλαστικοποιητές, σούπερ πλαστικοποιητές κ.λπ.) κ.λπ. <http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>

- Το σκυρόδεμα είναι το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως Ετήσια παγκόσμια κατανάλωση μεταξύ 21 και 31 δισεκατομμυρίων τόνων!!  
Κατασκευή σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα
- Χαμηλό κόστος Ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές αλλαγές



## Κοινά τσιμέντα

- CEM I Portland cement
  - CEM II Portland-composite cement,
  - CEM III Blast furnace cement,
  - CEM IV Pozzolan cement,
  - CEM V Composite cement.
- Ordinary Portland Cement (OPC)  
~95% clinker & ≤5% gypsum
- Clinker, gypsum & SCM:  
supplementary cementitious  
materials

3 Κατηγορίες με βάση την αντοχή των 28 ημερών

- class 32.5
- class 42.5
- class 52.5

# Αδρανή – άμμος

Πρωτογενές – παράγεται ειδικά για χρήση σε σκυρόδεμα

Δευτερογενή – υποπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διεργασιών που δεν χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως στις κατασκευές

Ανακυκλωμένο – από προηγούμενα στην κατασκευή

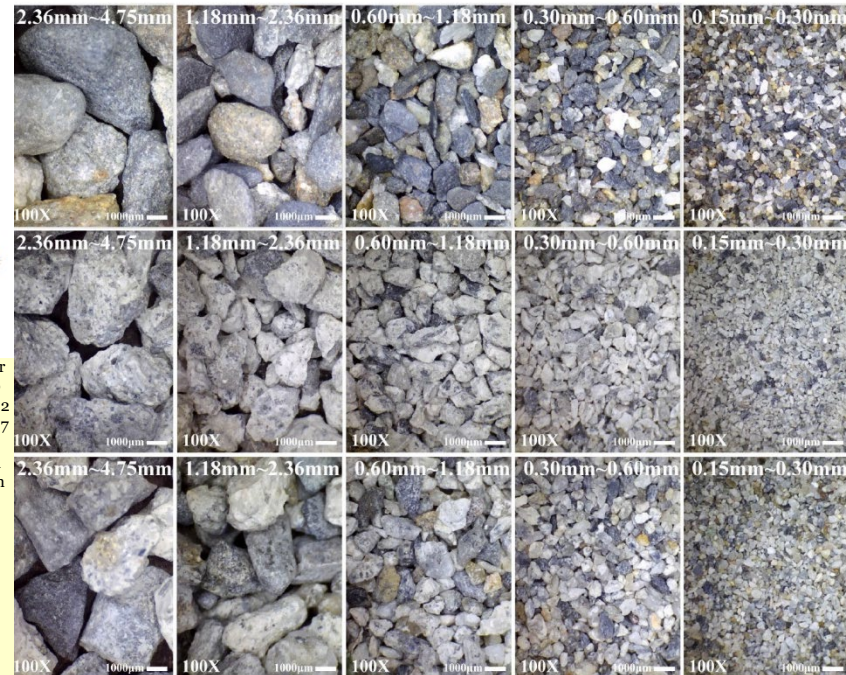
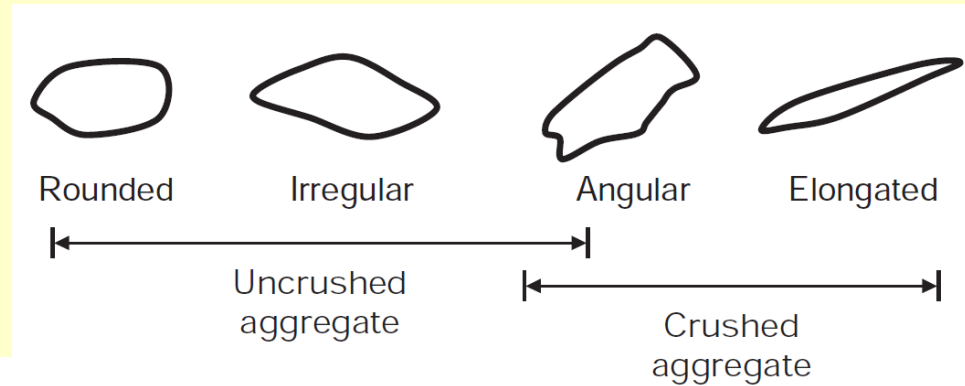
- Αδρανή κανονικής πυκνότητας
- Ελαφρά αδρανή
- Βαρέα αδρανή
- Αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος



<https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=7MhSHVpZ&id=9A31AA94F57B9A0EA1C8722DAB0D28274AF1BC4D&thid=OIP.7MhSHVpZexcFCPSiocWhVQHaH1&q=aggregates+in+concrete&simid=607988034835449815&selectedIndex=1&ajaxhist=0>

## Διαβάθμιση αδρανών

- Χοντρό (10, 16, 20, 32 ή 40 mm) – λεπτό (έως 4-8 mm ανάλογα με κάθε χώρα)
- % που διέρχεται κατά βάρος
- Διάμετρος



<https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=3l8X6GYr&id=FA695BCA25A0E0A510071F6EA07C5480D67F4693&thid=OIP.3l8X6GYr0Si5ReWFEQ2MeQHaEo&q=aggregates+in+concrete&simid=608043203658582769&selectedIndex=18&ajaxhist=0>

# Νερό

- Πρέπει να είναι καθαρό και απαλλαγμένο από έλαια, οξέα, αλκάλια, άλατα, ζάχαρη και οργανικά υλικά
- Το πόσιμο νερό είναι εντάξει
- Το θαλασσινό νερό ΔΕΝ είναι εντάξει
- Η τιμή του pH δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 6



Απαιτήσεις νερού που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα:

ASTM 1602M-06: Τυπική μέθοδος δοκιμής για την ανάμειξη νερού που χρησιμοποιείται στην παραγωγή υδραυλικού τσιμεντοσκυροδέματος.

EN 1008-2002: Νερό ανάμειξης για σκυρόδεμα – Προδιαγραφή για δειγματοληψία, δοκιμή και αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού, συμπεριλαμβανομένου του νερού που ανακτάται από διεργασίες στη βιομηχανία σκυροδέματος, ως νερό ανάμειξης για σκυρόδεμα

## Αναλογία νερού-τσιμεντου

Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα ελέγχει πολλές φρέσκες και σκληρυμένες ιδιότητες στο σκυρόδεμα, συμπεριλαμβανομένης της συνοχής, της αντοχής σε θλίψη, της διαπερατότητας και της στεγανότητας, της ανθεκτικότητας και των καιρικών συνθηκών, της συρρίκνωσης ξήρανσης και της πιθανότητας ρωγμών

# ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Typically:

6–16% τσιμέντο ή συνδετικό υλικό

12–20% νερό

20–30% λεπτόκοκκα αδρανή

40–55% χονδρόκοκκα αδρανή



Height & diameter of the interior circle are 43.3 m

ROME - PANTHEON (126 AD)



<http://en.wikipedia.org/>

# ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

➤ Ανάμειξη των διαφόρων συστατικών



➤ Η παραγωγή σκυροδέματος είναι ευαίσθητη στο χρόνο: Μόλις αναμειχθούν τα συστατικά μεταξύ τους, υπάρχει περιορισμένος χρόνος κατά τον οποίο το σκυρόδεμα μπορεί να διαμορφωθεί σε σχήμα και να τοποθετηθεί εκεί που πρόκειται να σκληρύνει

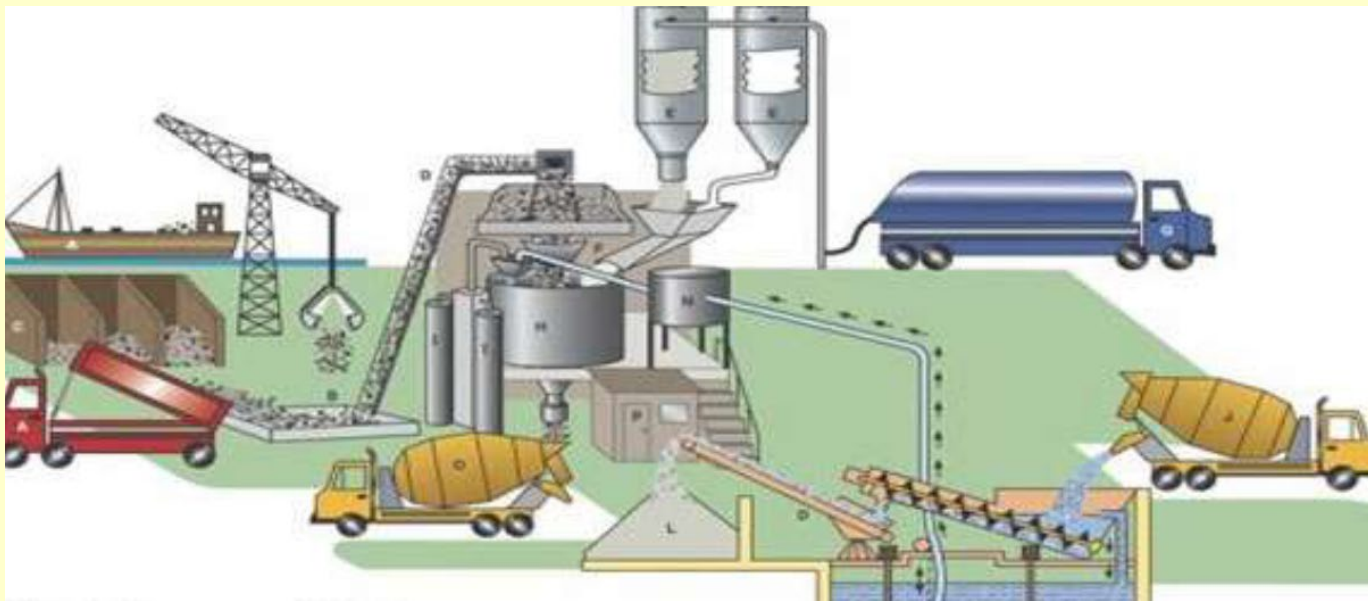
➤ Μεγάλη ποικιλία εξοπλισμού για την επεξεργασία σκυροδέματος. Για να επιτευχθεί το επιθυμητό δομικό υλικό, τα συστατικά πρέπει να αναμειχθούν σωστά, στη συνέχεια το μείγμα να τοποθετηθεί, να διαμορφωθεί και να διατηρηθεί εντός χρονικών περιορισμών

# ΑΝΑΜΕΙΞΗ

## Μεσαίες ή μεγάλες οικοδομικές εργασίες

**Ready mix plant** Συνδυάζει όλα τα συστατικά εκτός από το νερό στο εργοστάσιο σκυροδέματος.

Αυτό το μείγμα στη συνέχεια απορρίπτεται σε ένα φορτηγό έτοιμου μείγματος. Στη συνέχεια, προστίθεται νερό στο μείγμα στο φορτηγό και αναμιγνύεται κατά τη μεταφορά στο εργοτάξιο.



# ΑΝΑΜΕΙΞΗ

## Ανάμιξη στο εργοτάξιο – εργασίες μικρότερου όγκου

➤ Mixer mixed



➤ Hand mixed



# ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ

**Mixing time** θα πρέπει να επαρκούν για την παραγωγή νωπού σκυροδέματος στο οποίο η επιφάνεια όλων των σωματιδίων αδρανών είναι επικαλυμμένη με πάστα τσιμέντου και το οποίο είναι ομοιογενές.

➤ **Under mixing** → Μη ομοιογένεια

➤ **Over mixing** → κίνδυνος εξάτμισης του νερού, διαβάθμισης/θραύσης αδρανών

**Ο χρόνος ανάμειξης εξαρτάται από:**

- Τύπος μίξερ
- Απαιτούμενες ιδιότητες φρέσκου σκυροδέματος

# ΔΟΝΗΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Χρησιμοποιείται για την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής πυκνότητας. Αποβάλλει το μεγαλύτερο μέρος του παγιδευμένου αέρα (φυσαλίδες αέρα) του φρέσκου σκυροδέματος.

- **Εσωτερικοί δονητές (πιο συνηθισμένοι)**  
Ο δονητής βυθίζεται σε σκυρόδεμα και ασκεί αρμονικές δυνάμεις



<http://www.mywebermt.de>

Neville 'Properties of Concrete'



**VIDEO**

<http://www.youtube.com/watch?v=K6vNuPdVwPo>

# ➤ Εξωτερικός δονητής

## Τράπεζα δόνησης



<http://www.knauer.de>

# Συντήρηση

Η συντήρηση απαιτεί κατάλληλο περιβάλλον κατά τα πρώτα στάδια της σκλήρυνσης για ανθεκτικό σκυρόδεμα

- Η συντήρηση ελέγχει τον ρυθμό και την έκταση της απώλειας υγρασίας του σκυροδέματος
- Απαραίτητο για την παραγωγή ανθεκτικό, υψηλής αντοχής σκυρόδεμα και ελαχιστοποιεί τις ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης

**Ελάχιστος χρόνος συντήρησης** εξαρτάται από τον τύπο του σκυροδέματος, τον ήλιο, τον άνεμο και την υγρασία και **1-10 days**

# Μέθοδοι Συντήρησης

## ➤ Παροχή νερού— Ψεκασμός νερού



[www.cuttingin.com.au](http://www.cuttingin.com.au)

➤ Χρήση υλικών στεγανοποίησης(π.χ. επικάλυψη με αδιαπέραστα φύλλα πλαστικού, με χρήση σκληρυντικής ουσίας που σχηματίζει μεμβράνη κ.λπ.)



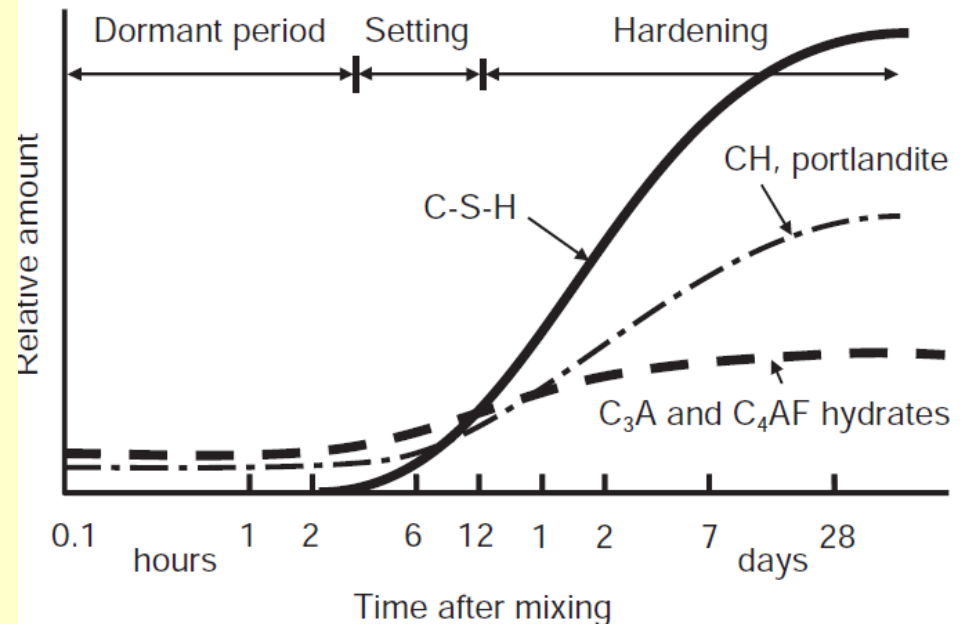
Kryton (<http://blog.kryton.com/2012/05/all-about-curing-2/>)

# STATES OF CONCRETE

➤ Νωπό (ή ρευστό) σκυρόδεμα

➤ Πήξη σκυροδέματος

➤ Σκληρυμένο σκυρόδεμα



*Typical development of hydration products of Portland cement (after Soroka, 1979).*

# ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΡΈΣΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΈΜΑΤΟΣ

## 1. Μετά την ανάμειξη:

- Εργασιμότητα

## 2. After placing:

- Segregation & Bleeding
- Συστολή Ξήρανσης

**Εργασιμότητα** είναι η ικανότητα ενός φρέσκου (πλαστικού) μίγματος σκυροδέματος να γεμίζει σωστά τη φόρμα/καλούπι με το επιθυμητό έργο (δόνηση) και χωρίς να μειώνει την ποιότητα του σκυροδέματος.

- Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την εργασιμότητα είναι η περιεκτικότητα του μείγματος σε νερό (το μέγεθος των αδρανών, η ηλικία και η θερμοκρασία επηρεάζουν επίσης την εργασιμότητα)
- Η εργασιμότητα αυξάνεται με τη χρήση υπερρρευστοποιητή (πρόσμικτο) ή με αύξηση του νερού <https://www.youtube.com/watch?v=CSZxjQwDKF0> <https://www.youtube.com/watch?v=JOkFzIALdQs>

**Η αύξηση του νερού μπορεί να προκαλέσει διαχωρισμό**

# ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ

**Segregation** είναι ο διαχωρισμός των συστατικών ενός ετερογενούς μίγματος έτσι ώστε η κατανομή τους να μην είναι πλέον ομοιόμορφη (τσιμέντο διαχωρισμού & αδρανή)

- Ο διαχωρισμός προκαλείται από τη διαφορά στο μέγεθος των σωματιδίων και στο ειδικό βάρος των συστατικών του μείγματος
- Μπορεί να ελεγχθεί με την επιλογή της κατάλληλης διαβάθμισης

# Εξίδρωση (BLEEDING)

Μια μορφή διαχωρισμού κατά την οποία μέρος του νερού στο μείγμα τείνει να ανεβαίνει στην επιφάνεια του πρόσφατα τοποθετημένου σκυροδέματος

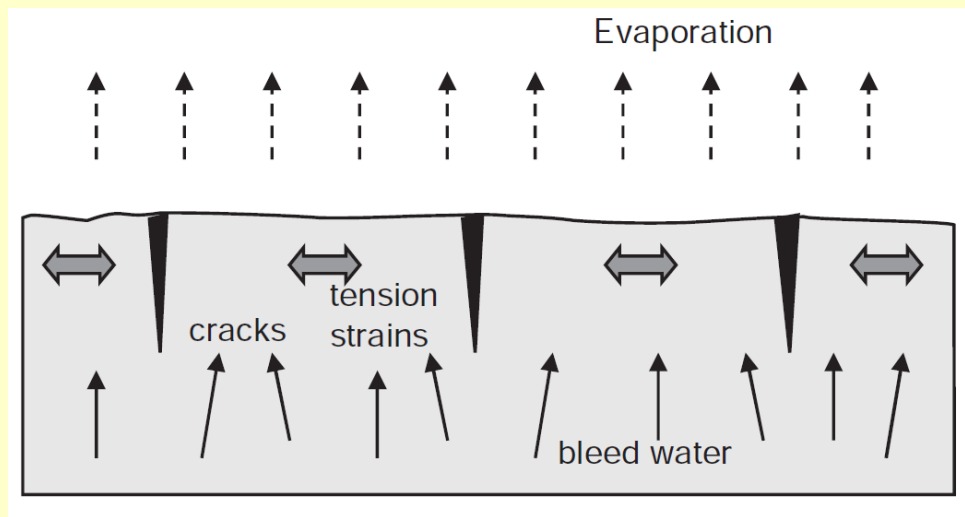
Η εξίδρωση μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας:

Πολύ λεπτά αδρανή

Λιγότερο νερό

Προσθήκη υπερρρευστοποιητή

# Συστολή Ξήρανσης



Formation of plastic  
shrinkage cracks

# ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

- Δεν υπάρχει αποδεικτό κριτήριο που θα μετρήσει άμεσα την εργασιμότητα

Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες δοκιμές είναι το **SLUMP TEST (Δοκιμή Κάθισης)**

Υπάρχουν και άλλες «έμμεσες» δοκιμές για τη μέτρηση της εργασιμότητας (π.χ. δοκιμή συντελεστή συμπίεσης (δοκιμή συμπίεσης: BS EN 12350-4), δοκιμή Vebe: BS EN 12350-3, δοκιμή πίνακα ροής: BS EN 12350-5 κ.λπ.)

# Δοκιμή Κάθισης

## Συσκευές

Καλούπι για το σχηματισμό του δείγματος δοκιμής – Κώνος  
διάμετρος βάσης: 200 mm,  
διάμετρος κορυφής: 100 mm,  
Ύψος: 300 mm.



[www.speedcrete.co.uk](http://www.speedcrete.co.uk)

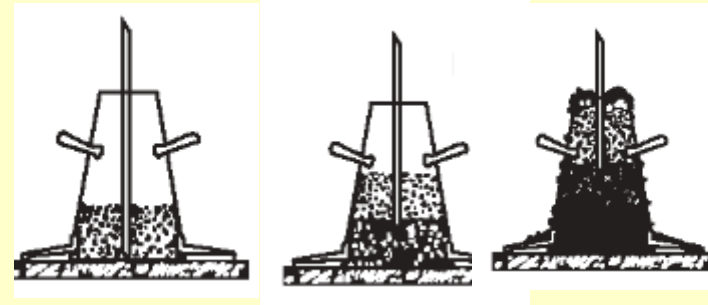
Η βάση και το πάνω μέρος του καλουπιού πρέπει να είναι ανοικτά και παράλληλα μεταξύ τους

- **Ράβδος συμπίεσης**, κυκλικής διατομής, ευθύγραμμα, χαλύβδινα, διαμέτρου 16 mm και μήκους 600 mm, και με στρογγυλεμένα άκρα.

- Γεμίστε το καλούπι σε τρεις στρώσεις (each approximately one-third of the height of the mould)
- Συμπυκνώστε κάθε στρώση με 25 χτυπήματα της ράβδου συμπίεσης

Συμπυκνώστε το πρώτο στρώμα σε όλο το βάθος του.

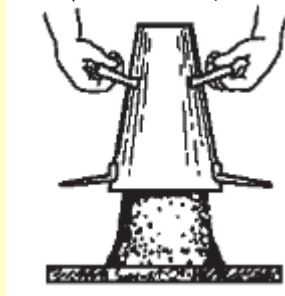
Συμπιέστε το δεύτερο στρώμα και το ανώτερο στρώμα το καθένα σε όλο το βάθος του, έτσι ώστε οι πινελιές να διεισδύσουν στο αμέσως υποκείμενο στρώμα.



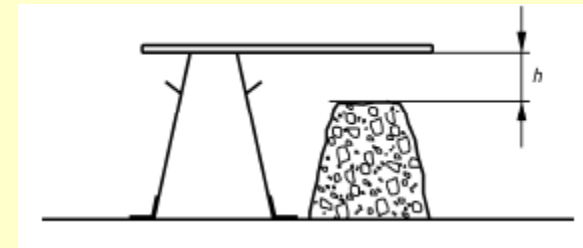
- Αφαιρέστε την περίσσεια σκυροδέματος από την κορυφή χρησιμοποιώντας τη ράβδο συμπίεσης



- Αφαιρέστε το καλούπι από το σκυρόδεμα ανυψώνοντάς το προσεκτικά σε κάθετη κατεύθυνση (εκτελέστε σε 2-5 δευτερόλεπτα)



- Αμέσως μετά την αφαίρεση του καλουπιού, μετράται η καθίση  $h$



**VIDEO**

Slump test at site:

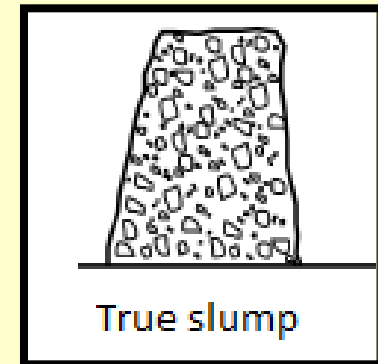
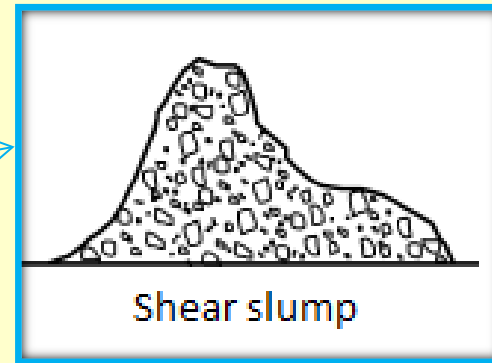
<https://www.youtube.com/watch?v=wPUeLiZaTSI>

Flow slump: <https://www.youtube.com/watch?v=dGd8zUoXyNU>

# SLUMP-TEST

Η καθίση μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη χημικών προσμείξεων όπως **πλαστικοποιητής** ή **υπερρυστοποιητής** χωρίς αλλαγή της αναλογίας νερού-τσιμέντου

Εάν το δείγμα **shears**  
λαμβάνεται άλλο δείγμα  
και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



## Different concrete classes based on slump

| Class | Slump in mm |
|-------|-------------|
| S1    | 10 to 40    |
| S2    | 50 to 90    |
| S3    | 100 to 150  |
| S4    | 160 to 210  |
| S5    | ≥220        |

Slump test can be used only  
**slump  $\geq 10$  mm and  $\leq 210$  mm**

# ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

## ➤ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Διαφορετικοί τύποι σκυροδέματος με βάση το βάρος

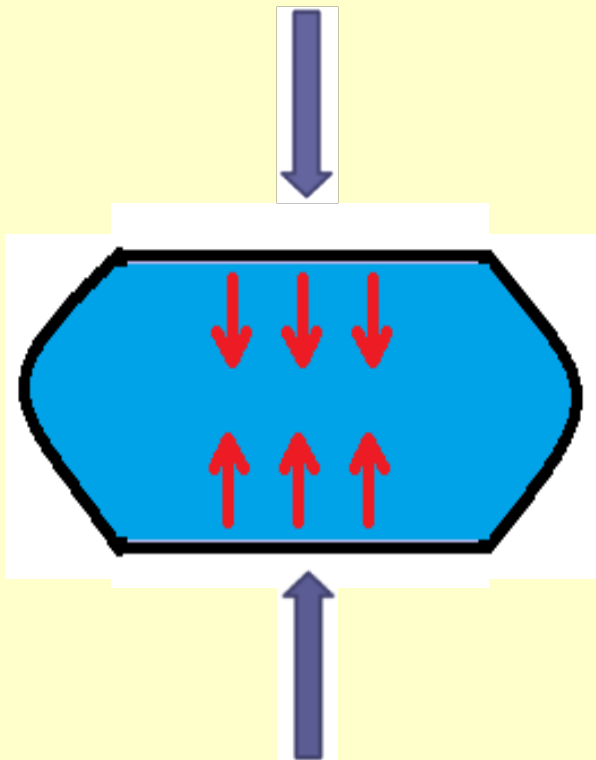
Ελαφροσκυρόδεμα:  $800 - 2000 \text{ kg/m}^3$

Σκυρόδεμα κανονικού βάρους:  $2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$

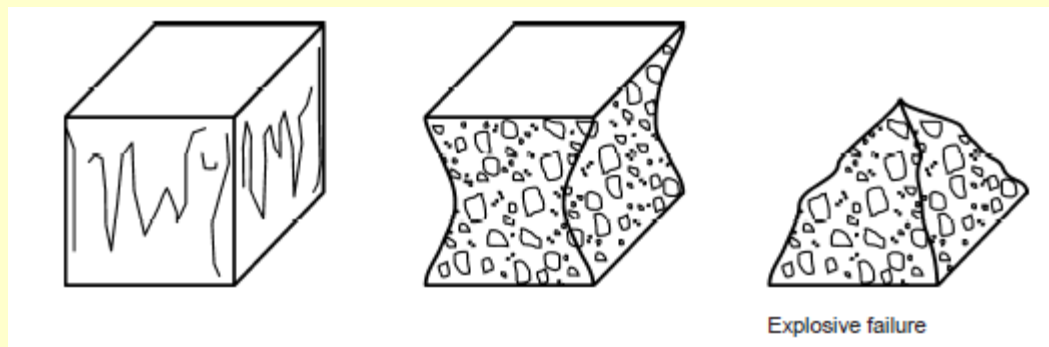
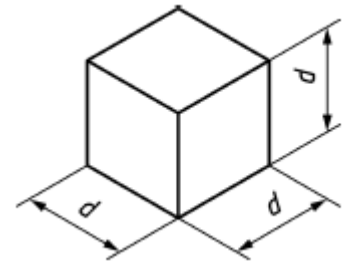
Βαρύ σκυρόδεμα  $> 2600 \text{ kg/m}^3$

# ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

**ΚΥΒΟΙ & ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ** μπορούν να χρησιμοποιηθούν



➤ **KYBOI**  
cubes (100mm or 150mm)

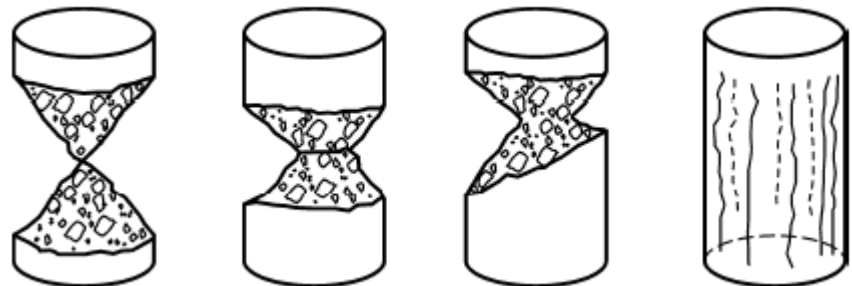
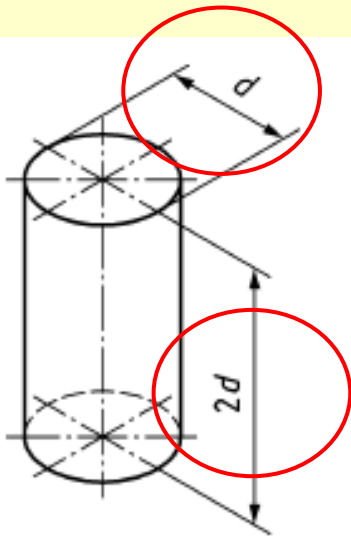


**FAILURE TYPE**

## ➤ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

Το ύψος του κυλίνδρου είναι διπλάσιο από τη διάμετρο  
Κοινά κυλινδρικά spesimens:

- 100mm diameter & 200mm height
- 150mm diameter & 300mm height



$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

$f_c$  είναι η αντοχή σε θλίψη, in **MPa** (**N/mm<sup>2</sup>**);

$F$  είναι το μέγιστο φορτίο σε περίπτωση αστοχίας, in **N**;

$A_c$  είναι η περιοχή διατομής του δείγματος στην οποία δρα η θλιπτική δύναμη (**in mm<sup>2</sup>**).

Η αντοχή του κυλίνδρου είναι περίπου **20% λιγότερο** από την αντοχή του κύβου για κανονικό δομικό σκυρόδεμα

- Με υψηλότερες κατηγορίες αντοχής, η αντοχή του κυλίνδρου επιτυγχάνει υψηλότερο ποσοστό της αντοχής του κύβου. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι διαφορές, η κατηγορία αντοχής ορίζεται και από τα δύο **cylinder** and **cube** αντοχή (for example, C30/37).

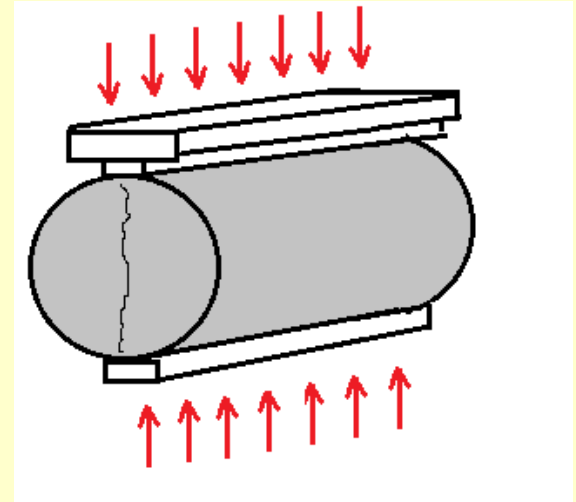
| Mix designation                               | C12/16 | C16/20 | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C45/55 | C50/60 | C55/67 | C60/75 | C70/85 | C80/95 | C90/105 |
|-----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Characteristic cylinder strength<br>$f_{ck}$  | 12     | 16     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 70     | 80     | 90      |
| Characteristic cube strength<br>$f_{ck,cube}$ | 16     | 20     | 25     | 30     | 37     | 45     | 50     | 55     | 60     | 67     | 75     | 85     | 95     | 105     |

$$\frac{f_{ck}}{f_{ck,cube}} = 0.75 \quad 0.80 \quad 0.80 \quad 0.83 \dots\dots\dots 0.86$$

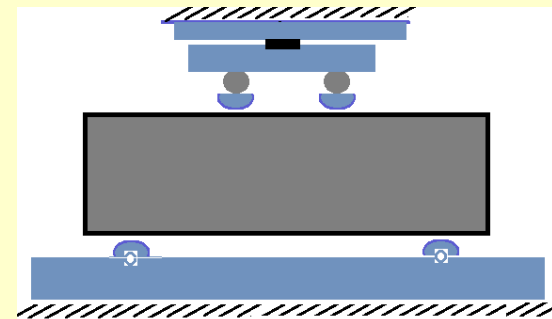
Cylinder/ cube strength = **0.75 - 0.86**

# Εφελκυστική Αντοχή Σκυροδέματος

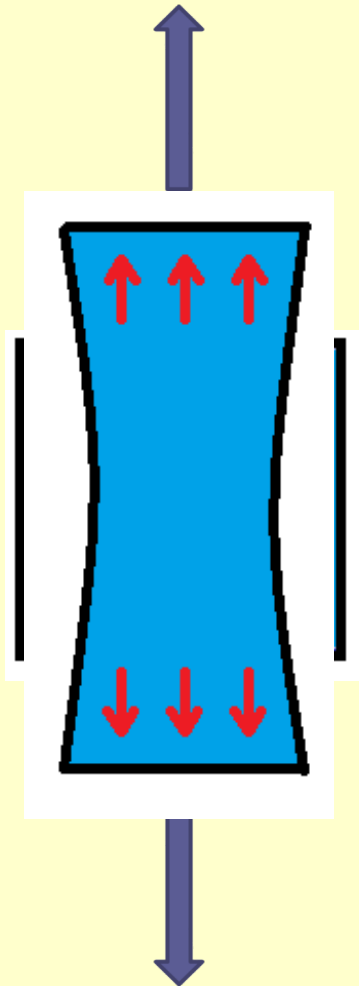
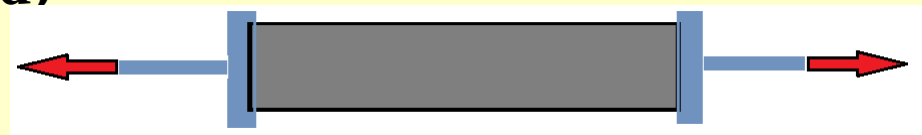
➤ Tensile splitting test



➤ Prism testing



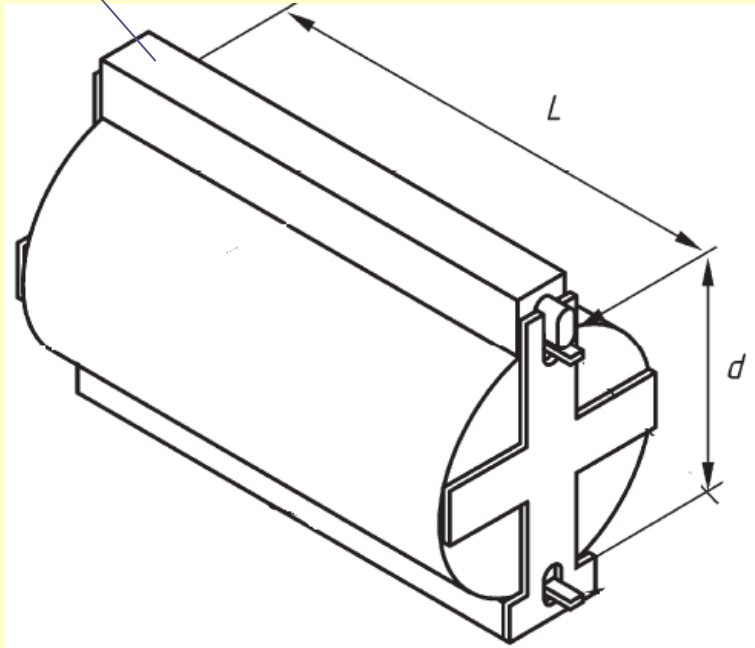
➤ Direct tensile tests (can't be easily conducted)



# Tensile splitting test

Steel loading piece

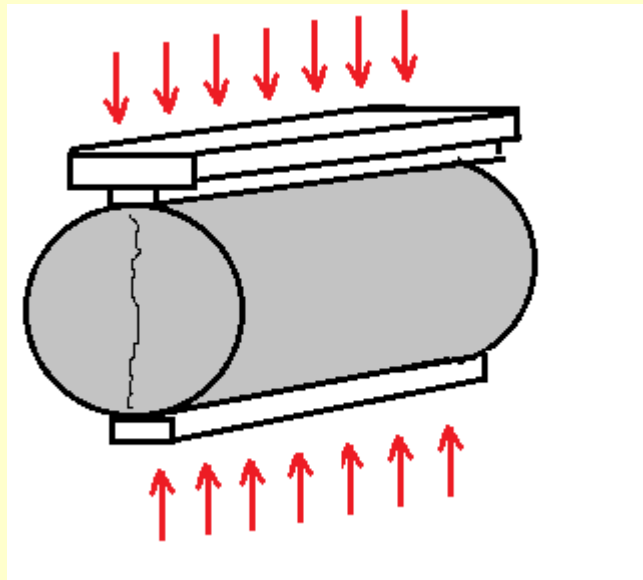
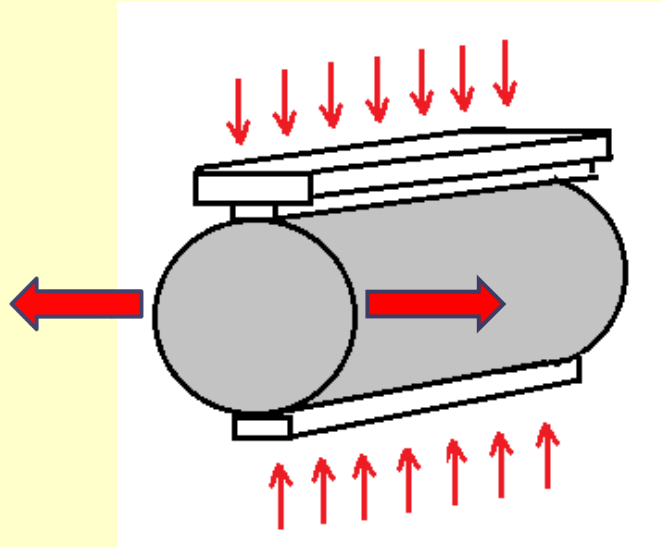
$L$  is the length of the line  
of contact of the specimen



$d$  is the diameter of the cylinder



The compressive stress produces a transverse tensile stress



$$f_{ct,sp} = \frac{2 P}{\pi L d}$$

*$f_{ct,sp}$  is the tensile splitting strength  $\left( \text{MPa or } \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$*

*$P$  : is the max load in N*

*$L$  is the length of the line of contact of specimen, in millimeters (mm)*

*$d$  is the diameter of cylinder, in millimeters (mm)*

Where the tensile strength is determined as the splitting tensile strength, **fct,sp**, an approximate value of the axial tensile strength, **fct**, may be taken as:

$$\mathbf{fct = 0,9 fct,sp}$$

| Mix designation                               | C12/16 | C16/20 | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C45/55 | C50/60 | C55/67 | C60/75 | C70/85 | C80/95 | C90/105 |
|-----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Mean axial tensile strength $f_{ctm}$         | 1.6    | 1.9    | 2.2    | 2.6    | 2.9    | 3.2    | 3.5    | 3.8    | 4.1    | 4.2    | 4.4    | 4.6    | 4.8    | 5.0     |
| Mean splitting tensile strength $f_{ctm, sp}$ | 1.7    | 2.1    | 2.5    | 2.8    | 3.2    | 3.6    | 3.9    | 4.2    | 4.5    | 4.7    | 4.8    | 5.1    | 5.4    | 5.6     |
| Mean flexural tensile strength $f_{ctm, fl}$  | 2.4    | 2.9    | 3.3    | 3.8    | 4.3    | 4.8    | 5.3    | 5.7    | 6.1    | 6.3    | 6.5    | 6.9    | 7.3    | 7.6     |

Bamforth, Chisholm, Gibbs, Harrison 'Properties of Concrete for use in Eurocode 2'

BS EN 1992-1-1:2004

# Ιδιότητες

- Strong in compression
- Weak in tension

**Περίπου**

**Αντοχή σε εφελκυσμό 7-13% Αντοχή σε θλίψη**

Ο οπλισμός από χάλυβα χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό

# Συντελεστής θερμικής διαστολής

Συντελεστής θερμικής διαστολής ( $\alpha$ ) συνήθως στην περιοχή  $8-13 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .