

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΩΤΗΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΡΓΙΛΟΧΩΜΑΤΩΝ
ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΞΗΡΟΚΑΜΠΙ ΚΑΙ ΜΕΤΟΧΗ ΠΡΟΚΟΠΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

ΛΙΑΡΟΜΜΑΤΗΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΩΣΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΑΛΕΒΙΖΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΛΕΚΤΟΡΑΣ)

ΣΤΑΜΠΟΛΙΑΔΗΣ ΗΛΙΑΣ (ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

XANIA 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Αργίλος.....	6
1.1.1 Ταξινόμηση αργίλων.....	7
1.2 Κεραμικά.....	7
1.2.1 Αργίλικα κεραμικά.....	8
2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ.....	13
2.1 Προετοιμασία της κεραμικής πρώτης ύλης.....	13
2.2 Δημιουργία κεραμικής (πλαστικής) μάζας.....	13
2.3 Μορφοποίηση.....	15
2.4 Ξήρανση.....	15
2.5 Έψηση.....	18
2.6 Η μικροδομή των κεραμικών.....	22
2.7 Αντοχή σε θραύση των κεραμικών.....	22
3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ.....	24
3.1 Γενικά.....	24
3.2 Γεωλογία της Κρήτης.....	24
3.3 Γεωλογία της περιοχής δειγματοληψίας.....	24
3.4 Περιγραφή της Περιοχής της Δειγματοληψίας.....	25
3.5 Περιγραφή των δειγμάτων.....	25
4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	29
4.1 Προσδιορισμός της πυκνότητας.....	29
4.2 Κοκκομετρική ανάλυση.....	32
4.2.1 Κοκκομετρική ανάλυση στο κλάσμα μεγαλύτερο από 63μm.....	33
4.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση στο κλάσμα μικρότερο από 63μm.....	33
4.3 Ορυκτολογικές αναλύσεις.....	34
4.4 Χημικές αναλύσεις.....	35
4.5 Ξήρανση.....	37
4.6 Θραύση.....	37
4.7 Αποδέσμευση.....	37
4.8 Παραγωγή της πλαστικής μάζας.....	38
4.8.1 Κεραμική πλαστική μάζα.....	38
4.9 Μορφοποίηση δοκιμίων.....	39
4.9.1 Βέλτιστη επιδεκτικότητα μορφοποίησης.....	40
4.10 Ξήρανση των δοκιμίων.....	41
4.10.1 Συρρίκνωση κατά την ξήρανση.....	41
4.10.2 Αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ.....	42
4.11 Έψηση των δοκιμίων.....	44
4.11.1 Βάθμωση της θερμοκρασίας του φούρνου.....	45
4.12 Ιδιότητες των ψημένων δοκιμίων.....	47
4.12.1 Χρώμα.....	47
4.12.2 Συρρίκνωση.....	48
4.12.3 Αντοχή σε κάμψη.....	48
4.12.4 Φαινόμενη πυκνότητα.....	48
4.12.5 Υδατοαπορροφητικότητα.....	49
4.12.6 Ανοιχτό πορώδες.....	50
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	51
5.1 Τιμές της πυκνότητας των αργίλων 19Α, 195 και 197.....	51
5.2 Κοκκομετρική κατανομή.....	51
5.3 Ορυκτολογική σύσταση.....	55
5.4 Χημική σύσταση.....	56
5.5 Βέλτιστη περιεκτικότητα νερού στην πλαστική μάζα.....	58
5.6 Συρρίκνωση εν ξηρώ.....	58
5.7 Αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ.....	59
5.8 Τεχνολογικές ιδιότητες των ψημένων δοκιμίων.....	60
5.9 Χρώμα των ψημένων δοκιμίων.....	61
5.10 Συρρίκνωση των ψημένων δοκιμίων.....	61
5.11 Αντοχή σε κάμψη.....	62

5.12 Φαινόμενη πυκνότητα των ψημένων δοκιμίων.....	62
5.13 Υδατοαπορροφητικότητα των ψημένων δοκιμίων.....	65
5.14 Ανοιχτό πορώδες των ψημένων δοκιμίων.....	66
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69
Παράρτημα Α.....	77
Παράρτημα Β.....	78

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Καταρχήν ευχαριστώ τον κ. Κωστάκη Γεώργιο, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, τη καθοδήγηση, τη σημαντική βοήθειά του και την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε κατά τη διεκπεραίωση της. Ευχαριστίες εκφράζονται στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ.κ. Αλεβίζο Γεώργιο (Λέκτορα) και Σταμπολιάδη Ηλία (Αναπλ. Καθηγητή).

Επίσης ευχαριστώ όλο το βοηθητικό επιστημονικό προσωπικό του τμήματος Μηχ.Ο.Π. με το οποίο χρειάστηκε να συνεργαστώ, για το πολύτιμο χρόνο και τη βοήθεια που μου προσέφεραν στο εργαστηριακό μέρος της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση κατά πρώτη φάση, δείγμα αργίλου από την περιοχή Μετόχι Προκόπη του Νομού Ρεθύμνου, με σκοπό τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του στη βιομηχανία των παραδοσιακών κεραμικών. Στη συνέχεια το ίδιο δείγμα αναμείχθηκε με ποσοστό 70% με δύο αργίλους (30%) από την περιοχή Ξηροκάμπι του Νομού Ρεθύμνου και παρασκευάστηκαν δύο νέα δείγματα για τον ίδιο σκοπό.

Αρχικά έγινε προσδιορισμός της ορυκτολογικής, χημικής και κοκκομετρικής σύστασης των δειγμάτων, ενώ στη συνέχεια από τις κατάλληλα προετοιμασμένες πλαστικές μάζες μορφοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια. Στη συνέχεια τα δοκίμια αυτά εξετάστηκαν ως προς την επιδεκτικότητα μορφοποίησης κατά Pfefferkorn, μέσω της οποίας και υπολογίστηκε η “βέλτιστη υγρασία” μορφοποίησης τους.

Μέρος των δοκιμίων που προέκυψαν κατόπιν με αυτή την υγρασία ξηράνθηκαν στους 110°C, ενώ ένας μεγαλύτερος αριθμός από αυτά ψήθηκε σε θερμοκρασίες από 800 έως και 1100°C (ανά 50°C).

Οι μετρήσεις που έγιναν στα ξηραμένα δοκίμια εστιάστηκαν στο προσδιορισμό της συρρίκνωσης “εν ξηρώ” και της αντοχής σε κάμψη, ενώ για τα ψημένα στο προσδιορισμό της συρρίκνωσης, της αντοχής σε κάμψη, της φαινόμενης πυκνότητας, της υδατοαπορροφητικότητας, του ανοικτού πορώδους και του χρώματος έψησης για κάθε θερμοκρασία.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προαναφερθέντων μετρήσεων προέκυψε ότι γενικά και τα τρία δείγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες για την βιομηχανική παραγωγή δομικών κεραμικών (αναλυτικά στη παράγραφο με τα συμπεράσματα).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Άργιλος

Υπάρχει πληθώρα ορισμών στην επιστήμη και τη βιομηχανία για την άργιλο. Στην κεραμική ο όρος άργιλος αναφέρεται σε μια πρώτη ύλη της οποίας γνώρισμα είναι οι παρακάτω ιδιότητες (Κωστάκης 1991):

- Η πλαστικότητα σε υγρή κατάσταση.
- Η αντοχή μετά το στέγνωμα.
- Ο, μετά από ψήσιμο σε υψηλές θερμοκρασίες, σχηματισμός μιας συμπαγούς, σκληρής και σε χημικές επιδράσεις ανθεκτικής μάζας.

Στη γεωλογία και την ιζηματολογία ως άργιλοι ή πελίτες ονομάζονται λεπτόκοκκα πετρώματα που δεν έχουν υποστεί μεταμόρφωση ή διαγένεση. Η έννοια της αργίλου δηλαδή αποδίδεται κατά κύριο λόγο σ' ένα χαρακτηριστικό της κοκκομετρίας, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις συνθήκες σχηματισμού της αργίλου (Κωστάκης 1991).

Τα προαναφερθέντα πετρώματα αποτελούνται από προϊόντα αποσάθρωσης τα οποία πριν την καθίζηση τους αιωρούνταν για μακρύ χρονικό διάστημα, είτε λόγω του πολύ μικρού μεγέθους είτε λόγω του φυλλώδους χαρακτήρα τους. Με τα προϊόντα αποσάθρωσης συνυπάρχουν συχνά νεοσχηματισθέντα ορυκτά, υπόλοιπα οργανισμών και λίγο ή πολύ λεπτοδιαμερισμένες οργανικές ουσίες. Λόγω διακυμάνσεων της μεταφοράς και απόθεσης του υλικού, εμφανίζονται πετρώματα μεταβαλλόμενης σύστασης με στρωματοειδείς σχηματισμούς.

Σύμφωνα με τις γερμανικές προδιαγραφές (DIN 66100) η άργιλος και η ιλύς είναι το κοκκομετρικό κλάσμα του ιζηματογενούς πετρώματος που έχει μέγεθος κόκκων $<0.045\text{mm}$. Στο αμερικάνικο σύστημα ταξινόμησης εξάλλου ορίζεται ως ιλύς (silt) το κλάσμα των κόκκων διαμέτρου $2\text{-}50\ \mu\text{m}$ και ως άργιλος το κλάσμα κόκκων $<2\ \mu\text{m}$. Στην πράξη όμως με τον όρο άργιλος εννοούμε τα γεώδη υλικά, που ως προϊόντα αποσάθρωσης ή και υδροθερμικής αλλοίωσης πετρωμάτων, έχουν μεταφερθεί κυρίως από το νερό και σπανιότερα από τον αέρα, σε μεγάλες αποστάσεις σε λεκάνες ή κόλπους, όπου έχουν αποτεθεί και σχηματίσει συγκεντρώσεις αποτελούμενες συνήθως από λεπτόκοκκο υλικό φυλλοπυριτικών και διαφόρων άλλων ορυκτών και κολλοειδών, που συχνά περιέχουν και οργανικά κατάλοιπα. Το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται κυρίως γύρω από την τιμή των $2\ \mu\text{m}$, αλλά μπορεί να αγγίζει και τα $20\ \mu\text{m}$ (Κωστάκης 1991). Η αξιολόγηση των αργίλων, ως προς την καταλληλότητά τους για την κατασκευή κεραμικών προϊόντων περιλαμβάνει:

- Ορυκτολογική ανάλυση.
- Χημική ανάλυση.
- Κοκκομετρική ανάλυση.
- Προσδιορισμό των φυσικοχημικών και τεχνολογικών ιδιοτήτων (Κωστάκης 1991).

Οι τρεις πρώτες αναλύσεις πραγματοποιούνται χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία της πρώτης ύλης-δείγματος, πέρα από την απαραίτητη θραύση και λειοτρίβιση.

Η παρασκευή των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας της αργίλου και του μπισκότου κατά την παραγωγική διαδικασία καθώς επίσης ορισμένες ιδιότητες του ψημένου προϊόντος, είναι σε γενικές γραμμές κοινή για την κατασκευή παραδοσιακών κεραμικών προϊόντων.

1.1.1 Ταξινόμηση αργίλων

Η ποικιλία μορφών αργίλου, τόσο ως προς τη χημική τους σύσταση όσο και ως προς τις τεχνολογικές εφαρμογές τους, έχει σαν αποτέλεσμα την ταξινόμησή τους με διάφορους τρόπους. Στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφορες ταξινομήσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της αργίλου που λαμβάνονται ως κριτήρια. Δειγματοληπτικά αναφέρονται οι:

α) κατά Lefond (1983):

- Μπετονίτης και γαίες για πληρωτικά.
- Καολίνης, Ball clay, αλλουσίτης και πυρίμαχες άργιλοι.
- Ανάμεικτες άργιλοι και αργιλικόι σχιστόλιθοι.

β) κατά Kuzvart H. (1984), για τις καολινιτικές αργίλους:

- Άργιλοι για πήλινα είδη και λευκά κεραμικά.
- Πυρίμαχες άργιλοι και αργιλικά συμπαγή πετρώματα.
- Πλαστικές συνδετικές άργιλοι και άργιλοι σαμώτ.
- Άργιλοι για είδη γκρε και πλακίδια.

Ευρύτερης αποδοχής, χωρίς να είναι η επίσημη ή η επικρατέστερη, είναι η ταξινόμηση σύμφωνα με τη χρήση των αργίλων. Η κατάταξη είναι η ακόλουθη:

- Άργιλοι για “αδρά κεραμικά”.
- Άργιλοι για “λεπτά κεραμικά”.
- Άργιλοι για πυρίμαχα κεραμικά.

1.2 Κεραμικά

Η χρήση των κεραμικών, από την αρχαιότητα διαμόρφωσε την ανθρώπινη ζωή και καθημερινότητα. Υπήρξε κατάκτηση του ανθρώπινου πολιτισμού αλλά και καταλύτης που πυροδότησε περαιτέρω την τεχνολογική εξέλιξη. Τα κεραμικά με τη μορφή αμοφορέων αποτέλεσαν μέσα αποθήκευσης τροφίμων, για φύλαξη ή εμπόριο, ή ως είδη οικιακής χρήσης κάλυψαν τις καθημερινές ανθρώπινες ανάγκες ως εργαλεία

παρασκευής φαγητού και είδη εστίασης. Φυσικά χρησιμοποιήθηκαν και για καλλιτεχνικούς σκοπούς αλλά και σαν μέσα γραφής. Στη σημερινή κοινωνία μαζί με τα μέταλλα, τα πολυμερή και τα λοιπά δομικά αποτελούν τα κύρια και βασικά στοιχεία των προϊόντων που καλύπτουν τις σύγχρονες ανάγκες και απαιτήσεις.

Ως κεραμικά χαρακτηρίζεται μια ευρύτερη κατηγορία στερεών ανόργανων μη μεταλλικών σωμάτων που αποκτούν δομική διασύνδεση κατά την παραγωγή τους, με την επενέργεια θερμότητας σε υψηλές, θερμοκρασίες άνω των 800°C, η οποία επιφέρει τη βελτίωση των φυσικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων, αποτέλεσμα που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό και αξιοποιήσιμο.

Η παραγωγική διαδικασία των κεραμικών μεταβλήθηκε σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Η βιομηχανική και τεχνολογική επανάσταση, η επιστημονική έρευνα και η εφαρμογή της οδήγησε στην παραγωγή πληθώρας κεραμικών προϊόντων υψηλής ποιότητας τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες αλλά και διάφορες χρήσεις. Μερικά από τα σημαντικά βήματα προόδου της βιομηχανικής παραγωγικής διαδικασίας είναι τα ακόλουθα (W.E. Brownell 1976):

- Βελτίωση της ξήρανσης και έψησης διαμέσου οργανωμένου ελέγχου της παραγωγής και κατάλληλο σχεδιασμό εξοπλισμού.
- Αυτόματη μεταφορά των προϊόντων από το στάδιο της μορφοποίησης στους κλιβάνους έψησης.
- Συσκευασία των προϊόντων για τη μεταφορά τους.
- Βελτιωμένος έλεγχος των πρώτων υλών και προσαρμογή τους στις απαιτήσεις των παραγόμενων προϊόντων.

Μια συνήθης κατάταξη των κεραμικών που πραγματοποιείται με βάση τη διαχρονική τους εξέλιξη είναι η παρακάτω:

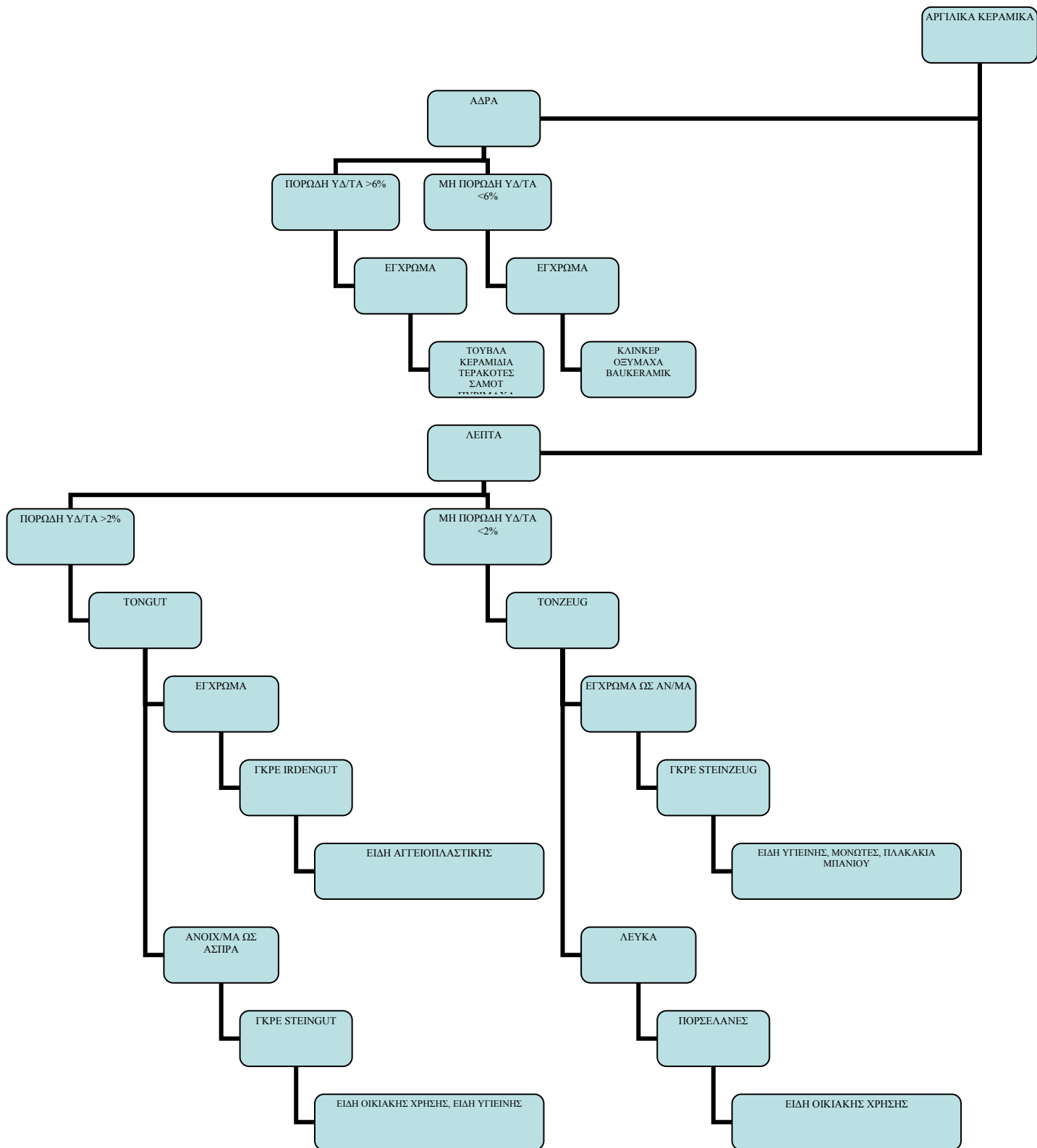
- Παραδοσιακά κεραμικά.
- Πυρίμαχα
- Κεραμικά προηγμένης τεχνολογίας.

Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσουν τα παραδοσιακά κεραμικά.

1.2.1 Αργιλικά κεραμικά

Τα κεραμικά προϊόντα, η σύσταση των οποίων περιέχει σημαντικά ποσοστά αργιλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται ως αργιλικά ή παραδοσιακά ή κλασσικά. Δεν υπάρχει καθιερωμένος ένας και μοναδικός τρόπος ταξινόμησής τους, στη διεθνή βιβλιογραφία. Ευρέως διαδεδομένη, παρ' όλα αυτά, είναι η ταξινόμηση κατά Hennicke (1967). Σ' αυτό το σύστημα ταξινόμησης (εικ. 1.1) γίνεται ένας πρωταρχικός διαχωρισμός σε χοντρά και λεπτά και μια περαιτέρω διάκριση σε πορώδη και μη πορώδη. Το πορώδες μετριέται με την υδατοαπορροφητικότητα. Κατώφλι της υδατοαπορροφητικότητας για τη διάκριση σε πορώδη και μη πορώδη είναι για τα μεν χοντρά 6% ενώ για τα λεπτά 2%. Επόμενο κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι το χρώμα οπότε και

διακρίνονται σε έγχρωμα, ανοιχτόχρωμα και λευκά κεραμικά. Τέλος διαχωρίζονται σε γκρε, πορσελάνες και σε άλλα προϊόντα.



Εικ 1.1: Σύστημα ταξινόμησης των αργιλικών κεραμικών κατά Hennicke

(Salmang, H und Scholze H, 1983, μετάφραση: Κωστάκη Γ.).

Η ταξινόμηση όμως σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να μην είναι μονοσήμαντη επειδή υπάρχουν συνεχείς μεταβάσεις από μια κατηγορία κεραμικών σε άλλη. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση και συστημάτων ταξινόμησης που στηρίζονται όχι μόνο σε μακροσκοπικά χαρακτηριστικά αλλά περισσότερο σε φυσικοχημικά. Έτσι π.χ. το χρώμα του ψημένου κεραμικού καθορίζεται συνήθως από την περιεκτικότητα % των πρώτων υλών σε Fe_2O_3 , το πορώδες μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κ.λ.π.

Στην πράξη διαχωρίζονται τα μεν πορώδη σε τερρακότες και φαγετιανά, τα δε μη πορώδη σε γκρε (stoneware) και πορσελάνες (Περάκη 1988). Μία σύντομη περιγραφή τους ακολουθεί στη συνέχεια.

Τερρακόττες: είναι τα κεραμικά αντικείμενα που έχουν πορώδη μάζα και δεν καλύπτονται από εφυάλωμα. Διαίρουνται σε απλές τερρακόττες (τούβλα, κεραμίδια) και πυρίμαχα είδη. Την πρώτη ύλη γι' αυτά αποτελούν συνήθως αργιλικές αλουβιακές αποθέσεις. Η ορυκτολογική και η χημική τους σύσταση παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Συνήθως αποτελούνται από ένα μίγμα αργιλικών ορυκτών, χαλαζία, αστρίων, ανθρακικού ασβεστίου, οξειδίων του σιδήρου κ.α..

Φαγετιανά : είναι τα πορώδη κεραμικά που καλύπτονται μ' ένα εφυάλωμα. Σ' αυτά ανήκουν τα προϊόντα τύπου μαγιόλικα και κοττοφόρτε, τα οποία διαφέρουν κυρίως ως προς την πρώτη ύλη, τη θερμοκρασία ψησίματος, την υδατοαπορροφητικότητα κ.λ.π. συνήθως κατασκευάζονται από λεπτόκκοκες ασβεστούχες αργίλους. Από ορυκτολογικής άποψης αποτελούνται συνήθως από ιλλίτη και χλωρίτη, λίγο μοντμοριλονίτη, ασβεστίτη, χαλαζία και μικρές ποσότητες αστρίων. Η θερμοκρασία ψησίματος τους είναι $920-980^\circ\text{C}$, το πορώδες κυμαίνεται από 16-22%, αντοχή σε κάμψη $70-190\text{kgf/cm}^2$ και ψήνονται μεταξύ 980 και 1080°C .

Γκρε : αυτή η ονομασία αποδίδεται σε ένα μεγάλο φάσμα προϊόντων, των οποίων τα χαρακτηριστικά ποικίλλουν. Το κριτήριο που δικαιολογεί τη συγκέντρωσή τους σε μία ενότητα είναι η παρουσία κατά τη διάρκεια του ψησίματος μιας υαλώδους φάσης με υψηλό ιξώδες που παράγει μια υαλοποίηση αργή και σταδιακή. Ειδικά χαρακτηριστικά αυτών των προϊόντων είναι η θερμοκρασία ψησίματος ($950-1280^\circ\text{C}$), οι χαμηλές τιμές του πορώδους ($\text{WA} < 4\%$), η μεγάλη αντοχή σε κάμψη κ.λ.π. στην πράξη βρίσκουν εφαρμογή ως είδη αγγειοπλαστικής, είδη οικιακής χρήσης κ.λ.π. διακρίνονται σε έγχρωμα και σε ανοιχτόχρωμα μέχρι άσπρα γκρε. Οι άργιλοι που θα χρησιμοποιηθούν για γκρε πρέπει να περιέχουν κυρίως ιλλίτη, καολινίτη, μοντμοριλονίτη και χλωρίτη σε ποσοστό 90% και χαλαζία. Δευτερεύοντα ορυκτά μπορεί να είναι οι άστριοι και οι μαρμαρυγίες. Επιβλαβή θεωρούνται το ανθρακικό ασβέστιο και ο δολομίτης και πρέπει $\text{CaO} + \text{MgO} < 3\%$. Τα γκρε έχουν αντοχή σε κάμψη $250-450\text{Kgf/cm}^2$.

Πορσελάνες: αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία των μη πορώδων κεραμικών. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται μίγμα από καθαρό καολίνη και χαλαζιακή άμμο υψηλής καθαρότητας. Ειδικά χαρακτηριστικά τους είναι το άσπρο χρώμα, η θερμοκρασία ψησίματος (1100-1500°C) και το υψηλό ποσοστό της υαλώδους φάσης. Διαφέρουν από τα γκρε διότι η μάζα τους είναι πιο λεύκη και η υαλοποίησή τους πιο έντονη. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ειδών υγιεινής, ειδών οικιακής χρήσης κ.λ.π.

2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Η συνήθης διαδικασία παραγωγής ενός παραδοσιακού κεραμικού περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Διαλογή και προετοιμασία της πρώτης ύλης.
2. Δημιουργία πλαστικής μάζας.
3. Μορφοποίηση.
4. Ξήρανση.
5. Έψηση.

2.1 Προετοιμασία της κεραμικής πρώτης ύλης

Αφού γίνει η διαλογή, απαραίτητη είναι η άλεση της αργίλου ώστε να αποκτήσει χαμηλή κοκκομετρία.

Η διαδικασία άλεσης μιας αργιλικής πρώτης ύλης περιλαμβάνει συνήθως τα παρακάτω στάδια (Φραγκίσκος 1977):

- Θραύση.
- Λειοτρίβηση-άλεση.

Για τις αργίλους η θραύση διενεργείται με χρήση απλών θραυστήρων. Με τη θραύση αυτή επιτυγχάνεται η παραγωγή υλικού μέχρι ένα τέταρτο της ίντσας. Για να επιτευχθεί μέγεθος κόκκου 30 mesh χρησιμοποιείται σφυρόμυλος. Το προϊόν μετά τη σμίκρυνση των τεμαχιδίων είναι ένα σύνολο ψηφίδων διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών, που αποτελούν τον κορμό του υλικού που θα υποστεί επεξεργασία για την κατασκευή των κεραμικών υλικών. Η φύση και η αλληλεξάρτηση μεταξύ των διαφόρων κόκκων επηρεάζουν πολλά από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού, όπως η υφή, το πορώδες και η πυκνότητα (Φραγκίσκος 1977).

Μετά τη λειοτρίβηση, απαραίτητη είναι η ανάμιξη για μια καλύτερη διασπορά σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους (ομογενοποίηση) (Στουρνάρας 1993).

2.2 Δημιουργία κεραμικής (πλαστικής) μάζας

Η πλαστική μάζα προκύπτει ύστερα από την ανάμιξη της αργίλου με τέτοια ποσότητα νερού, ικανή ώστε η πλαστικότητα της μάζας να είναι η επιθυμητή.

Με τον όρο πλαστικότητα εννοούμε την ιδιότητα των αργίλων να μετασχηματίζονται, όταν τους προσθέσουμε κατάλληλη ποσότητα νερού, σε μάζα πλαστική ικανή να παίρνει και να διατηρεί το σχήμα που της

δίνουμε χωρίς να χάνει τη συνοχή της. Η πλαστικότητα εξαρτάται κυρίως από την λεπτότητα των κόκκων και το φυλλώδες σχήμα των φυλλοπυριτικών ορυκτών. Εξαρτάται επίσης από το είδος του αργιλικού ορυκτού (π.χ. μικρό ποσοστό μοντμοριλλονίτη αυξάνει την πλαστικότητα των αργίλων), από το είδος των προσροφημένων ιόντων, από το μέγεθος των σωματιδίων (όσο μικρότερο το μέγεθος τόσο μεγαλύτερη η πλαστικότητα), από την κρυσταλλικότητα των τεμαχιδίων (όσο λιγότερο κρυσταλλωμένο το αργιλικό ορυκτό τόσο μεγαλύτερη η πλαστικότητα) και από την κατεργασία της αργίλου (Κωστάκης 1991).

Ένας όρος που αναφέρεται στη συμπεριφορά μιας πλαστικής μάζας σε συνάρτηση με το νερό που περιέχει η τελευταία, είναι η νεροπλαστικότητα. **Νεροπλαστικότητα** καλείται στην κεραμική τεχνολογία η ποσότητα νερού που χρειάζεται για να αποκτήσει τη βέλτιστη τιμή πλαστικότητας 100gr ξηρής αργίλου. Η ελάχιστη ποσότητα νερού που απαιτείται για να καταστεί πλαστική η άργιλος καλείται όριο πλαστικότητας, ενώ όριο υδαρότητας είναι η ελάχιστη ποσότητα νερού που καθιστά ρευστή την ίδια πάντοτε ποσότητα της ξηρής αργίλου. Η διαφορά μεταξύ του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας καλείται δείκτης πλαστικότητας (Μαρκόπουλος 1992).

Στην Κεραμική είναι συνήθης η χρήση του όρου επιδεκτικότητα μορφοποίησης (Workability, Bildsamkeit) (W.E.Brownell 1976). Με τον όρο αυτό εννοούμε τη δυνατότητα παραμένουσας παραμόρφωσης της πλαστικής μάζας εξαιτίας της επιβολής κάποιας εξωτερικής δύναμης, χωρίς να χαθεί η συνοχή μεταξύ των κόκκων (W.E. Brownell 1976). Η επιδεκτικότητα μορφοποίησης μεταβάλλεται ανάλογα με τη συγκέντρωση νερού στο μίγμα αργίλου. Τα λεπτά στρώματα νερού μεταξύ των αργιλικών σωματιδίων καθορίζουν τη συνοχή της υγρής αργιλικής μάζας. Ταυτόχρονα επιδρούν σαν λιπαντικό μεταξύ των στρώσεων των φυλλοπυριτικών, οι οποίες ολισθαίνουν όταν ασκείται η απαιτούμενη εξωτερική δύναμη στην πλαστική μάζα. Η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας νερού, αυξάνει την ολίσθηση, αλλά ελαττώνει τη σταθερότητα του σχήματος του αντικειμένου που πλάθεται. Η βέλτιστη πλαστικότητα για την παραγωγική διαδικασία επιτυγχάνεται για συγκεκριμένο εύρος τιμών της συγκέντρωσης νερού στην πλαστική μάζα (Κωστάκης 1991).

Η συνεχής αναζύμωση της πλαστικής μάζας της προσδίδει μεγαλύτερη ομογενοποίηση καθώς επίσης προσανατολίζει τους κόκκους της αργίλου. (Λαγγιώτης 1959).

Η ποσότητα νερού στο σώμα επηρεάζει επίσης την ποιότητα της πλαστικής ύλης. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία των αργιλικών στο μείγμα τόσο περισσότερο νερό απαιτείται για να προκύψει μια εύπλαστη με συνοχή μάζα. Η υψηλή συγκέντρωση υγρασίας στο σώμα μπορεί να προκαλέσει ρωγμές κατά την ξήρανση ή σπασίματα από την εφαρμοζόμενη τάση στους ξηρούς κόκκους κατά την έψηση, οπότε το εύρος τιμών της υγρασίας πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατό ώστε το μείγμα που προκύπτει να είναι εργάσιμο στο καλύτερο δυνατό βαθμό. Με τη χρήση μηχανικών μεθόδων μορφοποίησης έχουμε το πλεονέκτημα της εφαρμογής μεγαλύτερων δυνάμεων μορφοποίησης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες της χειρονακτικής μεθόδου, με αποτέλεσμα τη μείωση της ελάχιστης απαραίτητης υγρασίας (W. Ryan 1978).

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η αργιλική μάζα προκείμενου να αναπτύξει μεγάλη πλαστικότητα και να είναι εύκολη η μορφοποίησή της χρειάζεται μεγάλη ποσότητα νερού. Όπως προαναφέρθηκε όμως η χρήση του νερού δεν μπορεί να είναι απεριόριστη για να είναι ασφαλής η ξήρανση.

Η βελτίωση της πλαστικότητας με χρήση μικρότερης ποσότητας νερού μπορεί να επιτευχθεί, αν εκμεταλλευτούμε την ιδιότητα των αργιλικών κόκκων να προσροφούν το νερό λόγω του μικρού τους μεγέθους και της μεγάλης ελεύθερης επιφάνειας που αυτό επισύρει. Τα επιφανειακά άτομα των κόκκων έλκουν μόρια νερού έτσι ώστε να δημιουργείται ένα στρώμα νερού το οποίο δρα ως λιπαντικό ανάμεσα στα στρώματα της αργίλου. Έτσι η μορφοποίηση είναι πιο εύκολη. Ταυτόχρονα με το πλάσιμο η υγρασία διαμοιράζεται προς όλες τις διευθύνσεις του σώματος, εξουδετερώνοντας την τάση συγκέντρωσης της υγρασίας στο κέντρο του (W. Ryan 1978).

2.3 Μορφοποίηση

Με τον όρο μορφοποίηση εννοούμε τον τρόπο τον οποίο χρησιμοποιούμε ώστε η πλαστική μάζα να πάρει το επιθυμητό κάθε φορά σχήμα.

Οι μέθοδοι πλαστικής μορφοποίησης μπορούν να διαχωριστούν σε παραδοσιακές και μοντέρνες.

Στις παραδοσιακές μεθόδους η μορφοποίηση μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- Τροχό.
- Μαχαιρότορνο.
- Εξώθηση.
- Συμπίεση υγρής μάζας.

Η μορφοποίηση με εξώθηση χωρίζεται στην εξώθηση με έμβολο και στην εξώθηση με κοχλία (Στουρνάρας 1993). Η τελευταία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το κεραμικό σώμα ύστερα από τη διαδικασία της μορφοποίησης πρέπει να έχει αποκτήσει την επιθυμητή μορφή και να τη διατηρεί χωρίς ραγίσματα ή σπασίματα. Επίσης πρέπει να αντέχει, αφού ξηρανθεί, σε στρες και μετακινήσεις. Για να έχει αυτές τις ιδιότητες πρέπει να έχει την αναγκαία πλαστικότητα.

Στα αργιλούχα κεραμικά σώματα η άργιλος κυρίως προσδίδει πλαστικότητα και αντοχή. Όταν η άργιλος απουσιάζει προστίθενται οργανικά ή πλαστικοποιητές ώστε να εξασφαλιστούν οι επιθυμητές ιδιότητες (W. Ryan 1978).

2.4 Ξήρανση

Η ξήρανση αποτελεί το αμέσως επόμενο στάδιο κατασκευής των κεραμικών, μετά τη μορφοποίηση. Με την ξήρανση αποβάλλεται το προσροφημένο νερό που υπάρχει στην μορφοποιημένη πλέον πλαστική μάζα. Με

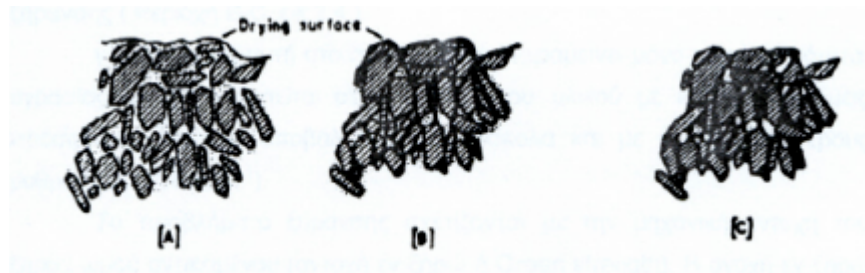
αυτόν τον τρόπο σταθεροποιείται στο επιθυμητό σχήμα προσλαμβάνοντας όμως μικρότερο μέγεθος, λόγω της συστολής που υφίσταται. Για λόγους οικονομίας η διαδικασία πρέπει να είναι σύντομη. Τροχοπέδη είναι ο κίνδυνος εμφάνισης παραμορφώσεων ή ρογμών λόγω της ταχείας αποβολής του νερού (Kingery 1960). Ο σχεδιασμός ενός ασφαλούς κύκλου ξήρανσης για κεραμικά, απαιτεί γνώση της κατανομής νερού στο πορώδες σύστημα και των κανόνων που διέπουν τη διακίνηση υγρών και ατμών μέσα από πορώδη σώματα. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης είναι δυνατόν να διακρίνουμε τρεις περιόδους, οι οποίες φαίνονται τόσο σχηματικά στην εικ.2.1 όσο και διαγραμματικά στην εικ.2.2 (Kingery,1960).

1. Το νερό σχηματίζει συνεχή στρώματα που διαχωρίζουν τους κεραμικούς κόκκους. Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός ξήρανσης είναι σταθερός, καθώς έχουμε προσαγωγή νερού από το εσωτερικό του υλικού προς την επιφάνεια ξήρανσης. Η απόσταση των κόκκων μικραίνει, καθώς το νερό απάγεται από την επιφάνεια και έχουμε συρρίκνωση του κεραμικού σώματος (περιοχή A-B στην καμπύλη της εικ.2.2).

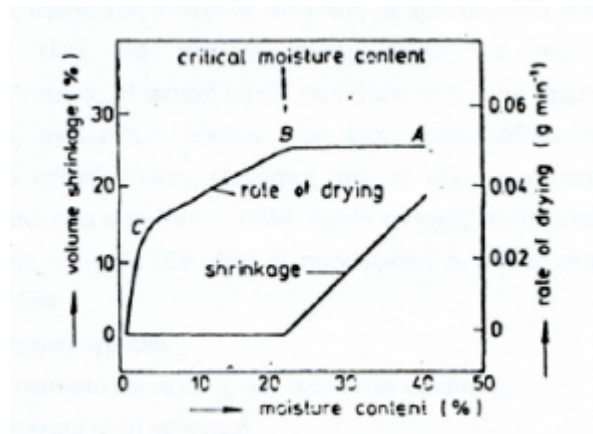
2. Τα στρώματα του νερού έχουν συρρικνωθεί τόσο πολύ ώστε τα κεραμικά σωμάτια εφάπτονται σε συγκεκριμένα σημεία ή επίπεδα. Το νερό γεμίζει τους πόρους μεταξύ των (σημείο B στην καμπύλη της εικ.2.2). Η υγρασία στο σημείο B ονομάζεται κρίσιμη υγρασία (Critical moisture content). Περαιτέρω ξήρανση είναι δυνατή υπό σταθερό όγκο αλλά με μειούμενο ρυθμό προσαγωγής νερού από το εσωτερικό στην επιφάνεια ξήρανσης (περιοχή B-C στην εικ.2.2).

3. Στη φάση αυτή στο σύστημα έχει παραμείνει μόνο μικρή ποσότητα, υγρασίας, που συγκρατείται στα σωμάτια του υλικού με ισχυρές δυνάμεις πρόσφυσης, και άρα αποβάλλεται πιο δύσκολα και με ακόμη μικρότερους ρυθμούς (C-O, εικ.2.2).

Τα προβλήματα ξήρανσης σχετίζονται με την μηχανική αντοχή του ξηρού ωμού αντικειμένου (Green strength). Η αντοχή εν ξηρώ είναι δυνατό να προσδιοριστεί σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 5103 και κυμαίνεται για τα ξηρά, ωμά σώματα από πηλό, μεταξύ 0.5-10MPa.



Εικ.2.1: Συμπεριφορά των αργίλων κατά το στέγνωμα, [A]αρχικό στάδιο ξήρανσης, [B]ενδιάμεσο στάδιο (δεν συμβαίνει παραπέρα συρρίκνωση), [C]τελικό στάδιο (χάσιμο νερού πόρων) (Worral 1986).



Εικ.2.2: Η συμπεριφορά ενός κεραμικού σώματος κατά την ξήρανση (Kingery 1960).

Η αντοχή των ωμών αντικειμένων οφείλεται στις δυνάμεις Van der Waals που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων (Στουρνάρας 1993). Τα λεπτόκοκκα κεραμικά σώματα αποδεικνύονται πιο ανθεκτικά σε σύγκριση με τα χονδρόκοκκα γιατί οι δυνάμεις συνοχής αυξάνουν όταν η επιφάνεια επαφής μεταξύ των κόκκων είναι μεγαλύτερη και αυτό συμβαίνει για τα πρώτα. Το σχήμα των κόκκων επηρεάζει σημαντικά την αντοχή των ωμών σωμάτων από πυλό. Το δισκοειδές σχήμα των κόκκων, προσδίδει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και άρα μεγαλύτερες δυνάμεις συνοχής. Τέλος τα κεραμικά με διαφορετικό είδος προσροφημένων ιόντων παρουσιάζουν διαφορετική αντοχή, π.χ. σώματα από Na^{+} -πηλό, έχουν αντοχές πολύ μεγαλύτερες από σώματα με H^{+} -πηλό.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα εξαιτίας της ξήρανσης επέρχεται συρρίκνωση του κεραμικού. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συρρίκνωση είναι:

1. Η αρχική υγρασία.
2. Το ποσοστό και το είδος των αργιλικών ορυκτών.
3. Η κοκκομετρική κατανομή.
4. Το ποσοστό και το είδος των κατιόντων.

5. Το ποσοστό σε αδρανή υλικά.

(Στουρνάρας 1993, Κωστάκης 1991, J.Hlavak 1983).

Όπως προαναφέρθηκε, η υψηλή αντοχή εν ξηρώ εξαρτάται από το μέγεθος της πλαστικότητας και η τελευταία από την περιεκτικότητα του σώματος σε αργιλικά και το λεπτό σχήμα των κόκκων. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε το China body, του οποίου η περιεκτικότητα σε αργιλικά είναι χαμηλή μόλις 25% και είναι από τα πιο ευαίσθητα σώματα ως προς την επεξεργασία. Η αντοχή του εν ξηρώ δεν ξεπερνά τα 14MPa και του Ball clay τα 69MPa.

Η υψηλή αντοχή εν ξηρώ οφείλεται στη λεπτότητα και στο επίπεδο σχήμα των κόκκων της αργίλου. Κατά την ξήρανση υπάρχει μία μεγάλη περιοχή επαφής μεταξύ των κόκκων και όσο μικρότερη και με περισσότερα επίπεδα είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντοχή (W.Ryan 1978).

Η ορυκτολογική σύσταση των φυσικών αργίλων καθορίζει την ευκολία ξήρανσής τους (Ford 1964). Αυτές που περιέχουν σε μεγαλύτερη ποσότητα καολινίτη, μπορούν να ξηραθούν με ασφάλεια με πολύ ταχύτερους ρυθμούς από αυτούς που περιέχουν ιλλίτη. Οι Al-Khalissi και Worall (1985), που ερεύνησαν τη δομή των πόρων ενός αριθμού ξηρών άψητων αργίλων με ποροσίμετρο υδραργύρου, διαπίστωσαν ότι οι καολινιτικές άργιλοι έχουν το μεγαλύτερο κατά μέσο όρο διάμετρο πόρων και οι ιλλιτικές τον μικρότερο. Επόμενο είναι οι μεγάλοι πόροι της καολινιτικής αργίλου να διευκολύνουν την ταχύτερη διάχυση ύδατος διαμέσου της δομής του δείγματος και έτσι να οδηγούμαστε σε ταχεία ξήρανση χωρίς τον κίνδυνο ραγισμάτων.

Η παρουσία μη αργιλικών ορυκτών, όπως ο χαλαζίας προκαλεί ανοίγματα στην υφή πράγμα που υποβοηθά την ξήρανση. Μεγάλη ποσότητα χαλαζία όμως, μειώνει την πλαστικότητα (W.E.Worral 1986).

2.5 Έψηση

Προκειμένου να αποκτήσουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή τα ξηραμένα κεραμικά, ψήνονται. Ύστερα από το πέρας και αυτής της φάσης τα κεραμικά είναι έτοιμα προς χρήση, εκτός και απαιτούνται κάποιες περαιτέρω διεργασίες, όπως π.χ. υάλωση της επιφάνειας.

Τα θεμελιώδη φαινόμενα που μπορούμε να παρατηρήσουμε κατά την έψηση είναι, η ανακρυστάλλωση και η μεγέθυνση των κρυσταλλιτών, και η πυροσυσσωμάτωση (sintering) (Κοντόπουλος 1983), κατά την οποία επέρχεται δομική διασύνδεση των τεμαχιδίων και το σώμα αποκτά μηχανική αντοχή. Ταυτόχρονα επέρχεται συρρίκνωση του όγκου (densification) με εξάλειψη των πόρων, καθώς και αύξηση της τιμής της φαινόμενης πυκνότητας.

Κατά την κρυστάλλωση και τη μεγέθυνση των κρυσταλλιτών συμβαίνουν τρεις διεργασίες:

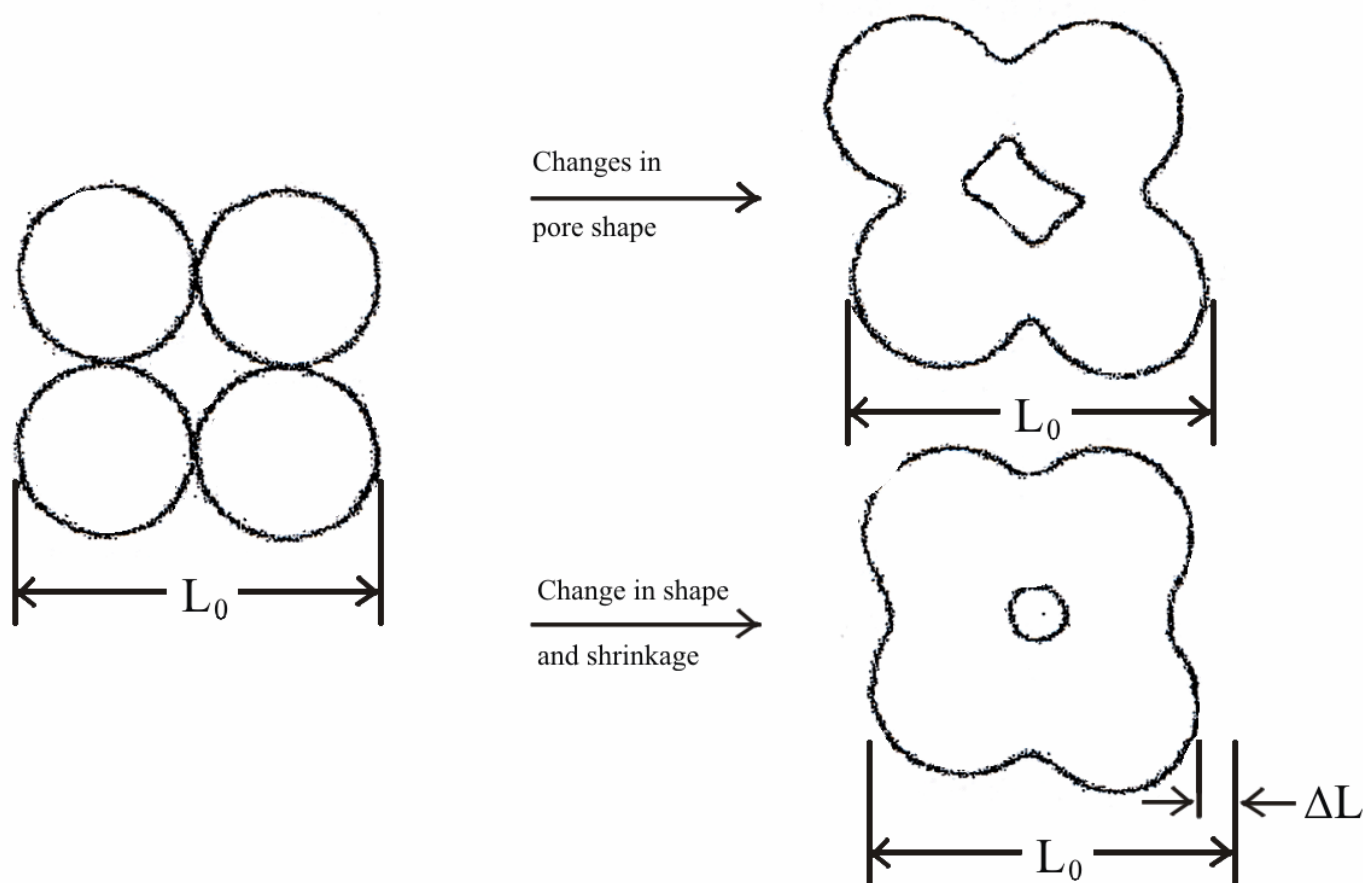
1. Πρωτογενής ανακρυστάλλωση, είναι η διεργασία κατά την οποία, σε μία κρυσταλλική μήτρα που έχει υποστεί πλαστικά παραμόρφωση, γίνεται σχηματισμός πυρήνων και στη συνέχεια δημιουργείται μία νέα γενιά κρυσταλλιτών χωρίς τάσεις.
2. Μεγέθυνση των κρυσταλλιτών, είναι η διεργασία κατά την οποία το μέσο μέγεθος των κρυσταλλιτών αυξάνεται συνεχώς, κατά τη διάρκεια μιας θερμικής κατεργασίας.
3. Δευτερογενής ανακρυστάλλωση, είναι η διεργασία κατά την οποία μερικοί κρυσταλλίτες αυξάνονται σε μέγεθος, ενσωματώνοντας υλικό από λεπτοκρυσταλλική, αλλά χωρίς τάσεις, μήτρα.

Παρόλο που και οι τρεις παραπάνω διεργασίες λαμβάνουν χώρα κατά την έψηση, οι δύο είναι οι σπουδαιότερες. Η μεγέθυνση των κρυσταλλιτών και η δευτερογενής ανακρυστάλλωση.

Κατά την πυροσυσσωμάτωση η ωθούσα δύναμη είναι η ταπείνωση της ελεύθερης ενθαλπίας που είναι αποτέλεσμα της ελάττωσης της επιφάνειας αφ' ενός, και της επιφανειακής ενέργειας αφ' ετέρου, λόγω της εξαλείψεως της διεπιφάνειας στερεού-ατμού.

Κατά την πορεία της πυροσυσσωμάτωσης, μπορούμε να διακρίνουμε τρία στάδια. Στο αρχικό στάδιο σχηματίζονται “λαιοί” στα σημεία επαφής των τεμαχιδίων, και συνήθως, αλλά όχι πάντα, τα κέντρα των τεμαχιδίων πλησιάζουν μεταξύ τους. Καθώς οι “λαιοί” μεγεθύνονται έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και αναπτύσσεται μία δομή με διασυνδεδεμένους πόρους και συνεχές στερεό, που ορίζεται σαν ενδιάμεσο στάδιο. Με την πρόοδο της διεργασίας, οι πόροι απομονώνονται σε φυσαλίδες μέσα στη μάζα του στερεού πράγμα που θεωρείται σαν το τελικό στάδιο της πυροσυσσωμάτωσης (εικ2.3) (Kingery 1960).

Συνήθως, κατά τη διάρκεια και των τριών σταδίων πυροσυσσωμάτωσης, παρατηρείται μείωση του όγκου του κεραμικού. Κάτω από ορισμένες συνθήκες όμως στο τελευταίο στάδιο μπορεί να προκύψει μεγέθυνση των πόρων και διόγκωση του σώματος (Κοντόπουλος 1983).



Εικ.2.3: Σχηματική παράσταση της πυροσυσσωμάτωσης (Kingery 1960).

Γενικά για ένα τυπικό κεραμικό σώμα που περιέχει διοξείδιο του πυριτίου και εύτηκτα υλικά μπορούμε να θεωρήσουμε τις παρακάτω αντιδράσεις κατά το ψήσιμο:

1. Στους 100°C όλη η υγρασία οδηγείται εκτός του σώματος στην ατμόσφαιρα.
2. Στους $450-500^{\circ}\text{C}$ η άργιλος αρχίζει να διασπάται. Τα υδροξύλια που υπάρχουν στη δομή της άργιλου απομακρύνονται ως νερό με την αντίδραση που είναι γνωστή ως απουδροξυλίωση.
3. Οργανικό υλικό που είναι παρόν στο σώμα μπορεί να καεί σε κάθε θερμοκρασία μεταξύ $300-700^{\circ}\text{C}$ ή σπανιότερα ακόμα ψηλότερα, πράγμα που εξαρτάται από τον τύπο του οργανικού υλικού και τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας (W.Ryan 1978). Είναι σημαντικό η ατμόσφαιρα του φούρνου να είναι αρκετά οξειδωτική ώστε να βοηθά την οξείδωση του άνθρακα σε CO_2 όσο το δυνατό γρηγορότερα. Μερικές κρυσταλλικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στο σημείο αυτό είναι η μετατροπή του χαλαζία-α σε χαλαζία-β στους 573°C . Μέχρι να συμβεί η μετατροπή αυτή, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας πρέπει να είναι χαμηλός κοντά στη θερμοκρασία μετατροπής για σώματα που περιέχουν χαλαζία. Γρήγορη θερμοκρασιακή αύξηση μπορεί να προκαλέσει σπασίματα σε πολλά σημεία του κεραμικού (W.Ryan 1978).
4. Υαλοποίηση. Ο σχηματισμός υαλώδους φάσης μπορεί να αρχίσει σε κάθε θερμοκρασία γύρω στους 900°C , που εξαρτάται από τη σύσταση της άργιλου. Κόκκοι εύτηκτων υλικών αντιδρούν με κόκκους οι οποίοι απαρτίζουν το σώμα του κεραμικού που είναι σε επαφή, δημιουργώντας υγρή φάση, το ποσοστό της οποίας αυξάνεται όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία. Η συστολή του σώματος οφείλεται στο σχηματισμό της υγρής φάσης (συστολή κατά την έψηση) και τη μείωση του πορώδους.

Οι μετατροπές που λαμβάνουν χώρα συνήθως κατά την έψηση μιας μάζας αργιλοπυριτικής σύστασης φαίνεται στον Πίνακα 1 (Μαρκόπουλος 1992).

Πιν.1: Μετατροπές που λαμβάνουν χώρα κατά την έψηση μάζας αργιλοπυριτικής σύστασης.

100-300°C	Απώλεια πορώδους και προσροφημένου νερού, συστολή
200-300°C	Οξείδωση οργανικών ουσιών
400-500°C	Οοξείδωση θειούχων συστατικών (σε οξειδωτικό περιβάλλον, αλλιώς η διαδικασία καθυστερεί)
400-600°C	Απώλεια του συνδεδεμένου OH
600-900°C	SiO ₂ και Al ₂ O ₃ έντονα δραστικά σαν άμορφα υπολειμματικά συστατικά
500-920°C	Ανθρακικές ενώσεις δημιουργούν CO ₂
950°C	Αρχή σχηματισμού μουλλίτη
1200°C	Σχηματισμός μουλλίτη-χριστοβαλλίτη
1650-1775°C	Τήξη μετά από την φάση σχηματισμού υάλου που διαρκεί αρκετές εκατοντάδες βαθμούς

Αν η υαλοποίηση προχωρήσει αρκετά το σώμα θα περάσει σε υγρή φάση και πιθανόν θα χάσει το σχήμα του. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται μπορεί να σχηματιστούν κρύσταλλοι από την υγρή φάση όπως οι κρύσταλλοι μουλλίτη 3Al₂O₃·2SiO₂ μπορούν να διαχωριστούν από την τετηγμένη μάζα. Κατά την ψύξη το σώμα από την υγρή φάση επιστρέφει στη στερεά και πλέον αποτελείται από το σύνολο των κόκκων που δεν έλιωσαν και των σχηματισμένων κρυστάλλων κατά το ψήσιμο, έχοντας αποκτήσει αντοχή.

Οι χημικές αντιδράσεις κατά την έψηση μεταξύ των κόκκων μπορεί να λάβουν χώρα και πριν το σχηματισμό της υγρής φάσης. Έτσι και αλλιώς η αντίδραση της στερεάς φάσης είναι το πρώτο βήμα για την συμπαγοποίηση ακόμα και στην περίπτωση που ακολουθήσει ο σχηματισμός υγρής φάσης.

Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να προκύψει συμπαγοποίηση με αποτέλεσμα τη δημιουργία συμπαγούς, σκληρού προϊόντος χωρίς το σχηματισμό καθόλου υγρής φάσης. Η διαδικασία είναι αυτή της αμοιβαίας διάχυσης των ατόμων μεταξύ των γειτονικών και σε επαφή κόκκων και είναι γνωστή ως περίτηξη (sintering).

Αποτέλεσμα της περίτηξης είναι να μειώνεται ο αριθμός των κόκκων αλλά ταυτόχρονα να μεγεθύνονται ώστε οι πόροι να οδηγούνται σε εξάλειψη. Η αντοχή του ψημένου σώματος δεν οφείλεται στο σχηματισμό της υγρής φάσης αλλά στη διασύνδεση των κρυστάλλων. Είτε σχηματισθεί υγρή φάση είτε όχι, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο. Η κατάληξη σε ένα σώμα με χαμηλό ή καθόλου πορώδες, από μια αρχική κατάσταση ενός σώματος συμπίεσμνης σκόνης υψηλού πορώδους.

Η συμπαγοποίηση εξαρτάται από την ποιότητα της επαφής των κόκκων. Όσο καλύτερη επαφή έχουν οι κόκκοι μεταξύ τους στο άψητο υλικό, τόσο ευκολότερα θα πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις που οδηγούν στη συμπαγοποίηση. Παράλληλα το μικρό μέγεθος των κόκκων του αρχικού υλικού, εξαιτίας της σχετικής ανά βάρος μεγαλύτερης ελεύθερης επιφάνειας, διευκολύνει τη διαδικασία της έψησης. Άτομα στην επιφάνεια ενός στερεού, έχουν υψηλότερη ενέργεια από αυτά του εσωτερικού, καθώς τα τελευταία ενώνονται με άλλα άτομα από τη μια πλευρά μόνο και είναι σε κατάσταση ανισορροπίας (φορτίου). Όσο μεγαλύτερη η ελεύθερη

επιφάνεια της σκόνης τόσο μεγαλύτερη η αναλογία των επιφανειακών ατόμων προς τα άτομα στο κύριο σώμα και τόσο μεγαλύτερη η επιφανειακή ενέργεια της σκόνης. Μετά το ψήσιμο η ελεύθερη επιφάνεια έχει μειωθεί κατά πολύ και η επιφανειακή ενέργεια επίσης. Αυτή η ελάττωση της ενέργειας είναι η κινούσα δύναμη της περίττηξης. Όσο το εύτηκτο αυξάνει σε ποσοστό επί της κεραμικής μάζας τόσο απαιτείται η ελάττωση της θερμοκρασίας (W.Ryan 1978).

Το αποτέλεσμα του ψήσιματος μιας κεραμικής μάζας δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία αλλά και από τη διάρκεια έψησης (W.Ryan 1978).

Μετά την έψηση, τα κεραμικά κρυστώνουν έως ότου φτάσουν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Απαραίτητος τότε για την αξιολόγηση της ποιότητας τους, είναι ο υπολογισμός των παρακάτω ιδιοτήτων (Schulle 1989):

- Φαινόμενη πυκνότητα σε gr/cm^3 , είναι ο λόγος της μάζας του ξηρού σώματος, προς τον όγκο του, συμπεριλαμβανομένου και του ολικού όγκου των πόρων.
- Αντοχή σε κάμψη, που ορίζεται ως το όριο αντοχής ενός κεραμικού σώματος σε κάμψη.
- Υδατοαπορροφητικότητα (water absorption), είναι ο λόγος επί τοις εκατό της μάζας ενός υγρού πλήρωσης (συνήθως αποσταγμένου νερού), που προσροφά ένα σώμα κατά τη βύθισή του στο υγρό, προς τη μάζα του ξηρού σώματος.
- Ανοιχτό πορώδες (open porosity), που είναι το ποσοστό των αλληλοσυνδεόμενων πόρων που έχουν επαφή με το περιβάλλον εκφρασμένο επί τοις εκατό του ολικού όγκου του κεραμικού συμπεριλαμβανομένου του όγκου των πόρων.

2.6 Η μικροδομή των κεραμικών

Σχεδόν κάθε κόκκος είναι ένας κρύσταλλος, που ενώνεται με τους γειτονικούς κόκκους έχοντας συγκεκριμένη θέση και απόσταση από αυτούς.

Η δομή αυτή των κεραμικών οδηγεί σε μη συμπαγή σώματα. Παρατηρείται πορώδες ως και 20% του υλικού τους. Η ύπαρξη πόρων εξασθενίζει την αντοχή του υλικού σε φορτία. Η μορφοποίηση του σώματος του κεραμικού και οι σχηματιζόμενοι πυρήνες από τη διαφορική θερμική ανάπτυξη ή την αλλοίωση μεταξύ των κόκκων και των σχηματιζόμενων φάσεων, οδηγούν σε ραγίσματα που και αν είναι δύσκολο να εντοπισθούν συμβάλλουν και αυτά στη μείωση της αντοχής του υλικού.

Πρόσφατες εξελίξεις στην παραγωγική διαδικασία των κεραμικών βοηθά στη μείωση του αριθμού και του μεγέθους των πόρων και των ραγισμάτων δίνοντας τους μεγαλύτερες αντοχές στις φορτίσεις. Πάντα αποσκοπούμε να βελτιώσουμε την αντοχή των κεραμικών, ελαττώνοντας τη διάμετρο των ραγισμάτων με προσεκτικό ποιοτικό έλεγχο και αυξάνοντας τον συντελεστή σκληρότητας με ανάμειξη των διαφόρων υλικών και τη δημιουργία κραμάτων (Michael F. Ashby & David R. Jones 1986).

2.7 Αντοχή σε θραύση των κεραμικών

Η αντοχή σε εφελκυσμό των κεραμιδιών, τούβλων και πήλινων αγγείων κυμαίνεται στην τιμή των 20MPa. Τα παραπάνω κεραμικά είναι πορώδη σε ποσοστό 5-20% και συγκεντρώνουν ραγίσματα και ατέλειες που προκλήθηκαν από τη διαδικασία παραγωγής.

Η αντοχή ενός κεραμικού εξαρτάται από το βαθμό σκληρότητας σε θραύση και από το μέγεθος των μικρορωγμών που περιέχει.

Για τα μέταλλα, μέτρο της αντοχής σε συμπίεση είναι το ίδιο με αυτό που μετράται σε εφελκυσμό. Για ψαθυρά υλικά αυτό δεν ισχύει. Η αντοχή σε συμπίεση είναι περίπου 15 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό. Στην περίπτωση αυτή ο κρίσιμος παράγοντας δεν είναι το μέγεθος του ραγίσματος, αλλά ο αριθμός αυτών σε σύνολο.

Ένα κεραμικό δοκίμιο είναι πιο ανθεκτικό στην κάμψη από τον εφελκυσμό, γιατί στον εφελκυσμό όλο το δείγμα υπόκειται στην εφελκυστική δύναμη ενώ στην κάμψη μόνο ένα λεπτό επίπεδο κοντά στην επιφάνεια υπόκειται στη μέγιστη τιμή της έντασης. Αυτό εξηγεί γιατί το μέτρο διάνοιξης είναι μεγαλύτερο από τον εφελκυσμό (Michael F. Ashby & David R. H. Jones 1986).

3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

3.1 Γενικά

Οι αργιλομάζες που παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προήλθαν από τη δειγματοληψία αργιλοχωμάτων του νομού Ρεθύμνου και συγκεκριμένα των παρακάτω περιοχών:

- Περιοχή Ξηροκάμπι, νοτίως της περιοχής Ποταμών.
- Περιοχή Μετόχι Προκόπη, νότιο-νοτιοανατολικά των χωριών Γουλεδιανά, Αμπελάκια.

3.2 Γεωλογία της Κρήτης

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από μια πολύπλοκη γεωλογική δομή. Αυτή είναι αποτέλεσμα της γεωτεκτονικής θέσης που κατέχει, σε σχέση με τις δύο συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες της Ευρασίας και της Αφρικής. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της δομής της είναι η λεπιοειδής διάταξη διαδοχικών τεκτονικών καλυμμάτων, που περιλαμβάνουν πετρώματα ο σχηματισμός των οποίων πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικούς παλαιογραφικούς χώρους.

Γενικά η Κρήτη συγκροτείται από ένα αυτόχθονο σύστημα. Είναι η ενότητα Ταλέα όρη των πλακωδών ασβεστόλιθων (plattenkalk). Πάνω σ' αυτό το σύστημα τοποθετούνται με λεπιοειδή τεκτονική διάταξη οι σειρές των πετρωμάτων των άλλων ζωνών και ενοτήτων.

Το αυτόχθονο υπόβαθρο της Κρήτης αποκαλύπτεται σε πολλές περιοχές του νησιού με τη μορφή πολλαπλού τεκτονικού παραθύρου κάτω από αλληπάλληλα επωθημένα καλύμματα. Μεγάλες μάζες των ορεινών όγκων των Λευκών Όρεων και της Ίδης, δομούνται από τη σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων.

Πάνω στη σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων βρίσκεται μια σειρά κροκαλοπαγών-λατυποπαγών ασβεστόλιθων που ονομάζεται σειρά Τρυπαλίου.

Επωθημένη πάνω στην ενότητα Ταλέα όρη και στη σειρά Τρυπαλίου βρίσκεται μια φυλλιτική χαλαζιτική σειρά ηλικίας Περμίου-Τριαδικού, που αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, μετα-κροκαλοπαγή, μετα-ψαμμίτες, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μεταβασίτες και μετά-ανδεσίτες.

Πάνω στη φυλλιτική σειρά τοποθετείται η ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως με τους γνωστούς νηριτικούς ασβεστόλιθους, σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται επωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου.

Η παχιά σειρά των φυλλιτών είναι και αυτή ιδιαίτερα διαδεδομένη σε όλη την έκταση του νησιού. Η σειρά των φυλλιτών υπολογίζεται ότι έχει πάχος 700-2000m και αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα σερικιτικών-γραφιτικών-χλωριτικών φυλλιτών και χαλαζιτών (Μουντράκης Δ. 1985).

3.3 Γεωλογία της περιοχής δειγματοληψίας

Το 1/3 περίπου της Κρήτης καλύπτεται από ιζήματα του νεογενούς και του πλειστόκαινου. Μέχρι το 1979 είχαν αναγνωριστεί πάνω από 60 τυπικές και άτυπες λιθολογικές ενότητες τις οποίες ο J.E. Meulenlamp χώρισε σε έξι ομάδες σχηματισμών. Ο ίδιος μελετητής βασισμένος σε λιθοστρωματογραφικά, βιοστρωματογραφικά και τεκτονικά στοιχεία περιγράφει την εξέλιξη της Κρήτης κατά το νεογενές διακρίνοντας έντεκα περιόδους. Οι περίοδοι αυτές ανακλούν ουσιαστικά τεκτονικά γεγονότα, τα οποία προκάλεσαν θεμελιώδεις αλλαγές στην

παλαιογεωγραφία και επηρέασαν δραστικά τις συνθήκες ιζηματογένεσης. Είναι φανερό ότι η γένεση των αργίλων στη Κρήτη είναι συνδεδεμένη με την αποσάθρωση και εξαλλοίωση της φυλλιτικής σειράς.

3.4 Περιγραφή της περιοχής της δειγματοληψίας

Το λατομείο απεικονίζεται στις φωτογραφίες που ακολουθούν. Στην πρώτη φωτογραφία βλέπουμε μια γενική άποψη αυτού στην περιοχή Μετόχι Προκόπη. Στη δεύτερη φωτογραφία βλέπουμε το μέτωπο στο οποίο είναι εμφανές το ακριβές σημείο της δειγματοληψίας του δείγματος 19Α. Επίσης ακολουθούν τοπογραφικοί χάρτες πάνω στους οποίους έχουν σημειωθεί τα ακριβή σημεία των δειγματοληψιών.

3.5 Περιγραφή δειγμάτων

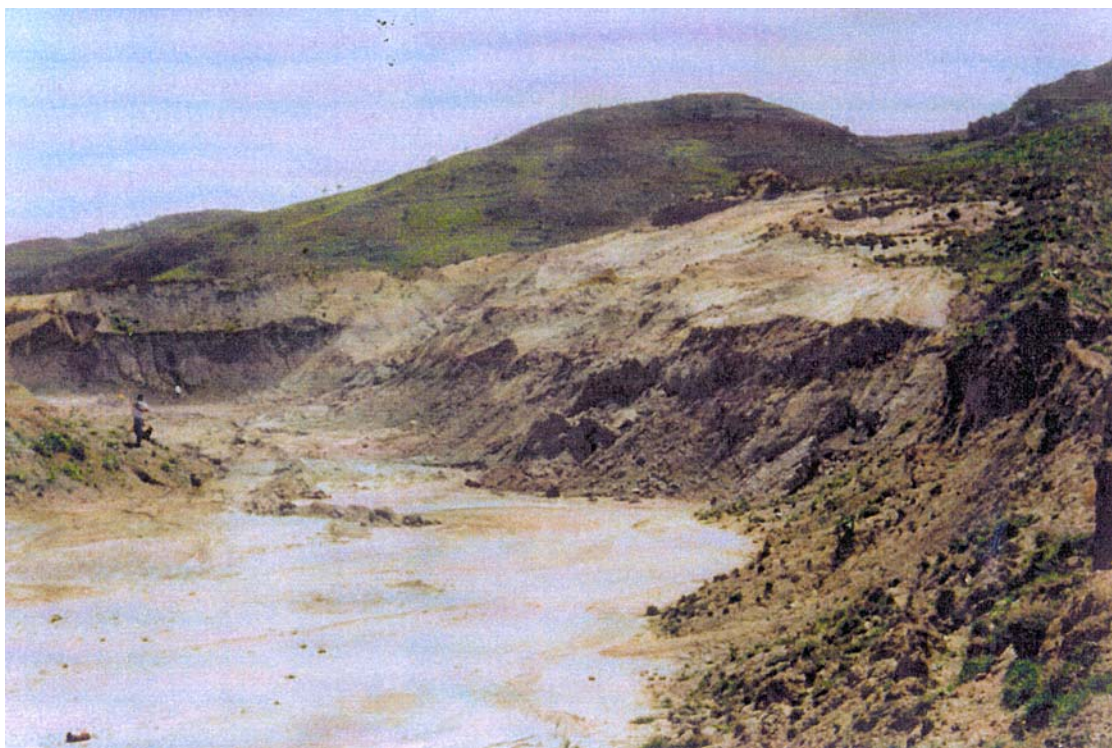
Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τρία δείγματα στα οποία χάριν συντομίας έχουν δοθεί τα κωδικά ονόματα 19Α, 195 και 197.

Το 19Α (χρώμα γκριζό) προέρχεται από την περιοχή Ξηροκάμπι.

Το 195 αποτελείται κατά 70% από το 19Α και 30% από το Νο5 (χρώμα γκριζοκιτρινοπράσινο).

Το 197 αποτελείται κατά 70% από το 19Α και 30% από το Νο7 (χρώμα σκούρο κόκκινο).

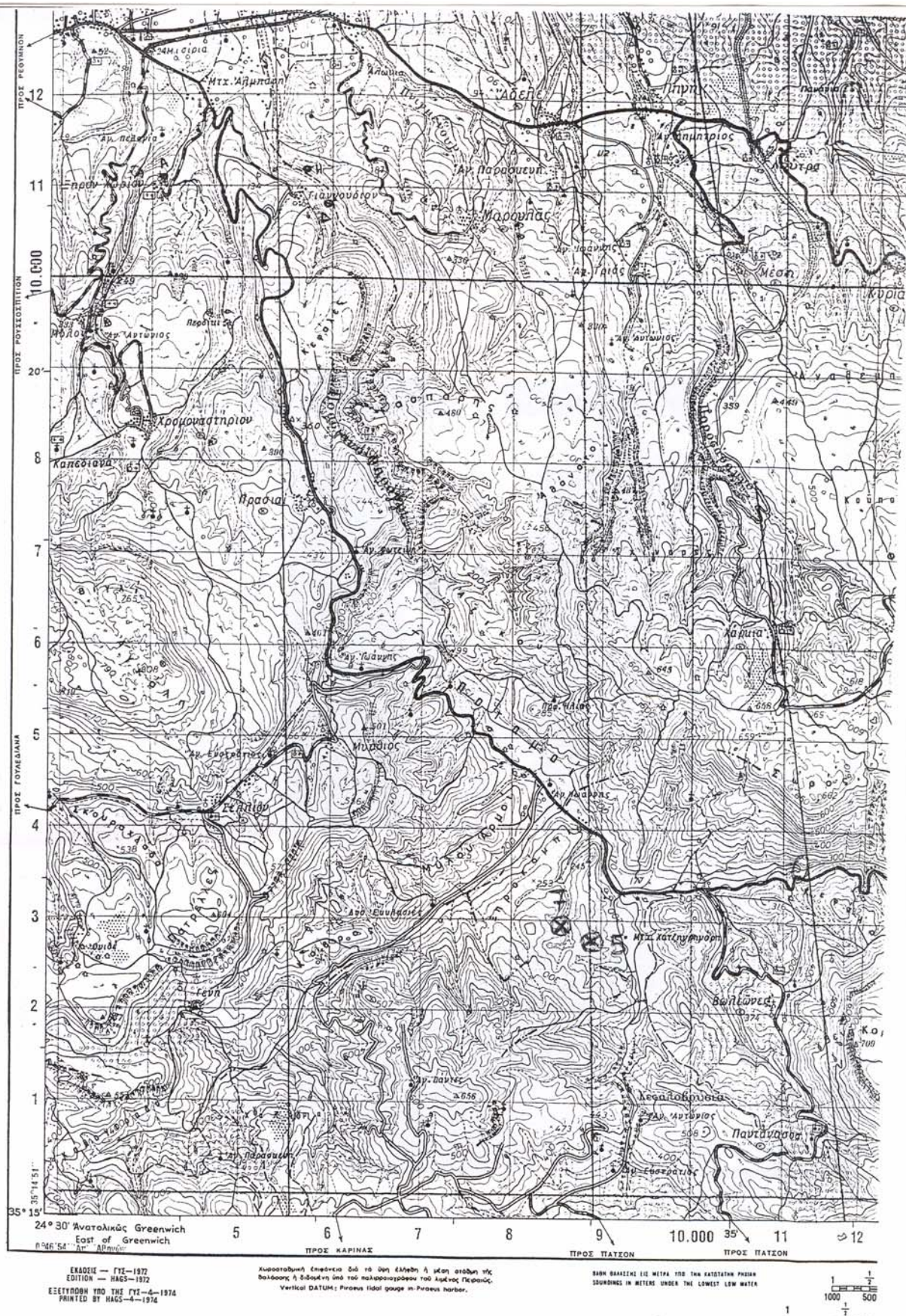
Τα Νο5 και Νο7 προέρχονται από την περιοχή Ποταμοί και τα ακριβή τους σημεία δίνονται στους τοπογραφικούς χάρτες που ακολουθούν.



Φωτ1: Άποψη του λατομείου στην περιοχή Μετόχι Προκόπη από το οποίο προέρχεται το 19Α.



Φωτ2: Μέτωπο του λατομείου στην περιοχή Μετόχι Προκόπη από το οποίο προέρχεται το 19Α (σημείο δειγματοληψίας).



4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε, προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης των αργιλοχωμάτων για εφαρμογές στην κεραμική βιομηχανία.

Στο κάθε δείγμα πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία έγιναν οι παρακάτω αναλύσεις:

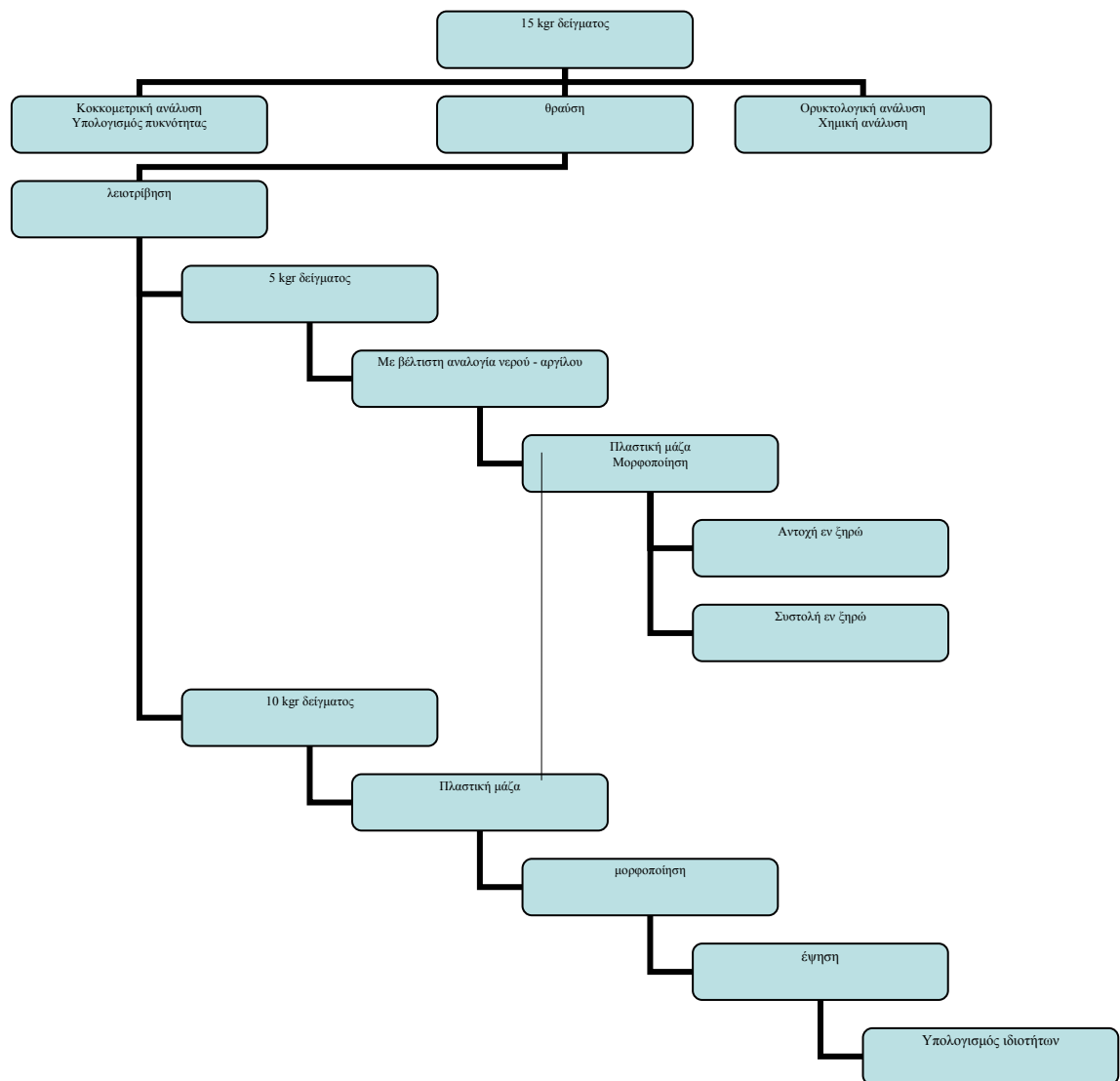
- Υπολογισμός της πυκνότητας (μέθοδος πυκνόμετρου ή ληκύθου).
- Κοκκομετρική ανάλυση (υγρή και ξηρή κοσκίνιση, καθίζηση σε σωλήνες ATTERBERG).
- Ορυκτολογική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X).
- Χημική ανάλυση (φασματοσκοπία ακτίνων X).

Έπειτα ακολούθησε θραύση και λειοτρίβηση και στη συνέχεια μια ποσότητα του λειοτριβημένου αργιλικού υλικού ανακατεύτηκε με νερό έτσι ώστε να δημιουργηθεί πλαστική μάζα. Στην πλαστική αυτή μάζα υπολογίστηκε η βέλτιστη αναλογία νερού-αργίλου, για την καλύτερη δυνατή επιδεκτικότητα μορφοποίησης (μέθοδος κατά PFEFFERKORN DIN 51030). Με τη βέλτιστη αναλογία νερού αργίλου δημιουργήθηκε νέα πλαστική μάζα για κάθε δείγμα. Από αυτή κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια (100mmX15mm), στα οποία μελετήθηκε μετά από στέγνωμα στους 40°C η αντοχή εν ξηρώ, και η συστολή τους εν ξηρώ μετά από ξήρανση στους 105°C. Από την ίδια πλαστική μάζα δημιουργήθηκαν μια σειρά κυλινδρικών δοκιμίων (100mmX15mm), τα οποία αφού ξηράθηκαν, ψήθηκαν σε διάφορες θερμοκρασίες (800°C-1100°C).

Στα ψημένα δοκίμια μετρήθηκαν οι παρακάτω ιδιότητες για κάθε θερμοκρασία:

- Χαρακτηρισμός χρώματος.
- Συρρίκνωση σε σχέση με το μήκος πριν και μετά την ξήρανση.
- Αντοχή σε κάμψη.
- Φαινόμενη πυκνότητα, υδατοαπορροφητικότητα και ανοιχτό πορώδες.

Οι παραπάνω πειραματικές εργασίες για την αξιολόγηση των αργιλικών δειγμάτων απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής της εικόνας 4.1.



Εικ. 4.1: Διάγραμμα ροής πειραματικών εργασιών για την αξιολόγηση των αργιλικών δειγμάτων

4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Η ειδική πυκνότητα των αργίλων προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της λήκυθου. Η λήκυθος είναι ένα μικρό φιαλίδιο, που έχει όγκο $2-20\text{cm}^3$ και ένα πώμα με τριχοειδή οπή. Οι κόκκοι του δείγματος μετά από ζύγιση τους στον αέρα τοποθετούνται σε νερό. Η πυκνότητα d προκύπτει από την εξίσωση:

$$d = \frac{Bu}{Bu + Bx - By} * Dw \quad [4.1]$$

όπου

Bu : το βάρος του υλικού

Bx : το βάρος του πυκνομέτρου όταν είναι γεμάτο με υγρό

By : το βάρος του πυκνομέτρου όταν είναι γεμάτο με υγρό και περιέχει τους κόκκους του υλικού

Dw : η πυκνότητα του υγρού στη θερμοκρασία εκτέλεσης του πειράματος

Εάν η θερμοκρασία διατηρηθεί σταθερή και απομακρυνθούν οι φυσαλίδες αέρα που βρίσκονται επί των κόκκων ή ανάμεσα τους, η πυκνότητα υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια (Κωστάκης 1988).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της πυκνότητας των αργιλικών δειγμάτων είναι η ακόλουθη:

Αφού επιλέχθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε άργιλο, λειοτριβήθηκε με τη βοήθεια γουδιού από αχάτη για την απαλλαγή από συσσωματώματα. Από το λειοτριβημένο δείγμα ζυγίστηκε ποσότητα 1-3gr σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας SARTORIUS, με ακρίβεια τρίτου δεκαδικού ψηφίου. Η μέτρηση του βάρους καταχωρήθηκε σαν Bu.

Έπειτα η λήκυθος γέμισε ως κάποιο σημείο με αποσταγμένο νερό και ζυγίστηκε στη ζυγαριά. Η μέτρηση αυτή καταχωρήθηκε σαν Bx. Σημειώθηκε επίσης η θερμοκρασία του νερού για να υπολογιστεί η πυκνότητά του Dew στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε στη λήκυθο, που ήταν γεμάτη με νερό και το υλικό, βάρους Bu. Το βάρος της λήκυθου μαζί με το βάρος του υλικού και το νερό, ζυγίστηκε και η μέτρηση καταχωρήθηκε σαν By. Η πυκνότητα της κάθε αργίλου υπολογίστηκε από την εξίσωση [4.1]. Τρεις φορές επαναλήφθηκε το πείραμα για κάθε μείγμα και ο μέσος όρος των τριών τιμών θεωρήθηκε ως η πυκνότητα του κάθε μείγματος.

4.2 Κοκκομετρική ανάλυση

Για την πλήρη κοκκομετρική ανάλυση των τριών δειγμάτων, ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Λήψη ποσότητας 200gr από κάθε άργιλο και θραύση της με γεωλογικό σφυρί.
- Υγρή ανάδευση με εργαστηριακά αναδευτήρια για 20 λεπτά και χρήση υπερήχων με συσκευές METASON 120 JTRUERS και ULTRASON-H P/SELEKTA για δύο ώρες για την αποδέσμευση των συσσωματωμάτων.
- Υγρή κοσκίνιση, με κόσκινα RETSCH DIN 41188 έτσι ώστε να προκύψουν δύο κλάσματα, ένα μεγαλύτερο και ένα μικρότερο των 63μm.
- Ξεχωριστή μεθοδολογία για την κοκκομετρική ανάλυση του κάθε κλάσματος. Μέθοδος καθίζησης σε σωλήνες ATTERBERG (εικ4.2) για το κλάσμα μικρότερο από 63μm και ξηρή κοσκίνηση για το κλάσμα μεγαλύτερο από 63μm.



Εικ. 4.2: Σωλήνες ATTEBERG

4.2.1 Κοκκομετρική ανάλυση στο κλάσμα μεγαλύτερο από 63μm

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι αυτή της ξηρής κοσκίνισης για 30 λεπτά με κόσκινα DIN 41188, ώστε να είναι το ένα επάνω στο άλλο. «Κοσκινίζονταν» 50gr δείγματος κάθε φορά. Τα κοκκομετρικά κλάσματα ζυγίστηκαν και προέκυψαν τα ποσοστά στο κλάσμα το μεγαλύτερο από 63μm. Στη συνέχεια έγινε αναγωγή των παραπάνω ποσοστών επί του συνόλου του δείγματος. Η κοσκίνιση επαναλήφθηκε μια δεύτερη φορά έτσι ώστε να περιοριστεί το πειραματικό σφάλμα.

Τα κοκκομετρικά κλάσματα τα οποία επιλέχθηκαν για την κοκκομετρική ανάλυση του κλάσματος μεγαλύτερο από 63μm φαίνονται στον πιν 4.1

Πιν4.1 (Κοκκομετρικά κλάσματα)

+106μm
+90μm
+63μm

4.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση στο κλάσμα μικρότερο από 63μm

Ακολουθήθηκε η μέθοδος της καθίζησης σε αποσταγμένο νερό για την κοκκομετρική ανάλυση του κλάσματος κάτω από 63μm, μέσα σε σωλήνες ATTERBERG. Πρόκειται για ογκομετρικά βαθμονομημένους σωλήνες με άνοιγμα στο επάνω μέρος τους, από όπου μπορεί να εισέρχεται το νερό και το υλικό προς κοκκομετρική ανάλυση. Στο κάτω μέρος τους υπάρχει λεπτό άνοιγμα από το οποίο μπορεί να εξέρχεται το νερό συμπαρασύροντας τα ζητούμενα κοκκομετρικά κλάσματα. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει το διαχωρισμό των κλασμάτων με βάση την ταχύτητα καθίζησης τους μέσα σε κάποιο ρευστό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ρευστό είναι το αποσταγμένο νερό.

Η μέθοδος ακολουθεί το νόμο του Stokes, βάσει του οποίου γίνονται οι μετρήσεις των χρόνων καθίζησης κάθε κοκκομετρικού κλάσματος. Ο τύπος που ισχύει είναι ο παρακάτω:

$$d = 174.5 * \sqrt{\frac{n * h}{(D_1 - D_2) * t}} \quad [4.2]$$

Όπου

d : η μεγαλύτερη διάμετρος κόκκων (μm)

t : χρόνος καθίζησης (min)

D₁: πυκνότητα του υλικού (gr/cm³)

D₂: πυκνότητα αποσταγμένου νερού στη θερμοκρασία εκτέλεσης του πειράματος (gr/cm³)

n : ιξώδες αποσταγμένου νερού στη θερμοκρασία εκτέλεσης του πειράματος (cP)

h : ύψος στήλης νερού (cm)

Αφού έχει διαχωριστεί το κλάσμα, κάτω από 63μm, μπορεί να αρχίσει η διαδικασία για την εφαρμογή της μεθόδου. Φροντίζουμε να είναι το υλικό μας απαλλαγμένο από συσσωματώματα, με καλή υγρή ανάδευση και

χρήση υπερήχων. Για καλύτερα αποτελέσματα με τη μέθοδο αυτή θα πρέπει να φροντίσουμε να έχουμε μια αναλογία 10-15gr υλικού στα 1000ml νερού. Με περισσότερο υλικό οι κόκκοι δεν καθιζάνουν ελεύθερα λόγω έντονης αλληλεπίδρασης μεταξύ τους και δεν έχουμε την πρόπυσα καθίζηση. Με λιγότερο υλικό το πειραματικό σφάλμα στις ζυγίσεις των κλασμάτων αυξάνει σημαντικά (Robert L. Folk 1974).

Για την κοκκομετρική ανάλυση των συγκεκριμένων δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ποσότητες 8-10gr υλικού στα 650ml νερού. Αφού έγινε καλή ανάδευση σε σωλήνες, με δυνατά κουνήματα για 15min περίπου, αφέθηκαν οι σωλήνες με την πιπέτα προς τα κάτω, ώστε να ηρεμήσει το σύστημα και να αρχίσει η καθίζηση.

Τα κοκκομετρικά κλάσματα που απαιτούνται για την πλήρη κοκκομετρική ανάλυση μιας αργίλου (σε μm) είναι:

- 0 - 2
- 2 - 6.3
- 6.3 - 20
- 20 - 63

Από την εξίσωση 4.2 υπολογίστηκαν οι χρόνοι καθίζησης για καθένα από τα παραπάνω κλάσματα. Η λήψη των κλασμάτων έγινε σταδιακά, λαμβάνοντας πρώτα το λεπτόκοκκο και βαίνοντας προς το χονδρόκοκκο. Το κλάσμα 20-63 μm λήφθηκε σαν υπόλοιπο (ίζημα). Η λήψη του κλάσματος έγινε αφού άνοιξε η πιπέτα από κάτω, έχοντας ανοιχτό το καπάκι στο πάνω μέρος του σωλήνα, ώστε να αρχίσει να ρέει το νερό μαζί με τους κόκκους του κλάσματος. Το ύψος της στήλης του νερού κατά τη λήψη των κλασμάτων 0-2 μm και 2-6.3 μm είναι 25cm, ενώ για τα υπόλοιπα 20cm.

Εάν πάρουμε το κλάσμα 0-2 μm μια φορά και ξαναγεμίσει ο σωλήνας με νερό, αναδευτεί και αφεθεί το σύστημα σε ηρεμία, θα παρατηρηθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό κόκκων <2 μm δεν έχει αφαιρεθεί με τη πρώτη φορά. Επομένως η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχουν άλλοι κόκκοι με διάμετρο κάτω από 2 μm . Αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο κλάσμα έχει πλήρως ληφθεί. Το ίδιο γίνεται και για τα άλλα κλάσματα.

Τα κλάσματα τοποθετήθηκαν σε γυάλινα δοχεία και αφέθηκαν στους 50°C έως ότου εξατμισθεί το νερό και μείνει καθαρό το υλικό, το οποίο και ζυγίστηκε.

Έγιναν δυο προσδιορισμοί για κάθε δείγμα με παράλληλη χρήση δυο σωλήνων ATTERBERG.

4.3 Ορυκτολογικές αναλύσεις

Η ποιοτική ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X.

Η περιθλασιμετρία ακτίνων X επιτρέπει την ποιοτική, ημιποσοτική και υπό ορισμένες προϋποθέσεις την ποσοτική ορυκτολογική ανάλυση. Για την ημιποσοτική ανάλυση κατά την παρασκευή των δειγμάτων, πρέπει να χρησιμοποιείται η ίδια ποσότητα δείγματος όπως επίσης και ο ίδιος τρόπος παρασκευής. Ένα περιθλασίμετρο ακτίνων X αποτελείται από τις εξής βασικές μονάδες: Μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης, λυχνία ακτίνων X, γωνιόμετρο, απαριθμητή ακτίνων X, μονάδα μικροϋπολογιστή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων X τύπου D500 της εταιρίας SIEMENS (εικ.4.3), του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Χρησιμοποιήθηκε τάση 35KV και ένταση 40mA, λυχνία $\text{CuK}\alpha_{1+2}$, ταχύτητα γωνιομέτρου 1°/min και φίλτρο νικελίου. Η ποιοτική αξιολόγηση των δειγμάτων έγινε με τη βοήθεια των δεδομένων των J.C.P.D.S. (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) (Κωστάκης 1988).

Σε ένα πλαστικό δειγματοφορέα, ο οποίος σχηματίζει κοιλότητα βάθους 1mm, τοποθετείται ποσότητα 1gr του δείγματος υπό μορφή κόνεως, με τρόπο τέτοιο ώστε να σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια. Στη συνέχεια το παρασκεύασμα τοποθετείται σε μια περιστρεφόμενη βάση, γύρω από την οποία περιστρέφεται ο απαριθμητής ακτίνων X. Το δείγμα περιστρέφεται επίσης γύρω από ένα άξονα, κάθετο στον άξονα της βάσης, με το ήμισυ της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του απαριθμητή των ακτίνων X.

Για την παρασκευή των δειγμάτων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Λήψη μικρής ποσότητας από το ομογενοποιημένο μείγμα
2. Λειοτρίβηση του δείγματος στον αχάτη, ώστε το υλικό να διέρχεται από το κόσκινο των 40 μm .

3. Τοποθέτηση του υλικού, με τη μορφή σκόνης, σε πλαστικά πλακίδια βάθους ~1mm και έκτασης μερικών cm^2 κατά τρόπο που να δημιουργείται επίπεδη επιφάνεια. Αν το δείγμα είναι σε μορφή αιωρήματος τοποθετείται σε κυκλικά γυαλάκια όπου και αφήνεται να ξηραθεί.
4. Εάν απαιτείται η ταυτοποίηση της ύπαρξης ή όχι ορυκτών της ομάδας του μοντμοριλλόνιτη επιδρούμε στο παρασκεύασμα με αιθυλενογλυκόλη η οποία προκαλεί διογκωση του πλέγματος που καταμετράται.
5. Λόγω της αλληλοεπικάλυψης μεταξύ της αιχμής δεύτερης τάξης του χλωρίτη με την πρώτη τάξη του καολινίτη απαιτείται θέρμανση του δείγματος στους 500°C επί 2 ώρες ώστε να καταστραφεί το κρυσταλλικό πλέγμα του καολινίτη. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η ύπαρξη του καολινίτη, ενώ η διατήρηση της αιχμής των 14A επιβεβαιώνει την ύπαρξη χλωρίτη (Thorez J. 1976).



Εικ. 4.3: Περιθλασίμετρο ακτίνων X του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας, τύπος D500 της εταιρείας SIEMENS

4.4 Χημικές αναλύσεις

Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν με τη βοήθεια του αυτόματου συστήματος φασματοσκοπίας ακτίνων X φθορισμού τύπου SRS 303 SIEMENS (εικ4.4) του εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το φασματόμετρο ακτίνων X αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη (Whiston C. 1987):

1. Λυχνία παραγωγής ακτίνων X.

2. Φίλτρο πρωτογενούς ακτινοβολίας.
3. Θάλαμος όπου το δείγμα βομβαρδίζεται με την πρωτογενή ακτινοβολία.
4. Μονοχρωματιστής που διαχωρίζει τα διάφορα μήκη κύματος
5. Ανιχνευτής
6. Ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης και καταγραφής.

Η πρωτογενής ακτινοβολία προσπίπτει στο δείγμα προκαλώντας φθορισμό, έτσι που κάθε στοιχείο εκπέμπει τη δική του χαρακτηριστική ακτινοβολία. Ένα μέρος της ακτινοβολίας διέρχεται από τον ευθυγραμμιστή έτσι ώστε να δημιουργείται μια παράλληλη δέσμη ακτίνων X και κατόπιν προσπίπτει στον αναλυτή κρύσταλλο όπου και περιθλάται. Η περιθλώμενη ακτινοβολία διέρχεται μέσω ενός ευθυγραμμιστή και καταγράφεται από τον ανιχνευτή.

Τα πλεονεκτήματα της φασματοσκοπίας ακτίνων X που σε μερικές περιπτώσεις την καθιστούν μοναδική είναι (Whiston C. 1987):

1. Δυνατότητα ανάλυσης όλων των στοιχείων του περιοδικού πίνακα με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του νατρίου.
2. Δυνατότητα ανάλυσης υλικών σε υγρή και στερεή κατάσταση.
3. Ικανότητα ανίχνευσης στοιχείων που βρίσκονται σε συγκέντρωση 1ppm στο συνολικό δείγμα.
4. Μη καταστροφικότητα της μεθόδου σε συνδυασμό με μεγάλη ταχύτητα ανάλυσης.

Για να αναλυθεί ένα δείγμα με το σύστημα SRS 303 χρειαζόταν να ακολουθηθεί συγκεκριμένη διαδικασία παρασκευής. Η διαδικασία περιλάμβανε τα εξής στάδια:

- Θραύση του αρχικού υλικού και λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος.
- Λειοτριβήση του αντιπροσωπευτικού δείγματος σε κοκκομετρία μικρότερη των 60μm σε ειδικό λειοτριβέα με ιγδία αχάτη.
- Προσδιορισμό της απώλειας πύρωσης του υλικού στους 1050°C.
- Ζύγιση 5gr λειοτριβημένου δείγματος από αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την απώλεια πύρωσης και ανάμειξή του με 0.5gr Wax-C.
- Κατασκευή ανθεκτικού δισκίου διαμέτρου 30mm με επικάλυψη βορικού οξέος, με τη βοήθεια ειδικής πρέσας παρασκευής δοκιμίων.



Εικ. 4.4: Σύστημα φασματοσκοπίας ακτίνων X φθορισμού τύπου SRS 303 SIEMENS του εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας.

4.5 Ξήρανση

Ολόκληρη η ποσότητα των δειγμάτων (~15Kgr) τοποθετήθηκε σε μεταλλικά ταψιά και αφέθηκε σε ξηραντήριο για 24 ώρες στους 40°C. Κατά τη διαδικασία εξατμίζεται ένα μεγάλο μέρος του ελεύθερου νερού που υπάρχει στα αργιλικά δείγματα, εξαιτίας της φυσικής τους υγρασίας. Η διαδικασία αυτή κρίθηκε απαραίτητη για να ακολουθήσει η θραύση που απαιτεί υλικό απαλλαγμένο από τη φυσική του υγρασία για καλύτερη θραυστότητα και λειτουργία του θραυστήρα, χωρίς να επικολλάται το υλικό στους σιαγόνες.

4.6 Θραύση

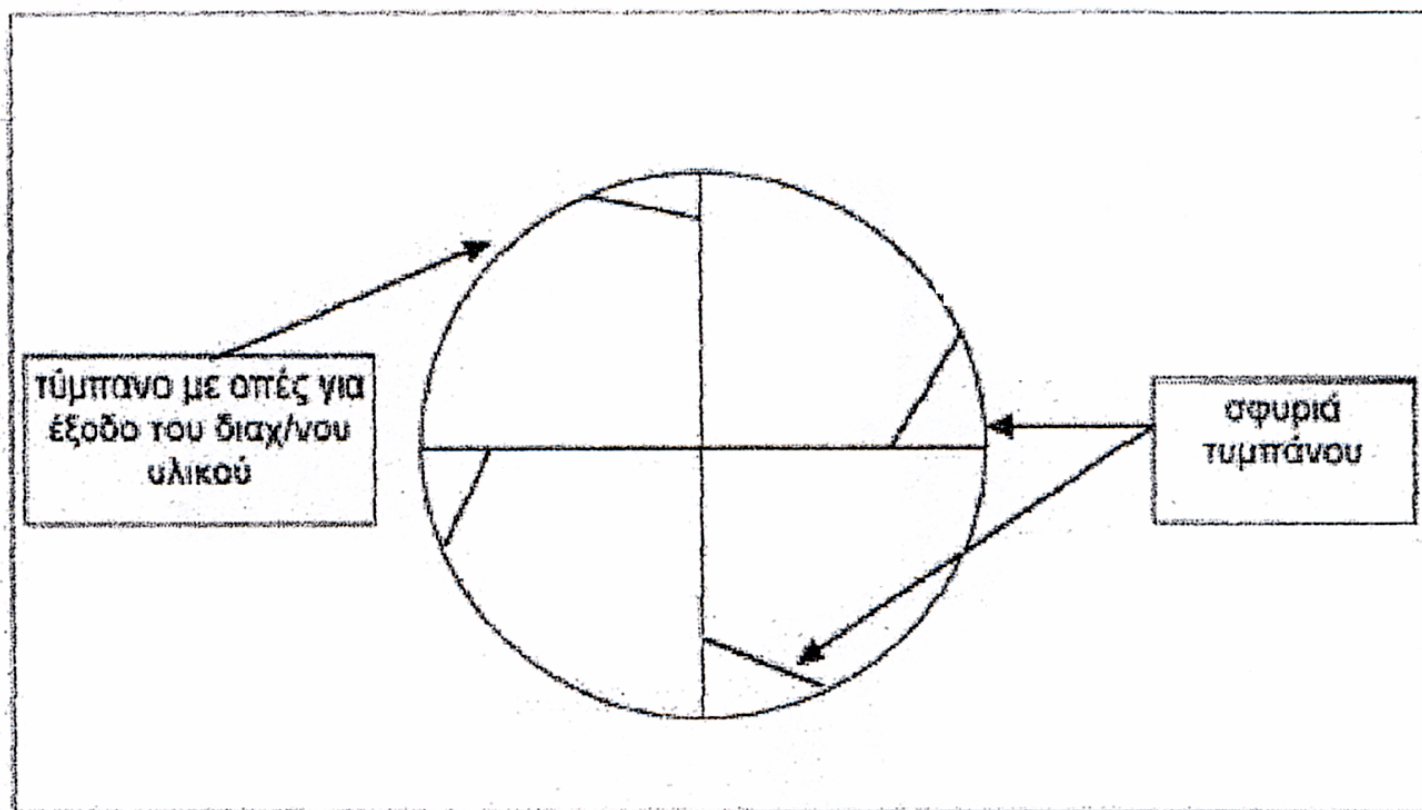
Η θραύση των ξηραμένων αργιλικών δειγμάτων έγινε σε εργαστηριακό θραυστήρα σιαγόνων (jaw crusher) της εταιρίας FITSH model 1 του εργαστηρίου Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ο θραυστήρας έχει δυνατότητα ρύθμισης της κοκκομετρίας εξόδου. Προτιμήθηκε αρχικά η θέση 4 και μετά η θέση 1 στις επιλογές του θραυστήρα. Η αρχή λειτουργίας του θραυστήρα είναι αυτή των σιαγόνων απλής ενέργειας και βασίζεται στη θραύση των υλικών της τροφοδοσίας, εξαιτίας δυνάμεων κατάτμησης και τριβής, που εμφανίζονται μεταξύ των σιαγόνων που ανοιγοκλείνουν (Φραγκίσκος 1977).

4.7 Αποδέσμευση

Μετά τη θραύση ακολούθησε η αποδέσμευση των κόκκων των αργιλικών δειγμάτων, έτσι ώστε η αργιλόμαζα να αποκτή τις καλύτερες δυνατές πλαστικές ιδιότητες με την ανάμιξη της με νερό. Για την αποδέσμευση χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός σφυρόμηλος της εταιρίας RETSH, του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας.

Το σύστημα αποτελείται από σφυριά τα οποία εκτελούν μια περιστροφική κίνηση μέσα σε ένα τύμπανο με διαστάσεις τέτοιες που να επιτρέπουν την αποδέσμευση των συσσωματωμάτων και τον διαχωρισμό μεταξύ των κόκκων του υλικού (εικ4.5). Η τροφοδοσία πρέπει να γίνεται με προσοχή και με αργούς ρυθμούς έτσι ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση υλικό να επικολληθεί στα τοιχώματα του τυμπάνου και να εμποδίσει την περιστροφή των σφυριών., θα πρέπει λοιπόν να ελεγχθεί η υγρασία του υλικού πριν περάσει από το σφυρόμυλο και αν υπάρχει ξηραντήρας το υλικό να ξαναπεράσει από αυτόν.



Εικ.4.5: Εσωτερικό του τυμπάνου του εργαστηριακού σφυρόμηλου Retsh.

4.8 Παραγωγή της πλαστικής μάζας

Από τα 15Kgr του κάθε αποδεσμευμένου αργλικού υλικού, τα 10Kgr ανακατεύτηκαν με περίσσεια νερού για να σχηματιστεί ένας ρευστός πολφός. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί κουβάδες που γέμισαν ως ένα σημείο με νερό και στη συνέχεια έγινε σταδιακά η τροφοδοσία με το υλικό της αργίλου. Κατά τη διάρκεια της τροφοδοσίας γινόταν συνεχής ανάδευση με ξύλινες ράβδους ώστε να διαλύονται τα συσσωματώματα και να δημιουργείται ρευστός πολφός. Παράλληλα η ανάδευση συνεχιζόταν με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ζυμωτηρίου του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας, μέχρι να επιτευχθεί πλήρης ομογενοποίηση του πολφού. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική γιατί εξασφαλίζει τη μέγιστη ομογενοποίηση έτσι ώστε η πλαστική μάζα που θα σχηματιστεί να έχει όσο το δυνατόν όμοια χαρακτηριστικά σε όλη την έκταση της και να είναι απαλλαγμένη από συσσωματώματα.

4.8.1 Κεραμική πλαστική μάζα

Ο πολφός που σχηματίστηκε με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί, αδειάστηκε σε μεταλλικά ταψιά και τοποθετήθηκε στο ξηραντήριο. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η εξάτμιση ενός μέρους του νερού του πολφού, έως ότου μετατραπεί σε μάζα με πλαστικές ιδιότητες.

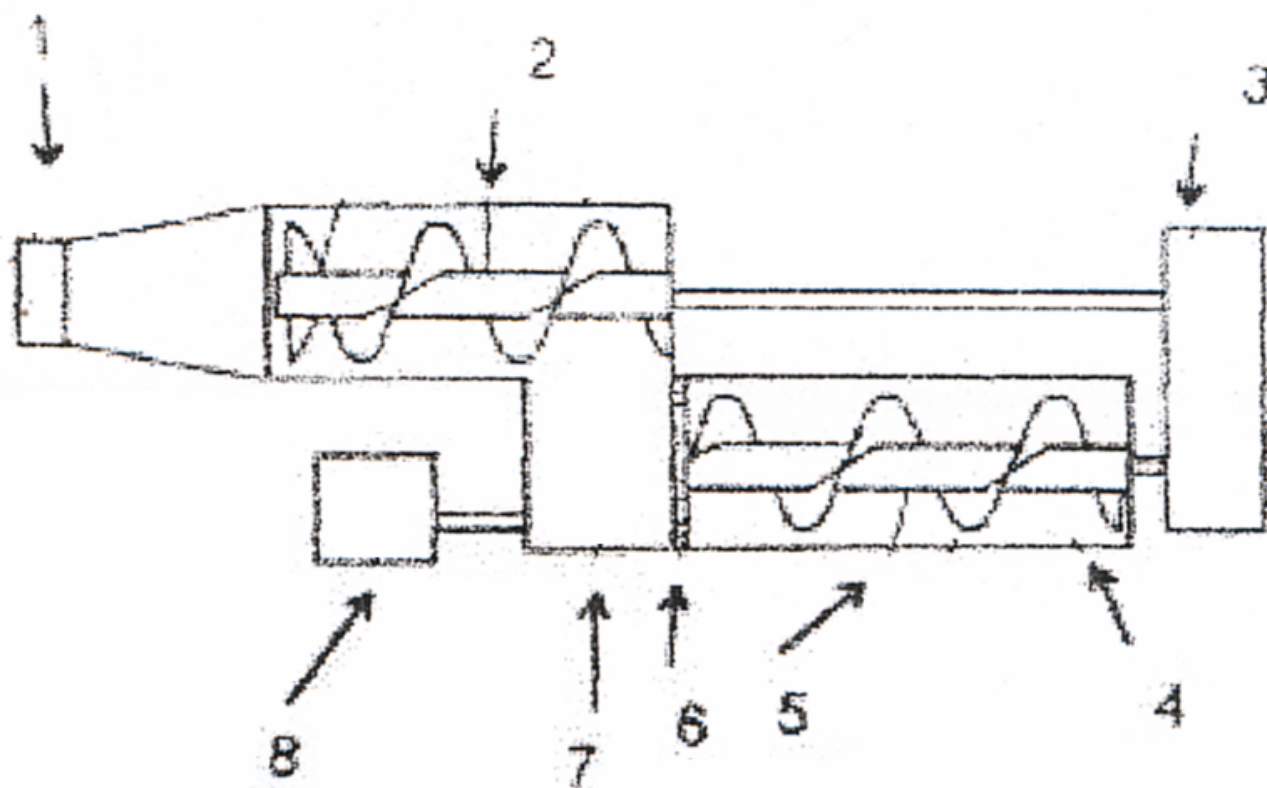
Η ξήρανση έγινε στους 105°C και σταμάτησε όταν εμπειρικά διαπιστώθηκε ότι αποκτήθηκαν οι επιθυμητές πλαστικές ιδιότητες.

4.9 Μορφοποίηση δοκιμίων

Από την πλαστική μάζα κατασκευάστηκαν μια σειρά δοκιμίων για τη διερεύνηση μιας σειράς ιδιοτήτων σε αυτά.

Η μορφοποίηση έγινε με εξώθηση με κοχλία. Η πλαστική μάζα εξωθήθηκε μέσα από τον extruder με τη βοήθεια περιστρεφόμενου κοχλία. Το εξωθούμενο υλικό περνώντας από ειδική μήτρα απέκτησε το επιθυμητό σχήμα.

Στην περίπτωση της εξώθησης με κοχλία η ασκούμενη δύναμη δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη και η επιτυχία της μορφοποίησης εξαρτάται από την ποιότητα της πλαστικής μάζας (Hlavak 1983). Απαιτείται επίσης σωστή ομογενοποίηση του υλικού, καθώς και δυνατότητα απαέρωσης της μάζας πριν από την εξώθηση. Για το λόγο αυτό οι περισσότεροι εξωθητές στη βιομηχανία έχουν δυνατότητες ομογενοποίησης και απαέρωσης της πλαστικής μάζας με δημιουργία κενού (Vacuum pag extruder εικ4.6).



Εικ.4.6: Εξωθητής με δυνατότητα απαέρωσης και δημιουργίας κενού. 1: έξοδος/μορφοποίηση, 2: κοχλίας εξώθησης, 3: είσοδος υλικού, 4: θάλαμος ομογενοποίησης, 5: κοχλίας ομογενοποίησης, 6: διαχωριστική επιφάνεια, 7: θάλαμος απαερίωσης, 8: αντλία κενού.

Ο εξωθητής που χρησιμοποιήθηκε δεν είχε τις παραπάνω δυνατότητες, ωστόσο κρίθηκε επαρκής για το σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας. Εάν υπήρχε η δυνατότητα της απαέρωσης κατά την ομογενοποίηση δεν αποκλείεται ιδιότητες όπως το ανοιχτό πορώδες, η υδατοαπορροφητικότητα, η αντοχή σε κάμψη, η φαινόμενη πυκνότητα και η συρρίκνωση, να παρουσίαζαν κάπως διαφορετικές τιμές. Οι μήτρες μορφοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δυο μεγεθών, για κυλινδρικά δοκίμια:

- Κυλινδρικά δοκίμια μήκους 40mm και διαμέτρου 33mm για χρήση στον προσδιορισμό της βέλτιστης επιδεκτικότητας μορφοποίησης (μέθοδος PFEFFERKORN DIN 51030).
- Κυλινδρικά δοκίμια μήκους 100mm και διαμέτρου 15mm για τη μελέτη των υπολοίπων ιδιοτήτων.

Η κατασκευή των δοκιμίων από το συγκεκριμένο εξωθητή γίνεται αναλυτικά ως εξής:

- Τροφοδότηση του εξωθητή με πλαστική μάζα από το στόμιο.
- Συνεχής προώθηση της πλαστικής μάζας με περιστροφή του κοχλία που γίνεται με το χέρι.
- Πέρασμα της πλαστικής μάζας από τη μήτρα και σχηματισμός ‘μακαρονιού’ στην έξοδο.
- Κόψιμο του μακαρονιού στο επιθυμητό μήκος με τη βοήθεια μεταλλικής λάμας.

Μετά τα δοκίμια είναι έτοιμα προς ξήρανση. Η μέτρηση του μήκους τους κατά το κόψιμο του μακαρονιού έγινε με τη βοήθεια παχυμέτρου ακριβείας 0.05mm.

4.9.1 Βέλτιστη επιδεκτικότητα μορφοποίησης

Για να υπολογίσουμε την ιδανική αναλογία νερού-αργίλου για το σχηματισμό πλαστικής μάζας με τη βέλτιστη επιδεκτικότητα μορφοποίησης (εργασιμότητα) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PFEFFERKORN κατά DIN 51030. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στο γεγονός ότι μια πλαστική μάζα παρουσιάζει μια διαφορετική επιδεκτικότητα μορφοποίησης κατά την επιβολή της ίδιας δύναμης και με τον ίδιο τρόπο, ανάλογα με την περιεκτικότητα της σε νερό.

Έτσι όταν έχουμε δύο κυλινδρικά δοκίμια της αυτής αργίλου (μετά την οποιαδήποτε κατεργασία της) με διαφορετικές όμως περιεκτικότητες (%) σε νερό, έστω Aw_1 και Aw_2 , και επιβάλλουμε σε αυτές ίση δύναμη και με τον ίδιο τρόπο, θα έχουμε διαφορετικές παραμορφώσεις D_1 και D_2 ($D=h_o/h_i$ όπου h_o :αρχικό μήκος δοκιμίου και h_i :μήκος δοκιμίου μετά την παραμόρφωση). Έτσι εάν σε διάγραμμα τοποθετήσουμε στον άξονα X τις περιεκτικότητες σε νερό και στον άξονα Y την παραμόρφωση τότε από την ένωση των σημείων προκύπτει μια ευθεία.

Αν θεωρήσουμε π.χ. ότι η ιδανική περιεκτικότητα σε νερό αντιστοιχεί στην παραμόρφωση $D=h_o/h_i=2$, αν πάρουμε το σημείο στην ευθεία που αντιστοιχεί σε $D=2$ και προεκτείνουμε στον άξονα των X θα βρούμε τη ζητούμενη περιεκτικότητα σε νερό Wd .

Η αριθμητική τιμή της Wd προκύπτει τόσο γραφικά, όσο και από την εξίσωση:

$$Wd = Aw_1 + \left(\frac{Aw_2 - Aw_1}{D_2 - D_1} \right) * (D_0 - D_1) \quad [4.3]$$

Wd : βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (%)

Aw_1 : πρώτη περιεκτικότητα (%) υγρασίας και D_1 αντίστοιχη παραμόρφωση

Aw_2 :δεύτερη περιεκτικότητα (%) υγρασίας και D_2 αντίστοιχη παραμόρφωση

$D_0=2$: παραμόρφωση στη βέλτιστη περιεκτικότητα

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης επιδεκτικότητας των εξετασθέντων αργίλων παρασκευάσθηκε μία ποσότητα πλαστικής μάζας η οποία χωρίστηκε σε δυο μέρη. Το ένα από αυτά τοποθετήθηκε ανάμεσα σε γύψινες πλάκες για τέσσερις ώρες, έτσι ώστε να απορροφηθεί μέρος της περιεκτικότητας του σε νερό. Με αυτό τον τρόπο από κάθε αργιλικό υλικό δημιουργήθηκαν δύο πλαστικές μάζες με διαφορετικές περιεκτικότητες σε νερό όπως προϋποθέτει η μέθοδος. Για κάθε μια από τις μάζες δημιουργήθηκαν από τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια μήκους 40mm και διαμέτρου 33mm. Στη συνέχεια έγινε χρήση της ειδικής συσκευής που αποτελείται από μια

μεταλλική πλάκα με βάρος 1.192Kgr στηριγμένη σε μια μεταλλική ράβδο ως έμβολο, η οποία μπορεί να ανυψώνεται από το μελετητή ή να αφήνεται να πέσει ελεύθερα πάνω στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Η σύγκρουση της πλάκας με το δοκίμιο προκαλεί παραμόρφωση στο τελευταίο, μειώνοντας το μήκος του ομόκεντρα στον άξονα του και αυξάνοντας τη διάμετρό του. Η ένδειξη της παραμόρφωσης του άξονα λαμβάνεται αυτόματα από ειδική βαθμονόμηση που υπάρχει πάνω στη συσκευή και καταχωρείται. Το πείραμα επαναλαμβάνεται για κάθε δείγμα και προκύπτει μια μέση τιμή παραμόρφωσης και για τις δυο πλαστικές μάζες με περιεκτικότητες σε νερό Aw_1 και Aw_2 αντίστοιχα.

Μετά από την παραπάνω διαδικασία τα παραμορφωμένα δοκίμια λαμβάνονται και ζυγίζονται όπως έχουν. Στη συνέχεια τοποθετούνται στο ξηραντήριο ($105^{\circ}C$) όπου αφήνονται για 24 ώρες μέχρι να εξατμισθεί όλο το νερό. Η διαφορά του βάρους των δοκιμίων πριν και μετά την ξήρανση καθορίζει το ποσοστό του νερού και ο μέσος όρος για τα δοκίμια κάθε μάζας καθορίζει τις τιμές της περιεκτικότητας σε νερό Aw_1 και Aw_2 .

Από τις δύο διαφορετικές περιεκτικότητες σε νερό και από τις αντίστοιχες διαφορετικές παραμορφώσεις προκύπτει το ζητούμενο διάγραμμα και από αυτό για παραμόρφωση $D=2$ η ζητούμενη τιμή της περιεκτικότητας σε νερό Wd .

Θεωρητικά η τιμή Wd είναι η ιδανική περιεκτικότητα σε νερό που πρέπει να έχει μια πλαστική μάζα προκειμένου να χρησιμοποιείται για την κατασκευή δομικών κεραμικών προϊόντων.

4.10 Ξήρανση των δοκιμίων

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από το αργιλικό χώμα μετά από την αποδέσμευση του στο σφυρόμηλο και με προσθήκη νερού.

Έτσι σχηματίστηκε μία πλαστική μάζα για την οποία μελετήθηκαν οι παρακάτω ιδιότητες:

- Αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ μετά από ξήρανση στους $40^{\circ}C$.
- Συστολή εν ξηρώ στους $105^{\circ}C$.

Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν 10 δοκίμια για καθένα από τα εξετασθέντα τρία αργιλικά υλικά με τη βοήθεια του εξωθητή με κοχλία.

Για την ξήρανση όλων των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ξηραντήριο θερμαινόμενου ρεύματος αέρα.

4.10.1 Συρρίκνωση κατά την ξήρανση

Τα δέκα δοκίμια για τον υπολογισμό της συρρίκνωσης κατά την ξήρανση σημαδεύτηκαν με τη βοήθεια του παχύμετρου ακριβείας 0.05mm σε δύο σημεία που απείχαν μεταξύ τους 100mm. Μετά την ξήρανση εξαιτίας της συρρίκνωσης η απόσταση μεταξύ των σημείων μίκρυνε. Μετρώνοντας την απόσταση μετά την ξήρανση και αφαιρώντας την από την αρχική υπολογιστική η ζητούμενη γραμμική συστολή. Αυτό εκφράζεται επι τοις εκατό και δίνεται από την εξίσωση:

$$\Sigma(\%) = \frac{L_0 - L_1}{L_0} * 100 \quad [4.4]$$

Όπου,

L_0 :100

L_1 :απόσταση μετά την ξήρανση στους $105^{\circ}C$

Ο μέσος όρος της συστολής για τα δέκα δοκίμια αποτελεί τη ζητούμενη συστολή εν ξηρώ στους 105°C , του κάθε αργιλικού υλικού. Η συστολή στη θερμοκρασία αυτή οφείλεται καθαρά και μόνο στη συρρίκνωση της πλαστικής μάζας εξαιτίας της απομάκρυνσης των φιλμ νερού μεταξύ των συστατικών του αργιλικού υλικού. Πριν ρυθμιστεί η θερμοκρασία του ξηραντηρίου στους 105°C , τα δοκίμια παρέμειναν για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Κατόπιν η ξήρανση συνεχίστηκε στο ξηραντήριο στους 40°C . Σε αυτό το στάδιο τα δοκίμια αναποδογυρίζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για να αποφευχθεί η κάμψη τους. Αυτό μπορεί να συμβεί γιατί η ξήρανση γίνεται από έξω προς τα μέσα του δοκιμίου. Εάν η ξήρανση γίνει γρήγορα και μονόπλευρα σχηματίζεται μια συρρικνωμένη επιφάνεια η οποία ασκεί τάσεις στη πλαστική εσωτερική μάζα του δοκιμίου, οι οποίες τείνουν να το κάμψουν. Μετά το αρχικό στέγνωμα στους 40°C τα δοκίμια ξηράθηκαν ως το τελικό στάδιο των 105°C . Το τέλος της διαδικασίας της ξήρανσης σηματοδοτήθηκε από το χρόνο μετά από τον οποίο το βάρος των δοκιμίων παραμένει σταθερό.

4.10.2 Αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ

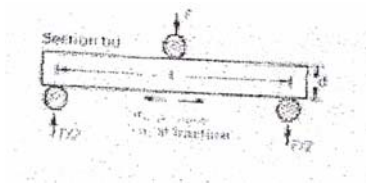
Δέκα άλλα δοκίμια ακολούθησαν παρόμοια διαδικασία ξήρανσης με αυτή που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο, χωρίς όμως, το τελικό στάδιο της ξήρανσης στους 105°C . Στα δοκίμια αυτά προσδιορίστηκε η αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ μετά την ξήρανση τους στους 40°C .

Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί γνωρίζουμε τη συμπεριφορά των κεραμικών προϊόντων πριν την ξήρανση. Τα κεραμικά προϊόντα κατά την βιομηχανική παραγωγή υφίστανται μικρές τάσεις στο στάδιο της μορφοποίησης, της ξήρανσης και της μεταφοράς τους. Τα όρια αντοχής τους σε αυτές τις τάσεις είναι μικρά και γι' αυτό είναι χρήσιμη η γνώση τους. Η αντοχή εν ξηρώ θεωρείται ικανοποιητική για την κατασκευή τούβλων και κεραμιδιών αν ξεπερνά τα 3MPa (Worrall W. 1986).

Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που εφαρμόζεται κατά την μορφοποίηση τόσο μεγαλύτερη η ευθυγράμμιση των κόκκων και μεγαλύτερη η αντοχή εν ξηρώ. Την περίοδο κατά την οποία η μάζα είναι ακόμα εύπλαστη, οι κόκκοι της αργίλου είναι σε μια τυχαία διασύνδεση αλλά κατά την εφαρμογή της δύναμης μορφοποίησης οι κόκκοι τείνουν να ευθυγραμμιστούν με το μεγαλύτερο τους άξονα παράλληλα με τη διεύθυνση της δύναμης (W. Ryan 1978).

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε κάμψη έγινε με τη χρήση συσκευής μέτρησης της αντοχής σε κάμψη της NETSCH (Bending Strength Tester 401/1 (240N)), βάσει των προδιαγραφών DIN 51030.

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στη κάμψη του δοκιμίου, με την επιβολή κάποιας δύναμης, μέχρι να επέλθει θραύση στο σημείο κάμψης. Πρόκειται για την «κάμψη τριών σημείων». (εικ4.9)



Εικ. 4.9: Κάμψη τριών σημείων, όπου F είναι η δύναμη που ασκεί η συσκευή επιβολής φορτίου, d είναι η διάμετρος των δοκιμίων και το l αντιστοιχεί στο μήκος τους.

Το κάθε δοκίμιο στηρίχθηκε σε ειδικούς υποδοχείς, σε δύο σημεία που απείχαν απόσταση $L=100\text{mm}$ μεταξύ τους. Ακριβώς στη μέση, μέσω μίας ακίδας επιβλήθηκε δύναμη στο δοκίμιο με καθορισμένο ρυθμό φόρτισης. Καθώς η δύναμη συνεχώς αυξανόταν στη μέση του δοκιμίου, αυτό άρχισε να κάμπτεται ελαφρά. Η κάμψη συνεχίστηκε έως ότου ξεπεράστηκε το όριο ελαστικότητας και προσεγγίστηκε το όριο θραύσης όπου και επήλθε η απότομη θραύση. Η δύναμη την οποία ασκεί η ακίδα τη στιγμή της θραύσης καταγράφεται απευθείας από τη συσκευή.

Η τάση (σ) την οποία δέχτηκε το δοκίμιο για να σπάσει, δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma = \frac{8 * F * L}{\pi * d^3} \quad [4.5]$$

Όπου

F : δύναμη τη στιγμή της θραύσης (N)

L : απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης (mm)

π : 3,14

d : διάμετρος του δοκιμίου στο σημείο θραύσης (mm)

Από το μέσο όρο των μετρήσεων προσδιορίστηκε η αντοχή σε κάμψη μετά από ξήρανση στους 40°C .

Η μέτρηση της διαμέτρου στη μέση του δοκιμίου έγινε με παχύμετρο ακριβείας $0,05\text{mm}$.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τα εξής:

- Η σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή, καθώς και ο σωστός έλεγχος των μετρήσεων πριν αρχίσει η φόρτιση.
- Η συσκευή έχει δυνατότητα μέτρησης μέχρι 240N σε τέσσερις επιλογές. Μπορεί να ρυθμιστεί να μετρά μέχρι $20,40,80$ και 240N με τέσσερις διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης, οι οποίοι ρυθμίζονται από τις τέσσερις επιλογές. Για το σκοπό αυτό η NETZSCH δίνει τον πίνακα 4.4, για την επιλογή του ρυθμού φόρτισης ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κλίμακα δύναμης.
- Ο ρυθμός φόρτισης επηρεάζει το όριο θραύσης. Συγκεκριμένα όσο πιο μικρός είναι αυτός σε τόσο μικρότερη δύναμη επέρχεται η θραύση. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε όλες οι δοκιμές να γίνουν με τον ίδιο ρυθμό φόρτισης (3N/sec). Για τη μέτρηση της αντοχής εν ξηρώ επιλέχθηκε η κλίμακα των 240N . Όπως προκύπτει από τον πίνακα 4.4 για την κλίμακα αυτή έχουμε ρυθμό φόρτισης ίσο με 3N/sec για την επιλογή 2.
- Εξαιτίας της ενδεχομένως ατελούς ομογενοποίησης της πλαστικής μάζας καθώς και της ύπαρξης ρωγμών σε ορισμένα δοκίμια, είναι δυνατό κάποιο δοκίμιο να σπάσει πολύ πριν από το μέσο όρο αντοχής των υπόλοιπων δοκιμίων. Αποκλίσεις ως 15% από το μέσο όρο ήταν αποδεκτές, ενώ τιμές εκτός του αποδεκτού ορίου δεν ελήφθησαν υπόψη.

Πιν.4.4: Επιλογή του ρυθμού φόρτισης στη συσκευή μέτρησης αντοχής σε κάμψη.

Δύναμη (N)	Επιλογή 1 N/sec	Επιλογή 2 N/Sec	Επιλογή 3 N/Sec	Επιλογή 4 N/Sec
20	0,0833	0,25	0,5	1
40	0,1670	0,5	1	2
80	0,3330	1	2	4
240	1	3	6	12

4.11 Έψηση των δοκιμών

Κατασκευάστηκαν περίπου 45 δοκίμια κυλινδρικού σχήματος από κάθε δείγμα για να προσδιοριστούν η συστολή, η αντοχή σε κάμψη, η φαινόμενη πυκνότητα, η υδατοαπορροφητικότητα και το ανοιχτό πορώδες της ψημένης μάζας των τριών αργιλικών υλικών

Η ξήρανση των δοκιμών έγινε με τον ίδιο τρόπο με αυτόν που περιγράφηκε προηγουμένως.

Η έψηση των τούβλων και των κεραμιδιών γίνεται βιομηχανικά γύρω στους 950°C. Για το σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας κρίθηκε αναγκαία η έψηση σε ένα μεγαλύτερο φάσμα θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα τα δοκίμια ψήθηκαν σε θερμοκρασίες 800,850,900,...,1100°C, σε ηλεκτρικό φούρνο της NABER Industriefenbau, Model D-2804 με ενσωματωμένο προγραμματιστή θερμοκρασίας C8 (εικ4.10).

Κάθε μια από τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν, μελετήθηκε σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα.

Εκτός της τελικής θερμοκρασίας έψησης, σημαντικό ρόλο στις μεταβολές των ιδιοτήτων, διαδραματίζει και ο τρόπος έψησης. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε ένας σταθερός τρόπος έψησης για όλα τα δοκίμια και των τριών αργιλικών υλικών.

Συγκεκριμένα ακολουθήθηκαν τα παρακάτω στάδια στον τρόπο έψησης:

- Από 0-400°C αύξηση της θερμοκρασίας με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα ανόδου της θερμοκρασίας του φούρνου. Ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει ο συγκεκριμένος φούρνος τους 400°C είναι 20 λεπτά. Στη συνέχεια ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ήταν από τους 400°C ως τους 800°C, 200°C/h και από τους 800-1100°C 100°C/h, ενώ η τελική θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερή για μία ώρα και η επαναφορά της θερμοκρασίας του φούρνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έγινε με ρυθμό 70°C/h.

Πριν από την έψηση τα δοκίμια ξηράθηκαν στους 105°C και καταχωρήθηκε η συρρίκνωση τους. Σε κάθε θερμοκρασία ψήθηκαν 5 δοκίμια του κάθε αργιλοχώματος.



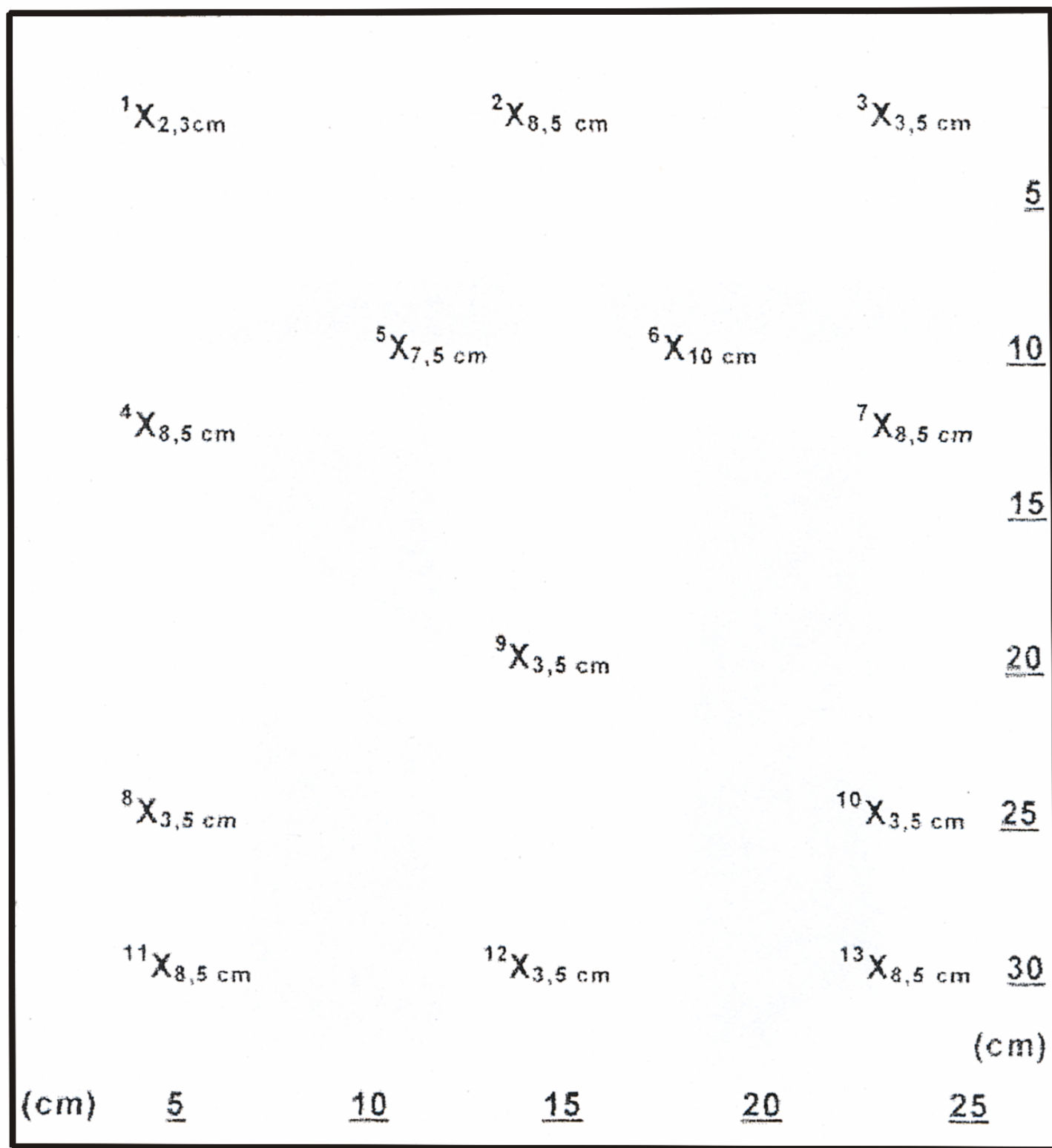
Εικ.4.10: Φούρνος της NABER Industriofenbau, model D-2804 Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας

4.11.1 Βάθμωση της θερμοκρασίας του φούρνου

Ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε έχει 8 αντιστάσεις, 4 στα πλαϊνά τοιχώματα και 4 στη βάση. Οι εσωτερικές διαστάσεις του φούρνου έχουν βάθος 34.5cm, πλάτος 26cm και ύψος 15cm ενώ το θερμοστοιχείο του φούρνου είναι τοποθετημένο στο βάθος αριστερά του φούρνου. Για να προσδιοριστεί η βάθμωση της θερμοκρασίας του φούρνου προσδιορίστηκε η θερμοκρασία ενός αριθμού σημείων του χώρου στο εσωτερικό του φούρνου σε σταθερή θερμοκρασία 950°C και 1100°C του κλιβάνου σε μία παλαιότερη διπλωματική εργασία που έγινε στο εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας (Τερλεμές Ν. 1993).

Για τη βαθμονόμηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν ειδικά κεραμικά κυκλικά πλακίδια της Filkeram Jonson, τα οποία ψήθηκαν στον φούρνο όταν η ψηφιακή ένδειξη έδειχνε την επιλεγμένη σταθερή θερμοκρασία των 950 και 1100°C. Από τη συρρίκνωση που υπέστησαν προσδιορίστηκε με ακρίβεια +5°C ή -5°C η πραγματική θερμοκρασία έψησης τους (εικ4.11).

Αυτό έδωσε τον πίνακα 4.5 από όπου παρατηρήθηκε ότι η ζώνη με τη μικρότερη βάθμωση της θερμοκρασίας στο φούρνο είναι αυτή που βρίσκεται στο βάθος του φούρνου. Αυτή η ζώνη επιλέχθηκε για την έψηση των δοκιμίων.



Εικ.4.11: Κάτοψη του εσωτερικού του εργαστηριακού φούρνου της Naber και σημείωση των κέντρων των κυλινδρικών κεραμικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη θερμική βαθμονόμηση. (Ν. Τερλεμές 1993)

Πιν.4.5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης του εργαστηριακού φούρνου (Α/Α:σημεία του εσωτερικού του κλιβάνου) (Ν. Τερλεμές 1993).

A/A	Ψηφιακή ένδειξη 950° C σε (oC)	Ψηφιακή ένδειξη 1100° C σε (oC)
1	950	1095
2	950	1090
3	950	1095
4	950	1075
5	950	1075
6	950	1075
7	950	1080

4.12 Ιδιότητες των ψημένων δοκιμίων

Όπως προαναφέρθηκε οι ιδιότητες που μελετήθηκαν στα ψημένα δοκίμια των αργιλικών υλικών είναι:

- Χρώμα.
- Γραμμική συρρίκνωση σε σχέση με το μήκος πριν και μετά την ξήρανση.
- Αντοχή σε κάμψη.
- Φαινόμενη πυκνότητα.
- Υδατοαπορροφητικότητα
- Ανοιχτό πορώδες.

4.12.1 Χρώμα

Το χρώμα των ψημένων κεραμικών δοκιμίων αποτελεί συνάρτηση της χημικής σύστασης των αργιλικών δειγμάτων. Τα οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου, τα ανθρακικά ορυκτά και τα οξείδια του τιτανίου καθορίζουν, ανάλογα με την ατμόσφαιρα του φούρνου, το χρώμα του ψημένου προϊόντος (Kromer 1981). Σε μια οξειδωτική ατμόσφαιρα φούρνου, το χρώμα του κεραμικού προϊόντος που περιέχει οξείδια του σιδήρου, γίνεται προοδευτικά κόκκινο, πράγμα που οφείλεται κυρίως στο σχηματισμό αιματίτη (Fe_2O_3), ενώ σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, περίπου 1100°C το χρώμα σκουραίνει πάλι λόγω διάσπασης (dissociation) του αιματίτη. Αν η ατμόσφαιρα του φούρνου είναι αναγωγική ή ουδέτερη, τότε τα οξείδια του σιδήρου είναι δυνατό να αναχθούν σε μαγνητίτη (Fe_3O_4) ή FeO που είναι και τα δύο μαύρα στο χρώμα και έτσι το τελικό προϊόν να έχει γκριζο χρώμα προς το μαύρο, αφού εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τις συνθήκες της αναγωγικής ατμόσφαιρας. Οι άργιλοι περιέχουν ασβεστίτη και οξείδια του σιδήρου, τα οποία αν ψηθούν σε αναγωγική ατμόσφαιρα δίνουν κίτρινους ή πορτοκαλί σχηματισμούς, που οφείλονται στην αντίδραση του οξειδίου του ασβεστίου με τα οξείδια του σιδήρου ενώ η ένταση αυτών των χρωματισμών εξαρτάται από τη θερμοκρασία ψησίματος. Τα πιο συχνά σουλφίδια που συναντά κανείς στις αργίλους είναι ο σιδηροπυρίτης (FeS_2). Σε οξειδωτικό περιβάλλον ο σιδηροπυρίτης διασπάται από τους 450°C σε Fe_2O_3 και SO_2 ή SO_3^{-2} , ενώ σε περιβάλλον με λίγο οξυγόνο μπορεί να έχουμε FeSO_4 (Περράκη 1987).

4.12.2 Συρρίκνωση

Τα δοκίμια πριν ξηραθούν σημαδεύτηκαν με το παχύμετρο. Αφού ξηράθηκαν στους 105°C μετρήθηκε το μήκος τους μετά την ξήρανση και στη συνέχεια ψήθηκαν στις θερμοκρασίες που προαναφέρθηκαν και ξαναμετρήθηκε το μήκος τους. Η διαφορά μεταξύ των διαστάσεων πριν και μετά την έψηση καθόρισε το ποσοστό της γραμμικής μεταβολής της απόστασης (συρρίκνωσης) εξαιτίας της έψησης, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Sigma(\%) = \frac{L_1 - L_2}{L_2} * 100 \quad [4.6]$$

Όπου:

L_1 : απόσταση μετά την ξήρανση (mm)

L_2 : απόσταση μετά την έψηση (mm)

Από το μέσο όρο της συρρίκνωσης των δοκιμίων προέκυψε η μέση τιμή για τη συρρίκνωση του κάθε αργιλικού υλικού σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και από τις μέσες τιμές στις διάφορες θερμοκρασίες προέκυψαν τα αντίστοιχα διαγράμματα.

4.12.3 Αντοχή σε κάμψη

Με την ίδια συσκευή και τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στην παράγραφο για την αντοχή των δοκιμίων εν ξηρώ, μετρήθηκε και η αντοχή σε κάμψη των ψημένων δοκιμίων. Η κλίμακα τοποθετήθηκε στα 240N στη συσκευή για τη μέτρηση της αντοχής σε κάμψη (εικ4.8) γιατί τα ψημένα δοκίμια έχουν αντοχές σε κάμψη που προσεγγίζουν αυτή την τιμή. Σε αυτή την κλίμακα για να έχουμε τον σταθερό ρυθμό φόρτισης 3N/sec, επιλέχθηκε η επιλογή 2 όπως προκύπτει από τον πίνακα 4.4. Τα δοκίμια που οδηγήθηκαν στη θραύση είναι αυτά στα οποία μετρήθηκαν οι συστολές στις διάφορες θερμοκρασίες. Στο κάθε ένα έγινε μέτρηση της διαμέτρου του προκειμένου να υπολογιστεί η αντοχή σε κάμψη από την εξίσωση [4.5].

Από το μέσο όρο των αντοχών σε κάμψη των πέντε δοκιμίων της κάθε θερμοκρασίας προέκυψε η αντοχή σε κάμψη που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, για κάθε αργιλικό υλικό.

Από τους παραπάνω μέσους όρους σχεδιάστηκε διάγραμμα αντοχής σε κάμψη σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης.

4.12.4 Φαινόμενη πυκνότητα

Για τον υπολογισμό της φαινόμενης πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της υδροστατικής ζυγού.

Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας OHAUS MODEL 183, με δυνατότητες ζύγισης και έξω από το νερό με ακρίβεια 0,01gr. Η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 - m_3} * \rho_w \quad [4.7]$$

Όπου:

m_1 : η μάζα του δοκιμίου ζυγισμένο στον αέρα (gr)

m_2 : η μάζα του δοκιμίου με τους πόρους γεμάτους νερό, ζυγισμένο στον αέρα (gr)

m_3 : η μάζα του δοκιμίου με τους πόρους γεμάτους νερό, ζυγισμένο στο νερό (gr)

ρ_w : η πυκνότητα του αποσταγμένου νερού στη θερμοκρασία εκτέλεσης του πειράματος (gr/cm^3)

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν μετά από θραύση στη συσκευή μέτρησης της αντοχής σε κάμψη. Η φαινόμενη πυκνότητα μετρήθηκε σε οκτώ σπασμένα δοκίμια για κάθε θερμοκρασία ψήσιματος.

Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός της ψημένης κεραμικής μάζας m_2 έπρεπε να γεμίσουν οι πόροι της με νερό. Έτσι ακολουθήθηκε η διαδικασία:

- Χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη η οποία αποτελείται από μια αντλία κενού και ένα ξηραντήριο. Η αντλία και το δοχείο συνδέονται μέσω ενός εργαστηριακού πλαστικού σωλήνα στη μέση του οποίου υπάρχει μικρό δοχείο γεμάτο υλικό συγκράτησης της υγρασίας (Silica gel), καθώς και ένα ειδικό φίλτρο. Τα παραπάνω χρειάζονται για να αποφευχθεί η είσοδος του νερού στη συσκευή δημιουργίας κενού κατά την αναρρόφηση του αέρα. Στη διάταξη ενσωματώθηκε και μανόμετρο ώστε να ελέγχεται η επίτευξη κενού.
- Τα σπασμένα δοκίμια ζυγίστηκαν στον αέρα και τοποθετήθηκαν μέσα σε γυάλινο δοχείο της διάταξης. Με το κλείσιμο του ξηραντήρα μπήκε σε λειτουργία η συσκευή δημιουργίας κενού. Μόλις επιτεύχθηκε το κενό ανοίξαμε την παροχή του νερού έτσι ώστε να καλυφθούν τα δοκίμια με αυτό. Δεχθήκαμε ότι το νερό εισήλθε σε όλους τους ανοιχτούς πόρους όταν σταμάτησαν να παράγονται φουσαλίδες.
- Τα γεμάτα με νερό δοκίμια ήταν έτοιμα να ζυγιστούν στον αέρα για τον υπολογισμό της μάζας m_2 . Πριν ζυγιστούν σκουπίστηκαν απαλά με πανί για να φύγει το επιφανειακό νερό.

Μετά τον υπολογισμό της μέσης φαινόμενης πυκνότητας για κάθε θερμοκρασία και για κάθε αργιλικό υλικό, σχεδιάστηκαν διαγράμματα που παρουσιάζουν τη φαινόμενη πυκνότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης.

4.12.5 Υδατοαπορροφητικότητα

Ο υπολογισμός της υδατοαπορροφητικότητας (water absorption) βασίζεται στις ζυγίσεις που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο.

Η υδατοαπορροφητικότητα (WA) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$WA(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1 * \rho_w} * 100 \quad [4.8]$$

Όπου:

m_1 : η μάζα του δοκιμίου ζυγισμένη στον αέρα (gr)

m_2 : η μάζα του δοκιμίου με τους πόρους γεμάτους νερό, ζυγισμένο στον αέρα (gr)

ρ_w : η πυκνότητα του αποσταγμένου νερού στη θερμοκρασία εκτέλεσης του πειράματος (gr/cm^3)

Από τις μέσες τιμές της υδατοαπορροφητικότητας σχεδιάστηκαν διαγράμματα συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης.

4.12.6 Ανοιχτό πορώδες

Το ανοιχτό πορώδες υπολογίστηκε με βάση τις μετρήσεις που περιγράφηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους, από την εξίσωση:

$$\text{OP}(\%) = \text{WA} * \rho \quad [4.9]$$

Όπου:

WA: η υδατοαπορροφητικότητα του δοκιμίου (%)

ρ : η φαινόμενη πυκνότητα του δοκιμίου (gr/cm^3)

Από τις μέσες τιμές του ανοιχτού πορώδους σχεδιάστηκαν διαγράμματα που δείχνουν τη συνάρτηση του προς τη θερμοκρασία έψησης των δοκιμίων.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά σκιαγραφούνται τα χαρακτηριστικά των αργίλων που εξετάστηκαν και γίνεται αξιολόγηση των τελευταίων ως προς την καταλληλότητα τους για την παραγωγή δομικών κεραμικών ειδών, στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό μετά από μελέτη σε εργαστηριακή μόνο κλίμακα.

5.1 Τιμές της πυκνότητας των αργίλων 19Α, 195 και 197

Οι μέσες τιμές πυκνότητας για τα τρία αργίλικα υλικά όπως αυτά προέκυψαν με τη μέθοδο του πυκνομέτρου ή ληκύθου που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1 είναι:

Πιν5.1: Πυκνότητες των αργίλικών δειγμάτων 19Α, 195 και 197

Κωδικός δείγματος	Πυκνότητα(gr/cm^3)
19Α	2,57
195	2,54
197	2,39

Ο παραπάνω πίνακας προέκυψε από τις αναλυτικότερες μετρήσεις του πίνακα του παραρτήματος.

5.2 Κοκκομετρική κατανομή

Μετά το τέλος της κοκκομετρικής ανάλυσης και τους υπολογισμούς για τα ποσοστά των κοκκομετρικών κλασμάτων προέκυψε ο πίνακας 5.2, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις κοκκομετρικές αναλύσεις των αργίλικών δειγμάτων.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.2, το μεγαλύτερο ποσοστό κόκκων $<2\mu\text{m}$ παρουσιάζεται στο δείγμα 195 το οποίο θα έχει και τα περισσότερα αργίλικα ορυκτά. Επίσης παρατηρούμε ότι το δείγμα 197 παρουσιάζει υψηλό ποσοστό στα λεπτόκοκκα κλάσματα. Το 19Α έχει ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό στο κλάσμα $>63\mu\text{m}$, ενώ το 195 στο $>20\mu\text{m}$.

Με βάση τον πίνακα 5.2 υπολογίζεται το αθροιστικώς διερχόμενο κλάσμα όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3. Τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3 απεικονίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 5.1.

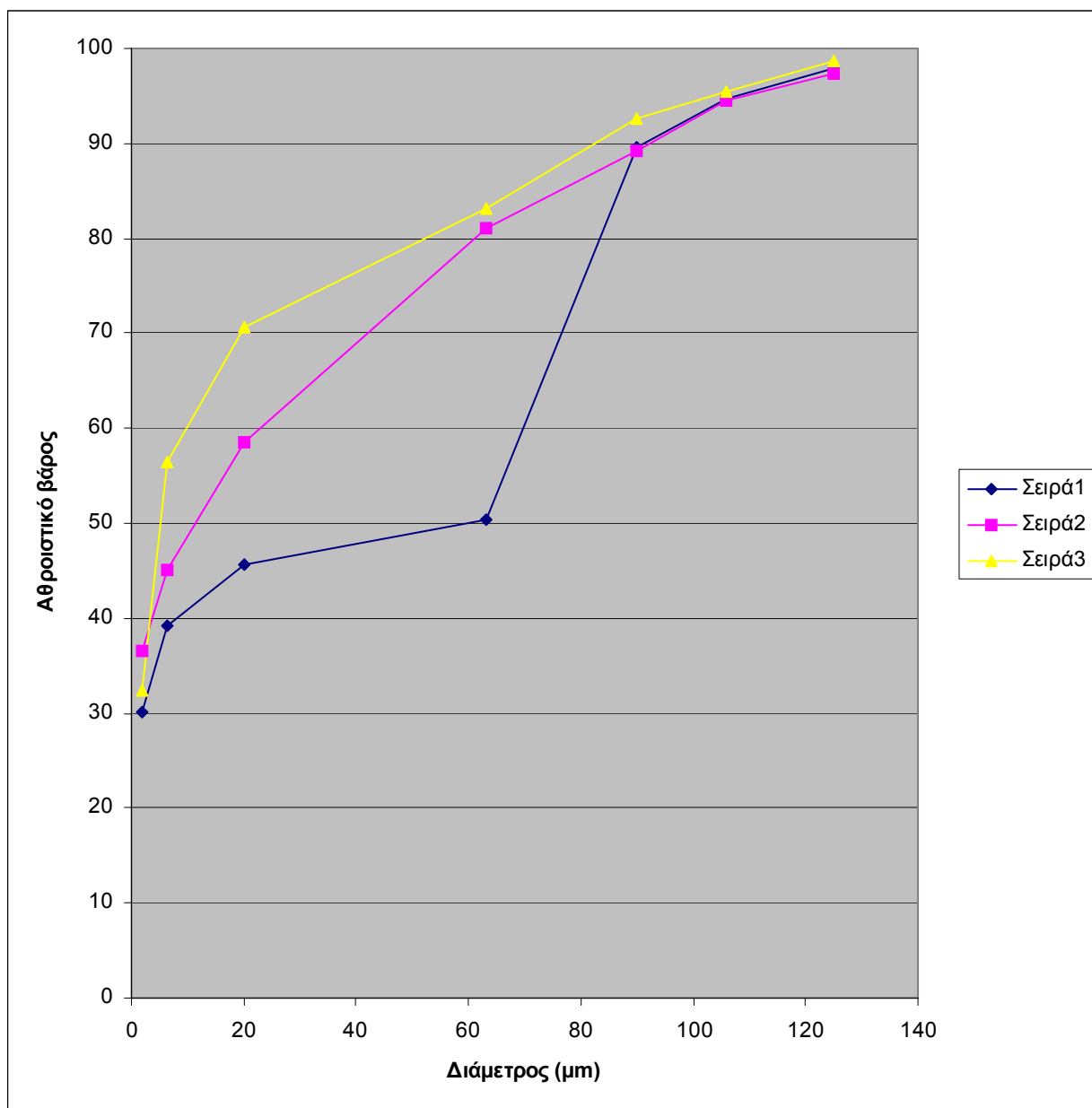
Πιν5.2: Κοκκομετρική κατανομή στα αργιλικά δείγματα 19Α, 195 και 197 (% βάρος).

Κοκκομετρικό κλάσμα (μm)	19Α	195	197
<2	29,72	34,21	31,42
2-6,30	9,11	8,53	24,12
6,3-20	6,42	13,57	14,26
20-63	4,76	22,37	12,34
63-90	39,11	8,23	9,55
90-106	5,2	5,3	2,79
106-125	3,15	2,8	3,33
125	2,11	2,7	1,28
Απώλειες(%)	0,42	2,29	0,91

Πιν5.3: Αθροιστικώς διερχόμενο κοκκομετρικό κλάσμα.

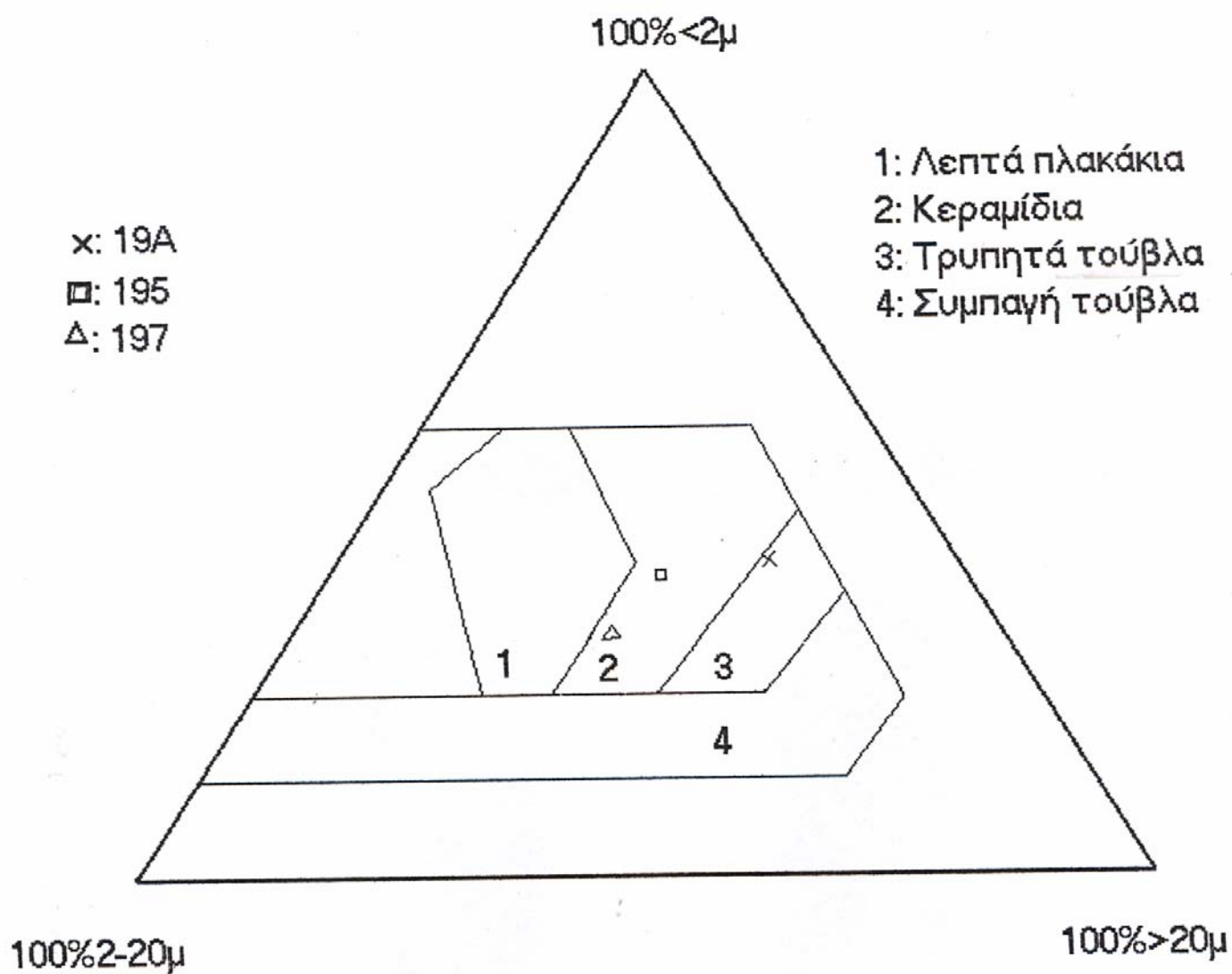
Κοκκομετρικό κλάσμα (μm)	19Α	195	197
125	97,89	97,3	98,72
106	94,74	94,5	95,39
90	89,54	89,2	92,6
63	50,43	80,97	83,05
20	45,67	58,6	70,71
6,3	39,25	45,03	56,45
2	30,14	36,5	32,33

Τέλος, τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής κατανομής τοποθετήθηκαν στο τρίγωνο **WINKLER**, ανάλογα με το ποσοστό των κόκκων στα κοκκομετρικά κλάσματα <2μm, 2-20μm, >20μm (Κωστάκης 1991) (εικ5.2).



Εικ. 5.1: Αθροιστικός διερχόμενο κοκκομετρικό κλάσμα των αργιλομαζών 19Α, 195 και 197

Ρόμβος:19Α
Τετράγωνο:195
Τρίγωνο:197



Εικ.5.2: Καταλληλότητα των αργίλων για διάφορα κεραμικά σύμφωνα με τη κοκκομετρία τους (κατά Winkler).

5.3 Ορυκτολογική σύσταση

Η ορυκτολογική σύσταση των αργιλοχωμάτων προσδιορίστηκε όπως αναφέρθηκε, με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ. Προκειμένου να επιτευχθεί ο ασφαλής προσδιορισμός των ορυκτολογικών συστατικών του αργιλοχώματος 19Α, πραγματοποιήθηκαν ακτινογραφήματα ενός συνολικού δείγματος, καθώς και των κλασμάτων +63 μ m και -63 μ m. Τα σχετικά ακτινογραφήματα παρουσιάζονται στο παράρτημα και η ορυκτολογική σύσταση των αργιλοχωμάτων στον πιν.5.4

Πιν5.4:Ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων 19Α,195, 197.

Δείγμα	Ορυκτά
19Α	Χαλαζίας, ασβεστίτης, καολινίτης, μοντμοριλονίτης, χλωρίτης, ιλλίτης, ανορθίτης (ίχνη), δολομίτης (ίχνη).
195	Χαλαζίας, ιλλίτης, αστριοι, χλωρίτης(?).
197	Άμορφα, καολινίτης.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 5.4, το αργιλόχωμα 19Α αποτελείται από χαλαζία, ασβεστίτη, μοντμοριλονίτη, χλωρίτη, ιλλίτη, ανορθίτη και δολομίτη, με κυρίαρχα συστατικά τον χαλαζία και τον ασβεστίτη. Το 195 αποτελείται από χαλαζία, ιλλίτη, άστριους, και χλωρίτη(?). Το 197 αποτελείται από άμορφα και καολινίτη.

5.4 Χημική σύσταση

Από την χημική ανάλυση των δειγμάτων προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 5.5.

Πιν5.5: Χημική σύσταση των αργίλων

Χημικός τύπος	19A	195	197
SiO₂	38,94	42,29	46,72
Al₂O₃	10,83	13,14	12,79
Fe₂O₃	6,62	6,80	6,80
MnO	0,38	0,30	0,29
MgO	3,07	2,79	2,61
CaO	20,21	16,28	14,20
Na₂O	0,3	0,35	0,34
K₂O	1,89	2,02	1,91
TiO₂	0,53	0,67	0,75
P₂O₅	0,07	0,08	0,08
Απώλεια πύρωσης	16,26	10,16	13,49
Σύνολο	99,1	99,86	99,98

Όπως προκύπτει από τον προηγούμενο πίνακα τα δείγματα 195 και 197 είναι πλούσια σε SiO₂, ενώ το 19A υστερεί σε αυτό. Επίσης παρατηρούμε ότι το 19A έχει υψηλό ποσοστό σε CaO. Η σημασία της παρουσίας οξειδίων των αργίλων για την παραγωγική διαδικασία και τις ιδιότητες των κεραμικών περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια

SiO₂ : Η παρουσία του συνδέεται άμεσα με την παρουσία του χαλαζία και των αργιλικών ορυκτών. Το ποσοστό του, σχετίζεται με τον βαθμό υαλοποίησης, κατά την έψηση του κεραμικού προϊόντος (Μαρκόπουλος 1992).

Al₂O₃ : Η παρουσία του οφείλεται στα αργιλικά ορυκτά και στα πλαγιόκλαστα και έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη πυριμαχικότητα του ψημένου προϊόντος.

Fe₂O₃ : Το ποσοστό του είναι υψηλό και επηρεάζει το χρώμα των ψημένων δοκιμίων. Ο σίδηρος είναι επιθυμητός στην κεραμική βιομηχανία σε χαμηλά ποσοστά γιατί κατεβάζει την περιοχή τήξεως και συνεπώς τη θερμοκρασία ψήσιματος του κεραμικού προϊόντος. Αντίθετα είναι ανεπιθύμητος σε μεγάλη περιεκτικότητα γιατί δημιουργεί φαινόμενα διόγκωσης (Bloating) από κοινού με τον ιλλίτη (Riley 1951). Η παρουσία του συνδέεται με την ύπαρξη του κλινόχλωρου και ορυκτών του σιδήρου όπως ο αιματίτης, ο οποίος ανιχνεύεται στα μικρά κοκκομετρικά κλάσματα.

K₂O : Η παρουσία του συνδέεται με τον μοσχοβίτη, βοηθάει στην υαλοποίηση του SiO₂ και του Al₂O₃ κατά την έψηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

MgO : Η παρουσία του συνδέεται κυρίως με τον δολομίτη και το κλινόχλωρο. Η ύπαρξη του συνεπάγεται αυξημένη πυριμαχικότητα.

TiO₂ : Συμμετέχει σε μικρά ποσοστά και επηρεάζει το χρώμα του ψημένου κεραμικού. Παρουσία TiO₂, ακόμα και μικρό ποσοστό Fe₂O₃ μετατρέπεται με θέρμανση σε Fe₃O₄ δίνοντας στο κεραμικό ένα πιο σκούρο χρώμα (Phelps 1973).

Na₂O : Η μικρή παρουσία του συνδέεται με την ύπαρξη των αστρίων. Δρα σαν ευτηκτικό, υποβιβάζοντας την θερμοκρασία έψησης.

P₂O₅ και MnO : Βρέθηκαν σε μικρά ποσοστά και δεν επηρεάζουν σε γενικές γραμμές τη διαδικασία παραγωγής των κεραμικών προϊόντων.

CaO : Η συγκέντρωση του βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα και αποδίδεται στην υψηλή περιεκτικότητα των δειγμάτων σε ασβεστίτη, αλλά και στην παρουσία του δολομίτη. Η παρουσία του στις κεραμικές μάζες ευνοεί κατά την έψηση το σχηματισμό εύτηκτων πυριτικών ενώσεων που υποβοηθούν την πυροσυσσώματωση

(Kingery 1976). Η παρουσία ελεύθερων κόκκων μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή του κεραμικού λόγω της ενυδάτωσης. Τέλος δίνει ένα πορτοκαλί-κίτρινο χρώμα κατά την έψηση των κεραμικών προϊόντων.

Η χημική σύσταση, όπως έχουν δείξει σύγχρονες έρευνες, είναι καθοριστική για το είδος του κεραμικού προϊόντος που προκύπτει (Norton F. 1974, Nakagawa M. 1994). Κάτα το ψήσιμο μεγάλη σημασία έχει η περιεκτικότητα της πρώτης ύλης σε υαλοποιητές (fluxing oxides), δηλαδή σε αλκαλικές γαίες ($\text{CaO}+\text{MgO}$), αλκάλια ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) και οξείδια του σιδήρου ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$) (Kingery et al. 1976). Από τα παραπάνω οξείδια εξαρτάται η θερμοκρασία ψήσιματος, ο βαθμός υαλοποίησης και η μεταβολή των διαστάσεων των ψημένων κεραμικών.

Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορα τριγωνικά διαγράμματα από τα οποία είναι δυνατό, με βάση τη χημική σύσταση του πυλού, να εκτιμηθεί η καταλληλότητα του για την κατασκευή κεραμικών προϊόντων συγκεκριμένου τύπου. Το 1951 ο Riley πρότεινε ένα τριγωνικό σύστημα $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}, \text{MgO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O})$, στο οποίο οριοθετούμε μια περιοχή για διογκωμένους (bloating) αργίλους. Το σύστημα με προσθήκη του TiO_2 στην πλευρά του Al_2O_3 , χρησιμοποιήθηκε από τους Sandrolini et Palmonari (1973) ενώ οι Vincenzini et Fiori (1977) πρότειναν δύο τριγωνικά διαγράμματα $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ και $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$. Επίσης οι Sandrolini et Palmonari (1973) πρότειναν το διάγραμμα F/A/S όπου $\text{F}=\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ και $\text{S}=\text{SiO}_2$, το οποίο παρέχει την δυνατότητα της παρουσίας των περισσότερων συστατικών της πρώτης ύλης.

Σε αυτά τα διαγράμματα λοιπόν, οριοθετούνται κυρίως οι περιοχές L,M,C και G (L:είδη πλινθοποιίας, M:είδη μαγιόλικα, C:είδη κοττοφόρτε και G:έγχρωμα γκρε), οι οποίες αντίστοιχα, δίνουν το εύρος της χημικής σύστασης των αργιλικών πρώτων υλών που είναι κατάλληλες για αυτά τα προϊόντα, παρά το ότι μερικές φορές και μη τυπικές άργιλοι χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες (Sandrolini 1973).

5.5 Βέλτιστη περιεκτικότητα νερού στην πλαστική μάζα

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία της πλαστικής μάζας έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Pfeffekorn (βλέπε παράγραφο 4.9.1). Τα αποτελέσματα αυτών φαίνονται στον πίνακα 5.6, ο οποίος προέκυψε από τους αναλυτικούς πίνακες του παραρτήματος.

Πιν5.6:Βέλτιστη υγρασία από τη δοκιμή Pfefferkorn

Δείγμα	Υγρασία(%)
19A	21,92
195	24,91
197	23,74

5.6 Συρρίκνωση εν ξηρώ

Η συρρίκνωση εν ξηρώ (105°C) μετρήθηκε για δέκα δοκίμια κατασκευασμένα από κάθε άργιλο με την αναλογία νερού που υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Με την εφαρμογή της εξίσωσης 4.4 προέκυψε ο μέσος όρος της συρρίκνωσης των αργιλομαζών που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 5.7

Πιν5.7:Συρρίκνωση (%) κατά την ξήρανση (105°C)

Δείγμα	Συρρίκνωση(%)
19A	10,11
195	9,34
197	9,26

Ο πίνακας 5.7 προέκυψε από τους αναλυτικούς πίνακες του παραρτήματος. Παρατηρούμε ότι και για τις τρεις αργίλους οι τιμές είναι παραπλήσιες και αρκετά υψηλές. Αυτό δεν είναι επιθυμητό καθώς υπάρχει σημαντική διαφορά όγκου στο προϊόν πριν και μετά την ξήρανση. Παράλληλα, κατά τη συρρίκνωση του υλικού αναπτύσσονται τάσεις στο εσωτερικό του. Οι τάσεις αυτές μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις στο ξηραμένο σώμα οι οποίες μπορεί να εξελιχθούν σε διαρρήξεις κατά την έψηση. Αυτό όμως που έχει σημασία είναι ότι ο όγκος μπορεί να είναι υπολογίσιμος με ανεκτές μεταβολές μετά την ξήρανση, καθώς οι διαφοροποιήσεις στις τιμές μεταξύ των δειγμάτων δεν ήταν μεγάλες.

5.7 Αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ

Η αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ προσδιορίστηκε όπως αυτή περιγράφεται στην §4.10.2. Με την εφαρμογή της εξίσωσης [4.5] προέκυψαν οι πίνακες 5.8, 5.9, 5.10, από τους οποίους καταλήγουμε στο μέσο όρο αντοχής σε κάμψη για κάθε αργιλικό υλικό.

Πιν5.8:Μετρήσεις αντοχής σε κάμψη εν ξηρώ του 19Α

Δοκίμιο	F(N)	d(mm)	σ(MPa)
1	76,5	14,2	6,81
2	80	14,15	7,19
3	68	14,25	5,99
4	78	14,2	6,94
5	76,5	14,15	6,88
6	71	14,2	6,32
7	71,5	14,2	6,36
Μέσος όρος			6,64

Πιν5.9:Μετρήσεις αντοχής σε κάμψη εν ξηρώ του 195

Δοκίμιο	F(N)	d(mm)	σ(MPa)
1	85	14,45	7,18
2	88	14,45	7,43
3	87	14,45	7,35
4	87	14,45	7,35
5	80	14,45	6,76
6	85	14,45	7,18
7	80	14,45	6,76
Μέσος όρος			7,14

Πιν5.10:Μετρήσεις αντοχής σε κάμψη εν ξηρώ του 197

Δοκίμιο	F(N)	d(mm)	σ(MPa)
1	110	15	8,30
2	108	15	8,15
3	115	15	8,68
4	112	15	8,45
5	110	15	8,30
6	112	15	8,45
7	108	15	8,15
Μέσος όρος			8,35

Έτσι λοιπόν προκύπτει για την αντοχή σε κάμψη εν ξηρώ των τριών αργίλων 19Α:6,64MPa, 195:7,14MPa, 197:8,35MPa.

Τα παραπάνω αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά.

5.8 Τεχνολογικές ιδιότητες των ψημένων δοκιμίων

Με την εκτέλεση των πειραμάτων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4 προέκυψαν οι αναλυτικοί πίνακες του παραρτήματος: Πιν5.1Γ,...,Πιν5.14Γ, στους οποίους περιέχονται όλες οι μετρήσεις για όλες τις ιδιότητες, όλων των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν από τα αργιλικά υλικά 19Α, 195 και 197 για κάθε θερμοκρασία έψησης.

Από τους αναλυτικούς αυτούς πίνακες προέκυψαν οι πίνακες 5.11, 5.12 και 5.13, όπου καταγράφονται οι μέσες τιμές της κάθε ιδιότητας για κάθε θερμοκρασία έψησης. Οι ιδιότητες αυτές είναι η συρρίκνωση (%) σε σχέση με το μήκος πριν την ξήρανση, η αντοχή σε κάμψη (MPa), η υδατοαπορροφητικότητα (%), η φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm^3) και το ανοιχτό πορώδες (%).

Από τους πίνακες 5.11, 5.12 και 5.13 προκύπτουν διαγράμματα που δείχνουν την εξάρτηση από τη θερμοκρασία έψησης κάθε προσδιορισμένη ιδιότητας των ψημένων δοκιμίων. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται και αξιολογούνται στις παραγράφους που ακολουθούν.

Πιν5.11: Μέσες τιμές των ιδιοτήτων για κάθε θερμοκρασία έψησης του δείγματος 19Α

Θερμοκρασία έψησης (°C)	Συρρίκνωση (%)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm^3)	Υδατο/κότητα (%)	Ανοιχτό πορώδες (%)
800	5,54	20,50	1,26	20,49	25,73
850	6,18	22,72	1,31	20,13	25,16
900	7,62	23,77	1,33	22,42	29,86
950	7,68	25,36	1,46	21,69	29,31
1000	7,24	26,93	1,55	21,65	33,51
1050	7,16	29,26	1,44	20,24	29,25
1100	7,69	άθραυστο	1,78	10,92	19,30

Πιν5.12: Μέσες τιμές των ιδιοτήτων για κάθε θερμοκρασία έψησης του δείγματος 195

Θερμοκρασία έψησης(°C)	Συρρίκνωση (%)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm^3)	Υδατο/κότητα (%)	Ανοιχτό πορώδες (%)
800	7,35	11,98	1,55	18,49	28,65
850	7,68	25,12	1,58	18,87	27,33
900	7,94	34,25	1,61	19,11	30,84
950	8,18	27,68	1,67	20,43	29,18
1000	8,34	23,4	1,72	21,45	36,92
1050	8,52	23,72	1,77	22,73	30,47
1100	8,81	23,15	1,82	12,33	22,42

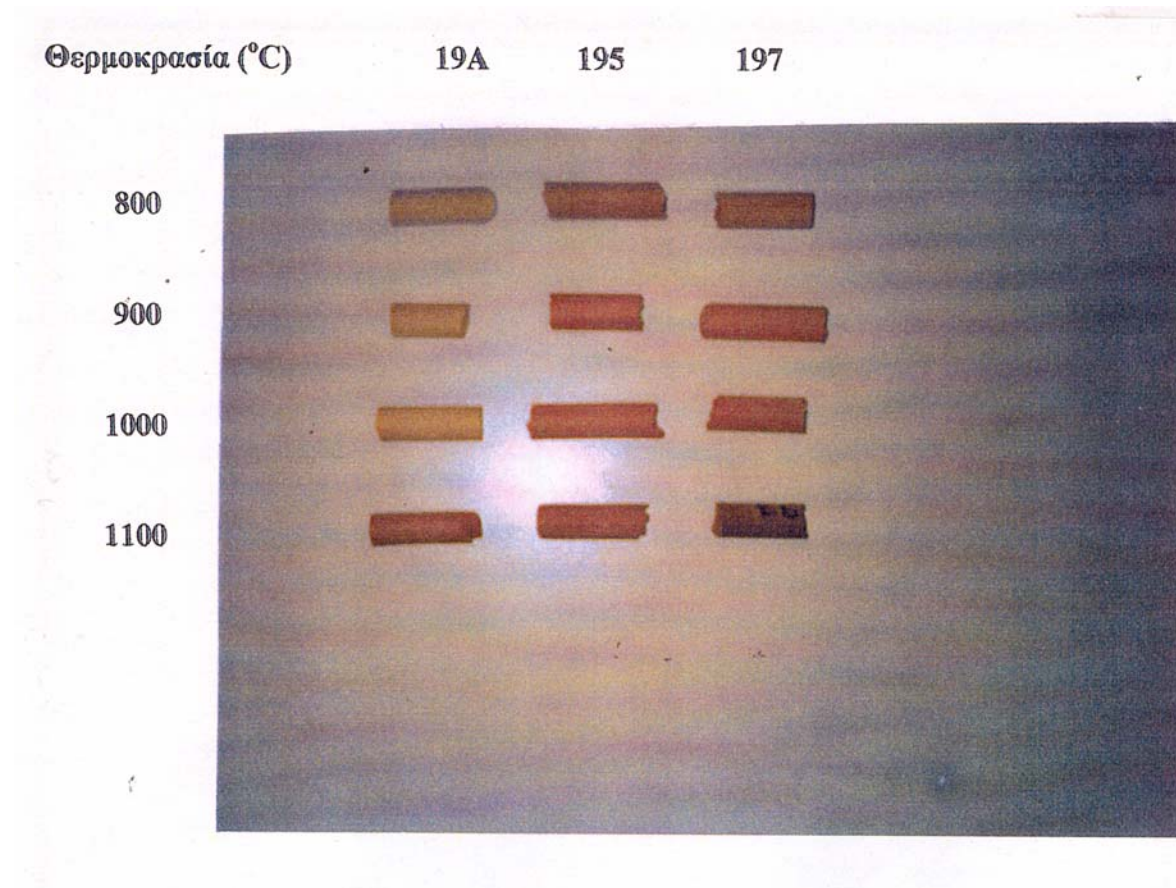
Πιν5.13: Μέσες τιμές των ιδιοτήτων για κάθε θερμοκρασία έψησης του δείγματος 197

Θερμοκρασία έψησης(°C)	Συρρίκνωση (%)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm^3)	Υδατο/κότητα (%)	Ανοιχτό πορώδες (%)
800	7,94	11,75	1,56	22,41	34,96
850	8,13	18,26	1,62	22,96	32,21
900	8,32	19,2	1,67	23,17	38,56

950	8,71	19,94	1,71	24,51	33,27
1000	8,93	20,25	1,76	17,97	31,7
1050	9,27	23,14	1,82	17,26	31,55
1100	9,41	24,95	1,87	17,09	31,42

5.9 Χρώμα των ψημένων δοκιμίων

Η μεταβολή του χρώματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης των δειγμάτων φαίνεται στην εικόνα 5.6.



Εικ5.6: Μεταβολή του χρώματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης των δοκιμίων.

5.10 Συρρίκνωση των ψημένων δοκιμίων

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται η συρρίκνωση των δοκιμίων σε σχέση με το μήκος που είχαν μετά την ξήρανση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης και για τα τρία αργιλικά δείγματα.

Σημαντικές ομοιότητες παρουσιάζει η εξέλιξη της συρρίκνωσης των δοκιμίων και των τριών αργιλοχωμάτων με την άνοδο της θερμοκρασίας. Ιδιαίτερα μεταξύ των 195 και 197. Σε αυτά παρατηρείται ομοιόμορφη αύξηση της συρρίκνωσης τους με την αύξηση της θερμοκρασίας έψησης, με το 197 να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

Στο 19Α σημειώνεται μια απότομη αύξηση της συρρίκνωσης στους 850°C η οποία οφείλεται στη θερμική διάσπαση των ανθρακικών ορυκτών. Το 195 παρουσιάζει σταθερό ρυθμό αύξησης.

5.11 Αντοχή σε κάμψη

Η αντοχή σε κάμψη των ψημένων δοκιμίων των αργιλοχωμάτων 19Α, 195 και 197 απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.8.

Στο αργιλόχωμα 19Α η αντοχή αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 1100°C όπου και είναι άθραυστο.

Στο αργιλόχωμα 195 η αντοχή αυξάνει μέχρι τους 900°C όπου λαμβάνει και τη μέγιστη τιμή της (34,25 MPa) και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τους 1000°C. Από εκεί και πέρα διατηρεί μία σχεδόν σταθερή τιμή γύρω στα 23,5 MPa.

Στο αργιλόχωμα 197 επίσης παρατηρείται αύξηση της αντοχής με την αύξηση της θερμοκρασίας με μέγιστη τιμή τα 24,95 MPa στους 1100°C.

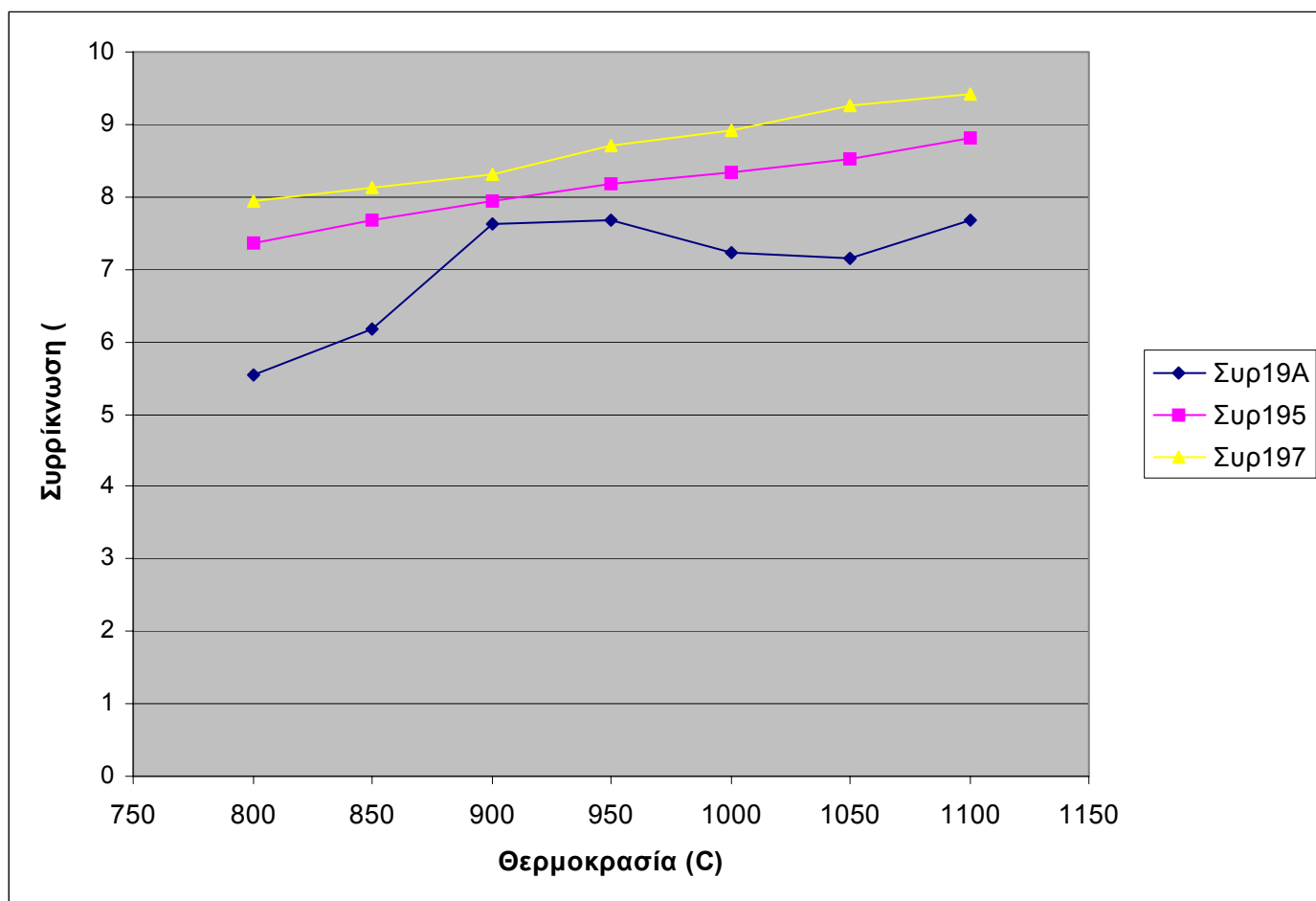
Γενικά η αντοχή σε κάμψη των ψημένων δοκιμίων και των τριών αργιλοχωμάτων είναι ικανοποιητική για όλες τις πιθανές εφαρμογές στην κεραμική βιομηχανία, με μοναδική ίσως ένσταση τις αντοχές στους 800°C του 195 και 197 που είναι σχετικά χαμηλές, 11,98 και 11,75 MPa αντίστοιχα.

5.12 Φαινόμενη πυκνότητα των ψημένων δοκιμίων

Στο διάγραμμα 5.9 φαίνονται οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης των τριών δειγμάτων.

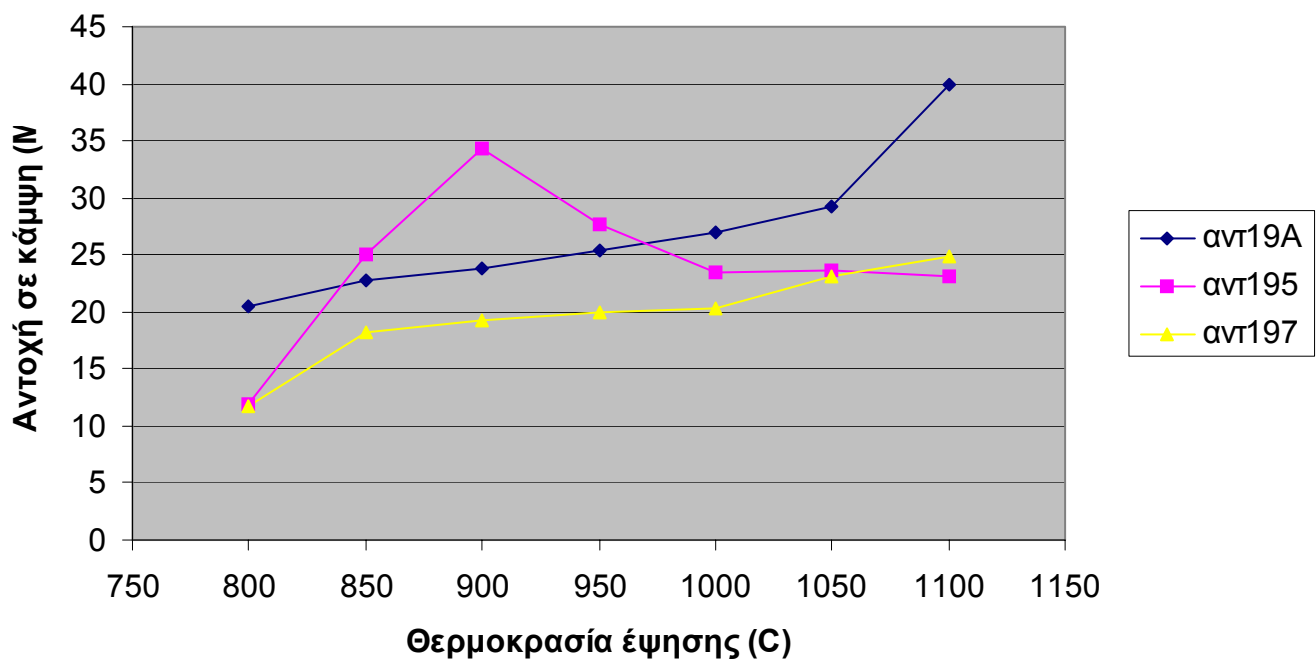
Τα διαγράμματα των 195 και 197 εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά αύξησης της φαινόμενης πυκνότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας, με το 197 να λαμβάνει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές στις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

Το 19Α έχει μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα από τα άλλα δύο, πράγμα που πιθανόν οφείλεται στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε CaCO_3 του οποίου η θερμική διάσπαση απελευθερώνει CO_2 με αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους.

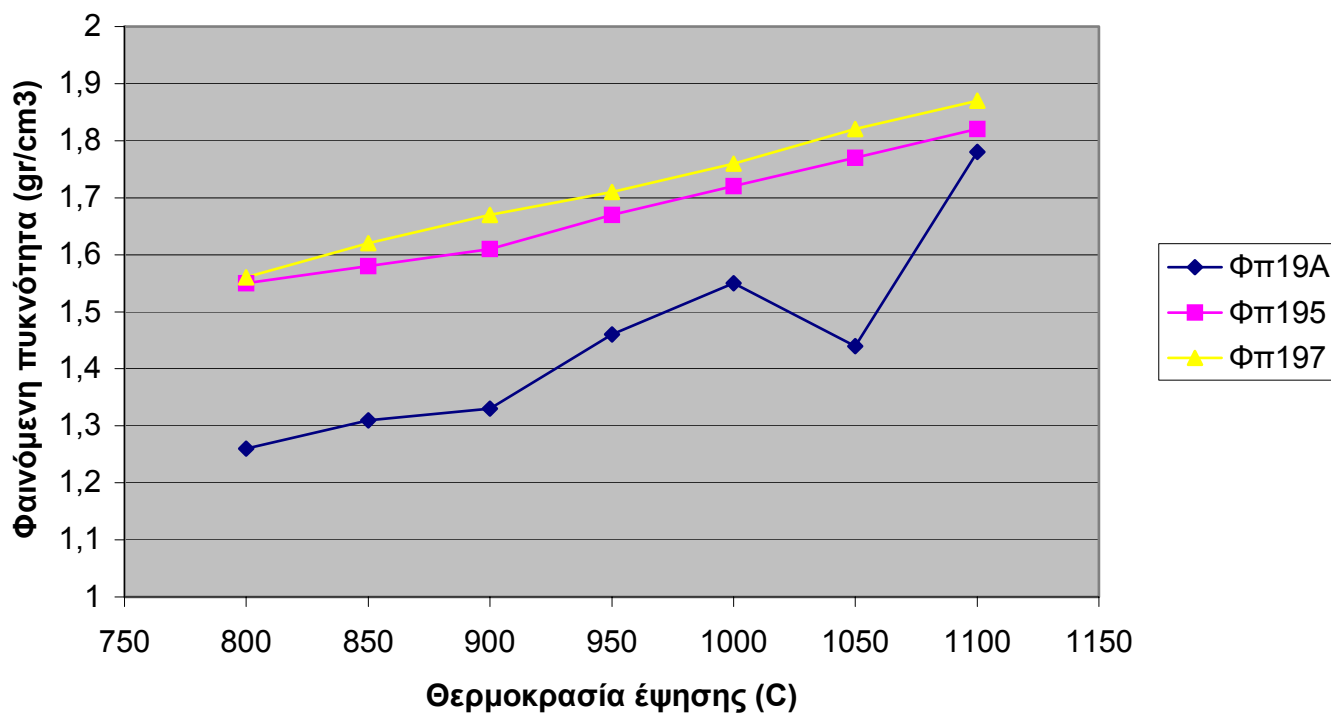


Εικ. 5.7: Συρρίκνωση των αργίλων 19Α, 195 και 197 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ψησίματος.

Εικ5.8: Αντοχή σε κάμψη συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης για τα αργιλοχώματα 19Α,195 και 197



Εικ5.9: Φαινόμενη πυκνότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης για τα αργιλοχώματα 19A, 195 και 197



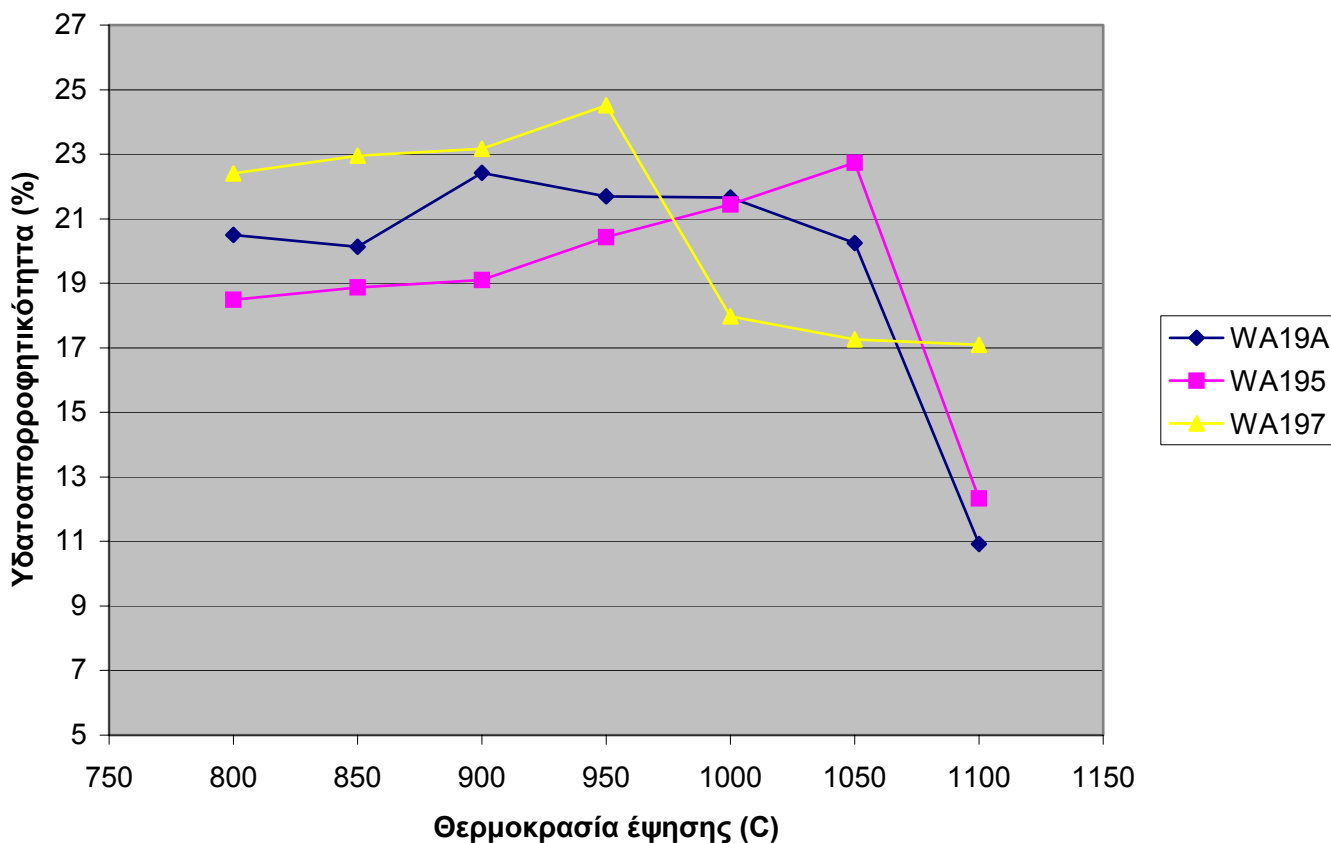
Παρατηρούμε, για το 19A, μια απότομη άνοδο της τιμής της φαινόμενης πυκνότητας από τους 900°C μέχρι τους 1000°C, πτώση για τους 1050°C και πάλι απότομη άνοδο. Αυτό πιθανόν οφείλεται στις αλλαγές φάσεων που πραγματοποιούνται σε αυτές τις θερμοκρασίες.

5.13 Υδατοαπορροφητικότητα των ψημένων δοκιμίων

Η μεταβολή της υδατοαπορροφητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης για τα αργιλοχώματα 19A, 195 και 197 φαίνεται στην εικ5.10.

Η υδατοαπορροφητικότητα του δείγματος 197 παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές μέχρι και την

Εικ5.10:Υδατοαπορροφητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης για τα αργιλοχώματα 19A,195 και 197



θερμοκρασία των 950°C, στη συνέχεια παρουσιάζει πτώση και διατηρεί σταθερά επίπεδα γύρω στο 17,5%.

Στο αργιλόχωμα 195 η υδατοαπορροφητικότητα παρουσιάζει μία συνεχή άνοδο μέχρι τη θερμοκρασία των 1050°C ενώ αμέσως μετά παρατηρείται σημαντική πτώση στο 12,33% στους 1100°C. Επίσης μέχρι και τους 950°C παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές υδατοαπορροφητικότητας σε σύγκριση με τα άλλα δύο δείγματα.

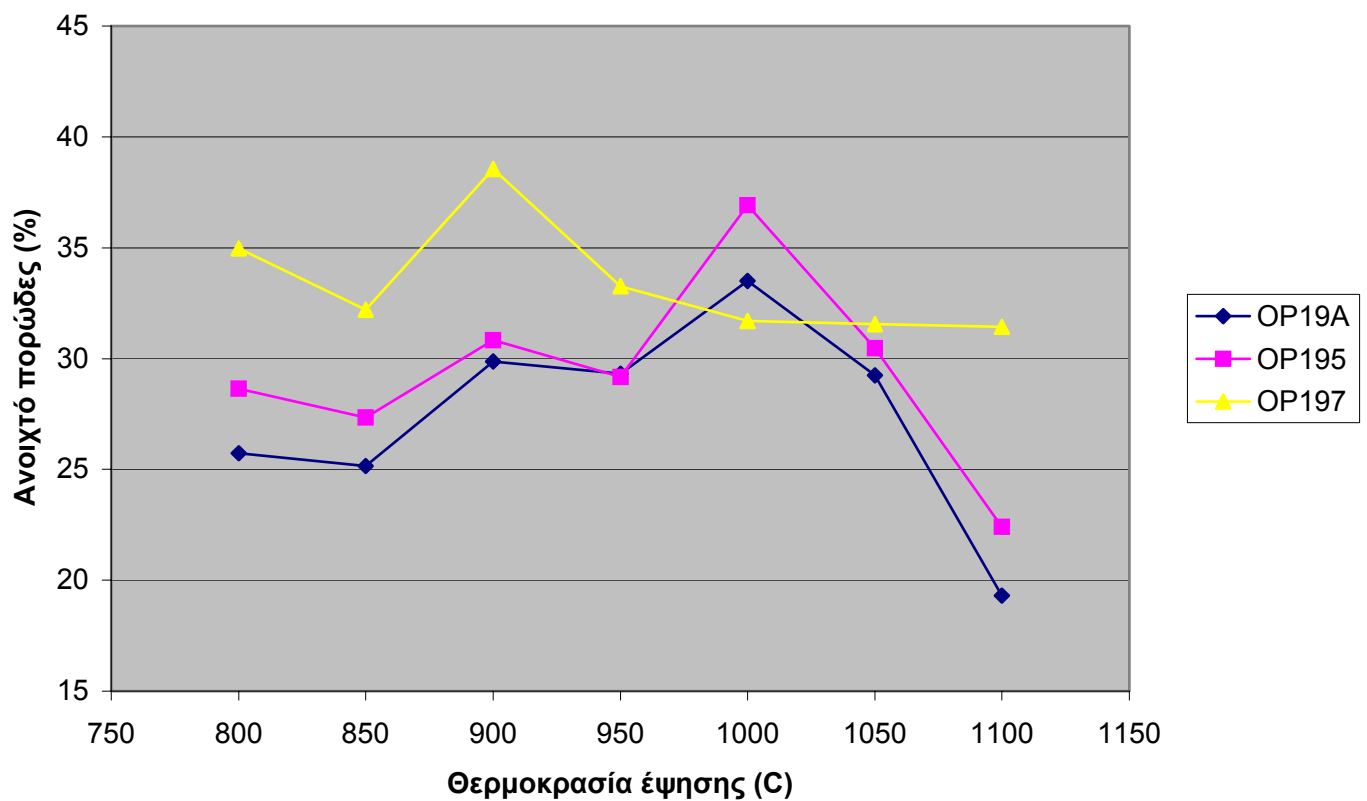
Η υδατοαπορροφητικότητα του αργιλόχωματος 19A παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις μέχρι την θερμοκρασία των 1000°C, από εκεί και πέρα παρουσιάζει σημαντική πτώση στη τιμή της, με μικρότερη τιμή στους 1100°C 10,92%, η τιμή αυτή είναι η μικρότερη και για τα τρία αργιλοχώματα σε όλες τις θερμοκρασίες έψησης.

5.14 Ανοιχτό πορώδες των ψημένων δοκιμίων

Η μεταβολή του ανοιχτού πορώδους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης για τα αργιλοχώματα 19A,195 και 197 φαίνεται στην εικόνα 5.11.

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε αυξομειώσεις του ανοιχτού πορώδους και για τα τρία αργιλοχώματα. Τις μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά έχει το 197 ενώ τις μικρότερες το 19A.

Εικ5.11:Ανοιχτό πορώδες συναρτήσει της θερμοκρασίας έψησης για τα αργιλοχώματα 19Α,195 και 197



6. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και αξιολόγηση, βάσει πειραματικών μετρήσεων, του αργιλοχώματος 19A (Ξηροκάμπι) και των αργιλομαζών 195, 197 που δημιουργήθηκαν αναμειγνύοντας 70% από το 19A με 30% από τα αργιλοχώματα Νο5 και Νο7 (Μετόχι Προκόπη) αντίστοιχα, ως προς την καταλληλότητα τους για παραγωγή στη βιομηχανία παραδοσιακών κεραμικών.

Από την κοκκομετρική ανάλυση προέκυψε ότι και οι τρεις αργιλομάζες είναι κατάλληλες, ως πρώτες ύλες για παραδοσιακά κεραμικά. Συγκεκριμένα από το διάγραμμα κατά Winkler (εικ. 5.2) προκύπτει ότι το δείγμα 19A είναι κατάλληλο για την παραγωγή τρυπητών τούβλων, ενώ τα δείγματα 195 και 197 ενδέχεται να είναι κατάλληλα για την παραγωγή κεραμιδιών.

Από την εξέταση των κεραμικών μαζών που προήλθαν από την έψηση των δοκιμίων προέκυψε ότι:

- και οι τρεις αργιλομάζες και ιδιαίτερα η πλουσιότερη σε ασβεστίτη, παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές υδατοαπορροφητικότητας και ανοιχτού πορώδους, μετά από το ψήσιμο σε θερμοκρασίες έως 1050°C, που είναι οριακά αποδεκτές για την παραγωγή τρυπητών τούβλων.
- Η αντοχή σε κάμψη των κεραμικών μαζών είναι πολύ υψηλή
- Τα χρώματα των ψημένων δοκιμίων είναι ερυθροκαφέ (κεραμιδί).

Οι τιμές της συρρίκνωσης και της αντοχής σε κάμψη κατά το στέγνωμα και στις τρεις αργιλομάζες ευρίσκονται εντός των πλαισίων για την παραγωγή παραδοσιακών κεραμικών

Συνεκτιμώντας τα παραπάνω οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι εξετασθήσες αργιλομάζες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή παραδοσιακών κεραμικών.

Βιβλιογραφία

- Ashby M.F. (1986): Engineering materials 2 “An introduction to microstructures, processing and design”. Oxford (Oxfordshire), New York.
- Creutzburg N. (1977): Γενικός γεωλογικός χάρτης Ελλάδος, Νήσος Κρήτη, κλίμαξ 1:200000 I.G.M.E. Αθήνα.
- Φραγκίσκος Α. (1977): Εισαγωγή στον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων και των βιομηχανικών ορυκτών. ΕΜΠ Αθήνα.
- Folk R. (1974): Petrology of sedimentary rocks. Austin Texas.
- Φώσκολος Α. Γαλετάκης Μ. (1992): Βασικές αρχές φασματοσκοπίας ακτίνων Χ-φθορισμού και πρακτική των μετρήσεων. Εργαστηριακές ασκήσεις. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Hlavak J. (1983): The technology of glass and ceramics. Applied Science Publishers, L.T.D. London.
- Kingery V. Bowen H. Uhlmann D. (1976): Introduction to ceramics. John Wiley and Sons (USA) second edition, New York.
- Κοντόπουλος Α. (1983): Εισαγωγή στα πυρίμαχα υλικά. ΕΜΠ, Αθήνα
- Krause/Berger/Nehlert/Wiegmann (1982): Technologie der Keramik, Band 2 Mechanische Prozesse. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Κωστάκης Γ. (1991): Εισαγωγή στην αξιολόγηση των βιομηχανικών ορυκτών. Σημειώσεις παραδόσεων, Πλνυτεχνείο Κρήτης σελ.24-49, Χανιά.
- Κωστάκης Γ. (1988): Φυσικές ιδιότητες των ορυκτών. Σημειώσεις παραδόσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανια.
- Λαγγιώτης Χ. (1968): Αδρανή υλικά. ΙΓΜΕ τομ.1, σελ 111-113, Αθήνα.
- Μαράτος Δ. (1972): Γεωλογία της Ελλάδας. University studio press, Αθήνα.
- Μουντράκης Δ.(1985): Γεωλογία της Ελλάδας. University studio press, Θεσσαλονίκη.
- Μαρκόπουλος Θ. (1992): Κεραμικά. Σημειώσεις παραδόσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Περράκη Θ. (1987): Συμβολή στη γνώση των ορυκτολογικών και τεχνολογικών χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων στη κεραμική αργίλων περιοχών της Αττικής, της Χαλκίδας και της Βοιωτίας. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Περράκη Θ. (1990): Χαρακτηριστικά των αργίλων κεραμουργίας των περιοχών Περιβόλια και Σταλός του νομού Χανίων. Ορυκτός πλούτος, τ.64, σελ.41-67.
- Phelps G. (1973): A proposed method for rapid reformulation of ceramic bodies. A.I.P.E.A.
- Ryan W. (1978): Properties of ceramic raw materials. Pergamon Press, Oxford, New York.

- Sandrolini F. Palmonari C. (1973): Structural and dimensional variations during firing of Italian building clay minerals. A.I.P.E.A.
- Σταμπολιάδης Η. (1992): Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών. Σημειώσεις παραδόσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Στουρνάρας Κ. (1993): Κεραμικά. Σημειώσεις παραδόσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Worrall W. (1986): Clays and ceramic raw materials. Applied science publishers, Ltd London.
- Brownell W. (1976): Structural clay products. Applied mineralogy, vol.9, Springer, Verlag, Wien, New York.
- Τερλεμές Ν. (1993): Διπλωματική εργασία, Χανιά
- Thorez J. (1976): Practical identification of clay minerals-A handbook for teachers and students in clay mineralogy. G. Lelotte B4820 Dison (Belique).
- Whiston C. (1987): X Ray Methods-John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΟΥ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΠινΒ1:Αντοχή (σ) του 19Α στους 800°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	125,5	150	13,95	17,67
2	41	150	14,1	5,59
3	53	150	13,9	7,54
4	216	130	13,9	26,64
5	132,5	130	13,85	16,52
6	171,5	130	13,9	21,15
Μέσος όρος				20,495

ΠινΒ2:Αντοχή (σ) του 19Α στους 900°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	97	180	13,75	17,11
2	189	150	13,55	29,03
3	179,5	150	13,55	27,57
4	147,5	150	13,7	21,92
5	72	150	13,6	10,94
6	153	150	13,6	23,24
Μέσος όρος				23,774

ΠινΒ3:Αντοχή (σ) του 19Α στους 1000°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	185,5	130	14	22,39
2	240	150	13,9	34,15
3	103,5	150	14,05	28,04
4	225,5	130	14	27,22
5	225	130	14,85	22,76
6	226	130	14,05	26,99
Μέσος όρος				26,925

ΠινΒ4:Αντοχή (σ) του 19Α στους 1050°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	218	130	13,75	27,77
2	240	130	13,8	30,25
3	220	130	13,75	28,3
4	181	180	13,85	31,24
5	156,5	180	13,7	27,91
6	208	200	15,15	30,48
7	199	200	15,2	28,87
Μέσος όρος				29,26

ΠινΒ5:Αντοχή (σ) του 195 στους 800°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	175	100	14,65	14,18
2	152,5	100	14,6	12,48
3	172,5	100	14,9	13,28
4	130	100	14,75	10,33
5	150	100	14,5	12,53
6	112,5	100	14,65	9,13
Μέσος όρος				11,98

ΠινB6:Αντοχή (σ) του 197 στους 800°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	187,5	100	14,6	15,35
2	135	100	14,6	11,05
3	130	100	14,5	10,88
4	147,5	100	14,55	12,2
5	150	100	14,6	12,28
6	107,5	100	14,6	8,8
Μέσος όρος				11,75

ΠινB7:Αντοχή (σ) του 195 στους 900°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	291,25	100	14,65	23,6
2	310	100	14,4	26,45
3	275	100	14,55	22,75
4	300	100	14,45	25,33
5	300	100	14,75	23,83
6	237,5	100	14,65	19,25
Μέσος όρος				23,54

ΠινB8:Αντοχή (σ) του 197 στους 900°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	300	100	14,6	24,55
2	222,5	100	14,65	18,03
3	177,5	100	14,45	15
4	320	100	14,55	26,48
5	155	100	14,35	13,38
6	217,5	100	14,6	17,8
Μέσος όρος				19,21

ΠινB9:Αντοχή (σ) του 195 στους 1000°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	285	100	14,5	23,83
2	250	100	14,4	21,33
3	305	100	14,5	25,5
4	227,5	100	14,55	18,82
5	275	100	14,75	21,82
6	355	100	14,6	29,05
Μέσος όρος				23,4

ΠινB10:Αντοχή (σ) του 197 στους 1000°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ(MPa)
1	240	100	14,4	20,47
2	242,5	100	14,4	20,7
3	260	100	14,5	21,71
4	212,5	100	14,4	18,13
5	237,5	100	14,4	20,27
Μέσος όρος				20,25

ΠινB11:Αντοχή (σ) του 195 στους 1100°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ (MPa)
1	237,5	100	14,15	21,35
2	290	100	14,45	24,5
3	305	100	14,4	26,02
4	301,25	100	14,45	25,45
5	252,5	100	14,5	21,1
6	237,5	100	14,35	20,46
Μέσος όρος				23,15

ΠινB12:Αντοχή (σ) του 197 στους 1100°C

A/A	F(N)	L(mm)	D(mm)	σ (MPa)
1	215	100	14,25	18,92
2	395	100	14	36,68
3	297,5	100	14,4	25,38
4	180	100	14,15	16,18
5	355	100	14,4	30,3
6	250	100	14,2	22,25
Μέσος όρος				24,95

ΠινB13:Μέτρηση των ρ , WA, OP και GP του 19A στους 800°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP	GP
1	3,76	4,46	1,68	1,35	18,62	25,18	47,47
2	4,52	5,52	1,58	1,15	22,12	25,38	55,25
3	4,92	5,94	2,11	1,28	20,73	26,63	50,19
M.O.				1,26	20,49	25,73	50,97

ΠινB14:Μέτρηση των ρ , WA, OP και GP του 19A στους 900°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP	GP
1	6,83	8,4	3,44	1,37	22,99	31,65	46,69
2	6,4	7,8	2,98	1,33	21,88	29,04	48,25
3	6,3	7,71	2,83	1,29	22,38	28,89	49,8
M.O.				1,33	22,42	29,86	48,25

ΠινB15:Μέτρηση των ρ , WA, OP και GP του 19A στους 1000°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP	GP
1	6,16	7,62	3,72	1,58	23,7	37,44	38,52
2	6,32	7,6	3,71	1,62	20,25	32,9	36,96
3	7,37	9	3,87	1,43	22,12	31,77	44,35
4	6,1	7,5	3,58	1,56	22,95	35,71	39,3
5	4,52	5,47	2,58	1,56	21,02	32,79	39,3
6	5,88	7,05	4,21	1,53	19,9	30,47	40,47
M.O.				1,55	21,65	33,51	39,82

ΠινB16:Μέτρηση των ρ , WA, OP και GP του 19A στους 1050°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP	GP
1	5,72	6,9	2,95	1,45	20,29	29,87	43,58
2	4,82	5,7	1,98	1,3	18,26	23,74	49,42
3	6,52	7,97	3,63	1,5	22,24	33,41	41,63
4	7,44	8,9	3,94	1,5	19,62	29,44	41,63
5	4,82	5,76	2,73	1,59	19,5	31,02	38,13
6	5,11	6,21	2,28	1,3	21,53	27,99	49,42
M.O.				1,44	20,24	29,25	43,97

ΠινB17:Μέτρηση των ρ , WA, OP και GP του 19A στους 1100°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP	GP
1	6,6	7,82	3,79	1,64	18,48	30,27	36,19
2	6,64	6,86	3,9	2,24	3,31	11,22	12,84
3	6,66	7,4	3,46	1,69	11,11	18,78	34,24
4	8,33	9,07	4,13	1,69	8,88	14,98	34,24
5	6,73	7,08	3,14	1,71	5,2	8,88	33,46
6	6,7	7,94	4,03	1,71	18,51	31,71	33,46
M.O.				1,78	10,92	19,3	30,74

ΠινB18:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 195 στους 800°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	8,12	9,64	4,37	1,54	18,72	28,83
2	9,7	11,47	5,13	1,53	18,25	27,92
3	4,76	5,64	2,63	1,58	18,49	29,21
M.O.				1,55	18,49	28,65

ΠινB19:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 197 στους 800°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	7,02	8,6	4,14	1,57	22,51	35,34
2	6,63	8,15	3,86	1,55	22,93	35,54
3	7,66	9,33	4,42	1,56	21,8	34
M.O.				1,56	22,41	34,96

ΠινB20:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 195 στους 900°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	6,05	7,2	3,19	1,51	19,01	28,71
2	7,21	8,57	4,15	1,63	18,86	30,74
3	7,25	8,66	4,6	1,7	19,45	33,07
M.O.				1,61	19,11	30,84

ΠινB21:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 197 στους 900°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	8,84	10,93	5,78	1,61	23,64	38,06
2	4,55	5,61	2,6	1,51	23,3	35,18
3	5,67	6,95	3,94	1,88	22,57	42,43
M.O.				1,67	23,17	38,56

ΠινB22:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 195 στους 1000°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	5,83	7,1	3,76	1,75	21,78	38,12
2	5,2	6,32	3,4	1,78	21,54	38,34
3	7,7	9,32	4,61	1,63	21,04	34,3
M.O.				1,72	21,45	36,92

ΠινB23:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 197 στους 1000°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	6,61	7,83	4,12	1,78	18,46	32,86
2	6,14	7,24	3,78	1,77	17,92	31,72
3	6,9	8,11	4,15	1,74	17,54	30,52
M.O.				1,76	17,97	31,7

ΠινB24:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 195 στους 1100°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	6,62	7,45	3,92	1,88	12,54	23,58
2	7,42	8,22	4,17	1,83	10,78	19,73
3	4,68	5,32	2,65	1,75	13,68	23,94
M.O.				1,82	12,33	22,42

ΠινB25:Μέτρηση των ρ , WA και OP του 197 στους 1100°C

A/A	m_1	m_2	m_3	ρ	WA	OP
1	5,8	6,65	3,63	1,92	14,66	28,15
2	6,3	7,38	4,03	1,88	17,14	32,22
3	5,03	6,01	3,12	1,74	19,48	33,9
M.O.				1,85	17,09	31,42

ΠινB26:Μέτρηση της πυκνότητας (d) του 19A με τη μέθοδο της λυκήθου

A/A	Bu	Bx	By	d
1	1,5	104,02	104,94	2,58
2	1,5	104,43	105,34	2,54
3	1,5	103,87	104,76	2,46
M.O.				2,53

ΠινB27:Μέτρηση της πυκνότητας (d) του 195 με τη μέθοδο της λυκήθου

A/A	Bu	Bx	By	d
1	2,51	104,84	106,34	2,48
2	2,5	104,05	105,59	2,6
M.O.				2,54

ΠινB28:Μέτρηση της πυκνότητας (d) του 197 με τη μέθοδο της λυκήθου

A/A	Bu	Bx	By	d
1	2,5	105,18	106,56	2,23
2	2,5	103,87	105,4	2,57
M.O.				2,39