



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Πειραματική Αποτίμηση των Μηχανικών και Ρεολογικών Χαρακτηριστικών Υδραυλικών Ενεμάτων σε Φέρουσες Λιθοδομές με Πηλοκονίαμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Γ. Καραγιαννάκη

Επιβλέπουσα: Ελισάβετ Βιντζηλαίου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος, 2017

Αντικείμενο & Σκοπός Εργασίας

- **Αντικείμενο:** Η ενίσχυση δίστρων & τρίστρων λιθοδομών, δομημένων με συνδετικό πηλοκονίαμα, με ενέματα ομογενοποίησης μάζας.
- **Διάρθρωση εργασίας:**
 - ✓ Μελέτη των δομικών υλικών μιας ιστορικής λιθοδομής (πηλοκονίαμα & λίθοι) και παρασκευή δύο τύπων πηλοκονιαμάτων.
 - ✓ Παρασκευή συνθέσεων ενεμάτων. Μελέτη των χαρακτηριστικών ενεσιμότητάς τους και των μηχανικών τους αντοχών. Επιλογή βέλτιστων συνθέσεων.
 - ✓ Κατασκευή δίστρων και τρίστρων τοιχίσκων. Εφαρμογή και αξιολόγηση των παραπάνω συνθέσεων ενεμάτων.





ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

ΕΝΕΜΑΤΑ

ΤΟΙΧΙΣΚΟΙ

Πηλός-Ιδιότητες

➤ Μίγμα από:

- Χαλίκι και άμμο → χονδρόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά
- Ιλύ → λεπτόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά
- Άργιλο → λεπτόκοκκα χημικώς ενεργά συστατικά αργιλοπυριτικής βάσεως

Δυνάμεις Τριβής

Δυνάμεις Van Der Waals

- Οξειδία
- Οργανικά υλικά → ακατάλληλα για δόμηση

➤ Διαδεδομένη χρήση του πηλού στην δόμηση:

- Ωμόπλινθοι
- Πηλοκονίαμα
- Οπτόπλινθοι



Πηλοκονιάματα

- Σημαντικό ρόλο στην σύνδεση των λιθοσωμάτων (αν και αποτελούν μόλις το 7% του όγκου της λιθοδομής)
- Μέχρι τώρα έρευνα στην ενίσχυση λιθοδομών με ιστορικά ασβεστοκονιάματα



Ανάγκη για μελέτη ενίσχυσης ιστορικών λιθοδομών με πηλοκονιάματα



- Αδυναμία τυποποίησης ιδιοτήτων πηλοκονιάματος
→ φυσικά/χημικά/ορυκτολογικά χαρακτηριστικά πηλού & εξάρτηση από τον τόπο προέλευσης

- Μέσα από βιβλιογραφική διερεύνηση & αναλύσεις σε δείγματα πηλοκονιαμάτων

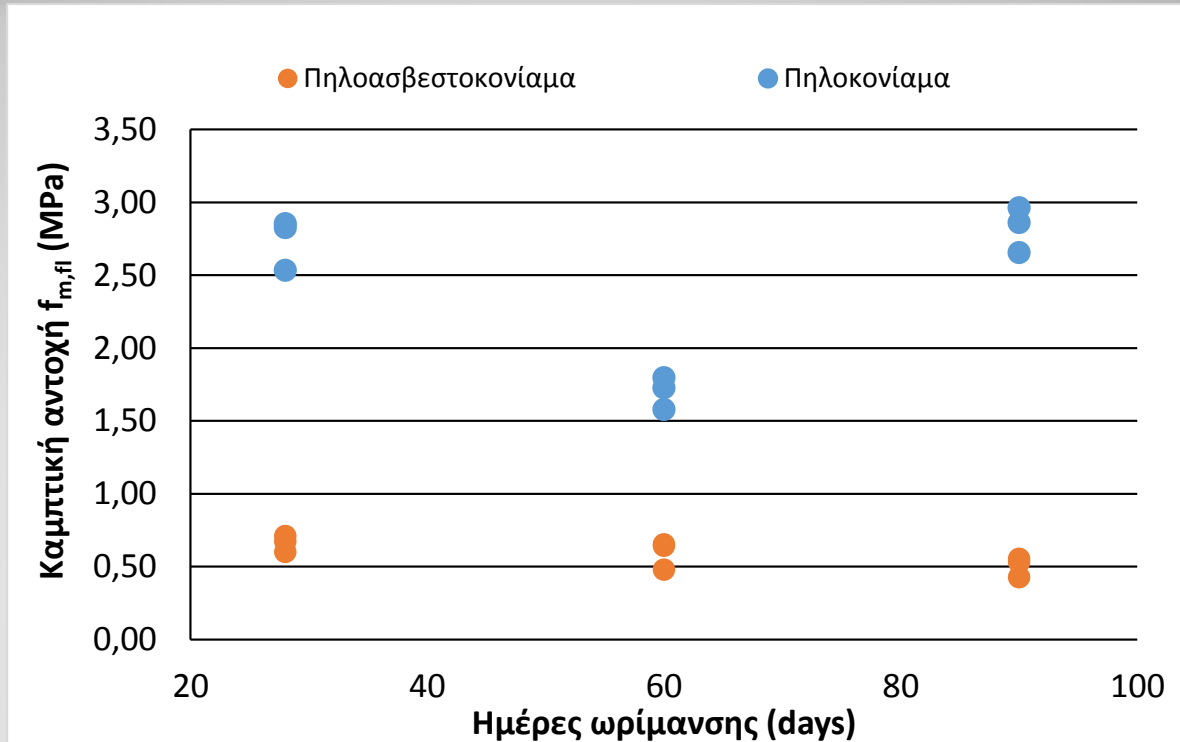


Πηλός
Χαλίκι
Άμμος
Ασβέστης
Νερό



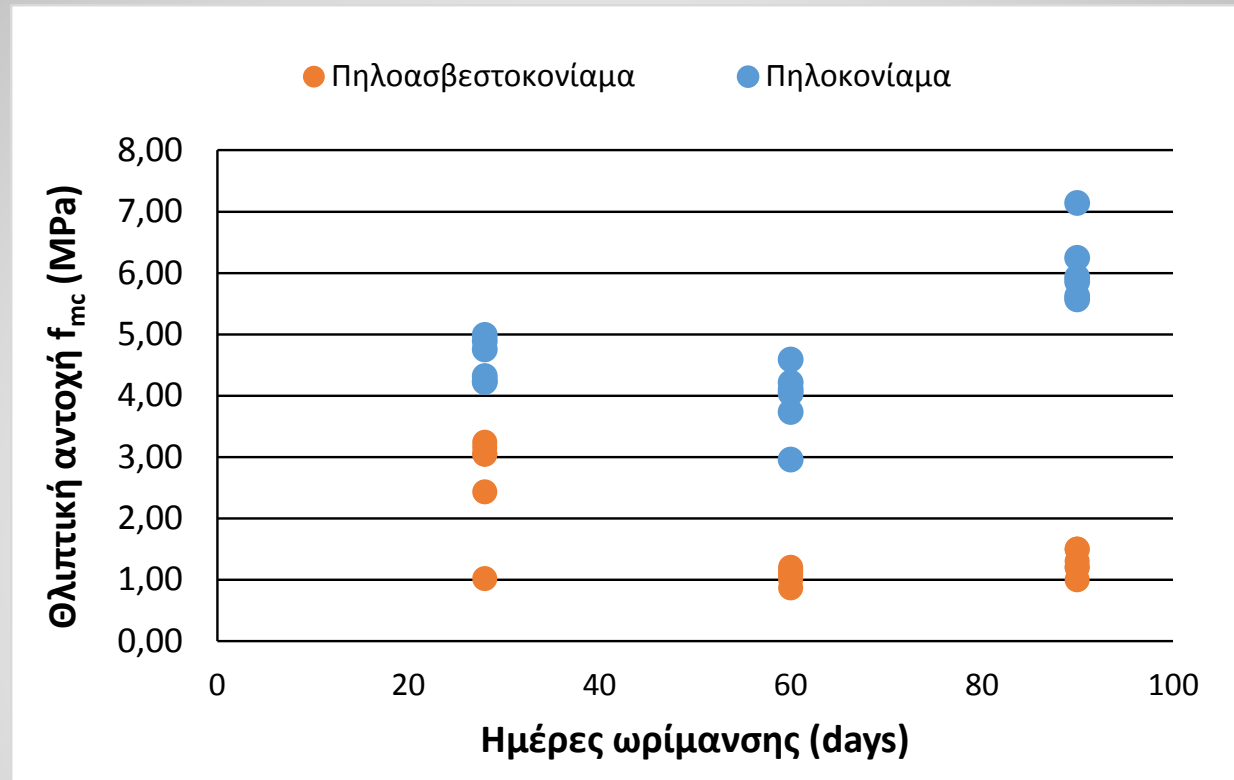
Τύπος	Πηλός (%)	Άμμος (%)	Χαλίκι (%)	Ασβέστης (%)	W/S
Πηλοκονίαμα	80	16	4	-	0,3415
Πηλοασβεστοκονίαμα	75	16	4	5	0,4109

Πηλοκονιάματα–Καμπτική Αντοχή



- 18 δοκιμές κάμψης
- Πηλοκονίαμα: σταθερή εν χρόνω αντοχή (2,78MPa) → μικρορηγματώσεις
- Πηλοασβεστοκονίαμα: σταθερή εν χρόνω αντοχή (0,59MPa) → μείωση 83% σε σχέση με πηλοκονίαμα
- Εξάρτηση από τύπο πηλού και φυσική προέλευση → αδυναμία τυποποίησης ιδιοτήτων τους

Πηλοκονιάματα–Θλιπτική Αντοχή

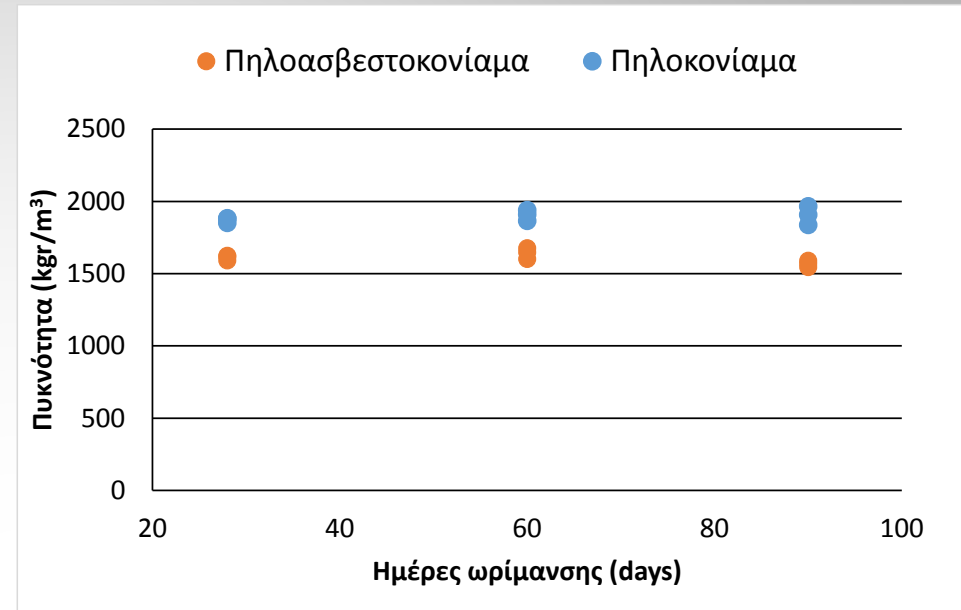
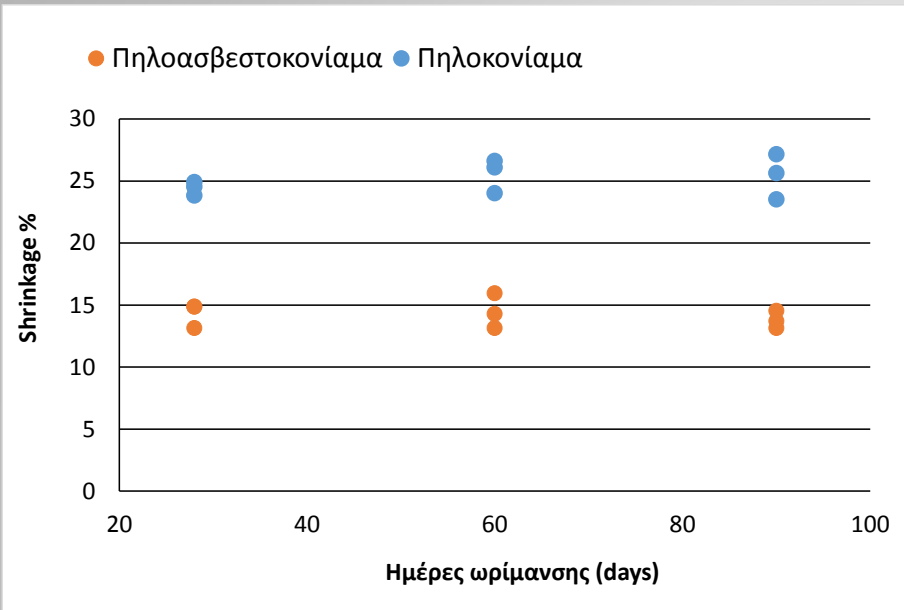


- 18 δοκιμές θλίψης

- Πηλοκονίαμα: Εν χρόνω αύξηση 30% (4,55-5,92MPa)

- Πηλοασβεστοκονίαμα: Εν χρόνω μείωση 56% (1,30MPa) → μείωση 78% (σε σχέση με πηλοκονίαμα)

Πηλοκονιάματα–Φυσικά Χαρακτηριστικά



- Πηλοκονίαμα: αύξηση εν χρόνω → 25,6% Επιρροή συνθηκών συντήρησης (RH)

- Πηλοασβεστοκονίαμα: σταθερή εν χρόνω (14,18%) → μείωση 46% σε σχέση με πηλοκονίαμα → πιο ανθεκτική στις περιβαλλοντικές συνθήκες

- Πηλοκονίαμα: σταθερή εν χρόνω (1894kg/m³)

- Πηλοασβεστοκονίαμα: μείωση εν χρόνω (1569kg/m³) → μείωση 17,61% Σημαντική εν χρόνω μείωση της μάζας



ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

ΕΝΕΜΑΤΑ

ΤΟΙΧΙΣΚΟΙ

Ενίσχυση με Ενέματα-Γενικά Στοιχεία

- Κρίθηκε ως ο καταλληλότερος τρόπος ενισχυτικής επέμβασης για δίστρωτες και τρίστρωτες αργολιθοδομές με πηλοκονίαμα για τους εξής λόγους:
 - Πλήρωση του μεγάλου ποσοστού κενών και ρωγμών
 - Αποκατάσταση συνάφειας μεταξύ των παρειών
 - Αύξηση αντοχής
 - Ενίσχυση ανθεκτικότητας
 - Δεν αλλοιώνεται η εξωτερική εμφάνιση
 - Δεν αυξάνει σημαντικά η δυσκαμψία
 - Δεν αλλάζει το στατικό σύστημα
- Γνωστή πρακτική ενίσχυσης σε γεωτεχνικά έργα
- **Ευρεία εφαρμογή σε αποκαταστάσεις μνημειακών κατασκευών λιθοδομών με ασβεστοκονίαμα**

Δίστρωτες & Τρίστρωτες
λιθοδομές



Μονή Δαφνίου

Ενέματα-Απαιτήσεις

➤ Κριτήρια Επιλογής Υλικών:

- Υδραυλικότητα
- Φυσικοχημική συμβατότητα με υφιστάμενα →

➤ Διεθνείς Συμβάσεις ή Διακηρύξεις (Χάρτες) → κριτήρια συμβατότητας:

1. Σύσταση (χημική, τύπος, κοκκομετρία)
2. Επίπεδο αντοχής (f_c , f_t)
3. Μικροδομή & πορώδες

- Χαρακτηριστικών Ενεσιμότητας →

1. Διεσδυτικότητα
2. Ρευστότητα
3. Σταθερότητα

- ✓ Κοκκομετρική Διαβάθμιση
- ✓ Λόγος W/S
- ✓ Τρόπος Ανάμιξης

- Μηχανικών αντοχών (ιδιαίτερα καμπτικής αντοχής)
- Ανθεκτικότητας επέμβασης & λιθοδομής (μικρή συστολή ξήρανσης)
- Συνάφειας με υπάρχοντα υλικά (μηχανική & χημική) →
- Οικονομικά & Περιβαλλοντικά

Διεπιφάνειες
Υποβάθρου-Ενέματος

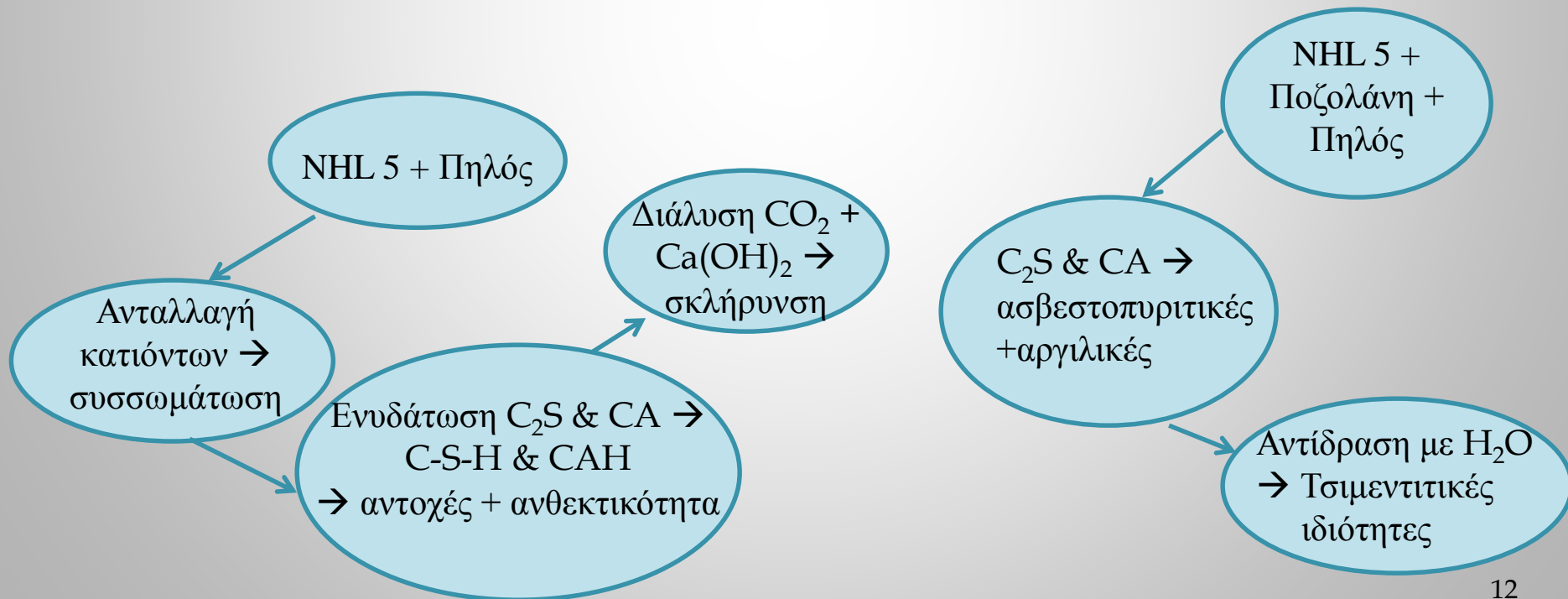
Ενέματα-Συνθέσεις / Αντιδράσεις

➤ 15 Συνθέσεις Αναφοράς: → NHL 5: 100%

➤ 34 Διμερείς συνθέσεις NHL 5- Πηλού →

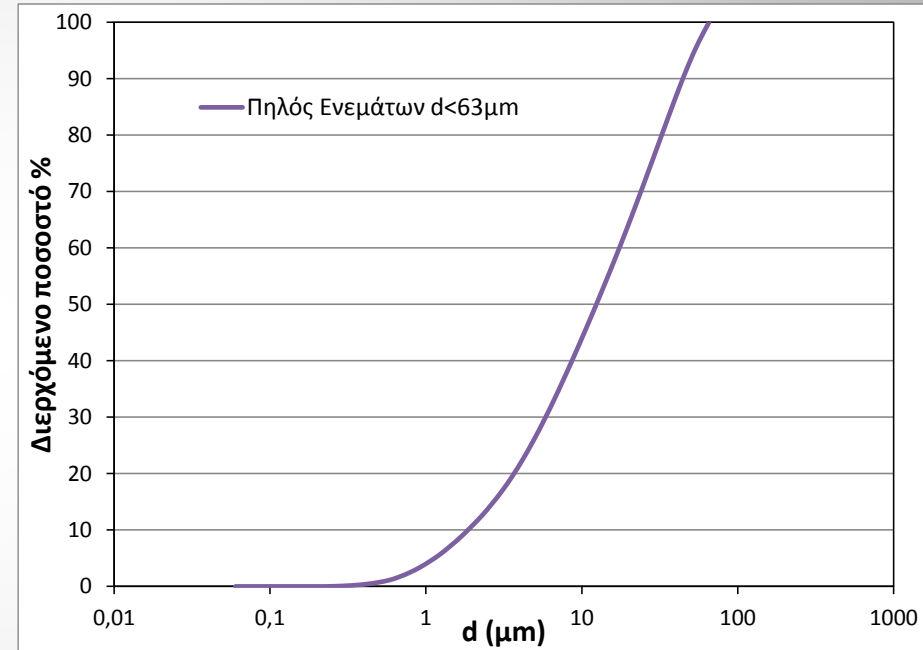
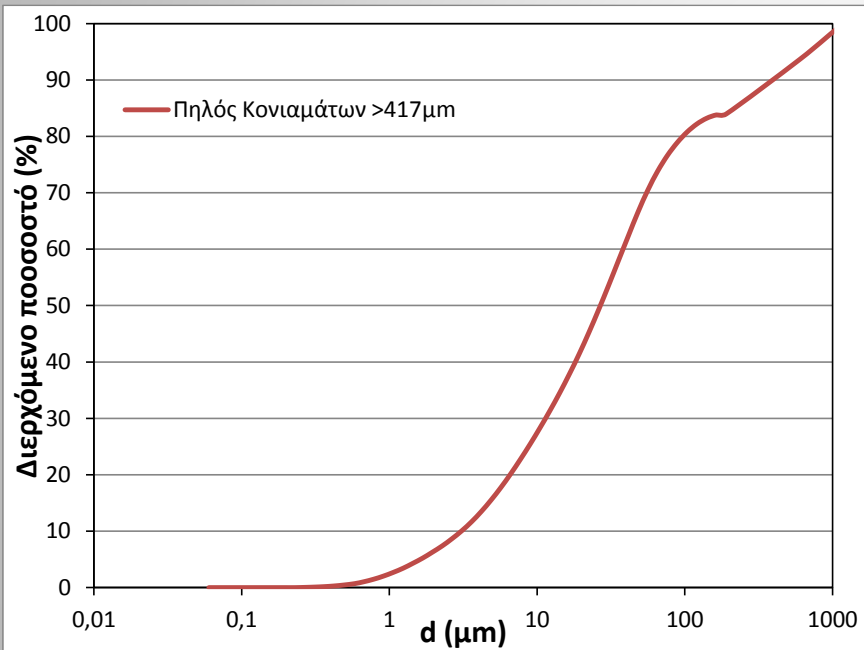
Συνθέσεις:
NHL 5: 90%-Clay: 10%
NHL 5: 80%-Clay: 20%
NHL 5: 70%-Clay: 30%

➤ 4 Τριμερείς συνθέσεις NHL 5- Πηλού-Ποζολάνης



Ενέματα-Υλικά

- NHL 5: $\gamma = 7\text{kN/m}^3$ & $E.E. = 8000\text{cm}^2/\text{gr}$ & Ποζολάνη (Θηραϊκή Γη) & Υπερρευστοποιητής (CHEM SPL)
- Πηλός: Κοκκομετρική διαβάθμιση $< 63\mu\text{m}$ → ξήρανση σε δόσεις 2kgr



- Αποφυγή καθίζησης → θέματα διεισδυτικότητας & σταθερότητας
- Παιπάλη → σκόνη του ίδιου υλικού ή άργιλος → καλύτερη πρόσφυση

Ενέματα-Παρασκευή Ενεμάτων

- Ανάμιξη με υπερήχους (28kHz) & ταυτόχρονη μηχανική ανάδευση
- Σειρά ανάμιξης: πρώτα λεπτόκοκκα μετά χονδρόκοκκα
 1. αποκροκκίδωση
 2. ομοιόμορφη διασπορά στο νερό
- Αποκροκκίδωση:
 1. λεπτόκοκκη στερεή φάση
 2. Αύξηση Ε.Ε.



μεγαλύτερη δέσμευση νερού → βελτίωση χαρακτηριστικών, πυκνή δομή → αύξηση αντοχής ανθεκτικότητας

- Διατήρηση χρόνου ανάδευσης 3min για κάθε υλικό
- Διατήρηση σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας & υγρασίας κατά την ανάδευση



Ενέματα-Ρευστότητα

- Δοκιμή κώνου Marsh
- Πρότυπο: ASTM C939-87 & NF P 18-358
- Μέτρηση χρόνου ροής σε κώνους διαμέτρου στομίου:
4,7mm & 3mm
- Κριτήρια Ελέγχου:

Διάμετρος στομίου 4,7mm

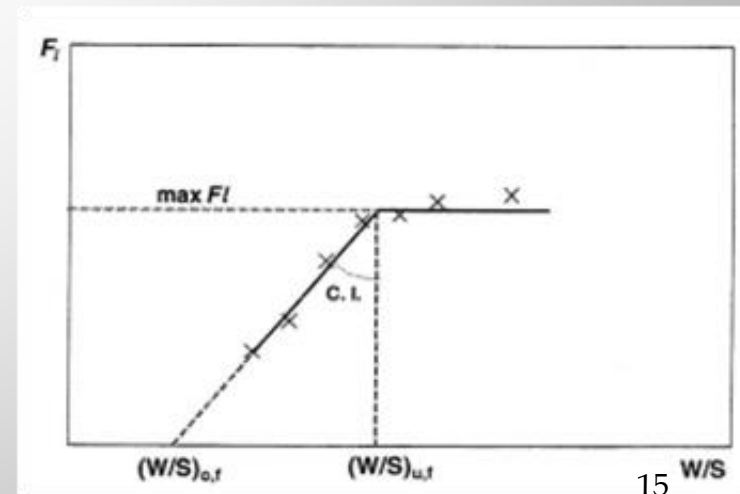
Κριτήριο I: $t_{d=4,7} < 45 \text{ s} \rightarrow 500\text{ml}$

Κριτήριο II: $t_{d=4,7} < 75 \text{ s} \rightarrow 1000\text{ml}$

Διάμετρος στομίου 3mm

Κριτήριο III: $F_1 \geq 0,98 * 10^3 \text{ mm/s} \rightarrow$ συνδυαστικό κριτήριο ρευστότητας & διεισδυτικότητας \rightarrow

$W_{\text{nom}} = 175 \mu\text{m}$



Ενέματα-Σταθερότητα

- Δοκιμή σταθερότητας
- Πρότυπο: NF P 18359
- Δείγμα σε 2 ογκομετρικούς κυλίνδρους 100ml
- Όριο 5% εξίδρωση για τις 2hr



Σύνοψη επιτυχημένων συνθέσεων

- ✓ $W/S = 0,875-0,975$
- ✓ $F_1 = 980 - 1390 \text{ mm/s}$

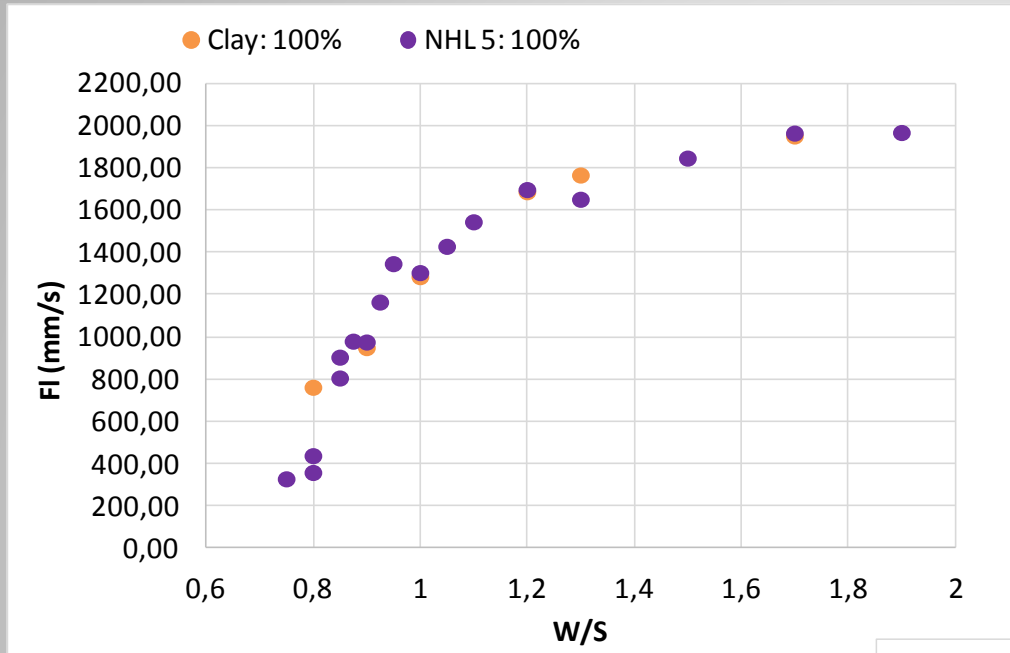
Συνθέσεις που εφαρμόστηκαν στους τοιχίσκους και στις διεπιφάνειες

NHL 5: 100% $W/S = 0,90$

NHL 5: 70% Clay: 30% $W/S = 0,90$

NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7% $W/S = 0,875$

Ενέματα-Ρεολογική Συμπεριφορά Βασικών Υλικών



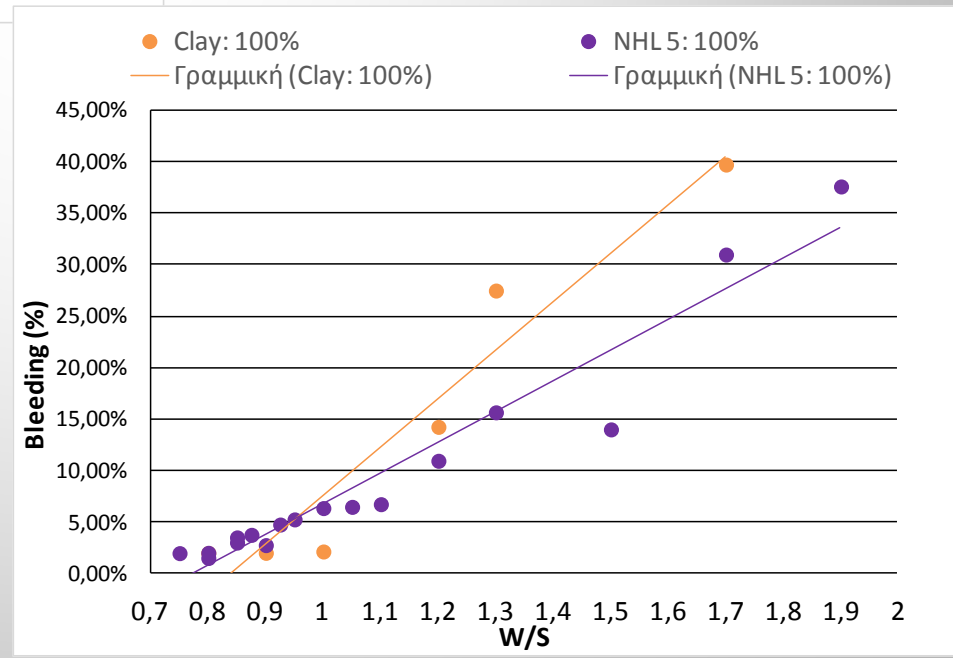
Ρευστότητα:
 Παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση
 → Ίδια ρεολογική συμπεριφορά

Σταθερότητα:

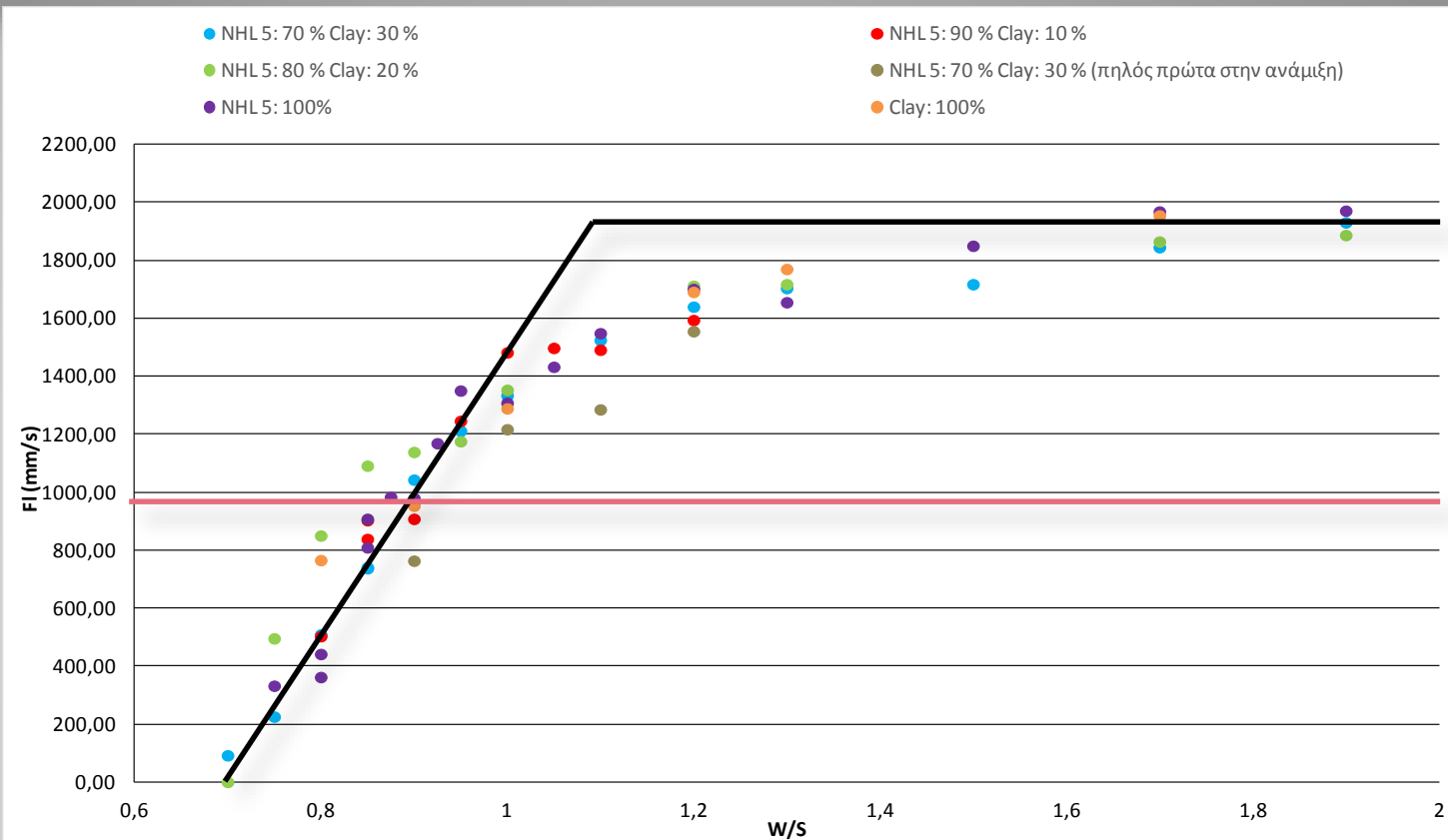
W/S ~ 1 → Εξίδρωση Πηλού < NHL 5
 W/S > 1 → Εξίδρωση Πηλού > NHL 5



Φύση πηλού → δέσμευση νερού μέχρι ενός σημείου κορεσμού → αποβολή του μετά από αυτό



Ενέματα-Αποτελέσματα Ρευστότητας

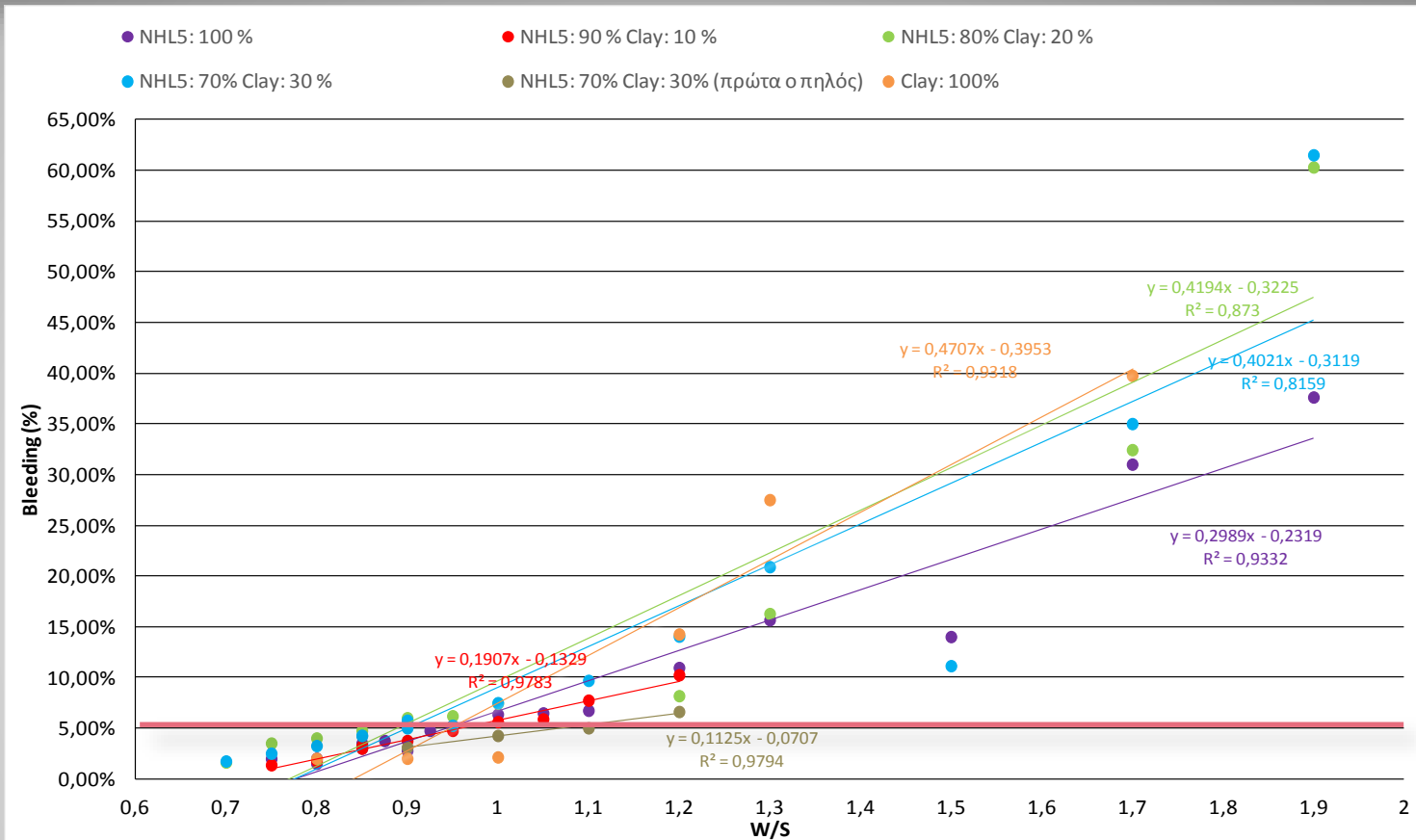


✓ 69 δοκιμές ρευστότητας

✓ Μέση καμπύλη F_1 - W/S λόγω παρόμοιας ρεολογικής συμπεριφοράς NHL 5-Πηλού και λόγω κοινής κοκκομετρικής διαβάθμισης, τρόπου & σειράς ανάμιξης:

- $(W/S)_{o,f} = 0,7$
- $(W/S)_{u,f} = 1,05-1,10$
- $F_{1,max} = 1970\text{mm/s}$

Ενέματα-Αποτελέσματα Σταθερότητας



- 69 δοκιμές σταθερότητας
 - Γραμμική προσέγγιση
- Μεγάλη διασπορά $W/S \geq 1 \rightarrow$ φύση πηλού \rightarrow σημείο κορεσμού \rightarrow μεγάλη διασπορά τιμών εξίδρωσης
 - Αποδεκτός λόγος $W/S \leq 0,975$

Ενέματα- Συντήρηση Ενεμάτων

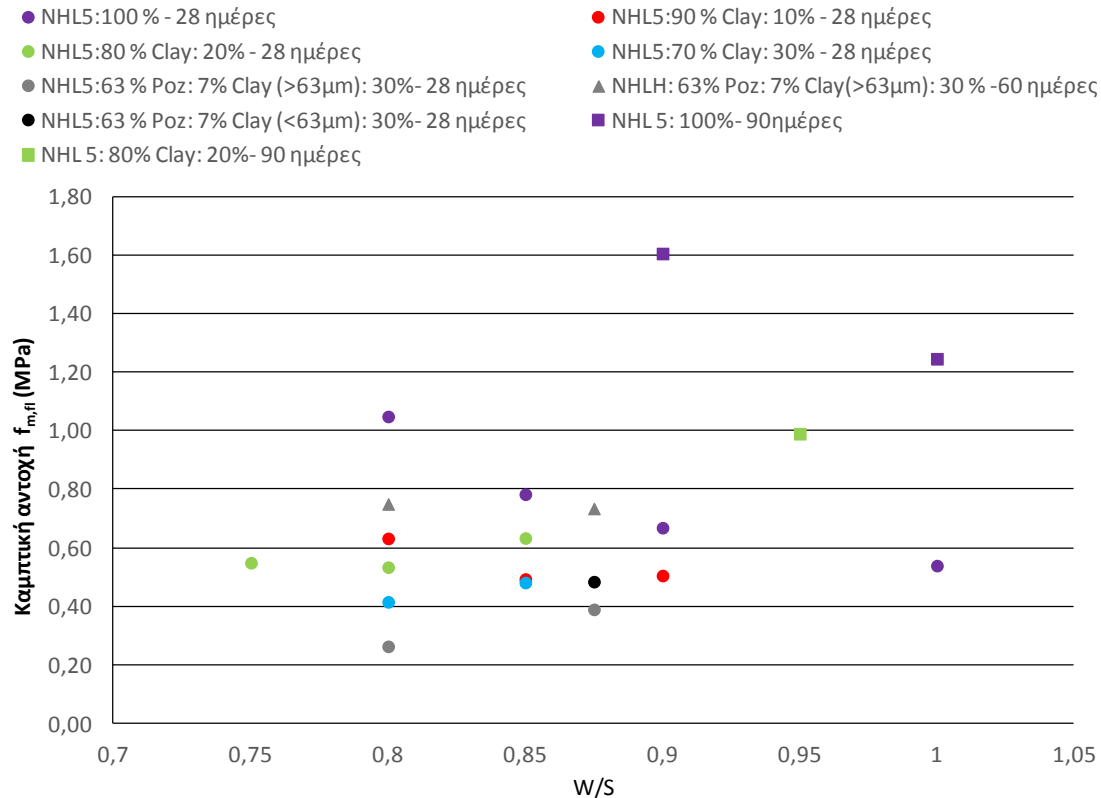
- Συντήρηση δοκιμίων
- σε μήτρες $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ EN1015-11:1999
- Θερμοκρασία $20 \pm 5^\circ\text{C}$ & υψηλή υγρασία
- Τρόποι συντήρησης:
 1. 14 ημέρες σε λινάτσες & στην συνέχεια σε υψηλή υγρασία
 2. 14 ημέρες σε υγρό θάλαμο συντήρησης & στην συνέχεια σε σταθερές συνθήκες ($20 \pm 5^\circ\text{C}$ RH= $30 \pm 5\%$)
 3. 28 ημέρες σε υγρό θάλαμο & στην συνέχεια σε υψηλή υγρασία



Δυσμενή αποτελέσματα →
ενέματα στο εσωτερικό
της τοιχοποιίας δεν έρχονται
σε επαφή με αέρα → όχι τόσο
εκτεταμένη ενανθράκωση



Ενέματα-Καμπτική αντοχή



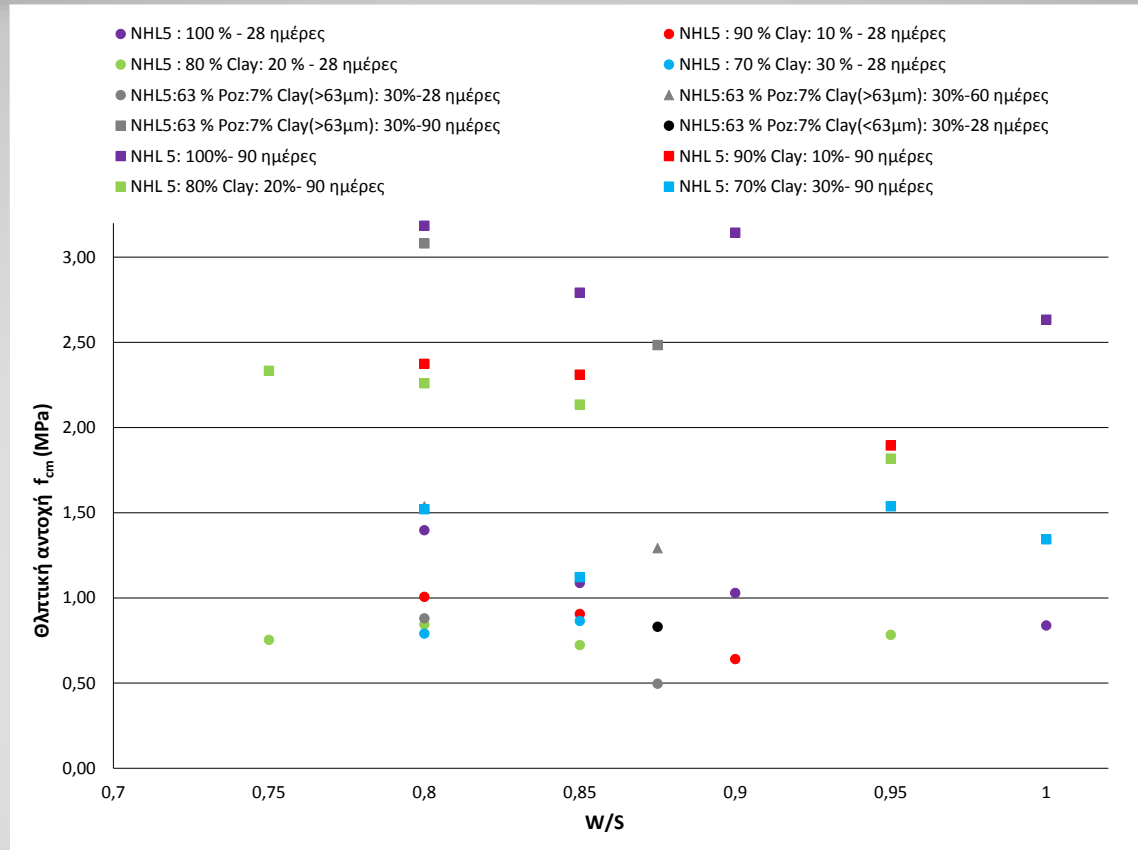
✓ 27 δοκιμές κάμψης

✓ Αύξηση W/S → Μείωση αντοχής

✓ NHL 5: 63%-Clay: 30%-Pozzolan: 7% στις 60 ημέρες ωρίμανσης προσεγγίζει την NHL 5 → ποζολανική αντίδραση

✓ Συμβατότητα μικρών αντοχών με μικρή αντοχή τοιχοποιίας και κονιάματος

Ενέματα-Θλιπτική αντοχή



✓ 121 δοκιμές θλίψης

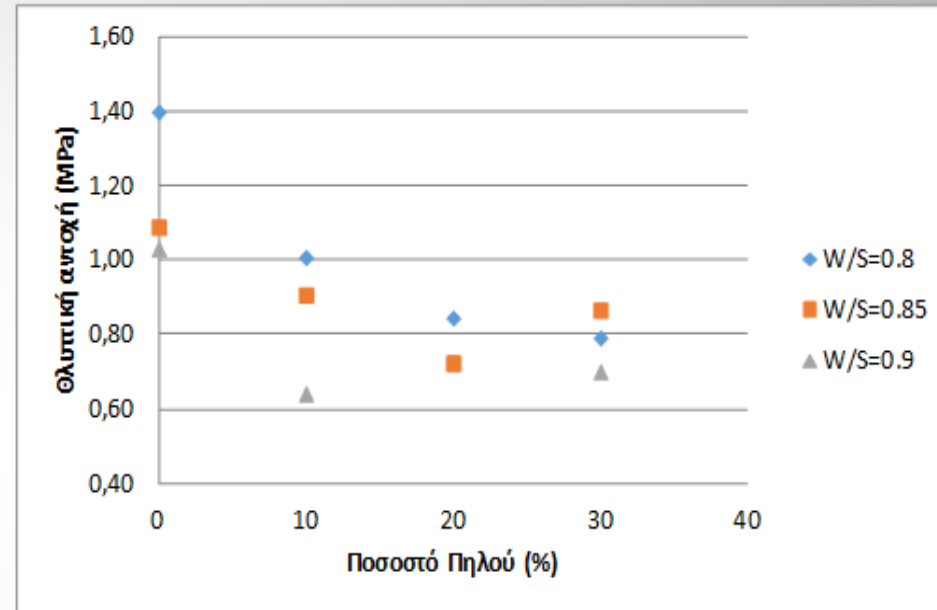
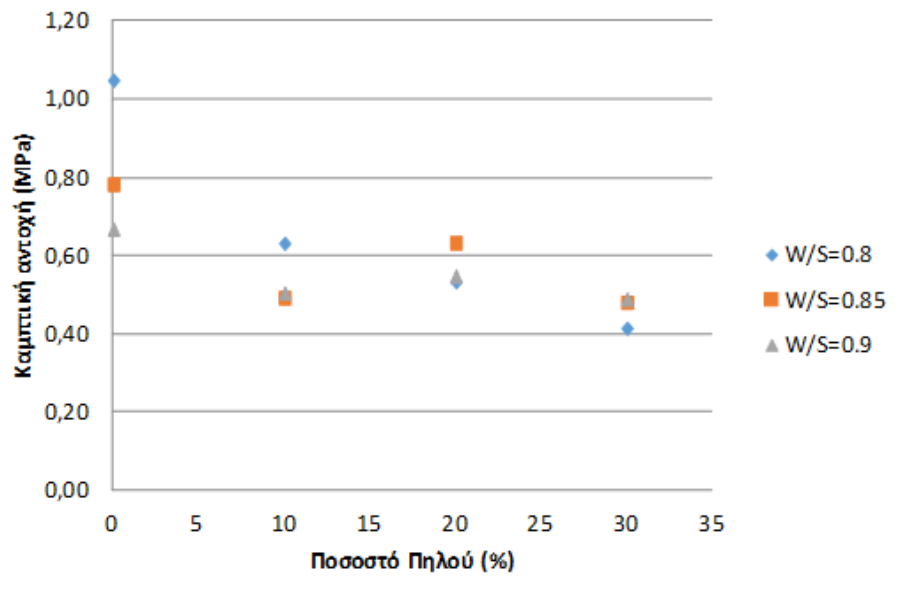
✓ Αύξηση W/S → Μείωση αντοχής περίπου γραμμικά

✓ Αύξηση εν χρόνω για όλες τις συνθέσεις → ενυδάτωση, ποζολανική αντίδραση

✓ NHL 5: 63%-Clay: 30%-Pozzolan: 7% στις 90 ημέρες ωρίμανσης:

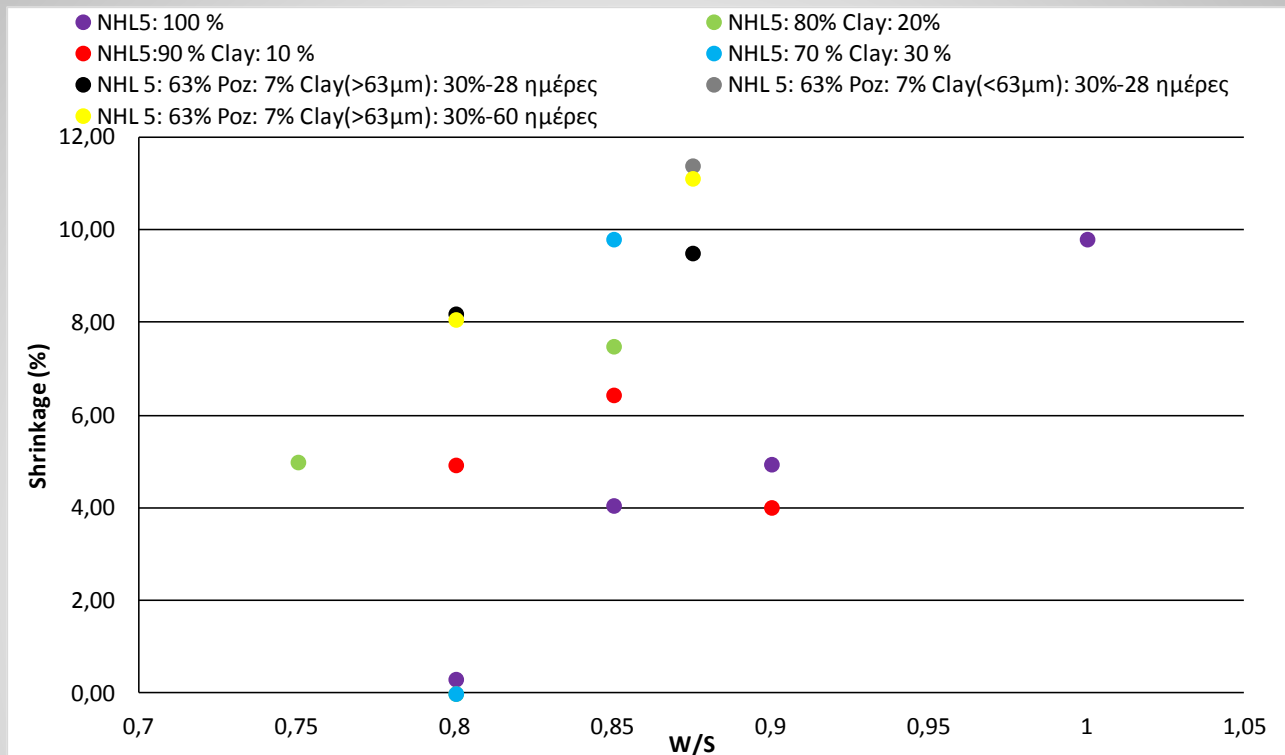
- προσεγγίζει την NHL 5: 100% → 3,15MPa (3,25% διαφορά)
- τριπλάσια αντοχή της NHL 5: 70%-Clay: 30% (+290%)

Ενέματα-Επίδραση Πηλού στην Αντοχή

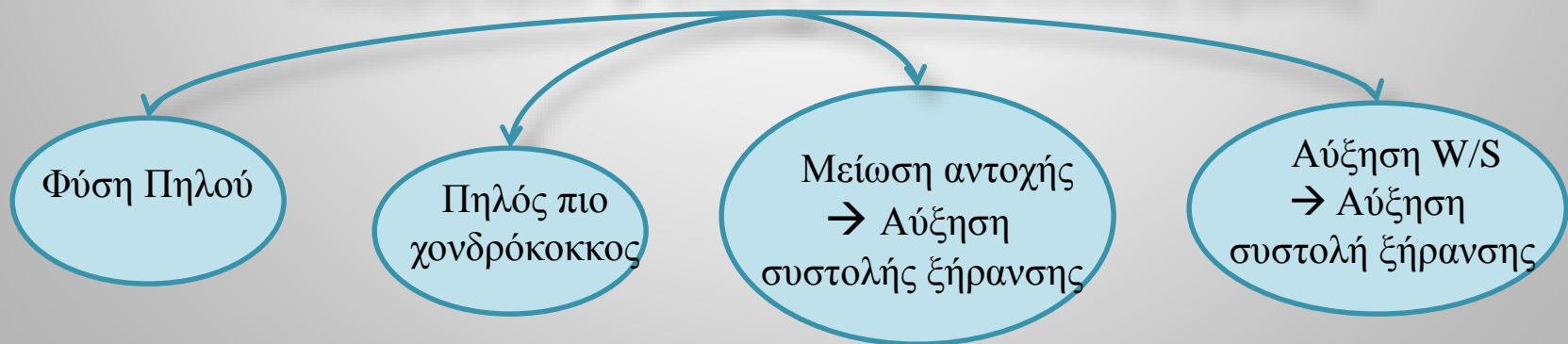


- ✓ Αύξηση ποσοστού πηλού → Γραμμική μείωση αντοχής
- ✓ Αύξηση W/S → αύξηση πάχους του φιλμ μέχρι ενός σημείου κορεσμού → Αύξηση ηλεκτροστατικών απωστικών δυνάμεων → λιγότερο συνεκτική δομή

Ενέματα-Συστολή Ξήρανσης



✓ Αύξηση πηλού → αύξηση ποσοστού συστολής ξήρανσης



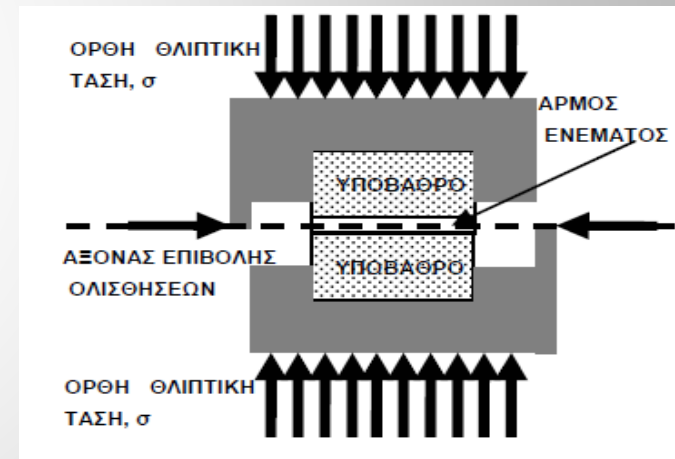
Ενέματα-Δοκιμή Διεπιφανειών

- Δοκιμή άμεσης διάτμησης
- Διάταξη: Διατμητικό κιβώτιο
- Δοκιμή: Επιβαλλόμενη ολίσθηση περί το μέσον του ύψους του δοκιμίου με ταυτόχρονη ορθή θλιπτική τάση & μέτρηση τ & s
- Αστοχία δοκιμίων στην Δ.Ζ (Διεπιφανειακή Ζώνη) ➔ ισχυρό υπόβαθρο & ασθενές ένεμα
- Υπόβαθρο ➔ ασβεστόλιθος $f_{bc} = 70\text{MPa}$
- Συνθέσεις ενεμάτων:

NHL 5: 100% W/S= 0,90

NHL 5: 70% Clay: 30% W/S= 0,90

NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7% W/S= 0,875



Ενέματα-Αποτελέσματα Διεπιφανειών

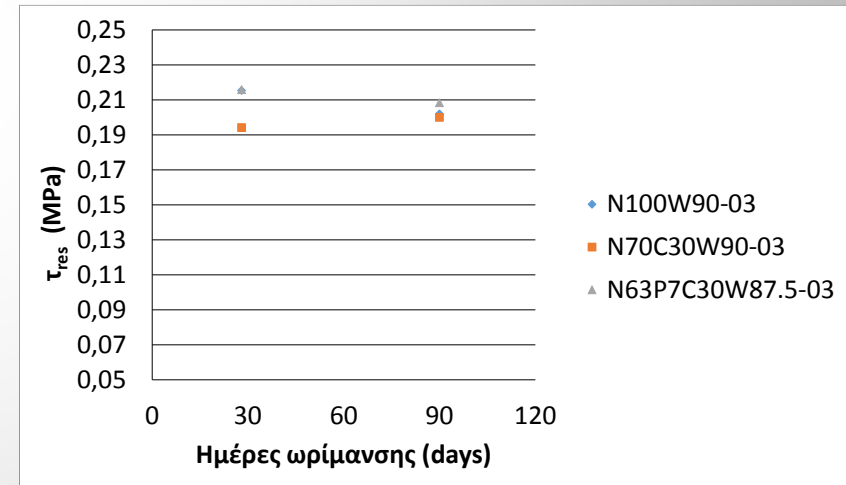
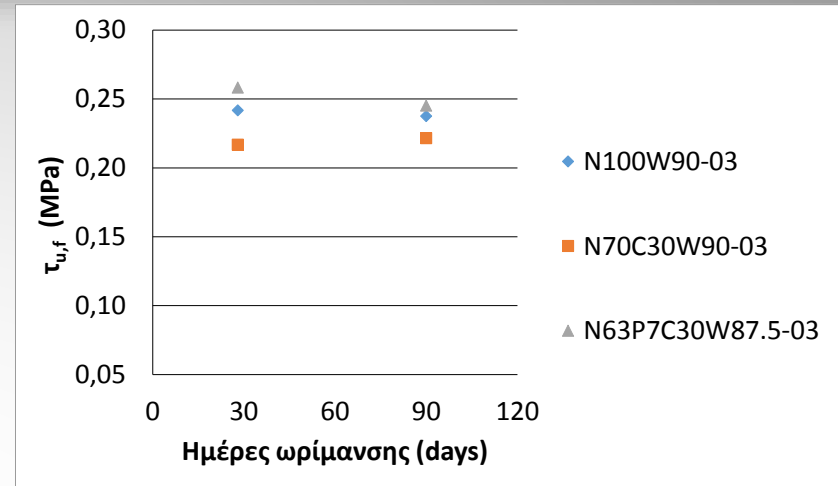
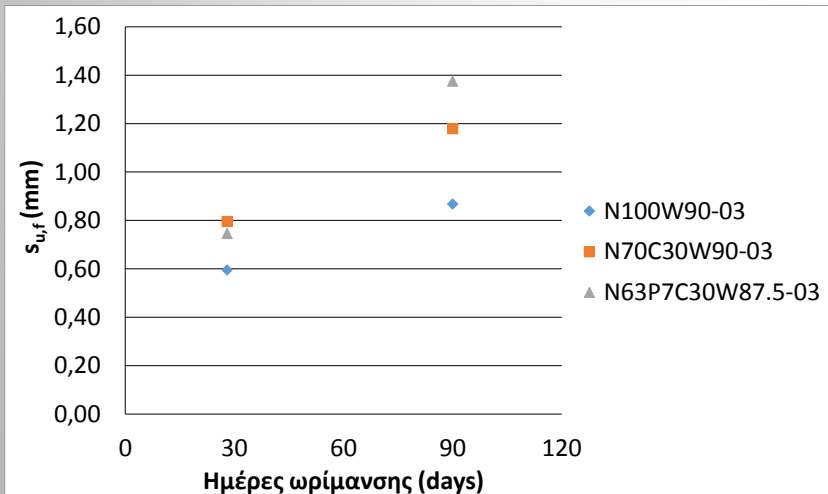
➤ Με την αύξηση της σ_n (0,3MPa)

• Σταθερή η $\tau_{u,f}$ (0,22MPa)

• Αύξηση η $s_{u,f}$ (1,14mm)
(αυξάνεται η πλαστιμότητα)

• Σταθερή η τ_{res} (0,19MPa)
(κοντινές τιμές με $\tau_{u,f}$)

90 ημέρες
ωρίμανσης



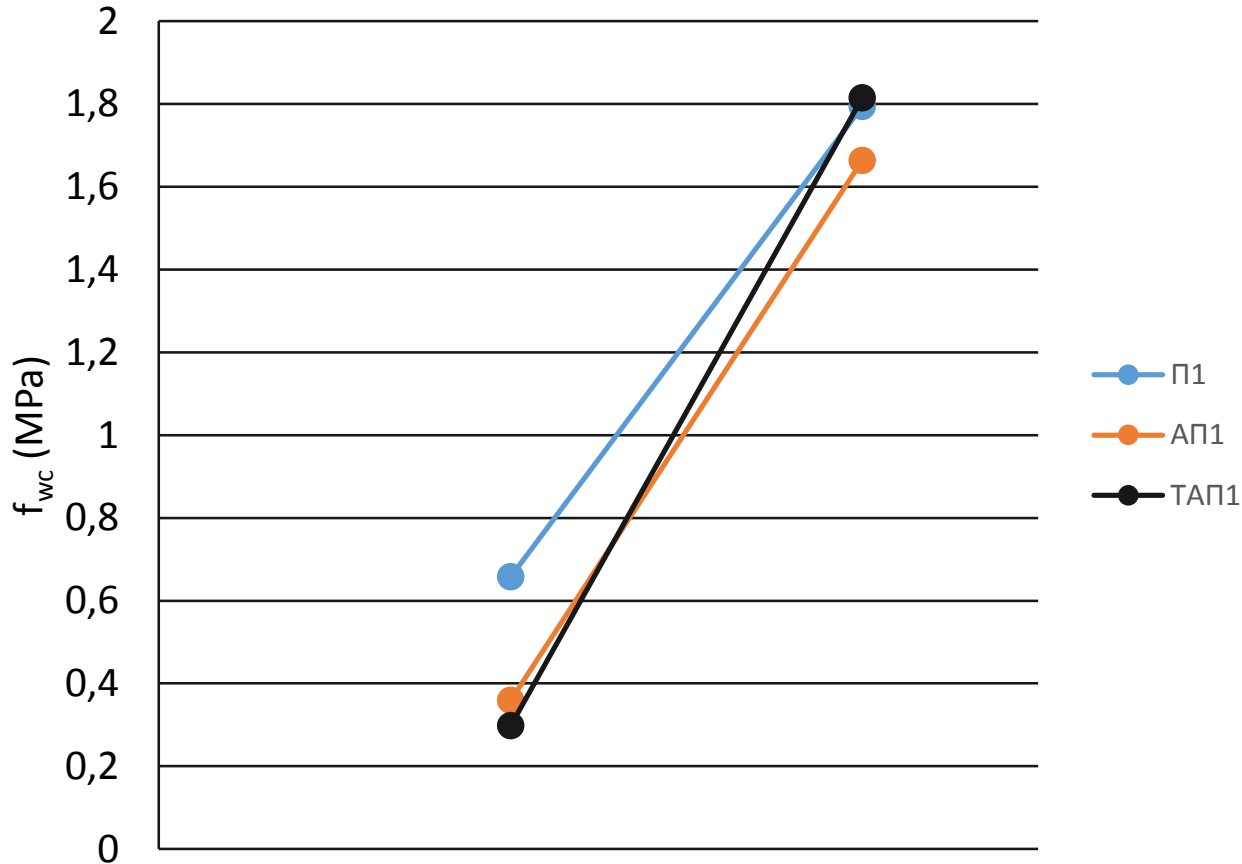


ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

ΕΝΕΜΑΤΑ

ΤΟΙΧΙΣΚΟΙ

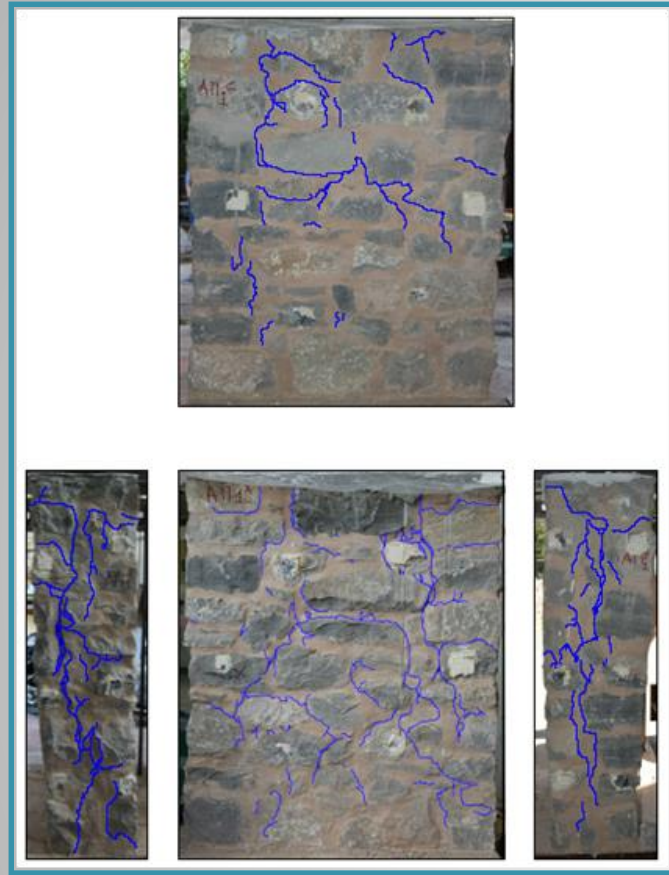
Τοιχίσκοι-Θλιπτική Αντοχή (Πριν & Μετά τα Ενεμάτα)



- ✓ Σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής μετά την εφαρμογή των ενεμάτων (2~5 φορές)
- ✓ Μειώθηκε η διασπορά των αντοχών μετά την εφαρμογή των ενεμάτων

Τοιχίσκοι-Παθολογία (Πριν τα Ενέματα)

Π1- Δίστρωτος με πηλοκονίαμα



ΤΑΠ1- Τρίστρωτος με πηλοασβεστοκονίαμα



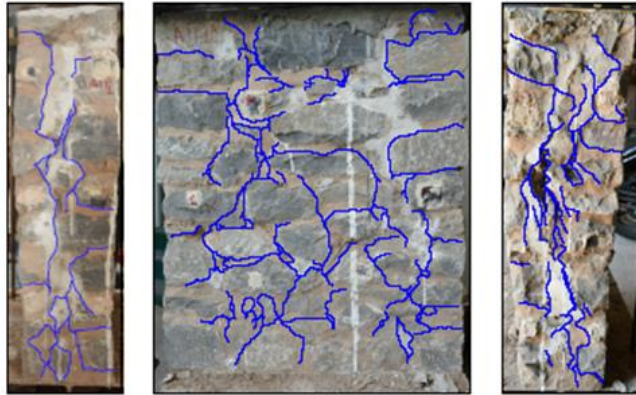
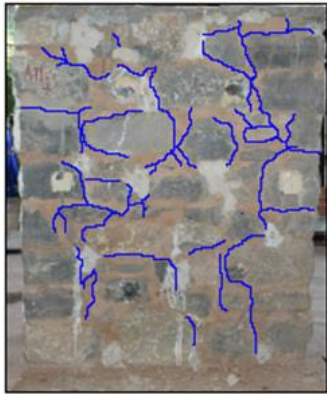
✓ Πριν την επιβολή φορτίου: Τριχοειδείς ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης

✓ Μετά την επιβολή φορτίου: Κατακόρυφες ρωγμές στις όψεις, ανάμεσα στις επιμέρους στρώσεις & στην ενδιάμεση στρώση της τρίστρωτης

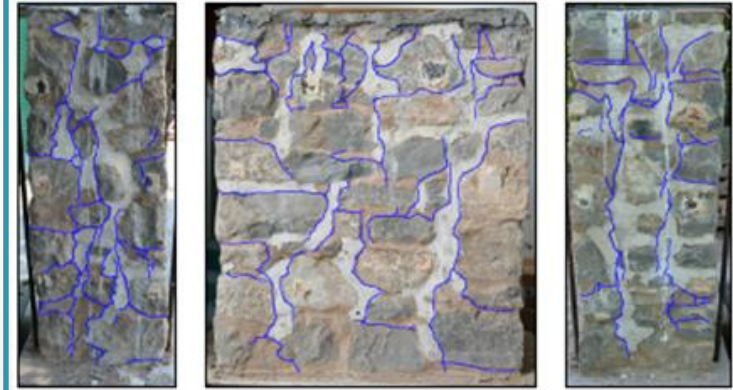
✓ Περιμετρική αποκόλληση κονιάματος από λίθους

Τοιχίσκοι-Παθολογία (Μετά τα Ενέματα)

Π1- Δίστρωτος με πηλοκονίαμα



ΤΑΠ1- Τρίστρωτος με πηλοασβεστοκονίαμα



✓ Κατακόρυφες ρωγμές στις όψεις, ανάμεσα στις επιμέρους στρώσεις & στο “γέμισμα” της τρίστρωτης → σε νέες θέσεις & στις παλιές → καθυστέρηση διάνοιξής τους

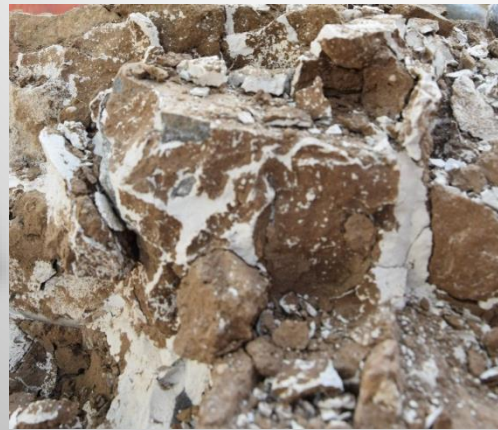
✓ Βελτιώθηκε η συνάφεια μεταξύ λίθων και κονιάματος

✓ Λιγότερες τριχοειδείς ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης

Τοιχίσκοι–Οπτικές Παρατηρήσεις κατά την Αποδόμηση

Τοιχίσκος Π1-Δίστρωτος με Πηλοκονίαμα

- Πληρώθηκαν ρωγμές 2,5-7mm
- Πληρώθηκαν εν μέρει ρωγμές 0,84-1,25mm
- Συνεχές δίκτυο ενέματος
- Πλήρωση διεπιφανειών λίθων-κονιάματος
- Επιφανειακή κάλυψη πόρων πηλοκονιάματος



Τοιχίσκοι-Οπτικές Παρατηρήσεις κατά την Αποδόμηση

Τοιχίσκος ΑΠ1- Δίστρωτος με Πηλοασβεστοκονίαμα

- Μεγάλη συγκέντρωση ενέματος στο κέντρο
- Μικρότερες ρωγμές από ότι στον Π1
- Πληρώθηκαν εξ' ολοκλήρου ρωγμές >2,20mm
- Πληρώθηκαν εν μέρει 1-2,20mm
- Πλήρωση διεπιφανειών λίθων-κονιάματος (<1mm)
- Όχι ξεκάθαρο δίκτυο ρωγμών



Τοιχίσκοι-Οπτικές Παρατηρήσεις κατά την Αποδόμηση

Τοιχίσκος ΤΑΠ1- Τρίστρωτος με Πηλοασβεστοκονίαμα

- Μεγάλα κενά και ρωγμές σε σχέση με δίστρωτη
- Πληρώθηκαν ρωγμές 0,77-1,58mm
- Πληρώθηκαν εν μέρει ρωγμές 0,84-1,25mm
- Συνεχές δίκτυο ενέματος
- Πλήρωση διεπιφανειών λίθων-κονιάματος (0,80-0,96mm)



Τοιχίσκοι-Ποσότητα Ενέματος

- Ανεξάρτητα από τον τύπο ενέματος και τον τρόπο δόμησης → 21-25% V_w
- Οι τοιχίσκοι με πηλοκονίαμα απαιτούν 3-8% περισσότερη ποσότητα ενέματος ανεξάρτητα από τον τρόπο δόμησης
- Για του τρίστρωτους: ως προς τον όγκο του “γεμίσματος” → 67-75% V_{inf}

→ Το πηλοκονίαμα έχει μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης από ότι το πηλοασβεστοκονίαμα, γι' αυτό και καταναλώθηκε μεγαλύτερη ποσότητα ενέματος



Συμπεράσματα

- ✓ Επιβεβαίωση της καταλληλότητας των ενεμάτων για ενίσχυση σε ιστορικές αργολιθοδομές με πηλοκονίαμα. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μείωση της διασποράς της
- ✓ Το υλικό του κονιάματος καθορίζει σημαντικά την συμπεριφορά της λιθοδομής καθώς και της ποσότητας του ενέματος που καταναλώνει εν τέλει
- ✓ Αποδείχθηκε ότι η χρήση του πηλού στις συνθέσεις των ενεμάτων σε συνδυασμό με την χρήση ποζολάνης μπορεί να είναι ανταγωνιστική με την σύνθεση αναφοράς (μηχανικά & ρεολογικά)
- ✓ Αναπτυσσόμενη συνάφεια στις 90 ημέρες (για $\sigma_n=0.30\text{MPa}$) πρακτικώς η ίδια για όλες τις συνθέσεις . Πιο «αδύναμες» συνθέσεις ανταγωνιστικές λόγω της πλαστιμότητάς τους
- ✓ Μέσα από οπτικές παρατηρήσεις επιβεβαιώθηκε η διεισδυτική ικανότητα των ενεμάτων

Προτάσεις για Έρευνα

- Χρήση διαφορετικών τύπων πηλού & ασβέστου για παρασκευή κονιαμάτων, ενεμάτων & τοιχίσκων
- Επιβεβαίωση συμπερασμάτων διεισδυτικότητας ενεμάτων με δοκιμή στήλης άμμου
- Δοκιμή ύγρανσης- ξήρανσης & ψύξης-απόψυξης
- Δοκιμή περισσότερων δοκιμίων διεπιφανειών & διαφορετικών συνθέσεων & υποβάθρων
- Κατασκευή επιπλέον τοιχίσκων & κυλίνδρων, δοκιμής & ενεμάτωσης αυτών

ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΠΟΛΥ!!

