

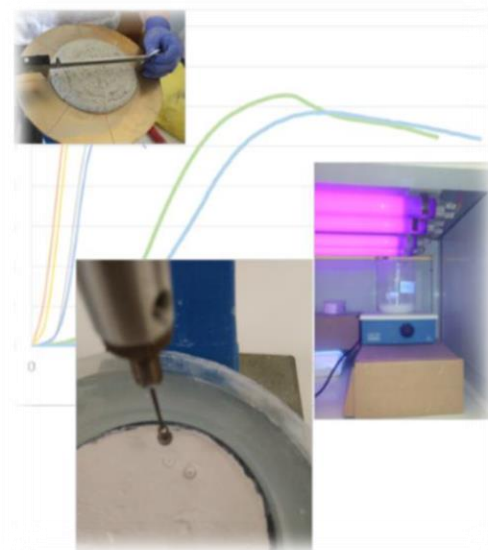
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών



ΠΜΣ: Ειδίκευση στην ολοκληρωμένη προστασία Ιστορικού
Δομημένου Περιβάλλοντος με Προηγμένες Τεχνολογίες και Υλικά

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Υδραυλικά κονιάματα με νανο-τιτανία, μια καινοτόμα
λύση στις αποκαταστάσεις μνημείων και μνημειακών
κατασκευών*



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΚΑΠΕΤΑΝΑΚΗ ΚΑΛΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΠΑΓΩΝΑ ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗ

ΧΑΝΙΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπό την

Καπετανάκη Καλή
Πολιτικός Μηχανικός

***Υδραυλικά κονιάματα με νανο-τιτανία, μια καινοτόμα λύση στις
αποκαταστάσεις μνημείων και μνημειακών κατασκευών***

ΠΑΓΩΝΑ (ΝΟΝΗ) ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗ (επιβλέπουσα)

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΜΑΡΙΑ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ

Επίκουρη Καθηγήτρια

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ

Καθηγητής

Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης

Η μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών
Πολιτισμικής Κληρονομιάς και Σύγχρονης Δόμησης

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική έλαβε χώρα στο εργαστήριο Υλικών Πολιτισμικής Κληρονομιάς και Σύγχρονης Δόμησης υπό την επίβλεψη της Αναπληρώτριας καθηγήτριας Παγώνας Μαραβελάκη. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου για την απεριόριστη βοήθεια, υποστήριξη και υπομονή που έδειξε μαζί μου καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησής της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη μεταδιδακτορική ερευνήτρια Χρυσή Καπριδάκη για την μεγάλη υποστήριξη που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερος το κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη και τον καθηγητή κ. Γιώργο Εξαδάκτυλο από το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων για την μεγάλη βοήθεια στο σπάσιμο των δοκιμίων, τον καθηγητή κ. Νίκο Καλλίθρακα, την κα. Ελένη Χαμηλάκη και τον καθηγητή κ. Νίκο Πασαδάκη από το Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπογείων Ταμιευτήρων για την προσφορά του μηχανήματος FTIR, τον κ. Αντώνη Στρατάκη και τον καθηγητή κ. Γιώργο Αλεβίζο από το Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας για τις αναλύσεις XRD και τον κ. Γιάννη Καντηλιεράκη για τη βοήθειά του στο στήσιμο της συσκευής Vicat.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, την Επίκουρη καθηγήτρια κα. Μαρία Σταυρουλάκη και τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
-----------------	----------

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

A. Αποκατάσταση ιστορικών κατασκευών	4
B. Κονιάματα ιστορικών κατασκευών	5
Γ. Συμβατότητα υλικών αποκατάστασης- χρήση τσιμέντου	5
Δ. Νανοτεχνολογία και προηγούμενη εμπειρία εργαστηρίου	6

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Υλικά

3.1.1 Κονίες	11
3.1.1.1 Υδράσβεστος	11
3.1.1.2 Φυσική υδραυλική άσβεστος	13
3.1.1.3 Ποζολανικές κονίες	14
3.1.2 Αδρανή	16
3.1.3 Νανο- τιτανία	20

3.2 Τεχνικές δοκιμών και αναλύσεων

3.2.1 Φυσικοχημικές αναλύσεις	21
3.2.1.1 DTA	21
3.2.1.2 FTIR	24
3.2.1.3 XRD	26
3.2.1.4 Τριχοειδής αναρρίχηση	28
3.2.1.5 Δοκιμή Vicat	29
3.2.2 Μηχανικές δοκιμές	
3.2.2.1 Μονοαξονική θλίψη	31
3.2.2.2 Κάμψη τριών σημείων	34
3.2.2.3 Μέτρηση υπερήχων	35

3.4 Συνθέσεις και αναλογίες συστατικών

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1: Φυσικοχημικά αποτελέσματα

4.1.1	<u>Πάστες με υδράσβεστο- μετακαολίνη</u>	
4.1.1.1	DTA	40
4.1.1.2	FTIR	43
4.1.1.3	XRD	45
4.1.1.4	Δοκιμή Vicat	47
4.1.2	<u>Πάστες με υδραυλική άσβεστο</u>	
4.1.2.1	DTA	48
4.1.2.2	FTIR	50
4.1.2.3	XRD	53
4.1.2.4	Δοκιμή Vicat	54

4.2: Μηχανικά αποτελέσματα

4.2.1	<u>Κονιάματα με υδράσβεστο- μετακαολίνη</u>	
4.2.1.1	Μονοαξονική θλίψη	55
4.2.1.2	Κάμψη τριών σημείων	63
4.2.1.3	Μέτρηση υπερήχων	67
4.2.2	<u>Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο</u>	
4.2.2.1	Μονοαξονική θλίψη	69
4.2.2.2	Κάμψη τριών σημείων	76
4.2.2.3	Μέτρηση υπερήχων	80

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	83
------------------------	-----------

ΑΝΑΦΟΡΕΣ	85
-----------------	-----------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	i
------------------	----------

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σημαντικό κομμάτι της έρευνας για την αποκατάσταση και επανάχρηση των μνημείων και των μνημειακών κατασκευών αποτελεί η μελέτη των ιστορικών υλικών και η σύνθεση νέων, που εξασφαλίζουν την ακεραιότητα του μνημείου τόσο δομικά τόσο και ιστορικά. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η σύνθεση υδραυλικών κονιαμάτων με την προσθήκη νανο-τιτανίας σε ποσοστό 6% ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της τελευταίας στον μηχανισμό πήξης των κονιαμάτων, στην πορεία της ενανθράκωσης και της ποζολανικής αντίδρασης. Η αξιολόγηση των παραπάνω διεργασιών από την πρώτη μέρα ωρίμανσης μέχρι και τον ενάμιση χρόνο έγινε με τις εξής τεχνικές και αναλύσεις: θερμοσταθμική ανάλυση (DTA-TG), φασματοσκοπία υπέρυθρου (FTIR) και ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτινών Χ (XRD). Επιπλέον μέσω της δοκιμής Vicat προσδιορίστηκε ο χρόνος πήξης και μέσω των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, κάμψης τριών σημείων και μέτρησης υπερήχων υπολογίστηκαν η θλιπτική ανοχή, η αντοχή σε κάμψη στις 28 μέρες, τους 3 και 6 μήνες και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα.

Οι συνθέσεις αποτελούνται από πάστες (κονία με νερό) και κονιάματα οι οποίες χωρίζονται σε 2 ομάδες, η πρώτη που έχει ως κονία υδράσβεστο με προσθήκη μετακαολίνη (ML) σε αναλογία 60/40 και η δεύτερη με φυσική υδραυλική άσβεστο (NHL). Στα κονιάματα προσθέτουμε αδρανή, ασβεστιτική (νταμαρίσια) ή πυριτική (ποταμίσια) άμμο με λόγο κονίας προς αδρανή 1/1 κατά βάρος. Για λόγους σύγκρισης δημιουργούμε τρεις διαφορετικές συνθέσεις ως προς την νανο-τιτανία: 1) χωρίς nT, 2) με nT και 3) με nT που έχει εκτεθεί σε ακτινοβολία UV. Ζητούμενο είναι να αποδειχθεί ότι η προσθήκη νανο-τιτανίας με την φωτοκαταλυτική της δράση επιταχύνει την πήξη των κονιαμάτων, χωρίς όμως να του στερεί τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι συνθέσεις με υδράσβεστο και μετακαολίνη δείχνουν βελτιωμένη συμπεριφορά στα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους με την προσθήκη ενεργοποιημένης νανο-τιτανίας. Τα κονιάματα με υδραυλική άσβεστο και νανο-τιτανία συμπεριφέρονται ικανοποιητικά με την πάροδο έξι μηνών ωρίμανσης. Επίσης τα κονιάματα με υδράσβεστο και μετακαολίνη παρουσιάζουν υπερδιπλάσιες αντοχές και μεγαλύτερη πλαστιμότητα από τα κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, επιβεβαιώνοντας τη θετική συνεισφορά που έχει η προσθήκη ποζολάνης στην υδράσβεστο. Γενικά αποδεικνύεται ότι η προσθήκη νανο-τιτανίας σε ποσοστό 6% κ.β της κονίας, εκτός από τις δεδομένες ιδιότητες αυτοκαθαρισμού, αποδίδει κονιάματα με εξαιρετικές αντοχές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Α. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η συντήρηση και η αποκατάσταση των μνημείων, αποτελεί έναν επιστημονικό κλάδο ο οποίος πρέπει να αποτείνεται στη συνεργασία όλων των επιστημών και όλων των τεχνών που μπορούν να συνεισφέρουν στη μελέτη και τη διάσωση της μνημειακής κληρονομιάς. Η διαδικασία της αποκαταστάσεως είναι μια επέμβαση υψηλής εξειδίκευσης που επιβάλλεται να γίνεται κατ' εξαίρεση. Έχει σαν στόχο να διατηρήσει και να αποκαλύψει τις ιστορικές και αισθητικές αξίες του μνημείου και βασίζεται στον σεβασμό προς την αρχική του υπόσταση και τα αυθεντικά του στοιχεία. Σταματάει στο σημείο που αρχίζουν να υπάρχουν υποθέσεις. Πέρα από αυτό το σημείο, οποιαδήποτε εργασία που ενδεχομένως θα θεωρηθεί απαραίτητη για τεχνικούς ή αισθητικούς λόγους, θα πρέπει να διαχωρίζεται από την αρχική αρχιτεκτονική σύνθεση και να φέρνει την σφραγίδα της εποχής μας. Σε όλες τις περιπτώσεις η αρχαιολογική μελέτη θα προηγείται της αποκατάστασης και θα την ακολουθεί. [1]. Η πλειονότητα των ιστορικών κατασκευών αποτελείται από φέρουσα τοιχοποιία, βασικά υλικά της οποίας είναι το λιθόσωμα και το **συνδετικό κονίαμα**. Οι γνώσεις μας για τη μηχανική της συμπεριφορά και την απόκριση κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία είναι σχετικά περιορισμένες. Τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάγκης συντήρησης και ανάδειξης της πολιτιστικής κληρονομιάς αναζωπυρώθηκε και η έρευνα της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας και των στοιχείων που την αποτελούν καθώς και νέων καινοτόμων λύσεων για την ενίσχυση των κατασκευών. Αδυναμία σε αυτή την προσπάθεια αποτελεί η έλλειψη νομικού- τεχνικού πλαισίου το οποίο να καθορίζει τις απαιτήσεις στα υλικά και τον τρόπο επέμβασης. Σε κάθε περίπτωση η πρακτική που πρέπει να ακολουθείται είναι:

1. Διερεύνηση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ιστορικών υλικών
2. Μελέτη τρόπου δόμησης και της απόκρισης της κατασκευής
3. Προσδιορισμός της χρήσης του μνημείου μετά την αποκατάσταση
4. Επιλογή της μεθόδου ενίσχυσης και μελέτη της απόκρισης αυτής, καθώς και τη δυνατότητα αναστρεψιμότητας της
5. Επιλογή των συμβατών υλικών
6. Σωστή εφαρμογή της μελέτης
7. Παρακολούθηση των εφαρμογών για τυχόν αστοχίες
8. Συντήρηση των εφαρμογών

B. ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Τα ιστορικά κονιάματα, λόγω της ποιότητας των πρώτων υλών, των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους και της τεχνολογίας παραγωγής τους είναι συμβατά με τις ιστορικές δομές. Αποτελεί ολόκληρο τομέα έρευνας η κατασκευή κονιαμάτων που αφενός πρέπει να είναι συμβατά αλλά και αφετέρου να διαθέτουν ιδιότητες που ανταποκρίνονται στην επισκευή- ενίσχυση και υποστήριξη της νέας εκάστοτε χρήσης των ιστορικών κατασκευών. Έχει αποδειχτεί ότι τσιμεντιτικά κονιάματα από τη μία προσφέρουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά από την άλλη είναι ασύμβατα από φυσικοχημική και μηχανική άποψη με τα ιστορικά υλικά, προκαλώντας διάφορες βλάβες. Από την άλλη ασβεστοκονιάματα με προσθήκη ποζολανικών κονιών (φυσικών και τεχνητών) έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν για την κατασκευή ιστορικών και παραδοσιακών κτιρίων. Με τη χρήση υψηλής δραστηριότητας ποζολανών στα ασβεστοκονιάματα, έχουμε κονιάματα με ιδιότητες παρόμοιες με των αντίστοιχων ιστορικών υλικών αλλά και κονιάματα με μια προηγμένη ανθεκτικότητα σε δύσκολες κλιματικές συνθήκες και υγρασία και με υψηλές τιμές μηχανικής αντοχής. [2,3]

Γ. ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ- ΧΡΗΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η συμβατότητα των υλικών έγκειται τόσο σε φυσικομηχανικά και χημικά χαρακτηριστικά των υλικών, όσο και στη μικροδομή και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας ως σύνολο. Στοιχεία που μελετάμε για την ανάλυση των ιστορικών υλικών είναι το πορώδες, η κατανομή των πόρων, υδαταπορρόφηση, κοκκοδιαβάθμιση, χημικά, ορυκτολογικά χαρακτηριστικά, μέτρο ελαστικότητας, αντοχές κ.α.

Η χρήση τσιμέντου

Τα προηγούμενα χρόνια η χρήση τσιμεντοκονιαμάτων στη συντήρηση και αποκατάσταση των μνημείων ήταν πολύ διαδεδομένη. Ωστόσο, τόσο η περεταίρω μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων όσο και η εμφάνιση νέων προβλημάτων στις υπό συντήρηση ή αποκατάσταση κατασκευές, οδήγησαν στο συμπέρασμα για την πλήρη ασυμβατότητα του τσιμέντου με τα ιστορικά υλικά, ακόμη και αν αυτό είναι σε χαμηλή περιεκτικότητα στα κονιάματα.

Η ασυμβατότητα του τσιμέντου έγκειται στα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Εσωτερική δομή: Το πορώδες των ιστορικών κονιαμάτων κυμαίνεται από 20 έως 40%. Τα χαμηλότερα πορώδη παρουσιάζουν τα κονιάματα με υδραυλική άσβεστο και τα υψηλότερα τα ασβεστοιτικά. Αντίστοιχα, τα δομικά υλικά των μνημείων έχουν πορώδες από 30 έως 35%. Αντίθετα, τα τσιμεντοκονιάματα

έχουν πολύ μικρότερο πορώδες, της τάξεως του 5- 10%. Επίσης, η κατανομή της ακτίνας των πόρων στα ιστορικά κονιάματα και δομικά υλικά κυμαίνεται μεταξύ 0,8- 3 μm , ενώ στα τσιμεντοκονιάματα παρατηρείται ότι τα 2/3 των πόρων έχουν ακτίνα πόρων μικρότερη από 0,1 μm . Αυτές οι διαφοροποιήσεις καθιστούν δύσκολη τη «αναπνοή» της τοιχοποιίας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση υγρασίας.

- Μηχανικές ιδιότητες: Τα τσιμεντοκονιάματα παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, με αποτέλεσμα να είναι δυνατά και εύκαμπτα σε σχέση με τα ιστορικά υλικά. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει αστοχία στα δομικά υλικά (λίθους), δηλαδή ανεπιθύμητη αστοχία και επικίνδυνη για τη στατικότητα της κατασκευής.
- Συντελεστής θερμικής διαστολής: Αυτός ο συντελεστής για τα τσιμεντοκονιάματα είναι διπλάσιος σχεδόν σε σχέση με τα ιστορικά δομικά υλικά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων σε αλλαγές θερμοκρασίας και άρα ρηγμάτωση.
- Φορέας διαλυτών αλάτων: ο προσανατολισμός των διαλυτών αλάτων στα γειτονικά ιστορικά υλικά και η κρυστάλλωση τους κατά την φάση της εξάτμισης δημιουργεί άσκηση πιέσεων λόγω κρυστάλλωσης. Τέλος, τα τσιμεντοκονιάματα αποτελούν μηχανισμό φθοράς στο περιβάλλον με την παραγωγή ετρίγκιτη και θωμασίτη με αποτέλεσμα την άσκηση μηχανικών πιέσεων. [4]

Δ. ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η νανοτεχνολογία είναι μια νέα προσέγγιση για την κατανόηση και την άρτια γνώση των ιδιοτήτων της ύλης σε νανοκλίμακα: ένα νανόμετρο (ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου) είναι το μήκος ενός μικρού μορίου. Στο επίπεδο αυτό αποκαλύπτονται διαφορετικές και συχνά καταπληκτικές ιδιότητες της ύλης και είναι δυσδιάκριτα τα όρια μεταξύ των καθιερωμένων επιστημών και τεχνικών κλάδων. Ως εκ τούτου, ο χαρακτήρας της νανοτεχνολογίας είναι άκρως διεπιστημονικός.

Η νανοτεχνολογία έχει μεγάλη ποικιλία εφαρμογών και προσδίδει μια εναλλακτική πορεία στην εξέλιξη των συμβατικών επιστημών. Η νανοτεχνολογία χρησιμοποιείται ήδη στον τομέα της ιατρικής, της φαρμακευτικής, των ηλεκτρονικών, των βιο-υλικών και στην παραγωγή ενέργειας. Επίσης εφαρμογές της νανοτεχνολογίας εμφανίζονται στην επιστήμη των υλικών με ευρείας κλίμακας απήχηση, η οποία αναμένεται να επηρεάσει ουσιαστικά όλους τους τομείς. Νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται ήδη για την ισχυροποίηση υλικών και για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των καλλυντικών. Με τη βοήθεια της νανοτεχνολογίας μπορούν να τροποποιούνται διάφορες επιφάνειες έτσι ώστε να μην χαράσσονται, να γίνονται αδιάβροχες, καθαρές ή αποστειρωμένες. Η επιλεκτική μεταμόσχευση οργανικών μορίων μέσω νανοδομημένων επιφανειών

αναμένεται ότι θα επηρεάσει την παραγωγή βιοαισθητήρων και μοριακών ηλεκτρονικών συσκευών. Οι επιδόσεις των υλικών σε ακραίες συνθήκες μπορούν να βελτιωθούν σε σημαντικό βαθμό προς όφελος π.χ. της βιομηχανίας αεροναυτικής και διαστήματος. Η αρχαία ελληνική ιστορία έχει χαρακτηριστικά παραδείγματα επιστημόνων (Δημόκριτος 440 π.Χ. και Λεύκιππος) που σκέφτηκαν ότι η ύλη μπορούσε να διασπαστεί ως ένα ακατάλυτο σημείο, δηλαδή ως το βασικό συστατικό της ύλης, που σήμερα οι επιστήμονες ονομάζουν «άτομο». Τελικά το 1803 ο John Dalton στην ομιλία του για την Ατομική Θεωρία ανέφερε την ύπαρξη του ατόμου η οποία βασιζόταν σε παρατηρήσεις πάνω από 100 χρόνων και τελικά αποδείχθηκε το 1908 από τον Γάλλο φυσικό Jean Perrin. Ο Joseph Proust το 1799 και οι James Watson και Francis Crick το 1953 βοήθησαν με ανακαλύψεις να συγκεντρωθούν πληροφορίες σχετικές με τη διαδικασία της κατανόησης της νανοτεχνολογίας, ενώ η πρώτη επιστημονική αναφορά πραγματοποιήθηκε σε μια ομιλία που έκανε ο Νομπελίστας φυσικός Richard Feynman, το 1959, με τίτλο «Υπάρχει Πολύς Χώρος στον Πάτο». Ο πρώτος ορισμός για νανοτεχνολογία δόθηκε από τον καθηγητή του Πανεπιστημίου Επιστημών του Τόκιο Norio Taniguchi το 1974 σε μία διατριβή του με τίτλο «Σχετικά με τη βασική έννοια της 'Νανοτεχνολογίας'», ο οποίος με ελάχιστες προσθήκες διατηρείται και σήμερα και ο οποίος είναι: Η «Νανοτεχνολογία» είναι η τεχνολογία παραγωγής με σκοπό την υπέρτατη ακρίβεια και τις υπέρ άριστες διαστάσεις, για παράδειγμα η ακρίβεια και η αρτιότητα στην κλίμακα 1 nm (νανόμετρο), 10^{-9} μέτρα μήκους.

Στην επεξεργασία των υλικών, το μικρότερο μόριο απομάκρυνσης αποθέματος, επισώρευσης ή ροής υλικών είναι πιθανώς ενός ατόμου ή ενός μορίου δηλαδή 0.1~0.2 nm σε μήκος. Επομένως, το αναμενόμενο όριο μεγέθους αρτιότητας θα είναι της κλίμακας του 1 nm. Κατά συνέπεια η «Νανοτεχνολογία» κυρίως έγκειται στην επεξεργασία διαχωρισμού, εδραίωσης και παραμόρφωσης υλικών από ένα άτομο ή ένα μόριο. Περιπτώ να λεχθεί ότι οι τεχνικές μέτρησης και ελέγχου της ακρίβειας και της αρτιότητας 1 nm παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο σ' αυτή την τεχνολογία. Ο Eric Drexler είναι γνωστός σαν αυτός που έφερε την επανάσταση της νανοτεχνολογίας, στο σημείο που βρίσκεται σήμερα καθώς αναφέρθηκε το 1986 στο βιβλίο του «Μηχανές Δημιουργίας: Η επερχόμενη Εποχή της Νανοτεχνολογίας» στην μοριακή νανοτεχνολογία. Έγραψε πολλά βιβλία και κείμενα με αναφορές στην νανοτεχνολογία, αύξησε την αναγνώριση του κόσμου σχετικά με την έρευνα, εκπάιδευσε αυτούς που στο μέλλον θα ερευνούσαν και θα ανέπτυσσαν τη νανοτεχνολογία, φώτισε τον τομέα αυτό και του προσφέρθηκε το πρώτο διδακτορικό στη νανοτεχνολογία.

Η πρώτη ίσως νανοκατασκευή πραγματοποιήθηκε το 1990, όταν ο ερευνητής της IBM Don Eigler τοποθέτησε 35 άτομα Xe πάνω σε υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού Ni, δημιουργώντας το λογότυπο της IBM (εικόνα 2.7). Λίγο αργότερα το 1999, ερευνητές του Πανεπιστημίου Cornell έφτιαξαν μια

νανοκιθάρα, οι χορδές της οποίας μπορούσαν να παιχτούν μόνο με δέσμες laser, παράγοντας εξαιρετικά υψίσυχο ήχο, συχνότητας προφανώς μη αντιληπτής από το ανθρώπινο αυτί [5].

Λόγω του απειροελάχιστου μεγέθους τους, τα νανοσωματίδια εκφράζουν μοναδικές ιδιότητες σε σχέση με τα μόρια, που αλλάζουν πολλά απ' όσα ξέραμε και δίνουν επαναστατικές λύσεις σε άλυτα ως τώρα προβλήματα. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος που όλες οι αναπτυσσόμενες χώρες χρηματοδοτούν αδρά την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας και τη θέτουν ως στρατηγική προτεραιότητά τους (όπως οι ΗΠΑ, η Ιαπωνία και η ΕΕ), επενδύοντας δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια. Ειδικά η Ευρώπη αφιέρωσε κατά την περίοδο 2002-2006 1,3 δισ. € για έρευνα και ανάπτυξη στη νανοτεχνολογία, ενώ τα κεφάλαια που κατευθύνονται προς αυτήν αυξάνονται διαρκώς. Οργανισμοί, ινστιτούτα, φορείς, μεγάλες επιχειρήσεις, αλλά κυρίως χιλιάδες μικρομεσαίες και πολύ μικρές επιχειρήσεις σ' όλο τον κόσμο δραστηριοποιούνται πλέον στον κλάδο, εστιάζοντας στην ανάπτυξη κάποιας συγκεκριμένης συσκευής ή εφαρμογής.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι το διοξείδιο του πυριτίου και του τιτανίου, τα οξειδία του αργιλίου, του σιδήρου και του ψευδαργύρου καθώς και υδροξειδίου του ασβεστίου. Η κατασκευή των νανοσωματιδίων μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους: με λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων, με άλεση με σφαιρίδια σιδήρου, με συμπύκνωση αερίου, με εκτομή με laser, με θερμική αποσύνθεση, με αποσύνθεση με υπερήχους, με χαμηλή πίεση (πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας), με αυτοσυναρμολόγηση, με την τεχνική διαλύματος-πηκτής (sol-gel) και άλλους. Η σημαντικότερη τεχνική είναι το sol-gel και περιλαμβάνει την μετάβαση του συστήματος από υγρό (κολλοειδές διάλυμα) σε στερεό (πήκτωμα). Έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία και χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παραγωγή SiO_2 από διάλυμα τετραμεθοξυσιλανίου, νερού και μεθανόλης με προσθήκη καταλύτη.

Τα σημαντικότερα από τα νανοσωματίδια που χρησιμοποιούνται στα κονιάματα είναι τα νάνο-οξειδία, με συχνότερη την χρησιμοποίηση του SiO_2 και του Fe_2O_3 καθώς και του $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Με την προσθήκη των δύο πρώτων νάνο-οξειδίων, αυξάνεται η αντοχή σε θλίψη των κονιαμάτων, βελτιώνεται η εργασιμότητα των κονιαμάτων ενώ αυξάνεται και η τριβή αντίστασης σε οδοστρώματα. Με την προσθήκη νάνο--οξειδίων έχει αποδειχθεί ότι γεμίζουν οι πόροι ενώ μειώνεται η περιεκτικότητα του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ με ταυτόχρονη ενυδάτωση των προϊόντων [6].

Προηγούμενη εμπειρία του εργαστηρίου

Το Εργαστήριο Υλικών Πολιτιστικής Κληρονομιάς & Σύγχρονης Δόμησης της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο οποίο έλαβε χώρα η παρούσα διπλωματική ασχολείται με τον τομέα των προηγμένων νανο-

σύνθετων υλικών που εφαρμόζονται απευθείας πάνω σε υπό συντήρηση επιφάνειες, όσο και με υβριδικά δομικά υλικά νανοτεχνολογίας. Στα πλαίσια των ερευνητικών έργων, το εργαστήριο έχει αναλάβει την εκπόνηση και τον συντονισμό πολλών Εθνικών ερευνητικών προγραμμάτων, όπως το ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ II, ΠΕΠ Κρήτης, το ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2009, συνεργασία με την Επιτροπή Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως (ΕΣΜΑ), συνεργασία με τις Εφορείες Αρχαιοτήτων, Οργανισμούς, εταιρείες και φορείς Πολιτιστικής Κληρονομιάς, καθώς και συμμετοχή στην βασική ερευνητική ομάδα σε πρόγραμμα «ΘΑΛΗΣ», σχετικό με την πολιτιστική κληρονομιά. Το Εργαστήριο τιμήθηκε με το **Πρώτο βραβείο** για την ερευνητική πρόταση «Οικολογικά νανο-υλικά για την προστασία σύγχρονων και παραδοσιακών κτιρίων από τη φθορά» στον 2ο Διαγωνισμό Εφαρμοσμένης Έρευνας και Καινοτομίας, που διοργανώθηκε από το Μεσογειακό Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων (ΜΑΙΧ), στο πλαίσιο του έργου «Ενθάρρυνση και Υποστήριξη των Ακαδημαϊκών και Ερευνητικών Ιδρυμάτων για Έρευνα και Ανάπτυξη (Ε&Α) στη Βιομηχανία – R&D INDUSTRY», το οποίο συγχρηματοδοτείται από το πρόγραμμα Εδαφικής Συνεργασίας MED 2007-2013 και εθνικούς πόρους.

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η σύνθεση υδραυλικών κονιαμάτων με την προσθήκη νανο-τιτανίας ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της τελευταίας στον μηχανισμό πήξης των κονιαμάτων. Οι συνθέσεις που μελετήθηκαν αποτελούν συνέχεια και εξέλιξη προηγούμενων συνθέσεων που είχαν σχεδιαστεί σε έρευνες για τη συγκόλληση πώρινων θραυσμάτων ακτίτη λίθου από τον αρχαϊκό ναό της Ακρόπολης. Με την παρούσα έρευνα μελετάται αναλυτικά στις παραπάνω συνθέσεις η πορεία της ενανθράκωσης και της ποζολανικής αντίδρασης καθώς και ο χρόνος πήξης και οι μηχανικές τους αντοχές. Ζητούμενο είναι να αποδειχθεί ότι η προσθήκη νανο-τιτανίας με την φωτοκαταλυτική της δράση επιταχύνει την πήξη των κονιαμάτων, χωρίς όμως να του στερεί τις μηχανικές τους ιδιότητες.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Υλικά

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται οι πρώτες ύλες που επιλέχθηκαν για τη σύνθεση των κονιαμάτων και των παστών. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι εξής κατηγορίες: α) Κονίες, β) Αδρανή και γ) Νάνο- τιτανία

3.1.1 Κονίες:

Κονίες είναι τα υλικά τα οποία όταν αναμιχθούν και υποστούν κατεργασία υπό ορισμένες αναλογίες με ένα ρευστό μέσο (συνήθως νερό) μεταβάλλονται σε εύπλαστο πολτό με συγκολλητικές ιδιότητες. Ο πολτός αυτός, αποτελεί μετά την πήξη και σκλήρυνση το συνδετικό υλικό των κονιαμάτων, τα οποία περιέχουν πέρα από την κονία, το νερό και αδρανές υλικό (συνήθως άμμο). [7]

Ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσής τους τις διακρίνουμε σε:

- Αερικές, οι οποίες πήζουν και σκληραίνουν στον ατμοσφαιρικό αέρα αποδίδοντας νερό και συντηρούνται σε περιβάλλον με χαμηλή υγρασία, καθώς είναι ευδιάλυτες στο νερό (άργιλος, υδράσβεστος, πηλός)
- Υδραυλικές, οι οποίες μετά την σκλήρυνση τους συντηρούνται με νερό και είναι αδιάλυτες σε αυτό (τσιμέντο, υδραυλική άσβεστος, ποζολανικές κονίες). [7,8]

3.1.1.1 Υδράσβεστος

Άσβεστος ονομάζεται το οξείδιο του ασβεστίου, CaO (χρώματος λευκού), το οποίο προέρχεται από τη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου στους $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου με απαιτήσεις θερμότητας της τάξης των 880 Wh/kg CaO .



Το ανθρακικό ασβέστιο είναι το κύριο συστατικό των ασβεστόλιθων, οι οποίοι περιέχουν και ξένες προσμίξεις, όπως π.χ. MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Η όπτηση του ασβεστόλιθου γίνεται στις ασβεστοκάμινους. Η απώλεια του CO_2 στην παραπάνω αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μεγάλου δικτύου τριχοειδών πόρων, το οποίο δημιουργεί πορώδες μέχρι και 55% και καθιστά τη μάζα σπογγώδη [9].

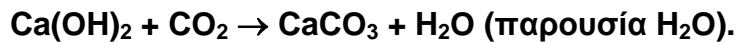
Η άσβεστος έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το νερό και λόγω του μεγάλου πορώδους μπορεί να προσλαμβάνει νερό με έκλυση μεγάλης ποσότητας θερμότητας (320 Wh/kg CaO) κατά την αντίδραση:



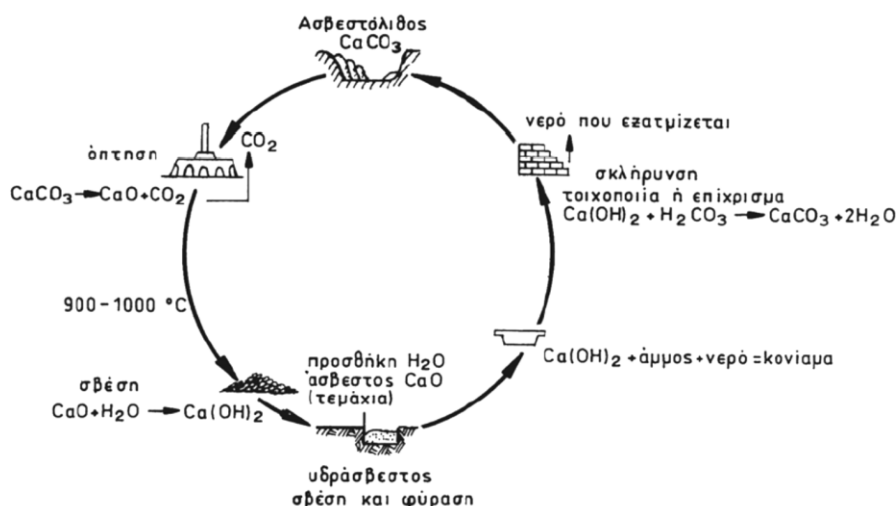
Το αποτέλεσμα της αντίδρασης ονομάζεται *υδράσβεστος*. Η αντίδραση της ενυδάτωσης ονομάζεται σβέση και η ταχύτητα της σβέσης προσδιορίζει τη δραστικότητα της ασβέστου. Η θερμοκρασία πύρωσης είναι καθοριστική για την τελική δομή της ασβέστου και κατά συνέπεια για την ταχύτητα της σβέσης. Για θερμοκρασίες πύρωσης 800-900 °C, 900-1050 °C και >1050 °C το πορώδες της ασβέστου είναι 45-55%, 35-45% και <35%, αντίστοιχα, ενώ η παραγόμενη άσβεστος χαρακτηρίζεται ταχείας, ημιταχείας και βραδείας σβέσης, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι με την αύξηση της ταχύτητας σβέσης μειώνονται οι διαστάσεις των ένυδρων τεμαχιδίων της υδρασβέστου και άρα βελτιώνεται η ποιότητά της, δηλαδή αυξάνεται η πλαστικότητα, που επιτρέπει την εύκολη και σωστή κατεργασία των ασβεστοκονιαμάτων.

Ο ασβεστοπολτός αποτελείται από λεπτότατα σωματίδια που δεν υπερβαίνουν τα 2 μm. Κατά την ξήρανσή τους τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν δυνάμεις συνάφειας και αναπτύσσουν σημαντική αντοχή.

Η σκλήρυνση της υδρασβέστου επιτυγχάνεται με ενανθράκωση του Ca(OH)_2 κατά την αντίδραση:



Εξαιτίας της μικρής περιεκτικότητας του ατμοσφαιρικού αέρα σε CO_2 , η παραπάνω αντίδραση προχωρεί πολύ αργά, με αποτέλεσμα να διαρκεί αρκετούς μήνες. Οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται κατά την ενανθράκωση του Ca(OH)_2 διαλύονται στο νερό (δηλαδή στην υγρασία) και κρυσταλλώνονται εκ νέου. Οι νέοι αυτοί κρύσταλλοι εμπλέκονται και συσσωματώνονται μεταξύ τους, δίνοντας στα κονιάματα της ασβέστου μεγαλύτερη αντοχή. Σημαντικά πλεονεκτήματα της αερικής κόνιας της ασβέστου αποτελούν η υψηλή πλαστικότητα, η υψηλή πρόσφυση και η μεγάλη ογκοσταθερότητα. [7]



Σχήμα 3.1: Ο κύκλος της ασβέστου. [8]

3.1.1.2 Φυσική υδραυλική άσβεστος

Η ενυδατωμένη υδραυλική άσβεστος συνίσταται από πυριτικά άλατα του ασβεστίου και του αργιλίου καθώς και υδροξείδιο του ασβεστίου. Ανάλογα με την προέλευση όπως υδραυλικής ασβέστου συναντάμε τις τεχνητές και τις φυσικές υδραυλικές άσβεστους.

Η φυσική υδραυλική άσβεστος προέρχεται από έψηση ειδικών μαργαϊκών ασβεστόλιθων που περιέχουν 5-20% άργιλο. Η έψηση γίνεται σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές του τσιμέντου και συγκεκριμένα από 900-1300° C. Η άσβεστος αυτή έχει υδραυλικές ιδιότητες που οφείλονται στις ενώσεις του ασβεστίου με το πυρίτιο, το αργίλιο και τον σίδηρο που αποτελούν τους υδραυλικούς παράγοντες της κονιάς. [7] Μειονεκτεί όμως σημαντικά λόγω του μεγάλου ποσοστού του ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου (CaO) που περισεύει. Για τον λόγο αυτόν συνήθως χρησιμοποιείται στα διάφορα κονιάματα σε συνδυασμό με ποζολάνες ώστε να δεσμεύεται το ελεύθερο CaO με το ενεργό SiO₂ που αυτές έχουν.

Η πήξη της υδραυλικής ασβέστου οφείλεται κυρίως στους υδραυλικούς συντελεστές της κονιάς. Όμως στην πήξη και τη σκλήρυνση συμβάλλει και η μικρή ποσότητα CaO που σχηματίζεται κατά την όπτηση, το οποίο αφού ενυδατωθεί και μετατραπεί σε υδράσβεστο, Ca(OH)₂, αντιδρά με το CO₂ της ατμόσφαιρας και οδηγεί στο σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃) και στη στερεοποίησή του, δηλαδή στη λίθωση της υδρασβέστου.

Τα κονιάματα με υδραυλική άσβεστο έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα κονιάματα της αερικής ασβέστου, υστερούν όμως ως προς τις αντοχές των τσιμεντοκονιαμάτων, επειδή περιέχουν σημαντικό ποσοστό ελεύθερης ασβέστου, όπως προαναφέρθηκε. [7,8]

3.1.1.3 Ποζολανικές κονίες

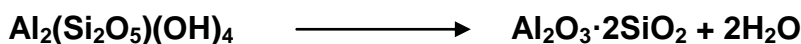
Οι ποζολάνες είναι λεπτότερες κονίες πυριτικής σύστασης (SiO_2) με οξείδια του αργιλίου, του σιδήρου, του ασβεστίου σε μικρότερη αναλογία και ανήκουν στις υδραυλικές κονίες. Διακρίνονται σε φυσικές και τεχνητές ανάλογα με την προέλευσή τους.

- Φυσικές ποζολάνες: Θηραϊκή γη, Μηλαϊκή γη, η ιταλική pozzolana (από την οποία πήρε το όνομά της η κατηγορία κονιών), κ.ά
- Τεχνητές ποζολάνες: ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, μετακαολίνης. [10]

Ενώ χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρή υδραυλικότητα, οι ποζολάνες ενυδατώνονται όπως και τα τσιμέντα όταν αναμιχθούν με κάποιο φυσικό διεγέρτη (π.χ. άσβεστος, γύψος, τσιμέντο). Κατά την ενυδάτωσή τους, που ονομάζεται ποζολανική αντίδραση, αντιδρούν χημικά (με αργό σχετικά ρυθμό) με το υδροξείδιο του ασβεστίου σχηματίζοντας παρόμοια προϊόντα με αυτά της ενυδάτωσης του τσιμέντου (ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις).

Μετακαολίνης

Ο μετακαολίνης (Metakaolin, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ή AS_2) είναι ένα τεχνητό ποζολανικό συστατικό το οποίο προστίθεται σε κονιάματα και προσδίδει σημαντικές ιδιότητες. Αποτελεί μία υπέρλεπτη κονία η οποία προέρχεται από τη θερμική επεξεργασία του καολινίτη σε θερμοκρασίες μεταξύ 450 και 900° C. [11,12]



Η αφυδάτωση του καολίνη σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (φτάνουν έως και τους 900° C) αποβάλλει το χημικά δεσμευμένο νερό (OH) και μετασχηματίζεται στον μετακαολίνη [8]. Με την θερμική διεργασία καταρρέει η κρυσταλλική δομή των αργιλικών συστατικών και σχηματίζεται μια άμορφη φάση αργιλοπυριτικών, ο μετακαολίνης.

Οι συχνότερες προσμίξεις στον καολίνη είναι ο μοσχοβίτης [$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$] και ο άστριος (KAlSi_3O_8), οι οποίοι μειώνουν την απόδοση του μετασχηματισμού του σε μετακαολίνη.

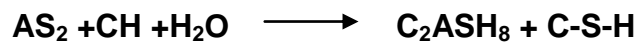
Ακόμη και φτωχής ποιότητας καολινίτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή δραστικού μετακαολίνη. Η θερμική κατεργασία στους 650° C για 3 ώρες είναι αποτελεσματική για τους καολίνες με χαμηλή περιεκτικότητα αλουνίτη. Σε αυτές τις συνθήκες ο παραγόμενος μετακαολίνης εμφανίζει την υψηλότερη

ποζολανική αντίδραση. Στην περίπτωση καολίνη με υψηλή περιεκτικότητα σε αλουμίτη, απαιτείται θερμική κατεργασία στους 850° C για 3 ώρες προκειμένου να αφαιρεθεί το ανεπιθύμητο SO₃. [13]



Εικόνα 3.1: Μετακαολίνης [18]

Ο μετακαολίνης (AS₂) ως ποζολάνη, αντιδρά με το Ca(OH)₂ παρουσία νερού και παράγονται ενυδατωμένες ενώσεις του ασβεστίου, του αργιλίου και του πυριτίου σύμφωνα με την γενική μορφή της αντίδρασης:



Η δραστηριότητα του μετακαολίνης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η ορυκτολογική σύσταση και η κρυσταλλικότητα του καολίνης, η κοκκομετρία (μέσο μέγεθος κόκκων 5 μm). Η ποζολανικότητα εξαρτάται από τις συνθήκες της θερμικής διεργασίας του καολίνης. Έχει διαπιστωθεί ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η αντίδραση μεταξύ μετακαολίνης-ασβέστη και νερού πραγματοποιείται από συγκεκριμένα κέντρα της επιφάνειας του μετακαολίνης, ενώ σε θερμοκρασία γύρω στους 100° C αυξάνεται η απόδοση της αντίδρασης. [14]

Πίνακας 3.1: Ποζολανική δραστηριότητα υλικών- δοκιμή Chapelle [15]

ΥΛΙΚΟ	ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (mg Ca(OH) ₂ ανά g υλικού
Silica fume	430
Σκωρία	300
Ιπτάμενη τέφρα	875
Μετακαολίνης	1000

Χρήση μετακαολίνη

Η χρήση μετακαολίνη τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω του κόστους, το οποίο οφείλεται στην εξαγωγή, την ασβεστοποίηση, την ξήρανση και την μεταφορά του υλικού, ιδιαιτέρως συγκριτικά με την ιπτάμενη τέφρα [16].

Εφαρμογές που βρίσκει χρήση η παρουσία μετακαολινών, είναι οι εξής:

- σκυρόδεμα υψηλών αποδόσεων, υψηλών αντοχών και χαμηλού βάρους
- σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες υάλου
- προϊόντα από σιδηρο-τσιμέντο και τσιμέντο ινών
- στόκος και ασβεστοκονίαμα
- προκατασκευασμένο και χυμένο σε εκμαγείο σκυροδέματος
- πάγκοι εργασίας και γλυπτά [15]

3.1.2 Αδρανή υλικά

Αδρανή είναι τα διαβαθμισμένα, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης, υλικά που χρησιμοποιούνται είτε με συγκολλητικό μέσο για παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κά, είτε αυτούσια ως έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηρίων, φίλτρων διηθήσεως ή καθαρισμού, βράχοι θωράκισης, κλπ), σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα. Τα αδρανή δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, παρά μόνο φυσική συνοχή λόγω της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους. [20]



Εικόνα 3.2: Αδρανή διαφορετικής σύστασης και κοκκομετρίας

Εθεωρείτο ότι κατά την ανάμιξή τους με τις κονίες και το νερό, τα υλικά αυτά δεν συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης, γι' αυτό και αποκαλούνται αδρανή υλικά.[20] Ωστόσο, αυτό δεν ανταποκρίνεται εντελώς στην πραγματικότητα, καθώς αφενός η χημική αδράνεια των υλικών αυτών εξαρτάται από την ορυκτολογική τους σύσταση και τα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή

και αφετέρου όπως θα δειχτεί και στην παρούσα έρευνα διαφορετικής σύστασης αδρανή διαφοροποιούν σε ένα βαθμό τις ιδιότητες των κονιαμάτων.

Οι κυριότερες κατηγορίες πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για αδρανή είναι τα μαγματικά, τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα. Τα συνηθέστερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αδρανών υλικών στην Ελλάδα είναι τα ασβεστολιθικά για τους παρακάτω λόγους: 1) ικανοποιούν τις μηχανικές αντοχές των συνήθων κατασκευών, 2) έχουν μικρό κόστος θραύσης, 3) συναντώνται στα περισσότερα μέρη του Ελλαδικού χώρου.

Κατηγορίες αδρανών

Ανάλογα με την προέλευση των αδρανών, τα διακρίνουμε σε:

- Φυσικής προέλευσης: Πρόκειται για αδρανή που προέρχονται από τη θραύση πετρωμάτων σε λατομεία (θραυστά αδρανή ή αδρανή λατομείων) ή ακόμα και απευθείας από τη φύση, από ποτάμια, ακτές (φερτά και συλλεκτά αδρανή ή φυσικά αδρανή).
- Τεχνητά ή βιομηχανικά: Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η σκωρία υψικαμίνων, το κουρασάνι, ο μπετονίτης και ο περλίτης. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται τεχνητά αδρανή υλικά που προέρχονται από ραδιενεργά απόβλητα. Τα ραδιενεργά απόβλητα από αντιδραστήρες ή οπτικά συστήματα ψήνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και το υλικό μετατρέπεται σε αδρανές μη ραδιενεργό.
- Ανακυκλωμένα: πρόκειται για υλικά που προέρχονται από κατεδαφίσεις κατασκευών.

Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους, διακρίνονται σε:

- I. **Άμμος**: Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους, d , ικανοποιεί τη σχέση $0 \leq d < 8 \text{ mm}$ και συμβολίζονται με (0/8). Η συγκεκριμένη κατηγορία χωρίζεται στις εξής δύο:
 - Παιπάλη: Το τμήμα των αδρανών, το οποίο αποτελείται από τους πιο λεπτούς κόκκους του υλικού και διέρχεται από το αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο Νο 200, που έχει διάμετρο 0,75 mm.
 - Ρυζάκι: Το τμήμα των αδρανών, που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $4 \leq d < 8 \text{ mm}$ και συμβολίζονται με (4/8).
- II. **Γαρμπίλι**: Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $8 \leq d < 16 \text{ mm}$ και συμβολίζονται με (8/16).

III. Σκύρα: Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $16 \leq d < 64$ mm και συμβολίζονται με (16/64). Τα χονδρόκοκκα συλλεκτά υλικά γαρμπίλι και σκύρα ονομάζονται χαλίκια.

Τα αδρανή διακρίνονται ανάλογα με το ειδικό βάρος τους σε:

1. Κανονικού ειδικού βάρους: 2-3 gr/cm³.
2. Ελαφροβαρή: <2 gr/cm³.
3. Βαρέα: 3 gr/cm³.

Τα αδρανή στα κονιάματα

Η προσθήκη των αδρανών στα κονιάματα συνιστάται για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Τα κονιάματα που παράγονται χωρίς προσθήκη αδρανών, συστέλλονται κατά την πήξη και την σκλήρυνση, με αποτέλεσμα την δημιουργία επιφανειακών ρηγματώσεων. Από οικονομική άποψη τα αδρανή υλικά είναι πιο φθηνά από τις κονίες.

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στα κονιάματα. Τα αδρανή των κονιαμάτων θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του παρακάτω Ευρωπαϊκού προτύπου: ΕΛΟΤ EN 13139:2002 Αδρανή κονιαμάτων (Aggregates for mortar).

Δεν πρέπει να περιλαμβάνουν επιβλαβείς προσμίξεις που θα επηρεάζουν την σταθερότητα, αντοχή και λοιπές ιδιότητες των κονιαμάτων.

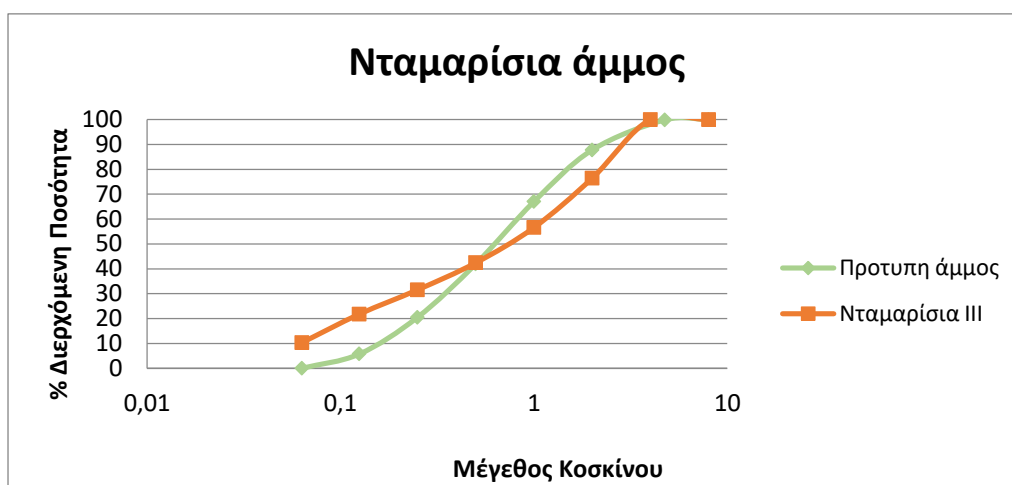
Επίσης η υγρασία τους είναι καθοριστικός παράγοντας. Η υγρασία δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3%. Θα πρέπει πάντα να υπολογίζεται πριν τον καθορισμό των αναλογιών ενός κονιάματος.

Επιλογή αδρανών

Στα πλαίσια της έρευνας της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκαν δύο είδη άμμων όπως έχει αναφερθεί: 1) νταμαρίσια θραυστή άμμος και 2) ποταμίσια συλλεκτή άμμος.

Νταμαρίσια άμμος

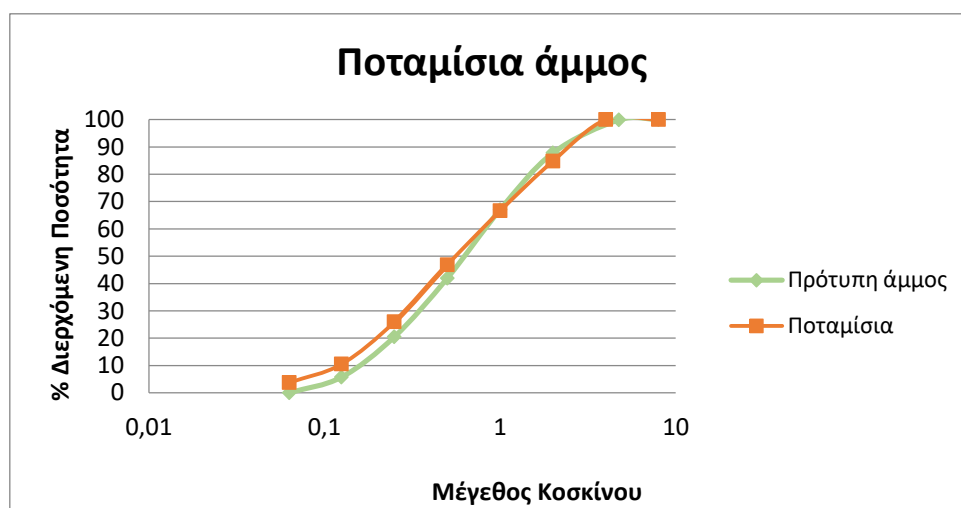
Πρόκειται για άμμο ασβεστιτικής σύστασης που ακολουθεί την παρακάτω κοκκομετρική καμπύλη:



Διάγραμμα 3.1: Κοκκομετρική καμπύλη νταμαρίσιας άμμου

Ποταμίσια άμμος

Πρόκειται για άμμο πυριτικής σύστασης που ακολουθεί την παρακάτω κοκκομετρική καμπύλη.



Διάγραμμα 3.2: Κοκκομετρική καμπύλη ποταμίσιας άμμου

3.1.3 Νάνο-τιτανία (nano- TiO_2)

Η φωτοκαταλυτική δράση του διοξειδίου του τιτανίου σε μορφή νάνο, συμβάλλει σημαντικά στην ενίσχυση της διαδικασίας ενυδάτωσης και ενανθράκωσης των κονιαμάτων, επηρεάζοντας έτσι την απαιτούμενη αντοχή τους. Επιπλέον, η νανο-τιτανία με τη φωτοκαταλυτική της ιδιότητα και τον αντιβακτηριδιακό της ρόλο μπορεί να βοηθήσει στη διαδικασία αυτοκαθαρισμού της επιφάνειας των

κονιαμάτων, δηλαδή απομάκρυνση οργανικών ρύπων και αντιμετώπισης βιολογικών φθορών. Μελέτες έχουν δείξει την επίδραση της νανο-τιτανίας στην πρόοδο της ανθρακοποίησης και της υδρόλυσης σε κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα. [21,22,23]

Ενεργοποίηση νανο- τιτανίας

Προκειμένου να ξεπεραστεί η αυξημένη ζήτηση νερού των νανοσωματιδίων, η νάνο- τιτανία αναμειγνύεται στο νερό με τη βοήθεια μαγνητικού αναδευτήρα για 15 λεπτά για να αποφευχθεί ο σχηματισμός συσσωματωμάτων. Το κολλοειδές διάλυμα υποβάλλεται σε υπεριώδη ακτινοβολία υν (365 nm) για 20 λεπτά για να ενεργοποιηθεί η τιτανία.



Εικόνα 3.3: Ενεργοποίηση νανο- τιτανίας σε λάμπα UV

3.2 Τεχνικές δοκιμών και αναλύσεων

Περιγράφονται οι δοκιμές και οι αναλύσεις στις οποίες υποβάλλονται τα κονιάματα και οι πάστες για να προσδιοριστούν οι φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες τους. Οι αναλύσεις αυτές διακρίνονται σε:

Χημικές αναλύσεις:

- Θερμοσταθμική ανάλυση DTA/TG
- Φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

Ορυκτολογική ανάλυση:

- Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD)

Αναλύσεις φυσικών μεγεθών:

- Τεχνική προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης
- Δοκιμή Vicat για τον προσδιορισμό του χρόνου πήξης

Μηχανικές δοκιμές:

- Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης
- Δοκιμή κάμψης τριών σημείων
- Δοκιμή υπερήχων

3.2.1 Φυσικοχημικές αναλύσεις

3.2.1.1 Θερμοσταθμική ανάλυση DTA/TG

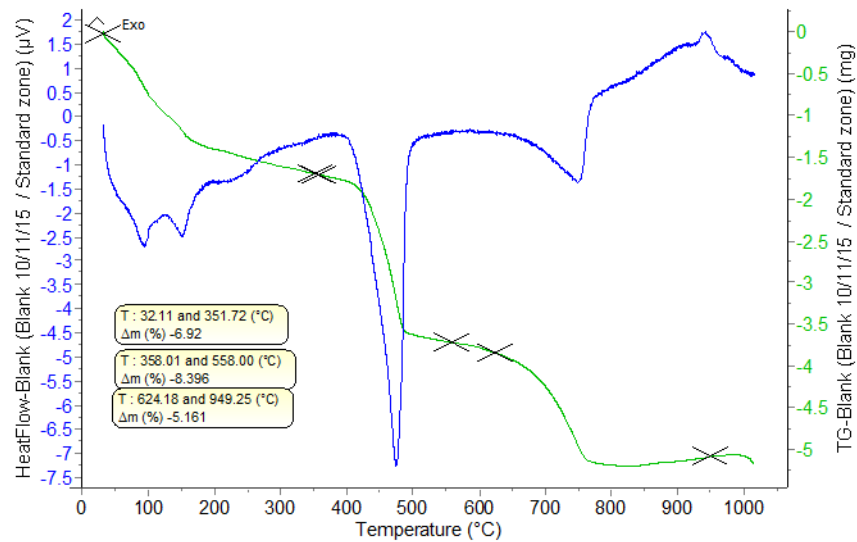
Θερμική ανάλυση σύμφωνα με την ICTAC (International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry) είναι: « Ένα σύνολο αναλυτικών τεχνικών στις οποίες μετράται μια ιδιότητα του δείγματος ή των προϊόντων αντίδρασης αυτού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, ενώ το δείγμα υποβάλλεται σε μια προγραμματισμένη θερμική διεργασία, υπό καθορισμένο περιβάλλον» [26].

Οι θερμικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στην μελέτη των παστών είναι η διαφορική θερμική ανάλυση (differential thermal analysis, DTA) και η θερμοστατική ανάλυση (thermogravimetric analysis TG).

Η διαφορική θερμική ανάλυση DTA, αποτελεί τεχνική της θερμικής ανάλυσης στηριζόμενη στην αρχή για την μέτρηση της μεταβολής ενέργειας στα υλικά. Όταν ένα υλικό υπόκειται σε αλλαγή στη φυσική του κατάσταση ή όταν αντιδρά χημικά, απορροφάται ή εκλύεται θερμότητα (η οποία βέβαια δε συνοδεύεται πάντα με μεταβολή στη μάζα του υλικού) και αυτό αντιστοιχεί σε ενδόθερμες ή εξώθερμες αλλαγές αντίστοιχα. Κατά την τεχνική DTA μελετάται η διαφορά θερμοκρασίας ΔT μεταξύ του δείγματος και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς κάτω από την ίδια πηγή θερμότητας. [27]

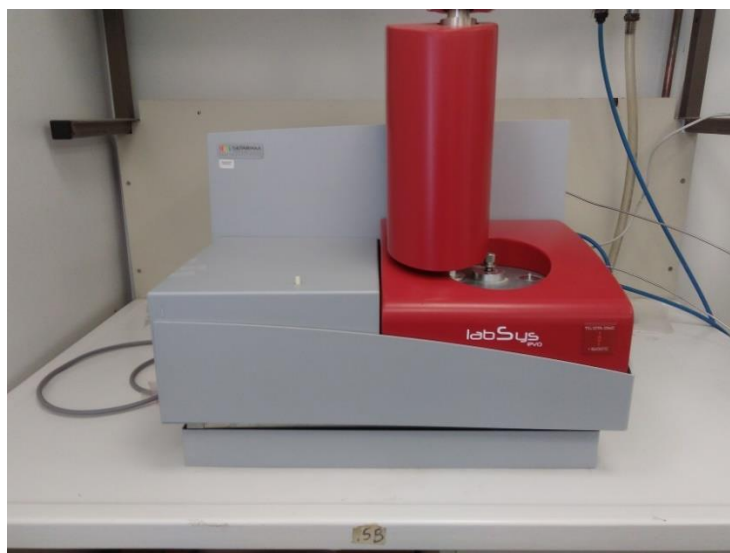
Θερμοστάθμιση TG είναι η τεχνική κατά την οποία η μεταβολή μάζας του δείγματος καταγράφεται ως συνάρτηση του χρόνου ή της θερμοκρασίας, η οποία θερμαίνεται ή ψύχεται με σταθερή ταχύτητα σε ειδική ατμόσφαιρα αερίου.

Με την ολοκλήρωση του πειράματος εξάγονται δυο καμπύλες (σχήμα) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, η θερμοσταθμική καμπύλη **TG** και η καμπύλη της διαφορικής θερμικής ανάλυσης **DTA**.



Διάγραμμα 3.3: Καμπύλες TG & DTA

Η καμπύλη DTA δίνει πληροφορίες για την περιοχή θερμοκρασιών που συμβαίνουν τα φαινόμενα και το ποσό της μεταβολής της ενθαλπίας, ενώ παράλληλα εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την κινητική αυτών. Η καμπύλη TG παριστά τη μεταβολή της μάζας του δείγματος σε σχέση με τη θερμοκρασία. Με βάση λοιπόν αυτή την καμπύλη και σε σχέση με την προηγούμενη μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή της μάζας κατά τη διάρκεια ορισμένων διεργασιών (ενδόθερμες- εξώθερμες αντιδράσεις σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες). Στην παρούσα εργασία η συσκευή θερμοσταθμικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν LabSys Evo 1600oC της εταιρείας Setaram.



Εικόνα 3.4: Η συσκευή θερμοσταθμικής ανάλυσης LabSys Eno 1600oC

Πειραματική διαδικασία

Για να εφαρμόσουμε τη μέθοδο στις πάστες που παρασκευάσαμε, αρχικά τις σπάσαμε στη μέση για να πάρουμε δείγμα από το εσωτερικό της πάστας. Παίρνουμε μία μικρή ποσότητα (20-25 mg) και την ελαιοτριβούμε για τη βάλουμε στο μηχάνημα. Ακολουθούμε την ίδια πρακτική σε όλες τις πάστες για να μην έχουμε αλλαγή στα αποτελέσματα λόγω της θέσης λήψης του δείγματος.



Εικόνα 3.5: Λήψη δείγματος από το εσωτερικό της πάστας για την θερμική ανάλυση

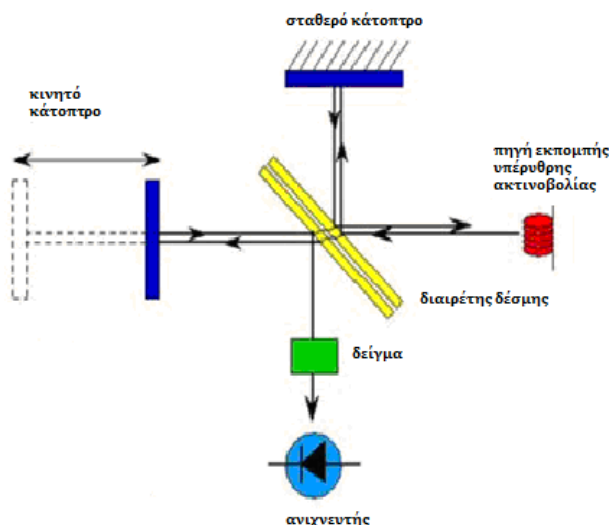
3.2.1.2 Φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

Η φασματοσκοπία αποτελεί τμήμα της Φυσικοχημείας και ασχολείται με τη μελέτη της αλληλεπίδρασης της ύλης με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η φασματοσκοπία ανήκει στις φυσικοχημικές μεθόδους ανάλυσης της ύλης, όπου μετράται η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος (λ) ή της συχνότητας (ν).

Η υπέρυθρη φασματοσκοπία αποτελεί μια απλή τεχνική για την ανάλυση στερεών, υγρών ή αέριων υλικών και βιολογικών συστημάτων, η δε απαιτούμενη προς ανάλυση ποσότητα του υλικού είναι αρκετά μικρή (μερικά μg). Η νέα γενιά φασματοφωτόμετρων υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier έχει διευρύνει την χρήση τους και σε περισσότερα πολύπλοκα συστήματα, όπως είναι τα υδατικά διαλύματα βιολογικών μορίων και βιοπολυμερών. [28]

Η φασματοσκοπία υπέρυθρου είναι μια μέθοδος που βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρου από το δείγμα που εξετάζουμε. Η πορεία που ακολουθεί μια δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας σε ένα φασματοφωτόμετρο FTIR είναι η εξής: Πηγή εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία προσκρούει στον διαιρέτη δέσμης και χωρίζεται σε δύο ίσες δέσμες. Η μία από τις δύο δέσμες διαπερνά τον διαιρέτη δέσμης και κτυπά στο σταθερό κάτοπτρο ενώ η άλλη ανακλάται στον διαιρέτη δέσμης και προσπίπτει στο κινητό κάτοπτρο. Μετά την ανάκλαση στους δύο καθρέπτες, οι δύο δέσμες συναντώνται εκ νέου στον διαιρέτη δέσμης, συμβάλλουν, έπειτα κατευθύνονται στο δείγμα με το οποίο αλληλεπιδρούν και καταλήγουν τέλος στον ανιχνευτή. Η φασματοσκοπία IR χρησιμοποιείται κυρίως στην περιοχή $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$.

Τα φάσματα απορρόφησης υπέρυθρου εμφανίζονται όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την συχνότητα δόνησης του μορίου. Για να ληφθούν φάσματα υπέρυθρου η φωτεινή δέσμη όλων των συχνοτήτων διέρχεται μέσα από το υλικό και μετράται η διαπερατότητα επί τοις % (Τα) ή η απορροφητικότητα (Α). Η συσκευή υπέρυθρης φασματοσκοπίας με μετασχηματισμό που χρησιμοποιήθηκε ήταν Perkin-Elmer system 1000.

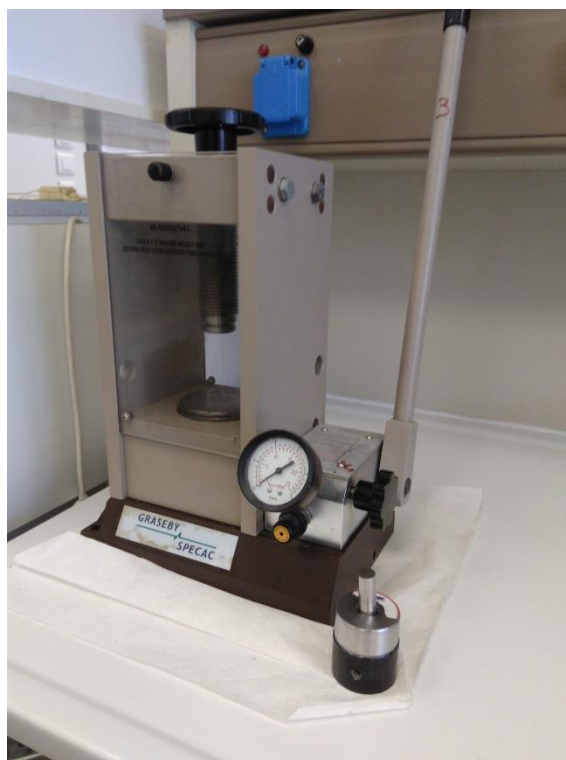


Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της πορείας της υπέρυθρης ακτινοβολίας, ξεκινώντας από την πηγή και καταλήγοντας στον ανιχνευτή

Πειραματική διαδικασία

Από τη στιγμή που τα δείγματα που εξετάζουμε είναι σε στερεή μορφή, πρέπει να παρασκευαστούν διάφανα δισκία (pellets) σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Ζυγίζεται 1 mg δείγματος από το εσωτερικό της εκάστοτε πάστας που μελετάμε.
2. Σε γουδί από αχάτι το ελαιοτριβούμε
3. Ζυγίζονται 100 mg καθαρού βρωμιούχου καλίου (KBr) το οποίο προστίθεται στο γουδί για να αναμιχθεί και να ελαιοτριφτεί όλο το δείγμα μαζί.
4. Έπειτα, το μείγμα τοποθετείται σε πρέσα που ασκεί πίεση 10-15 tonnes.
5. Το δισκίο που προκύπτει έχει διάμετρο 1,2 εκατοστά και πάχος 0,3 εκατοστά.
6. Μέχρι την ανάλυση του στη συσκευή φασματοσκοπίας, τα δισκία τοποθετούνται σε κλειστό δοχείο με σίλικα, για να μην επηρεαστούν από την υγρασία.



Εικόνα 3.6: Η πρέσα που χρησιμοποιείται για την παρασκευή pellets

3.2.1.3 Ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας στηρίζεται στην περίθλαση των ακτίνων-Χ και δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των ορυκτολογικών συστατικών των δειγμάτων.

Όταν μονοχρωματική δέσμη ακτίνων Χ προσπίπτει στο υλικό του δείγματος, προκαλείται σκέδαση των ακτίνων-Χ στα κρυσταλλικά πλέγματα των κρυσταλλικών φάσεων του δείγματός. Σε ορισμένες διευθύνσεις και για ορισμένες μόνο γωνίες προσπτώσεως της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οι σκεδασμένες ακτίνες συμβάλλουν και ενισχύονται. Τότε θα προκύψουν περιθλώμενες ακτίνες. [29]

Οι ακτίνες Χ παράγονται από λυχνία χαλκού. Η κάθοδος της λυχνίας αποτελείται από νήμα βολφραμίου και η άνοδος από χαλκό. Η διάταξη βρίσκεται σε κενό. Κατά την εφαρμογή τάσης στο νήμα βολφραμίου τα ηλεκτρόνια θερμαίνονται, διεγείρονται και υπό κενό οδηγούνται στην άνοδο χαλκού. Έτσι τα ηλεκτρόνια του Cu διεγείρονται, μεταπηδούν σε εξωτερικές στοιβάδες και κατά την επαναφορά τους στη θεμελιώδη στοιβάδα παράγουν φωτόνια μήκους κύματος ακτίνων Χ. Η άνοδος του Cu παράγει ακτίνες μήκους κύματος $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$. Η κάθοδος W διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I=40 \text{ mA}$ και τάσης $V=40 \text{ kV}$. [10]

Το περιθλασίμετρο έχει γωνιόμετρο που περιστρέφει το δείγμα κατά γωνία θ και ο ανιχνευτής περιστρέφεται κατά γωνία 2θ για να λαμβάνει όλη την ακτινοβολία. Η σχέση μεταξύ γωνίας θ , του μήκους κύματος λ και των ακτινών X και της διαπλεγματικής απόστασης d , δίνεται από την γνωστή εξίσωση Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Πειραματική διαδικασία

Στην παρούσα εργασία ο τύπος περιθλασίμετρου ακτινών X που χρησιμοποιήθηκε ήταν Siemens D 500 diffractometer (Cu – $K\alpha$). Λαμβάνονται 15-20 mg από το εσωτερικό της πάστας, κονιοποιείται σε γουδί και στη συνέχεια τοποθετείται στους ειδικούς δειγματοφορείς της συσκευής με οινόπνευμα, έτσι ώστε να απλωθεί το μείγμα ομοιόμορφα. Αφήνονται να στεγνώσουν για περίπου μισή ώρα και στη συνέχεια τοποθετούνται στο περιθλασίμετρο.



Εικόνα 3.7: Περιθλασίμετρο ακτινών x

3.2.1.4 Τεχνική προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης

Το πείραμα για τον προσδιορισμό της απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης γίνεται κατά το πρότυπο UNI EN 15801:2010. Η μέθοδος της τριχοειδούς αναρρίχησης βασίζεται στις δυνάμεις συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του νερού και των τοιχωμάτων μέσα στους πόρους των δοκιμίων. Οι δυνάμεις συνάφειας που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνοχής των μορίων του νερού και δημιουργείται η τάση διεύρυνσης του νερού σε όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια του δοκιμίου. Το σύστημα των τριχοειδών πόρων του δοκιμίου παίζει το ρόλο των λεπτών σωληνίσκων όπου οι δυνάμεις πρόσφυσης και συνοχής υπερνικούν τη βαρύτητα – λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεών τους – και τροφοδοτούν ανοδική κίνηση του νερού στο δοκίμιο. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

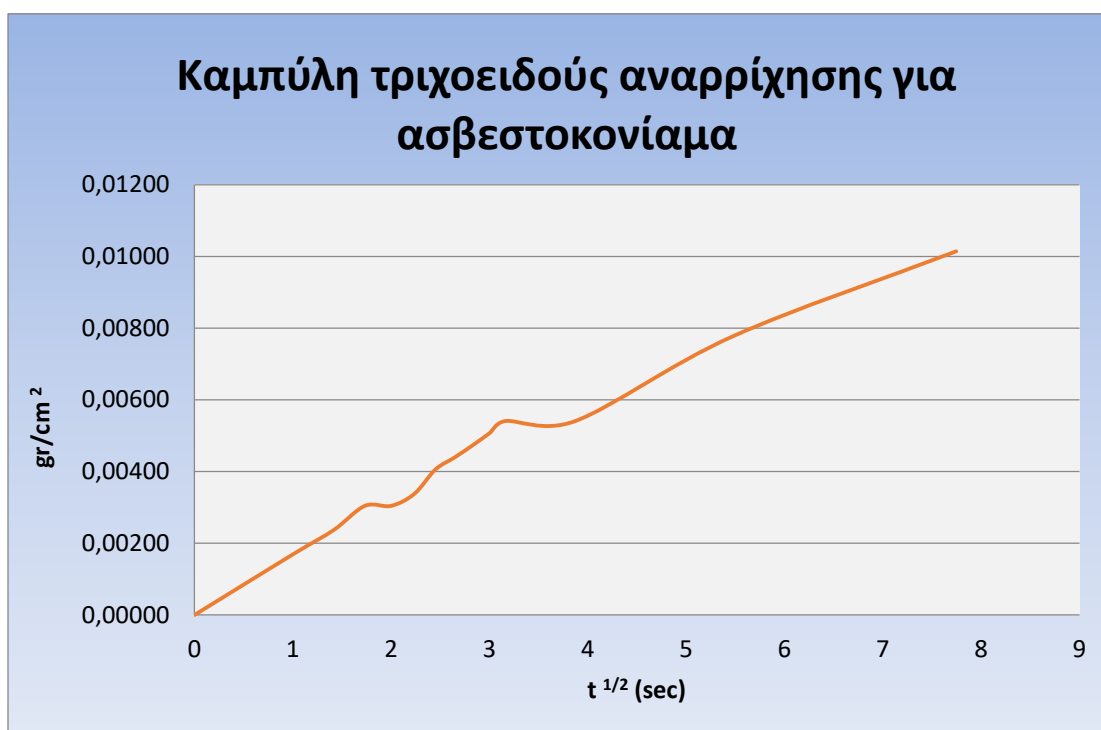
Προεργασία:

- Τα δοκίμια έχουν τοποθετηθεί σε φούρνο στους 60°C για δύο μέρες ώστε να φύγει η υγρασία.
- Μετά τις δύο μέρες τα δοκίμια τοποθετούνται σε ξηραντήρα ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.

Πείραμα:

- Ζυγίζονται τα δοκίμια
- Τοποθετούνται σε ειδικά δοχεία με κατάλληλες στρώσεις από διηθητικό χαρτί.
- Εμποτίζουμε το χαρτί με απιονισμένο νερό και τοποθετούμε τα δοκίμια.
- Μετράμε το βάρος ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 30, 60 λεπτά

Για να κατασκευάσουμε την καμπύλη της τριχοειδούς αναρρίχησης τοποθετούμε στον οριζόντιο άξονα x την τετραγωνική ρίζα του χρόνου και τη διαφορά βάρους προς την επιφάνεια του δοκιμίου στον κατακόρυφο άξονα y .



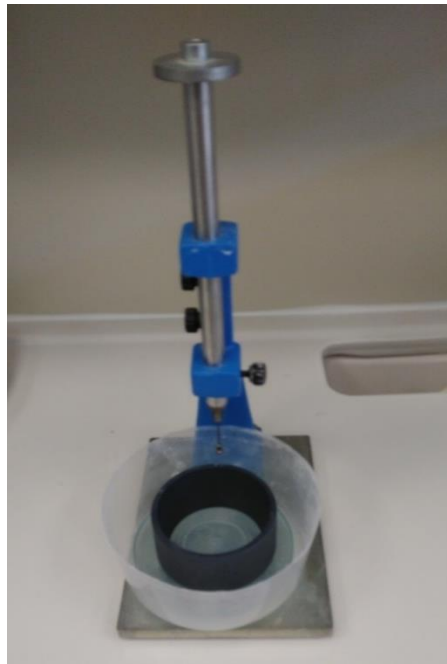
Διάγραμμα 3.4: Παράδειγμα καμπύλης τριχοειδούς αναρρίχησης

Η κλίση της καμπύλης τριχοειδούς αναρρίχησης εκφράζει το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης με τιμές 0- 1. Μεγάλη τιμή του συντελεστή σημαίνει ότι το ενεργό πορώδες του υλικού αποτελείται κυρίως από μικρούς πόρους ενώ τιμή κοντά στο μηδέν υποδηλώνει ότι το ποσοστό των μεγάλων πόρων είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των μικρών.

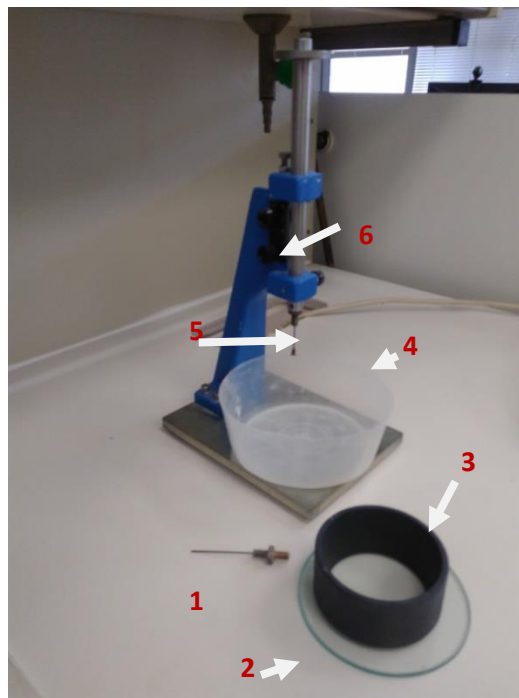
3.2.1.5 Δοκιμή Vicat

Από τη δοκιμή Vicat προσδιορίζεται ο αρχικός και τελικός χρόνος πήξης των κονιαμάτων με βάση το πρότυπο EN 196-3.[30]

Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης ανάμιξης της κονίας με το νερό και της σκλήρυνσης της πάστας (χρόνος «απώλειας» της πλαστικότητάς της) καλείται **χρονικό διάστημα πήξης (setting time period)**. Ανάλογα με τον τύπο της κονίας, τις ιδιότητές της και τα χημικά πρόσθετα, το χρονικό διάστημα πήξης διαφοροποιείται. Όπως έχει αναφερθεί, ζητούμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της επιρροής της νανο-τιτανίας στην πήξη των κονιαμάτων.



Εικόνα 3.8: Διάταξη της συσκευής Vicat για τον προσδιορισμό του τελικού χρόνου πήξης



Εικόνα 3.9: Εξοπλισμός συσκευής Vicat: 1) Βελόνα για τον προσδιορισμό αρχικού χρόνου πήξης, 2) Γυάλινη βάση, 3) Καλούπι πάστας, 4) Δοχείο στο οποίο μπαίνει η το καλούπι με την πάστα, 5) Βελόνα για τον προσδιορισμό του τελικού χρόνου πήξης, 6) Χάρακας

Πειραματική διαδικασία

1. Η διάταξη του πειράματος είναι η αυτή που φαίνεται στην εικόνα.
2. Στη συσκευή βάζουμε αρχικά τη βελόνα για τον προσδιορισμό του αρχικού χρόνου πήξης. Τη βαθμονομούμε έτσι ώστε όταν η βελόνα είναι την επιφάνεια του γυαλιού η τιμή να είναι 0.
3. Καλείται χρόνος μηδέν η στιγμή που προστίθεται το νερό στην κονία.
4. Η πάστα χυτεύεται στο ειδικό καλούπι
5. Το δοχείο τοποθετείται σε γυάλινη βάση την οποία έχουμε αλείψει με λάδι ορυκτής προέλευσης.
6. Την παραπάνω διάταξη την βάζουμε στο δοχείο, το οποίο γεμίζουμε με νερό μέχρις ότου καλύψει το καλούπι με την πάστα.
7. Αρχίζουμε να κάνουμε δοκιμές μετά από τουλάχιστον 1 ώρα. Φέρνουμε τη βελόνα στην επιφάνεια της πάστας. Κάνουμε μια παύση σε αυτή τη θέση για 1-2 δευτερόλεπτα για να μην έχουμε αρχική ταχύτητα. Κρατάμε σταθερό το καλούπι και αφήνουμε το έμβολο να πέσει.
8. **Αρχικό χρόνο πήξης έχουμε όταν η βελόνα σταματήσει τουλάχιστον 5 mm πάνω από τον πυθμένα της πάστας.**
9. Έπειτα για τον προσδιορισμό του τελικού χρόνου πήξης της πάστας, αλλάζουμε βελόνα.
10. Αρχίζουμε δοκιμές 3,5- 4 ώρες από το χρόνο μηδέν. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία στο βήμα 7.
11. **Τελικό χρόνο πήξης έχουμε όταν το έμβολο αφήσει ένα αποτύπωμα στην επιφάνεια, χωρίς να εισχωρήσει μέσα στη πάστα. [22]**

3.2.2 Μηχανικές δοκιμές

3.2.2.1 Μονοαξονική θλίψη

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιείται με βάση το πρότυπο EN 1015-11 (1999). Χυτεύονται 3 κυβικά δοκίμια για κάθε δοκιμή διαστάσεων 5x5x5 cm σε ειδικές μήτρες τις οποίες έχουμε επαλείψει με λάδι ορυκτής προέλευσης. Τα δοκίμια ξεκαλουπώνονται τρεις μέρες μετά τη χύτευση. Η δοκιμή πραγματοποιείται για 28 μέρες, 3 & 6 μήνες ωρίμανσης. Τα δοκίμια φυλάσσονται σε κλειστά δοχεία με υγρασία έτσι ώστε να τηρείται το πρότυπο EN 196-1 (2002). [24,31]. Για την έναρξη της πραγματοποίησης της δοκιμής τοποθετείται το δοκίμιο ανάμεσα στις δύο πλάκες φόρτισης και στην συνέχεια ξεκινάει η φόρτιση μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Η συσκευή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου καταγράφονται όλες οι τιμές της φόρτισης (μονάδες δύναμης kN) και οι αντίστοιχες μετακινήσεις σε mm.



Εικόνα 3.10: Μήτρα για χύτευση δοκιμίων θλίψης



Εικόνα 3.11: Συσκευή μέτρησης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Αποτελέσματα δοκιμής

Μετά από κάθε δοκιμή προκύπτει ένα αρχείο csv το οποίο περιέχει τιμές φόρτισης και μετακίνησης. Τις τιμές αυτές τις μετατρέπουμε σε τιμές τάσης και παραμόρφωσης από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma = \frac{F}{0,1 \cdot A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Όπου:

σ : είναι η τάση σε MPa

F : η δύναμη σε kN

A : το εμβαδόν της επιφάνειας σε cm

ε : η παραμόρφωση

l_0 : το αρχικό ύψος

Δl : η συρρίκνωση

Θλιπτική αντοχή: Υπολογίζοντας λοιπόν τις παραπάνω τιμές μπορούμε να πάρουμε την αντοχή σε θλίψη F_c :

$$F_c = \sigma_{max} \quad (3)$$

Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης

Πέρα από την τιμή της θλιπτικής αντοχής που μας δίνει αυτή η δοκιμή, εξίσου σημαντική είναι η καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης. Από την καμπύλη μπορούμε να εκτιμήσουμε:

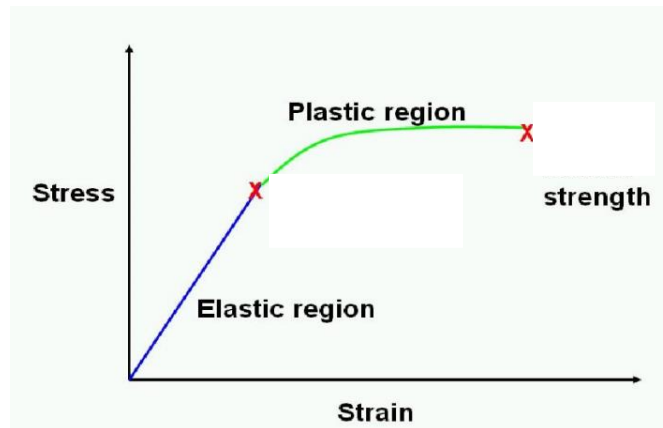
- Τη συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή κατά πόσο συμπεριφέρεται ελαστικά ή έχει πλαστιμότητα.
- Το μέτρο ελαστικότητας
- Το δείκτη δυσθραυστότητας.

Η *ελαστική συμπεριφορά* του υλικού αφορά το γραμμικό κλάδο της καμπύλης κατά τον οποίο η τάση (σ) είναι ανάλογη της παραμόρφωσης (ε) και τα υλικά ακολουθούν το νόμο του Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Ως μέτρο ελαστικότητας E λοιπόν ορίζεται η κλίση της ευθείας αυτής.

Η *πλαστική συμπεριφορά* αφορά τον οριζόντιο κλάδο της καμπύλης και ουσιαστικά εκφράζει ότι σε αυτή τη φάση το υλικό παίρνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις οι οποίες είναι πλέον μόνιμες.



Σχήμα 3.3: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης

Η *δυσθραυστότητα* εκφράζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα σπάει το δοκίμιο κατά τη φόρτιση. Είναι η ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια χωρίς να σπάει. Ο δείκτης δυσθραυστότητας υπολογίζεται από το εμβαδόν της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης.

3.2.2.2 Κάμψη τριών σημείων

Ορθογωνικά δοκίμια διαστάσεων 4x4x16 υποβάλλονται σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής των κονιαμάτων. Η καμπτική αντοχή μας δίνει πληροφορίες για την συμπεριφορά των υλικών σε εφελκυσμό αφού οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κάτω ίνα του δοκιμίου είναι εφελκυστικές.

Για να βρούμε την μέγιστη τάση (σ_t) που αναπτύσσεται στη διατομή του δοκιμίου ακολουθούμε τον τύπο:

$$\sigma_t = \frac{3}{2} \frac{P_f l_s}{bh^2} \quad (5)$$

Όπου:

P_f : το φορτίο που ασκείται

b : το πλάτος του δοκιμίου

h : το ύψος του δοκιμίου

I_z : η ροπή αδράνειας, η οποία ισούται με:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (6)$$

3.2.2.3 Δοκιμή υπερήχων

Οι υπέρηχοι είναι ελαστικοί κυματισμοί του αέρα, της ίδιας φύσης με τον ήχο, αλλά συχνότητας μεγαλύτερης των 20.000 m/sec. Η ταχύτητα των υπερήχων (v), όπως και του ήχου, μέσα από ένα υλικό συνδέεται με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E , και την πυκνότητα ρ του υλικού με τη σχέση:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

Η μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων έγινε με τη συσκευή TICO ultrasonic instrument της εταιρίας Proseq.



Εικόνα 3.12: Συσκευή TICO

3.4 Συνθέσεις

Συνολικά σχεδιάστηκαν 12 κονιάματα και 6 πάστες. Πάστες θεωρούμε τις συνθέσεις χωρίς την προσθήκη αδρανών, έτσι ώστε να μελετήσουμε καλύτερα τις αντιδράσεις της ενανθράκωσης, της ενυδάτωσης και του σχηματισμού των υδραυλικών συστατικών.

Οι συνθέσεις χωρίζονται σε δύο βασικές ενότητες με βάση την κονία:

- A.** Συνθέσεις με **υδράσβεστο (L)** και **μετακαολίνη (M)** με αναλογία 60/40 κατά βάρος.
- B.** Συνθέσεις με **φυσική υδραυλική άσβεστο (Y)**

Έπειτα για λόγους σύγκρισης στα κονιάματα χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικούς τύπους άμμου σε αναλογία κονία προς αδρανή 1/1 κατά βάρος:

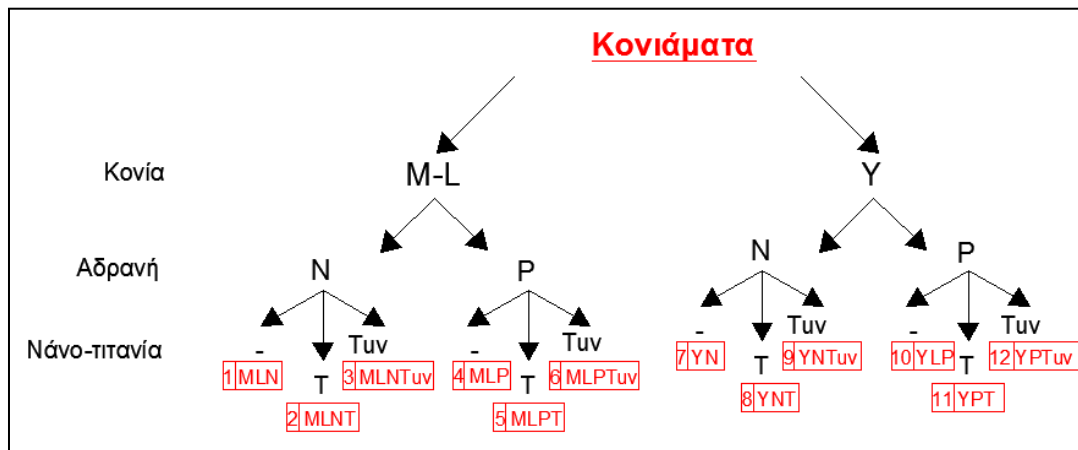
- A.** Νταμαρίσια άμμο (**N**)

B. Ποταμίσια άμμο (P)

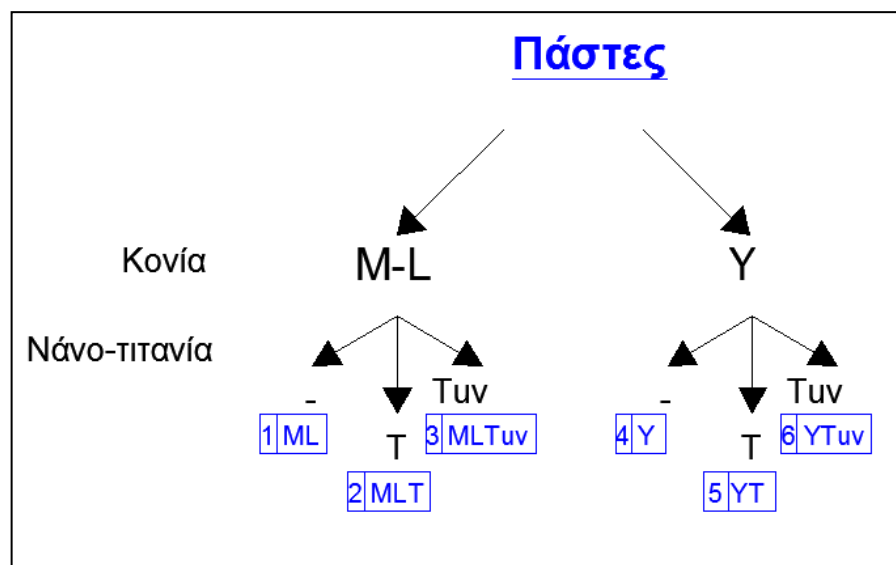
Αναφορικά με την προσθήκη **νάνο-τιτανίας (T)**, σχεδιάζουμε τρεις διαφορετικούς τύπους:

- A. Χωρίς νάνο-τιτανία
- B. Νανο-τιτανία 6% κατά βάρος στην κονία χωρίς ενεργοποίηση σε υπεριώδη ακτινοβολία
- C. Νανο-τιτανία 6% κατά βάρος στην κονία με ενεργοποίηση σε υπεριώδη ακτινοβολία (**Tuv**)

Επομένως προκύπτουν οι εξής 18 συνθέσεις:



Σχήμα 3.4: Συνθέσεις κονιαμάτων



Σχήμα 3.5: Συνθέσεις παστών

Πίνακας 3.2: Ονόματα συνθέσεων

Α/Α	ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ	Α/Α	ΠΑΣΤΕΣ
1	MLN	1	ML
2	MLNT	2	MLT
3	MLNT _{uv}	3	MLT _{uv}
4	MLP	4	Υ
5	MLPT	5	ΥΤ
6	MLPT _{uv}	6	ΥΤ _{uv}
7	YN		
8	YNT		
9	YNT _{uv}		
10	YP		
11	YPT		
12	YPT _{uv}		

Σύνθεση παστών

Για να μελετηθούν ο μηχανισμός ενανθράκωση και η ποζολανική αντίδραση μέσα από διάφορες αναλύσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, προχωρήσαμε στην παρασκευή παστών σφαιρικού σχήματος, διαμέτρου 2,5-3 εκατοστών. Αρχικά αφήσαμε τις πάστες να ωριμάσουν στην υγρασία και έπειτα διακόπταμε την ωρίμανση σε συγκεκριμένες μέρες βάζοντας τις μέσα σε κεραμικά δοχεία σε ακετόνη.

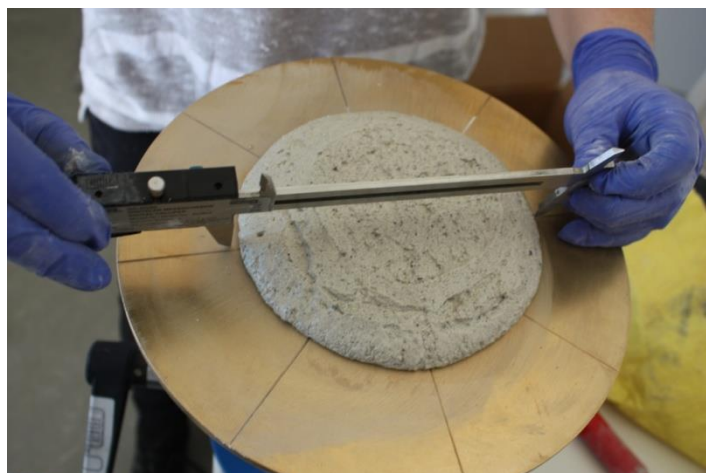
Σύνθεση κονιαμάτων

Για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων, χυτεύτηκαν σε πρισματικές και κυβικές μήτρες, με διαστάσεις 4 x 4 x 16 εκ και 5 x 5 x 5 εκ, αντιστοίχως, και στη συνέχεια τοποθετούνται σε θάλαμο ωρίμανσης σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο EN 196-1 [20]. Για τη δοκιμή υπερήχων και την τριχοειδή αναρρίχηση χυτεύτηκαν κωνοειδή δοκίμια σε ποτήρια με κυκλική βάση 5 εκ και ύψος 10-12 εκ.

Για να εξεταστεί η εργασιμότητα των κονιαμάτων σε κάθε χύτευση πραγματοποιήθηκε η δοκιμή της τράπεζας εξάπλωσης, σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3:1999 [25].

Πίνακας 3.3: Συνεκτικότητα κονιαμάτων

Σύνθεση	Συνεκτικότητα (mm)
YN	144.41
YNT	137.18
YNT _{uv}	135.17
YP	149.38
YPT	135.01
YPT _{uv}	137.41
MLN	136.96
MLNT	136.52
MLNT _{uv}	135.94
MLP	148.12
MLPT	138.25
MLPT _{uv}	137.16



Εικόνα 3.13: Δοκιμή εξάπλωσης

Πίνακας 4.4: Αναλογίες κονιαμάτων, λόγος κονίας/ αδρανή και νερού προς κονία

Ονομασία	Κονία		M	TiO2	Αδρανή		Κ/Α	N/K
	Y	L			Νταμαρίσια	Πυριτική		
YN	100	-	-	-	100	-	1	0.50
YNT	100	-	-	6	100	-	1	0.70
YNT _{uv}	100	-	-	6	100	-	1	0.70
YP	100	-	-	-	-	100	1	0.60
YPT	100	-	-	6	-	100	1	0.65
YPT _{uv}	100	-	-	6	-	100	1	0.65
MLN	-	60	40	-	100	-	1	1.25
MLNT	-	60	40	6	100	-	1	1.19
MLNT _{uv}	-	60	40	6	100	-	1	1.19
MLP	-	60	40	-	-	100	1	1.35
MLPT	-	60	40	6	-	100	1	1.20
MLPT _{uv}	-	60	40	6	-	100	1	1.22
Y	100	-	-	-	-	-	-	0.50
YT	100	-	-	6	-	-	-	0.60
Y _{Tuv}	100	-	-	6	-	-	-	0.60
ML	-	60	40	-	-	-	-	1.75
MLT	-	60	40	6	-	-	-	1.65
ML _{Tuv}	-	60	40	6	-	-	-	1.65

4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αποτελέσματα παστών

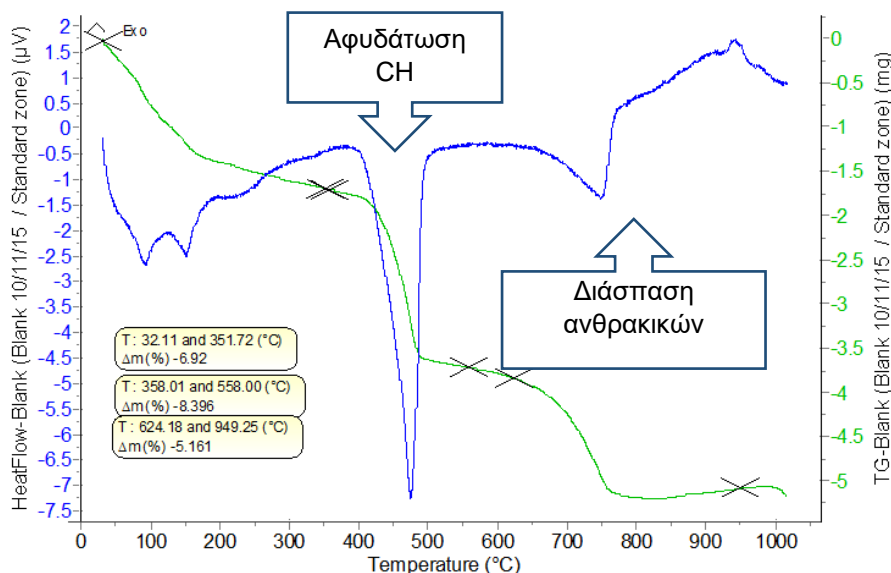
Με τη βοήθεια των τεχνικών που περιγράφηκαν παραπάνω θα εκτιμηθεί η πορεία της ενανθράκωσης και της ποζολανικής αντίδρασης στις πάστες σε διάφορες χρονικές στιγμές της ωρίμανσής τους. Οι παραπάνω αντιδράσεις σχετίζονται με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων όπως θα δειχτεί και από την παρούσα μελέτη.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και δοκιμών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες μία για τα αποτελέσματα των συνθέσεων με υδράσβεστο και μετακαολίνη και μία δεύτερη για την υδραυλική άσβεστο.

4.1.1 Πάστες με υδράσβεστο και μετακαολίνη

4.1.1.1 Θερμική ανάλυση DTA

Η θερμική ανάλυση βοήθησε αφενός να κατανοηθεί καλύτερα η επίδραση της νάνο-τιτανίας αλλά και η ενεργοποίηση της με ακτινοβολία υπεριώδους και αφετέρου να ποσοτικοποιηθεί η εξέλιξη της διαδικασίας της ενανθράκωσης σε συνάρτηση με την ποζολανική αντίδραση. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2 για συντομία CH) σύμφωνα με μεθοδολογία που προτείνεται από τους Cameiro et al. [28]



Διάγραμμα 4.1: Αποτελέσματα DTA/TG της πάστας ML την 1^η μέρα ωρίμανσης Όπως έχει αναφερθεί κατά την ενδόθερμη αντίδραση μεταξύ 400-550 $^{\circ}$ C η μεταβολή μάζας αφορά την αφυδάτωση του CH (CH_{deh}) και η αντίστοιχη μεταξύ 600-900 $^{\circ}\text{C}$ αφορά τη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (Ca_{dec}). Για να

εκτιμηθεί η εξέλιξη της ενανθράκωσης έναντι της ποζολανικής αντίδρασης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις:

$$CH_{poz} = CH_{th} - (CH_{fr} + CH_{carb}) \quad (4.1)$$

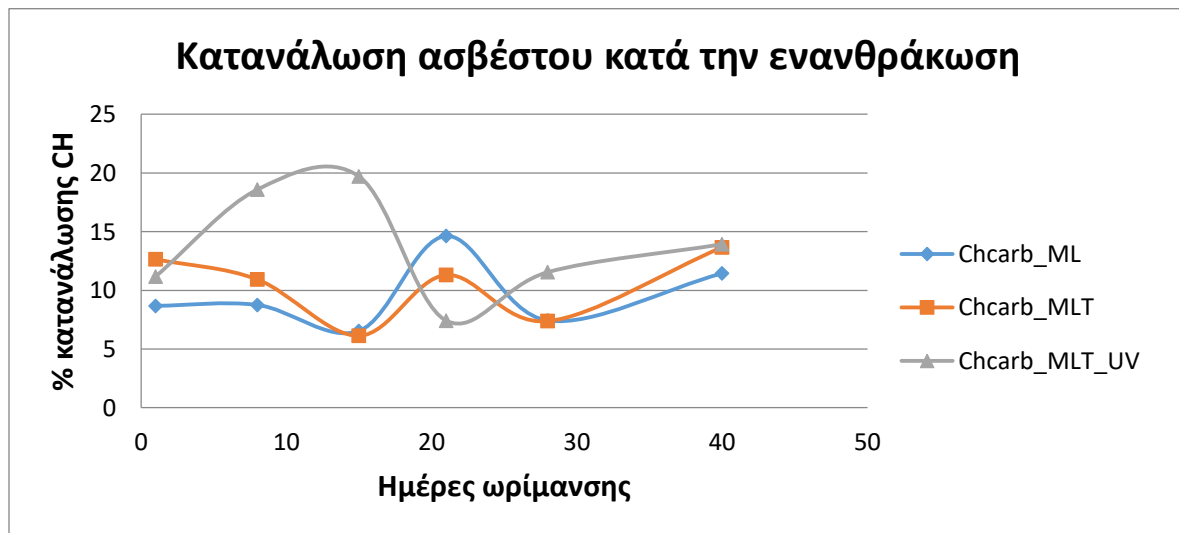
$$CH_{fr} = CH_{deh} \times \mu \cdot \beta(CH) / (\mu \cdot \beta)(H_2O) \quad (4.2)$$

$$CH_{carb} = Ca_{dec} \times \mu \cdot \beta(CH) / (\mu \cdot \beta)(CO_2) \quad (4.3)$$

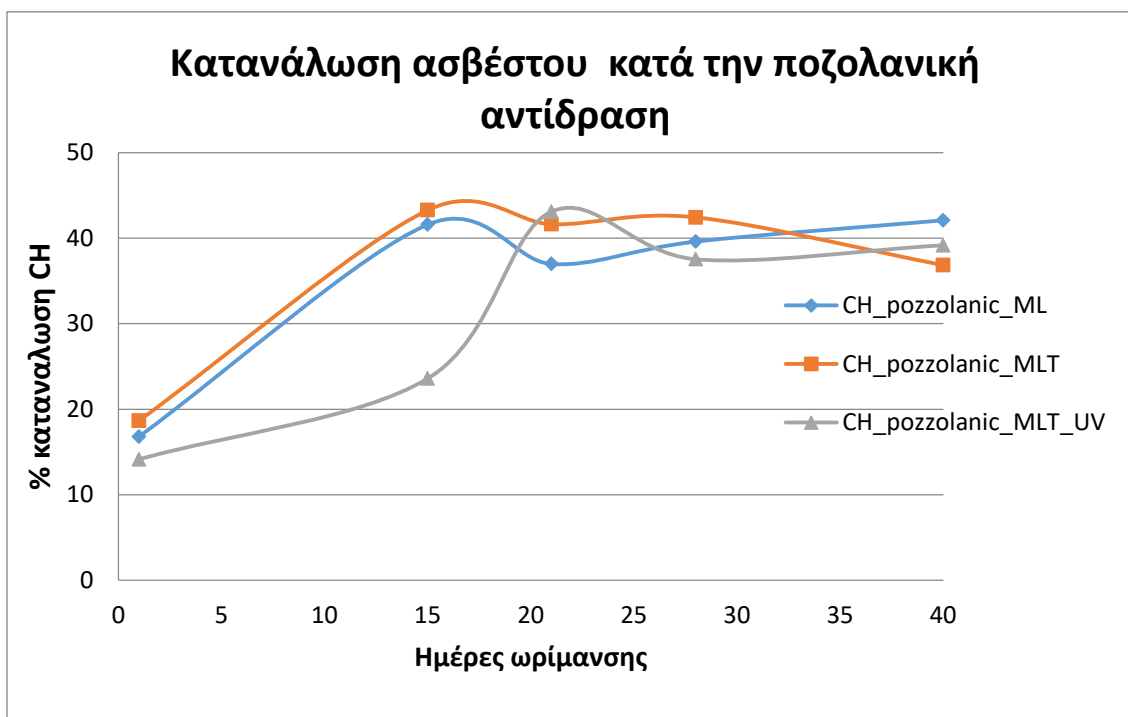
Όπου:

- **CH_{poz}**: η κατανάλωση ασβέστου κατά την ποζολανική αντίδραση
- **CH_{th}**: η αρχική ποσότητα ασβέστου
- **CH_{fr}**: η ποσότητα ελεύθερου πορτλανδίτη, δηλαδή υδροξειδίου του ασβεστίου
- **CH_{carb}**: η κατανάλωση ασβέστου κατά την ενανθράκωση
- **M.β CH**: το μοριακό βάρος του πορτλανδίτη, ήτοι 74
- **M.β H₂O**: το μοριακό βάρος του νερού, ήτοι 18
- **M.β CO₂**: το μοριακό βάρος του διοξειδίου του άνθρακα, ήτοι 44.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν τα διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.2: Κατανάλωση ασβέστου κατά την ενανθράκωση στις πάστες ML



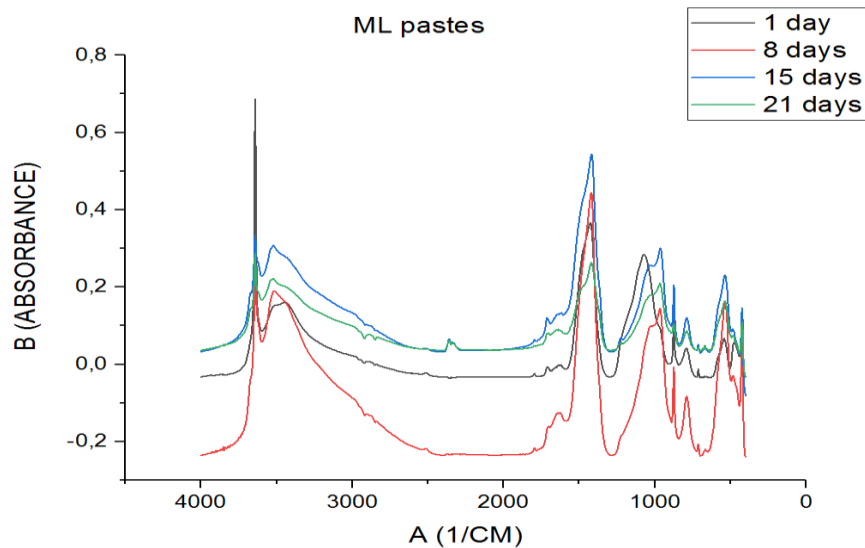
Διάγραμμα 4.3: Κατανάλωση ασβέστου κατά την ποζολανική αντίδραση στις πάστες ML

Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τα δύο παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι:

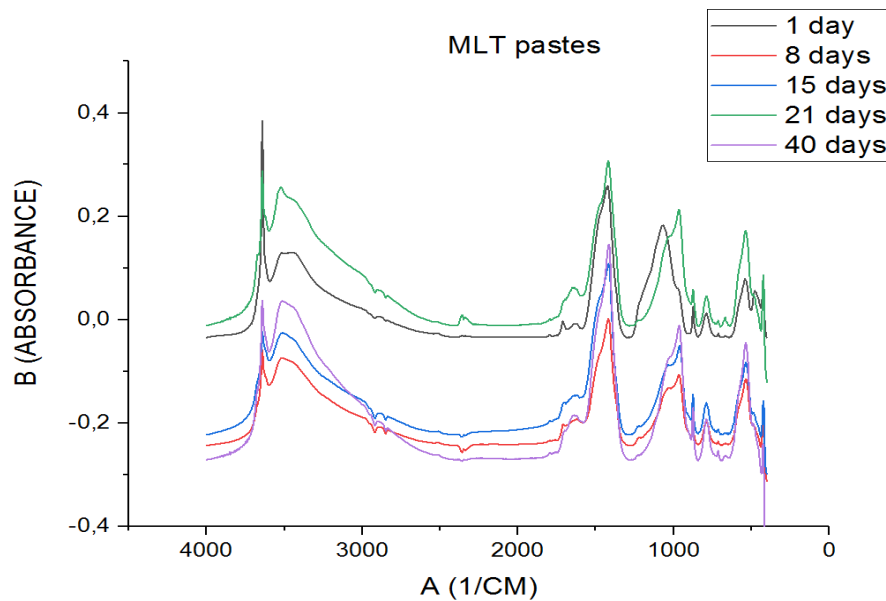
- Σε ότι αφορά την ενανθράκωση, οι πάστες με ενεργοποιημένη τιτανία εμφανίζουν σαφώς μεγαλύτερες καταναλώσεις σε σχέση με τις πάστες ML και MLT ιδιαίτερα κατά τη 15^η μέρα όπου η κατανάλωση ασβέστη στην πάστα MLTυν φτάνει τη μέγιστη τιμή της.
- Κατά την ποζολανική αντίδραση η εικόνα αντιστρέφεται καθώς τη 15^η μέρα για την πάστα MLTυν έχουμε τη μικρότερη τιμή σε αντίθεση με τις άλλες δυο πάστες.
- Μετά το διάστημα των 21 ημερών παρατηρείται παρόμοια τάση για όλες τις πάστες.
- Η σύγκριση της ενανθράκωσης με την ποζολανική αντίδραση στα πρώτα στάδια οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μίγματα με ενεργοποιημένη τιτανία παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την ενανθράκωση από τις πάστες ML και MLT.

4.1.1.2 Φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

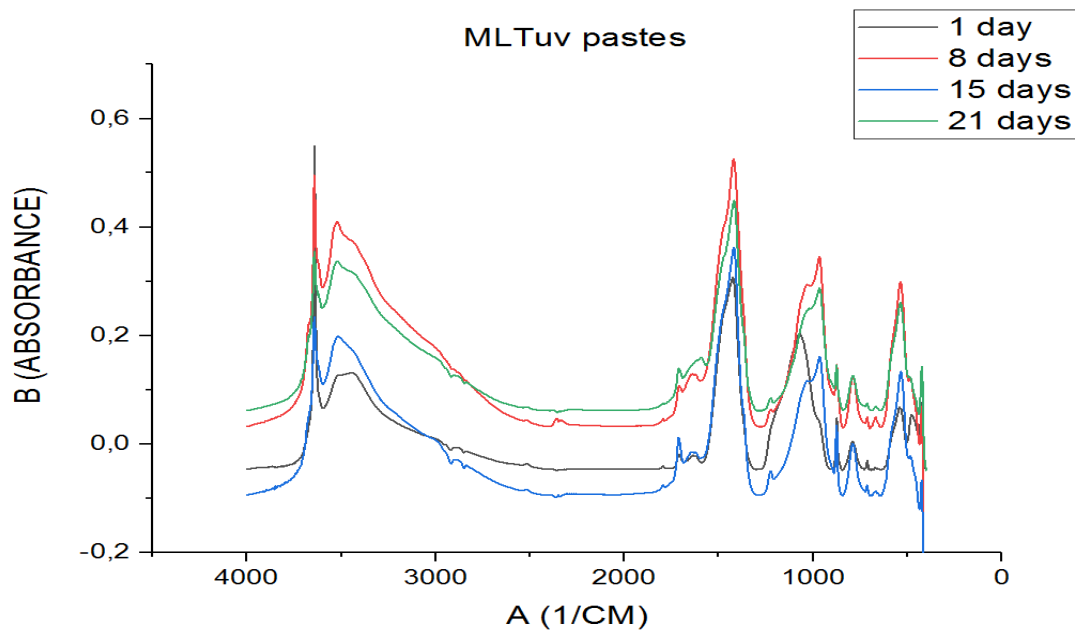
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης FTIR επιβεβαιώνουν τις εκτιμήσεις της θερμικής ανάλυσης. Οι αντιδράσεις ενανθράκωσης και του σχηματισμού υδραυλικών συστατικών αξιολογήθηκαν στα φάσματα της ανάλυσης μέσω της διαφοράς των κορυφών στις ενώσεις του πορτλαντίτη (3640 cm^{-1}), του ασβεστίτη ($1420, 870, 712\text{ cm}^{-1}$) και των Si-O-Si ενώσεων ($960, 1050\text{ cm}^{-1}$), δηλαδή υδραυλικά συστατικά.



Διάγραμμα 4.4: Φάσματα FTIR στις ML πάστες



Διάγραμμα 4.5: Φάσματα FTIR στις MLT πάστες



Διάγραμμα 4.6: Φάσματα FTIR στις MLTuv πάστες

Παρατηρείται μείωση της κορυφής που αποδίδεται στον πορτλαντίτη και ταυτόχρονα αυξανόμενη ένταση του ασβεστίτη και του σχηματισμό Si-O-Si των υδραυλικών εξαρτημάτων μέχρι τη 15^η μέρα.

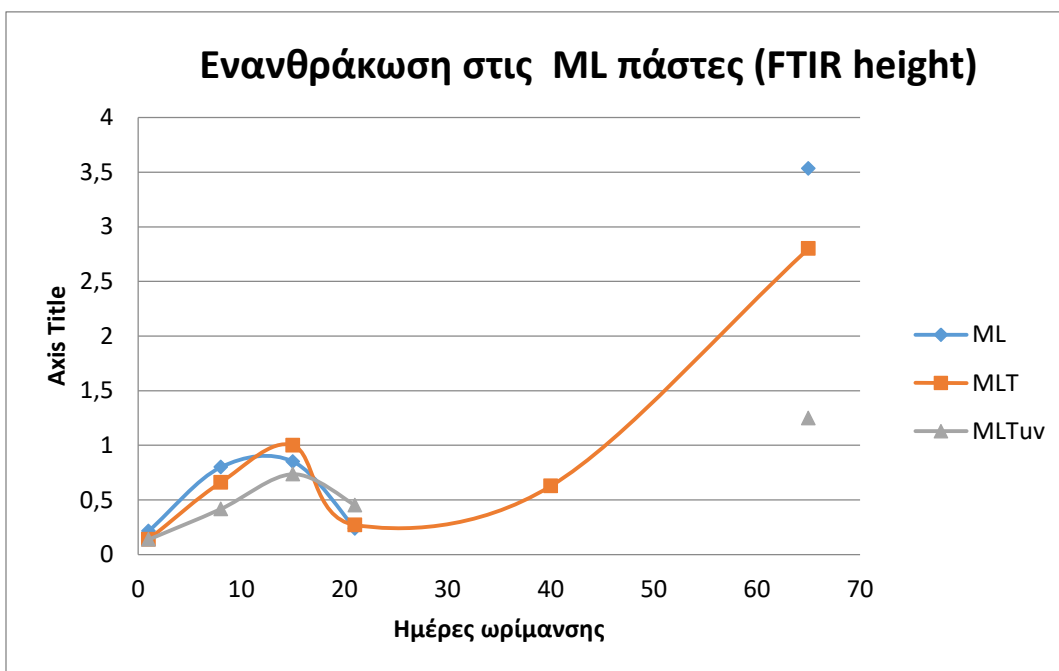
Πιο συγκεκριμένα στις πάστες φαίνεται ότι ασβεστίτης παρήχθη ακόμα και κατά την πρώτη ημέρα της ωρίμανσης. Οι κορυφές που αφορούν τα υδραυλικά συστατικά ήταν κυρίαρχα τη 15^η ημέρα της ωρίμανσης, τη στιγμή που ο πορτλαντίτης έχει καταναλωθεί.

Πιο ξεκάθαρα διακρίνονται οι διεργασίες της ενανθράκωσης και της ποζολανικής αντίδρασης στα παρακάτω διαγράμματα όπου για την αποτίμηση της ενανθράκωσης χρησιμοποιείται η σχέση:

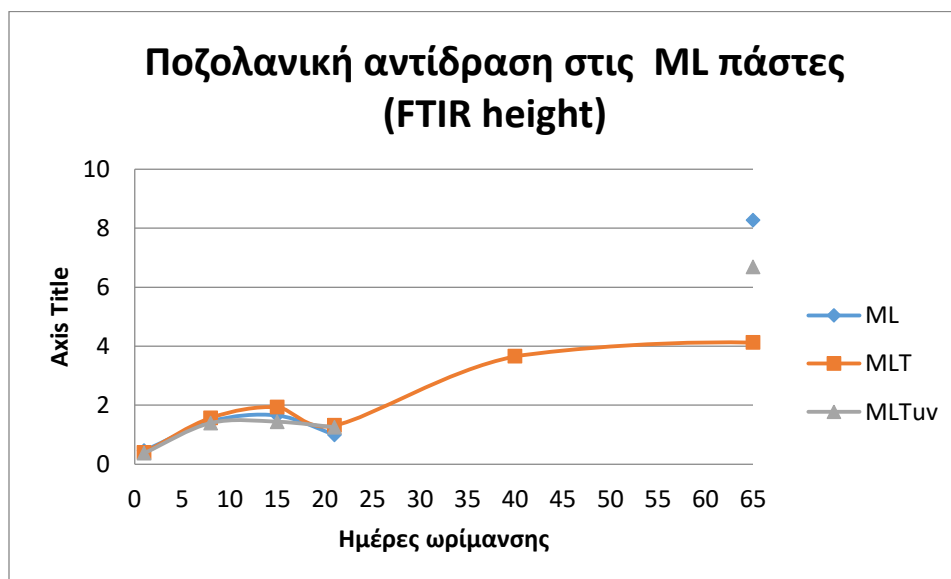
$$Carb = \frac{\text{peak CH (870)}}{\text{peak Cc (3640)}} \quad (4.4)$$

Αντίστοιχα για την ποζολανική αντίδραση:

$$Pozz = \frac{\text{peak Si-O(965)}}{\text{peak Cc (3640)}} \quad (4.5)$$



Διάγραμμα 4.7: Εκτίμηση της ενανθράκωσης στις πάστες ML μέσω FTIR



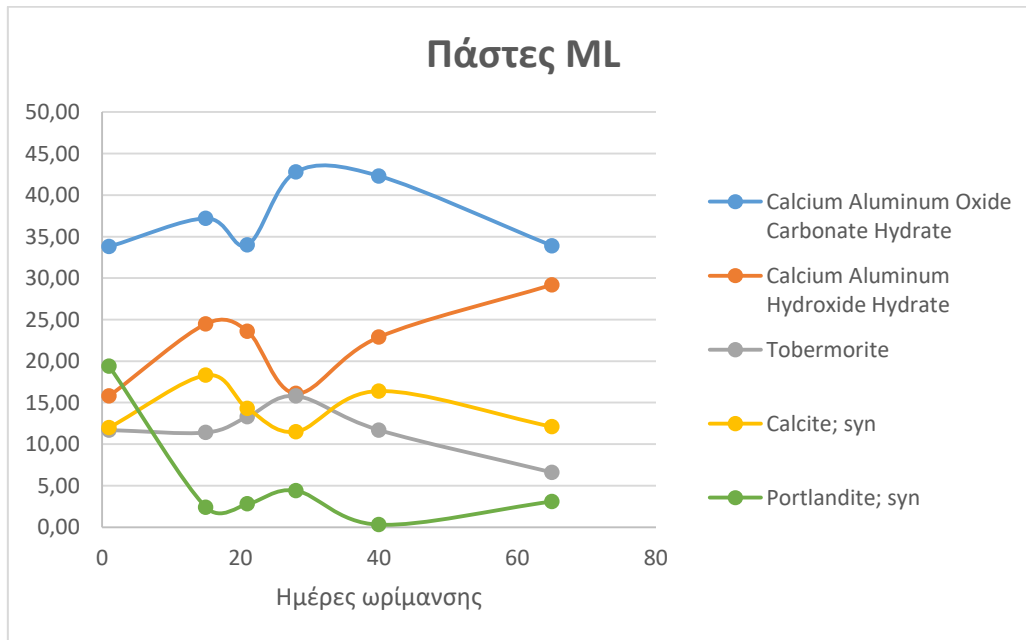
Διάγραμμα 4.8: Εκτίμηση της ποζολανικής αντίδρασης στις πάστες ML μέσω FTIR

4.1.1.3 Ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)

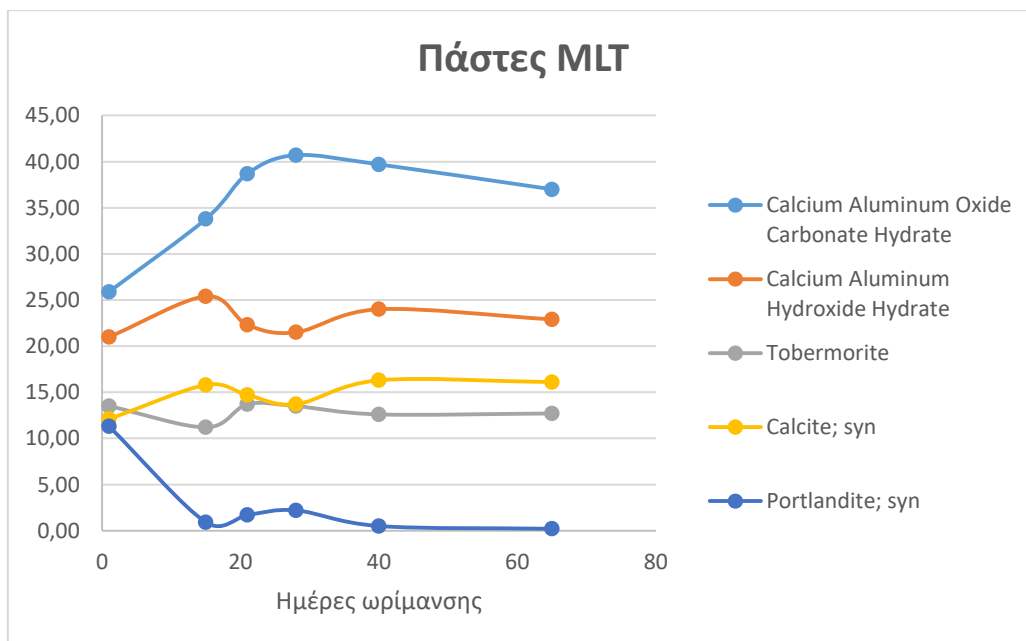
Μέσα από την ορυκτολογική ανάλυση διαπιστώθηκε ότι κατά την αντίδραση της ασβέστου και του μετακαολίνη εκτός από το ασβεστίτη και το πορτλανδίνη, παρατηρούνται ενυδατωμένες φάσεις ασβεστίου και αργυλοπυριτικών αλάτων (CSH και CAH, αντίστοιχα). Ο ποσοτικός προσδιορισμός της CSH (tobermorite: 100374) μαζί με CAH (ένυδρο υδροξείδιο του ασβεστίου: [16-0339] και ένυδρο ανθρακικό άλας αλουμινίου [41-0219]) μέσω της συγκεκριμένης ανάλυσης σε έχει

μεγάλη σημασία, καθώς συσχετίζεται με τη συνεχιζόμενη ενυδάτωση και την ποζολανική αντίδραση, που παίζουν βασικό ρόλο στη σκλήρυνση του τελικού σύνθετου υλικού.

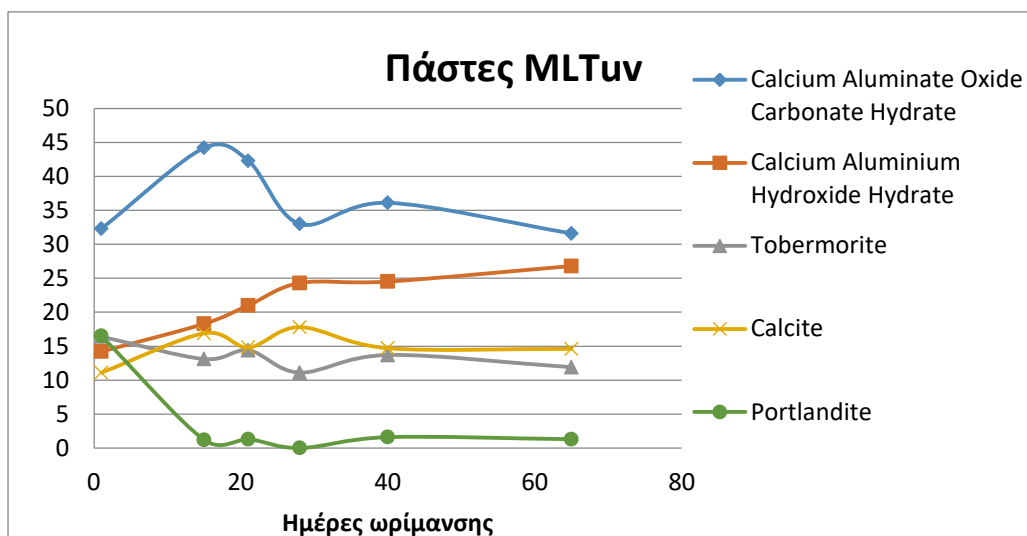
Στα παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις ορυκτών στις τρεις πάστες ML, MLT, MLTun, στις 1^η, 15^η, 21^η, 28^η και 40^η μέρα ωρίμανσης.



Διάγραμμα 4.9: Συγκεντρώσεις ορυκτών στις πάστες ML



Διάγραμμα 4.10: Συγκεντρώσεις ορυκτών στις πάστες MLT



Διάγραμμα 4.11: Συγκεντρώσεις ορυκτών στις πάστες MLTυν

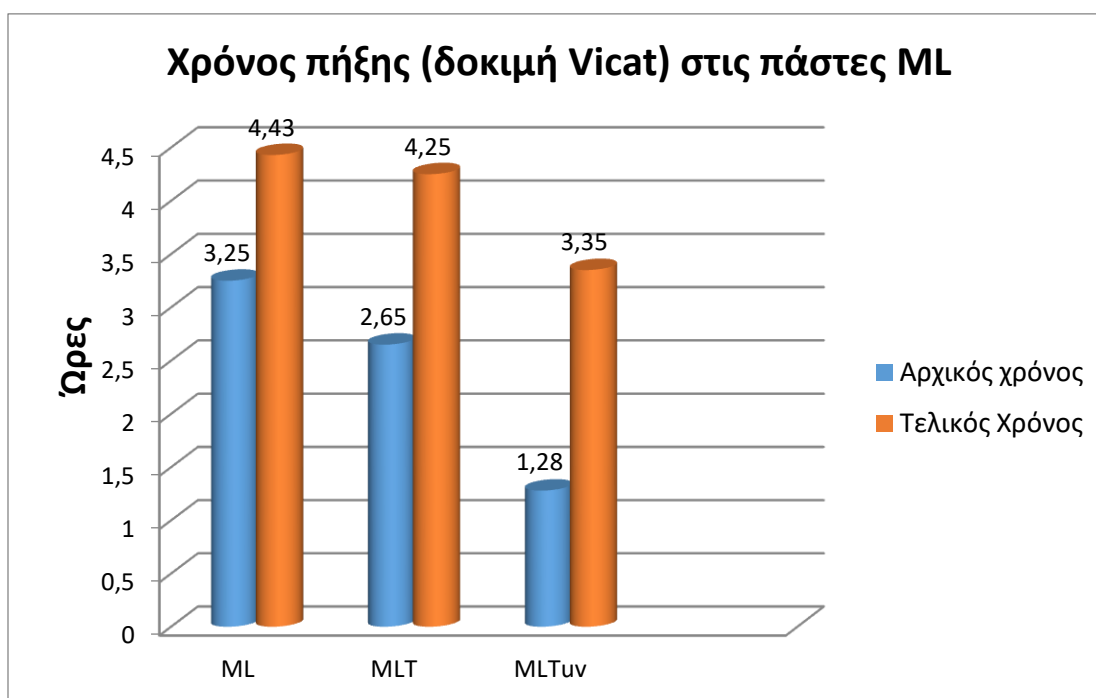
Παρατηρούμε ότι η αυξημένη σε ποσότητα συμμετοχή των ανθρακούχων ενώσεων, όπως του ανθρακικού αργιλικού ασβεστίου, στις πάστες με ενεργοποιημένη νανο-τιτανία είναι φανερή και σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης.

4.1.1.4 Χρόνος πήξης (Δοκιμή Vicat)

Η δοκιμή του χρόνου πήξης αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι αυτής της μελέτης καθώς ένα από τα ζητούμενα της παρούσας διπλωματικής είναι το κατά πόσο επιταχύνει την σκλήρυνση και πήξη των κονιαμάτων η παρουσία της νανο-τιτανίας καθώς και η ενεργοποίηση αυτής.

Όπως φάνηκε και από τις παραπάνω τεχνικές η παρουσία της ενεργοποιημένης νανο-τιτανίας στις συνθέσεις η διαδικασία της ενανθράκωσης ήταν πιο έντονη σε σχέση με τις πάστες χωρίς nT και μη ενεργοποιημένη nT τις πρώτες 15 μέρες ωρίμανσης.

Κατά τη δοκιμή Vicat διαπιστώνεται μεγάλη μείωση τόσο του αρχικού όσο και του τελικού χρόνου πήξης στην πάστα με ενεργοποιημένη nT, 61% και 24% αντίστοιχα.

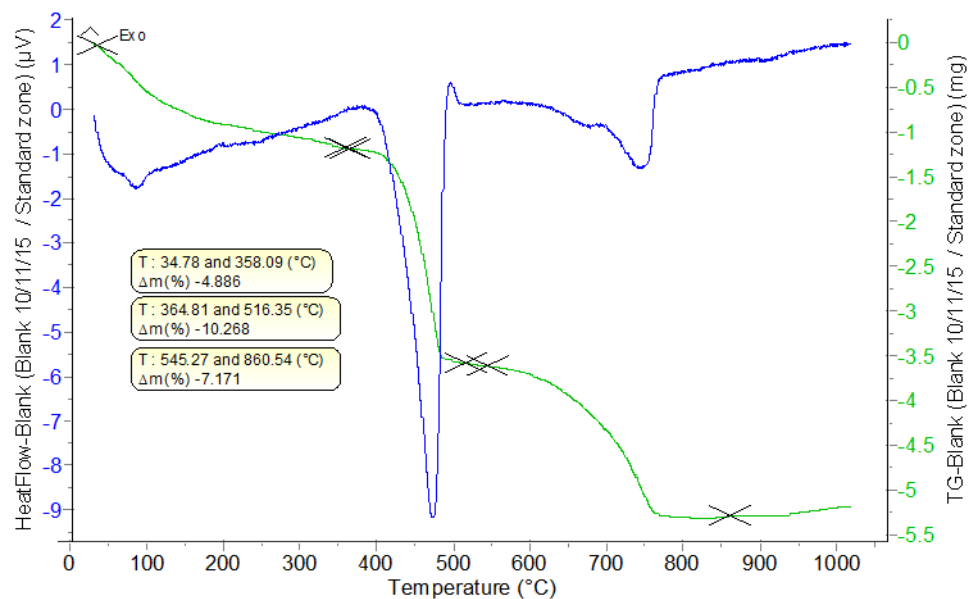


Διάγραμμα 4.12: Αρχικοί και τελικοί χρόνοι πήξης στις πάστες ML

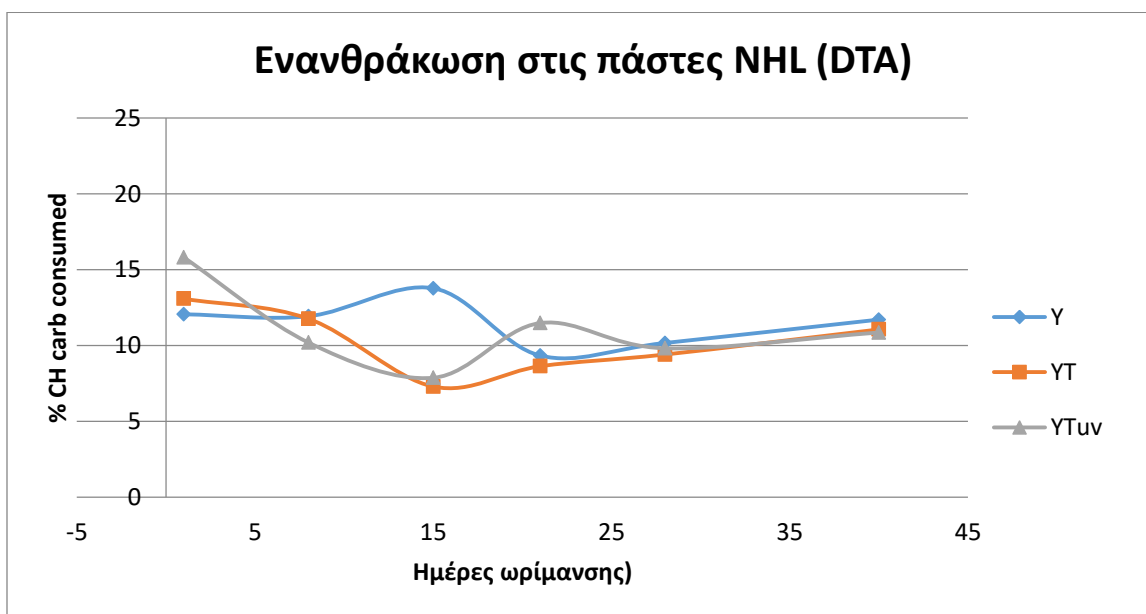
4.1.2 Πάστες με υδραυλική άσβεστο

4.1.2.1 Θερμική ανάλυση DTA

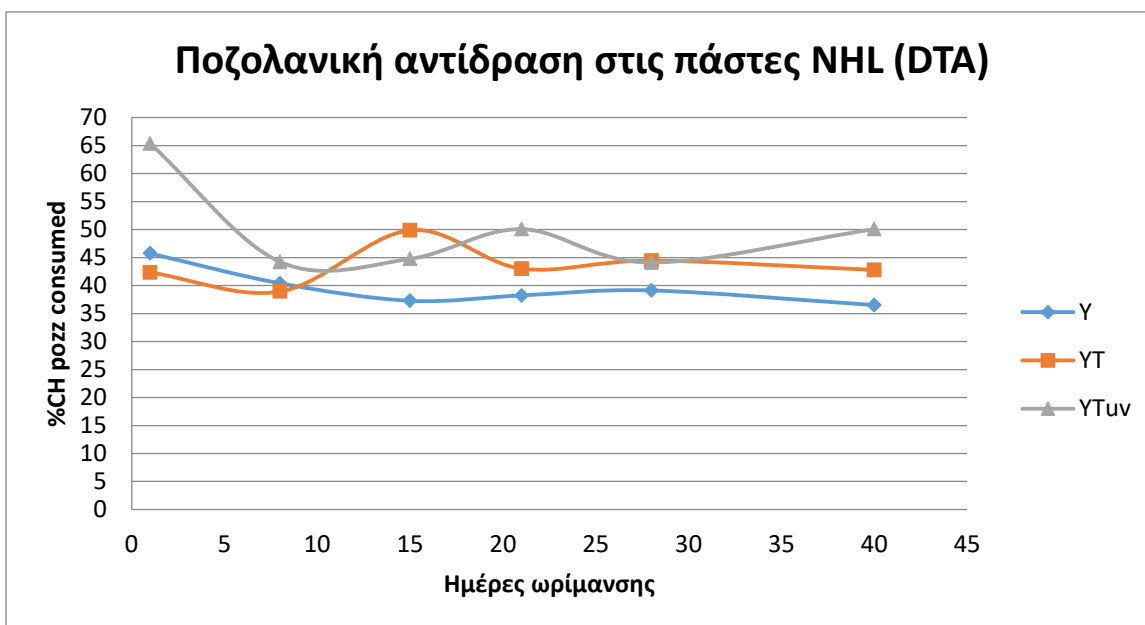
Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη ομάδα παστών, κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της θερμικής ανάλυσης, προσδιορίστηκε το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) σύμφωνα με μεθοδολογία που προτείνεται από τους Gameiro et al, καθώς επίσης χρησιμοποιήθηκαν και οι σχέσεις 4.1-4.3 για την ποσοτικοποίηση της ενανθράκωσης και της ποζολανικής αντίδρασης.



Διάγραμμα 4.13: Αποτελέσματα DTA/TG της πάστας Υ την 1^η μέρα ωρίμανσης



Διάγραμμα 4.14: Κατανάλωση ασβέστου κατά την ενανθράκωση στις πάστες με υδραυλική άσβεστο



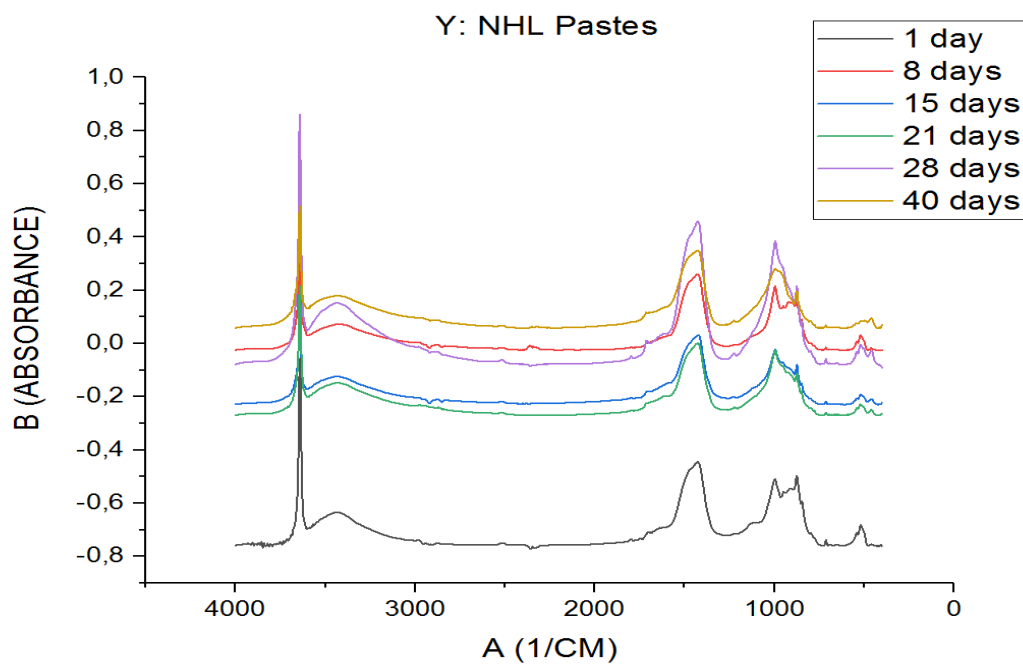
Διάγραμμα 4.15: Κατανάλωση ασβέστου κατά την ποζολανική αντίδραση στις πάστες με υδραυλική άσβεστο

Από τα δύο αυτά διαγράμματα προκύπτει ότι τόσο η ενανθράκωση όσο και η ποζολανική αντίδραση είναι υψηλές τις πρώτες μέρες χωρίς ωστόσο μεγάλες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις τρεις συνθέσεις Y, YT και YTuv. Αυτό που μπορούμε να σημειώσουμε είναι ότι στη σύνθεση με την ενεργοποιημένη τιτανία παρατηρείται υψηλή ποζολανική αντίδραση κατά την πρώτη μέρα.

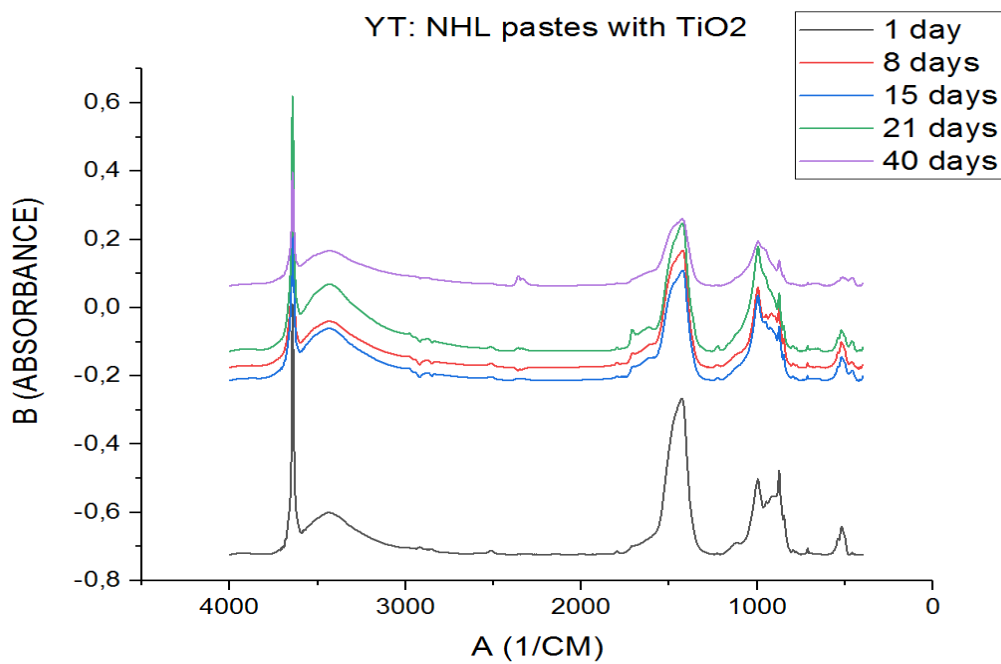
Το γεγονός ότι η ενανθράκωση τηρείται σε υψηλά επίπεδα μαζί με την ποζολανική αντίδραση εξηγείται καθώς στην υδραυλική άσβεστο κατά την υδρόλυση του υδροξειδίου του ασβεστίου παράγεται ασβεστίτης.

4.1.2.2 Φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

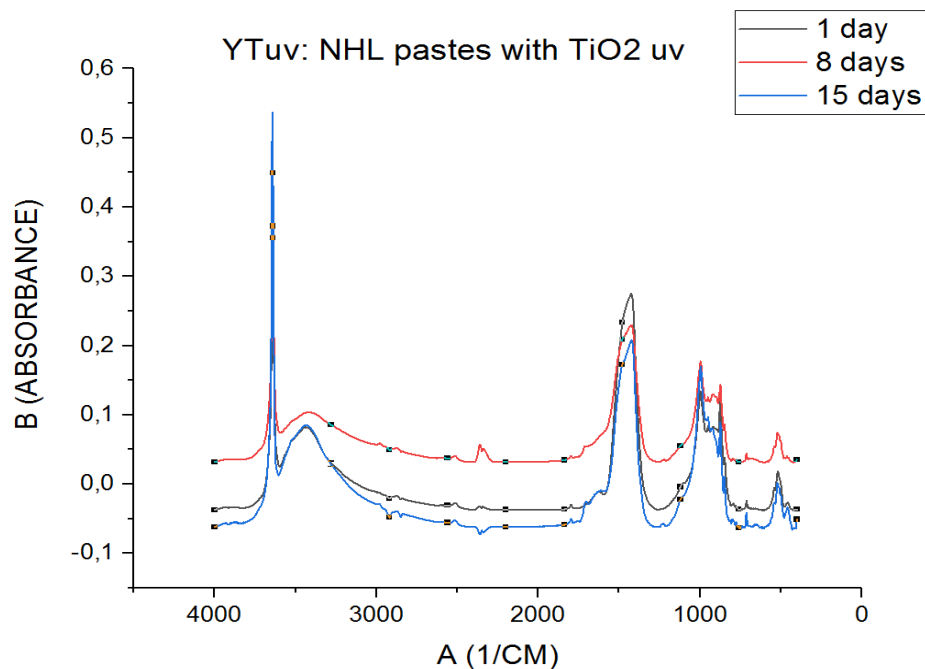
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης FTIR δεν δείχνουν τόσο ξεκάθαρα τις παραπάνω εκτιμήσεις. Οι αντιδράσεις ενανθράκωσης και του σχηματισμού υδραυλικών συστατικών αξιολογήθηκαν στα φάσματα της ανάλυσης μέσω της διαφοράς των κορυφών στις ενώσεις του πορτλαντίτη (3640 cm^{-1}), του ασβεστίτη ($1420, 870, 712\text{ cm}^{-1}$) και των Si-O-Si ενώσεων (995 cm^{-1}), δηλαδή υδραυλικά συστατικά.



Διάγραμμα 4.16: Φάσματα FTIR στις Y πάστες



Διάγραμμα 4.17: Φάσματα FTIR στις YT πάστες



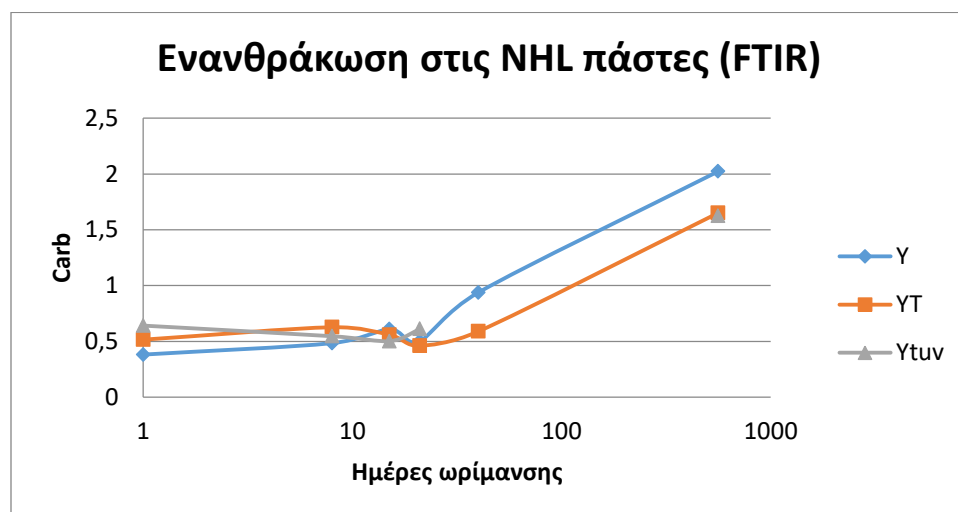
Διάγραμμα 4.18: Φάσματα FTIR στις ΥΤυν πάστες

Πιο συγκεκριμένα για την εκτίμηση της ενανθράκωσης γίνεται χρήση της εξίσωσης:

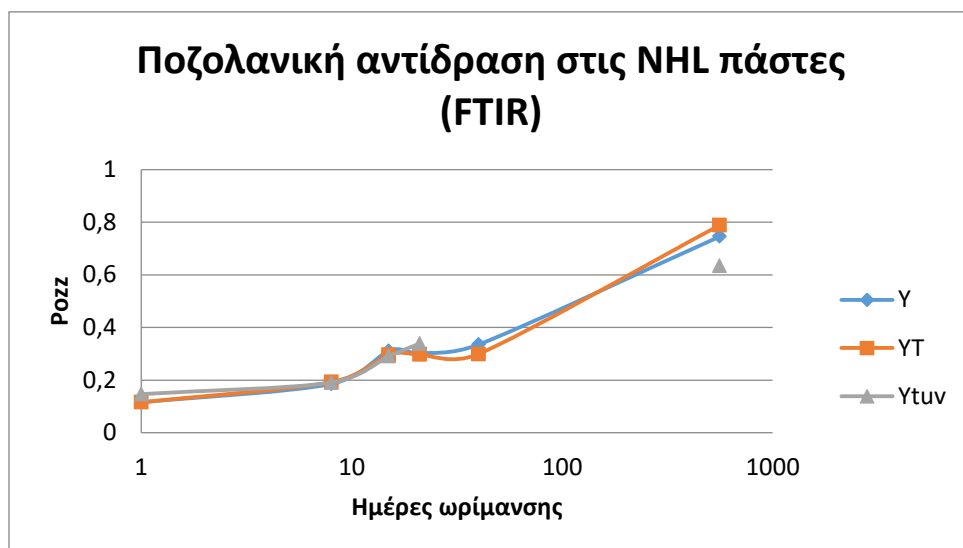
$$Carb = \frac{\text{peak CH (1418)}}{\text{peak Cc (3643)}} \quad (4.6)$$

Και για την εκτίμηση της ποζολανικής αντίδρασης:

$$Pozz = \frac{\text{peak Si-O (995)}}{\text{peak Cc (3640)}} \quad (4.7)$$



Διάγραμμα 4.19: Εκτίμηση της ενανθράκωσης στις πάστες NHL μέσω FTIR

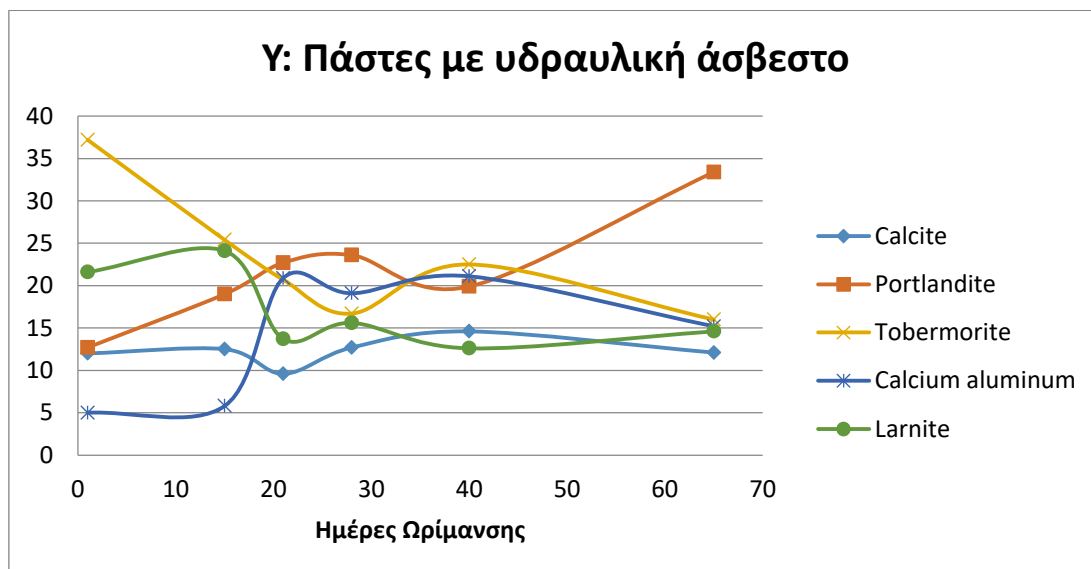


Διάγραμμα 4.20: Εκτίμηση της ποζολανικής αντίδρασης στις πάστες NHL μέσω FTIR

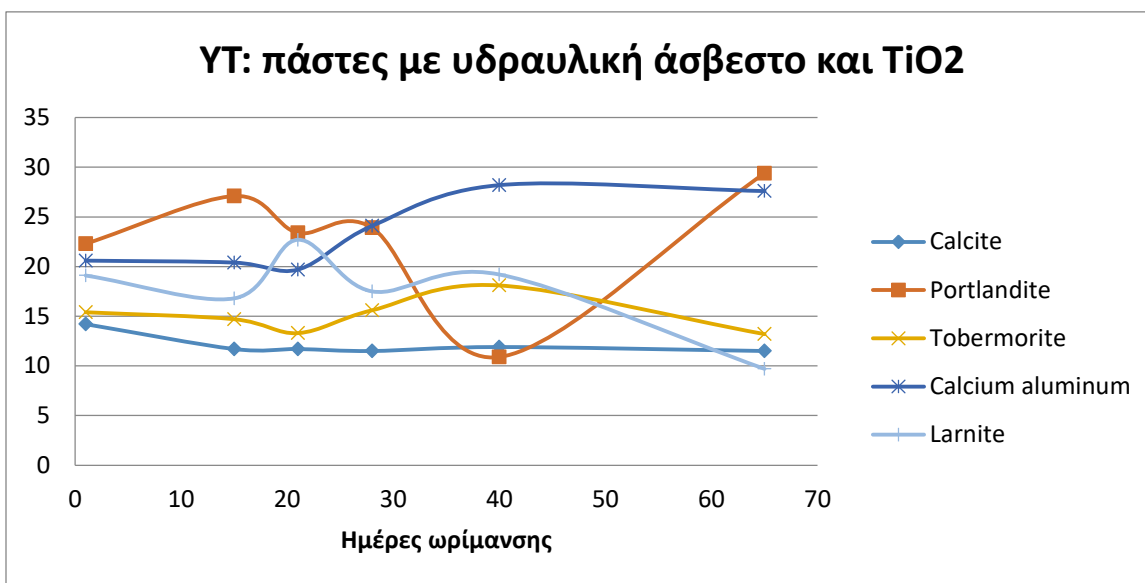
Παρατηρώντας και τα δύο γραφήματα δεν διαπιστώνονται διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών συνθέσεων, εκτός από την αυξημένη ενανθράκωση την πρώτη μέρα, πράγμα το οποίο είδαμε και από τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης.

4.1.2.3 Ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτινών X (XRD)

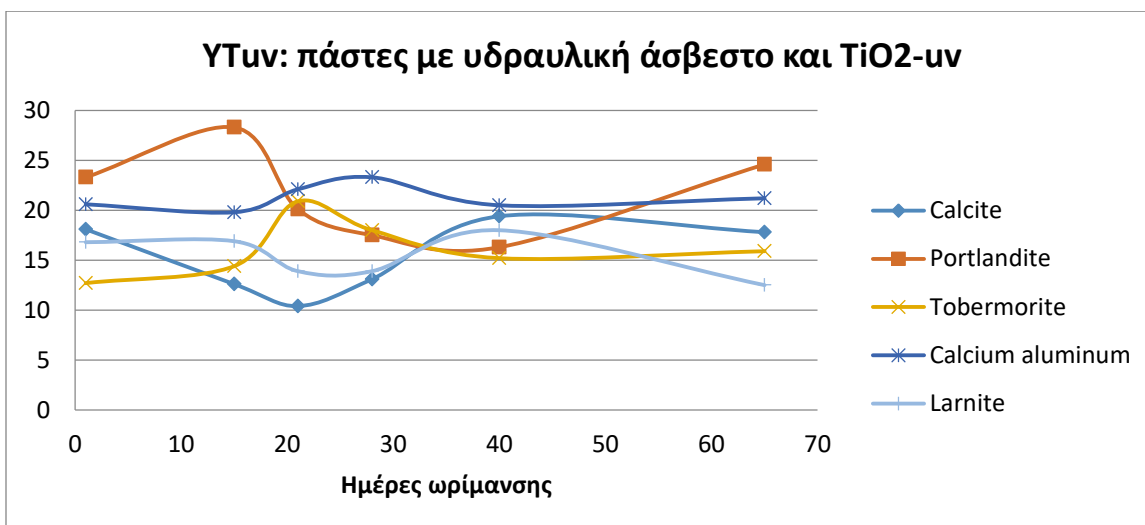
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ορυκτών στις 3 πάστες από την πρώτη έως την 65^η μέρα ωρίμανσης.



Διάγραμμα 4.21: Συγκεντρώσεις ορυκτών στις πάστες NHL



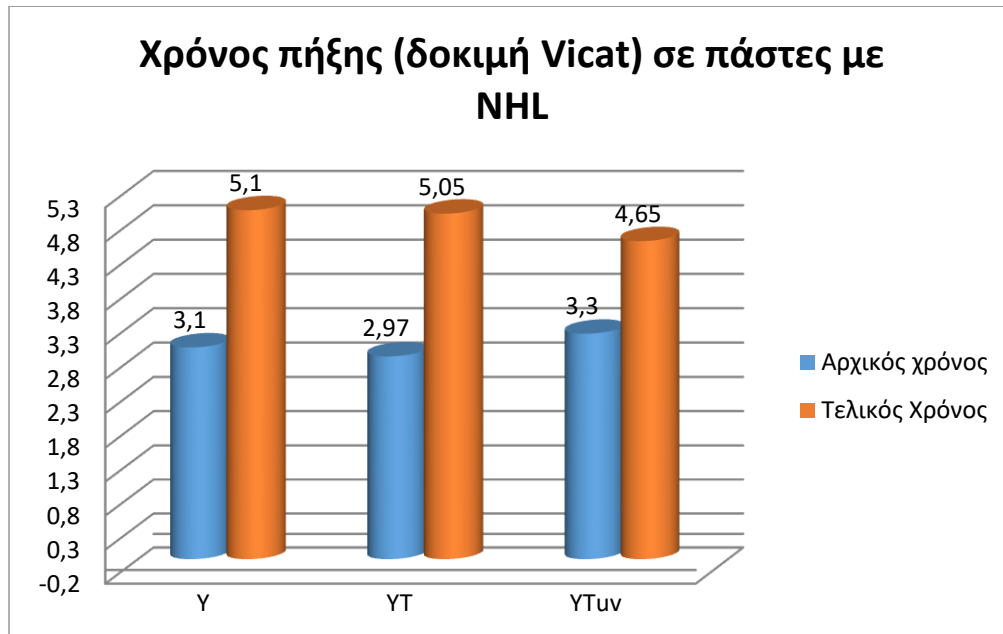
Διάγραμμα 4.22: Συγκεντρώσεις ορυκτών στις πάστες NHL με νανο-τιτανία



Διάγραμμα 4.23: Συγκεντρώσεις ορυκτών στις πάστες NHL με ενεργοποιημένη νανο-τιτανία

4.1.2.4 Χρόνος πήξης (Δοκιμή Vicat)

Όπως φάνηκε και από τις παραπάνω τεχνικές η παρουσία της ενεργοποιημένης νανο-τιτανίας στις συνθέσεις με υδραυλική άσβεστο, η διαδικασία της ενανθράκωσης δεν ήταν εμφανώς εντονότερη με τις πάστες χωρίς nT και μη ενεργοποιημένη nT όπως συνέβη στις συνθέσεις με μετακαολίνη- υδράσβεστο. Ωστόσο, κατά τη δοκιμή Vicat διαπιστώνεται μείωση του τελικού χρόνου πήξης στην πάστα με ενεργοποιημένη nT κατά 9% σε σχέση με τον τελικό χρόνο πήξης της πάστας χωρίς νανο-τιτανία. Ο αρχικός χρόνος πήξης κυμαίνεται περίπου στις ίδιες τιμές και στις τρεις συνθέσεις.



Διάγραμμα 4.24: Αρχικοί και τελικοί χρόνοι πήξης στις πάστες με υδραυλική άσβεστο

4.2 Μηχανικά αποτελέσματα

Σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα αποτελέσματα των παστών, στο παρόν κεφάλαιο τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών στα κονιάματα θα παρουσιαστούν σε δύο μέρη. 1) Κονιάματα με υδράσβεστο και μετακαολίνη και 2) κονιάματα υδραυλική άσβεστο.

4.2.1 Κονιάματα με υδράσβεστο μετακαολίνη

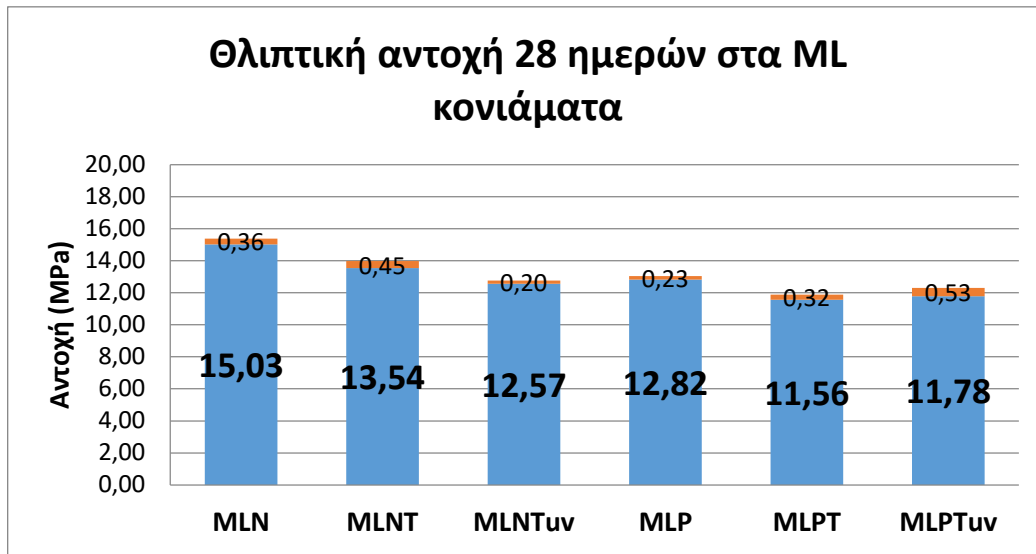
4.2.1.1 Μονοαξονική θλίψη

Η δοκιμή σε αξονική θλίψη αρχικά στις 28 μέρες πέρα από τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής μας προσφέρει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας και το δείκτη δυσθραυστότητας. Έπειτα γίνονται δοκιμές στους τρεις και έξι μήνες και υπολογίζεται η αντίστοιχη αντοχή.

Δοκιμή 28 ημερών

Η θλιπτική αντοχή αποτελεί είναι βασικό μηχανικό χαρακτηριστικό των κονιαμάτων και σημαντικό μέγεθος σχεδιασμού αλλά και αποτίμησης των κατασκευών συμπεριλαμβανομένων και των μνημείων. Η αντοχή των 28 ημερών αποτελεί και χαρακτηριστική αντοχή για τα κονιάματα όπως και στο σκυρόδεμα.

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται οι αντοχές των 6 συνθέσεων στις 28 μέρες.

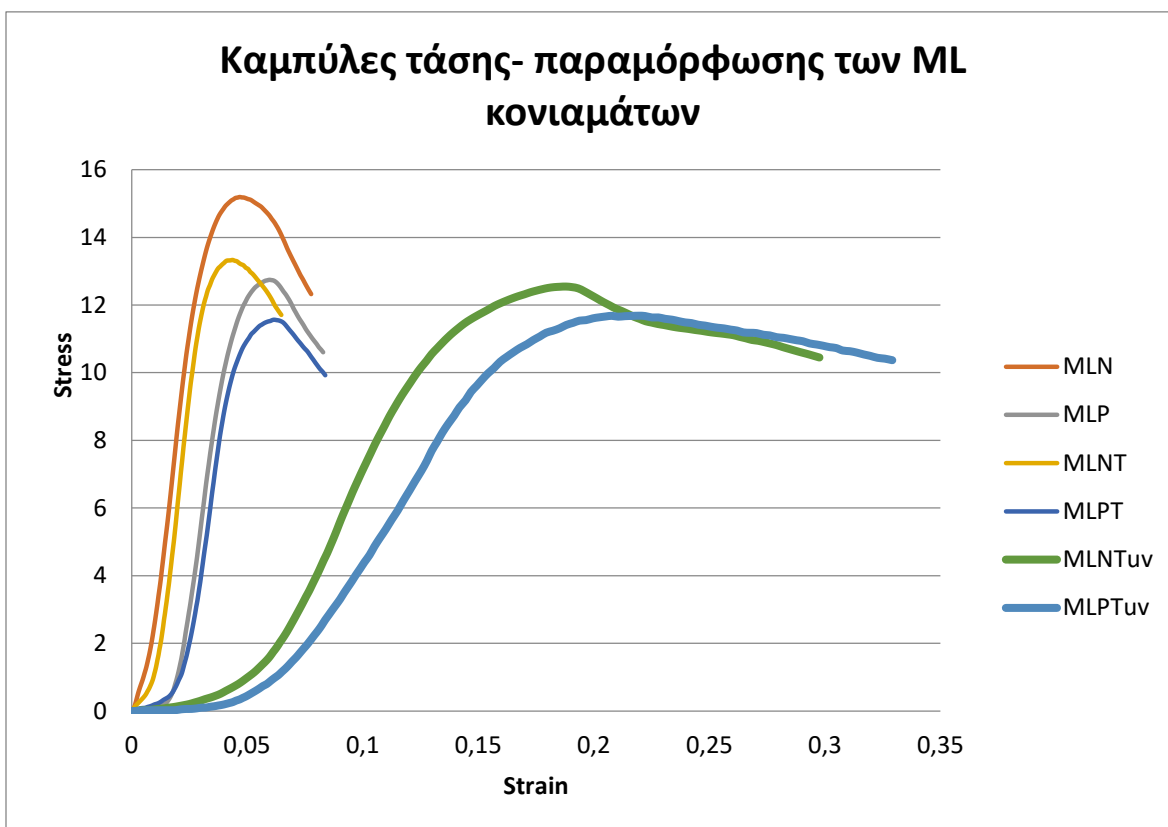


Διάγραμμα 4.25: Θλιπτική αντοχή 28 ημερών στα ML κονιάματα

Διαπιστώνεται ότι:

- Οι συνθέσεις με νταμαρίσια άμμο (N) παρουσιάζουν υψηλότερες ανοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσια άμμο (P).
- Οι συνθέσεις χωρίς την προσθήκη νανο-τιτανίας έχουν υψηλότερες τιμές αντοχής.
- Οι συνθέσεις με την ενεργοποιημένη τιτανία σε σχέση με αυτές χωρίς την ενεργοποιημένη δεν παρουσιάζουν σοβαρές διαφοροποιήσεις.
- Τη μέγιστη αντοχή παρουσιάζει το κονίαμα MLN με
 $\sigma_{\max} = 15.03 \text{ MPa} \pm 0.36$
- Την ελάχιστη αντοχή παρουσιάζει το κονίαμα MLPT με
 $\sigma_{\min} = 11.56 \text{ MPa} \pm 0.32$

Για να προσδιορίσουμε το μέτρο ελαστικότητας και το δείκτη δυσθραυστότητας χρησιμοποιούμε την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα συγκεντρώνονται όλες οι καμπύλες των έξι διαφορετικών συνθέσεων.

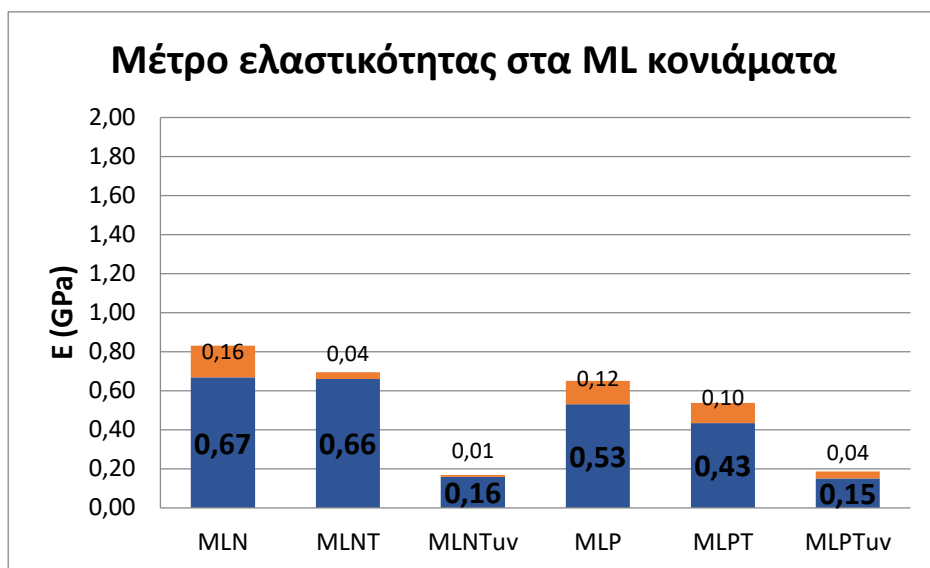


Διάγραμμα 4.26: Καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης στις 28 μέρες των ML κονιαμάτων

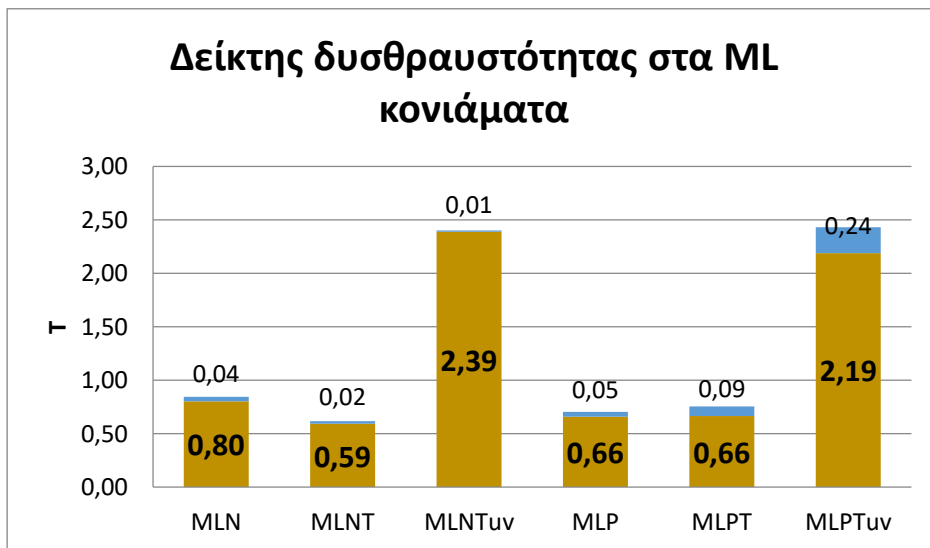
Με βάση αυτό το διάγραμμα σημειώνουμε τα εξής:

- Οι τέσσερις συνθέσεις MLN, MLNT, MLP, MLPT παρά τη διαφορετική μέγιστη τιμή (αντοχή) που έχουν παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά στον ελαστικό κλάδο.
- Οι συνθέσεις με την ενεργοποιημένη τιτανία (MLNTuv, MLPTuv) παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές στις παραμορφώσεις και ιδιαίτερα πλαστική συμπεριφορά (μεγάλη παραμόρφωση υπό την ίδια τάση).

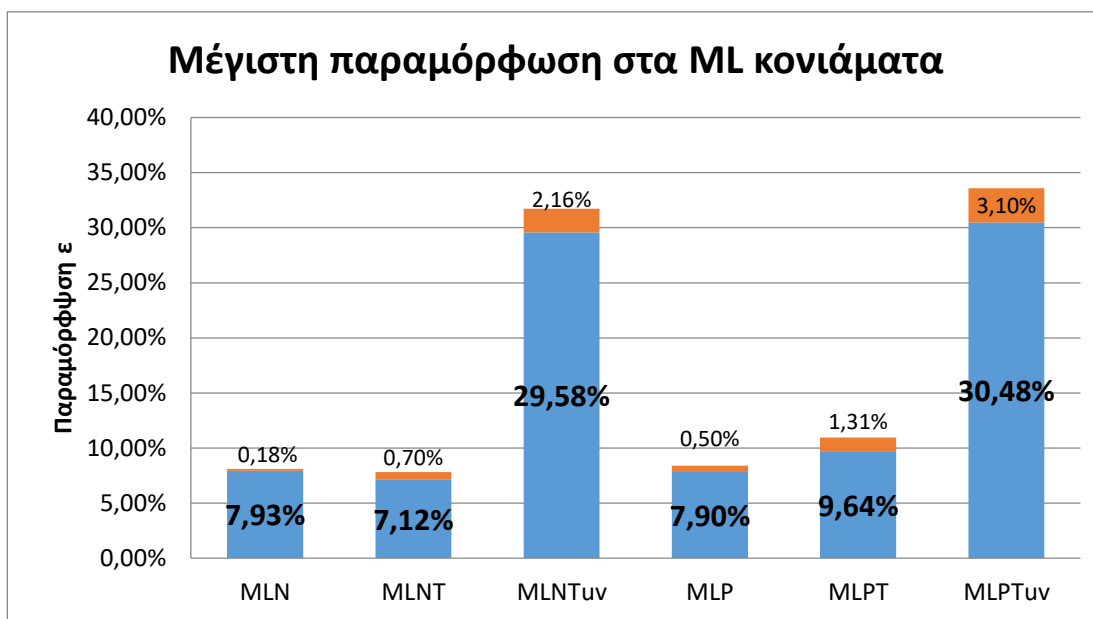
Οι δυο παραπάνω παρατηρήσεις συμπυκνώνονται και στα επόμενα ραβδογράμματα του μέτρου ελαστικότητας, δείκτη δυσθραυστότητας.



Διάγραμμα 4.27: Μέτρο ελαστικότητας στα ML κονιάματα



Διάγραμμα 4.28: Δείκτης δυσθραυστότητας στα ML κονιάματα



Διάγραμμα 4.29: Μέγιστη παραμόρφωση στα ML κονιάματα

- Τα κονιάματα με ενεργοποιημένη τιτανία έχουν το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας ενώ το μεγαλύτερο παρουσιάζει το κονίαμα MLN.

Μέγιστη τιμή E: $E_{MLN} = 0.67 \pm 0.16 \text{ GPa}$

Ελάχιστη τιμή E: $E_{MLNTuv} = 0.16 \pm 0.01 \text{ GPa}$

- Τα κονιάματα με ενεργοποιημένη τιτανία παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγαλύτερη δυσθραυστότητα σε σχέση με τα άλλα. Αυτό το γεγονός είναι πολύ θετικό δεδομένου ότι αυτός ο δείκτης εκφράζει πόσο δύσκολα σπάει το δοκίμιο και σε συνδυασμό με τις μεγάλες παραμορφώσεις αυτών των συνθέσεων συμπεραίνουμε ότι έχουν πιο πλαστική συμπεριφορά.

Μέγιστες τιμές T: $T_{MLNTuv} = 2.39 \pm 0.01$, $T_{MLPTuv} = 2.19 \pm 0.24$

Ελάχιστες τιμές T: $T_{MLNT} = 0.59 \pm 0.02$, $T_{MLP} = 0.66 \pm 0.05$

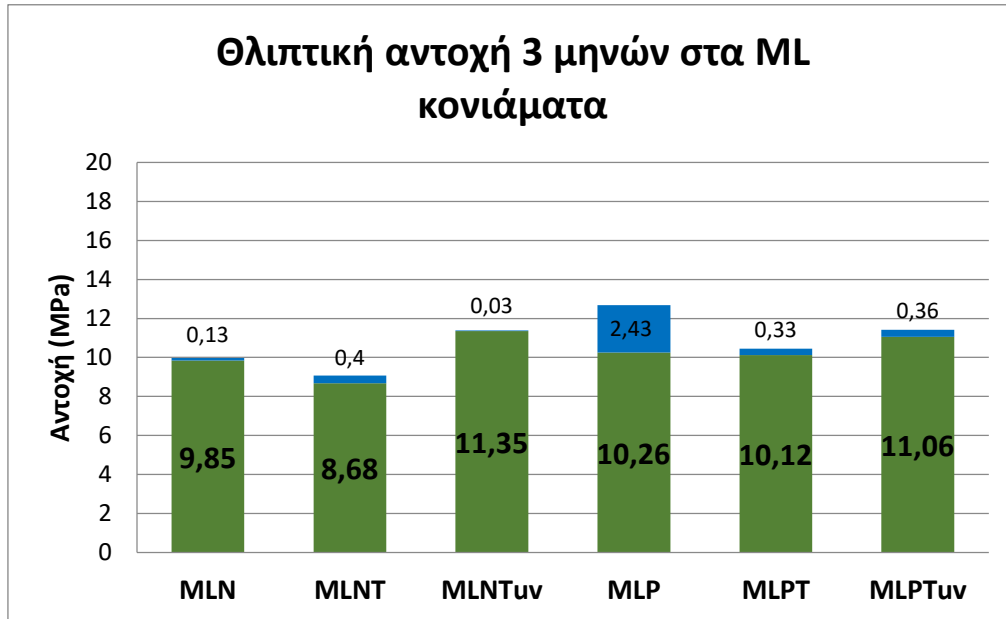
- Τα κονιάματα με την ενεργοποιημένη τιτανία έχουν υπερδιπλάσια παραμόρφωση σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις.

Μέγιστες τιμές ε: $\epsilon_{MLNTuv} = 29.58 \pm 2.16 \%$, $\epsilon_{MLPTuv} = 30.48 \pm 3.10 \%$

Ελάχιστες τιμές ε: $\epsilon_{MLNT} = 7.12 \pm 0.70 \%$, $\epsilon_{MLP} = 7.90 \pm 0.50 \%$

Δοκιμή 3 μηνών

Οι παραπάνω συνθέσεις χυτεύτηκαν και έσπασαν και στους τρεις μήνες. Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 3 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.30: Θλιπτική αντοχή 3 μηνών στα ML κονιάματα

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

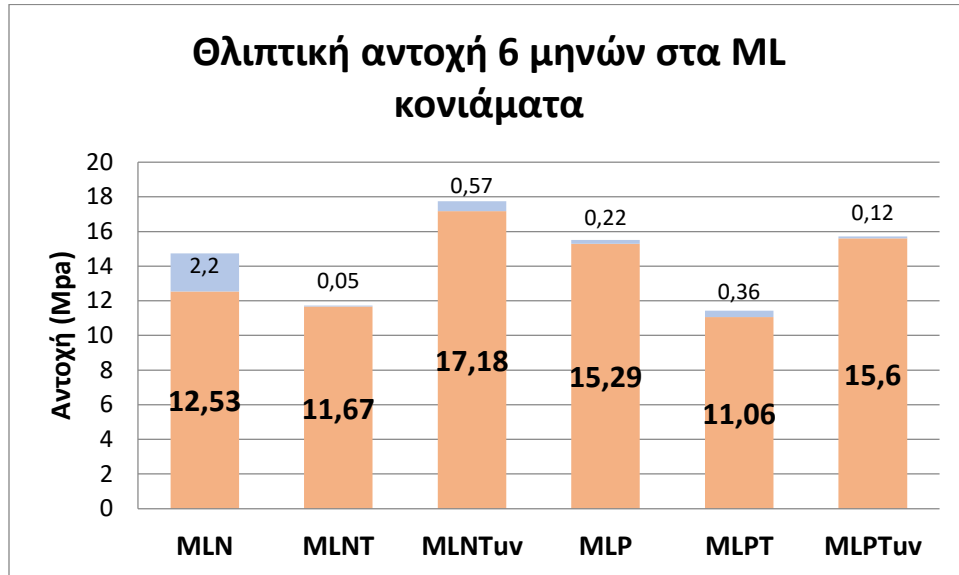
- Δεν παρατηρείται η ίδια τάση με τις 28 ημέρες όπου τα κονιάματα με την νταμαρίσια άμμο είχαν μεγαλύτερες αντοχές. Αντίθετα, οι συνθέσεις με την ποταμίσια άμμο παρουσιάζουν και στις δύο περιπτώσεις (χωρίς nT, με nT) μεγαλύτερες αντοχές ενώ στην τρίτη περίπτωση (με nTuv) όταν δεν λαμβάνουμε υπόψη την τυπική απόκλιση το MLNTuv έχει πιο υψηλή αντοχή.
- Στα κονιάματα με τη νταμαρίσια άμμο η μέγιστη αντοχή παρουσιάζεται στη σύνθεση με την ενεργοποιημένη τιτανία ενώ στα κονιάματα με την ποταμίσια υπάρχουν μικρές διαφορές.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη αντοχή στους τρεις μήνες έχουμε:

MLNTuv: $\sigma_{\max} = 11.35 \pm 0.03 \text{ MPa}$

MLNT: $\sigma_{\min} = 8.68 \pm 0.40 \text{ MPa}$

Δοκιμή 6 μηνών

Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 6 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.31: Θλιπτική αντοχή 6 μηνών στα ML κονιάματα

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

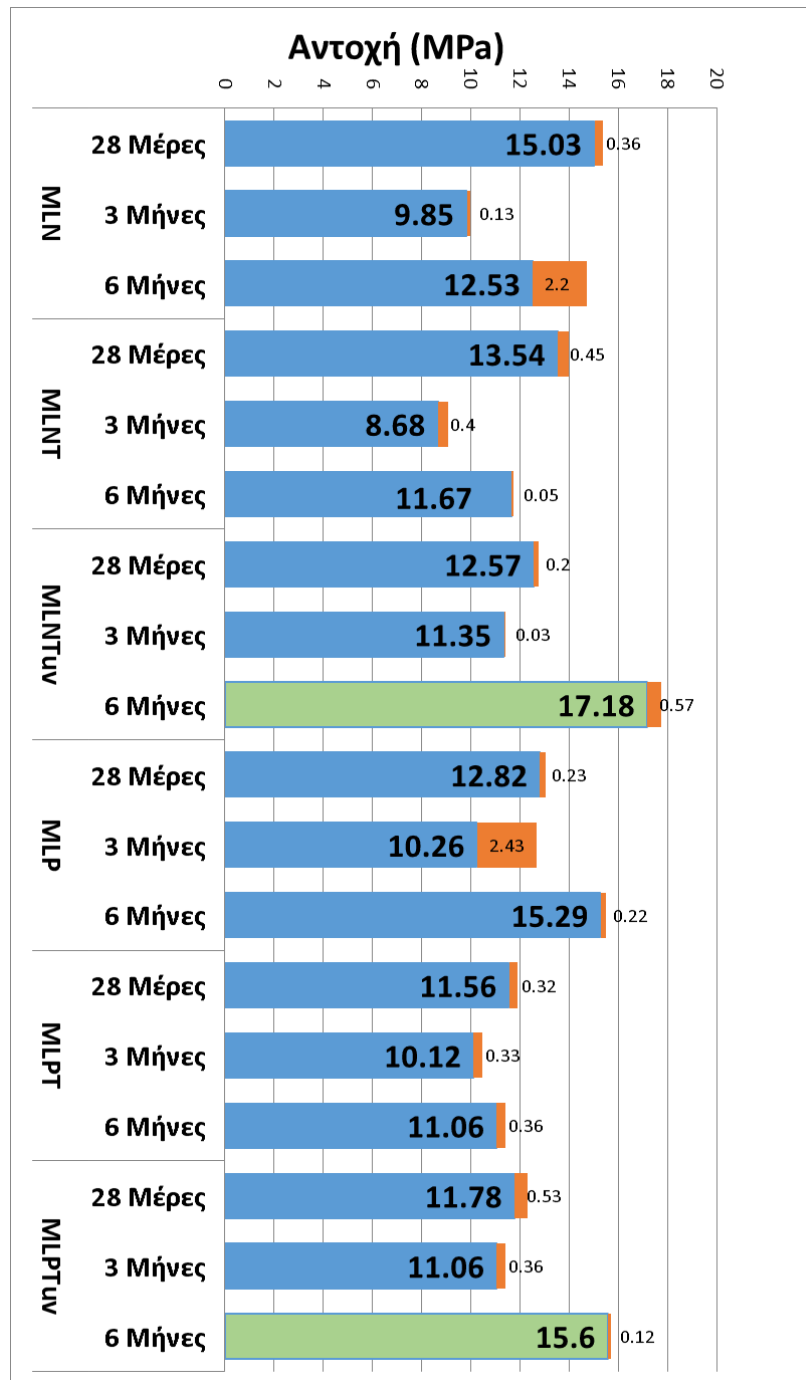
- Δεν υπάρχει ξεκάθαρη τάση για το αν η νταμαρίσια ή η ποταμίσια άμμος δίνει μεγαλύτερες αντοχές. Στην περίπτωση που δεν έχουμε νανο-τιτανία η σύνθεση με την ποταμίσια έχει μεγαλύτερη τιμή. Όταν η νανο-τιτανία δεν είναι ενεργοποιημένη δεν σημειώνονται σοβαρές διαφοροποιήσεις και όταν είναι ενεργοποιημένη η νταμαρίσια άμμος δίνει μεγαλύτερη αντοχή.
- Συγκρίνοντας την επιρροή της νανο-τιτανίας παρατηρούμε ότι η ενεργοποιημένη nT δίνει μεγαλύτερες αντοχές ειδικά στην περίπτωση του MLNTuv. Η μη ενεργοποιημένη nT δίνει τις χαμηλότερες τιμές.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη αντοχή στους έξι μήνες έχουμε:

MLNTuv: $\sigma_{\max} = 17.18 \pm 0.57 \text{ MPa}$

MLPT: $\sigma_{\min} = 11.06 \pm 0.36 \text{ MPa}$

Συγκριτική θεώρηση των τριών δοκιμών της θλίψης

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για τις 6 συνθέσεις οι αντοχές στις 28 ημέρες, 3 και 6 μήνες.



Διάγραμμα 4.32: Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών, 3 και 6 μηνών στα ML κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Τα κονιάματα παρουσιάζουν μετά τις 28 μέρες μια μείωση στην αντοχή τους στους 3 μήνες, η οποία όμως αυξάνεται έπειτα στους 6 μήνες.
- **Αναφορικά με την νανο-τιτανία παρατηρούμε ότι όταν είναι ενεργοποιημένη φτάνει στους έξι μήνες να ξεπερνά την αντοχή των 28 ημερών και μάλιστα να ξεπερνά και την αντίστοιχη αντοχή των κονιαμάτων χωρίς nT και με μη ενεργοποιημένη nT. Αυτό το**

συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό μιας και αποδεικνύει ότι η προσθήκη νανο-τιτανίας δεν στερεί μηχανικές ιδιότητες στα κονιάματα αντιθέτως συνεισφέρει.

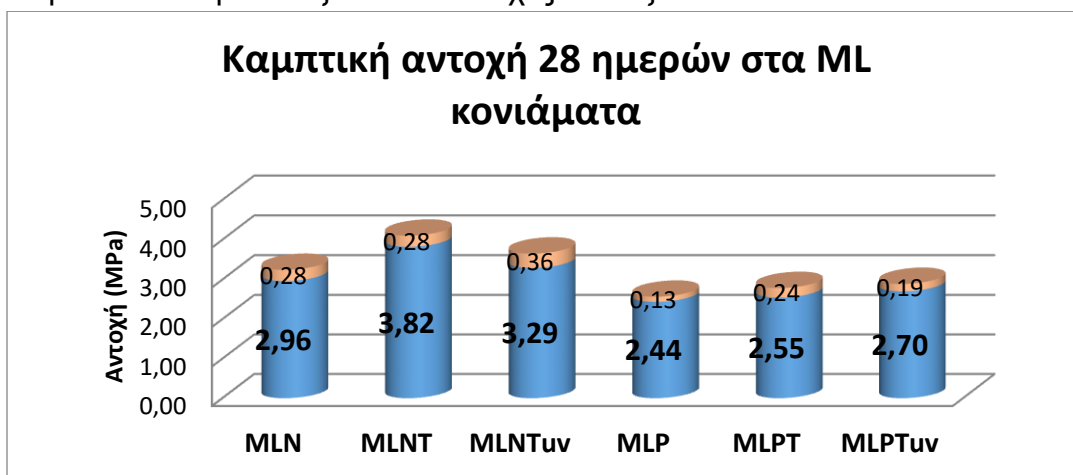
Τέλος, τα κονιάματα με τη μη ενεργοποιημένη τιτανία παρουσιάζουν παρόμοια τάση και κοντινές τιμές με αυτά χωρίς ηΤ γεγονός που δείχνει ότι αν δεν γίνει έκθεση της νανο-τιτανίας σε ακτινοβολία UV δεν έχουμε διαφοροποιήσεις.

4.2.1.2 Κάμψη τριών σημείων

Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των κονιαμάτων σε κάμψη η οποία όπως έχει αναφερθεί δίνει πληροφορίες για την συμπεριφορά των υλικών σε εφελκυσμό αφού οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κάτω ίνα του δοκιμίου είναι εφελκυστικές.

Δοκιμή 28 ημερών

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντοχές των έξι συνθέσεων.



Διάγραμμα 4.33: Αντοχή σε κάμψη 28 ημερών στα ML κονιάματα
Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Οι συνθέσεις που έχουν ως αδρανές τη νταμαρίσια άμμο έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσια.
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη, οι συνθέσεις παρουσιάζουν διαφορετική τάση ανάλογα με το αδρανές. Στα κονιάματα με νταμαρίσια άμμο η νανο-τιτανία δίνει μεγαλύτερα αποτελέσματα ιδιαίτερα η μη ενεργοποιημένη. Στα κονιάματα με την ποταμίσια άμμο πάλι η τιτανία δίνει μεγαλύτερες αντοχές με μέγιστη αυτή της ενεργοποιημένης.

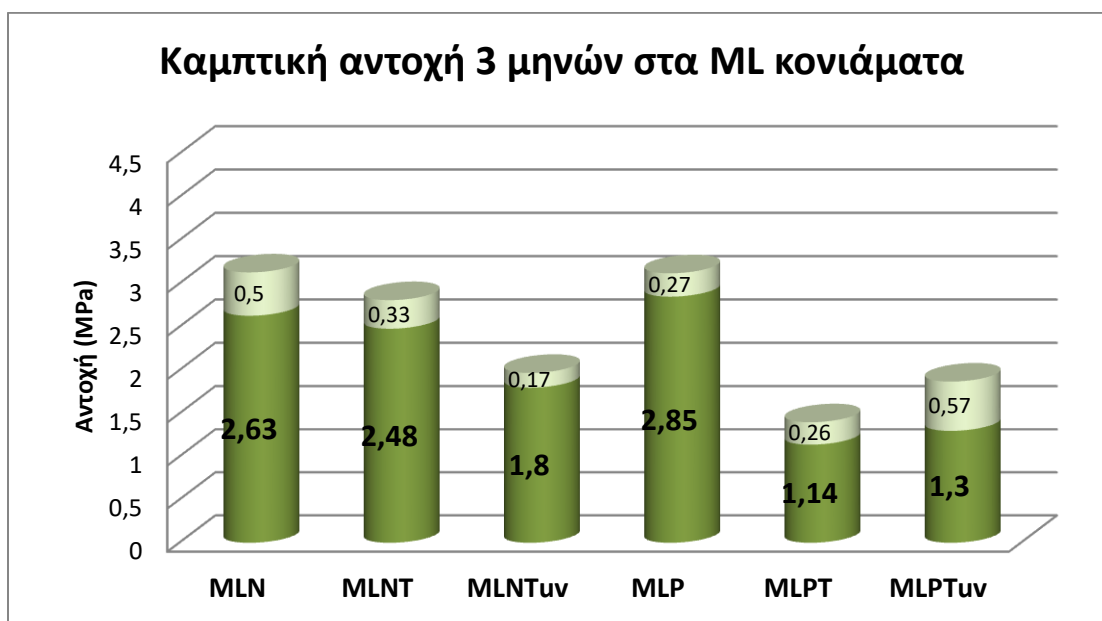
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη καμπτική αντοχή έχουμε:

MLNT: $\sigma_{\max} = 3.82 \pm 0.28 \text{ MPa}$

MLP: $\sigma_{\min} = 2.44 \pm 0.13 \text{ MPa}$

Δοκιμή 3 μηνών

Οι παραπάνω συνθέσεις χυτεύτηκαν και έσπασαν και στους τρεις μήνες. Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 3 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.34: Αντοχή σε κάμψη 3 μηνών στα ML κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Οι συνθέσεις που έχουν ως αδρανές τη νταμαρίσια άμμο έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσις με εξαίρεση την περίπτωση όπου δεν έχουμε προσθήκη νανο-τιτανίας.
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη, παρατηρείται ότι οι συνθέσεις χωρίς την προσθήκη nT έχουν υψηλότερες αντοχές. επίσης στα κονιάματα με νταμαρίσια άμμο η μη ενεργοποιημένη nT δίνει μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με αυτά με την ενεργοποιημένη ενώ το αντίστροφο συμβαίνει στα κονιάματα με την ποταμίσις άμμο.

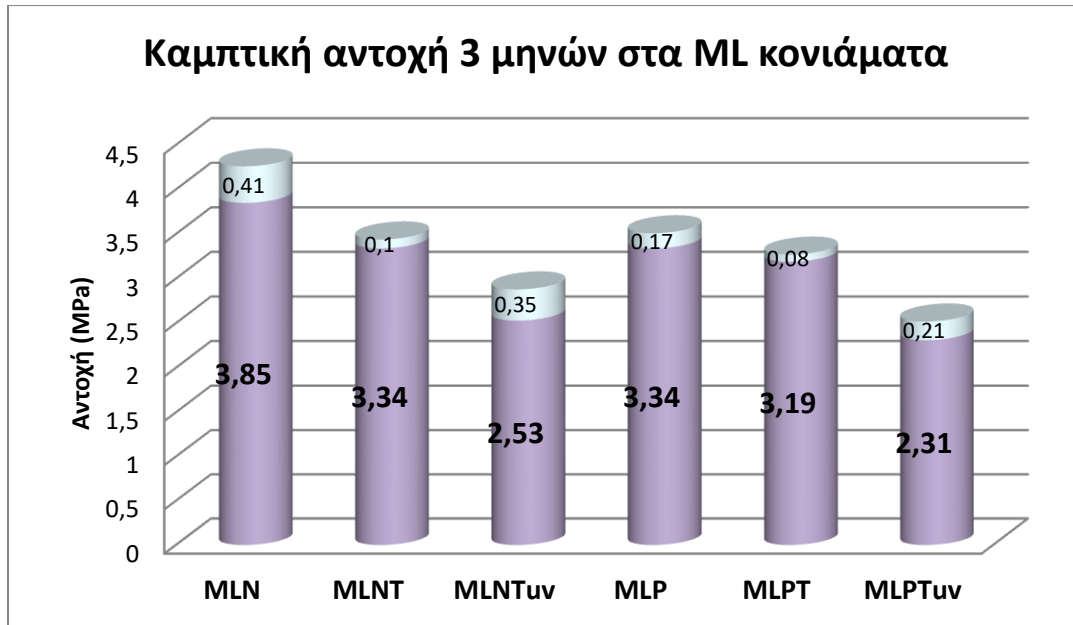
Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη καμπτική αντοχή έχουμε:

MLP: $\sigma_{\max} = 3.82 \pm 0.27 \text{ MPa}$

MLPT: $\sigma_{\min} = 2.14 \pm 0.26 \text{ MPa}$

Δοκιμή 6 μηνών

Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 6 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.35: Αντοχή σε κάμψη 3 μηνών στα ML κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

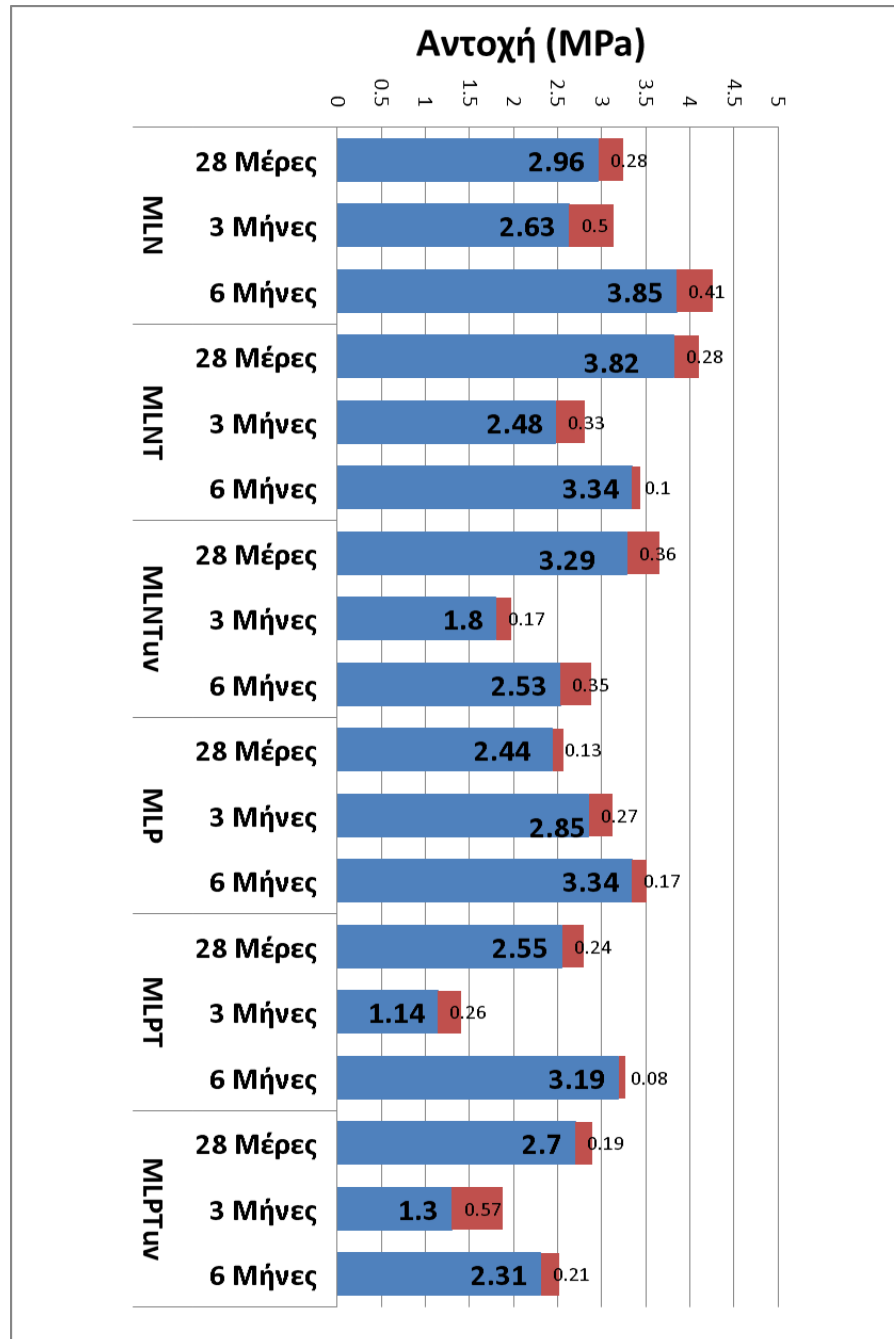
- Οι συνθέσεις που έχουν ως αδρανές τη νταμαρίσια άμμο έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσια.
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη, παρατηρείται ότι οι συνθέσεις χωρίς την προσθήκη nT έχουν υψηλότερες αντοχές και ταυτόχρονα η μη ενεργοποιημένη τιτανία δίνει μεγαλύτερες αντοχές από την ενεργοποιημένη.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη καμπτική αντοχή έχουμε:

MLN: $\sigma_{\max} = 3.85 \pm 0.41 \text{ MPa}$

MLPTuv: $\sigma_{\min} = 2.31 \pm 0.21 \text{ MPa}$

Συγκριτική θεώρηση των τριών δοκιμών της κάμψης

Αρχικά για τις αντοχές σε κάμψη που παρουσιάστηκαν παραπάνω βλέπουμε ότι είναι συνολικά σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός αναμενόμενο μιας και τα κονιάματα δεν έχουν εφελκυστική ικανότητα. Όποτε, όποιες διαφοροποιήσεις υπάρχουν είναι σε χαμηλά ποσοστά.



Διάγραμμα 4.36: Καμπτικές αντοχές 28 ημερών, 3 και 6 μηνών στα ML κονιάματα

Συγκρίνοντας τις τιμές των αντοχών στις 28 ημέρες, τους 3 και 6 μήνες διαπιστώνουμε τα εξής:

- Στα κονιάματα MLN και MLPT η αντοχή των 3 μηνών πέφτει σε σχέση με αυτή των 28 ημερών ενώ στους έξι μήνες αυξάνεται ξεπερνώντας την αντοχή και των 28 ημερών.
- Στα κονιάματα MLNT, MLNT_{uv} και MLPT_{uv} στους 3 μήνες η αντοχή μειώνεται και αυξάνεται πάλι στους 6 μήνες, χωρίς όμως να φτάσει τα επίπεδα των 28 ημερών.
- Στα κονιάματα MLP η αντοχή αυξάνεται από τις 28 μέρες, στους 3 και στους 6 μήνες, ακολουθεί δηλαδή αυξητική πορεία.

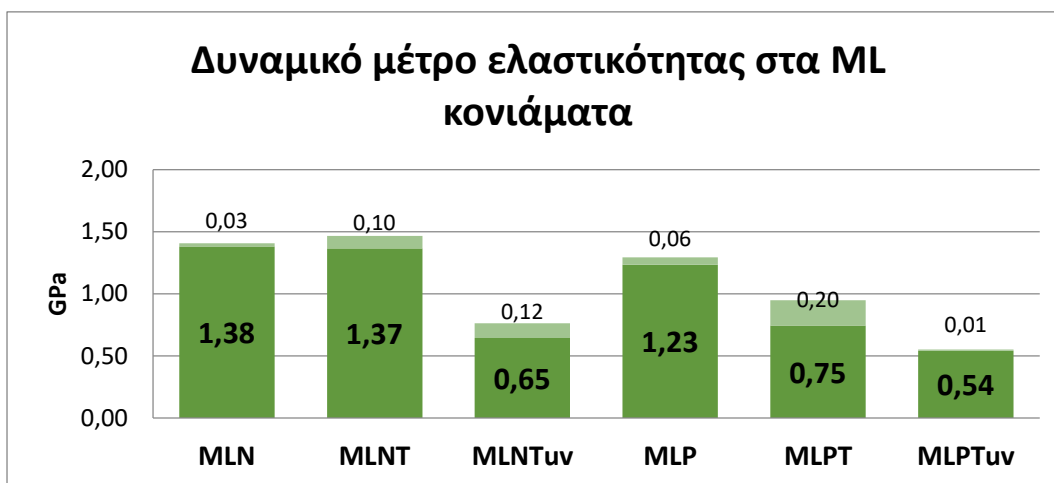
4.2.1.3 Μέτρηση υπερήχων

Κατά τη χύτευση των δοκιμίων για θλίψη και κάμψη κατασκευάστηκαν και κωνοειδή δοκίμια για τη μέτρηση των υπερήχων. Για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έγινε εμβαπτισμός των δοκιμίων σε βαθμονομημένο δοχείο με νερό για τον υπολογισμό του όγκου τους.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 4.1: Μέτρηση υπερήχων και υπολογισμός δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Σύνθεση	Μάζα (gr)	Όγκος (ml)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Χρόνος (μs)	Ταχύτητα (m/s)	Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας	
						M.O (GPa)	STDEV
MLN	431,62	245,00	176,26	25,90	2800,00	1,38	0,03
MLNT	380,95	221,82	172,52	29,88	2606,25	1,37	0,10
MLNT _{uv}	351,82	202,50	173,47	33,15	1925,00	0,65	0,12
MLP	458,95	262,50	174,97	29,75	2655,00	1,23	0,06
MLPT	443,17	255,00	173,87	26,38	2176,25	0,75	0,20
MLPT _{uv}	333,10	195,00	170,81	33,95	1780,00	0,54	0,01



Διάγραμμα 3.37: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας στα ML κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

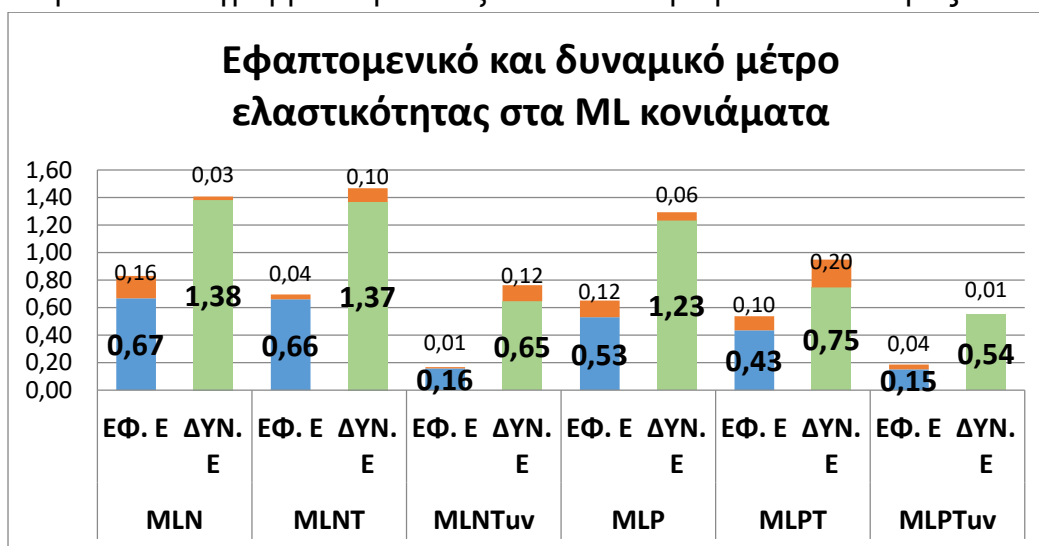
- Οι συνθέσεις με νταμαρίσια άμμο έχουν μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις συνθέσεις με ποταμίσια άμμο.
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο- τιτανίας τα κονιάματα με σκέτο υδράσβεστο και μετακαολίνη έχουν πιο υψηλές τιμές.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη τιμή έχουμε:

Μέγιστη τιμή D E: $E_{MLN} = 1.38 \pm 0.03 \text{ GPa}$

Ελάχιστη τιμή D E: $E_{MLPTuv} = 0.54 \pm 0.01 \text{ GPa}$

Σύγκριση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα δυο μέτρα ελαστικότητας.



Διάγραμμα 3.38: Εφαπτομενικά και δυναμικά μέτρα ελαστικότητας στα ML κονιάματα

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε τα εξής:

- Τα δυναμικά μέτρα ελαστικότητας είναι συνολικά πολύ μεγαλύτερα.
- Ακολουθούν ακριβώς την ίδια τάση μεταξύ τους ανάλογα με τα αδρανή και την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη.

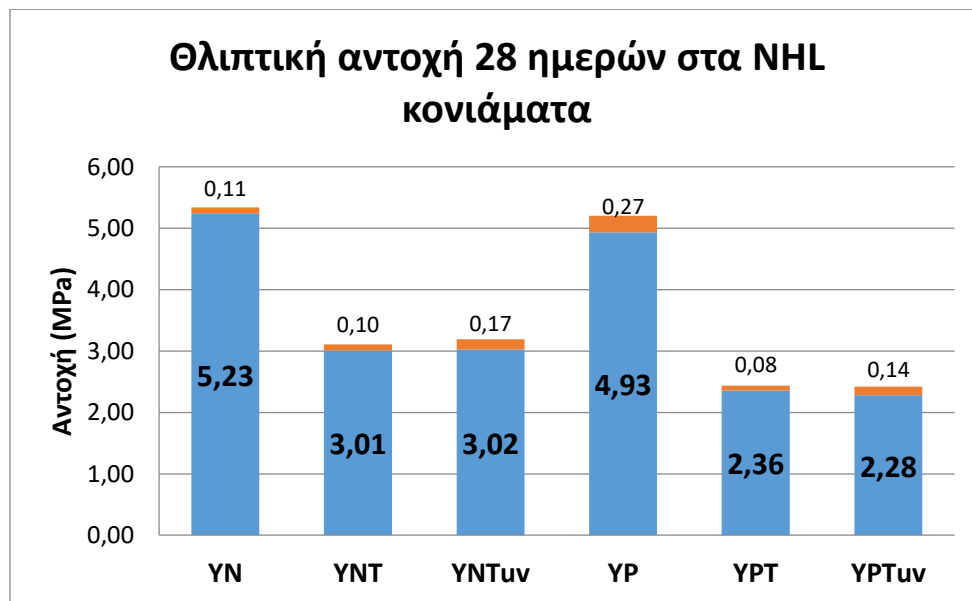
4.2.2 Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο

4.2.2.1 Μονοαξονική θλίψη

Σε αναλογία με τα προηγούμενα αποτελέσματα και εδώ η δοκιμή σε αξονική θλίψη αρχικά στις 28 μέρες μας δίνει τη θλιπτική αντοχής, το μέτρο ελαστικότητας και το δείκτη δυσθραυστότητας. Έπειτα γίνονται δοκιμές στους τρεις και έξι μήνες και υπολογίζεται η αντίστοιχη αντοχή.

Δοκιμή 28 ημερών

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται οι αντοχές των 6 συνθέσεων στις 28 μέρες.



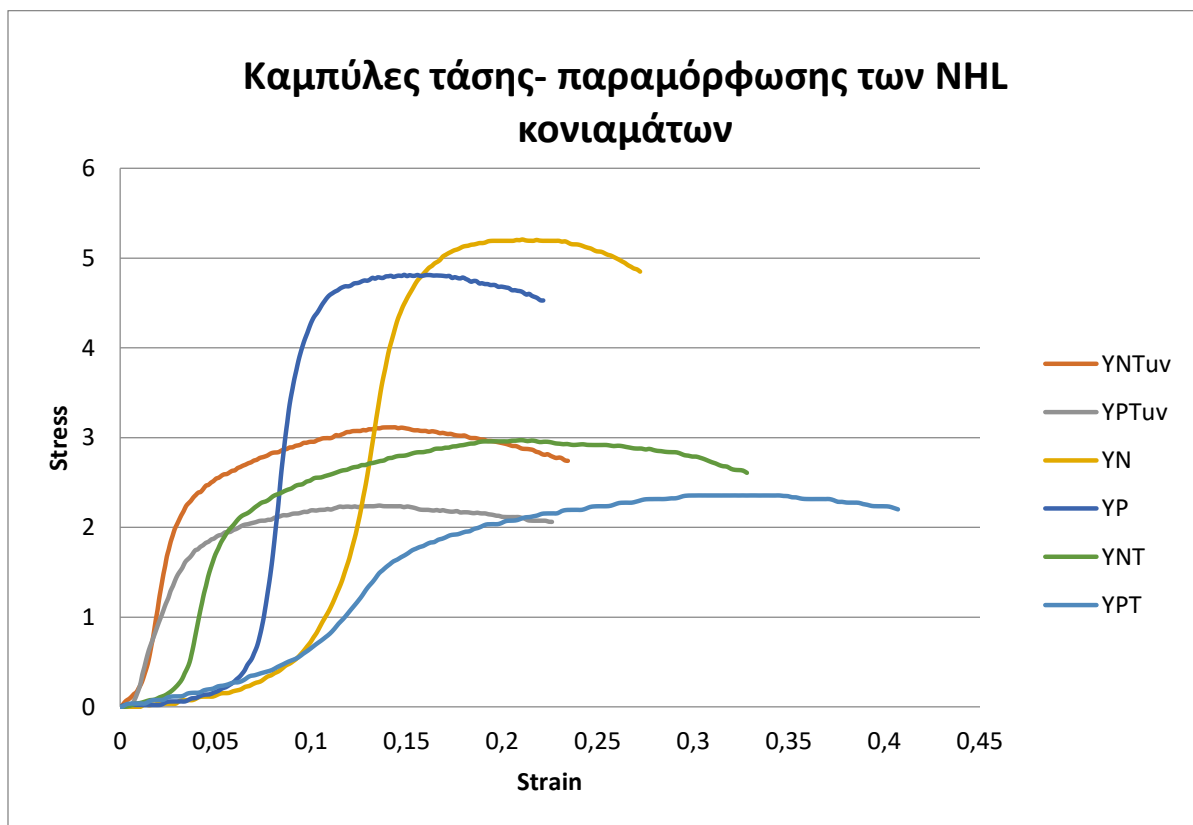
Διάγραμμα 4.39: Θλιπτική αντοχή 28 ημερών στα NHL κονιάματα

Διαπιστώνεται ότι:

- Οι συνθέσεις με νταμαρίσια άμμο (N) παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσια άμμο (P).

- Οι συνθέσεις χωρίς την προσθήκη νανο-τιτανίας έχουν υψηλότερες τιμές αντοχής.
- Οι συνθέσεις με την ενεργοποιημένη τιτανία σε σχέση με αυτές χωρίς την ενεργοποιημένη δεν παρουσιάζουν σοβαρές διαφοροποιήσεις.
- Τη μέγιστη αντοχή παρουσιάζει το κονίαμα YN με $\sigma_{\max} = 5.23 \text{ MPa} \pm 0.11$
- Την ελάχιστη αντοχή παρουσιάζει το κονίαμα YPTυν με $\sigma_{\min} = 2.28 \text{ MPa} \pm 0.14$

Για να προσδιορίσουμε το μέτρο ελαστικότητας και το δείκτη δυσθραυστότητας χρησιμοποιούμε την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα συγκεντρώνονται όλες οι καμπύλες των έξι διαφορετικών συνθέσεων.

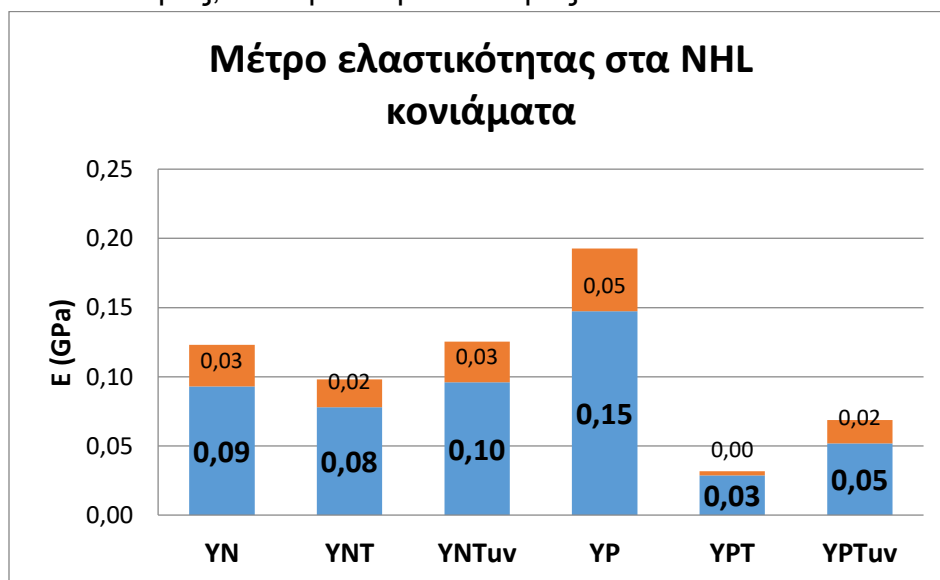


Διάγραμμα 4.40: Καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης στις 28 μέρες των NHL κονιαμάτων

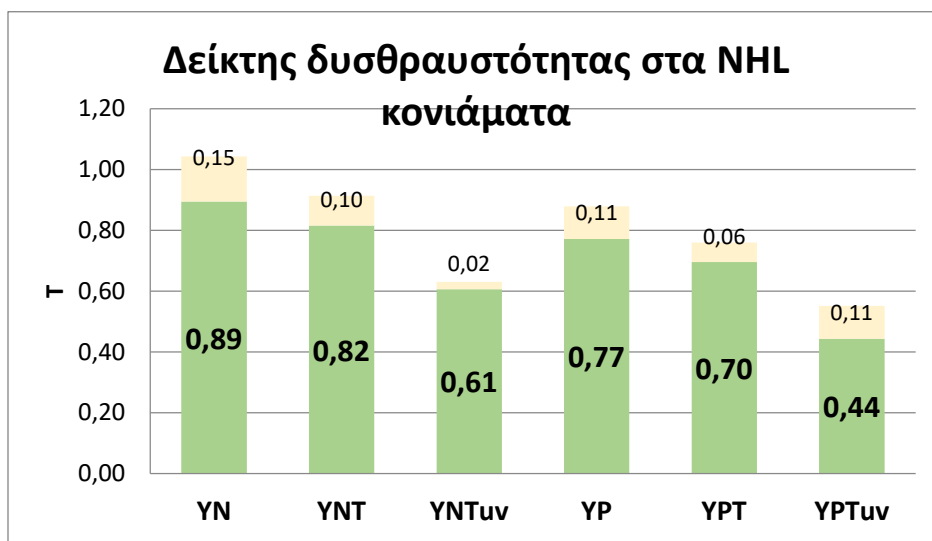
Με βάση αυτό το διάγραμμα σημειώνουμε τα εξής:

- Ανάλογα με το αν έχουν νανο-τιτανία, ενεργοποιημένη ή μη, παρουσιάζουν την ίδια τάση. Δηλαδή YN με YP όπου το YP έχει πιο απότομη κλίση στον ελαστικό κλάδο και μικρότερη παραμόρφωση, YNT με YPT όπου το τελευταίο έχει πολύ μικρή ελαστική περιοχή, YNTυν με YPTυν όπου πάλι το τελευταίο έχει μικρό κλάδο ελαστικής περιοχής.

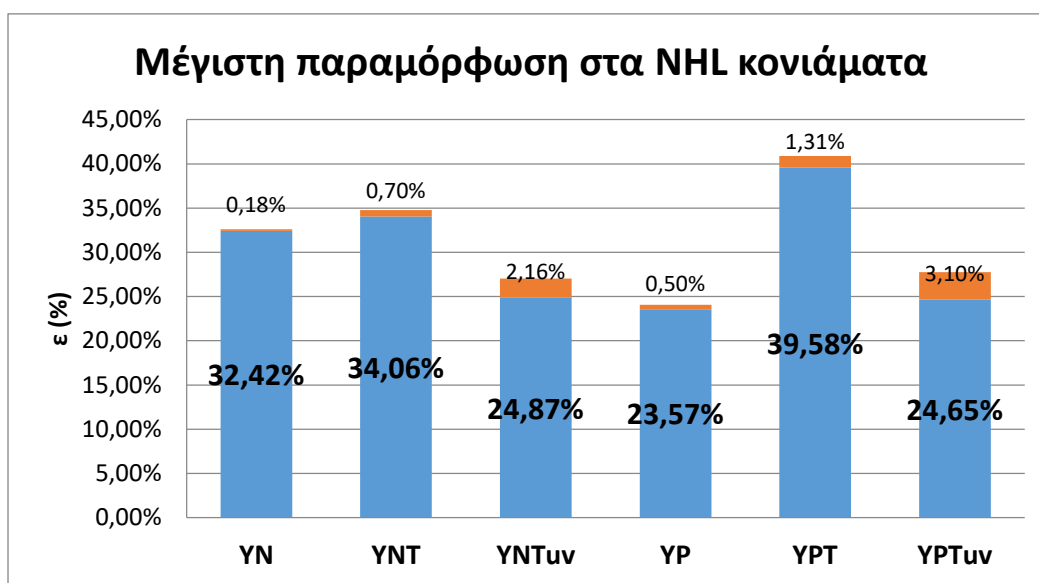
Τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπληρώνουν τα επόμενα ραβδογράμματα του μέτρου ελαστικότητας, δείκτη δυσθραυστότητας.



Διάγραμμα 4.41: Μέτρο ελαστικότητας στα NHL κονιάματα



Διάγραμμα 4.42: Δείκτης δυσθραυστότητας στα NHL κονιάματα



Διάγραμμα 4.43: Μέγιστη παραμόρφωση στα NHL κονιάματα

- Συνολικά οι συνθέσεις έχουν χαμηλές τιμές ελαστικότητας με σχετικά μικρές διαφορές. Τα κονιάματα με ποταμίσις άμμο και τιτανία έχουν το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας ενώ το μεγαλύτερο παρουσιάζει το κονίαμα YP.

Μέγιστη τιμή E: $E_{YP} = 0.15 \pm 0.05 \text{ GPa}$

Ελάχιστη τιμή E: $E_{YPT} = 0.03 \pm 0.00 \text{ GPa}$

- Ανάλογη εικόνα υπάρχει και για το δείκτη δυσθραυστότητας όπου μέγιστη τιμή παρουσιάζει το κονίαμα YN και ελάχιστη το YPTuv.

Μέγιστη τιμή T: $T_{YN} = 0.89 \pm 0.15$

Ελάχιστη τιμή T: $T_{YPTuv} = 0.44 \pm 0.11$

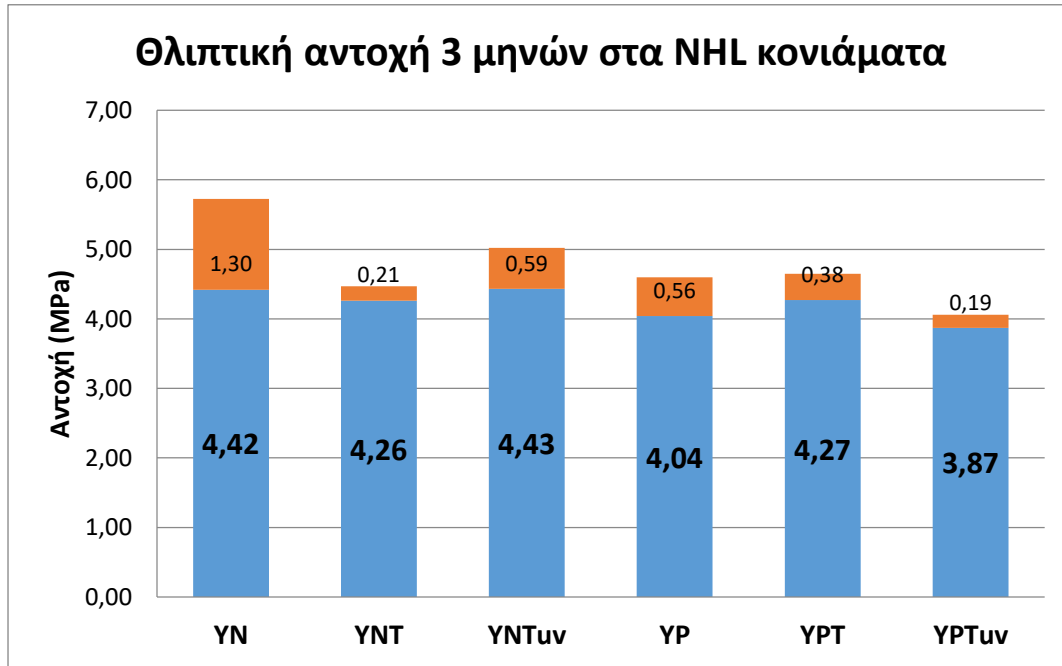
- Τα κονιάματα με την τιτανία έχουν και την ποταμίσις άμμο έχουν εμφανίζουν τη μεγαλύτερη παραμόρφωση και το γεγονός ότι έχουν πολύ μικρή ελαστικότητα επιβεβαιώνει ότι έχουν πλαστική συμπεριφορά. Τη μικρότερη παραμόρφωση έχουν τα YP χωρίς όμως μεγάλη διαφορά με το YPTuv και YNTuv.

Μέγιστη τιμή ε: $\epsilon_{YPT} = 39.58 \pm 1.31 \%$

Ελάχιστη τιμή ε: $\epsilon_{YP} = 23.57 \pm 2.16 \%$

Δοκιμή 3 μηνών

Οι παραπάνω συνθέσεις χυτεύτηκαν και έσπασαν και στους τρεις μήνες. Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 3 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.44: Θλιπτική αντοχή 3 μηνών στα NHL κονιάματα

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

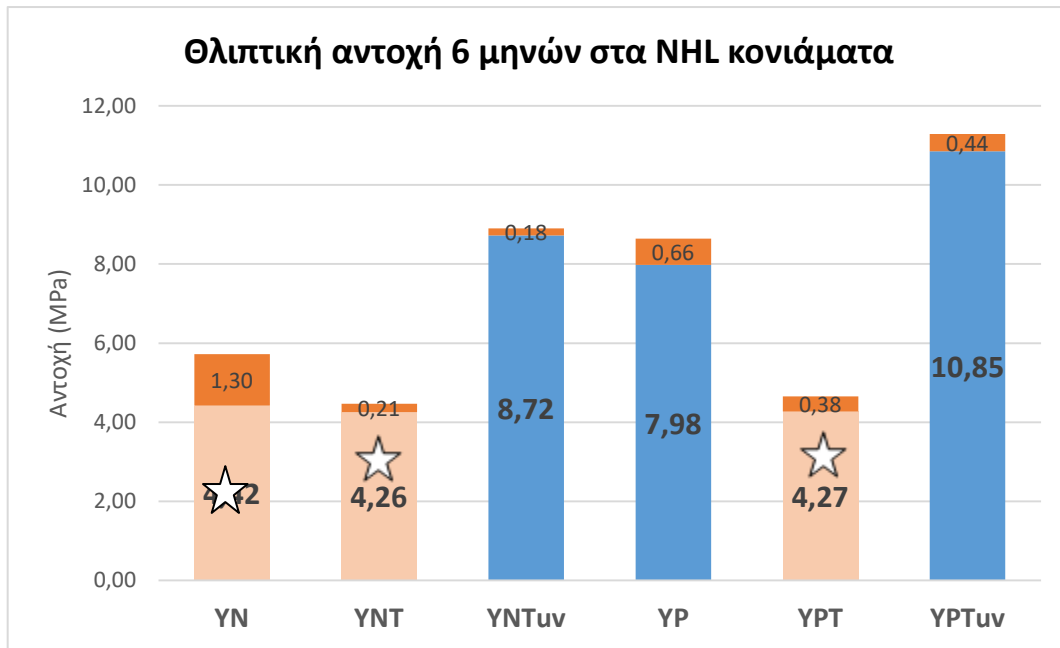
- Οι 6 συνθέσεις έχουν μικρό εύρος αντοχών (4.04 έως 4.43) είναι δηλαδή πολύ κοντά.
- Συνολικά τα κονιάματα με τη νταμαρίσια άμμο έχουν πιο υψηλές αντοχές σε σχέση με τα κονιάματα με την ποταμίσια άμμο.
- Επίσης στην περίπτωση της νταμαρίσιας άμμου, παρατηρούμε ότι η ενεργοποιημένη τιτανία δίνει ελαφρώς μεγαλύτερη έως ίση αντοχή με την σκέτη υδραυλική άσβεστο, ενώ στην περίπτωση της πυριτικής άμμου δίνει μικρότερη.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη αντοχή στους τρεις μήνες έχουμε:

YN: $\sigma_{\max} = 4.42 \pm 1.30 \text{ MPa}$

YPTuv: $\sigma_{\min} = 3.87 \pm 0.19 \text{ MPa}$

Δοκιμή 6 μηνών

Για τη δοκιμή των έξι μηνών παρόλο που χυτεύτηκαν και οι έξι διαφορετικές συνθέσεις με υδραυλική άσβεστο, τα αποτελέσματα των τριών δεν κρίθηκαν αξιόπιστα γι' αυτό και θα παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των YNTυν, YP, YPTυν. Οι μη αξιόπιστες τιμές των υπολοίπων αναγράφονται στο παράρτημα. Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 6 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.45: Θλιπτική αντοχή 6 μηνών στα NHL κονιάματα

Οι τιμές με το αστέρι είναι αντοχές των αντίστοιχων κονιαμάτων στους τρεις μήνες

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

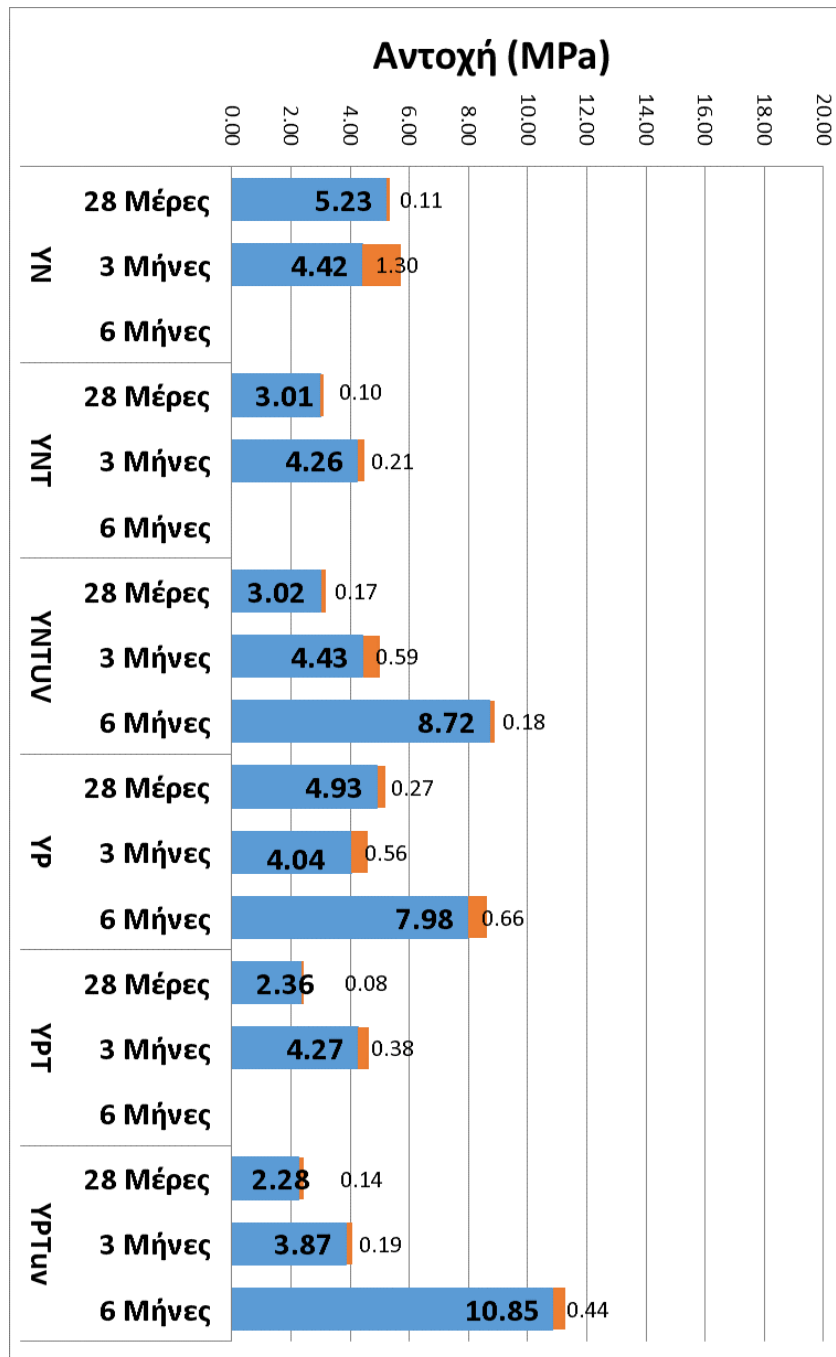
- Οι αντοχές των τριών συνθέσεων είναι σαφώς αυξημένες
- Σε σχέση με το αδρανές αυτή τη φορά η ποταμίσις άμμος δίνει μεγαλύτερη αντοχή από την νταμαρίσις.
- Συγκρίνοντας την επιρροή της νανο-τιτανίας στις συνθέσεις με την ποταμίσις άμμο βλέπουμε σαφώς μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την σκέτη υδραυλική άσβεστο.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη αντοχή στους έξι μήνες έχουμε:

YPTυν: $\sigma_{\max} = 10.85 \pm 0.44 \text{ MPa}$

YP: $\sigma_{\min} = 7.98 \pm 0.66 \text{ MPa}$

Συγκριτική θεώρηση των τριών δοκιμών της θλίψης

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για τις 6 συνθέσεις οι αντοχές στις 28 ημέρες, 3 και 6 μήνες.



Διάγραμμα 4.46: Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών, 3 και 6 μηνών στα NHL κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

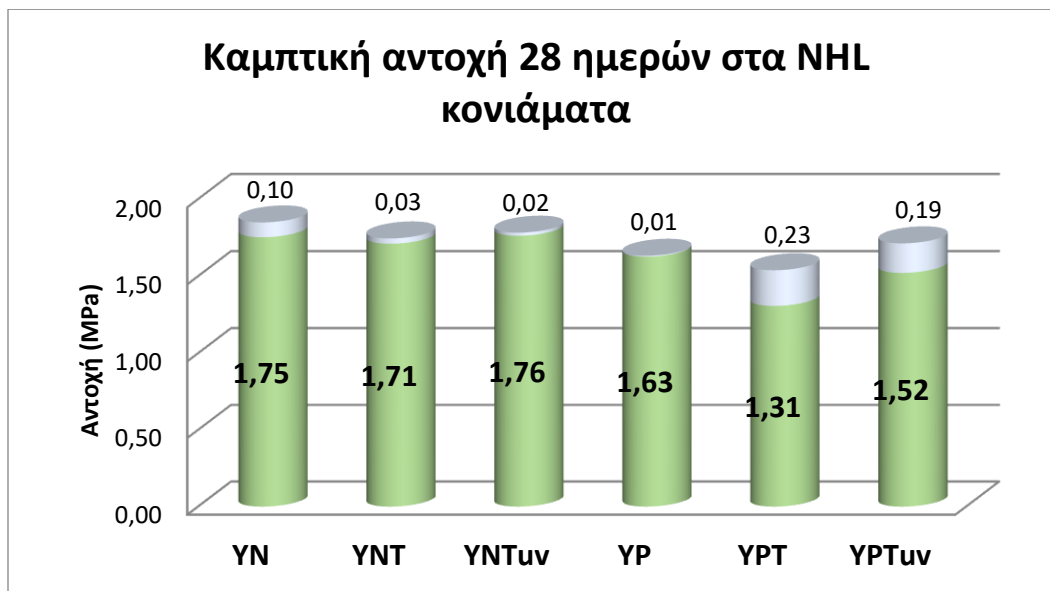
- Τα κονιάματα παρουσιάζουν αύξηση στην αντοχή τους από τις 28 μέρες στους έξι μήνες με εξαίρεση τις συνθέσεις YN και YP που οι διαφορές είναι σχετικά μικρές. Στις περιπτώσεις που έχουμε αντοχή στους 6 μήνες η αντοχή είναι σαφώς μεγαλύτερη.
- Αναφορικά με την τιτανία, παρατηρούμε ότι πέρα από τις 28 ημέρες δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες αντοχές χωρίς όμως πολύ μεγάλες διαφοροποιήσεις. Στους έξι μήνες δίνει σαφώς μια μεγαλύτερη αντοχή στα κονιάματα με την ποταμίσια άμμο.

4.2.2.2 Κάμψη τριών σημείων

Κατ' αναλογία με τα κονιάματα με υδράσβεστο και μετακαολίνη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε κάμψη στις 28 ημέρες, τους 3 και 6 μήνες.

Δοκιμή 28 ημερών

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντοχές των έξι συνθέσεων.



Διάγραμμα 4.47: Αντοχή σε κάμψη 28 ημερών στα NHL κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Το εύρος των αντοχών είναι μικρό από 1.31 MPa έως 1.75 MPa.
- Οι συνθέσεις που έχουν ως αδρανές τη νταμαρίσια άμμο έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσια.

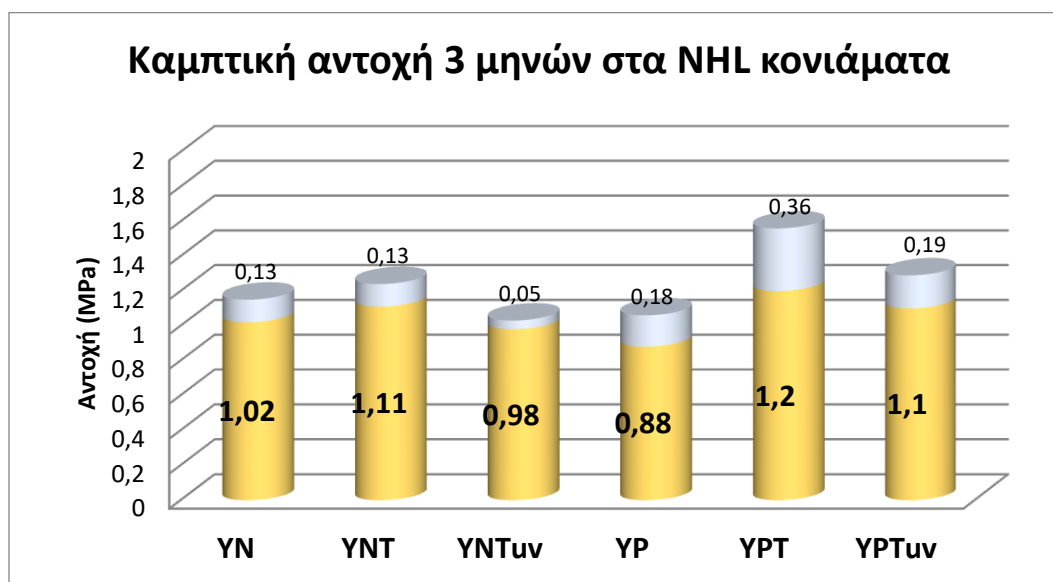
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη, οι συνθέσεις παρουσιάζουν διαφορετική τάση ανάλογα με το αδρανές. Στα κονιάματα με νταμαρίσια άμμο η νανο-τιτανία δίνει μεγαλύτερα αποτελέσματα με πολύ μικρή διαφορά. Στα κονιάματα με την ποταμίσια άμμο, η σκέτη υδραυλική άσβεστος δίνει μεγαλύτερη αντοχή και τη μικρότερη τη δίνει η μη ενεργοποιημένη.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη σκαπτική αντοχή έχουμε:

YNTuv: $\sigma_{\max} = 1.76 \pm 0.02 \text{ MPa}$

YPT: $\sigma_{\min} = 1.31 \pm 0.23 \text{ MPa}$

Δοκιμή 3 μηνών

Οι παραπάνω συνθέσεις χυτεύτηκαν και έσπασαν και στους τρεις μήνες. Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 3 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.48: Αντοχή σε κάμψη 3 μηνών στα NHL κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έχουμε μικρό εύρος αντοχών από 0.88 έως 1.2 MPa.
- Δεν υπάρχει ενιαία τάση για την επιρροή του αδρανούς. Στη σκέτη υδραυλική άσβεστο η νταμαρίσια άμμος δίνει μεγαλύτερη αντοχή, στις δυο περιπτώσεις της τιτανίας η ποταμίσια άμμος παρατηρούνται υψηλότερες τιμές.

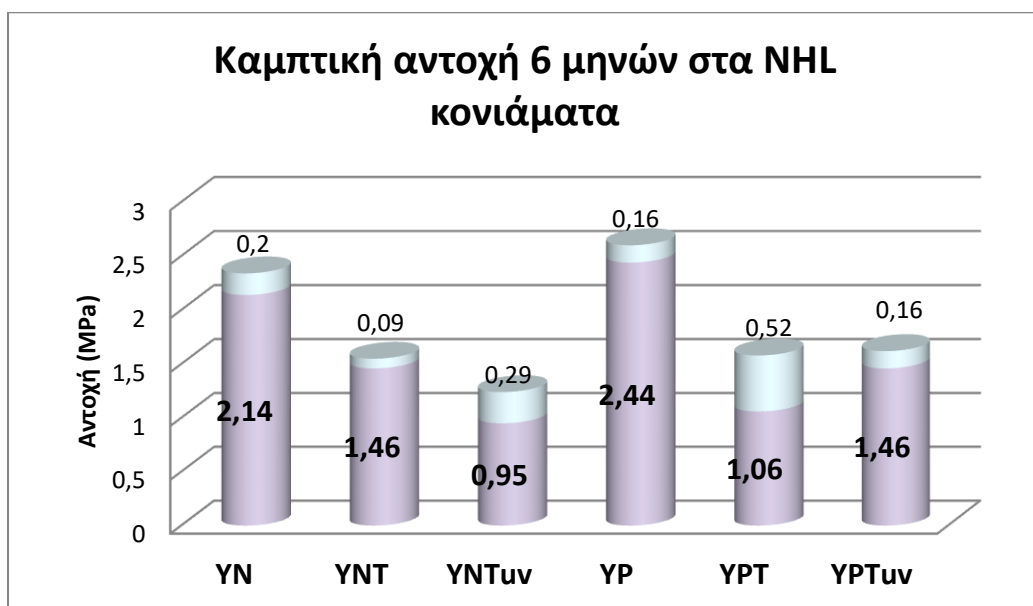
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη, παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με ποταμίσις άμμο με nT έχουν υψηλότερες αντοχές. Στα κονιάματα με νταμαρίσις άμμο η μη ενεργοποιημένη nT δίνει τη μεγαλύτερη αντοχή. Οι διαφορές ωστόσο είναι πολύ μικρές για να πούμε αν προσφέρει ή όχι η προσθήκη της.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη καμπτική αντοχή έχουμε:

YPT: $\sigma_{\max} = 1.20 \pm 0.36 \text{ MPa}$

YP: $\sigma_{\min} = 0.88 \pm 0.18 \text{ MPa}$

Δοκιμή 6 μηνών

Από αυτή τη δοκιμή εξάγουμε την αντοχή των 6 μηνών. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται συνολικά οι αντοχές.



Διάγραμμα 4.49: Αντοχή σε κάμψη 6 μηνών στα NHL κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Στους έξι μήνες υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των 6 συνθέσεων.
- Οι συνθέσεις που έχουν ως αδρανές τη νταμαρίσις άμμο έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με αυτές με την ποταμίσις μόνο στην μη ενεργοποιημένη τιτανία.
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη, παρατηρείται ότι οι συνθέσεις χωρίς την προσθήκη nT έχουν υψηλότερες αντοχές και ταυτόχρονα η μη ενεργοποιημένη τιτανία δίνει μεγαλύτερες αντοχές από την ενεργοποιημένη στα κονιάματα με ποταμίσις άμμο και το αντίστροφο σε αυτά με τη νταμαρίσις.

- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη καμπτική αντοχή έχουμε:

ΥΠ: $\sigma_{\max} = 2.44 \pm 0.16 \text{ MPa}$

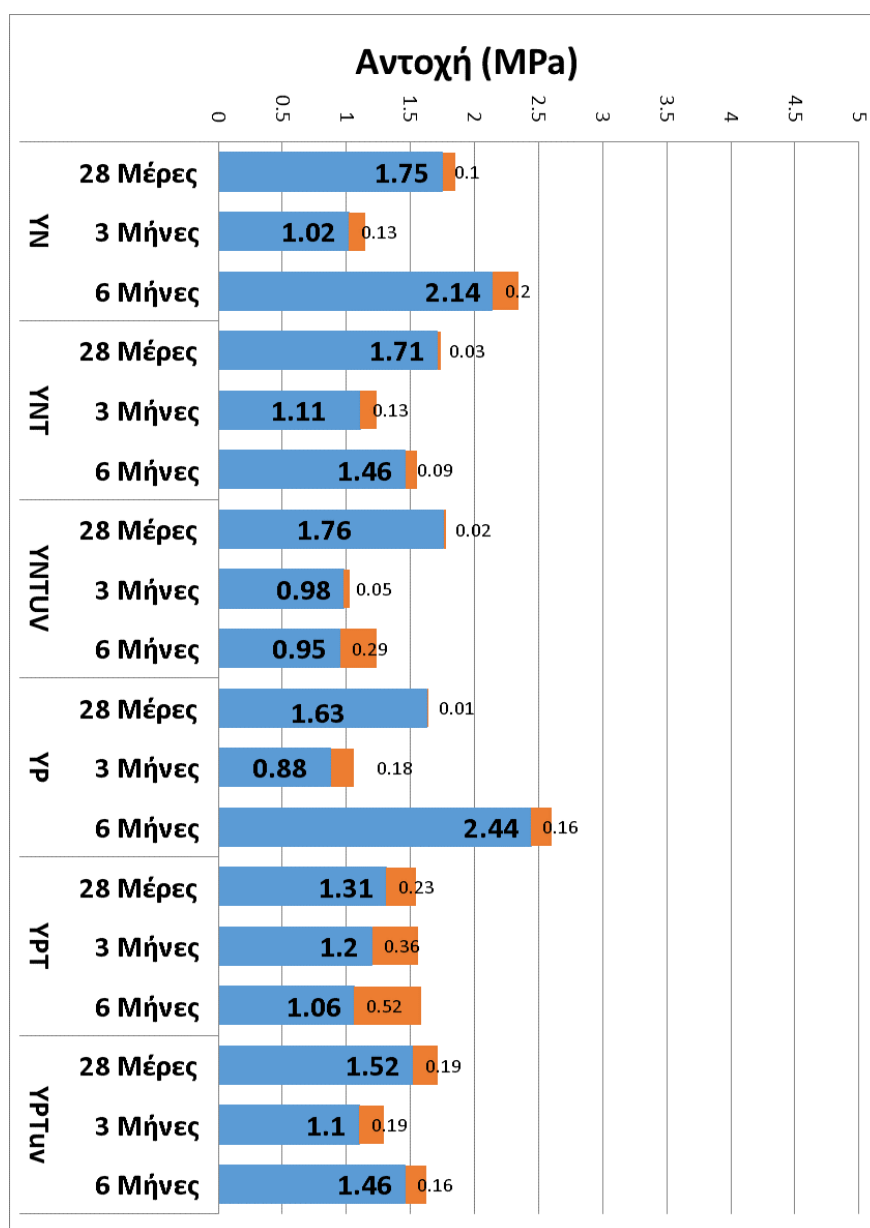
ΥΝΤυν: $\sigma_{\min} = 0.95 \pm 0.29 \text{ MPa}$

Συγκριτική θεώρηση των τριών δοκιμών της κάμψης

Αρχικά για τις αντοχές σε κάμψη που παρουσιάστηκαν παραπάνω βλέπουμε ότι είναι συνολικά σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός αναμενόμενο μιας και τα κονιάματα δεν έχουν εφελκυστική ικανότητα. Όποτε, όποιες διαφοροποιήσεις υπάρχουν είναι σε χαμηλά ποσοστά.

Συγκρίνοντας τις τιμές των αντοχών στις 28 ημέρες, τους 3 και 6 μήνες διαπιστώνουμε τα εξής:

- Στα κονιάματα ΥΝ και ΥΡ η αντοχή των 3 μηνών πέφτει σε σχέση με αυτή των 28 ημερών ενώ στους έξι μήνες αυξάνεται ξεπερνώντας την αντοχή και των 28 ημερών.
- Στα κονιάματα ΥΝΤ και ΥΡΤυν στους 3 μήνες η αντοχή μειώνεται και αυξάνεται πάλι στους 6 μήνες, χωρίς όμως να φτάσει τα επίπεδα των 28 ημερών.
- Στα κονιάματα ΥΝΤυν και ΥΡΤ η αντοχή μειώνεται από τις 28 μέρες, στους 3 και στους 6 μήνες, ακολουθεί δηλαδή πτωτική πορεία.



Διάγραμμα 4.50: Καμπτικές αντοχές 28 ημερών, 3 και 6 μηνών στα NHL κονιάματα

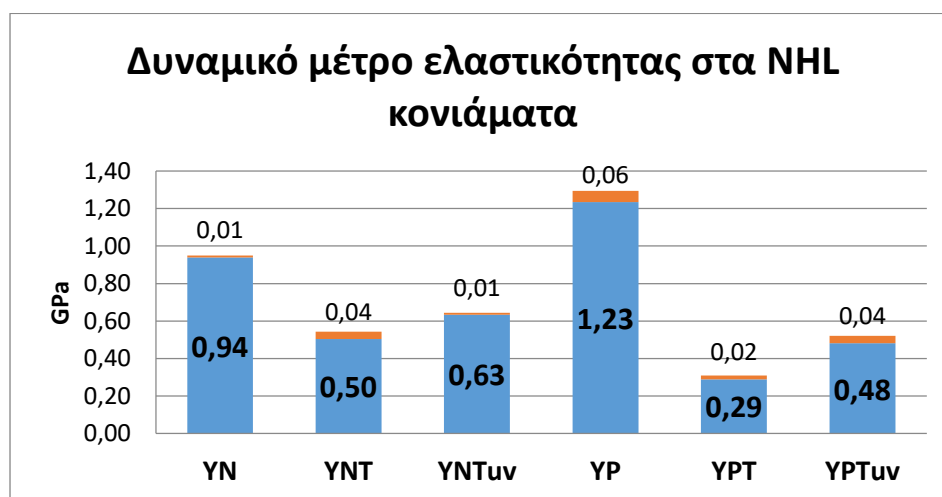
4.2.2.3 Μέτρηση υπερήχων

Κατά τη χύτευση των δοκιμών για θλίψη και κάμψη κατασκευάστηκαν και κωνοειδή δοκίμια για τη μέτρηση των υπερήχων. Για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έγινε εμβαπτισμός των δοκιμών σε βαθμονομημένο δοχείο με νερό για τον υπολογισμό του όγκου τους.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 4.2: Μέτρηση υπερήχων και υπολογισμός δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Σύνθεσ η	Μάζα (gr)	Όγκος (ml)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Χρόνος (μs)	Ταχύτητα (m/s)	Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας	
						M.O (GPa)	STDEV
YN	401,95	242,50	165,7505	29,50	2375,00	0,94	0,01
YNT	401,45	245,00	163,8571	30,42	1752,93	0,50	0,01
YNT _{uv}	398,78	242,50	164,4454	33,30	1962,05	0,63	0,01
YP	408,68	245,00	166,8082	32,51	2381,25	0,82	0,03
YPT	388,56	230,00	168,9391	30,45	1309,50	0,29	0,02
YPT _{uv}	412,01	255,50	161,2564	30,35	1728,11	0,48	0,04



Διάγραμμα 4.51: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας στα NHL κονιάματα

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

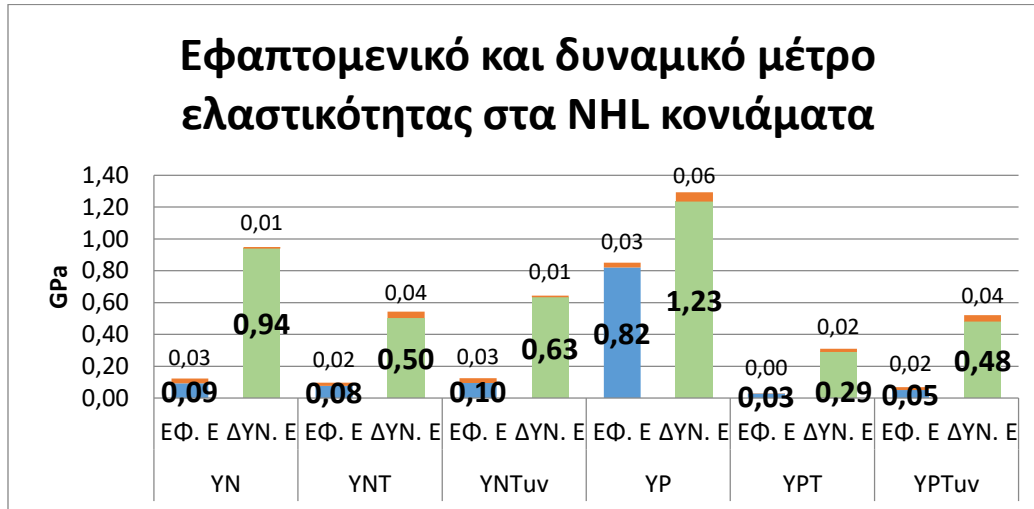
- Οι συνθέσεις με νταμαρίσια άμμο έχουν μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις συνθέσεις με ποταμίσια άμμο με εξαίρεση τις συνθέσεις χωρίς νανο-τιτανία.
- Αναφορικά με την προσθήκη νανο- τιτανίας τα κονιάματα με σκέτη υδραυλική άσβεστο έχουν πιο υψηλές τιμές.
- Συνολικά μέγιστη και ελάχιστη τιμή έχουμε:

Μέγιστη τιμή D E: $E_{YP} = 1.23 \pm 0.06$ GPa

Ελάχιστη τιμή D E: $E_{YPT} = 0.29 \pm 0.02$ GPa

Σύγκριση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα δυο μέτρα ελαστικότητας.



Διάγραμμα 5.52: Εφαπτομενικά και δυναμικά μέτρα ελαστικότητας στα NHL κονιάματα

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε τα εξής:

- Τα δυναμικά μέτρα ελαστικότητας είναι συνολικά πολύ μεγαλύτερα.
- Ακολουθούν ακριβώς την ίδια τάση μεταξύ τους ανάλογα με τα αδρανή και την προσθήκη νανο-τιτανίας ενεργοποιημένης ή μη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να διερευνηθεί εάν η προσθήκη νανο-τιτανίας επιταχύνει την πήξη των κονιαμάτων χωρίς όμως να του στερεί τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αρχικά θα συνοψίσουμε τα αποτελέσματα των συνθέσεων με υδράσβεστο και μετακαολίνη (ML), έπειτα τα αντίστοιχα με την υδραυλική άσβεστο (NHL) και τέλος θα γίνει μια σύγκριση των δυο.

Συνθέσεις με υδράσβεστο και μετακαολίνη (ML)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η ενεργοποιημένη νανο-τιτανία αύξησε την εξέλιξη της ενανθράκωσης έναντι της ποζολανικής αντίδρασης στις πρώτες μέρες ωρίμανσης,
- Μείωσε τη θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων ειδικά μέχρι τους 3 μήνες ενώ στους 6 μήνες έδωσε πολύ υψηλές τιμές. Η μακροπρόθεσμη βελτίωση της απόδοσης των κονιαμάτων nT μπορεί να αποδοθεί στην εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης και τη μείωση των συρρικνώσεων από την συνεχιζόμενη ενανθράκωση μέρους των ενυδατωμένων ενώσεων, όπως του ανθρακικού αργιλικού ασβεστίου που είδαμε ότι υπερέχει στα δείγματα με ενεργοποιημένη nT. [33,34,35]
- Επίσης, τα nTυν κονιάματα παρουσίασαν έντονη πλαστική συμπεριφορά και ιδιαίτερα υψηλή δυσθραυστότητα, επισημαίνοντας περαιτέρω την πρόοδο της ενανθράκωσης έναντι της ποζολανικής αντίδρασης.
- Κονιάματα και πάστες με μη ενεργοποιημένη τιτανία παρουσιάζουν παρόμοια τάση με αυτά χωρίς nT γεγονός που δείχνει την αναγκαιότητα ενεργοποίησης της τιτανίας.
- Οι πάστες nTυν είχαν πολύ μικρότερο χρόνο πήξης.

Συνθέσεις με υδραυλική άσβεστο (NHL)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η διαδικασία τόσο της ενανθράκωσης όσο και της ποζολανικής αντίδρασης είναι υψηλές τις πρώτες μέρες χωρίς μεγάλες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις τρεις συνθέσεις Y, YT και YTyn.
- Η ενανθράκωση τηρείται σε υψηλά επίπεδα μαζί με την ποζολανική αντίδραση λόγω του ότι στην υδραυλική άσβεστο κατά την υδρόλυση του υδροξειδίου του ασβεστίου παράγεται υδράσβεστος.

- Οι τιμές της θλιπτικής αντοχής είναι γενικά σε σταθερά επίπεδα κατά τους τρεις πρώτους μήνες χωρίς μεγάλες διαφοροποιήσεις, λόγω της προσθήκης της νανο-τιτανίας, ενώ στους 6 μήνες η αντοχή αυξάνεται.
- Οι πάστες ηΤυν έχουν ελαφρώς μικρότερο χρόνο πήξης.
- Συνολικά, από τα παραπάνω η προσθήκη νανο-τιτανίας δεν έχει ιδιαίτερη συνεισφορά στην υδραυλική άσβεστο στους πρώτους μήνες. Επειδή όμως τα κονιάματα παρουσιάζουν σημαντικές αντοχές στους 6 μήνες, προτείνεται η χρήση της νανο-τιτανίας στα κονιάματα υδραυλικής ασβέστου, έχοντας και ως απώτερο στόχο τον καθαρισμό του περιβάλλοντος εκμεταλλευόμενοι την σπουδαία ιδιότητα της νανο-τιτανίας να διασπά τους οργανικούς ρύπους. [36]

Σύγκριση των 2 ομάδων συνθέσεων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των δυο ομάδων φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι συνθέσεις με υδράσβεστο και μετακαολίνη δείχνουν βελτιωμένη συμπεριφορά στα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους με την προσθήκη ενεργοποιημένης νανο-τιτανίας. Τα κονιάματα με υδραυλική άσβεστο και νανο-τιτανία συμπεριφέρονται ικανοποιητικά με την πάροδο έξι μηνών ωρίμανσης. Επίσης τα κονιάματα ML παρουσιάζουν υπερδιπλάσιες αντοχές και μεγαλύτερη πλαστιμότητα από τα κονιάματα με υδραυλική άσβεστο επιβεβαιώνοντας τη θετική συνεισφορά που έχει η προσθήκη ποζολάνης στην άσβεστο. Η χρήση νανο-τιτανίας 6% κ.β. επί της κόνιας, αποδεικνύεται ότι εκτός από τις δεδομένες ιδιότητες αυτοκαθαρισμού, αποδίδει κονιάματα με εξαιρετικές αντοχές.[37,38]

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στοιχεία που θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν σε μελλοντική έρευνα είναι: η συμπλήρωση των μηχανικών δοκιμών που λείπουν στους έξι μήνες, φυσικοχημικές αναλύσεις μετά τις 40 μέρες και σε διάστημα 6 μηνών, ο προσδιορισμός άλλων φυσικών μεγεθών όπως το πορώδες και η διαπνοή. Τέλος θα ήταν χρήσιμη η περεταίρω ανάλυση αυτών των υλικών σε υπολογιστικό επίπεδο.

Μέρος της συγκεκριμένης ερευνητικής δουλειάς δημοσιεύτηκε και παρουσιάστηκε, μετά από κρίση, στο 4^ο Διεθνές Συνέδριο Ιστορικών Κονιαμάτων (HMC), που έλαβε χώρα στη Σαντορίνη τον Οκτώβριο του 2016.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Χάρτα της Βενετίας, 1964
- [2] "Physico-chemical Study of Cretan Ancient Mortars", P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, A. Moropoulou, Cement and Concrete Research, 33/5, 2003, pp. 651-661.
- [3] "Hydraulic lime mortars for the restoration of the historic masonry in Crete", P. Maravelaki-Kalaitzaki, I. Karatasios, A. Bakolas, V. Kilikoglou, Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp. 1577–1586.
- [4] Μοροπούλου Α., Μπακόλας Α., Μούνδουλας Π., Συμβατά κονιάματα αποκατάστασης ιστορικών μνημείων. Οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του σκυροδέματος
- [5] Πουλιόπουλος, Α.(2011), ΠΟΛΥΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ-ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ. Τμ. Φυσικής., Α.Π.Θ.
- [6] Konstantin Sobolev, Ismael Flores, Roman Hermosillo, Leticia M. Torres-Martínez,(2006), NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY FOR HIGH PERFORMANCE CEMENT COMPOSITES, Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, Denver, USA
- [7] Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, Πάτρα 2008
- [8] Παγώνα Μαραβελάκη, σημειώσεις μαθήματος για τα κονιάματα, <https://www.eclass.tuc.gr/courses/MHPER246/>
- [9] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMATA
- [10] Ε. Βιντζηλαίου, Ε. Βουγιούκας, Ε. Μπαδογιάννης, Τεχνικά Υλικά, Διαλέξεις: 8^η Ενότητα: Κονίες και κονιάματα, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- [11] Μαρίνος Α., Μπατής Γ., Κατσιώτη Μ., Μελέτη της ανθεκτικότητας κονιαμάτων με μετακαολίνη υπό αέρια συντήρηση, 10^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα 2015
- [12] Λιονάκης Ευστράτιος, Μελέτη Σύνθεσης Κονιαμάτων με Νανο-υλικά και Ιπτάμενη Τέφρα, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011
- [13] Ε. Badogiannis, G. Kakali, S. Tsivilis,(2005) METAKAOLIN AS SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL Optimization of kaolin to metakaolin conversion, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, pp 457-462
- [14] J. Ninov, Donchev, I., Dimova, L, (2009, November 07), On the kinetics of pozzolanic reaction in the system kaolin–lime–water, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry , pp. 107-112
- [15] Φίτος Μιχαήλ, Ποζολανική δραστηριότητα μηχανικά ενεργοποιημένων μετακαολινών και εφαρμογή τους στην τεχνολογία σκυροδέματος, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μεταλλείων- Μεταλλουργών , ΕΜΠ, 2014

- [16] «Advanced Cement Technologies,» Advanced Cement Technologies, (2012). [Ηλεκτρονικό]. Available: www.metakaolin.com.
- [17] Τεκίδης Σωκράτης- Κωνσταντίνος, Ανθεκτικότητα κονιαμάτων γεωπολυμερών από μετακαολίνη και ασβεστολιθική άμμο, ΔΠΜΣ, ΕΜΠ, 2013
- [18] <http://www.dalkafoukis.gr/>
- [19] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_AGGREGATES
- [20] Αντωνόπουλος Ανάργυρος, Αδρανή Υλικά, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2011
- [21] P. Maravelaki, E. Lionakis, C. Kapridaki, A. Verganelaki, Physico-chemical characterization of hydraulic mortars containing nano-titania for restoration applications, 8th International Conference on Nanosciences and Nanotechnologies 2011 (NN11), 12-15 July 2011, Thessaloniki, Greece
- [22] “Hydraulic lime-mortars with siloxane for waterproofing historic masonry”, P. Maravelaki-Kalaitzaki, Cement and Concrete Research, 37(2), 2007, pp. 283-290.
- [23] “Producing photoactive, transparent and hydrophobic SiO₂/crystalline TiO₂ nanocomposites at ambient conditions with application as self-cleaning coatings”, C Kapridaki, L Pinho, MJ Mosquera, P Maravelaki-Kalaitzaki, Applied Catalysis B: Environmental 156, 2014, pp. 416-427.
- [24] EN 196-1 (2002), Methods of testing cement. Determination of strength
- [25] EN 1015-3 (1999), Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)
- [26] Mackenzie, R. (1978). J. Thermal Anal., 13
- [27] Ελληνική Εταιρία Θερμικής Ανάλυσης (2006), «Θερμική ανάλυση, Θεωρία-Οργανολογία- Εφαρμογές», Επιστημονικές Εκδόσεις Παρισσιανού Α.Ε
- [28] Εργαστηριακός οδηγός, Επιστήμη και Τεχνική των Υλικών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- [29] Τζιότζιου Μαρία, Μελέτη του μηχανισμού πήξης κονιαμάτων τύπου ασβέστη – φυσικής ποζολάνης, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013
- [30] EN 196-3 (2005), Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness
- [31] EN 1015-11 (1999), Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar
- [32] Gameiro A, Santos Silva A, Grilo J et al (2014) Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. Cem Concr Comp 45: 264–271
- [33] "Physico-chemical and Mechanical Characterization of Hydraulic Mortars Containing Nano-Titania for Restoration Applications", Maravelaki-

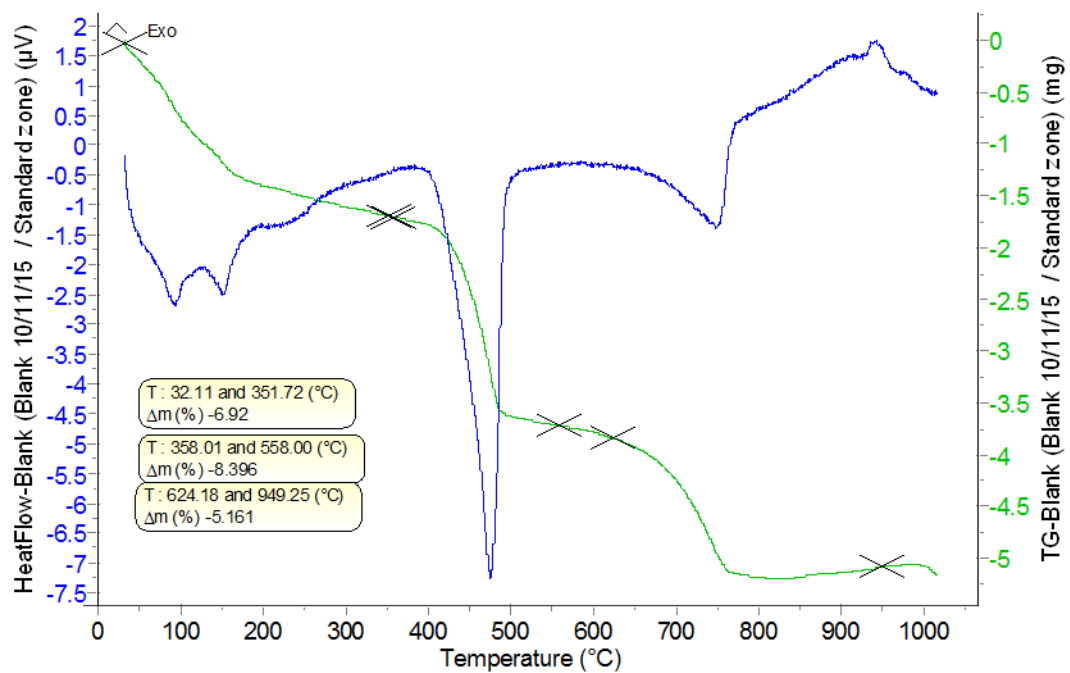
- Kalaitzaki, P., Agioutantis, Z., Lionakis, E., Stavroulaki, M., & Perdikatsis, V., *Cement and Concrete Composites*, Volume 36, Issue 1, 2013, pp. 33-41.
- [34] “Monitoring of self-healing phenomena towards enhanced sustainability of historic mortars”, M. Amenta, I. Karatasios, P. Maravelaki, V. Kilikoglou, *Applied Physics A* 122 (5), 2016, pp. 1-8.
- [35] Improvement of properties of hydraulic mortars with addition of nano-titania”, N. Maravelaki, C. Kapridaki, E. Lionakis, A. Verganelaki, In *Adhesives: Mechanical Properties, Technologies and Economic Importance*, Chapter 4, Editor Dario Croccolo, Nova Science Publishers, Inc., 2014, pp. 79-93.
- [36] “Amelioration of crushed brick-lime composites using nano-additives”, M. Theodoridou, E. Charalambous, P. Maravelaki-Kalaitzaki, I. Ioannou, *Cement and Concrete Composites* 68, 2016, pp. 77-87.
- [37] Maravelaki-Kalaitzaki P. (et al.), 2012. Physico-chemical and Mechanical Characterization of Hydraulic Mortars Containing Nano-Titania for Restoration Applications, *4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, NICOM4, Agios Nikolaos, Greece, May 20-22, 2012, (S1.2_200, CD).
- [38] K. Kapetanaki, C. Kapridaki, N. Maravelaki, “Hydraulic mortars with nano-titania for restoration applications: physico-chemical and mechanical assessment”, HMC 2016 Santorini, October 2016

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Διαγράμματα θερμικής ανάλυσης

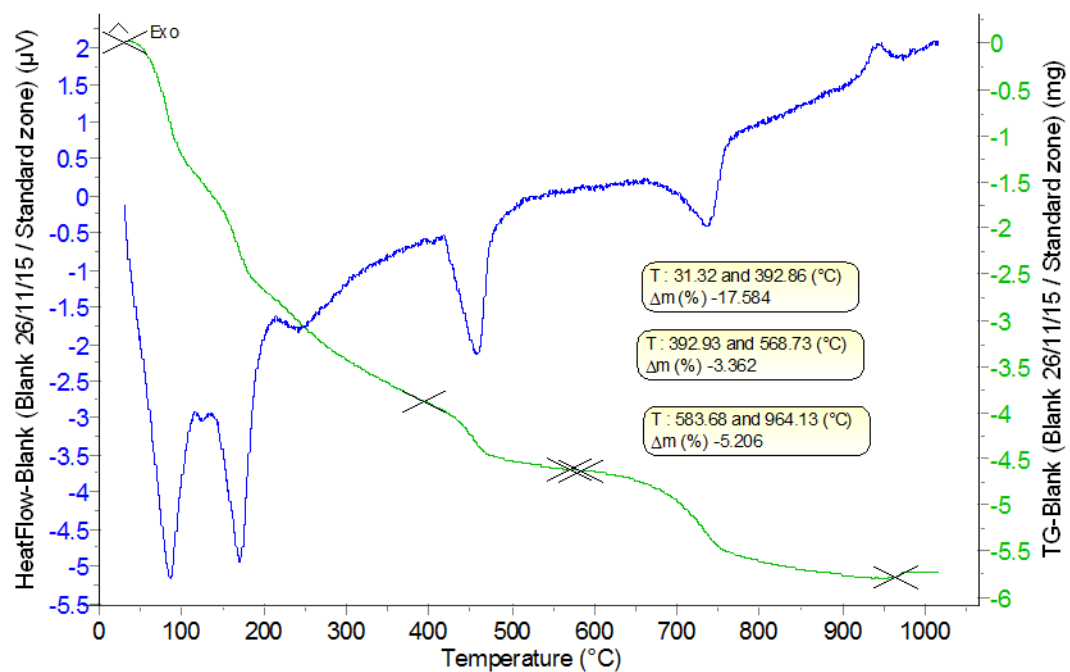
Experiment : ML_1day_internal (1 day,Kali)

Initial Mass : 23.98 (mg)



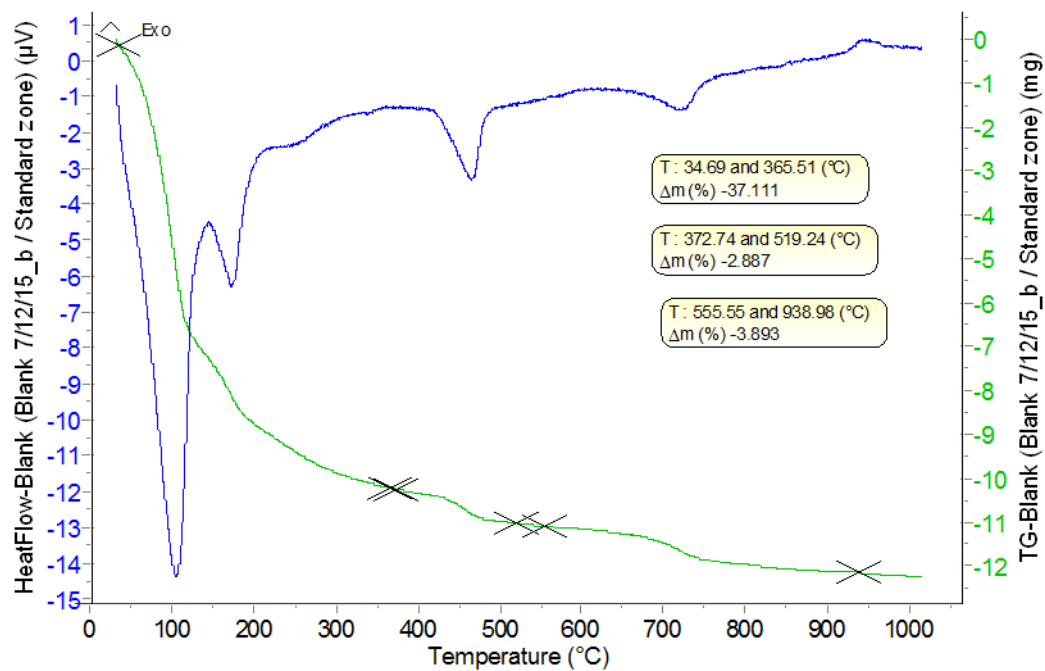
Experiment : ML_8day_internal_(Kali)

Initial Mass : 22.1 (mg)



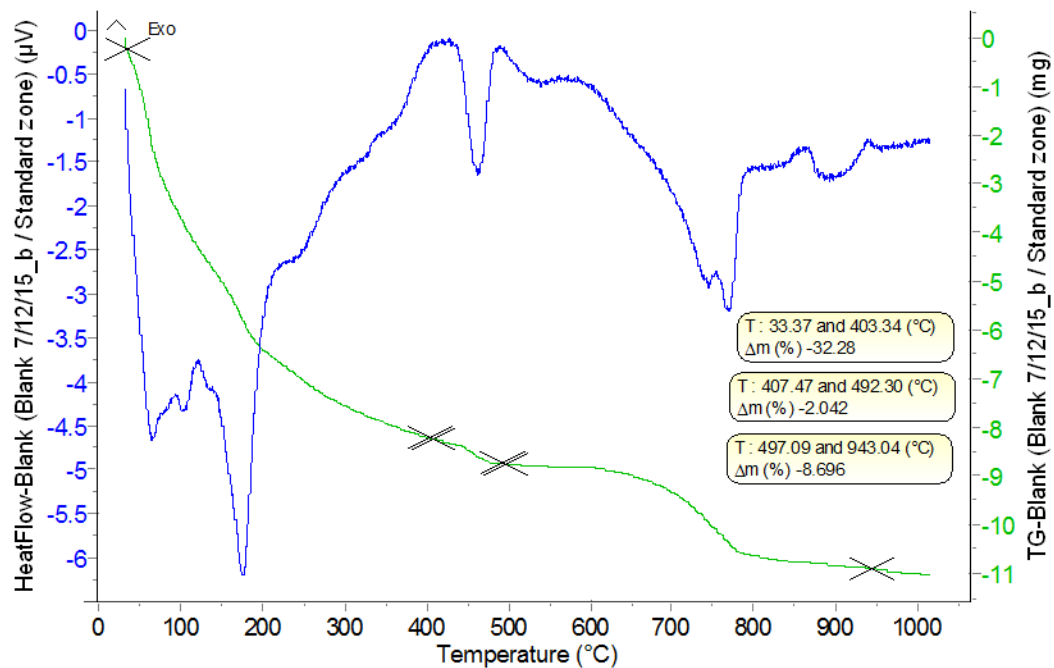
Experiment : ML_15day_internal (Kali)

Initial Mass : 27.1 (mg)



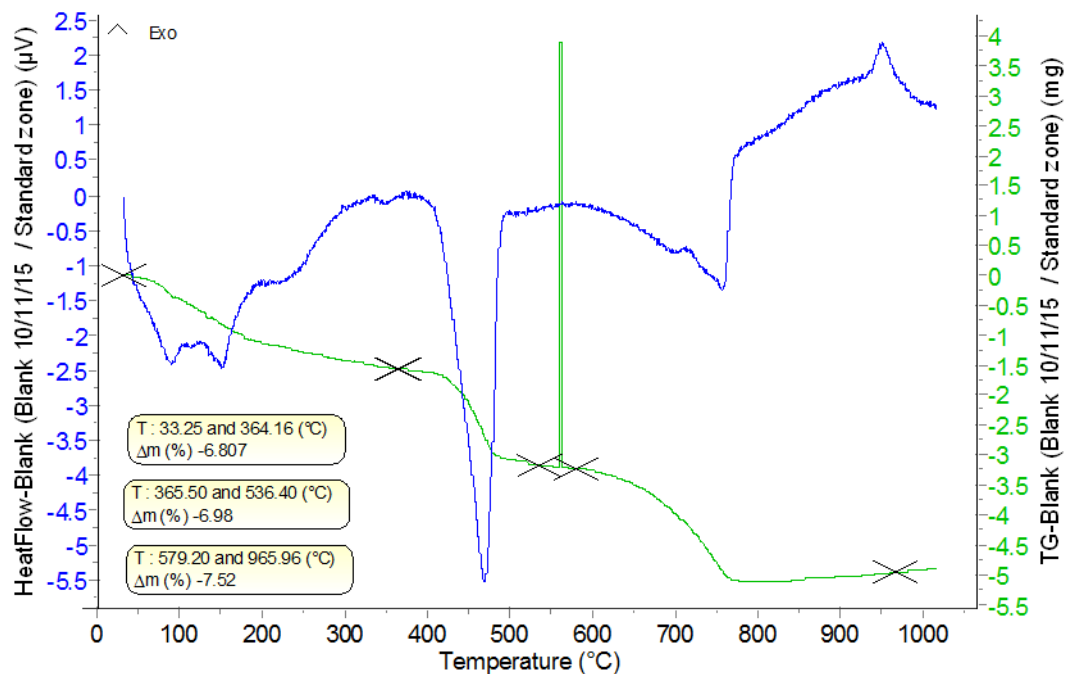
Experiment : ML_21day_internal (Kali)

Initial Mass : 24.75 (mg)



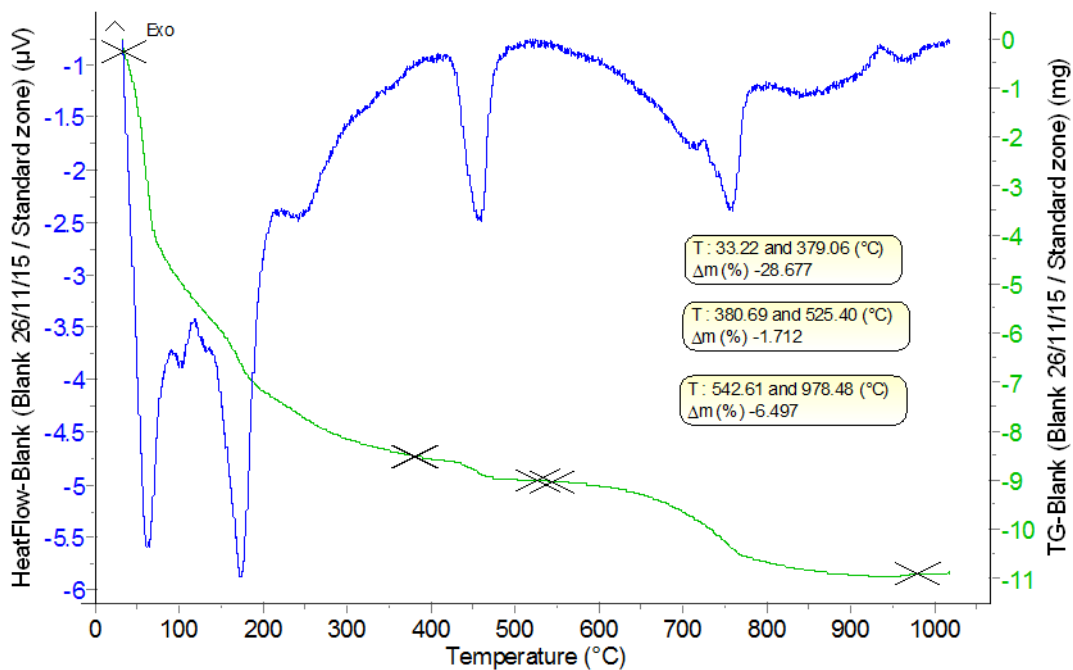
Experiment : MLT_1day_internal (NHL, 1 day,Kali)

Initial Mass : 23 (mg)



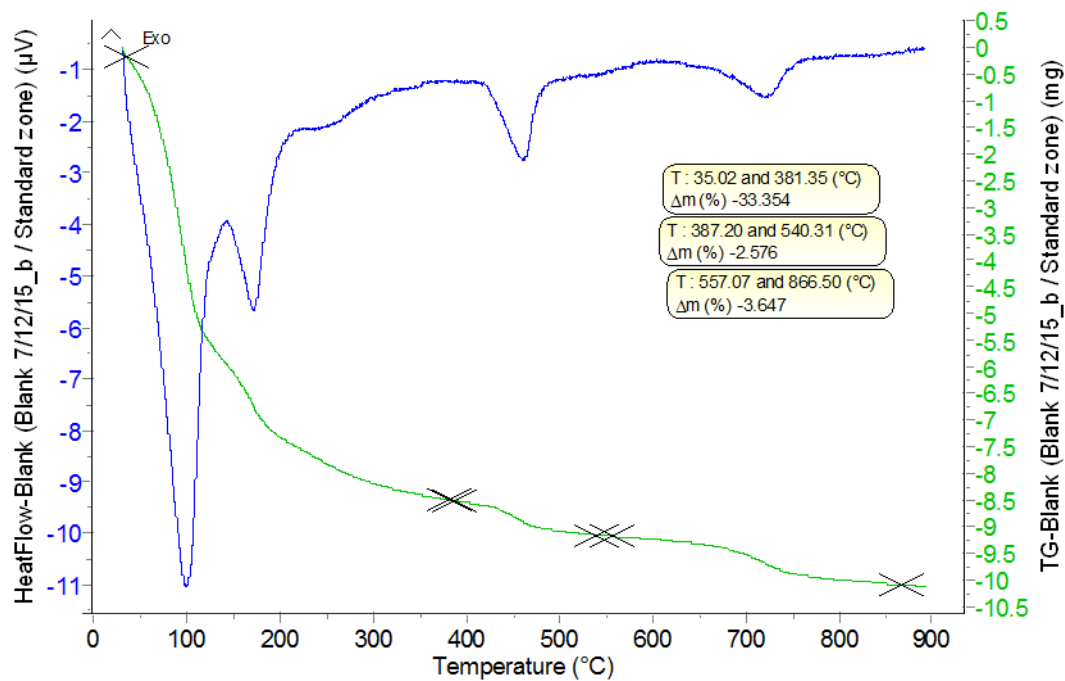
Experiment : MLT_8day_internal_(Kali)

Initial Mass : 28.75 (mg)



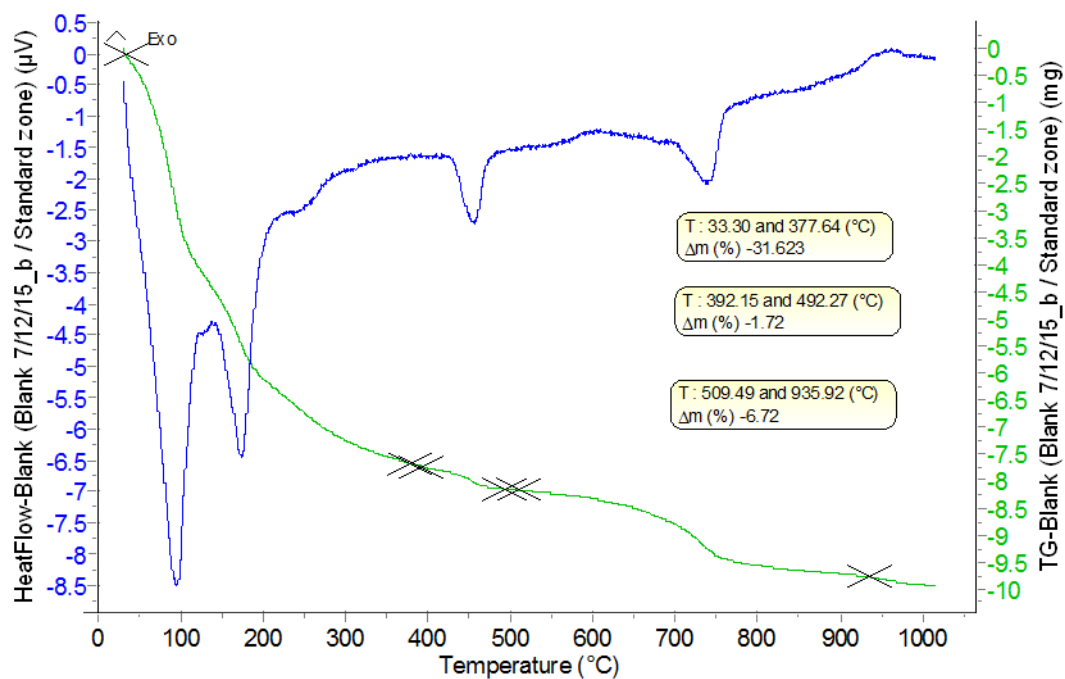
Experiment : MLT_15day_internal (Kali)

Initial Mass : 24.95 (mg)



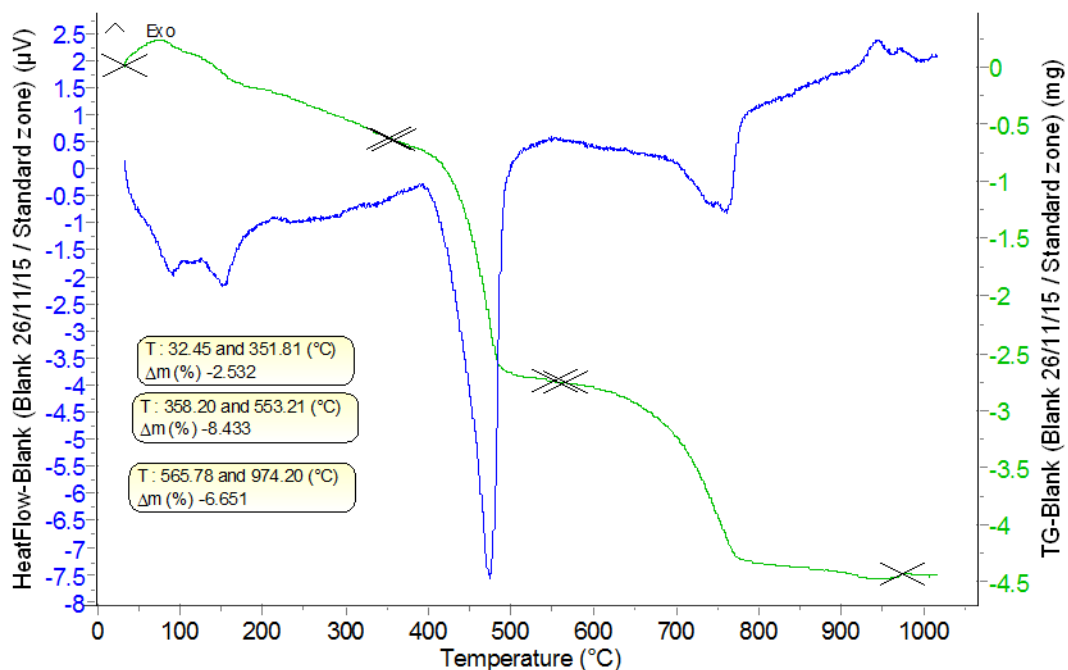
Experiment : MLT_21day_internal (Kali)

Initial Mass : 23.91 (mg)



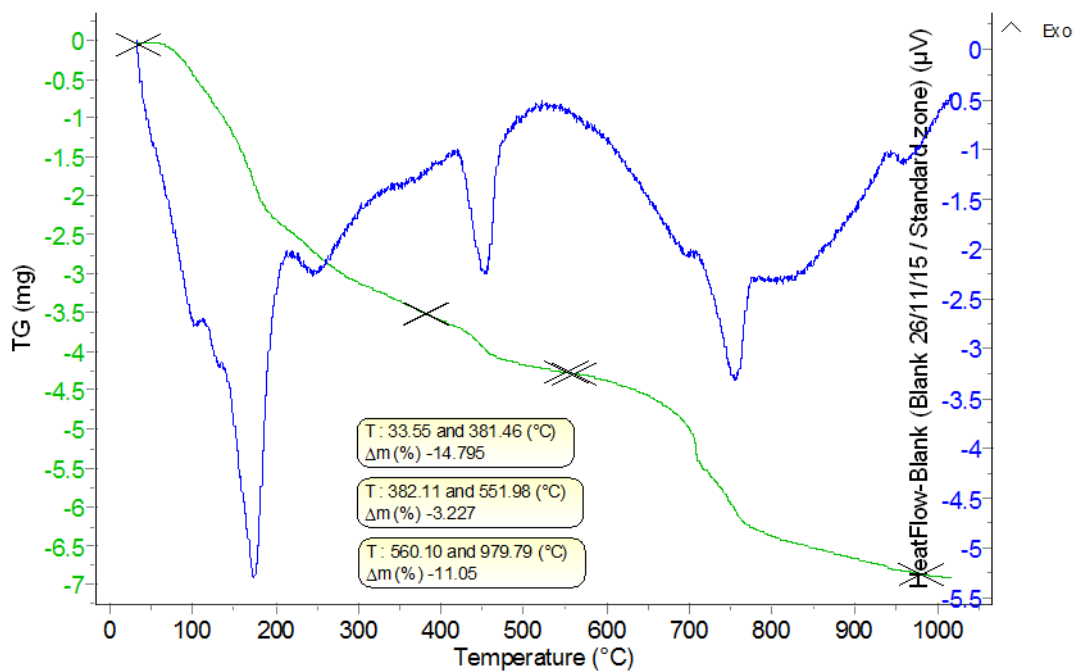
Experiment : MLTuv_1day_internal (1 day,Kali)

Initial Mass : 25.03 (mg)



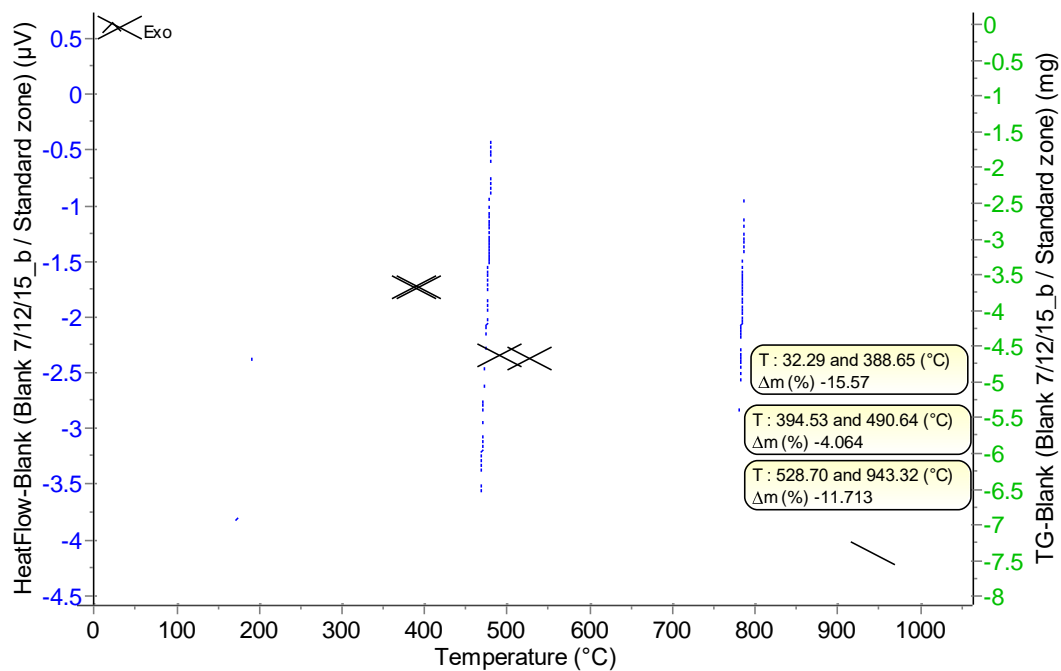
Experiment : MLTuv_8day_internal_(Kali)

Initial Mass : 23.32 (mg)



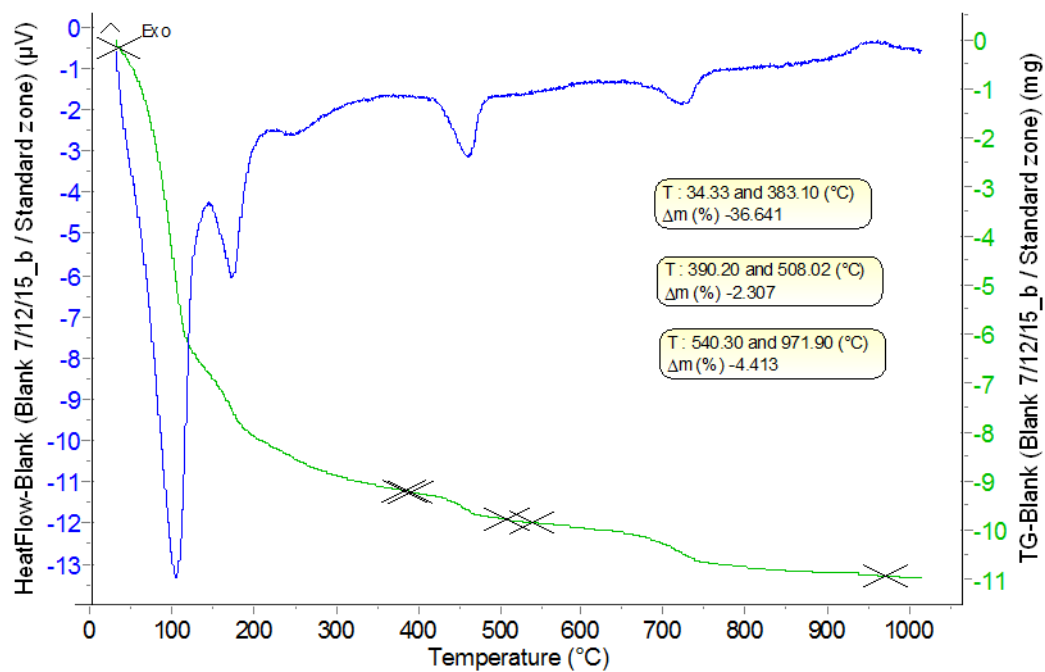
Experiment : MLTuvb_15day_internal (Kali)

Initial Mass : 23.23 (mg)



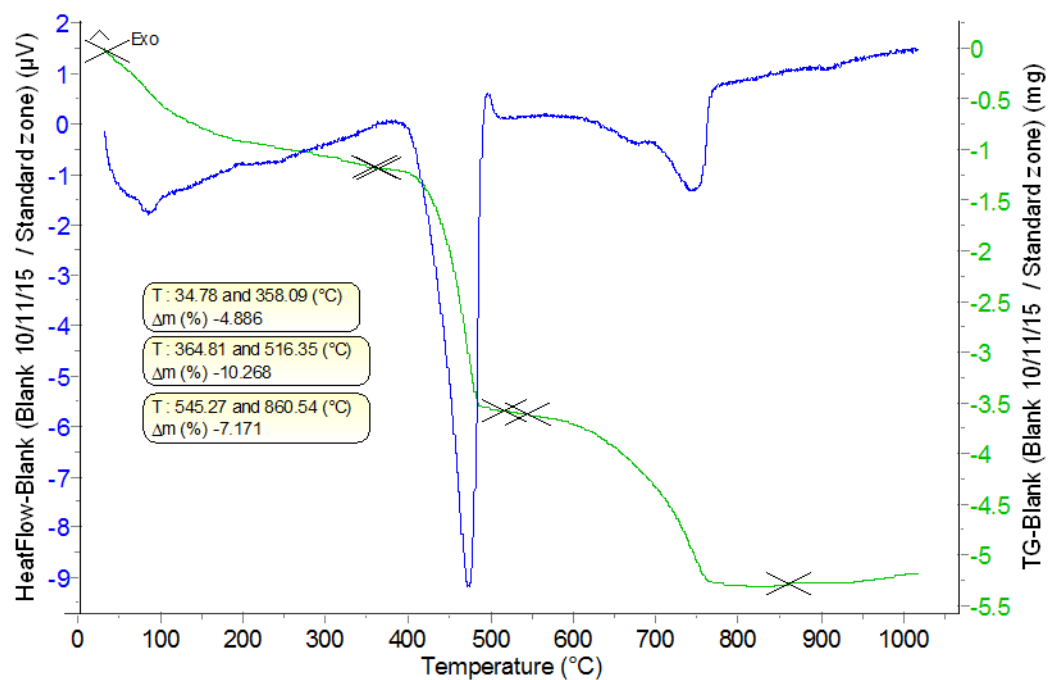
Experiment : MLTuv_21day_internal (Kali)

Initial Mass : 24.7 (mg)



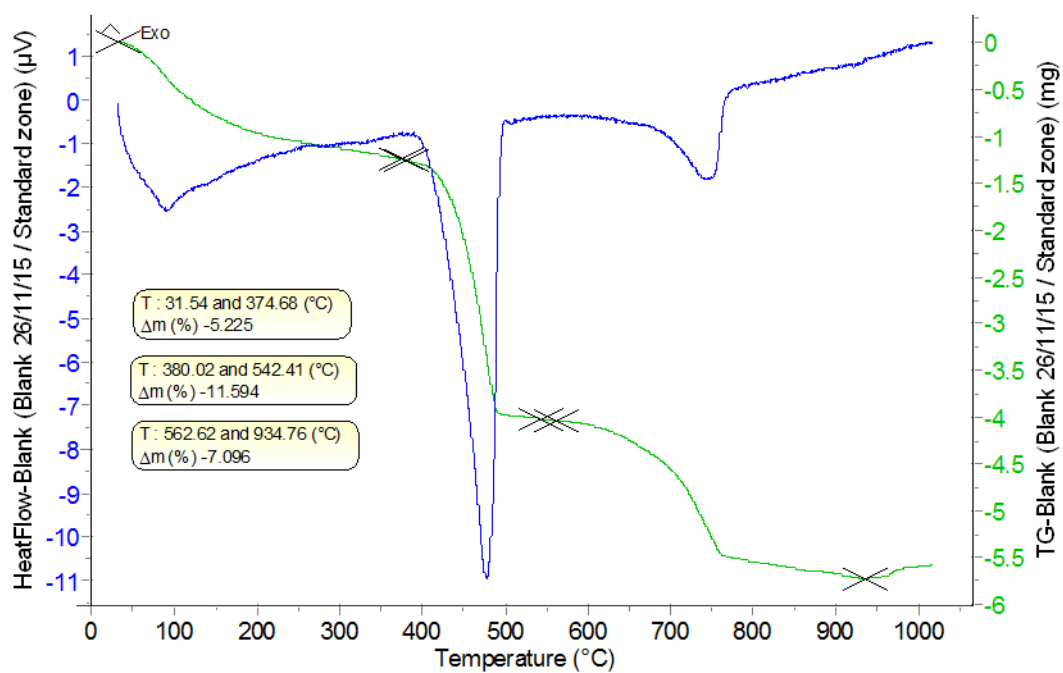
Experiment : Y_1day_internal (NHL, 1 day,Kali)

Initial Mass : 23.3 (mg)



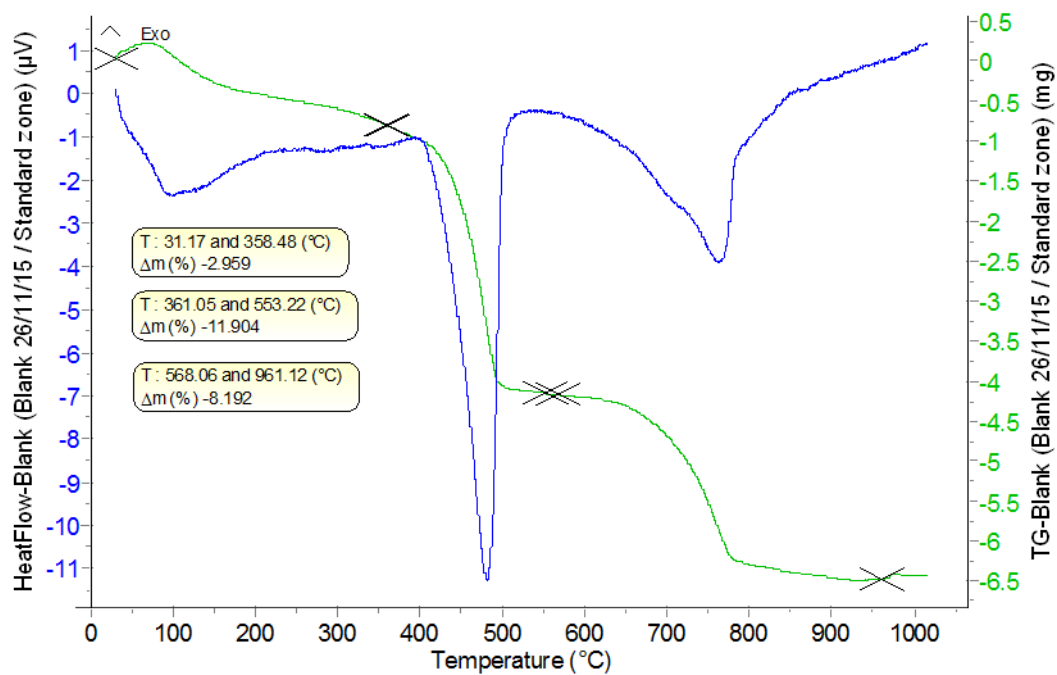
Experiment : Y_8day_internal (NHL, 8 day,Kali)

Initial Mass : 23.84 (mg)



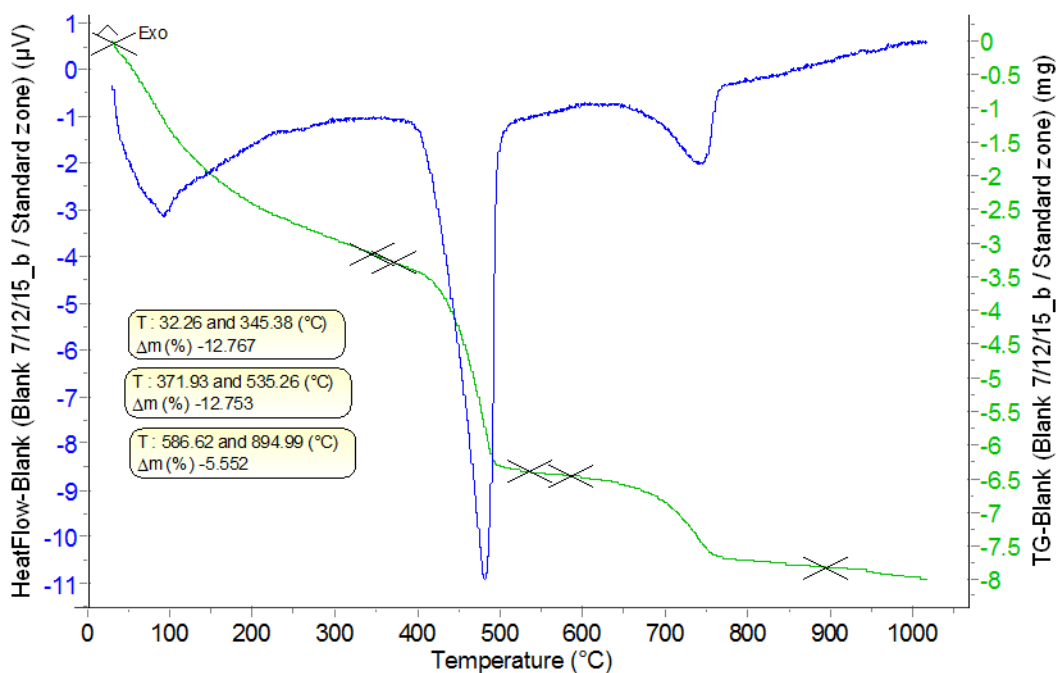
Experiment : Y_15day_internal (NHL, 15 day,Kali)

Initial Mass : 28.08 (mg)



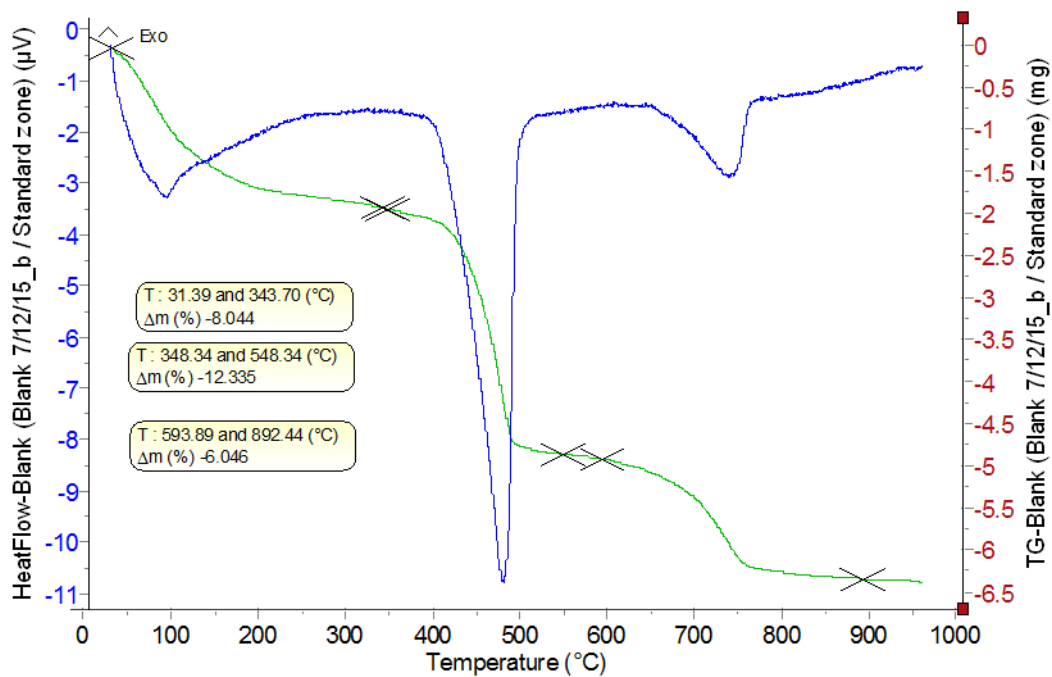
Experiment : Y_21day_internal (NHL,Kali)

Initial Mass : 24.34 (mg)



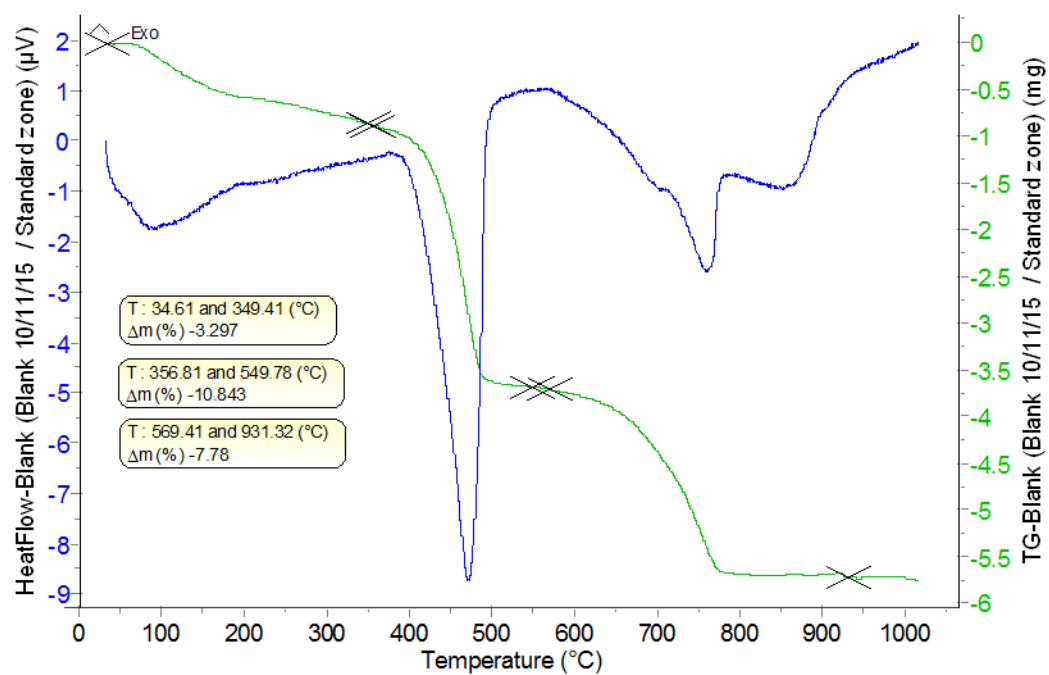
Experiment : Y_28day_internal (NHL,Kali)

Initial Mass : 23.63 (mg)



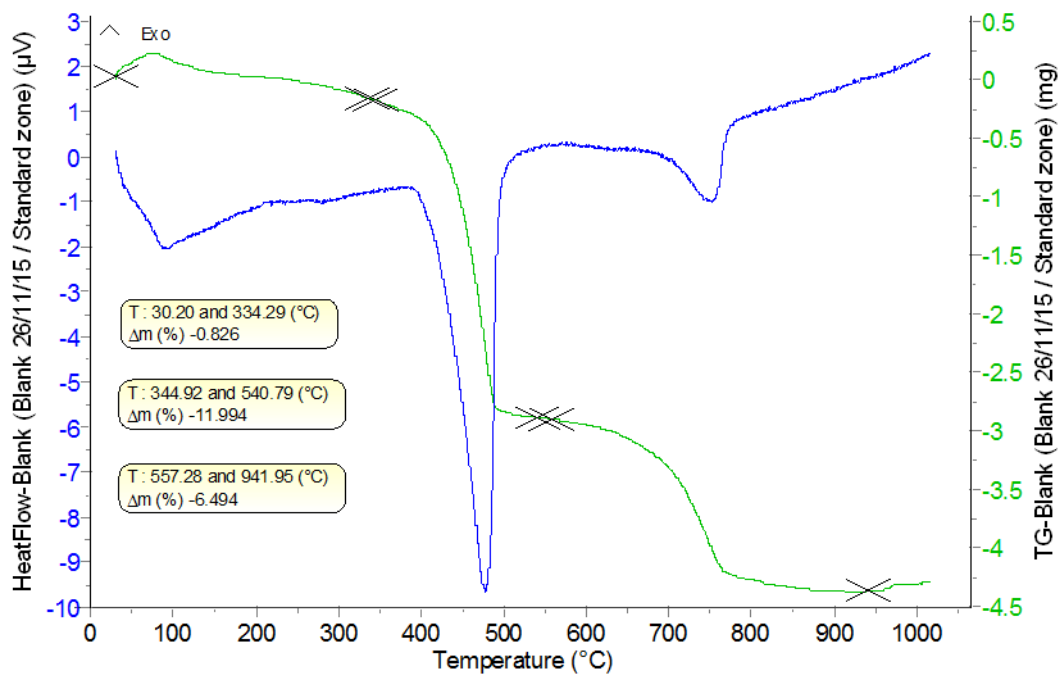
Experiment : YT_1day_internal (NHL with TiO_2 ,1 day,Kali)

Initial Mass : 25.86 (mg)



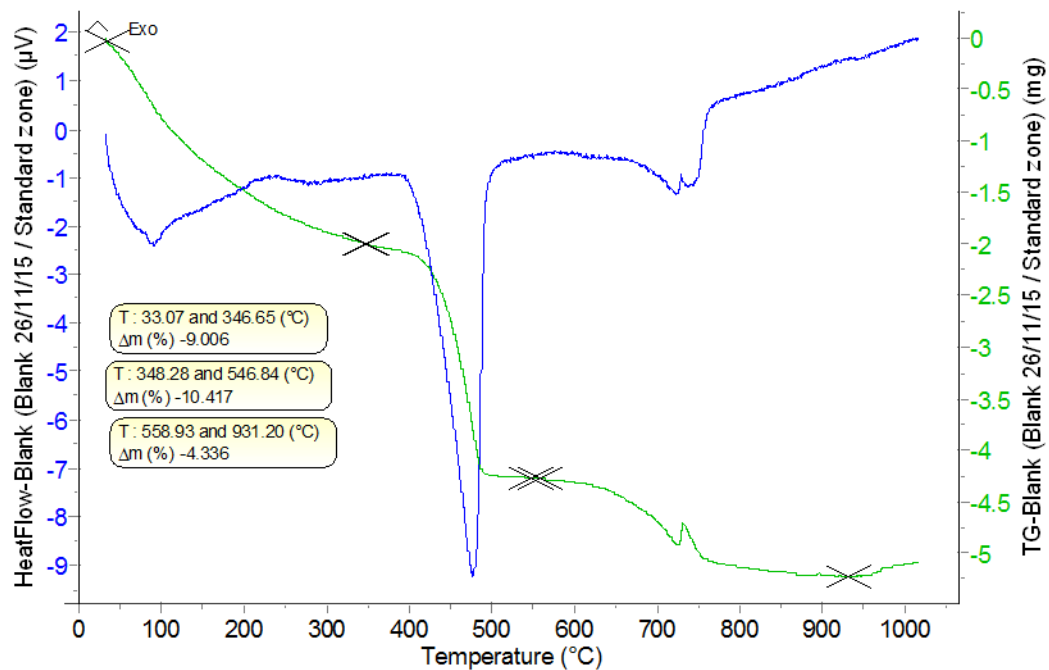
Experiment : YT_8day_internal (NHL with TiO₂, 8 day,Kali)

Initial Mass : 22.56 (mg)



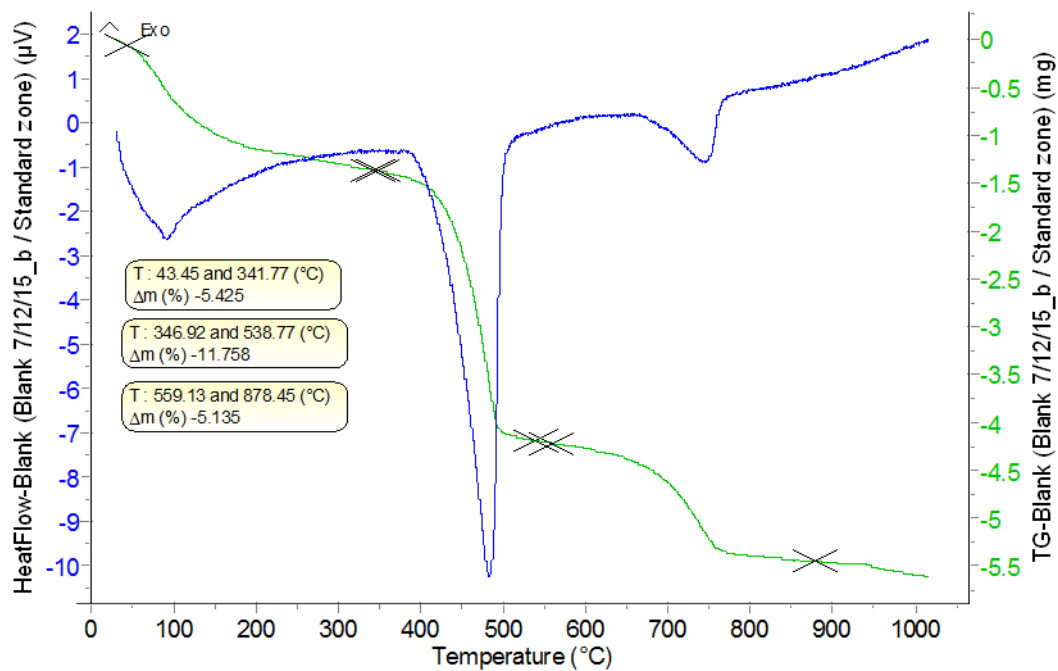
Experiment : YT_15day_internal (NHL with TiO₂, 15 day,Kali)

Initial Mass : 21.85 (mg)



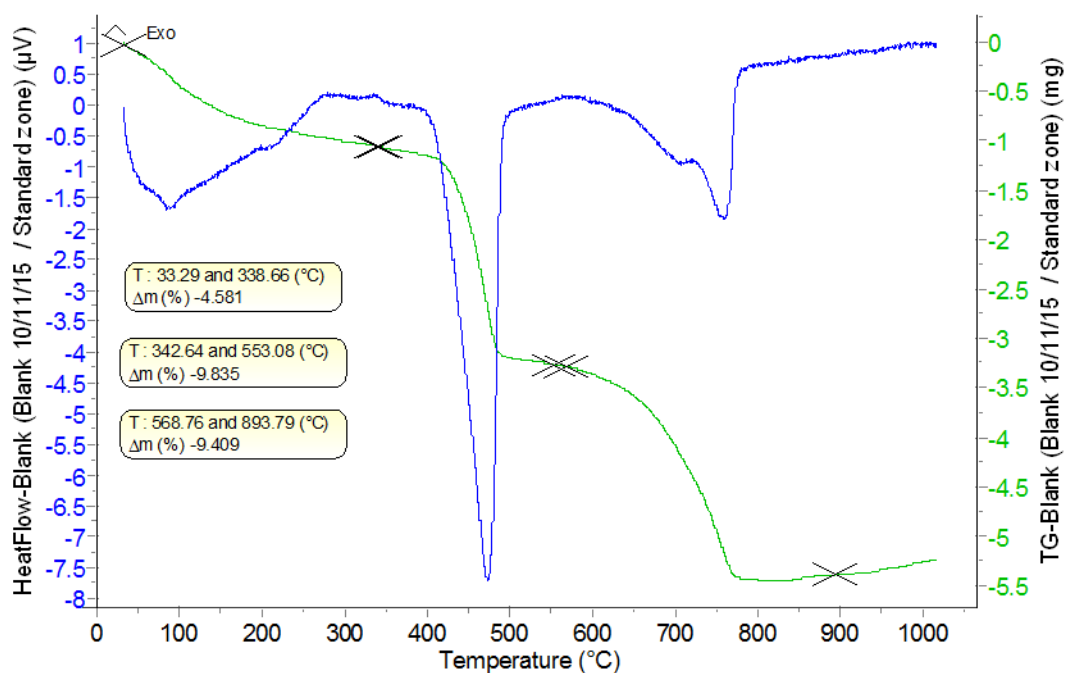
Experiment : YT_21day_internal (NHL with TiO₂,Kali)

Initial Mass : 24.02 (mg)



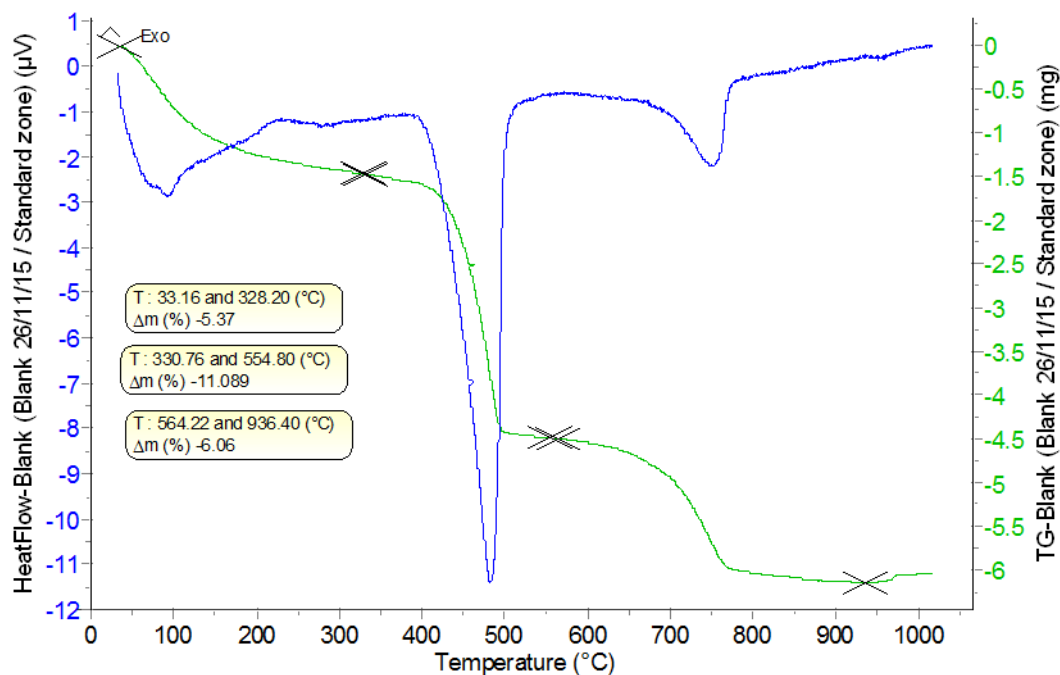
Experiment : YTuvc_1day_internal (NHL, 1 day,Kali)

Initial Mass : 22.4 (mg)



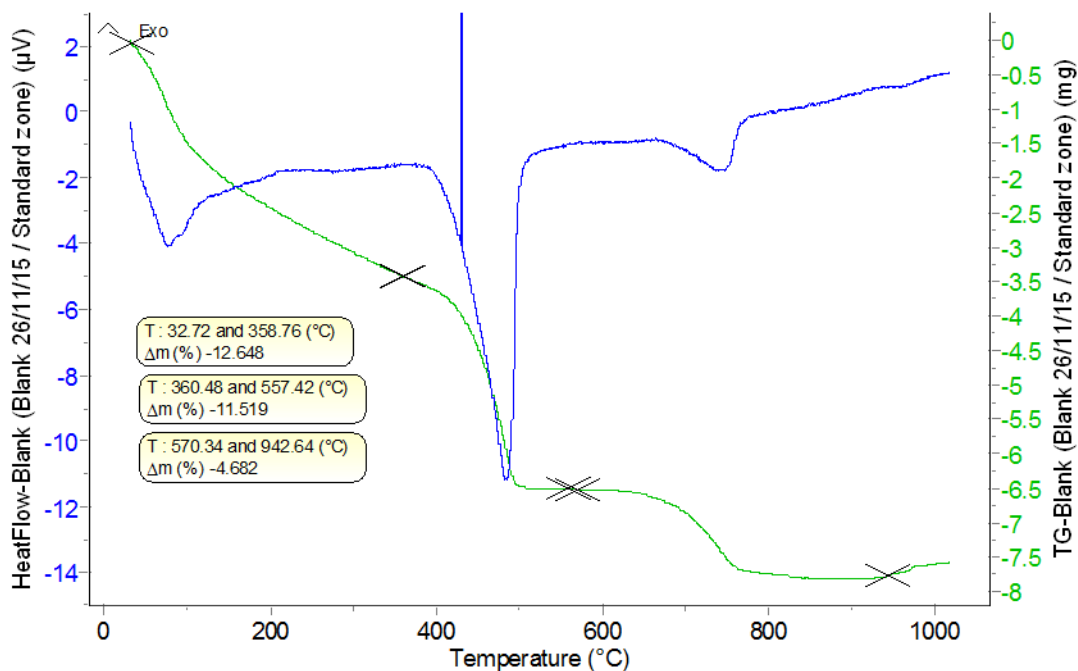
Experiment : YTuv_8day_internal (NHL with TiO₂uv, 8 day,Kali)

Initial Mass : 27.16 (mg)



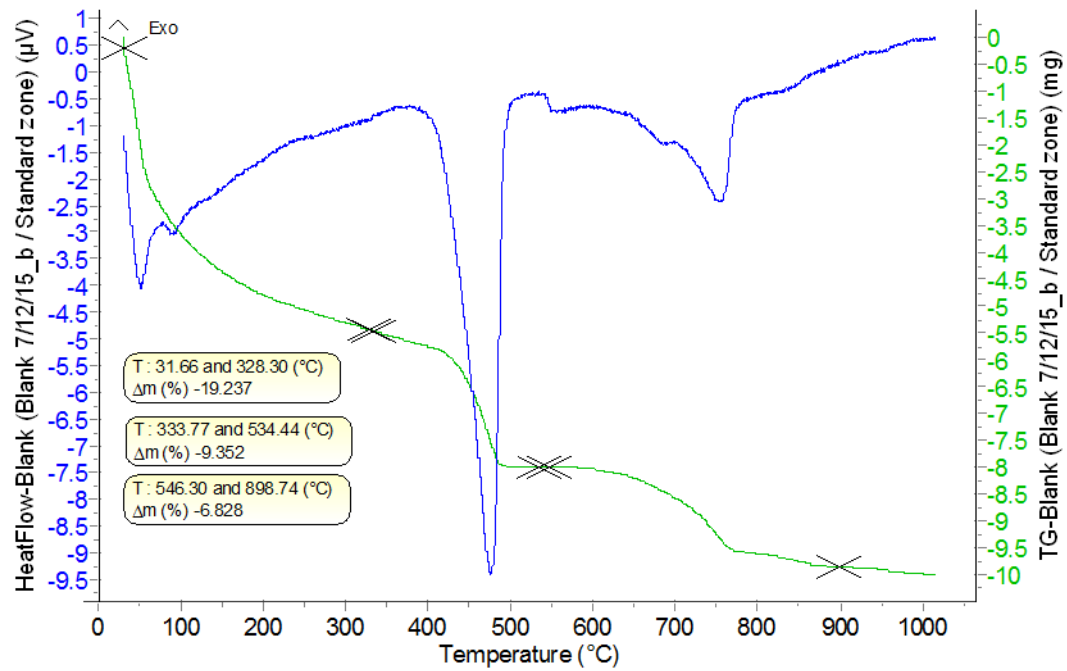
Experiment : YTuv_15day_internal (NHL with TiO₂uv, 15 day,Kali)

Initial Mass : 26.72 (mg)

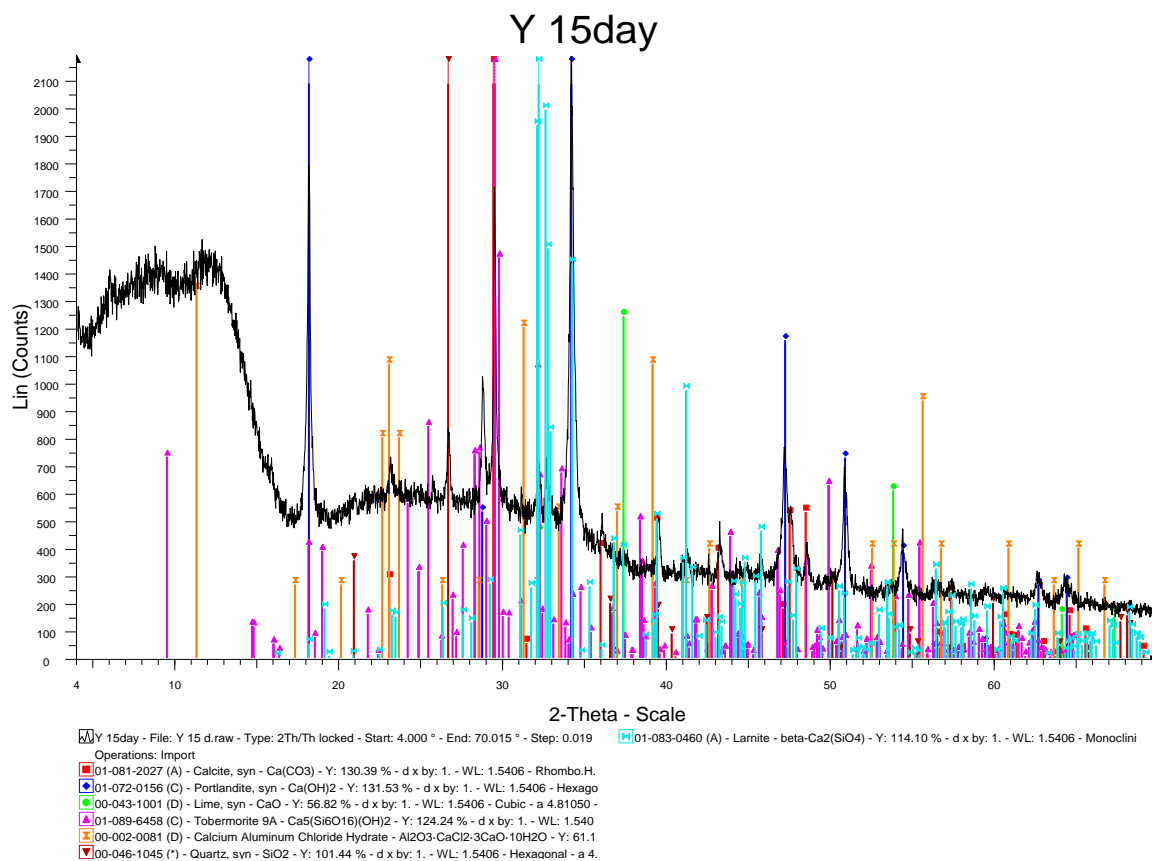
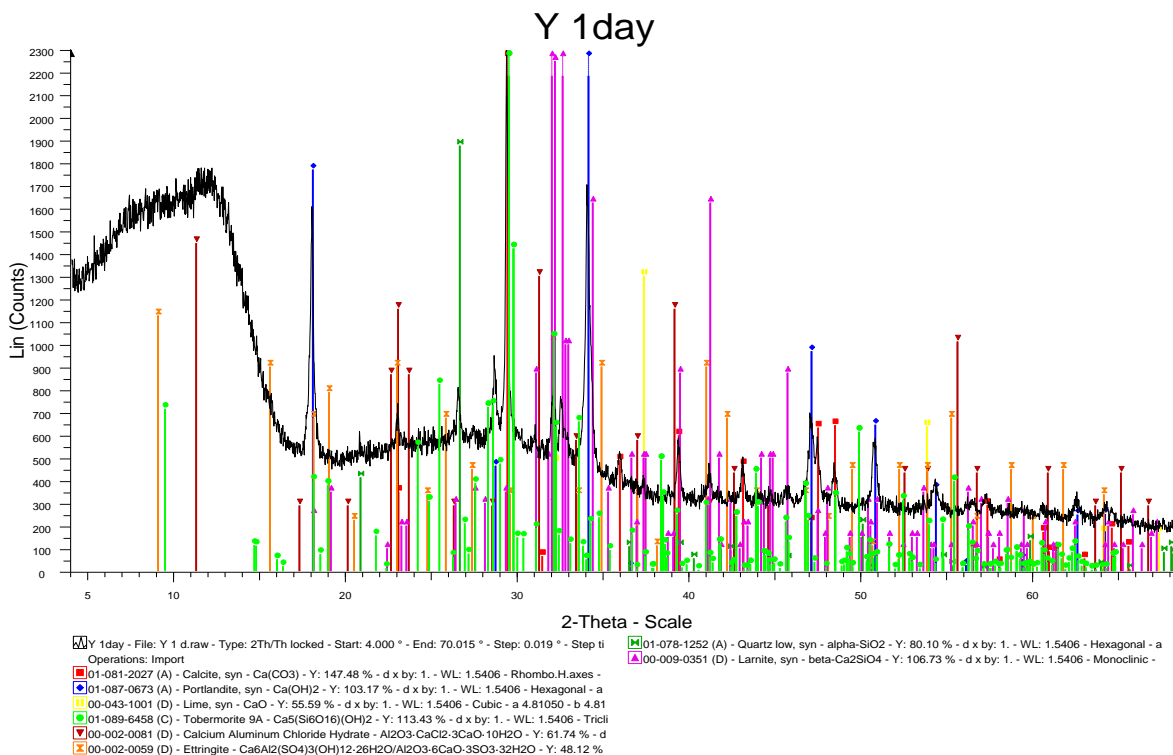


Experiment : YTuv_21day_internal (NHL with TiO₂uv,Kali)

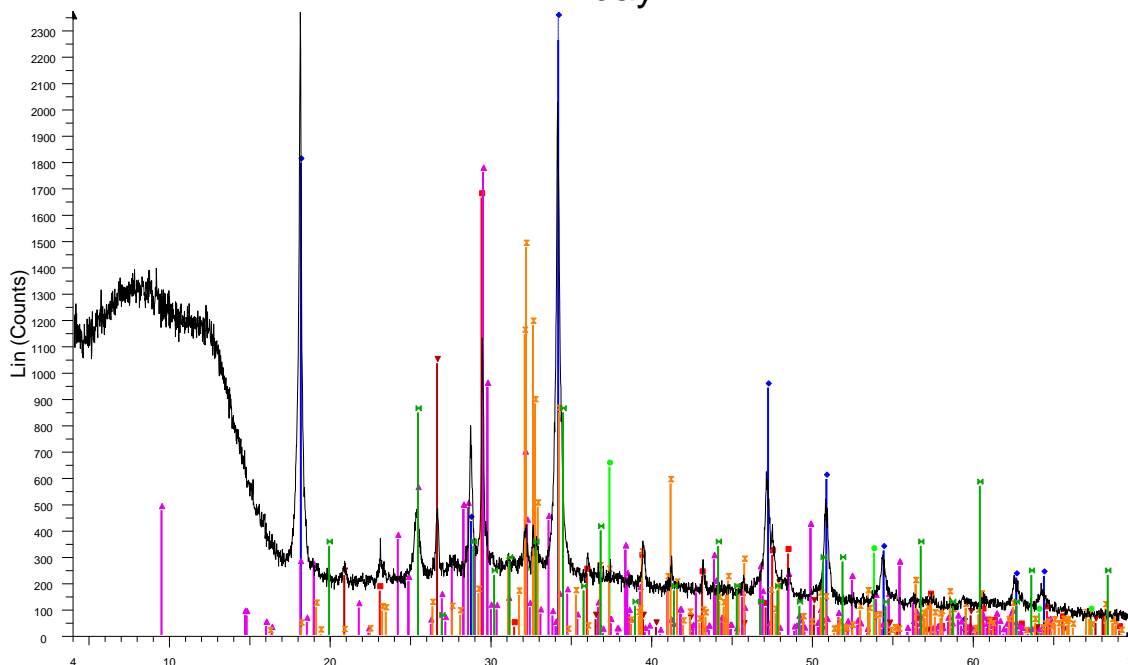
Initial Mass : 27.11 (mg)



2. Φάσματα XRD

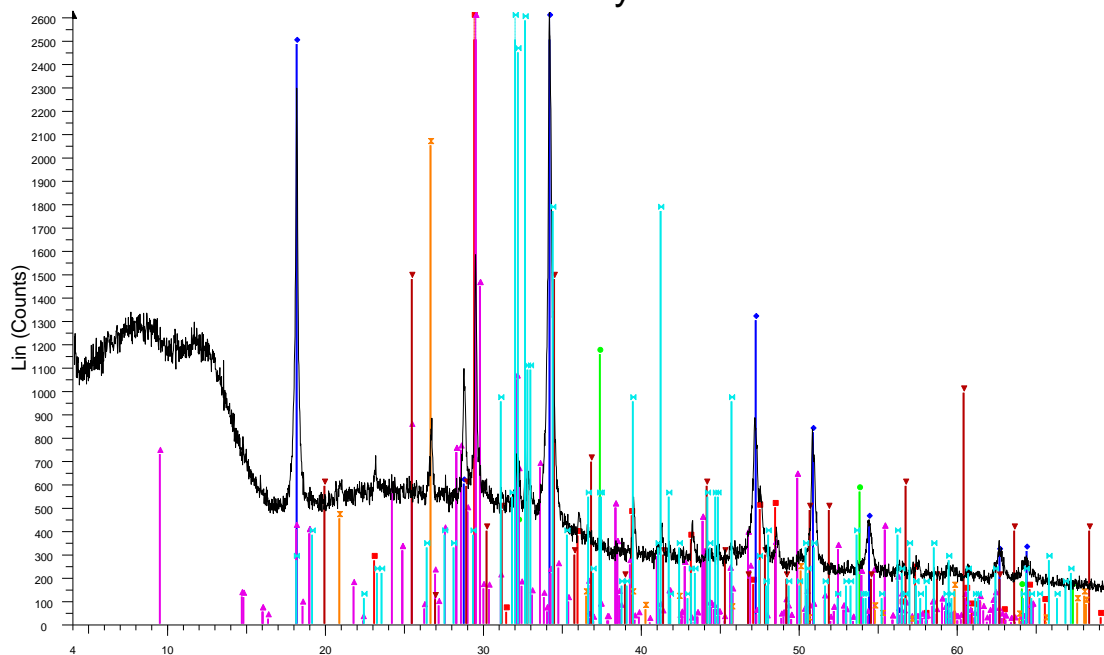


YT 21day

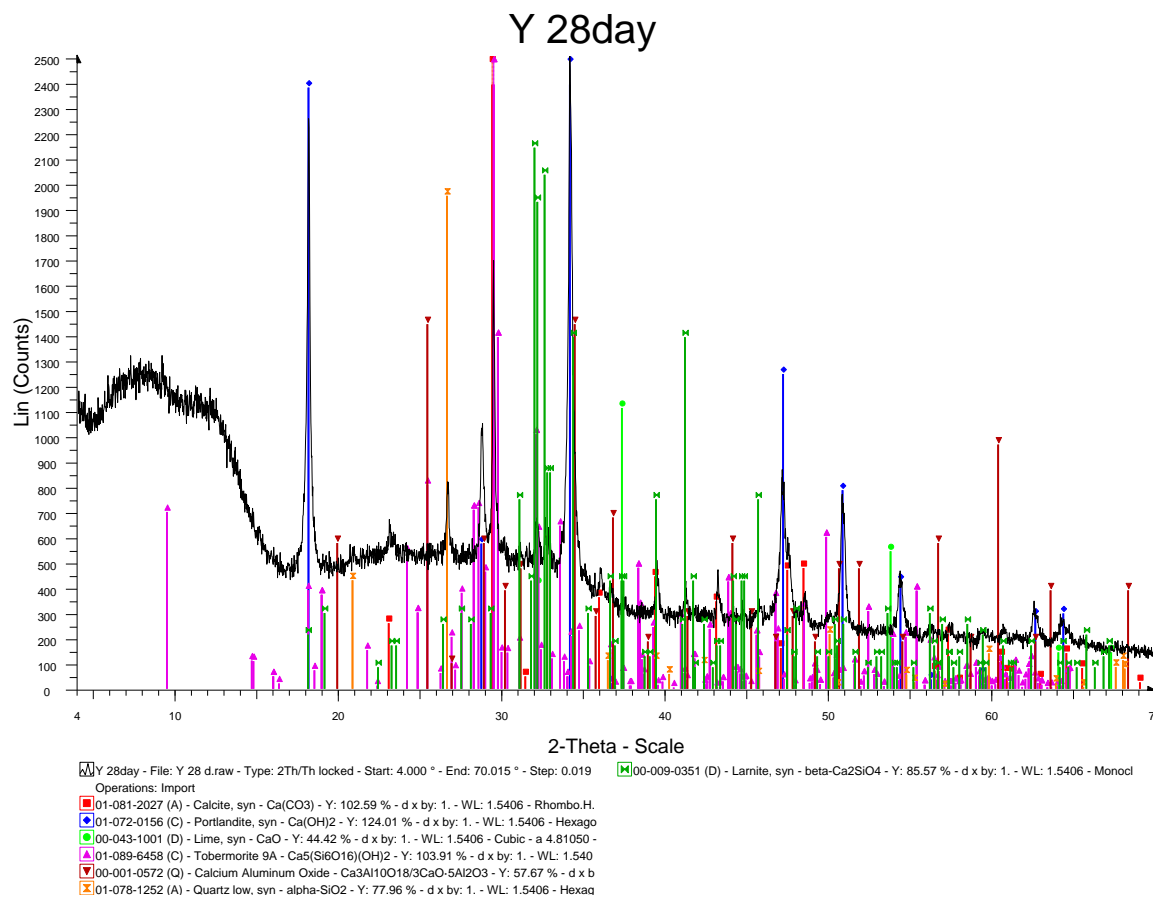


YT 21day - File: YT 21 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.0
 Operations: Import
 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ - Y: 70.24 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Y: 98.92 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagon
 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 26.98 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2$ - Y: 74.32 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - $\alpha\text{-SiO}_2$ - Y: 43.62 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexag
 01-083-0460 (A) - Larnite - $\beta\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4)$ - Y: 62.31 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic

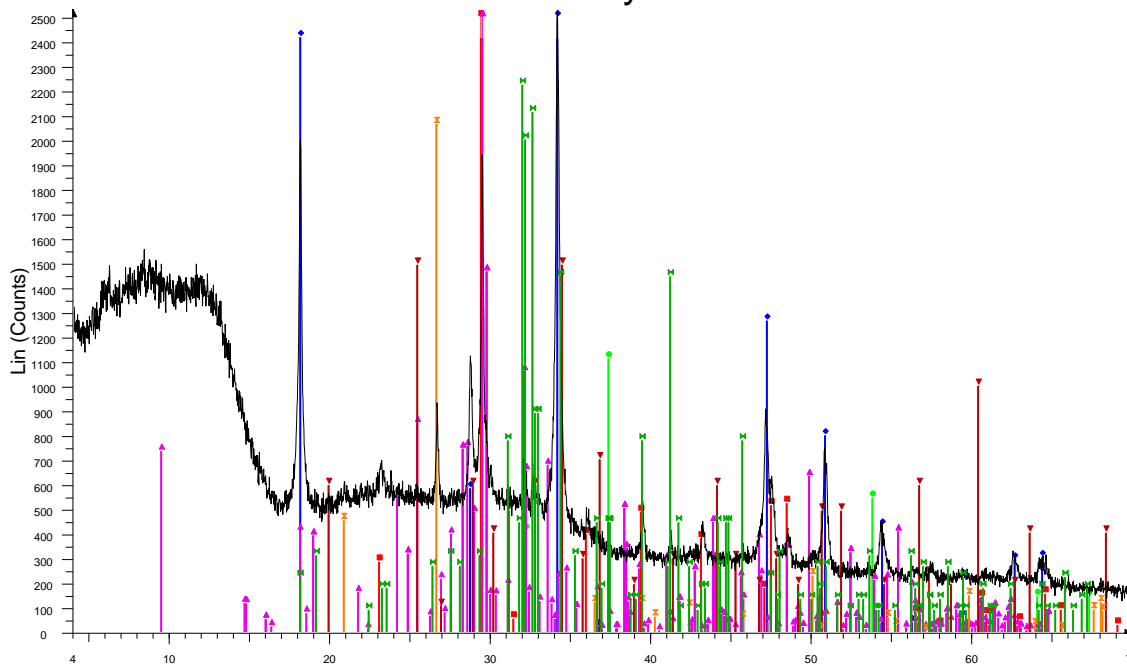
Y 21day



Y 21day - File: Y 21 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.019
 Operations: Import
 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ - Y: 102.23 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Y: 123.66 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexago
 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 44.09 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2$ - Y: 103.04 % - d x by: 1. - WL: 1.540
 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ - Y: 56.37 % - d x b
 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - $\alpha\text{-SiO}_2$ - Y: 78.24 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexag



Y 40day

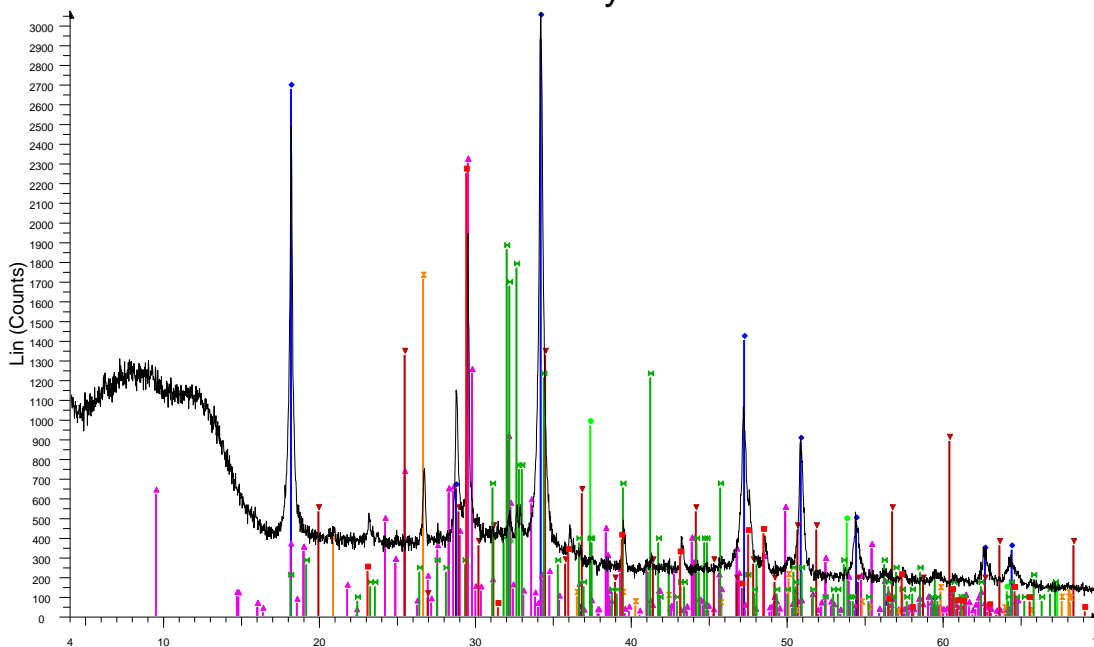


Y 40day - File: Y 40 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.019 [00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 88.04 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monocl

Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 111.38 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 124.82 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexago
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 44.01 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 108.27 % - d x by: 1. - WL: 1.540
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 59.07 % - d x b
- 01-078-1252 (A) - Quartz low. svn - alpha-SiO₂ - Y: 81.70 % - d x bv: 1. - WL: 1.5406 - Hexao

Y 65day

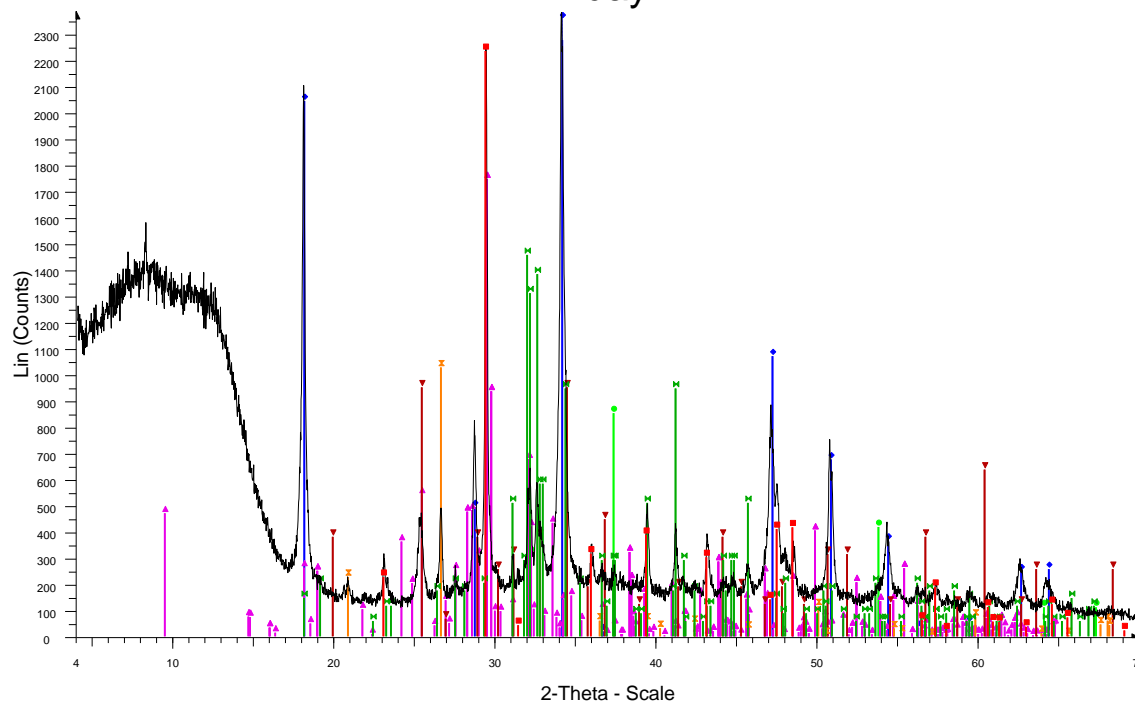


Y 65day - File: Y 65 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.019 [00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 60.69 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monocl

Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 73.37 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 113.81 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexago
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 31.55 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 75.04 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 43.21 % - d x b
- 01-078-1252 (A) - Quartz low. svn - alpha-SiO₂ - Y: 55.81 % - d x bv: 1. - WL: 1.5406 - Hexao

YT 1day

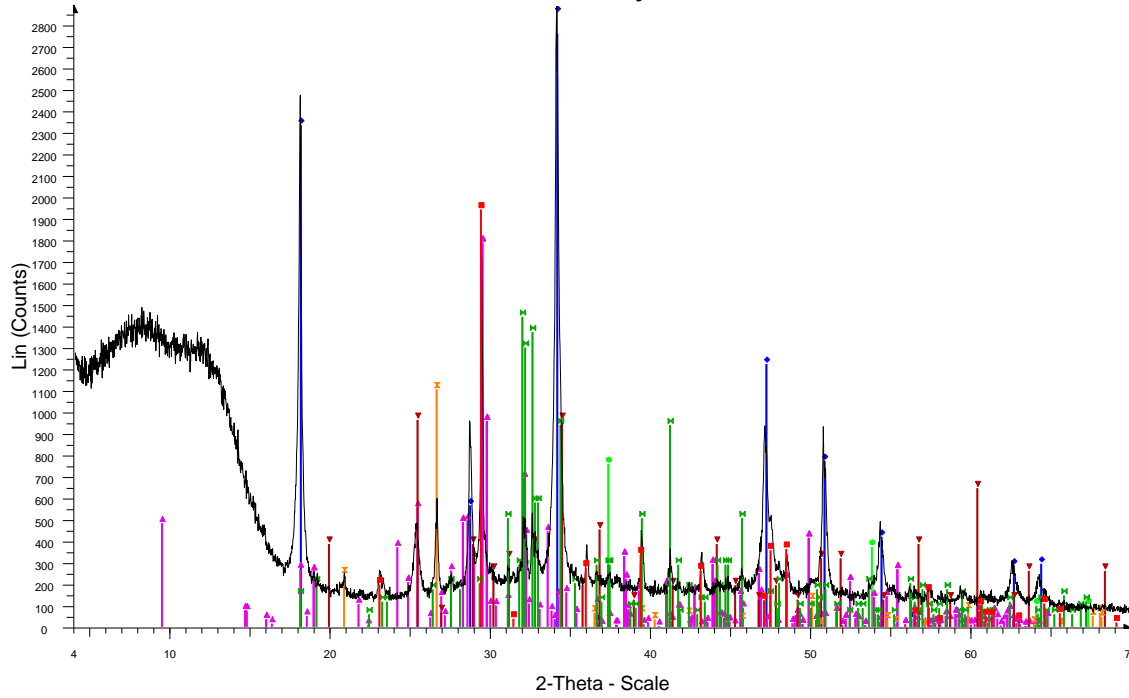


YT 1day - File: YT 1 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.019 [00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 61.12 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic]

Operations: Import

- [01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 93.84 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
- [01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 111.90 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexago
- [00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 35.76 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- [01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 73.30 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- [00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO·5Al₂O₃ - Y: 39.90 % - d x b
- [01-078-1252 (A) - Quartz low. svn - alpha-SiO₂ - Y: 43.09 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexao

YT 15day

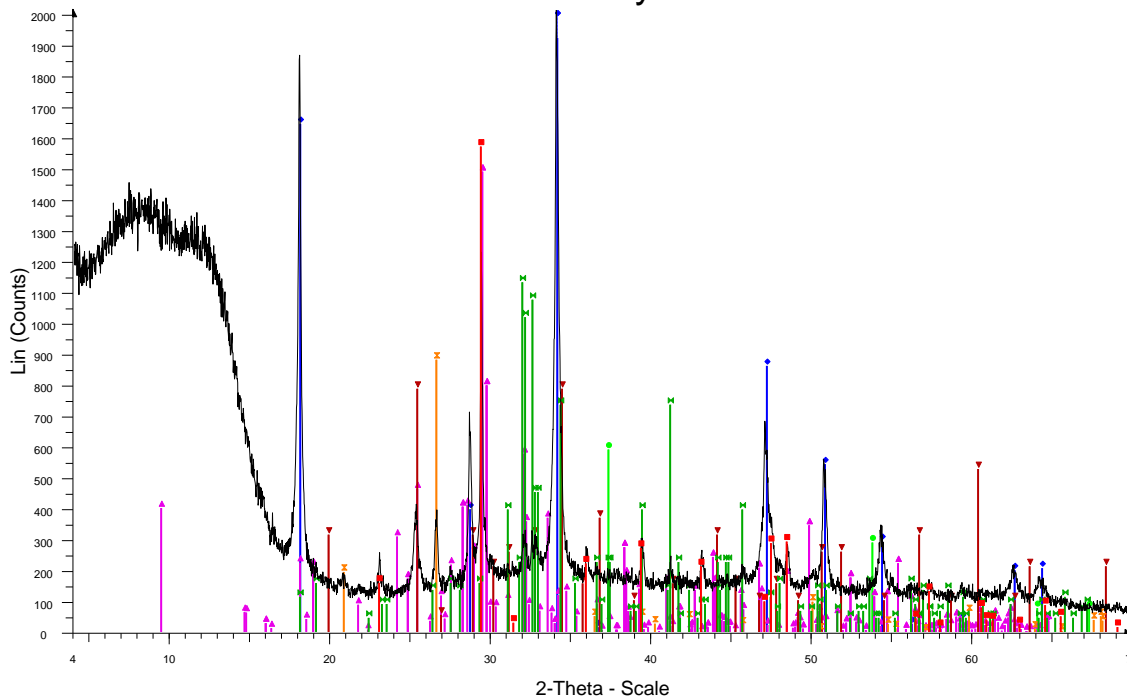


YT 15day - File: YT 15 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.0 [00-009-0351 (D) - Larinite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 49.95 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic]

Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 67.22 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 105.45 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 26.21 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 61.89 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO·5Al₂O₃ - Y: 33.31 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - alpha-SiO₂ - Y: 38.24 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal

YT 28day



YT 28day - File: YT 28 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.0 00-009-0351 (D) - Larinite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 56.26 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monocl

Operations: Import

01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 78.11 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a

01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 106.60 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexago

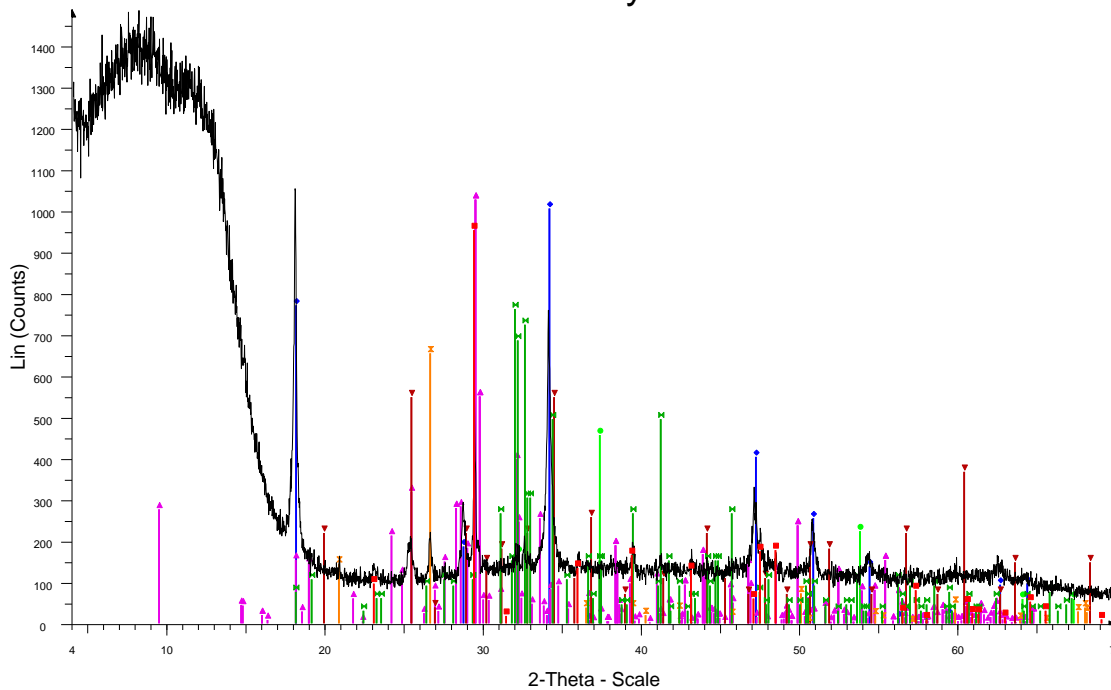
00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 29.36 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -

01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 74.04 % - d x by: 1. - WL: 1.5406

00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 39.11 % - d x b

01-078-1252 (A) - Quartz low. svn - alpha-SiO₂ - Y: 43.79 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexao

YT 40day



YT 40day - File: YT 40 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.0 00-009-0351 (D) - Larinite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 51.31 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monocl

Operations: Import

01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 64.20 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a

01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 67.73 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagon

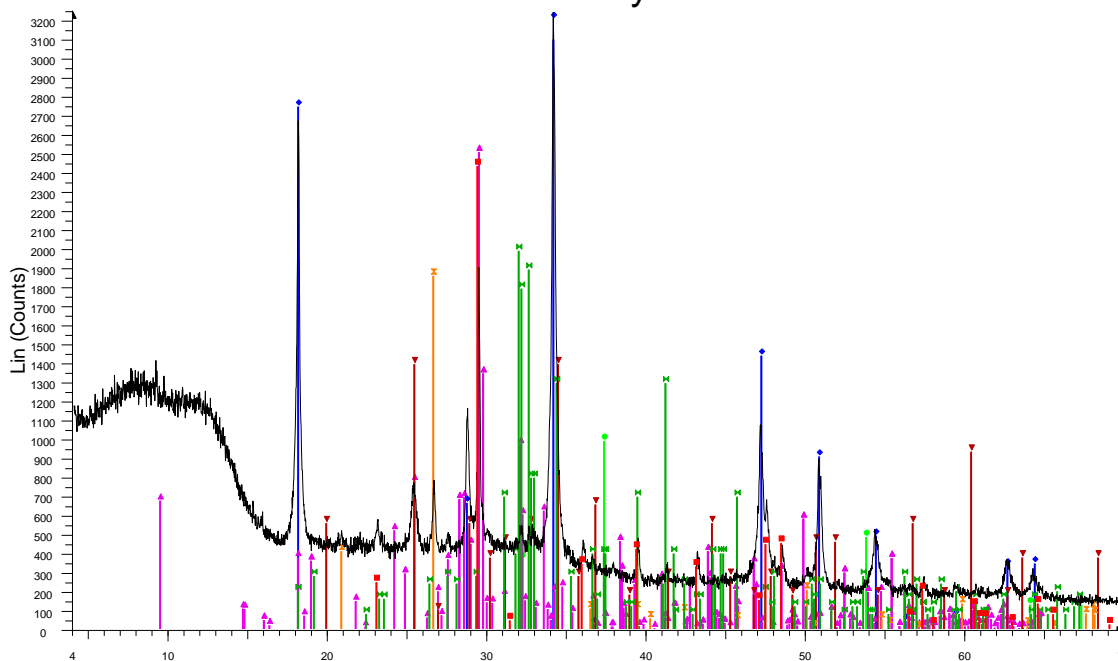
00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 30.73 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -

01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 69.17 % - d x by: 1. - WL: 1.5406

00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 36.92 % - d x b

01-078-1252 (A) - Quartz low. svn - alpha-SiO₂ - Y: 44.09 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexao

YT 65day

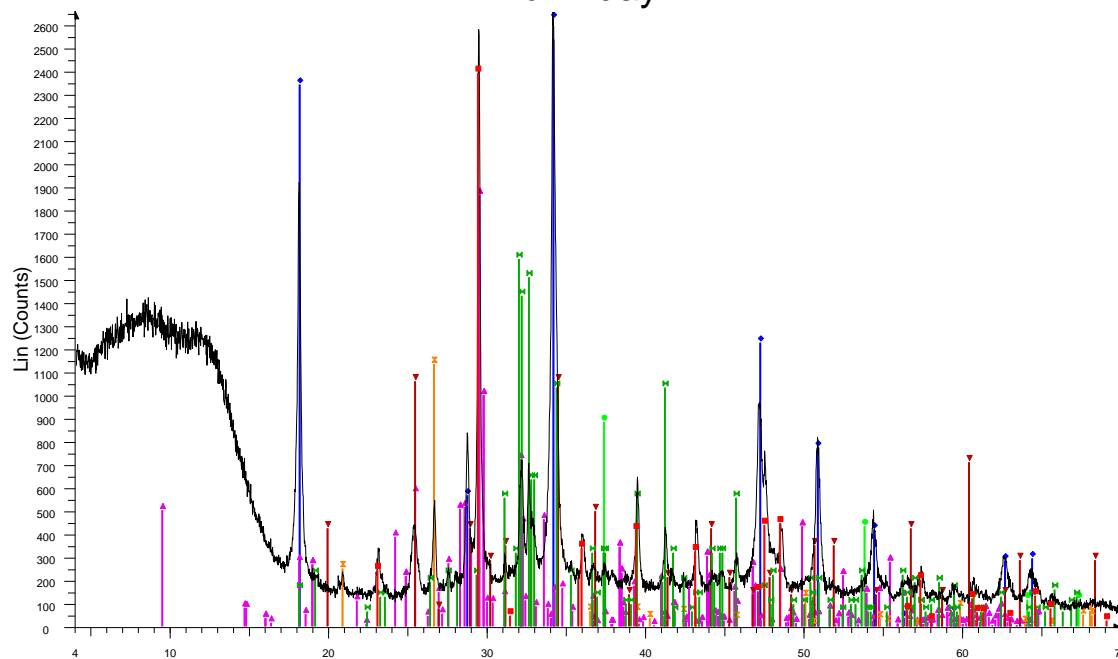


YT 65day - File: YT 65 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.0 [00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 61.32 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic]

Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 75.08 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 110.45 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 30.50 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 77.33 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 42.92 % - d x b
- 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - alpha-SiO₂ - Y: 57.27 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal

YTuv 1day

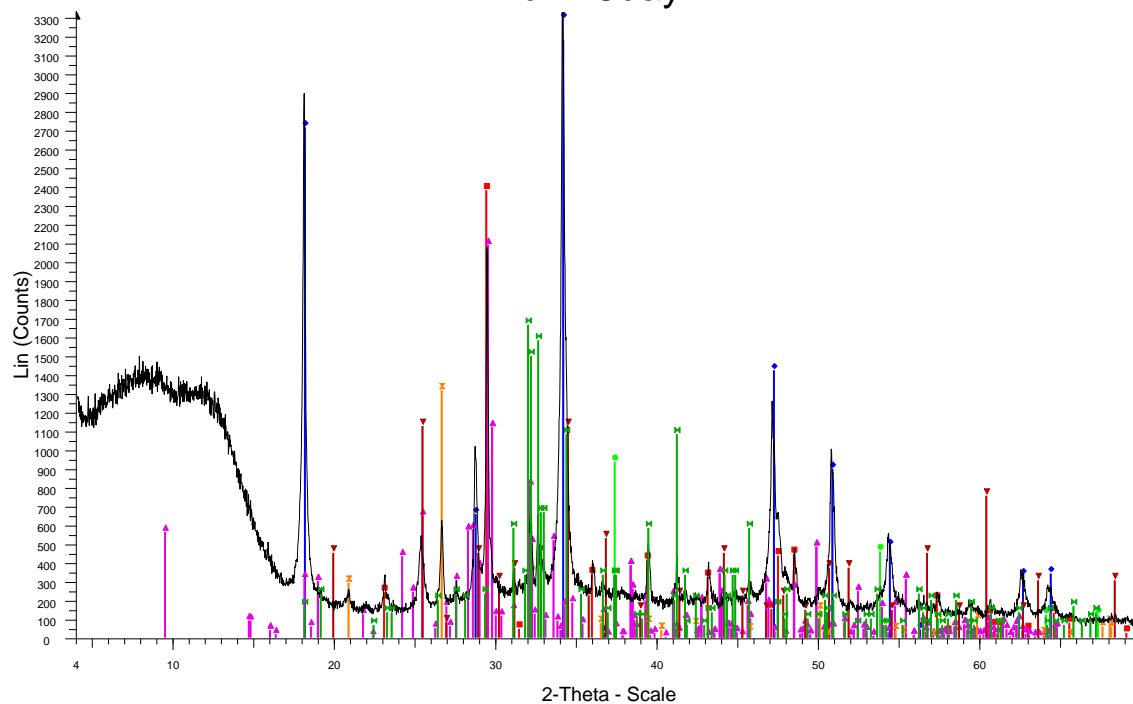


YTuv 1day - File: YTuv 1 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0 [00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 59.81 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic]

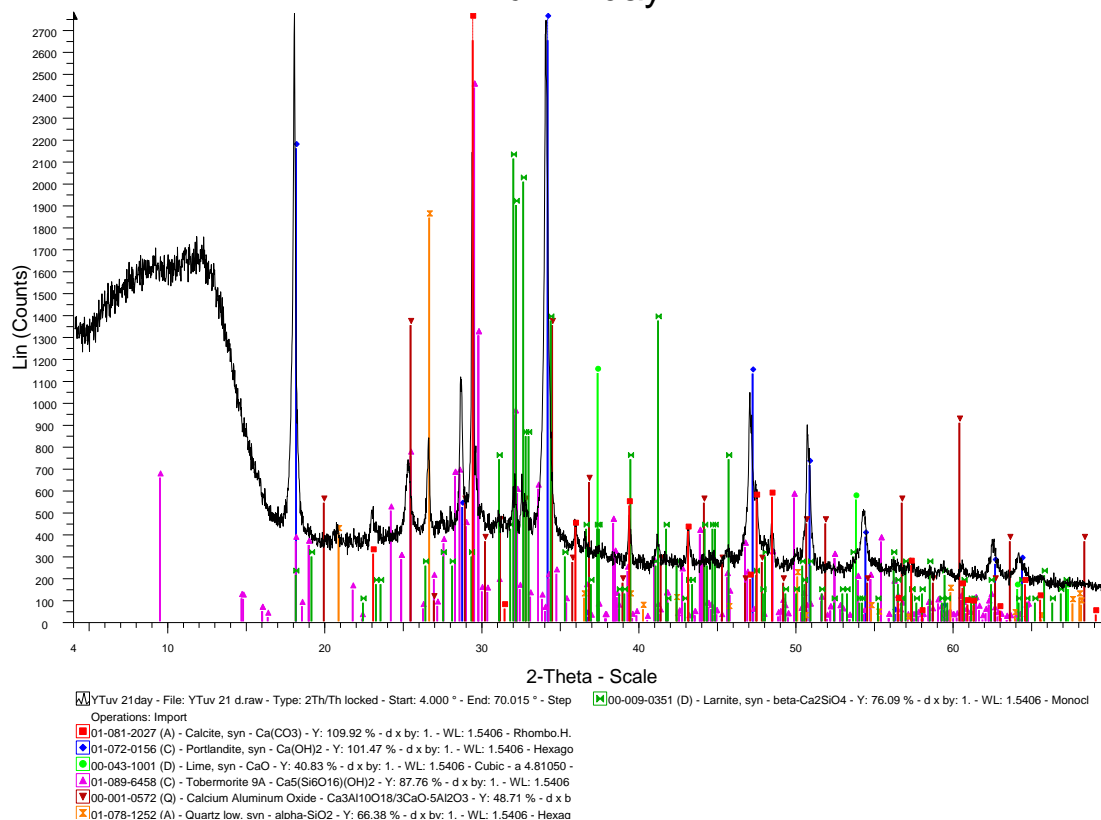
Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 90.11 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 115.04 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 33.29 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 70.26 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 39.89 % - d x b
- 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - alpha-SiO₂ - Y: 42.73 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal

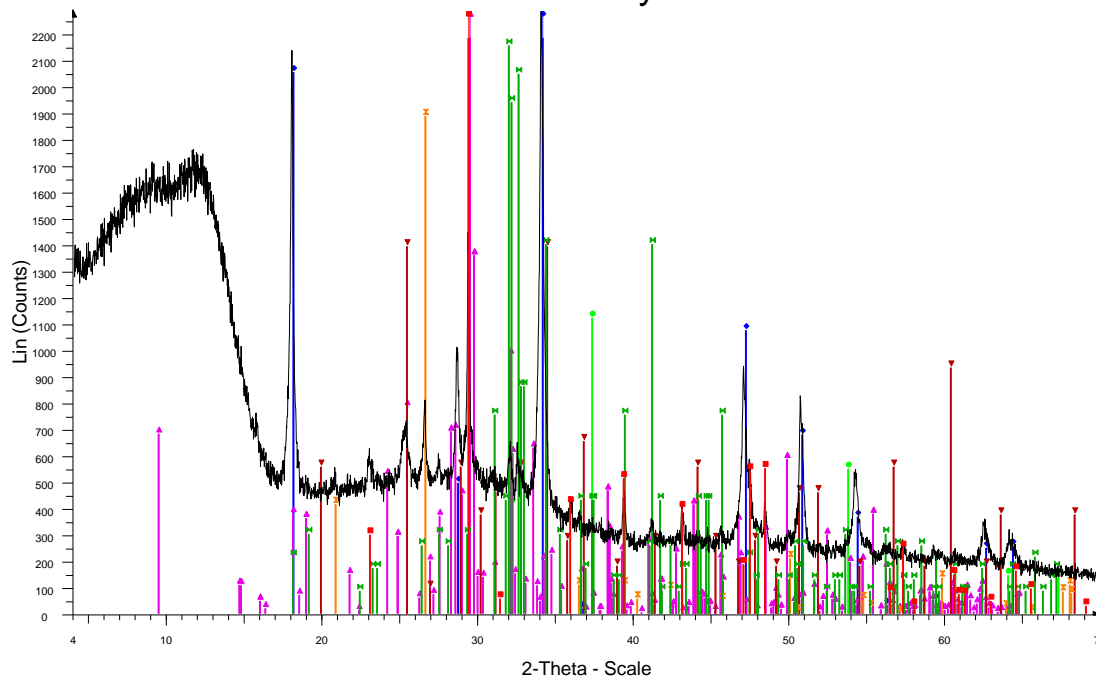
YTuv 15day



YTuv 21day



YTuv 28day

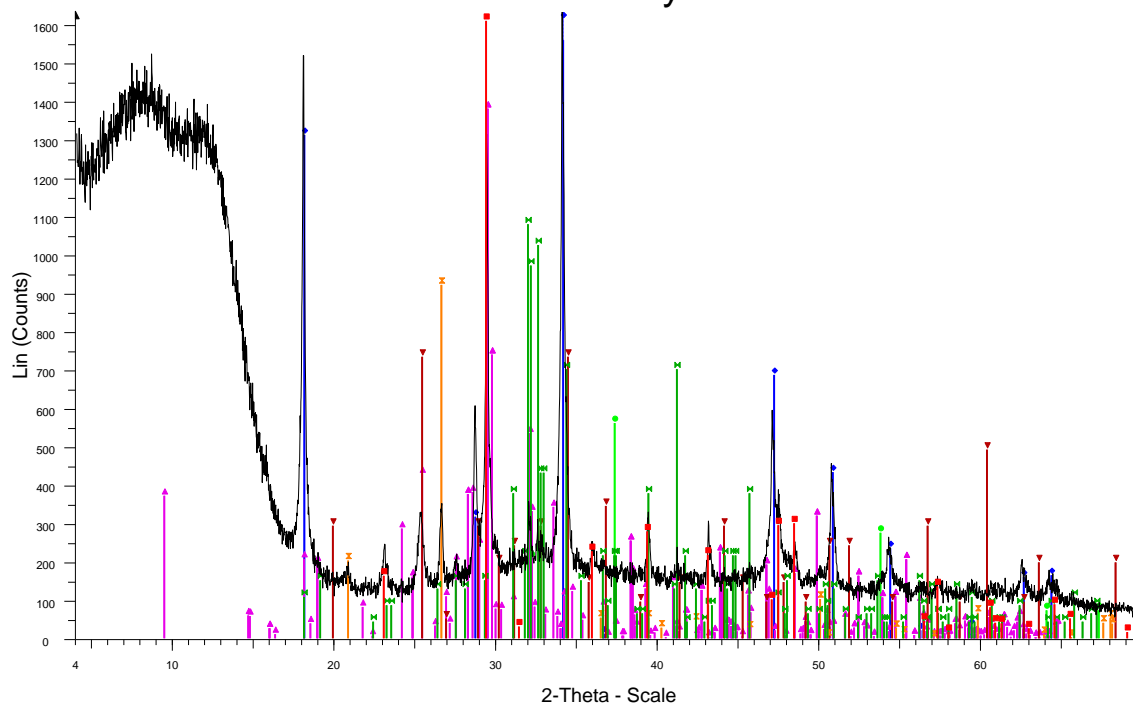


YTuv 28day - File: YTuv 28.d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 94.31 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic

Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 129.59 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 117.21 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 49.08 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 110.98 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 60.95 % - d x b
- 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - alpha-SiO₂ - Y: 82.59 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal

YTuv 40day

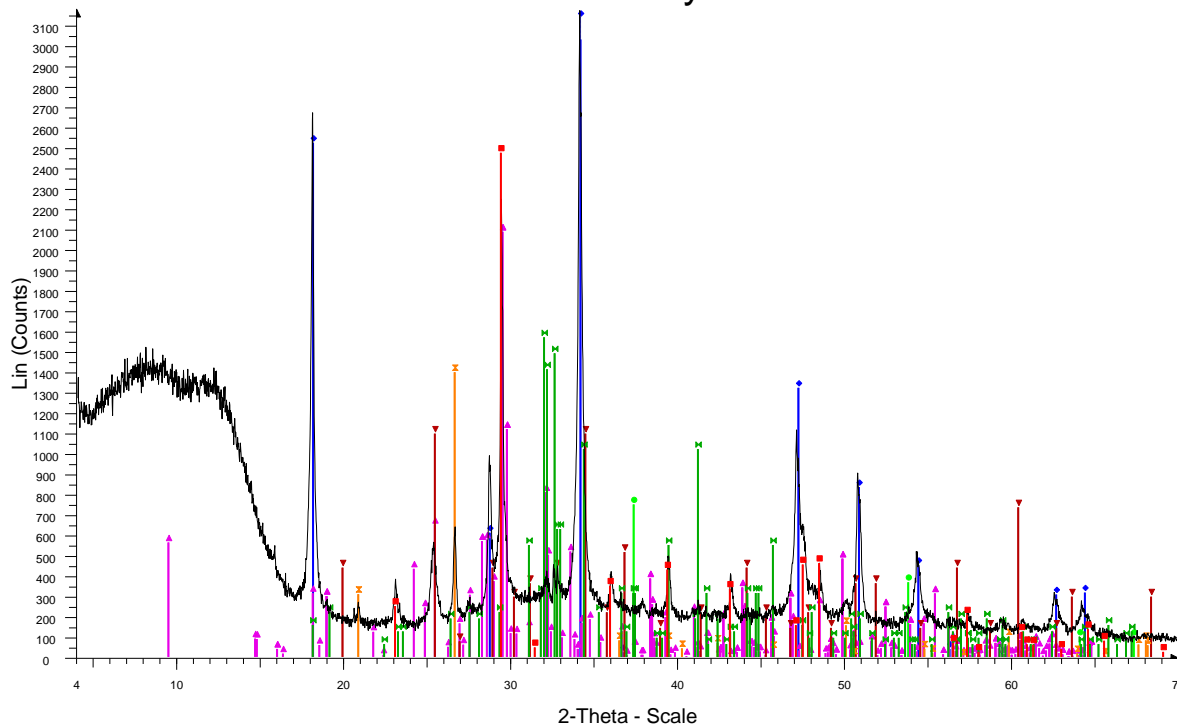


YTuv 40day - File: YTuv 40d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 00-009-0351 (D) - Larnite, syn - beta-Ca₂SiO₄ - Y: 66.16 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic

Operations: Import

- 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 98.64 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
- 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - Ca(OH)₂ - Y: 104.88 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal
- 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 34.40 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
- 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - Ca₅(Si₆O₁₆)(OH)₂ - Y: 84.62 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
- 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - Ca₃Al₁₀O₁₈/3CaO-5Al₂O₃ - Y: 44.97 % - d x b
- 01-078-1252 (A) - Quartz low, syn - alpha-SiO₂ - Y: 56.46 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal

YTuv 65day

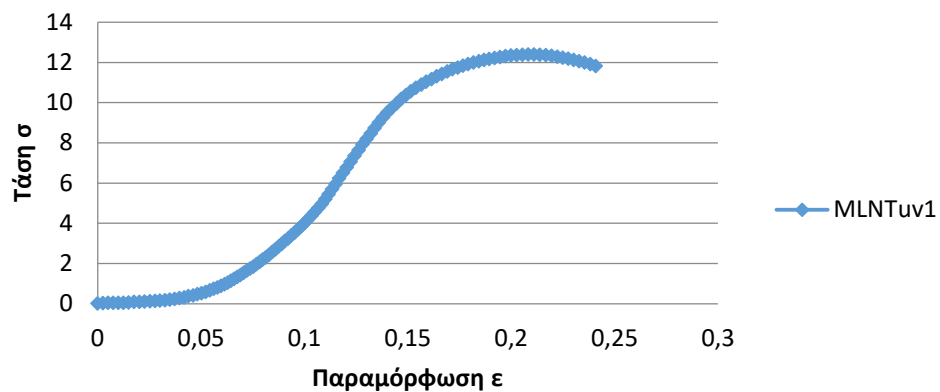


YTuv 65day - File: YTuv 65 d.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.015 ° - Step: 0.015 ° - WL: 1.5406 - Monoclinic
 Operations: Import

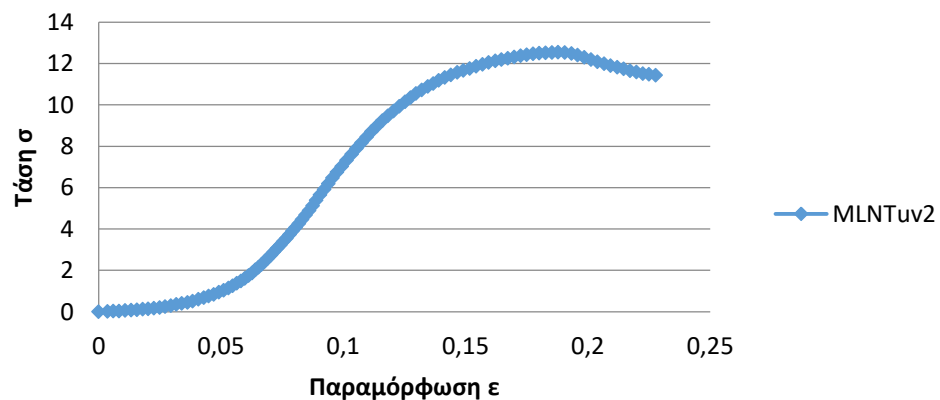
■ 01-081-2027 (A) - Calcite, syn - $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ - Y: 78.03 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.a
■ 01-072-0156 (C) - Portlandite, syn - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Y: 103.76 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexago
■ 00-043-1001 (D) - Lime, syn - CaO - Y: 23.59 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.81050 -
■ 01-089-6458 (C) - Tobermorite 9A - $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2$ - Y: 65.81 % - d x by: 1. - WL: 1.5406
■ 00-001-0572 (Q) - Calcium Aluminum Oxide - $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2$ - Y: 34.55 % - d x b
■ 01-078-1252 (A) - Quartz low. svn - $\alpha\text{-SiO}_2$ - Y: 44.08 % - d x bv: 1. - WL: 1.5406 - Hexao

Δοκιμή θλίψης 28 ημερών

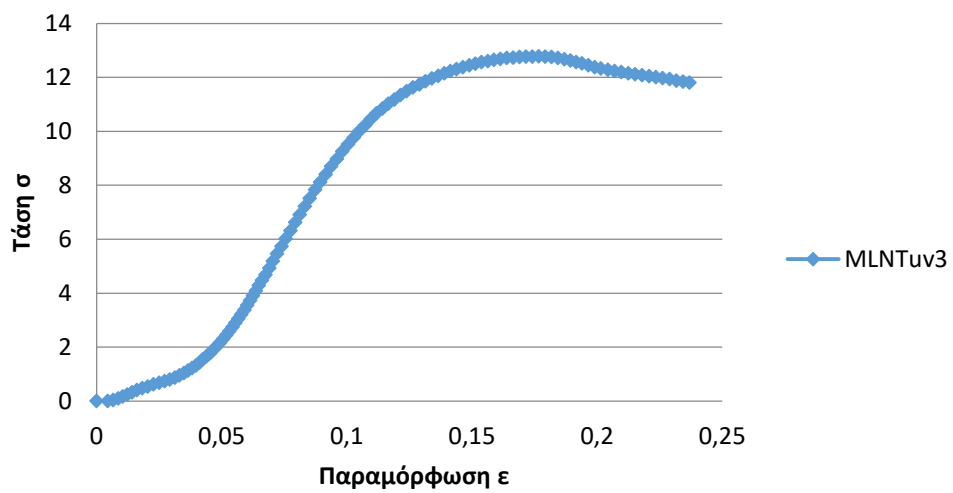
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLNTuv1

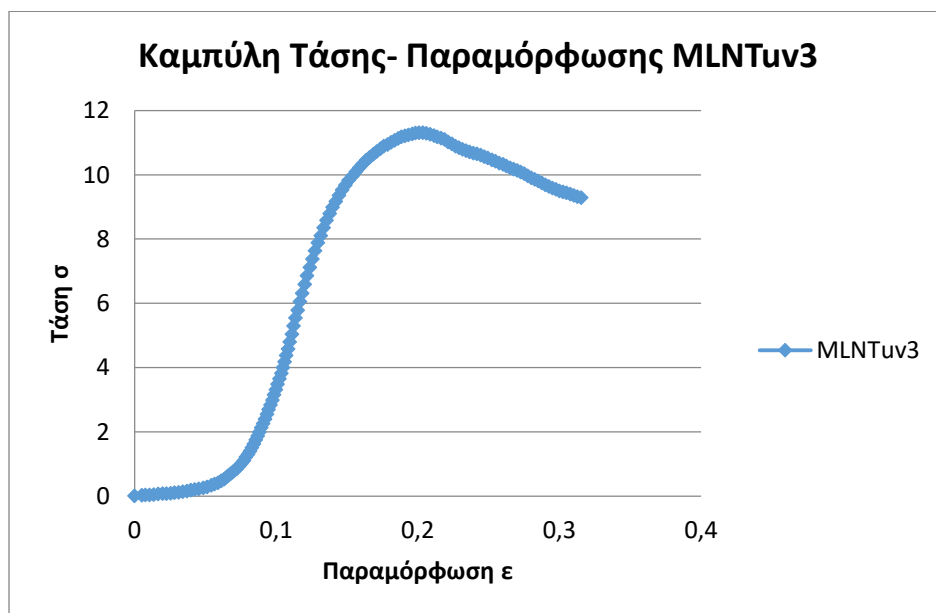
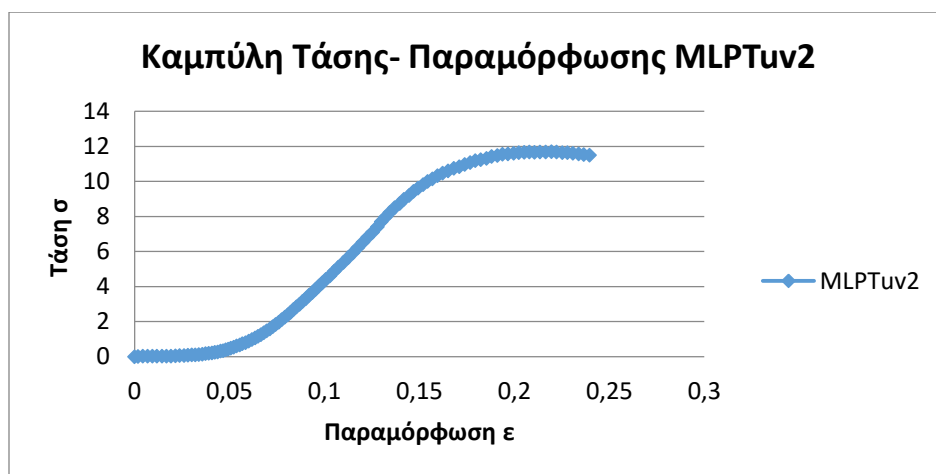
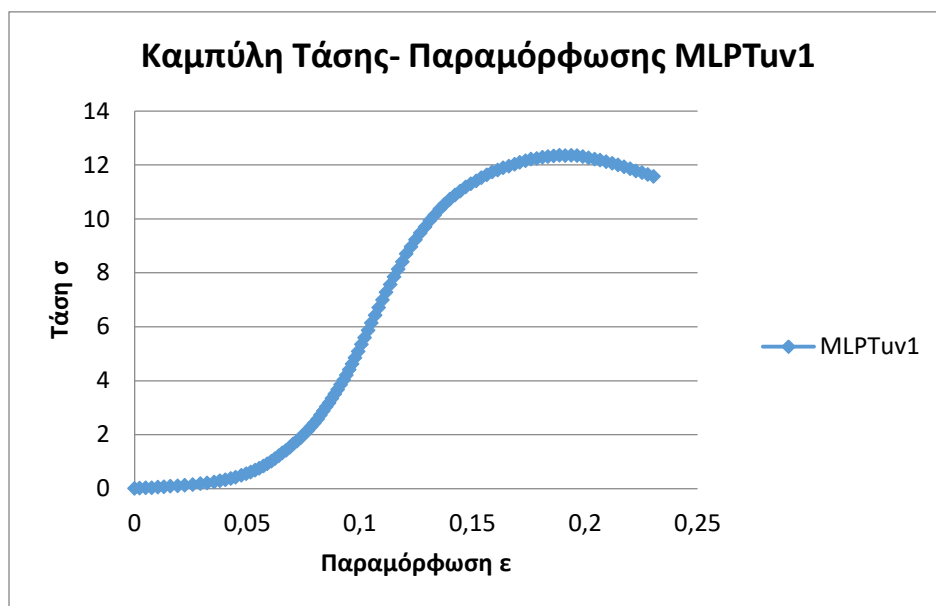


Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLNTuv2

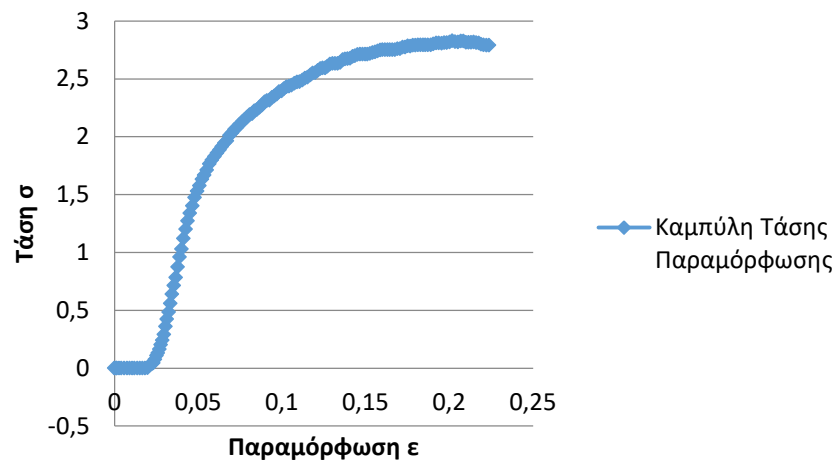


Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLNTuv3

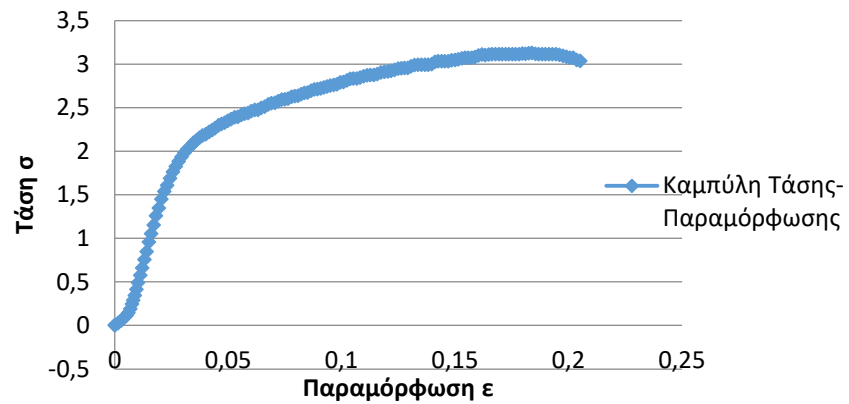




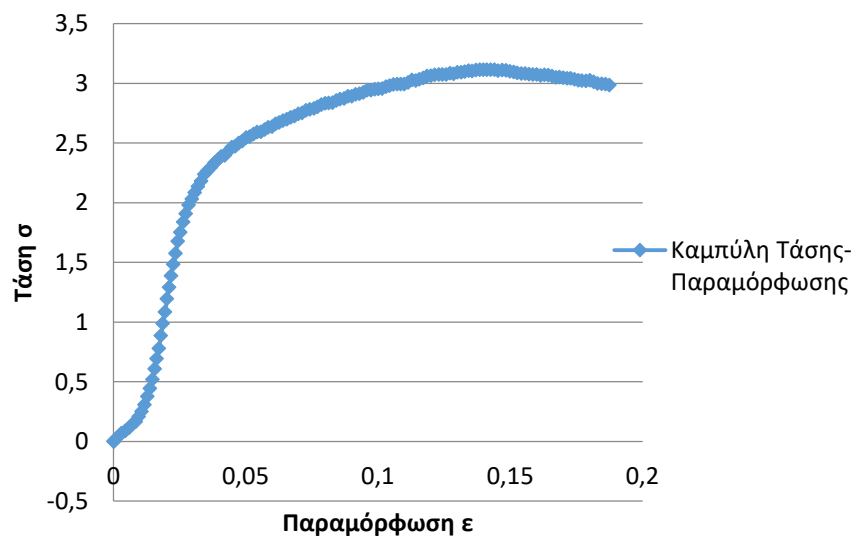
Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης ΥΝΤυν 1



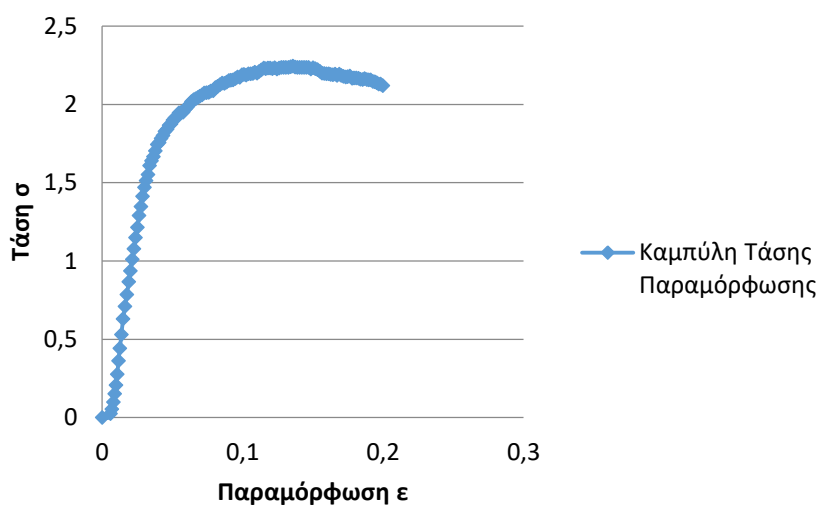
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης ΥΝΤυν 2



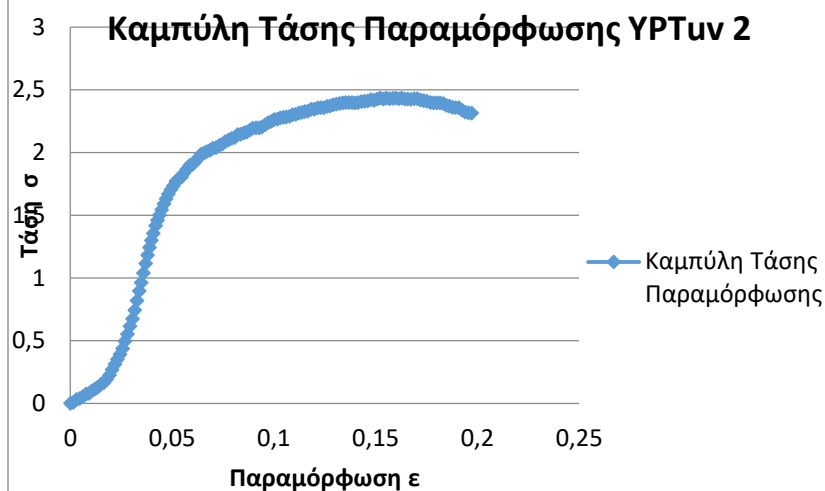
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης ΥΝΤυν 3



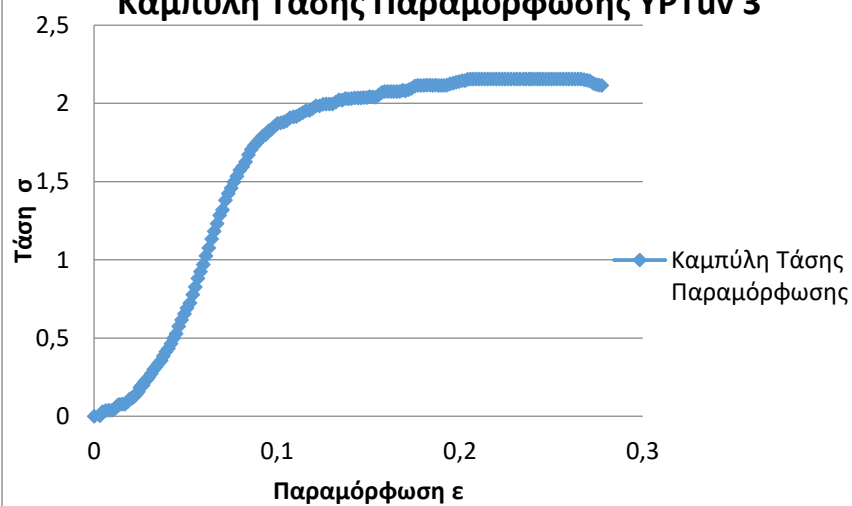
Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης ΥΡΤυν 1

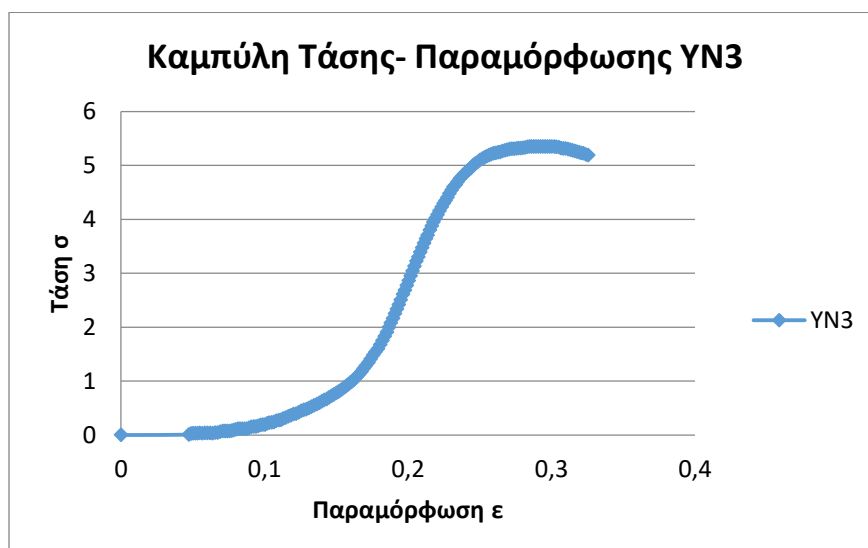
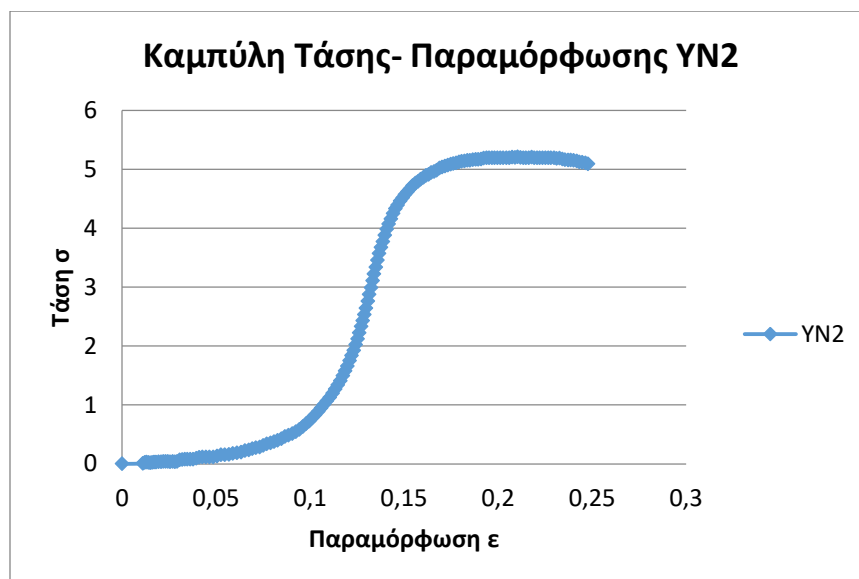
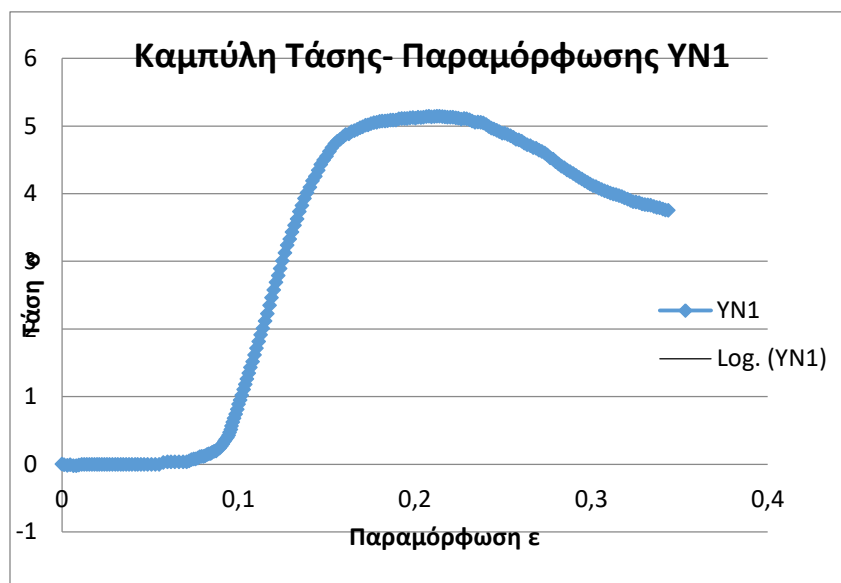


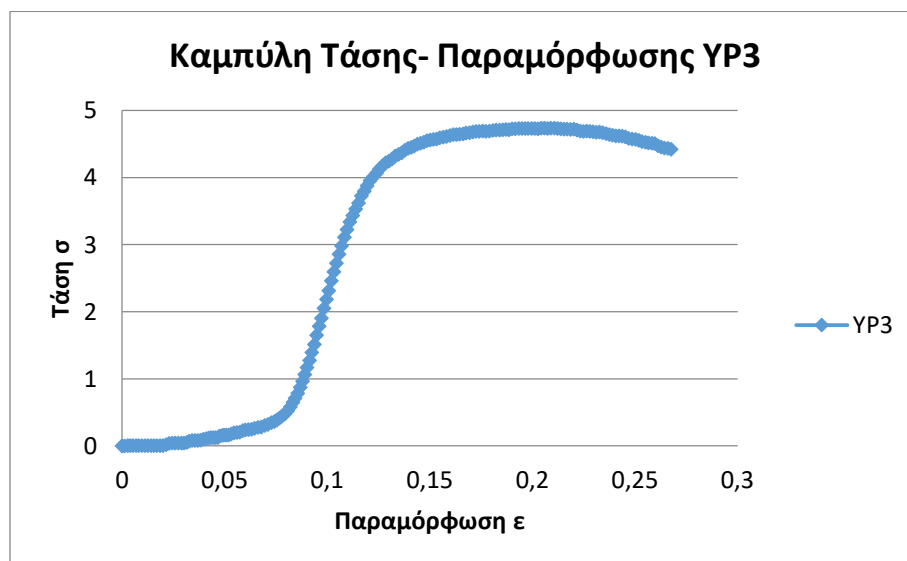
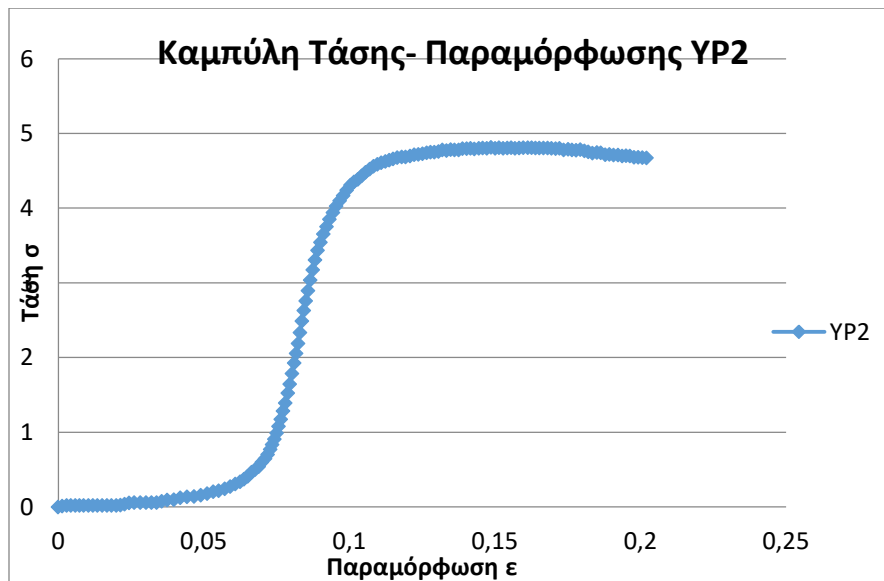
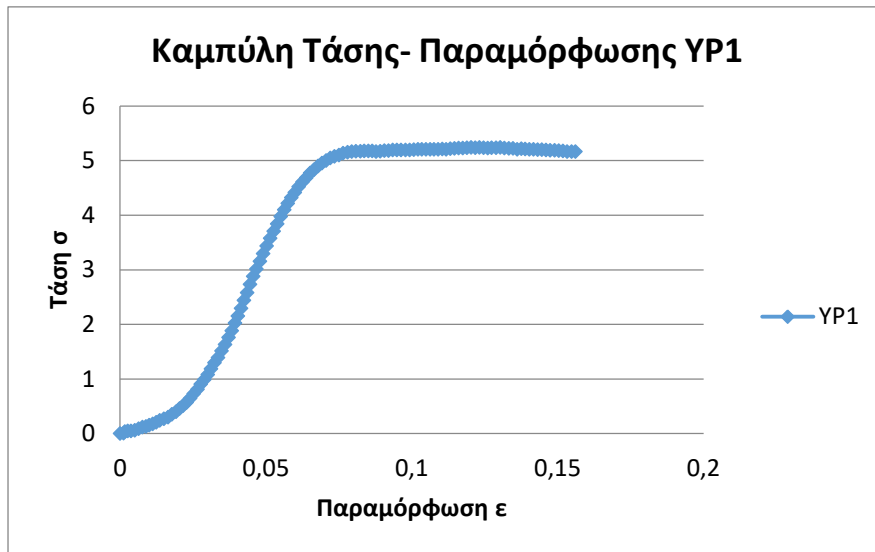
Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης ΥΡΤυν 2



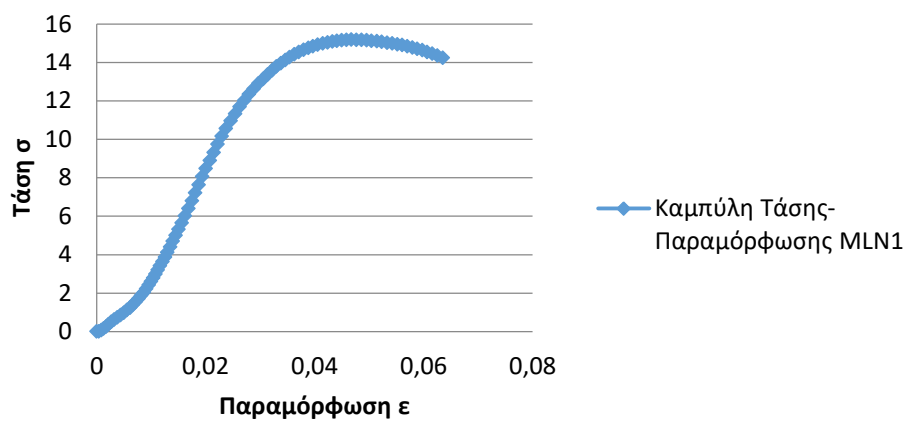
Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης ΥΡΤυν 3



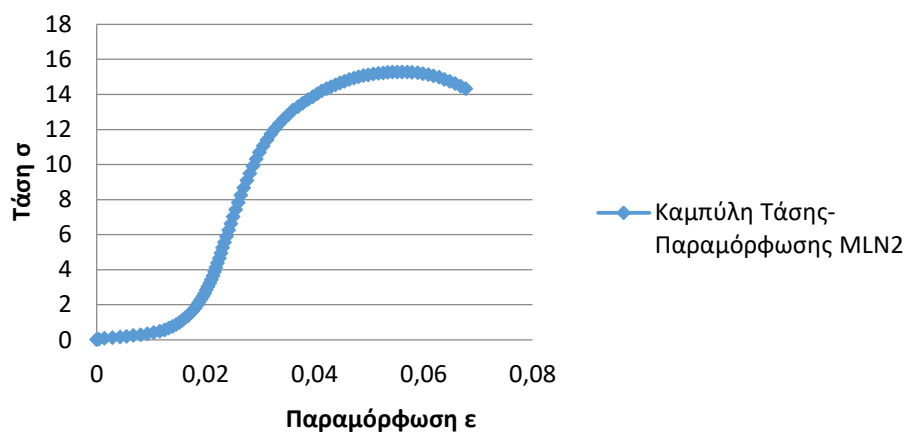




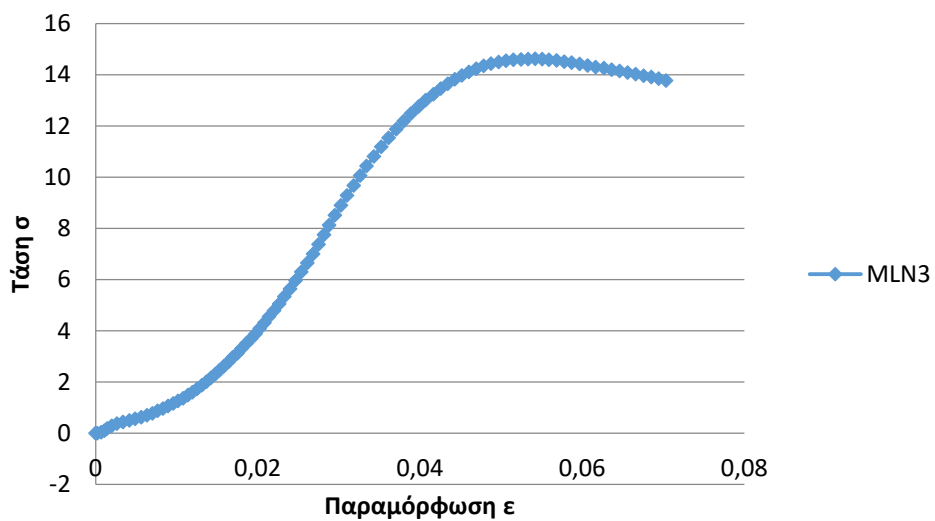
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLN1

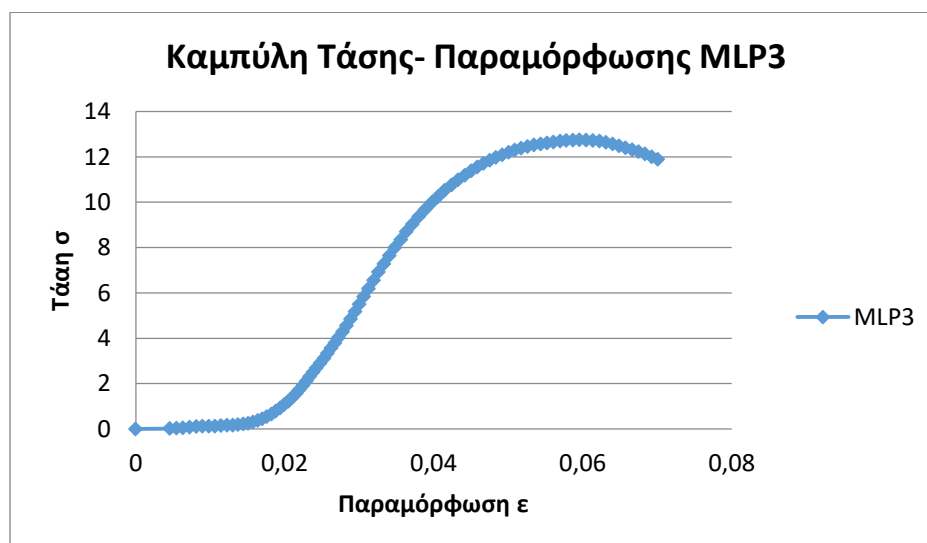
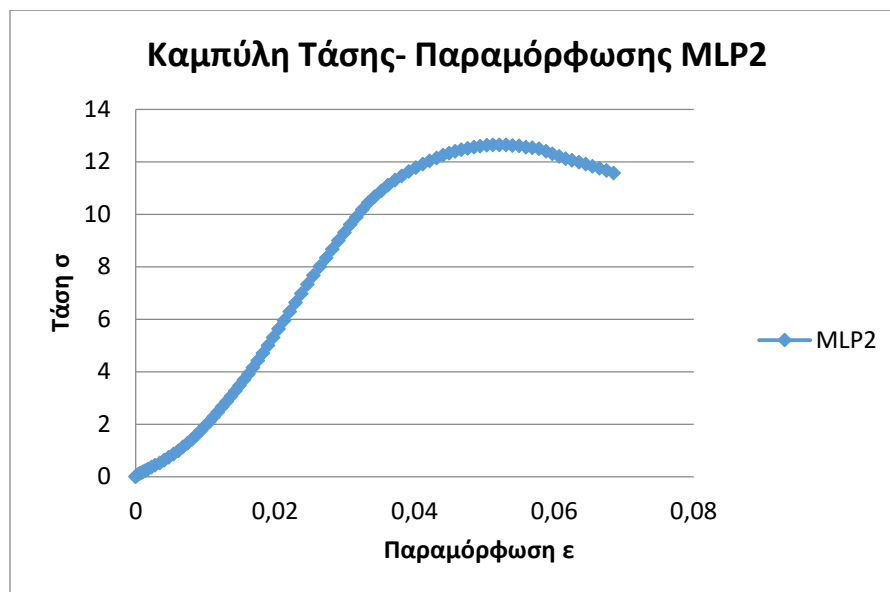
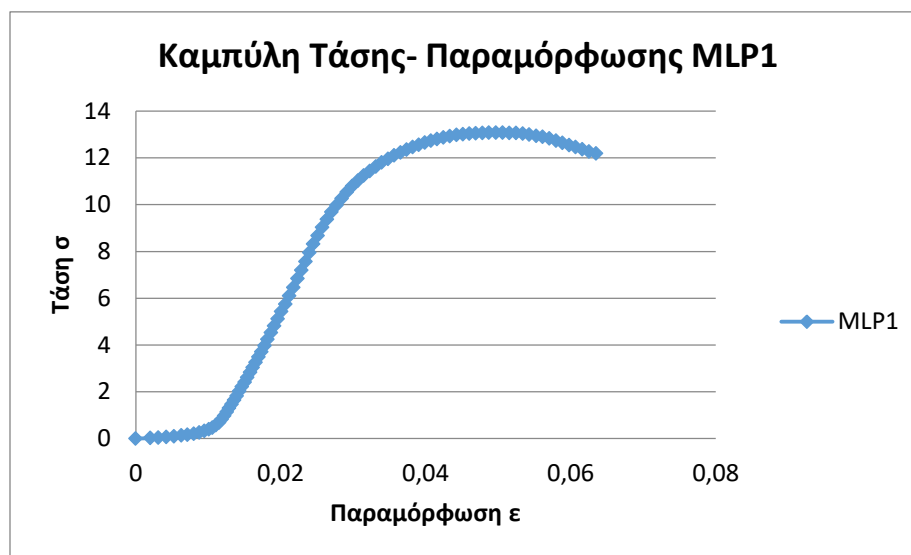


Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLN2

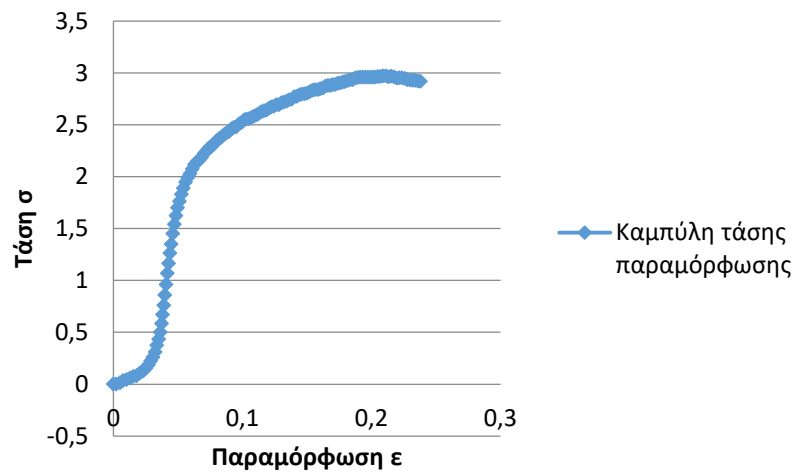


Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLN3

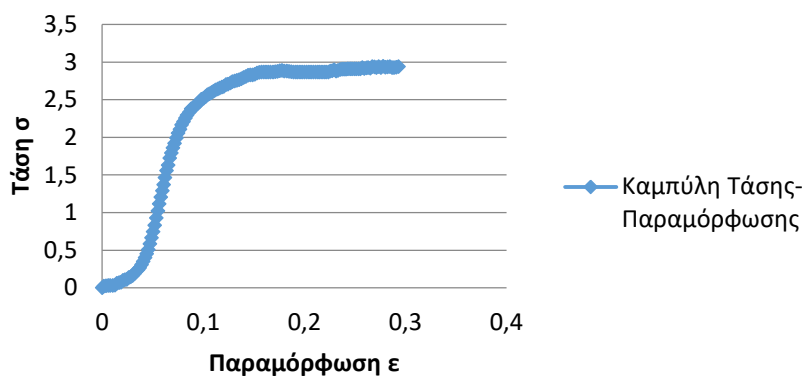




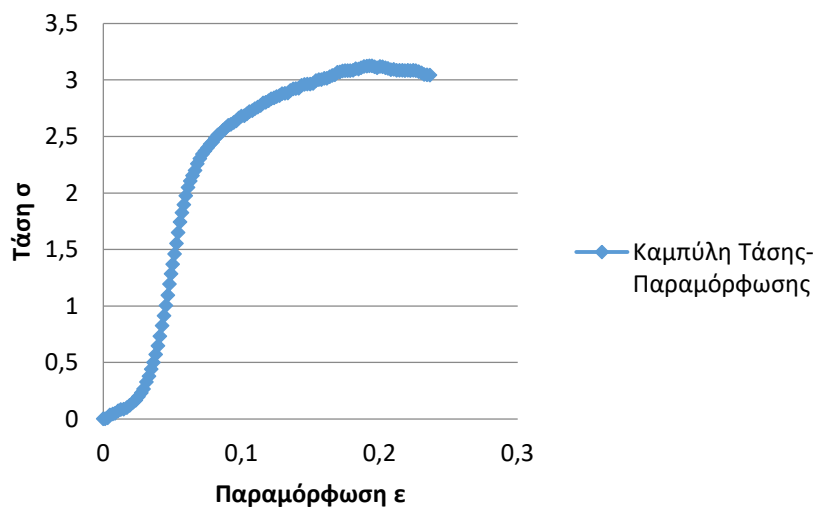
Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης ΥΝΤ1



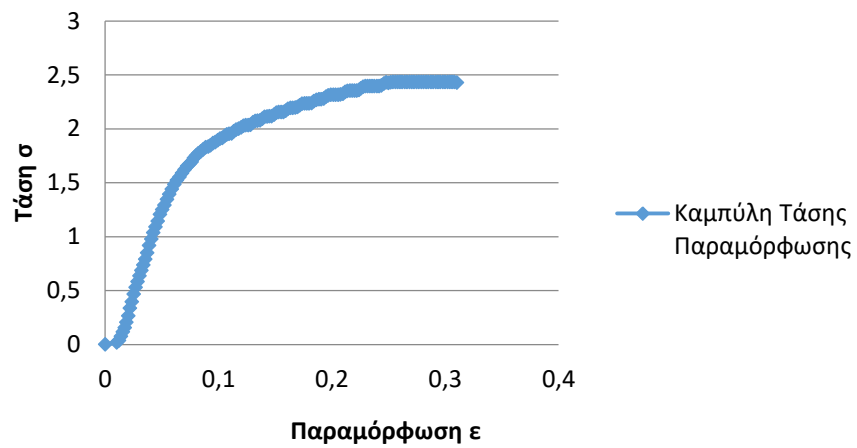
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης ΥΝΤ2



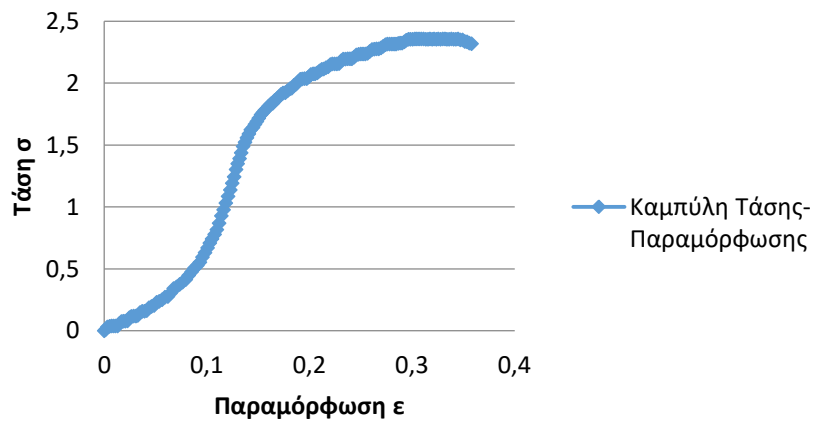
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης ΥΝΤ3



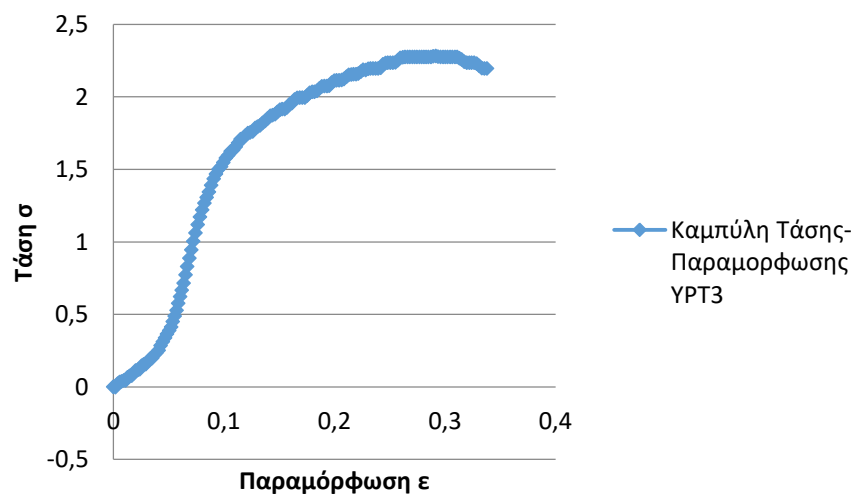
Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης ΥΡΤ 1



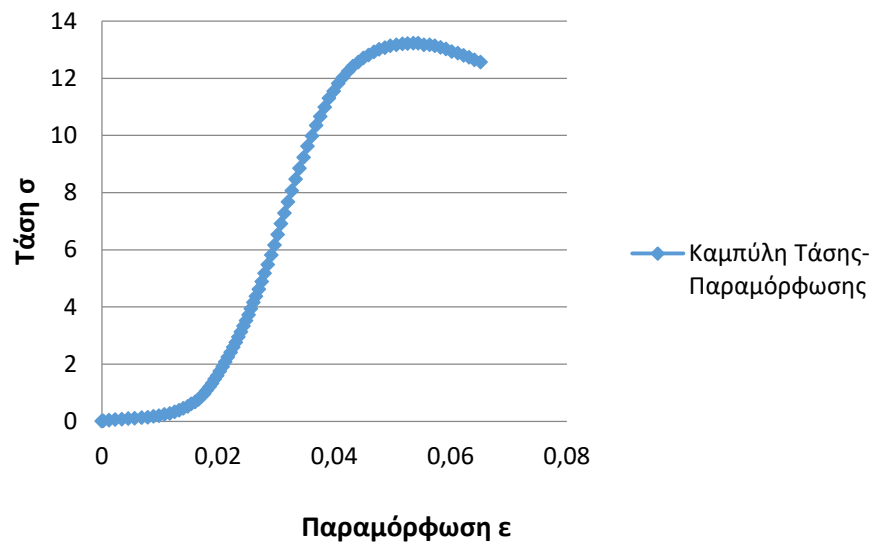
Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης ΥΡΤ2



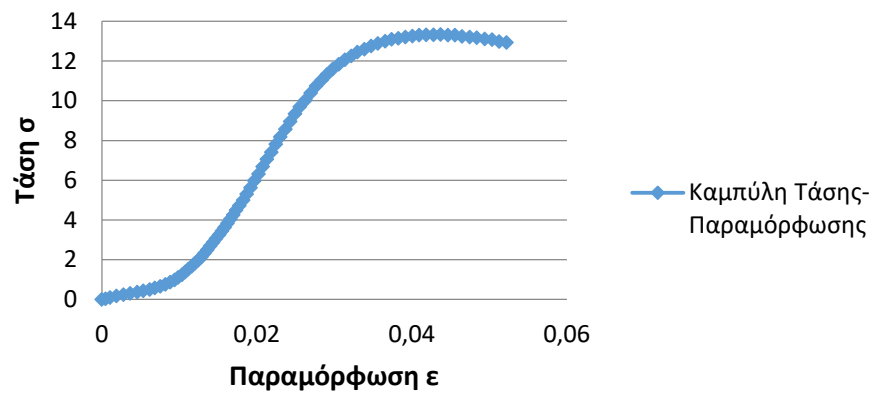
Καμπύλη Τάσης- Παραμορφωσης ΥΡΤ3



Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLNT 1



Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLNT 2



Καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης MLNT 3

