



# Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN  
"SCIENZE DELLA TERRA"

CICLO  
*XXI*

COORDINATORE Prof. Luigi Beccaluva

CARATTERIZZAZIONE PETROCHIMICA E PETROFISICA  
DI MATERIALI INERTI SECONDARI DA COSTRUZIONE E  
DEMOLIZIONE, PER LA REALIZZAZIONE DI IMPASTI CERAMICI  
ORDINARI E CALCESTRUZZI

Settore Scientifico Disciplinare GEO/07

**Dottorando**

Dott. Alice Toffano

**Tutore**

Prof.ssa Carmela Vaccaro

Dot. Michele Dondi

Anni 2006/2009

# INDICE

## I. INTRODUZIONE ED OBIETTIVI

### 1.1 PREMESSA

### 1.2 SCOPO DEL LAVORO

## II. LE ESPERIENZE DI APPLICAZIONE DEGLI AGGREGATI RICICLATI

### 2.1 I CALCESTRUZZI CON AGGREGATO RICICLATO

### 2.2 LE MALTE CON MATERIALI RICICLATI

## III. INQUADRAMENTO NORMATIVO IN MATERIA DI RIFIUTI IN ITALIA ED IN EUROPA

### 3.1 IL QUADRO NORMATIVO COMUNITARIO

### 3.2 IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO

## IV. MERCEOLOGIA E IMPIANTO DI RICICLAGGIO OGGETTO DI INDAGINE

### 4.1 SISTEMA DI RICICLAGGIO

### 4.2 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE RACCOLTO PRIMA DI SUBIRE I PROCESSI DI LAVORAZIONE

## V. CAMPIONATURA E INDAGINI CHIMICO-PETROGRAFICHE PRELIMINARI

### 5.1 CRITERI DI CAMPIONATURA DEI MATERIALI

### 5.2 RIDUZIONI GRANULOMETRICHE ESEGUITE IN LABORATORIO SUI CAMPIONI OGGETTO DI STUDIO

### 5.3 DATI PETROCHIMICI

### 5.4 ANALISI DIFFRATTOMETRICA

## VI. VALUTAZIONE DEL POSSIBILE RIUTILIZZO DEGLI AGGREGATI DA RICICLO NELL'INDUSTRIA CERAMICA

### 6.1 CENNI SULLE FASI DI PRODUZIONE INDUSTRIALE DEL LATERIZIO

#### *6.1.1 DOSAGGIO E MISCELAZIONE DELLE MATERIE PRIME*

#### *6.1.2 FORMATURA ED ESSICCAMENTO*

#### *6.1.3 COTTURA*

### 6.2 CARATTERIZZAZIONE DELLE MATERIE PRIME

#### *6.2.1 LE MATERIE PRIME*

*6.2.1.1 ANALISI CHIMICA*

*6.2.1.2 ANALISI MINERALOGICA*

*6.2.1.3 ANALISI GRANULOMETRICA*

*a -ANALISI GRANULOMETRICA DELLA FRAZIONE PIU'*

*GROSSOLANA ATTRAVERSO SETACCIATURA PER VIA UMIDA*

*b - ANALISI GRANULOMETRICA DELLA FRAZIONE PIU' FINE*

*ATTRAVERSO SEDIGRAFO A RAGGI X*

**6.3 SIMULAZIONE DEL CICLO PRODUTTIVO E CARATTERIZZAZIONE  
TECNOLOGICA**

*6.3.1 PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEGLI IMPASTI*

*6.3.1.1 DOSAGGIO MISCELAZIONE ED UMIDIFICAZIONE DEGLI IMPASTI*

*6.3.1.2 PLASTICITA' SECONDO IL METODO DI ATTEMBERG*

*6.3.1.3.UMIDIFICAZIONE DEGLI IMPASTI*

*6.3.1.3.1 DETERMINAZIONE DELL'ACQUA DI IMPASTO*

*6.3.2 SIMULAZIONE DEL CICLO PRODUTTIVO SU SCALA DI LABORATORIO*

*6.3.2.1 ESTRUSIONE CON TRAFILA PNEUMATICA*

*6.3.2.2 ESSICCAZIONE*

*6.3.2.3 COTTURA*

*6.3.3 CARATTERIZZAZIONE TECNOLOGICA DEI LISTELLI ESSICATI E DEI  
PRODOTTI DI COTTURA*

*6.3.3.1 CARATTERIZZAZIONE DEI LISTELLI ESSICATI*

*6.3.3.1.1 DETERMINAZIONE DEL RITIRO LINEARE IN  
ESSICCAMENTO PERCENTUALE*

*6.3.3.1.2 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA MECCANICA A  
FLESSIONE DEI LISTELLI ESSICATI*

*6.3.3.1.3 CURVE DI BIGOT*

*6.3.3.2 CARATTERIZZAZIONE TECNOLOGICA DEI LISTELLI COTTI*

*6.3.3.2.1 DETERMINAZIONE DEL RITIRO LINEARE IN COTTURA  
PERCENTUALE*

*6.3.3.2.2 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA MECCANICA A  
FLESSIONE DEI LISTELLI COTTI*

*6.3.3.2.3 DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO D'ACQUA*

*6.3.3.2.4 DETERMINAZIONE DELL'ATTITUDINE ALLE  
EFFLORESCENZE SALINE PER SALI PRIMARI*

*6.3.3.2.5 ANALISI COLORIMETRICA*

*6.3.3.2.6 ANALISI MINERALOGICA QUANTITATIVA DEI PRODOTTI  
DI COTTURA*

VII. UTILIZZO DEGLI AGGREGATI DA RICICLO NEL CONFEZIONAMENTO DEL  
CALCESTRUZZO

7.1 CENNI SUL CALCESTRUZZO ED IL SUO CONFEZIONAMENTO

*7.1.1 IL CONFEZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO*

7.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AGGREGATI PER IL CONFEZIONAMENTO  
DEL CALCESTRUZZO.

*7.2.1 PROPRIETA' FISICHE DEGLI AGGREGATI*

*7.2.1.1 CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA DEGLI AGGREGATI*

*7.2.1.2 FORMA E ANGOLARITA' DEGLI AGGREGATI*

*7.2.1.3 MASSA VOLUMICA IN MUCCHIO*

*7.2.1.4 MASSA VOLUMICA DEI GRANULI ED ASSORBIMENTO D'ACQUA*

*7.2.2 PROPRIETA' FISICHE DEGLI AGGREGATI*

*7.2.2.1 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE  
MEDIANTE IL METODO DI PROVA LOS ANGELES*

*7.2.3 PROPRIETA' CHIMICHE DEGLI AGGREGATI*

*7.2.3.1 SILICE ALCALI-REATTIVA*

*7.2.3.2 SOSTANZE LIMO-ARGILLOSE*

*7.2.3.3 SOSTANZE ORGANICHE*

*7.2.4 STUDIO PETROGRAFICO*

*7.2.4.1 DESCRIZIONE PETROGRAFICA*

*7.2.4.2 ANALISI CHIMICA QUANTITATIVA DEL MATERIALE MEDIANTE  
ANALISI ALLA FLUORESCENZA X (XRF)*

*7.2.4.3 ANALISI MINERALOGICA QUALITATIVA MEDIANTE  
DIFRATTOMETRIA AI RAGGI X (XRD)*

7.3 PROGETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO ED IL MIX-DESIGN

*7.3.1 DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA OTTIMALE*

*7.3.2 L'ACQUA E IL CEMENTO PER IL MIX-DESIGN*

*7.3.3 GLI ADDITIVI*

7.4 MISCELAZIONE DEGLI INGREDIENTI E CARATTERIZZAZIONE DEL  
CALCESTRUZZO FRESCO

*7.4.1 LA LAVORABILITA'*

*7.4.2 DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO D'ARIA OCCLUSA NEL CALCESTRUZZO FRESCO*

*7.4.3 DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA APPARENTE DEL CALCESTRUZZO*

7.5 CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO INDURITO

*7.5.1 PROPRIETA' FISICO MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO INDURITO*

*7.5.1.1 RESISTENZA A COMPRESSIONE*

7.6 REALIZZAZIONE IMPASTI DEFINITIVI

*7.6.1 CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO FRESCO*

*7.6.2 CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO INDURITO*

*7.6.2.1 MISURA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO*

*7.6.2.2 MISURA DELL'ASSORBIMENTO TOTALE E DELLA SUZIONE CAPILLARE DEL CALCESTRUZZO INDURITO*

*7.6.2.3 MISURA DEL RITIRO IGROMETRICO*

VIII. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

8.1 CORRELAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE PRELIMINARI INDAGINI CHIMICHE CON DATI OTTENUTI DA STUDI PRECEDENTI.

8.2 CORRELAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA SOSTITUZIONE NEGLI IMPASTI CERAMICI

8.3 CORRELAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA SOSTITUZIONE NELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO

ALLEGATI

BIBLIOGRAFIA

# I. INTRODUZIONE ED OBIETTIVI

## 1.1 PREMESSA

In questi ultimi anni la crescente attenzione alle problematiche ambientali ha reso sempre più difficoltoso il prelievo da cave naturali degli inerti e, nel contempo, sempre più restrittiva la regolamentazione per la gestione delle discariche di rifiuti. Per tale motivo gli aggregati riciclati da attività di costruzione e demolizione, la cui produzione annua in Italia può essere stimata in diverse decine di milioni di tonnellate, stanno rapidamente diventando un materiale di grande interesse per le costruzioni civili. Questo è essenzialmente dovuto al fatto che in generale negli anni trascorsi si è sempre più incentivato l'utilizzo delle risorse naturali, pensando di poter disporre di una riserva illimitata di materie prime, senza considerare invece che i rifiuti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione potessero rappresentare un effettivo problema di smaltimento. E' chiaro come questo comportamento oggi non sia più sostenibile, in quanto:

- La domanda di aggregati ha generato forti impatti sul territorio a causa di una attività estrattiva che con molta difficoltà riesce ad essere pianificata e regolamentata;
- Il notevole quantitativo di rifiuti proveniente dal settore edile ha generato una domanda di impianti di smaltimento difficile da soddisfare ed ha comportato inoltre il frequente abbandono in discariche abusive;
- L'utilizzo della discarica deve essere considerato come ultima soluzione, privilegiando tutte le azioni possibili per recuperare risorse disponibili dalla gestione dei rifiuti stessi.

Si è quindi giunti alla consapevolezza che lo smaltimento in discarica ai livelli attuali è un'opzione difficilmente sostenibile per il futuro, e per tale motivo si cerca di limitarlo attraverso l'adozione di opportuni strumenti politici ed economici. Sviluppare e approfondire la strada del riciclo dei rifiuti da costruzione e demolizione risulta quindi essere una questione estremamente importante.

Dal punto di vista ambientale infatti il riutilizzo degli scarti edilizi oltre che a ridurre gli spazi da destinare alle discariche autorizzate permette anche un notevole risparmio dei materiali tradizionali di cava, mentre dal punto di vista economico l'impiego dei materiali riciclati al posto dei materiali vergini, i quali stanno raggiungendo costi estremamente elevati, risulta essere anno dopo anno una soluzione estremamente vantaggiosa.

Tuttavia nonostante gli impianti riescano ormai da tempo a produrre materiale di ottima qualità e si sia dimostrato tramite indagini di laboratorio ed in sito che i materiali riciclati da costruzione e demolizione risultino impiegabili con piena soddisfazione nell'ambito della realizzazione di molteplici progetti di ingegneria civile, la diffusione delle tecniche di riciclaggio è stata ostacolata in passato dall'atteggiamento conservatore dei progettisti e costruttori che in alcuni casi ancora oggi sussiste e dal quadro normativo precedente. Oggi invece, ad esempio con la circolare n. 5205

del 15/07/2005 la quale impone l'obbligo di copertura del trenta per cento del fabbisogno annuale con aggregati riciclati, si dimostra come dal punto legislativo vi sia il massimo interesse a promuovere attività di riciclaggio. Relativamente invece all'aspetto tecnico si può affermare che la quasi totalità dei capitolati circolanti sul nostro territorio richiede che vengano utilizzate esclusivamente materie prime naturali.

Come detto precedentemente un ulteriore ostacolo all'utilizzo degli aggregati riciclati è dato dall'atteggiamento conservatore che in alcuni casi si riscontra nei progettisti, stazioni appaltanti e direzioni lavori, che preferiscono, rispetto ai materiali riciclati, fare riferimento all'impiego esclusivo dei materiali tradizionali ben più collaudati.

Al fine di incentivare lo sviluppo della cultura del riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione in alcuni Paesi sono state attuate opportune scelte di carattere politico-economico (piani di gestione dei rifiuti, fissazioni di obiettivi di riciclaggio, sostegno dei nuovi mercati, etc.), che hanno generato una percentuale media di recupero estremamente più elevata rispetto a quella relativa ai Paesi in cui mancano interventi specifici di questo tipo.

L'Olanda risulta essere il paese in cui si ha la maggiore percentuale di materiale riciclato e tale risultato è strettamente relazionato alla natura stessa del territorio dove, a differenza di altri paesi europei ed in particolare l'Italia, si registra scarsa disponibilità di spazi da destinare a discarica ma soprattutto carenza di inerti naturali. Per tale motivo il governo Olandese, al fine di salvaguardare sia l'ambiente che le risorse naturali, ha adottato misure politiche ed economiche orientate a scoraggiare il conferimento in discarica dei rifiuti inerti e allo stesso tempo incentivare il recupero ed il riciclaggio degli scarti edilizi, in quanto da tale comportamento discenderanno "vantaggi ambientali", come ad esempio minore escavazione, minor impatto ambientale e maggiore salvaguardia dell'ambiente.

## 1.2 SCOPO DEL LAVORO

Da risultati emersi da precedenti ricerche sugli aggregati da riciclo derivanti dall'attività di costruzione e demolizione, è stato possibile acquisire una conoscenza in merito alla composizione chimica e mineralogica, dei materiali trattati dall'impianto di riciclaggio, e mediante l'impiego del diagramma ternario  $\text{CaO}+\text{MgO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , è emerso che le composizioni di alcune frazioni di aggregati di riciclo da C&D potrebbero essere utilizzate per confezionare miscele da utilizzare nell'industria ceramica, allo scopo di realizzare dei laterizi.

In base ai dati precedentemente emersi, con questo lavoro di tesi si vuole testare la reale possibilità di utilizzare frazioni fini di aggregati riciclati per la produzione di laterizi, andando a creare miscele ceramiche nelle quali vengono introdotte appunto frazioni di aggregati riciclati, che vanno in sostituzione delle frazioni di sabbia naturale generalmente impiegate dall'industria ceramica.

Oltre a testare la reale possibilità di impiego nel settore delle ceramiche, si vuole valutare anche un'altra strada di riutilizzo degli aggregati riciclati da C&D, cioè testare e valutare la possibilità di utilizzarli come aggregati per il confezionamento di calcestruzzi.

Per riuscire a valutare pienamente le due possibilità di riutilizzo sopra menzionate, i materiali da riciclo di C&D verranno caratterizzati secondo le normative e confrontati con quelli naturali, in modo da determinare nella maniera più precisa possibile quale influenza hanno tali materiali nelle miscele che si realizzeranno.

## **II. LE ESPERIENZE DI APPLICAZIONE DEGLI AGGREGATI RICICLATI**

Il settore maggiormente interessato dall'applicazione degli aggregati riciclati è senza dubbio quello dell'ingegneria, in quanto questi materiali sono stati impiegati nella costruzione di infrastrutture stradali e ferroviarie, poiché le prestazioni richieste ai materiali sono più modeste e certamente alla portata degli aggregati riciclati di buona qualità. Il materiale di risulta proveniente dalle demolizioni, trattato in modo opportuno viene impiegato nel campo delle costruzioni civili e delle infrastrutture, in particolar modo:

- Rilevati di piazzali e strade;
- Sottofondi stradali;
- Riempimenti di vario genere (acquedotti, gasdotti, fognature, fondazioni, ecc.);
- Recuperi ambientali;
- Vivaistica e giardinaggio;
- Piste ciclabili;
- Campi sportivi;
- Opere di drenaggio.

Le Ferrovie dello Stato hanno elaborato una tecnica specifica per l'utilizzo dei materiali provenienti dalle demolizioni edilizie.

L'utilizzo di tali materiali è consentito:

- a. Nella costruzione del corpo dei rilevati ferroviari;
- b. Nella costruzione del corpo dei rilevati stradali delle strade di pertinenza FS e delle strade da consegnare ad Enti terzi, qualora l'Ente gestore ne condivida l'utilizzo;
- c. Nella realizzazione dello strato di bonifica dei rilevati stradali e ferroviari;
- d. Nella realizzazione di opere in terra, quali dune, colline artificiali, ritombamenti, sistemazioni ambientali, ecc.

Ovviamente tutti gli usi per riempimenti, tombamenti, ecc. sono possibili, anche se in questo caso, dal punto di vista delle prestazioni richieste, anche gli aggregati riciclati di migliore qualità appaiono male utilizzati.

Sono stati compiuti studi per riuscire a valutare la possibilità di impiegare i rifiuti provenienti da attività di costruzione e demolizione di edifici civili, in seguito ad opportuni trattamenti come aggregati per il confezionamento di malte e calcestruzzi.

## 2.1 I CALCESTRUZZI CON AGGREGATO RICICLATO

Nel corso dell'ultimo decennio, numerose sperimentazioni sono state condotte un po' in tutto il mondo allo scopo di valutare l'effetto dell'introduzione, nel calcestruzzo di aggregati riciclati. Le esperienze riportate in letteratura, relative alla preparazione con tali aggregati di calcestruzzi strutturali, nella maggior parte dei casi si sono limitate a sostituzioni parziali dell'inerte naturale con quello di riciclo. In particolare, se per quanto riguarda la frazione grossa di aggregato da più parti ci si è spinti verso una sostituzione pari al 100%, assai raramente si è fatta un'analoga esperienza per quel che riguarda la frazione fine. Infatti questa ultima, secondo il giudizio concorde di numerosi studiosi, risulterebbe deleteria per la maggior parte delle proprietà tecniche dei calcestruzzi con aggregato riciclato.

## 2.2 LE MALTE CON MATERIALI RICICLATI

Sono stati messi a punto due tipi di malta contenente materiali di riciclo:

- una preparata con polvere ottenuta dalla macinazione di laterizi (altrimenti detta "cocciopesto") in parziale sostituzione del cemento;
- una confezionata sostituendo la sabbia naturale con la frazione fine di aggregato prodotto dagli impianti di riciclaggio.

Tali malte sono state innanzi tutto caratterizzate dal punto di vista fisico e meccanico, hanno poi valutato anche l'influenza di un'eventuale aggiunta di fibre in polipropilene o in acciaio inox sul loro comportamento.

Le malte preparate con aggregato riciclato mettono in evidenza un'eccellente capacità di aderenza con il mattone grazie all'ottima qualità della zona di interfaccia tra i due materiali.

L'introduzione di fibre polipropileniche nelle malte con aggregato riciclato, al fine di limitarne il ritiro plastico e idrometrico, non influenza la resistenza a flessione di tale malta ma tende a peggiorarne un po' la capacità di aderire sia al mattone che alla barra di acciaio zincato.

Poiché la prestazione che conta per una malta di allettamento non è tanto la sua resistenza meccanica ma la sua capacità di sviluppare tensioni tangenziali a contatto con il mattone, la malta con inerte riciclato può trovare nel settore del restauro di murature un importante campo di applicazione.

Per quanto riguarda le malte contenenti cocciopesto, l'aggiunta di fibre polipropileniche ha un effetto negativo un po' su tutte le prestazioni meccaniche, mentre l'esatto contrario si verifica nel caso dell'aggiunta di fibre d'acciaio inox.

In sostanza ogni malta funziona bene quando è accoppiata con la fibra giusta.

### **III. IL QUADRO NORMATIVO IN MATERIA DI RIFIUTI IN EUROPA ED IN ITALIA**

#### **3.1 IL QUADRO NORMATIVO COMUNITARIO**

La strategia comunitaria, basata sulla trasformazione dei rifiuti da costruzione e demolizione da utilità negativa (per problemi legati a spazi occupati e ad elevati costi di trasporto e smaltimento) in utilità positiva (in quanto materia prima seconda per nuovi impieghi) ha sensibilizzato i Paesi europei, che hanno ottenuto opportuno uniformare, a livello nazionale, le proposte comunitarie. Si è giunti infatti alla consapevolezza che lo smaltimento in discarica ai livelli attuali rappresenta una pratica difficilmente sostenibile per il futuro e quindi si sta cercando di limitarlo attraverso l'adozione di opportuni strumenti politici ed economici. La necessità di coordinare la gestione di tali rifiuti, avvertita dalla gran parte dei Paesi Comunitari, ha portato alla redazione di numerose Direttive. Nella I Direttiva quadro sui rifiuti n. 75/442/CEE del 1975 viene data la definizione del termine rifiuto: "Qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi"; viene inoltre prevista la promozione di sistemi tendenti a riciclare e riutilizzare i rifiuti o a recuperare da essi materiale ed energia con criteri di economicità ed efficienza.

Successivamente, con la Risoluzione del 7 maggio 1990 sulla politica di gestione dei rifiuti, vengono definiti programmi d'azione specifici per alcuni flussi di rifiuti, tra cui quelli prodotti dalle attività di costruzioni e demolizioni.

Nel 1991 viene emanata la Direttiva Comunitaria 91/156/CEE, valido strumento per la riduzione della produzione dei rifiuti e l'incoraggiamento della pratica del riciclo rispetto allo smaltimento, e la Direttiva, relativa a rifiuti pericolosi, che concede l'applicazione di agevolazioni anche per questa categoria di rifiuti. Con la Decisione della Commissione Europea 2000/532/CE (che rappresenta il nuovo sistema di catalogazione dei rifiuti), modificata in seguito dalle Decisioni 2001/118/CE, 2001/119/CE e 2001/573/CE, sono state apportate numerose modifiche al CER. Viene fatto obbligo agli Stati Membri di adeguare la normativa vigente e di disporre, a decorrere dal 1 gennaio 2002, l'applicazione del nuovo elenco europeo dei rifiuti, che sostituisce integralmente quelli delle precedenti Decisioni 94/3/CE e 94/904/CE (e cioè i vecchi CER e l'Elenco dei rifiuti pericolosi).

#### **3.2 IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO**

In ambito italiano la gestione dei rifiuti inerti viene regolamentata dal Decreto Legislativo n. 22 del 5 febbraio 1997, "Attuazione delle Direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti

pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio”, noto con il nome di Decreto Ronchi, il quale definisce come rifiuti speciali “i rifiuti derivanti dalle attività di demolizione, costruzione, nonché rifiuti pericolosi che derivano da attività di scavo”. In particolare sono da considerarsi:

- Rifiuti speciali i materiali residuati da attività di demolizione e costruzione di manufatti, impianti e opere edili in genere, incluse le costruzioni stradali e i materiali provenienti dal settore dell’ingegneria degli scavi;
- Rifiuti speciali pericolosi i materiali derivanti da attività di scavo contaminati e/o inquinati da costituenti pericolosi (ad esempio terre da scavo provenienti da operazioni di bonifica), individuati all’Allegato D del D.L. n. 22/97.

Il Decreto Ronchi ha disposto norme per incentivare i sistemi di raccolta differenziata alla fonte, la preselezione ed il trattamento finalizzati al riciclaggio, al riutilizzo ed al recupero di rifiuti utilizzabili come materia prima. A partire dal 1 gennaio 2000 è vietato smaltire in discarica i rifiuti inerti derivanti dalle attività di demolizione e costruzione, se non dopo la frantumazione e la selezione dei materiali recuperabili (ad esclusione dell’amianto), da effettuare presso i cantieri di produzione degli inerti o presso appositi centri autorizzati. Lo smaltimento dei rifiuti inerti deve comunque essere eseguito negli impianti più vicini al sito di produzione, al fine di ridurre i movimenti dei rifiuti, tenendo anche conto delle necessità degli impianti specializzati per i rifiuti inerti. Per incentivare il recupero, il decreto prevede inoltre una semplificazione delle procedure autorizzative per le attività effettuate nel rispetto delle norme tecniche generali, atte a garantire un elevato livello di protezione ambientale.

Al Decreto Ronchi si appoggia il Decreto ministeriale del 5 febbraio 1998, “Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli art. 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997 n. 22”, il quale individua 31 tipologie di rifiuti ceramici ed inerti recuperabili con procedura semplificata, e fornisce una nuova definizione di materie prime secondarie (MPS). Viene qui stabilito che le materie prime secondarie ottenute dal riciclaggio e dal recupero dei rifiuti non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti ottenuti dalla lavorazione di materie prime naturali e devono comunque essere destinate all’utilizzo in cicli di produzione: in caso contrario, esse rimangono assoggettate al regime ordinario dei rifiuti. L’impiego diretto dei rifiuti da demolizione non è comunque possibile, in quanto la composizione dei rifiuti risulta variabile (calcestruzzo, legno, ferro, gesso, plastica, ecc..) ed è tale da necessitare operazioni di trattamento delle diverse frazioni prima dell’impiego della frazione inerte, da cui si possono ottenere: materie prime secondarie per l’edilizia a granulometria idonea e selezionata con caratteristiche di cui alle norme CNR-UNI 10006 e con test di cessione conforme a quanto previsto dal decreto stesso.

Per i rifiuti non pericolosi derivanti da attività di scavo è previsto il recupero:

- Nell'industria ceramica e dei laterizi;
- Per recuperi ambientali di ex cave, discariche esaurite e bonifica di siti inquinati; il recupero rimane subordinato alla esecuzione del test di cessione.

L'Allegato I, sub allegato 1, dal punto 7.1 al punto 7.31, identifica i rifiuti inerti provenienti da costruzione, da demolizione e simili, destinati ad attività di trattamento per la produzione di materie prime secondarie per l'edilizia.

Ai due decreti citati va aggiunta la Legge n. 93 del 23 marzo 2001 "disposizioni in campo ambientale", la quale, all'articolo 10 esclude dal regime dei rifiuti "le terre e le rocce da scavo destinate all'effettivo utilizzo per reinterri, riempimenti, rilevati e macinati, con esclusione di materiali provenienti da siti inquinati e da bonifiche con concentrazione di inquinanti superiore ai limiti di accettabilità stabiliti dalle norme vigenti". Ciò implica indirettamente l'esclusione delle attività di recupero di questi materiali dalla normativa sui rifiuti (D.M. del 5/2/98).

In ottemperanza alla direttiva europea sui prodotti da costruzione 89/106/CE, recepita in Italia con il D.P.R. n. 246 del 21 Aprile 1993, nel giugno del 2004 sono entrate in vigore le norme armonizzate riguardanti diverse categorie di aggregati (naturali, artificiali o riciclati), in base alle quali è fatto obbligo ai produttori di applicare ai materiali la marcatura CE. Il set di tali norme, di carattere cogente, comprende riferimenti ad aggregati per calcestruzzo, malte, miscele non legate per lavori stradali, ecc..., e fa riferimento ai requisiti essenziali che le opere in cui vengono utilizzati i prodotti devono soddisfare.

Per gli aggregati i requisiti di riferimento: "Resistenza meccanica e stabilità" e "Igiene, salute, ambiente", unitamente al sovra requisito della "Durabilità". L'entrata in vigore della nuova normativa europea armonizzata segna una svolta nel settore, in quanto tutte le norme in oggetto si applicano ad aggregati naturali, artificiali o riciclati, indipendentemente dalla loro origine.

L'avvento della normativa europea inoltre apporta un cambiamento sostanziale al mercato dei materiali da costruzione, passando da un approccio prescrittivo ad un approccio prestazionale, in cui i vari materiali vengono classificati in funzione delle prestazioni tecniche che sono in grado di offrire, piuttosto che in funzione della loro provenienza. Tali prestazioni devono essere garantite dal produttore con la marcatura CE. La presenza della marcatura CE sul prodotto fa sì che sia presunto il soddisfacimento dei requisiti essenziali di riferimento.

Gli aggregati provenienti dal riciclaggio di inerti, in Italia, trovano destinazioni in diversi campi. Per ciascuno dei possibili utilizzi la Direttiva 89/106 ed il DM 11.4.07 impongono la marcatura CE degli aggregati prevedendo due percorsi per l'attestazione di conformità, ovvero il cosiddetto "sistema 4" e il "sistema 2+" in funzione del tipo di uso previsto.

## **IV. MERCEOLOGIA E IMPIANTO DI RICICLAGGIO OGGETTO DI INDAGINE**

### **4.1 SISTEMA DI RICICLAGGIO**

Il materiale inerte derivante da processi di costruzione e demolizione entra nel centro di riciclaggio e dopo un primo controllo per l'idoneità all'accettazione viene fatto depositare nell'apposita area di stoccaggio a terra (fig. 4.1).

Nel caso siano presenti blocchi particolarmente voluminosi che non si possano frantumare così come sono, si procede con una pre-frantumazione mediante l'impiego di escavatori attrezzati con appositi martelli demolitori.

Si provvede quindi ad una pre-separazione manuale per l'eliminazione dei materiali quali carta, plastica, legno ed eventualmente ferri ingombranti.

Il materiale è poi caricato, con un escavatore, in un frantoio a ganasce, che consente di frantumare con differenti pezzature, e permette la separazione delle parti metalliche attraverso un apposito nastro magnetico.

Il prodotto frantumato che si raccoglie in cumuli alla base del nastro trasportatore, è in seguito prelevato con una pala meccanica e caricato nel vaglio dove verrà effettuata una selezione in tre categorie così denominate:

- Materiale riciclato 60-30mm;
- Materiale riciclato 30-0 mm;
- Sabbia riciclata <6 mm.

Il materiale separato è raccolto in grandi cumuli alla base dei nastri trasportatori, dove si provvede ad effettuare un'ulteriore controllo per eliminare le frazioni leggere (carta, plastica, e legno) che possono essere sfuggite al primo controllo.

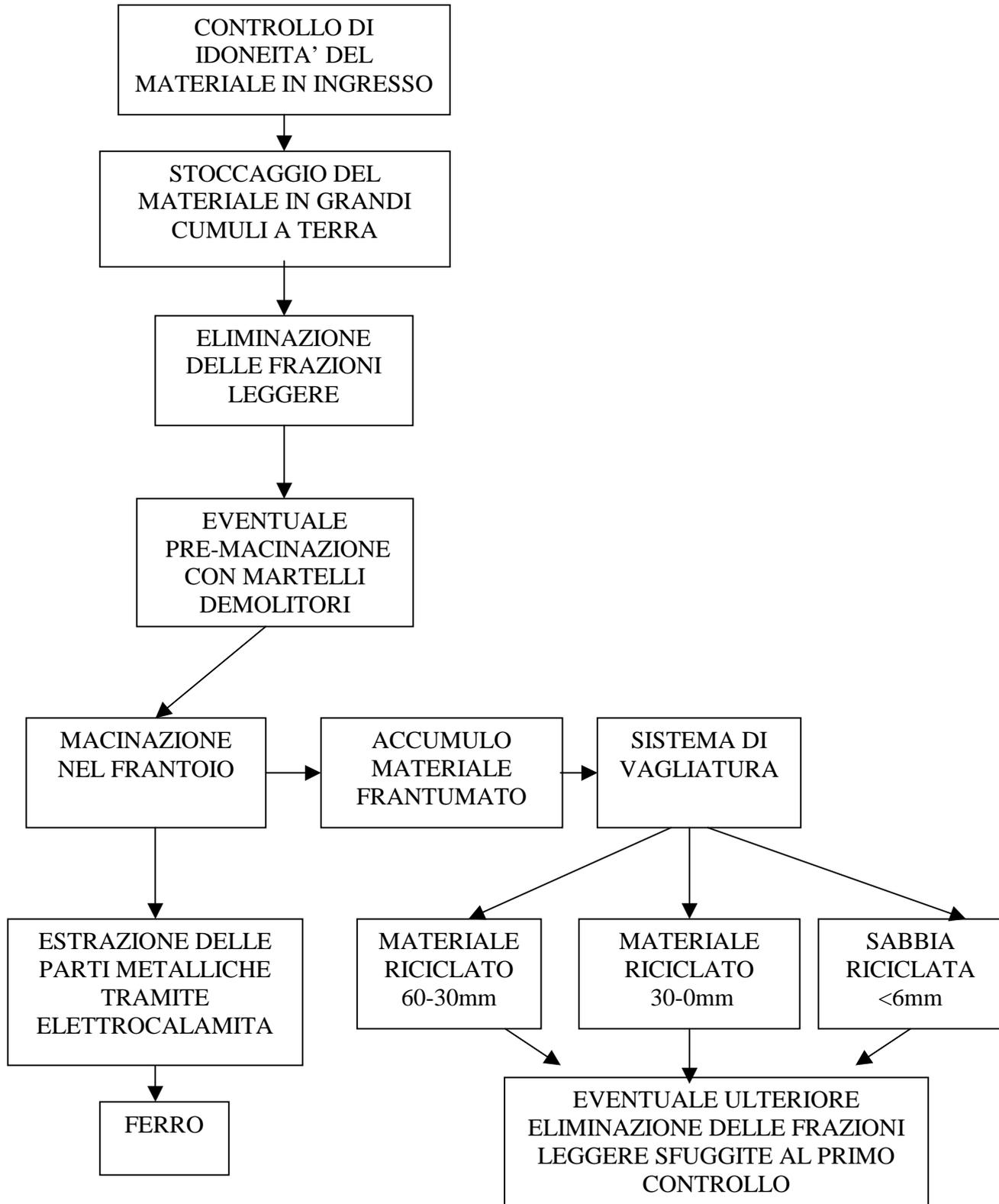


Figura 4.1- Diagramma di flusso del centro di riciclaggio di Rovigo della ditta “Fenza Daniela”.

## 4.2 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE RACCOLTO PRIMA DI SUBIRE I PROCESSI DI LAVORAZIONE

Il materiale derivante dai processi di costruzione e demolizione che viene stoccato nel centro di riciclaggio, prima di essere lavorato, è composto da vari elementi di diversa natura come: mattoni e materiali in terracotta, calcestruzzo, legno, asfalto, plastica, carta, parti in gomma, e materiali fini incoerenti provenienti da malta e calcestruzzo.

Poiché le quantità dei componenti sopraccitati sono molto importanti al fine di possibili successivi riutilizzi si è cercato di stimare ad occhio la percentuale con la quale i vari elementi si presentano nel materiale accumulato (tab. 4.1).

COMPONENTI	
Mattoni e materiali in terracotta	48%
Calcestruzzo	20%
Legno	2%
Metalli	3%
Plastica, carta e gomma	0.5%
Asfalto	1%
Materiali fini incoerenti provenienti da malta e calcestruzzo	25.5%
TOTALE	100%

Tabella 4.1- Percentuale dei vari componenti nei materiali conferiti nella discarica di 2<sup>a</sup> categoria di Rovigo.



materiale non vagliato



materiale riciclato 60-30 mm



materiale riciclato 30-0 mm



sabbia riciclata <6 mm

Figura 4.2- Materiali campionati dal centro di riciclaggio della ditta “Fenza Daniela”.

## V. CAMPIONATURA, TRATTAMENTO DIMENSIONALE E INDAGINI CHIMICO-PETROGRAFICHE PRELIMINARI

### 5.1 CRITERI DI CAMPIONATURA DEI MATERIALI

Il campionamento dei materiali studiati è avvenuto in una discarica di seconda categoria della provincia di Rovigo. Dai cumuli di materiale già lavorato siti nella discarica sono stati prelevati all'incirca 300 Kg di materiale per tipologia di materiale, e più precisamente:

- 300 Kg dal cumulo del materiale che non subisce alcuna vagliatura successiva, ma che viene solamente frantumato con il frantoio. Tale materiale presenta una frazione granulometrica massima pari ad 60 mm. (TA4)
- 300 Kg sono stati prelevati da ciascuno dei tre cumuli che si formano in seguito al processo di vagliatura, che viene effettuato dopo la frantumazione con il mulino:
  - Cumulo frazione 60-30 mm (TA3), denominato “materiale riciclato 60-30”;
  - Cumulo frazione 30-0 mm (TA2), denominato “materiale riciclato 30-0”;
  - Cumulo frazione <6 mm (TA1) denominato “sabbia riciclata”.

### 5.2 RIDUZIONI GRANULOMETRICHE ESEGUITE IN LABORATORIO SUI CAMPIONI OGGETTO DI STUDIO

In seguito al prelievo dei materiali, si è proceduti con trattamenti e analisi in laboratorio.

Per ciascuno dei campioni prelevati si è provveduto a frantumarne una piccola parte, all'incirca un paio di chilogrammi, mediante l'impiego del mortaio d'agata.

Dopo aver ridotto la dimensione dei campioni è stata effettuata una quartatura, cioè il materiale frantumato è stato disposto a forma di torta sulla quale si è poi incisa una croce, a questo punto sono stati tolti i due spicchi opposti e tenuti gli altri due, tale operazione è stata eseguita più volte sino ad ottenere una quantità pari a 100 grammi di ciascun campione, con i quali si è compiuta una setacciatura ottenendo delle frazioni granulometriche classificate, in accordo con la classificazione di Wentworth (1922), nei seguenti limiti dimensionali e terminologie:

- Il Mesh 5, che trattiene la frazione maggiore di 4 mm;
- Il Mesh 10, che trattiene la ghiaia fine;
- Il Mesh 30, che trattiene la sabbia molto grossolana/grossolana;
- Il Mesh 120, che trattiene la sabbia media/fine;
- Il Mesh 200, che trattiene la sabbia molto fine;
- Il fondo chiuso della pila di setacci, che raccoglie la frazione inferiore a 0,0625 mm chiamata fango.

Nei setacci passeranno quei clasti che hanno diametro minimo inferiore alla maglia e saranno trattenuti quelli che hanno diametro superiore. Per fare in modo che ogni clasto venga virtualmente a contatto con i fori della maglia, è indispensabile che il materiale venga agitato per un sufficiente lasso di tempo, nel caso in esame sono risultati necessari 10 minuti per ogni carico.

Nell'effettuare questa analisi oltre al problema che i setacci non riflettono le dimensioni reali delle particelle, ma quelle minime e medie, sussiste il problema che le maglie hanno fori che sono quadrati mentre le particelle presentano una forma varia che in ogni modo, di norma, non è mai quadrata. Di conseguenza, le dimensioni delle particelle che passano in una determinata maglia, non sono esattamente le dimensioni della stessa ma sono leggermente inferiori, specificatamente quelle iscritte nel riquadro della maglia.

Le frazioni ottenute sono state nuovamente quartate, sino a quando è stata raggiunta la quantità di materiale necessario per eseguire un'ulteriore riduzione dimensionale mediante l'impiego della giara che permette di ottenere una polvere impalpabile, in seguito impiegata per effettuare le varie analisi (XRF, XRD, ecc.).

### 5.3 DATI PETROCHIMICI

I campioni di aggregati riciclati precedentemente frantumati e ulteriormente setacciati in laboratorio sono stati analizzati mediante spettrometria di fluorescenza di raggi X (tab. 5.1) ottenendo concentrazioni degli ossidi principali espresse in percentuali peso e degli elementi in tracce in ppm.

I dati ottenuti sono stati plottati nei diagrammi binari di figura 5.1, nei quali la percentuale in peso di  $\text{SiO}_2$  è stata messa in relazione con la percentuale in peso dei seguenti ossidi:  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e  $\text{K}_2\text{O}_3$ ; e con le concentrazioni dei seguenti elementi: Ni, Co, Cr, Th.

Negli stessi diagrammi sono stati inoltre plottati per confronto dati provenienti da precedenti campionamenti e analisi avvenute nel 2003, alcuni campioni di sabbie naturali della provincia ferrarese e alcuni campioni di materiali inerti provenienti dalla zona di Ferrara, già studiati da Bianchini et al. (2005).

Dall'analisi dei diagrammi appare evidente come la granulometria influenzi la composizione, infatti le varie classi granulometriche sono concentrate in gruppi.

E' possibile notare che nei campioni in esame:

- Il contenuto in  $\text{SiO}_2$  è inferiore rispetto alle sabbie naturali ed ai campioni di Bianchini et al., ed altresì inferiore rispetto alla precedente campionatura del 2003.
- Risultano più ricchi in  $\text{CaO}$ , pertanto è pensabile che la frazione carbonatica sia maggiore.
- Presentano un contenuto di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  confrontabile con le sabbie naturali ed i campioni di Bianchini et al, e di poco inferiore rispetto alla campionatura del 2003.

- Il contenuto in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  è di poco inferiore rispetto alla campionatura del 2003 e paragonabile con le sabbie naturali e i dati di Bianchini et al.
- La quantità in peso percentuale del  $\text{K}_2\text{O}$  appare di poco inferiore nei campioni esaminati, rispetto alla stessa nelle sabbie e negli altri campioni.
- La presenza in ppm di metalli pesanti quali Ni, e Cr appare nettamente inferiore nei campioni oggetto di studio rispetto alle sabbie del Po ed ai campioni di Bianchini et al., ma confrontabili con quelli della campionatura avvenuta nel 2003 nella stessa discarica di 2<sup>a</sup> categoria, così come anche il contenuto, sempre in ppm, dell'elemento Torio (Th).
- Per quanto riguarda il contenuto in ppm, di Co, questo spesso non è stato determinato.

Tabella 5.1- Dati petrochimici.

	>4 mm	ghiaia fine	sabbia molto grossolana /grossolana	sabbia media/ fine	sabbia molto fine	fango	Tal Quale
	TA1a	TA1b	TA1c	TA1d	TA1e	TA1f	TA1g
SiO <sub>2</sub>	22,67	26,14	38,67	55,00	43,09	40,43	44,95
TiO <sub>2</sub>	0,21	0,33	0,39	0,40	0,66	0,66	0,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,11	6,01	8,91	10,70	12,02	11,52	10,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,88	2,22	3,16	3,11	4,72	4,59	3,54
MnO	0,05	0,06	0,07	0,07	0,10	0,10	0,08
MgO	7,38	8,95	6,15	4,71	5,13	5,18	5,86
CaO	33,75	27,82	21,14	11,96	15,96	17,07	17,14
Na <sub>2</sub> O	0,74	0,83	1,16	1,61	1,26	1,23	1,30
K <sub>2</sub> O	0,86	1,07	1,92	2,31	2,29	2,10	2,11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,10	0,16	0,16	0,27	0,29	0,18
LOI	28,30	26,47	18,29	9,96	14,50	16,83	14,23
Totale	100	100	100	100	100	100	100
Ba	215	261	356	399	505	517	452
Ce	nd	nd	nd	nd	nd	9	Nd
Co	nd	nd	nd	0	3	4	5
Cr	8	22	42	64	88	81	61
La	42	35	41	31	41	45	34
Nb	10	10	16	10	15	19	11
Ni	nd	7	20	29	33	34	22
Pb	8	10	33	35	46	51	26
Rb	13	20	50	71	65	59	62
Sr	342	269	256	214	265	281	242
Th	2	4	5	6	6	8	5
V	30	43	55	58	95	92	68
Y	6	6	11	14	16	16	13
Zn	6	14	45	65	95	103	55
Zr	48	53	102	93	166	206	102
Cu	8	14	23	21	39	47	26
Ga	nd	nd	6	6	7	11	5
Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd
S	780	1168	1787	1114	1337	1383	1740
Sc	7	7	9	8	12	13	10

Continua tabella 5.1

	>4 mm	ghiaia fine	sabbia molto grossolana /grossolana	sabbia media/ fine	sabbia molto fine	fango	Tal Quale
	TA2a	TA2b	TA2c	TA2d	TA2e	TA2f	TA2g
SiO <sub>2</sub>	21,77	22,96	27,41	36,92	34,19	33,25	31,48
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,25	0,33	0,39	0,45	0,46	0,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,06	4,97	6,75	8,51	9,07	8,95	7,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,92	2,05	2,69	3,41	3,95	4,06	3,06
MnO	0,05	0,05	0,07	0,08	0,09	0,09	0,07
MgO	12,86	11,55	9,03	7,04	6,68	6,84	9,37
CaO	27,89	28,59	27,39	24,02	24,13	24,20	24,64
Na <sub>2</sub> O	0,71	0,70	0,77	0,95	0,85	0,83	0,90
K <sub>2</sub> O	0,75	0,80	1,07	1,57	1,51	1,49	1,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,06	0,09	0,11	0,15	0,15	0,10
LOI	28,68	28,02	24,41	16,99	18,93	19,68	21,74
Totale	100	100	100	100	100	100	100
Ba	201	185	260	308	364	357	273
Ce	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co	nd	nd	nd	nd	4	6	nd
Cr	17	18	40	68	83	84	50
La	14	28	16	34	40	25	26
Nb	4	6	6	8	10	10	8
Ni	5	7	17	25	35	37	20
Pb	13	46	46	46	51	48	26
Rb	13	15	25	47	45	45	32
Sr	246	245	262	284	329	337	266
Th	2	2	2	3	3	4	3
V	37	36	47	53	67	72	50
Y	3	4	6	11	12	12	8
Zn	7	9	18	33	48	51	23
Zr	33	34	60	81	103	97	60
Cu	10	14	15	19	29	32	20
Ga	nd	nd	nd	1	2	5	1
Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
S	205	374	1018	2327	2355	2237	1257
Sc	9	9	10	11	11	10	9

Continua tabella 5.1

			sabbia molto grossolana /grossolana	sabbia media/ fine	sabbia molto fine	fango	Tal Quale
	>4 mm	ghiaia fine					
	TA3a	TA3b	TA3c	TA3d	TA3e	TA3f	TA3g
SiO <sub>2</sub>	26,76	33,37	42,26	43,49	43,67	44,51	44,01
TiO <sub>2</sub>	0,33	0,43	0,52	0,47	0,54	0,60	0,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,23	8,61	11,19	10,71	11,46	12,24	10,64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44	3,46	4,59	4,24	4,88	5,24	4,55
MnO	0,06	0,07	0,09	0,09	0,10	0,11	0,09
MgO	11,67	8,76	6,74	6,15	6,31	6,44	6,63
CaO	25,35	22,93	18,38	19,56	18,13	16,23	17,93
Na <sub>2</sub> O	0,75	0,92	1,09	1,08	1,10	1,17	1,26
K <sub>2</sub> O	0,90	1,35	1,94	1,92	1,99	2,03	1,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,10	0,13	0,13	0,16	0,17	0,14
LOI	25,43	20	13,07	12,17	11,67	11,26	12,27
Totale	100	100	100	100	100	100	100
Ba	275	333	421	411	437	486	427
Ce	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co	nd	nd	4	2	4	7	6
Cr	25	51	85	93	114	114	91
La	24	29	32	29	30	31	33
Nb	4	6	9	8	11	11	8
Ni	11	24	43	33	47	62	41
Pb	7	13	17	19	24	31	18
Rb	20	36	70	68	72	78	73
Sr	266	257	272	175	299	310	273
Th	3	4	5	3	4	5	4
V	45	59	76	67	79	90	74
Y	5	10	17	16	20	22	18
Zn	14	23	46	42	55	70	52
Zr	39	65	102	98	141	144	102
Cu	16	21	27	23	33	37	29
Ga	nd	2	6	4	6	9	5
Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
S	463	1482	2178	366	3854	2588	2111
Sc	10	11	14	11	13	15	12

Continua tabella 5.1

	<b>&gt;4 mm</b>	<b>ghiaia fine</b>	<b>sabbia molto grossolana /grossolana</b>	<b>sabbia media/ fine</b>	<b>sabbia molto fine</b>	<b>fango</b>	<b>Tal Quale</b>
	TA4a	TA4b	TA4c	TA4d	TA4e	TA4f	TA4g
SiO <sub>2</sub>	27,44	32,06	34,34	44,68	38,26	37,14	35,01
TiO <sub>2</sub>	0,32	0,37	0,35	0,39	0,48	0,51	0,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,71	8,08	7,92	9,26	9,98	9,73	8,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,49	3,04	3,16	3,36	4,06	4,17	3,80
MnO	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,08
MgO	10,65	7,58	6,73	5,30	5,47	5,70	6,12
CaO	25,50	25,44	25,61	20,45	22,22	21,72	24,47
Na <sub>2</sub> O	0,76	0,90	0,94	1,16	0,95	0,94	0,96
K <sub>2</sub> O	1,11	1,40	1,49	1,79	1,67	1,64	1,54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,08	0,10	0,14	0,19	0,18	0,13
LOI	24,89	20,97	19,28	13,39	16,64	18,18	18,76
Totale	100	100	100	100	100	100	100
Ba	224	255	264	303	347	346	292
Ce	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co	nd	nd	nd	nd	3	3	1
Cr	37	50	58	81	92	90	85
La	24	26	34	32	27	32	34
Nb	6	10	9	8	10	12	9
Ni	19	25	32	38	51	53	35
Pb	5	6	22	29	40	42	24
Rb	23	36	41	56	53	52	46
Sr	229	248	261	259	308	315	262
Th	3	3	3	4	3	5	3
V	46	53	50	56	76	81	57
Y	6	9	12	15	16	16	12
Zn	11	18	26	48	72	74	37
Zr	39	61	68	80	120	126	74
Cu	15	17	20	22	38	41	23
Ga	nd	nd	2	3	5	8	1
Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
S	753	1853	2316	2895	3300	2945	3808
Sc	8	10	10	9	12	13	9

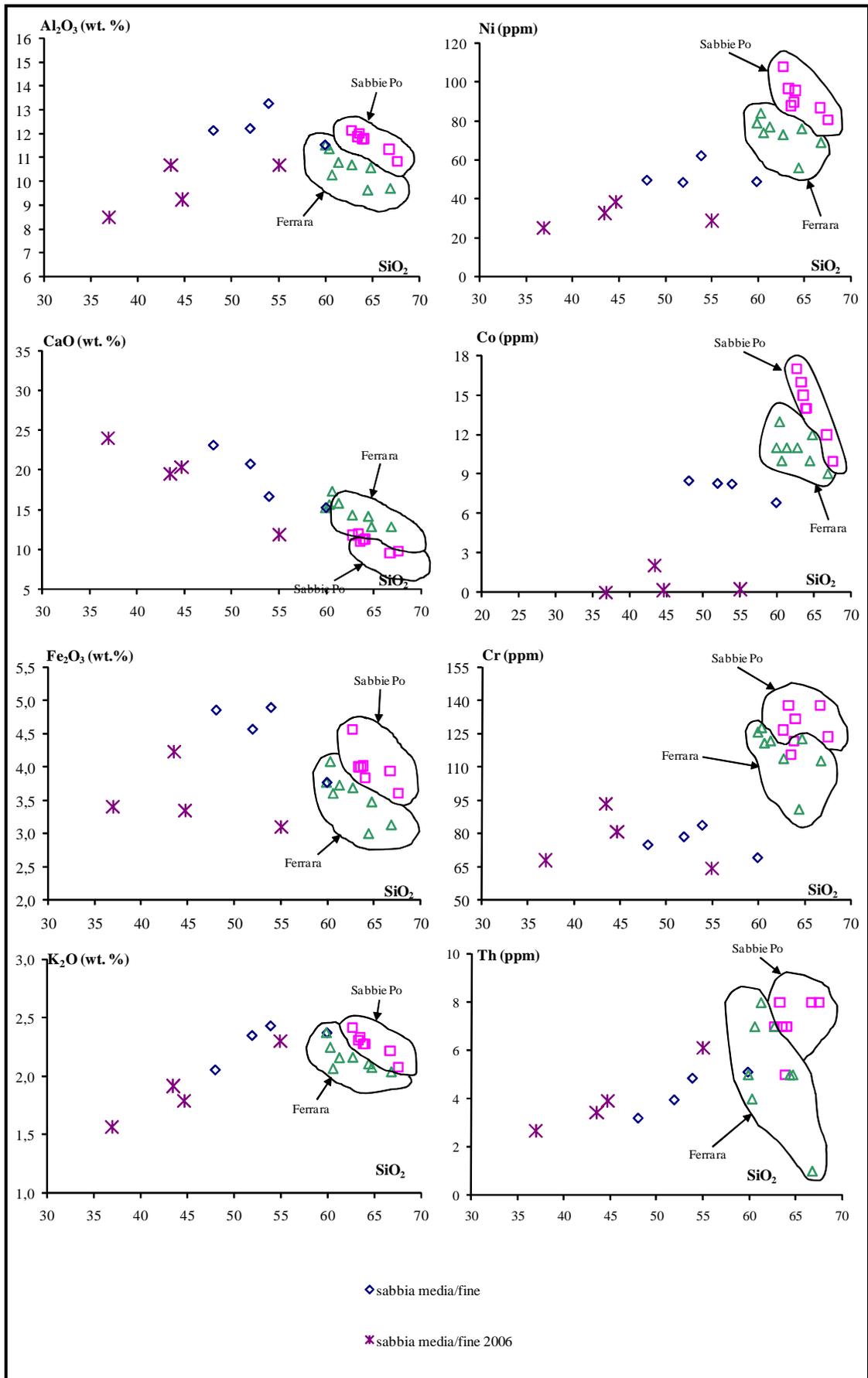
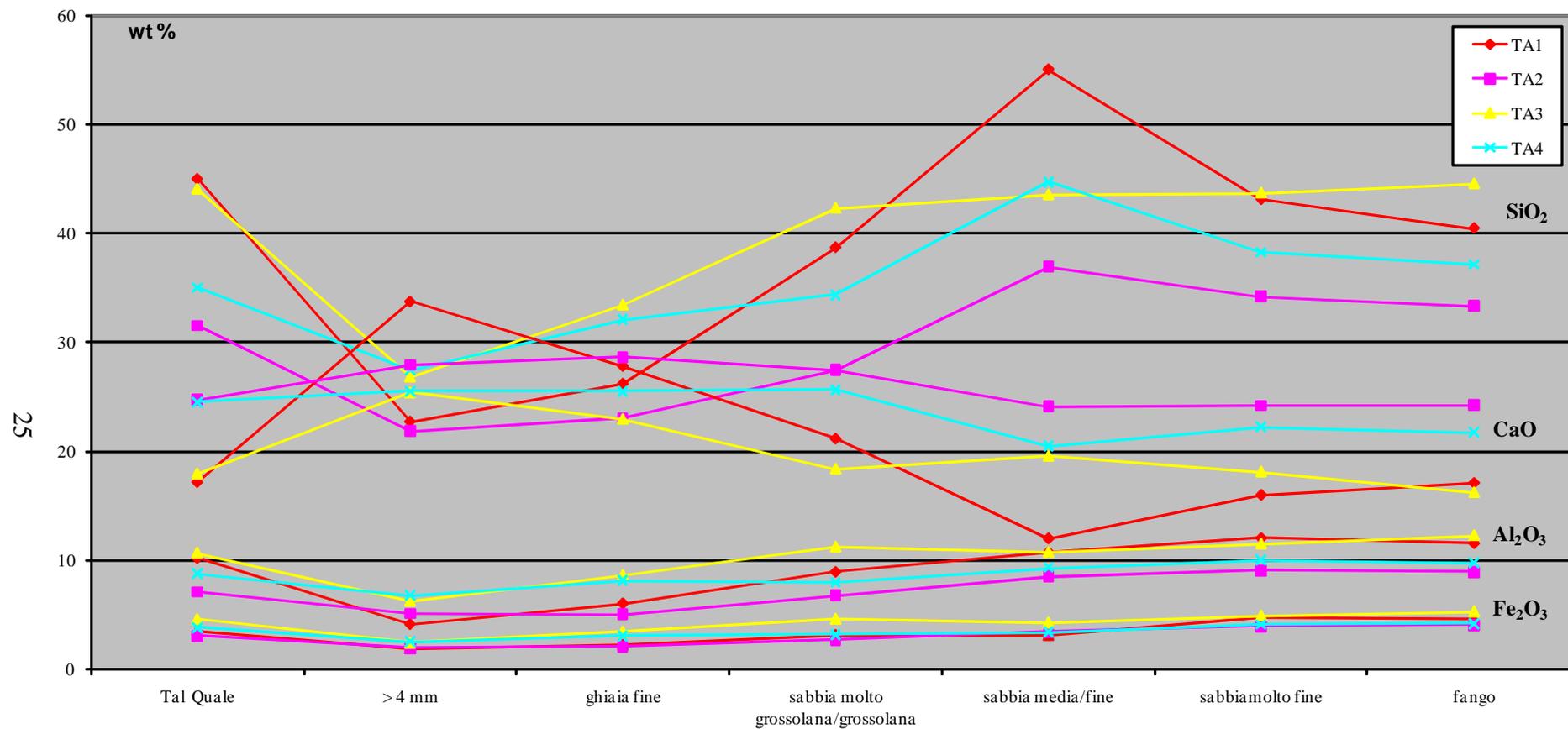


Figura 5.1- Diagrammi binari.

Figura 5.2- Diagramma con SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nell'asse delle ordinate e classi granulometriche nell'asse delle ascisse.



Sono stati realizzati dei diagrammi riportati in figura 6 nei quali le percentuali dei vari elementi quali  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  si trovano nell'asse delle ordinate, e le classi granulometriche sono poste nell'asse delle ascisse, in questi è possibile notare:

- Per quanto riguarda  $\text{SiO}_2$  il campione TA1 (sabbia vagliata) è quello che presenta il più alto contenuto e l'andamento migliore, nel senso che presenta il picco, molto più alto rispetto agli altri, in corrispondenza della classe granulometrica della sabbia media/fine, e l'intensità minore in corrispondenza degli inerti con dimensioni maggiori di 4 mm.

Un andamento abbastanza analogo ad TA1 è identificabile anche nel campione TA2 (materiale riciclato  $\varnothing$  0-30mm), dove il valore più basso si riscontra nuovamente in corrispondenza degli inerti con dimensioni maggiori di 4mm, ed il picco più elevato si presenta ancora nella classe granulometrica della sabbia medio/fine ma con un'intensità notevolmente inferiore rispetto al caso precedente.

I campioni TA3 e TA4 non presentano picchi particolari ma appaiono avere un andamento abbastanza lineare.

- Analizzando il comportamento dei campioni nei confronti del  $\text{CaO}$ , appare che TA1 presenta la maggiore intensità in corrispondenza degli inerti con dimensioni maggiori di 4mm, e la minore intensità in corrispondenza della classe della sabbia medio/fine.
- Nell'analisi della tendenza dei campioni nei confronti dell' $\text{Al}_2\text{O}_3$  non si riscontrano picchi ed evoluzioni particolari in quanto tutti i campioni presentano un andamento pressoché simile e di tipo lineare.
- Studiando il comportamento dei campioni nei riguardi dell' $\text{Fe}_2\text{O}_3$  non si evidenziano picchi particolari, ma per tutti quattro i campioni l'andamento è molto simile e di tipo lineare.

Facendo un'analisi complessiva si può affermare che esiste una corrispondenza tra l'andamento dei campioni nei confronti dell' $\text{SiO}_2$  e l'andamento degli stessi rispetto al  $\text{CaO}$ , si può dedurre che le frazioni aventi più elevato contenuto in ossidi di calcio si raccolgono nelle frazioni più grossolane e pertanto è presumibile che in queste si concentrino le frazioni cementizie.

In corrispondenza della classe della sabbia media/fine si osservano i valori più elevati in  $\text{SiO}_2$ . L'andamento tende a ritornare lineare superate le dimensioni della sabbia media/fine.

Per quanto concerne l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  e l' $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gli andamenti di tutti i campioni sono molto simili e pressoché lineari, per tanto si può affermare che le frazioni che contengono questi elementi si distribuiscono in ugual modo in tutte le classi granulometriche.

## 5.4 ANALISI DIFFRATTOMETRICA

L'analisi mineralogica delle fasi costituenti alcuni campioni di aggregati riciclati, è stata determinata mediante la diffrattometria a raggi x (vedi allegato).

Il diffrattogramma di polveri risulta caratteristico e differente per ogni sostanza cristallina, pertanto rappresenta un mezzo diagnostico per identificare fasi cristalline sia allo stato puro sia in miscele con altre.

Per arrivare a determinare le fasi cristalline ignote è stato necessario compiere una serie di passaggi.

Il primo passo è stato preparare per ciascun campione una polvere finissima nel modo descritto precedentemente, con queste si sono in seguito eseguiti dei diffrattogrammi di polveri.

I diffrattogrammi ottenuti sono stati quindi interpretati trasformando dapprima i valori misurati in  $2\theta$  con i corrispondenti valori in distanze reticolari ed esprimendo le intensità in modo relativo ponendo uguale a 100 la diffrazione più intensa.

A questo punto sono state selezionate le diffrazioni di maggiore intensità da andare a confrontare con le schede relative a fasi cristalline le cui diffrazioni più intense corrispondono a quelle del campione analizzato.

Tali schede sono state confrontate con l'intero diffrattogramma del campione ignoto sino ad identificare l'unica scheda con la quale esiste corrispondenza con tutte le diffrazioni.

Dato che le diffrazioni di più fasi cristalline presenti contemporaneamente in uno stesso campione non interagiscono tra loro, la procedura prima indicata ha permesso di risalire alla composizione qualitativa dei campioni.

Prendendo in considerazione i diffrattogrammi dei vari campioni in uno stesso grafico riportato in figura 5.3, è facile notare che tutti presentano uno stesso andamento generale.

Dalle analisi è emerso che le fasi mineralogiche dominanti in tutti i campioni sono quelle del quarzo, della calcite, della dolomite, e dell'illite/muscovite. Altre fasi sono nuovamente presenti in tutti, ma con picchi d'intensità minore e queste sono la caolinite, e i feldspati.

Nel diffrattogramma è anche possibile notare che i picchi si presentano con intensità diversa nei vari diffrattogrammi, in particolar modo i picchi del quarzo sono più intensi nel campione TA1, come d'altro canto ci si aspettava essendo questo il campione della sabbia riciclata.

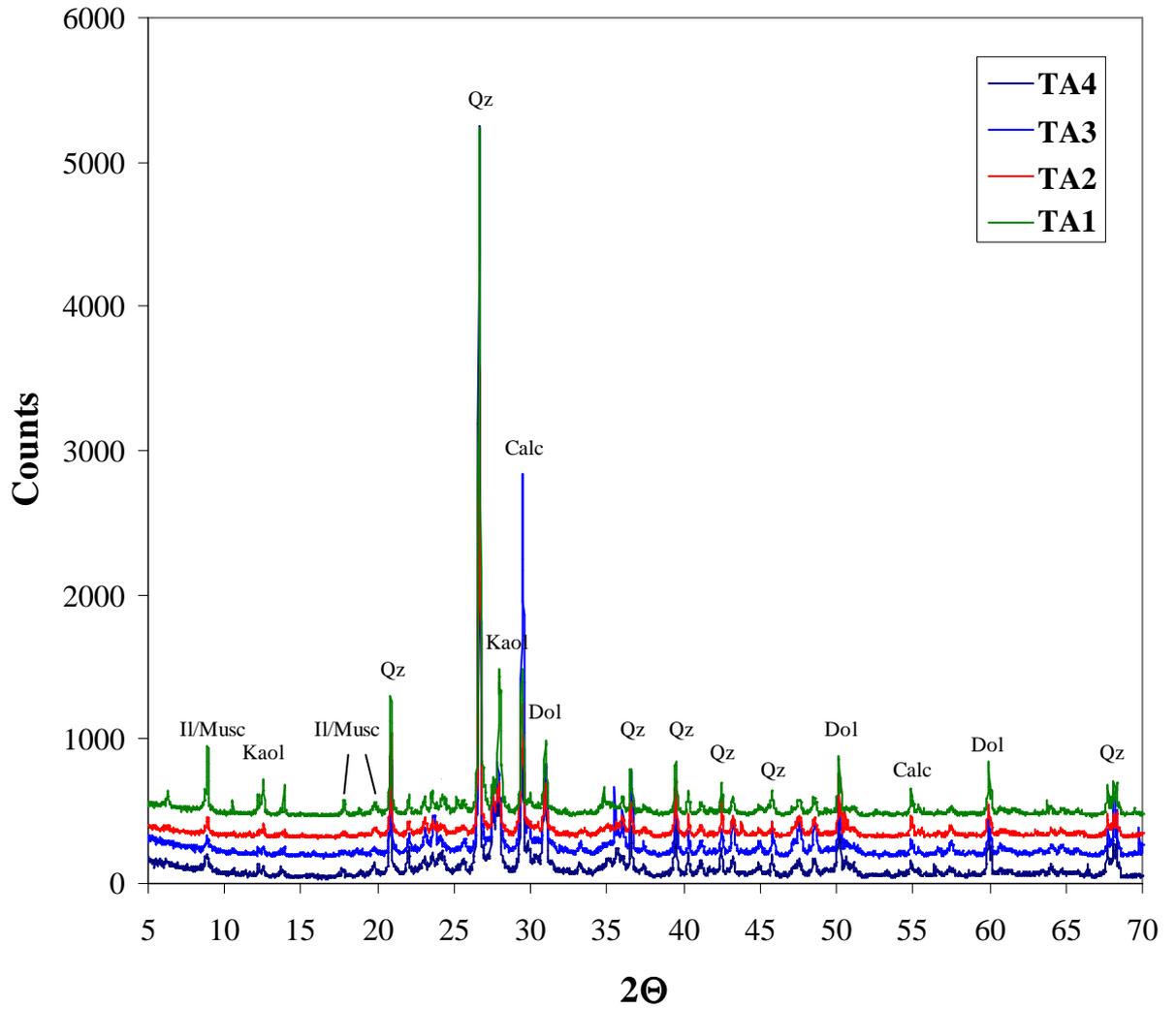


Figura 5.3- Difrattogrammi di tutti i campioni nei quali emergono le seguenti fasi mineralogiche: quarzo (Qz), calcite (Calc), dolomite (Dol), illite/muscovite (Ill/Musc),caolinite (Kaol).

## **VI. VALUTAZIONE DEL POSSIBILE RIUTILIZZO DEGLI AGGREGATI DA RICICLO NELL'INDUSTRIA CERAMICA**

Questa parte del lavoro è atta a valutare la possibilità di riutilizzare alcune delle frazioni fini degli aggregati riciclati, ottenute dai precedenti trattamenti in laboratorio per inserirle nella produzione di materiali ceramici, in particolare per produrre laterizi.

Si pensa infatti che le frazioni fini di aggregato riciclato potrebbero andare a sostituire le frazioni di sabbia naturale impiegate nella produzione ceramica.

A tale scopo si sono da prima caratterizzate le materie prime oggetto di studio ed in seguito realizzati degli impasti ceramici con tali materiali in sostituzione alle materie prime naturali, i quali sono stati via via caratterizzati nelle varie fasi del processo produttivo.

### **6.1 CENNI SULLE FASI DI PRODUZIONE INDUSTRIALE DEL LATERIZIO**

I laterizi sono materiali ceramici ordinari, di composizione silicatica, a tessitura porosa, non rivestiti, a pasta colorata, costituiti essenzialmente da elementi per muratura, tegole e coppi, blocchi per solai e pezzi speciali per pavimentazioni.

Il ciclo industriale della produzione del laterizio si articola sostanzialmente in quattro fasi quali: il dosaggio e la miscelazione delle materie prime, la foggatura, l'essiccamento e la cottura.

#### ***6.1.1 DOSAGGIO E MISCELAZIONE DELLE MATERIE PRIME***

Nella produzione dei laterizi si utilizzano impasti di materie prime naturali costituite da argille estratte da cave generalmente nelle vicinanze della fabbrica. Nelle cave l'estrazione dell'argilla è eseguita a cielo aperto, previo allontanamento della parte superficiale troppo ricca di residui vegetali e Sali solubili, mediante l'utilizzo di draghe ed escavatori. Tenendo conto che molti dei sedimenti alluvionali coltivati dalle industrie non hanno una composizione costante, ma possono presentare banchi di argilla di buona qualità, frammisti a letti di ghiaia e sabbia, quasi tutte le aziende provvedono alla depurazione e stagionatura.

Oltre all'argilla, nell'impasto si introduce una parte inerte (alle temperature di cottura comprese tra i 900 e 1000°C) formata in genere da sabbie silicatiche costituite essenzialmente da quarzo, feldspati, miche e raramente feldspato idi. Tale frazione costituisce lo scheletro portante dei manufatti nella fase di foggatura, essiccamento e cottura in quanto favorisce l'essiccamento stesso, riduce la plasticità e il ritiro e concorre nella formazione della porosità della massa. Ha inoltre un ruolo determinante nell'influenzare la resistenza a flessione del prodotto finito e nel conferire un caratteristico aspetto rustico al manufatto, molto ricercato sul mercato.

La preparazione dell'impasto si svolge con modalità differenti a seconda della granulometria dell'argilla, del tipo e della qualità del prodotto che si vuole ottenere.

Qualunque sia stato il trattamento di lavorazione, questo si conclude con l'umidificazione che precede l'operazione di foggatura.

### *6.1.2 FORMATURA ED ESSICCAMENTO*

La foggatura dei laterizi a sezione costante avviene generalmente per estrusione allo stato plastico. Questo tipo di formatura presuppone l'impiego di un'apparecchiatura, detta estrusore, nella quale la pasta viene sollecitata contro un'apertura a sezione prestabilita (filiera). Al termine della fase di foggatura i manufatti vengono sottoposti ad essiccamento una delle fasi più delicate del processo produttivo dei laterizi.

### *6.1.3 COTTURA*

Al termine dell'essiccamento avviene la cottura, un'operazione fondamentale del processo tecnologico, in quanto dà origine al materiale ceramico in senso stretto, trasformando le materie prime dell'impasto in nuovi composti cristallini e vetrosi che conferiscono al cotto le proprietà fisico-meccaniche, strutturali e tessiturali che lo caratterizzano, come il mantenimento della forma, la solidità, la resistenza meccanica, l'impermeabilità e la resistenza chimica. La cottura consiste nel riscaldamento del manufatto essiccato fino ad una temperatura prefissata e per un tempo determinato, in modo che possano avvenire le trasformazioni chimiche e fisiche che portano l'impasto ad acquisire le proprietà suddette.

## **6.2 CARATTERIZZAZIONE DELLE MATERIE PRIME**

### *6.2.1 LE MATERIE PRIME*

Le materie prime utilizzate per la realizzazione degli impasti ceramici sono sia di tipo naturale che aggregati di riciclo.

Sono state prese in considerazione tre differenti argille naturali di provenienza geografica diversa, in particolare, l'argilla utilizzata dalla fornace Sila di Rovigo e altre due argille provenienti dalla zona del vicentino. La scelta delle argille è stata condizionata dall'ubicazione dell'impianto (area sud ovest di Rovigo) in quanto si è valutato economicamente vantaggioso utilizzare materie prime prossime al centro di riciclaggio della ditta Fenza Daniela.

Oltre a tali argille sono state scelte le frazioni TA1d e TA2d corrispondenti rispettivamente alla frazione di sabbia media/fine della "sabbia riciclata" e del "materiale riciclato 0-30", ottenute dal precedente trattamento di riduzione granulometrica e setacciatura, in accordo con la classificazione di Wentworth (1922), degli aggregati da riciclo in laboratorio.

Infine è stata impiegata anche una sabbia naturale chiamata "sabbia Colombara", usualmente impiegata dai laboratori del CNR-ISTEC, scelta allo scopo di creare i campioni di riferimento.

Le materie prime sono state quindi caratterizzate dal punto di vista chimico-mineralogico e granulometrico.

#### *6.2.1.1 ANALISI CHIMICA*

La composizione chimica dei materiali studiati espressa in percentuale in peso per gli elementi maggiori ed in parte per milioni (ppm) per le tracce consente di caratterizzare i componenti e di definire la qualità della frazione inorganica, dati essenziali per un corretto utilizzo e per comprendere le problematiche connesse al riciclaggio e l'efficienza dei processi di recupero.

Si è proceduto quindi all'analisi chimica dei materiali oggetto dello studio attraverso spettrofotometria dei raggi X di fluorescenza, metodologia che si basa sul riconoscimento delle radiazioni componenti lo spettro discontinuo emesso dal campione (analisi qualitativa) e sulla valutazione dell'intensità di determinate radiazioni, confrontata con quella di campioni a composizione nota (analisi quantitativa).

Essendo gli impasti ceramici silicatici la composizione è espressa in termini di elementi maggiori da ossidi di silicio, alluminio, titanio, ferro, magnesio, calcio, potassio e sodio (tab. 6.1). A questi parametri si aggiunge la percentuale di perdita al fuoco (L.O.I.) ovvero la diminuzione di peso, fino al valore costante, che subisce un campione di materiale per effetto del riscaldamento a 1000° C.

L'analisi in fluorescenza richiede una minimizzazione dell'effetto matrice per cui i campioni sono stati polverizzati e preparati in pasticche pressate su supporto di acido borico (elemento trasparente ai raggi x). La L.O.I. è stata ottenuta per differenza di peso tra 100 e 1000°C. (Franzini et al.).

Oltre agli elementi maggiori sono stati analizzati anche gli elementi in tracce, cioè quegli elementi presenti nel campione in quantità < 0,1 % (tab. 6.2).

#### *Risultati analitici*

Come precedentemente esposto sono stati analizzati due campioni selezionati in modo da verificare la potenzialità dell'utilizzo a fini ceramici di frazioni composizionalmente molto diverse (tab. 6.1), infatti uno dei campioni, TA1(d) presenta un quantitativo maggiore di silice, mentre nel campione TA2(d) si ha una significativa presenza di ossido di calcio e quindi di legante, che è di quasi il doppio rispetto a TA1(d), come circa la quantità di sodio. La scelta di utilizzare anche frazioni arricchite in componente carbonatica e leganti cementizi deriva dalla necessità di verificare la potenzialità di più frazioni compresa la porzione più fine arricchita nei materiali più teneri pulverulenti e quindi nella componente carbonatica. L'analisi chimica ha messo anche in evidenza che il campione ricco nei leganti presenta contributi di zolfo (tab. 6.2), comunque non rilevanti ai fini dell'utilizzo ceramico.

	SABBIE			ARGILLE		
	TA1 (d)	TA2 (d)	COLOMBARA	MOSSO	GIOMO	SILA
SiO <sub>2</sub>	55,00	36,92	83,7	56,60	53,63	51,54
TiO <sub>2</sub>	0,40	0,39	0,10	0,70	0,68	0,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,70	8,51	8,13	17,30	13,36	14,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,11	3,41	0,46	6,90	5,26	5,91
MnO	0,07	0,08	-	-	0,12	0,11
MgO	4,71	7,04	0,18	3,00	2,79	4,21
CaO	11,96	24,02	1,96	3,30	8,46	7,22
Na <sub>2</sub> O	1,61	0,95	1,77	0,80	1,26	1,10
K <sub>2</sub> O	2,31	1,57	3,55	2,10	2,47	2,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,16	0,11	-	-	0,13	0,15

Tabella 6.1- XRF elementi maggiori riscontrati nelle materie prime.

	TA1 (d)	TA2 (d)
Ba	399	308
Ce	nd	nd
Co	0	nd
Cr	64	68
La	31	34
Nb	10	8
Ni	29	25
Pb	35	46
Rb	71	47
Sr	214	284
Th	6	3
V	58	53
Y	14	11
Zn	65	33
Zr	93	81
Cu	21	19
Ga	6	1
Nd	nd	nd
S	1114	2327
Sc	8	11

Tabella 6.2- XRF elementi in tracce riscontrati nelle sabbie.

Dall'analisi chimica delle sabbie si notano inoltre importanti differenze composizionali rispetto la sabbia Colombara. La prima differenza che appare è il contenuto in silice, nettamente maggiore nella sabbia Colombara, che è una sabbia naturale feldspatica, rispetto alle sabbie TA1(d) e TA2(d) che sono sabbie ottenute dal trattamento di frantumazione e setacciatura di alcune frazioni di materiali di riciclo. Il secondo elemento maggiore presente in proporzioni notevolmente diverse dei vari campioni è il calcio, che è presente in minima parte nella sabbia Colombara, mentre si rileva in una quantità nettamente maggiore per le frazioni TA1(d) e TA2(d). La sabbia Colombara ha un contenuto di ferro intorno a 0.5% , valore nettamente più elevato nei materiali di riciclo, dato importante da valutare quando si andranno in seguito a prendere in considerazione le proprietà tecnologiche dei campioni cotti, in particolare per dati colorimetrici.

#### 6.2.1.2 ANALISI MINERALOGICA

L'analisi mineralogica porta al riconoscimento e alla quantificazione dei minerali presenti nel materiale in esame, permettendo di prevedere per quali impieghi ceramici un materiale è più adatto e quale sarà il suo comportamento nel corso del processo di lavorazione.

I campioni di materie prime, sono stati ridotti in polvere impalpabile (<10 µm) attraverso l'uso di un mortaio d'agata.

Le analisi sono state effettuate con il metodo della diffrazione di raggi X da campioni policristallini, XRD con uno strumento Philips Analytical x-ray.

Le condizioni sperimentali adottate durante la raccolta dati sono sotto riportate:

Tubo anodico: Cu  
Generatore di tensione: 40 Kv  
Generatore di corrente: 25 mA  
Lunghezza d'onda Alfa1 ( $\alpha_1$ ): 1,54060  
Lunghezza d'onda Alfa2 ( $\alpha_2$ ): 1,54439  
Rapporto di intensità ( $\alpha_1/\alpha_2$ ): 0,500  
Slitta divergente: 1°  
Slitta ricevente: 0,1  
Monocromatore: inserito  
Angolo 2θ range: 5°-70°  
Dimensioni dello step (passo di 2θ): 0,020  
Tempo per step: 2s

#### *Analisi mineralogiche qualitative*

Il riconoscimento delle fasi cristalline (tab. 6.3) dai picchi del diffrattogramma è stato effettuato per confronto con le schede della banca dati dei Powder Diffraction File (PDF).

COMPOSIZIONE MINERALOGICA QUALITATIVA	
TA1 (d)	TA2 (d)
Quarzo	Quarzo
Illite/ Muscovite	Illite/ Muscovite
Caolinite	Caolinite
Dolomite	Dolomite
Calcite	Calcite

Tabella 6.3- Composizione mineralogica qualitativa degli aggregati di riciclo utilizzati.

#### *Analisi mineralogiche quantitative delle argille*

Per quanto riguarda le argille, utilizzate nella sperimentazione, è stato possibile ricavare i dati relativi alle analisi mineralogiche quantitative (tab. 6.4) (schede fornite dal CNR).

Composizione mineralogica quantitativa(%)			
	MOSSO	GIOMO	SILA
Quarzo	27	28	32
Plagioclasio	4	9	10
Calcite	6	15	5
Dolomite	< 1	0	10
Illite	23	23	26
Clorite	11	9	6
Caolinite	9	3	0
Smectite	13	7	5
Em	5	4	4
Accessori	2	2	2

Tabella 6.4- Composizione mineralogica quantitativa delle argille (schede fornite dal CNR).

### *6.2.1.3 ANALISI GRANULOMETRICA*

La granulometria delle materie prime che costituiscono un impasto ceramico è un carattere di notevole rilevanza in quanto controlla in differente misura alcune proprietà del manufatto finito, come per esempio la porosità e la resistenza meccanica.

È possibile eseguire un'analisi granulometrica mediante setacciatura, sedimentazione del materiale disperso in acqua, diffrazione della luce laser, microscopia ottica o elettronica.

Nel nostro caso la quantità di particelle di diametro maggiore a 100 micron è stata misurata seguendo il metodo della setacciatura per via umida, mentre per le particelle più fini è stato impiegato un sedigrafo a raggi X.

L'analisi granulometria delle materie prime è importante per la comprensione dei processi in quanto come è noto dalla letteratura i processi chimico-fisici e il comportamento reologico degli impasti ceramici sono fortemente influenzati da essi. Inoltre alcuni parametri petrofisici e geotecnici del materiale a crudo e del manufatto finito, come per esempio la porosità e la resistenza meccanica, la dilatazione termica lineare ecc dipendono da esso.

#### *a - ANALISI GRANULOMETRICA DELLA FRAZIONE PIU' GROSSOLANA ATTRAVERSO SETACCIATURA PER VIA UMIDA*

La tecnica della setacciatura per via umida si basa sul principio per cui i grani con una dimensione media superiore alla luce del setaccio vengono trattenuti dallo stesso. Tale residuo viene in seguito pesato e rapportato alla quantità di campione iniziale, passando da setacci a maglie larghe a setacci a maglie più fini, si è in grado di separare e quindi quantificare le varie frazioni granulometriche in cui si suddividono le particelle. L'uso dell'acqua è finalizzato semplicemente a rendere più veloce l'analisi, imprimendo una forza sulla superficie del setaccio in modo da sollecitare le particelle ad attraversarlo.

Il limite di tale metodo è legato alla scarsa affidabilità nel separare con dimensioni inferiori di 30 micron.

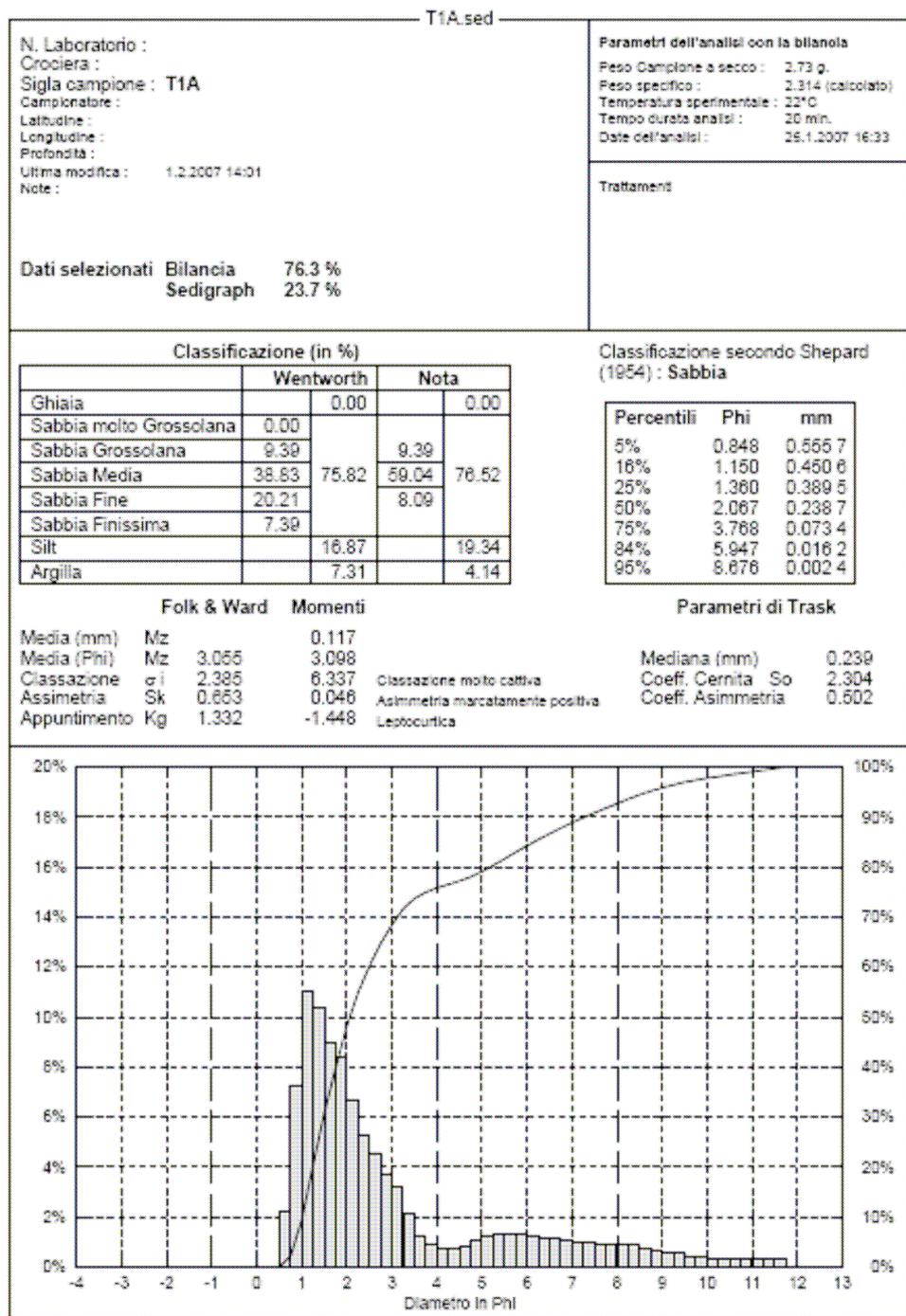


Figura 6.1- Analisi granulometrica della frazione di sabbia riciclata TA1(d).

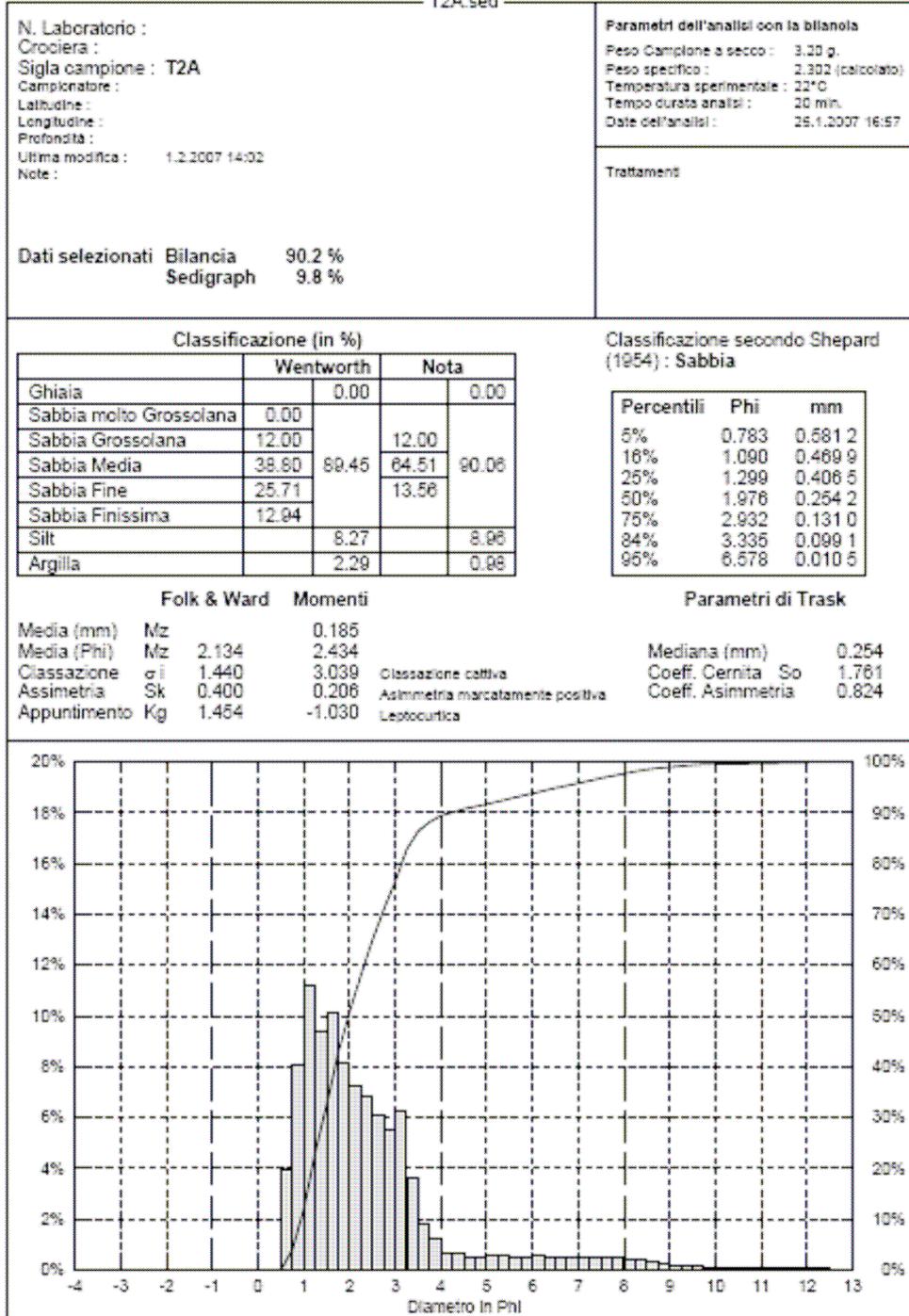


Figura 6.2- Analisi granulometrica della frazione di sabbia riciclata TA2(d).

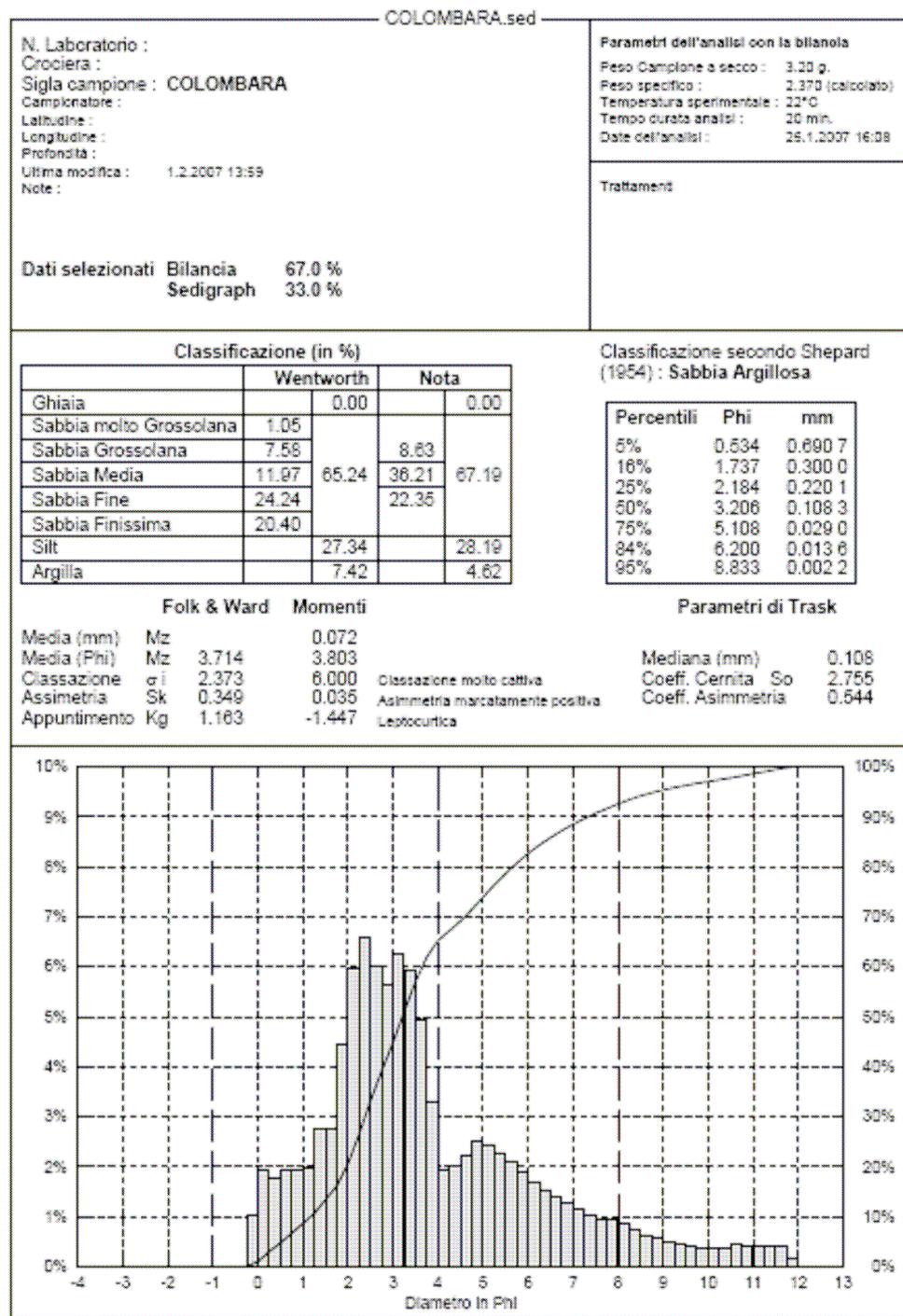


Figura 6.3- Analisi granulometrica della frazione di sabbia naturale, “Colombara”.

Dall’analisi delle frazioni granulometriche delle tre frazioni di sabbia utilizzate (fig.6.1, fig.6.2, fig.6.3), si può notare che la sabbia Colombara è tra le tre la sabbia più dispersa, cioè la meno selezionata, tanto che presenta una classazione “molto cattiva”, mentre le sabbie TA1(d) e TA2(d) sono un po’ meno disperse ma presentano comunque una “cattiva classazione”. Per quanto concerne la dimensione media delle particelle, delle tre sabbie quella che presenta clasti più fini è la sabbia Colombara. Le frazioni di sabbia riciclata messe a confronto tra loro mostrano che la

frazione TA1(d) presenta un valore medio dei clasti minore della sabbia TA2(d), e pertanto quest'ultima è più grossolana.

*b - ANALISI GRANULOMETRICA DELLA FRAZIONE PIU' FINE ATTRAVERSO SEDIGRAFO A RAGGI X*

Al fine di determinare la distribuzione granulometrica delle particelle più fini (il metodo dei setacci non è in grado di separare in modo affidabile particelle <30 micron) è stato utilizzato un sedigrafo a raggi x modello Sedigraph 5100 della Micrometrics.

Tale strumento permette di separare le particelle sfruttando la forza di gravità e la diversa velocità di caduta delle stesse, regolata dalla legge di Stokes:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - d}{\eta} \cdot g \cdot r^2$$

dove:

$\rho$  = densità del materiale

$d$  = densità del fluido

$g$  = accelerazione di gravità

$r$  = raggio della particella considerata convenzionalmente come sferica

$\eta$  = viscosità del fluido

Il sedigrafo a raggi x determina la granulometria sulla base della variazione della trasparenza della sospensione attraversata, nel corso della sedimentazione da un fascio di raggi x.

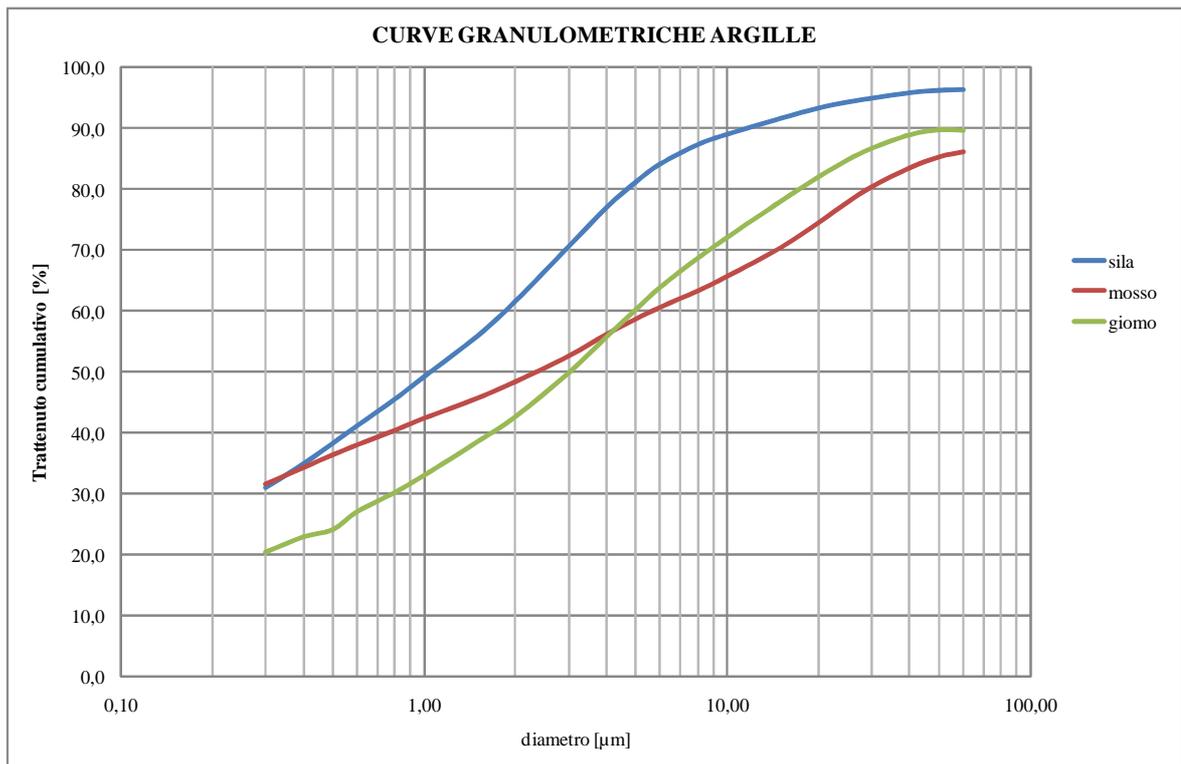


Figura 6.4- Distribuzione granulometrica delle argille (Sila, Mosso e Giomo).

Le granulometrie delle tre argille utilizzate (fig.6.4), mettono in evidenza una migliore cassazione per l'argilla Sila rispetto alle altre due argille. Andando ad analizzare le differenze dimensionali si riscontra che l'argilla Sila è quella con una dimensione media dei clasti inferiore rispetto alle altre, e tra queste ultime, si nota che la Giomo ha un diametro medio dei clasti maggiore dell'argilla Mosso. Come si può osservare in figura 6.4 il diametro medio dell'argilla Sila è di  $1\mu\text{m}$ , dell'argilla Mosso è  $2\mu\text{m}$  e dell'argilla Giomo è  $3\mu\text{m}$ .

### 6.3 SIMULAZIONE DEL CICLO PRODUTTIVO E CARATTERIZZAZIONE TECNOLOGICA

#### 6.3.1 PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEGLI IMPASTI

In seguito alla caratterizzazione delle materie prime sotto sia l'aspetto chimico che granulometrico, è iniziata la fase di progettazione, realizzazione e caratterizzazione delle miscele.

##### 6.3.1.1 DOSAGGIO MISCELAZIONE ED UMIDIFICAZIONE DEGLI IMPASTI

Dopo aver scelto le materie prime da impiegare per la realizzazione degli impasti ceramici, ed averle caratterizzate, ha avuto luogo la fase di trattamento.

Per prima cosa le argille sono state messe in stufa per circa 24 ore a 105°C, si è quindi proceduto alla disgregazione, facendole passare attraverso un frantoio a mascelle e successivamente, attraverso un mulino a martelli con setaccio di diametro di 1 mm.

Anche le sabbie riciclate sono state messe in stufa ad asciugare e successivamente setacciate attraverso il mulino a martelli con setaccio del diametro di 1 mm.

Dopo aver preparato i materiali si è proceduto a creare nove differenti impasti da sottoporre al ciclo produttivo sperimentale.

Gli impasti (tab. 6.5) sono stati formulati andando a creare:

- tre campioni standard di riferimento, ottenuti mescolando ogni argilla (Sila, Mosso, Giomo) con la sabbia naturale Colombara, ( S0, M0, G0);
- tre provini mescolando le tre argille con l'aggregato di riciclo TA1, ( STA1, MTA1, GTA1);
- tre provini mescolando le tre argille con l'aggregato TA2, ( STA2, MTA2, GTA2).

FORMULAZIONE IMPASTI					
IMPASTO S0		IMPASTO STA1		IMPASTO STA2	
Materia prima	% impasto	Materia prima	% impasto	Materia prima	% impasto
Argilla Sila	85,0	Argilla Sila	85,0	Argilla Sila	85,0
Sabbia Colombara	15,0	Sabbia Colombara	0,0	Sabbia Colombara	0,0
MP Demolizione TA1	0,0	MP Demolizione TA1	15,0	MP Demolizione TA1	0,0
MP Demolizione TA2	0,0	MP Demolizione TA2	0,0	MP Demolizione TA2	15,0
<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>Totale</b>	<b>100,0</b>
IMPASTO G0		IMPASTO GTA1		IMPASTO GTA2	
Materia prima	% impasto	Materia prima	% impasto	Materia prima	% impasto
Argilla Giomo	85,0	Argilla Giomo	85,0	Argilla Giomo	85,0
Sabbia Colombara	15,0	Sabbia Colombara	0,0	Sabbia Colombara	0,0
MP Demolizione TA1	0,0	MP Demolizione TA1	15,0	MP Demolizione TA1	0,0
MP Demolizione TA2	0,0	MP Demolizione TA2	0,0	MP Demolizione TA2	15,0
<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>Totale</b>	<b>100,0</b>
IMPASTO M0		IMPASTO MTA1		IMPASTO MTA2	
Materia prima	% impasto	Materia prima	% impasto	Materia prima	% impasto
Argilla Mosso	85,0	Argilla Mosso	85,0	Argilla Mosso	85,0
Sabbia Colombara	15,0	Sabbia Colombara	0,0	Sabbia Colombara	0,0
MP Demolizione TA1	0,0	MP Demolizione TA1	15,0	MP Demolizione TA1	0,0
MP Demolizione TA2	0,0	MP Demolizione TA2	0,0	MP Demolizione TA2	15,0
<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>Totale</b>	<b>100,0</b>

Tabella 6.5- Composizione delle miscele ceramiche prodotte.

### 6.3.1.2 PLASTICITA' SECONDO IL METODO DI ATTEMBERG

Lo studio dei caratteri di plasticità dei vari impasti risulta fondamentale per delineare il comportamento del materiale durante l'intero processo di lavorazione principalmente durante la fase di foggatura.

Per testare la plasticità degli impasti realizzati, è stato utile il metodo di Attemberg, secondo la normativa CNR-UNI 10014 "Prove su terre: determinazione dei limiti di consistenza (o di Attemberg) di una terra" (fig. 6.7).

Tali limiti di consistenza sono i valori di umidità assunti convenzionalmente per caratterizzare i passaggi di un materiale coesivo dallo stato liquido a quello plastico (limite di liquidità,  $W_l$ ) e dallo stato plastico a quello semisolido (limite di plasticità,  $W_p$ ). La differenza tra il limite di liquidità e quello di plasticità è detto indice di plasticità ( $I_p = W_l - W_p$ ).

La determinazione del limite plastico ( $W_p$ ) avviene quantificando il contenuto d'acqua al di sotto del quale è impossibile modellare l'argilla senza provocare evidenti crepe nei provini cilindrici foggati manualmente (del diametro di circa 3mm e della lunghezza di 5-10mm).

$W_l$  sarà quindi la perdita di peso percentuale del provino essiccato in stufa a  $105^\circ\text{C}$ , corrispondente all'umidità assorbita.

Il limite liquido ( $W_l$ ) si determina con il "Cucchiaio di Casagrande", contando i colpi necessari alla chiusura del solco tracciato diametralmente nell'impasto disposto nell'incavo del cucchiaio. Successivamente si costruisce un diagramma "% d'acqua ( $W$ ) - numero di colpi" e per convenzione si desume che  $W_l$  sia l'intercetta di  $W$  a 25 colpi

Proprio grazie a questa prova è stato possibile determinare la quantità di acqua necessaria per l'umidificazione dei diversi impasti (tab. 6.6).

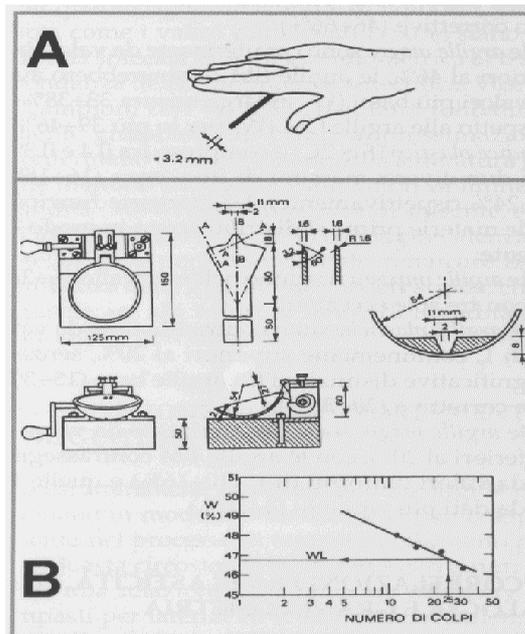


Figura 6.7- Valutazione del possibile comportamento in foggatura degli impasti prodotti.

campioni	limite plastico (Wp)	limite liquido (Wl)	indice di plasticità (Ip)
MO	20,3 ± 0,5	36,0 ± 1,8	15,7 ± 1,1
MTA1	20,3 ± 0,5	38,5 ± 4,5	18,1 ± 2,5
MTA2	21,2 ± 0,5	40,7 ± 3,5	19,5 ± 2,0
SO	26,9 ± 0,6	51,7 ± 7,4	24,8 ± 4,0
STA1	28,2 ± 0,9	53,4 ± 2,6	25,3 ± 1,8
STA2	30,1 ± 1,3	53,7 ± 2,5	23,6 ± 1,9
GO	24,2 ± 0,5	46,1 ± 4,1	21,9 ± 2,3
GTA1	25,5 ± 0,7	46,6 ± 2,8	21,1 ± 1,8
GTA2	25,8 ± 0,7	47,4 ± 2,7	21,7 ± 1,7

Tabella 6.6- Valori di Wp, Wl, e Ip corrispondenti a ciascuno dei 9 impasti.

A seconda del tipo di argilla utilizzata si evidenzia una variazione dei valori ricavati con i limiti di Attemberg, in particolare delle tre, l'argilla Mosso è quella che presenta i valori inferiori, mentre l'argilla Sila quella che presenta i valori più elevati.

Andando ad analizzare le variazioni comportate a tali limiti, in seguito all'aggiunta delle sabbie di riciclo, si vede che tendenzialmente l'introduzione di queste porta per qualsiasi argilla si consideri un aumento dei valori ottenuti per definire i limiti di Attemberg, ed in particolare l'introduzione della frazione TA2 comporta un ulteriore sensibile aumento rispetto alla frazione TA1.

In seguito i dati misura per il limite liquido (Wl), il limite plastico (Wp) e l'indice di plasticità (Ip) sono stati riportati in due diagrammi derivanti dalla letteratura (M. Marsili et al.) che permettono a priori di capire come possano comportarsi gli impasti nella fase di foggatura (fig.6.8).

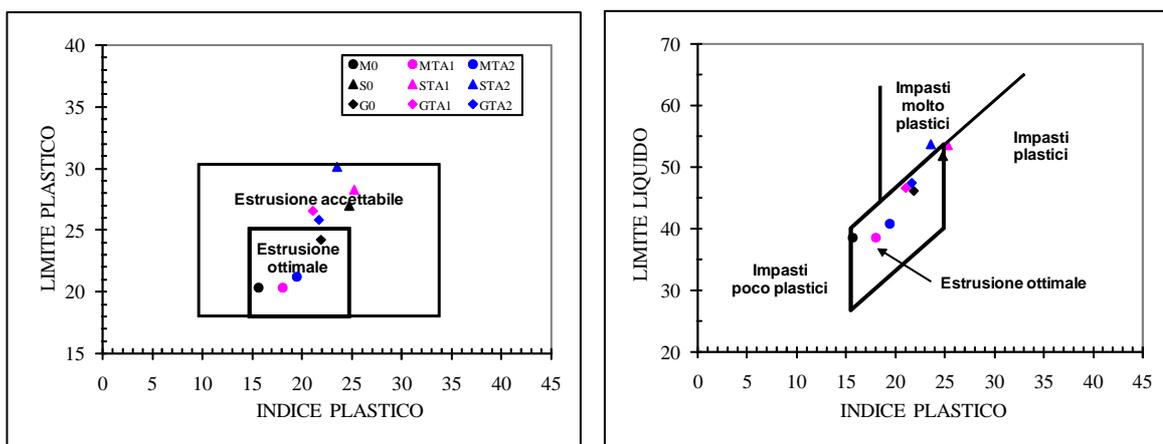


Figura 6.8- Valutazione del possibile comportamento in foggatura degli impasti prodotti.

Da tali prove risulta ottimale l'utilizzo dell'argilla mosso, mentre meno efficace ai fini del trattamento a crudo è l'utilizzo dell'argilla Sila caratterizzata da un'elevata plasticità.

Gli impasti di riferimento realizzati miscelando rispettivamente ciascuna argilla con la sabbia Colombara, tendono a ricadere all'interno del campo di estrusione ottimale soprattutto nel grafico che riporta il limite plastico nell'asse delle ordinate. Si nota altresì che la sostituzione della sabbia Colombara con le frazioni di sabbia riciclata TA1(d) e TA2(d), porta un aumento del limite plastico e pertanto sposta alcune miscele dal campo di estrusione ottimale e il campo di estrusione accettabile.

Comunque nel complesso l'estrusione degli impasti realizzati con l'aggregato di riciclo è da considerarsi ottimale o comunque accettabile come evidenzia anche dal grafico che riporta il valore del limite liquido nell'asse delle ordinate.

#### *6.3.1.3. UMIDIFICAZIONE DEGLI IMPASTI*

Una fase particolarmente delicata del ciclo produttivo è la fase di umidificazione degli impasti, poiché è importante aggiungere la giusta quantità d'acqua, ma è difficile prevederne il valore. Per fare ciò gli impasti sono stati umidificati nebulizzando sulla miscela secca una quantità di acqua precedentemente individuata grazie ai limiti di Attemberg.

Per ottenere un comportamento ottimale dell'impasto in foggatura, dopo l'umidificazione è stata eseguita una stagionatura di 24 ore.

##### *6.3.1.3.1 DETERMINAZIONE DELL'ACQUA DI IMPASTO*

Per determinare l'acqua contenuta all'interno delle miscele realizzate (tab. 6.7), sono stati prelevati, prima dell'estrusione, dei piccoli campioni di impasto umidificato, che sono quindi stati pesati e posti in stufa a 105 °C per 48 ore. Al termine di tale periodo sono stati estratti dalla stufa e pesati di nuovo. L'acqua contenuta nel campione è stata quindi determinata in funzione della perdita in peso percentuale del campione secco.

$$W_i = \frac{(P_u - P_e)}{P_e} \cdot 100$$

dove:

$P_u$  = peso impasto umido (g)

$P_e$  = peso impasto secco (g)

<b>campioni</b>	<b>Peso impasto umido Pu (g)</b>	<b>Peso impasto secco Pe (g)</b>	<b>Acqua di impastamento Wi (%)</b>
MO	83,47	69,34	20,4
MTA1	62,60	51,89	20,6
MTA2	60,31	49,77	21,2
SO	87,06	68,72	26,7
STA1	97,21	75,99	27,9
STA2	79,48	61,18	29,9
GO	99,59	79,32	25,6
GTA1	72,02	57,09	26,2
GTA2	82,72	65,29	26,7

Tabella 6.7- Umidità di impastamento percentuale.

L'acqua d'impastamento varia a seconda dell'argilla utilizzata, in particolare è minore per l'argilla Mosso e maggiore dell'argilla Sila. Se in particolare prendiamo in esame gli impasti realizzati con l'argilla Sila notiamo che l'inserimento delle frazioni riciclate porta in generale un aumento dell'acqua d'impastamento, l'impasto realizzato con la frazione TA2(d) richiede più acqua rispetto all'impasto realizzato con TA1(d).

### *6.3.2 SIMULAZIONE DEL CICLO PRODUTTIVO SU SCALA DI LABORATORIO*

E' noto che il comportamento tecnologico di un manufatto ceramico non dipende esclusivamente dalle caratteristiche intrinseche dell'argilla che lo costituisce, ma è fortemente influenzato anche dal processo di lavorazione a cui viene sottoposto.

Per poter caratterizzare in maniera esauriente i caratteri tecnologici di un prodotto quale un laterizio, è dunque necessario analizzare il comportamento delle materie prime durante tutto il ciclo di lavorazione. Per fare ciò è stato dunque necessario riprodurre, su scala di laboratorio il ciclo produttivo adottato dall'industria.

Risulta di notevole importanza, durante una simulazione su scala di laboratorio, tener conto delle differenze esistenti nel ciclo di lavorazione dei diversi tipi di ceramica. Infatti le proprietà tecnologiche dei semilavorati e dei cotti sono significativamente differenti se si confrontano manufatti ottenuti a partire dalla stessa argilla, ma foggiate per esempio con estrusione o pressatura, o cotti con forno a tunnel o a rulli. Per queste ragioni, la dotazione strumentale necessaria per eseguire le prove di laboratorio dovrà essere il più possibile fedele a quella utilizzata durante il processo industriale.

### 6.3.2.1 ESTRUSIONE CON TRAFILA PNEUMATICA

La foggatura dei listelli sperimentali è stata effettuata per trafilatura allo stato plastico grazie ad un estrusore pneumatico ad aria compressa (fig. 6.9).



Figura 6.9- Estrusione degli elementi.

Il rapporto di compressione dell'estrusore utilizzato è dato da:

$$\frac{A_{ep}}{A_{bt}} = 14$$

dove:

$A_{ep}$  = area del pistone;

$A_{bt}$  = bocca della trafila

Per ciascun impasto sono stati prodotti non meno di 15 listelli con dimensioni 10x2x1 cm.

### 6.3.2.2 ESSICCAZIONE

L'essiccazione è una delle fasi più importanti e delicate del processo di fabbricazione dei laterizi e può influire in modo sostanziale sulla quantità e sulle prestazioni dei prodotti finiti. Si tratta sostanzialmente di un processo fisico che comprende due aspetti fondamentali: il trasferimento di calore (riscaldamento del materiale ed evaporazione dell'acqua) e il trasferimento di massa (migrazione dell'acqua all'interno del manufatto e diffusione del vapore acqueo nell'atmosfera).

Il comportamento di un'argilla in essiccamento (fig. 6.10) dipende, oltre che dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità relativa, ecc..), alla microstruttura, la quale influenza la tensione capillare e la diffusione dell'acqua nel semilavorato.

L'essiccazione di un'argilla avviene in due fasi successive:

- I. L'evaporazione avviene alla superficie del manufatto con *tasso costante*, in quanto l'acqua rimossa viene continuamente rimpiazzata da altra acqua proveniente dall'interno del pezzo. A tale processo è associata una ristrutturazione del materiale, che si contrae progressivamente sino al punto critico (Pcr), oltre il quale non si ha più ritiro. Tale contrazione si protrae finché il raggio del menisco acqua-aria ( $r_m$ ) resta maggiore del raggio dei pori del materiale ( $r_p$ ): al punto critico i due raggi sono uguali.
- II. L'essiccazione prosegue senza più alcun ritiro del manufatto. Non si ha più evaporazione alla superficie, ormai secca, ma all'interno della porosità del materiale con un *tasso calante* progressivamente sino all'esaurimento dell'acqua.

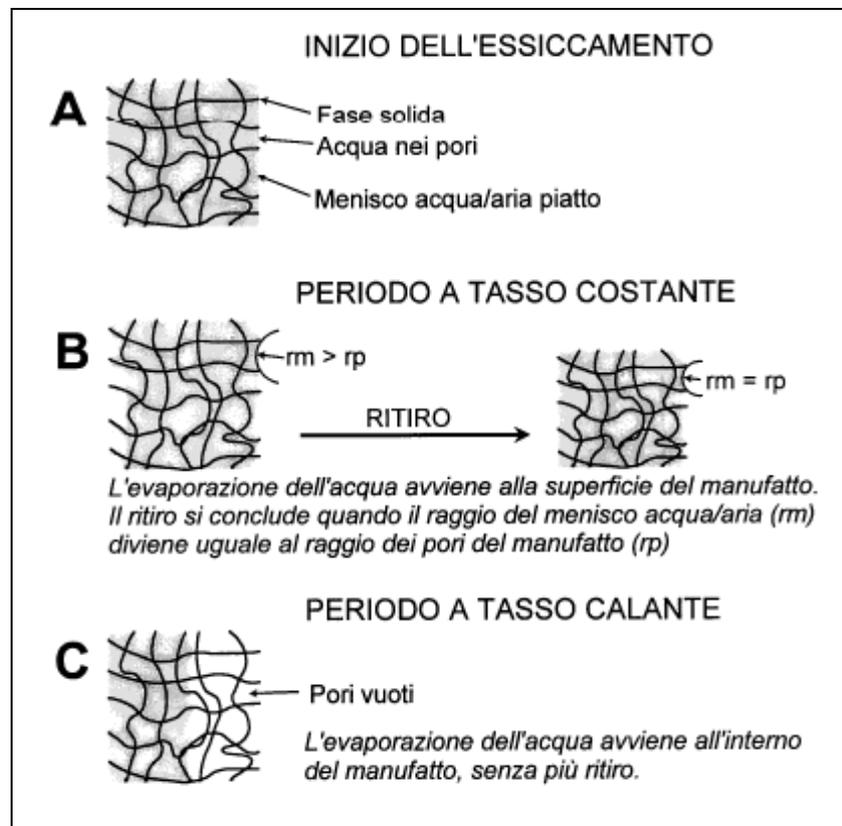


Figura 6.10- Schema teorico del comportamento di un manufatto argilloso durante l'essiccazione.

Le difficoltà principali che si incontrano nell'essiccazione riguardano essenzialmente la fase a tasso di evaporazione costante, perché in questo primo periodo del processo, modeste differenze di umidità da un punto all'altro del manufatto possono generare dei ritiri differenziali e quindi delle tensioni in grado di danneggiare il prodotto.

### 6.3.2.3 COTTURA

La cottura è stata fatta attraverso l'uso di un forno in aria con un ciclo di 48 ore da freddo a freddo (cioè i campioni sono stati tolti dal forno solo dopo essersi oltre che cotti, anche raffreddati), fino al raggiungimento delle temperature prefissate per i vari impasti.

In particolare gli impasti realizzati con l'argilla Mosso sono stati portati alla temperatura massima di 900 °C, quelli realizzati con l'argilla Sila invece hanno raggiunto la temperatura massima di 950 °C, ed infine gli impasti realizzati mediante l'impiego dell'argilla Giomo, sono stati portati a raggiungere la temperatura massima di 940 °C.

### 6.3.3 CARATTERIZZAZIONE TECNOLOGICA DEI LISTELLI ESSICCATI E DEI PRODOTTI DI COTTURA

#### 6.3.3.1 CARATTERIZZAZIONE DEI LISTELLI ESSICCATI

Lo studio delle proprietà tecnologiche dei listelli essiccati è fondamentale allo scopo di individuare eventuali correlazioni presenti tra il comportamento del materiale in essiccamento e la microstruttura dei semilavorati.

E' noto che esiste una reale interdipendenza dei parametri microstrutturali, come la distribuzione dimensionale dei pori e la porosità, con proprietà tecnologiche quali l'acqua d'impastamento, il ritiro lineare, la resistenza a flessione e l'indice di sensibilità all'essiccamento.

#### 6.3.3.1.1 DETERMINAZIONE DEL RITIRO LINEARE IN ESSICCAMENTO PERCENTUALE

Per uno studio completo del comportamento del materiale in essiccamento è necessario stimare l'entità del ritiro lineare percentuale dei semilavorati (tab. 6.8).

Il RLE% è stato utilizzato, durante la misurazione delle curve di Bigot, al fine di determinare l'indice di sensibilità all'essiccamento (ISE).

Tale determinazione è stata effettuata tracciando un solco della lunghezza di 7 cm ( $L_v$ ) sui listelli verdi. In seguito i listelli sono stati fatti permanere a temperatura ambiente per 48 ore - avendo cura di ruotarli di 90° attorno all'asse maggiore ogni 2-3 ore per le prime 12 ore e poi ogni 4-6 ore, al fine di assicurarne la planarità - e successivamente in stufa a 105° C per 24 ore.

Dopo aver svolto tale procedimento i listelli sono stati misurati una seconda volta ed è stata determinata l'entità del ritiro in essiccamento grazie alla seguente formula:

$$RLE \% = \frac{L_v - L_s}{L_v} \cdot 100$$

dove:

RLE %: ritiro lineare in essiccamento percentuale (%)

$L_v$ : lunghezza solco nei listelli verdi (mm)

$L_s$ : lunghezza solco nei listelli secchi (mm)

h: spessore minimo del campione misurato dopo la prova lungo il bordo di rottura (mm)

campioni	MO	MTA1	MTA2	SO	STA1	STA2	GO	GTA1	GTA2
Media	5,51	5,46	5,10	6,77	6,77	6,5	7,00	6,71	6,10
d.s.	0,24	0,18	0,10	0,35	0,30	0,20	0,27	0,18	0,30

Tabella 6.8- Valori relativi al ritiro lineare in seguito alla fase di essiccamento dei listelli prodotti.

Dai dati ricavati dalla misurazione del ritiro in seguito all'essiccamento si vede che tendenzialmente gli impasti realizzati con l'argilla Mosso presentano un ritiro inferiore rispetto agli altri.

L'introduzione delle sabbie da riciclo nelle differenti argille, porta ad una diminuzione del ritiro ed in particolare le miscele realizzate con la frazione TA2 presentano un ritiro ancora minore rispetto a quelle realizzate con la frazione TA1(D).

#### *6.3.3.1.2 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA MECCANICA A FLESSIONE DEI LISTELLI ESSICCATI*

Oltre alle considerazioni sul prodotto cotto, nell'ambito delle operazioni del processo produttivo, acquistano grande interesse anche i valori della resistenza meccanica del prodotto secco, perché essi si devono prestare a varie operazioni di scarico, trasporto ed impacchettamento senza rompersi e fessurarsi.

La resistenza meccanica a flessione del secco dipende in maniera diretta delle percentuali delle varie componenti argillose e dalla loro granulometria. E' noto infatti che il potere coesivo del secco cresce all'aumentare della frazione colloidale presente nelle argille. In queste condizioni infatti aumenta la superficie specifica e quindi le superfici di contatto su cui si sviluppano le forze di legame, l'attività chimica e lo scambio ionico. In modo indiretto, essa dipende dal grado e dalle modalità di essiccazione, dalla forma del pezzo, dalla quantità d'acqua nell'impasto e dalle dimensioni granulometriche degli inerti e dalla loro omogeneizzazione nella massa.

La prova è stata svolta determinando la resistenza a flessione di listelli essiccati interi delle dimensioni di 10x2x1 cm (tab. 6.9) per mezzo di un carico applicato su tre punti, con il punto centrale di carico in contatto con la superficie di esercizio della piastrella.

Lo strumento utilizzato per effettuare la prova è un Netzsche Geratebau (fig.6.11).

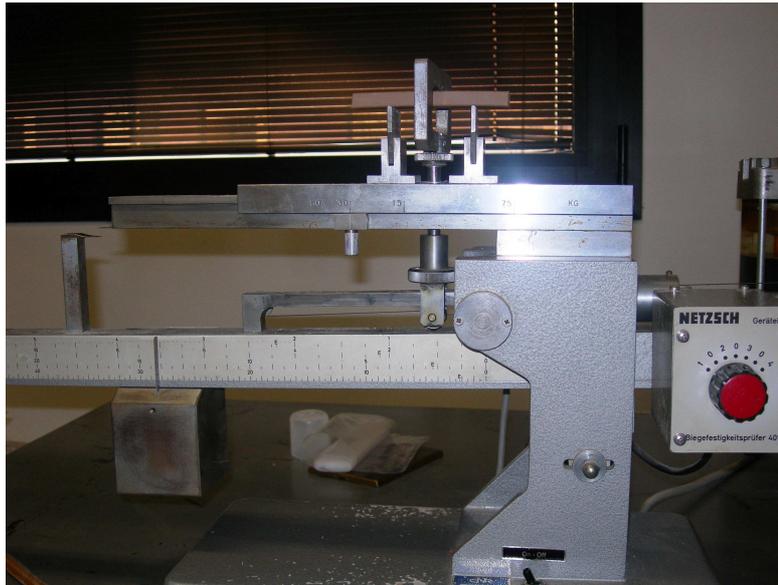


Figura 6.11- Prova di resistenza a flessione nei prodotti essiccati.

La resistenza a flessione come già visto in precedenza, è espressa in  $N/mm^2$  (MPa) ed è data:

$$\rho = \frac{3FL}{2bh^2}$$

dove:

$\rho$ : resistenza a flessione (MPa)

F: carico di rottura applicato dallo strumento (N)

L: distanza tra i rulli di supporto (mm)

b: larghezza del provino (mm)

h: spessore minimo del campione misurato dopo la prova lungo il bordo di rottura (mm)

campioni		MO	MTA1	MTA2	SO	STA1	STA2	GO	GTA1	GTA2
$\rho$ (MPa)	Media	8,3	8,2	8,0	8,6	9,7	7,2	9,4	10,0	8,4
	d.s.	0,2	0,6	0,2	0,5	0,4	0,5	1,0	0,8	0,4

Tabella 6.9- Dati relativi ai valori di resistenza a flessione rilevati sui listelli essiccati.

È possibile affermare che tutti gli impasti realizzati con la frazione di riciclo TA1(d) presentano una resistenza a flessione maggiore rispetto a quelli realizzati con la sabbia Colombara, e tutti hanno resistenza a flessione maggiore degli impasti realizzati con la frazione di riciclo TA2(d).

### 6.3.3.1.3 CURVE DI BIGOT

I metodi per valutare la sensibilità all'essiccamento delle argille sono numerosi e mirano tutti a determinare, direttamente o indirettamente, la quantità d'acqua che si allontana, con particolare riguardo alla frazione che, evaporando, è associata ad un contemporaneo ritiro del materiale. In particolare, nel corso di questo studio, è stato utilizzato il metodo della misurazione della curva di Bigot (fig. 6.12), (vedi appendice).

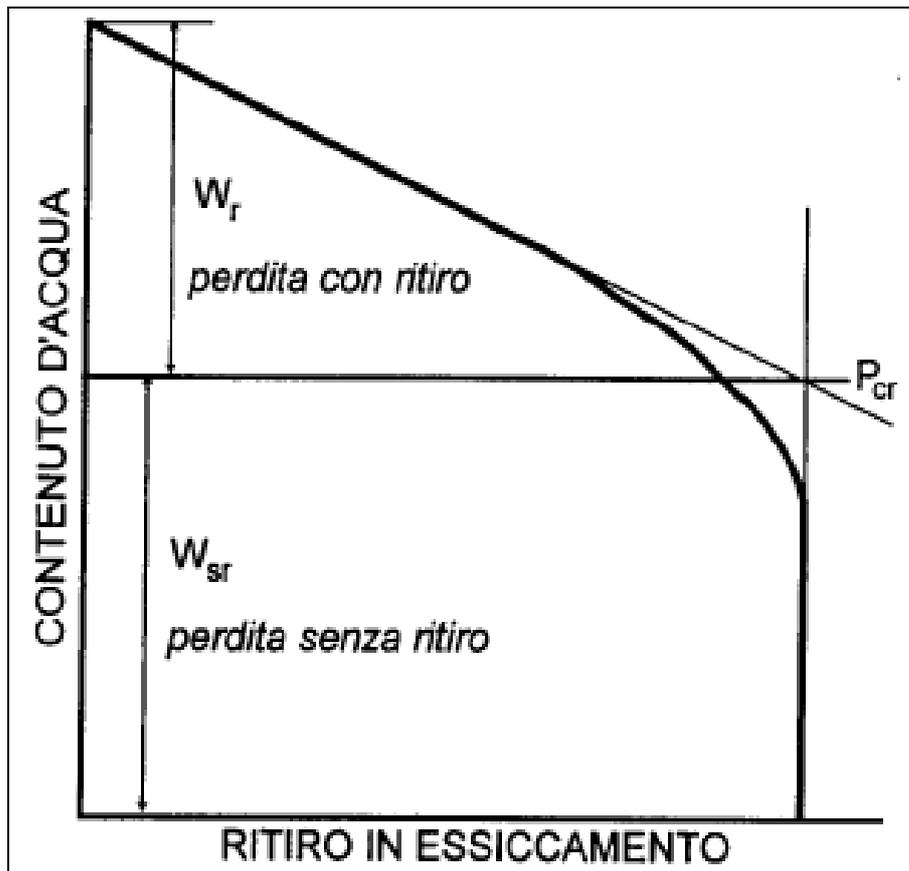


Figura 6.12- Esempio di curva di Bigot di un materiale argilloso, con metodo grafico per ricavare il punto critico ( $P_{cr}$ ) e calcolare le perdite di peso con e senza ritiro.

Col termine "curva di Bigot" si definisce la curva di variazione del contenuto d'acqua in funzione del ritiro di essiccamento, determinata con un'apparecchiatura detta barelattografo.

La prova è stata condotta su campioni estrusi di circa  $5 \text{ cm}^3$ , con un contenuto d'acqua iniziale ( $W_0$ ) corrispondente al valore ottimale per la formatura.

Grazie all'impiego di un barelattografo Adamel, è stato possibile costruire la curva di essiccamento di ciascuno dei 9 impasti realizzati.

Il barelattografo funziona come una bilancia a due piatti, su uno dei quali è posto un campione (provino) del materiale umido, l'altro piatto è essenzialmente un contrappeso costituito da un

sistema di leve e da una punta scrivente collegati al provino. Durante l'essiccamento, dopo un'iniziale situazione di equilibrio della bilancia, la diminuzione di peso del provino per effetto dell'evaporazione dell'acqua in esso contenuta determina uno spostamento verticale del giogo della bilancia dal lato della punta scrivente, mentre nello stesso tempo la conseguente contrazione del provino, amplificata dal sistema di leve, provoca uno spostamento orizzontale della stessa punta. Pertanto al trascorrere del tempo d'essiccamento si ottiene un caratteristico grafico indicante in verticale le diminuzioni di peso ed in orizzontale il ritiro.

Dalla curva di Bigot sono stati estrapolati i valori corrispondenti alla quantità d'acqua persa con il ritiro ( $W_r$ ) e senza ritiro ( $W_{sr}$ ) grazie ai quali sono stati calcolati la sensibilità all'essiccamento,  $b = W_r / W_{sr}$  e l'indice di sensibilità all'essiccamento  $ISE = W_r$ . In particolare un'alta sensibilità all'essiccamento è definita da valori elevati di ISE e bassi Sb (tab. 6.10).

<b>campioni</b>	<b>W<sub>0</sub>%</b>	<b>W<sub>sr</sub> %</b>	<b>W<sub>r</sub> %</b>	<b>ISE</b>	<b>Sb</b>	<b>RLE%</b>
M0	20,4	53,0	47,0	0,71	0,89	5,51
MTA1	20,6	45,0	55,0	0,78	1,22	5,46
MTA2	21,2	49,5	50,5	0,80	1,02	5,10
S0	26,7	61,0	39,0	0,91	0,64	6,77
STA1	27,9	53,5	46,5	0,81	0,87	6,77
STA2	29,9	57,0	43,0	0,84	0,75	6,50
G0	25,6	52,0	48,0	0,83	0,92	7,00
GTA1	26,2	47,0	53,0	0,82	1,13	6,71
GTA2	26,7	50,5	49,5	0,84	0,98	6,10

Tabella 6.10- Parametri derivati dalla misurazione delle curve di Bigot.

Dalle curve di Bigot, emerge che gli impasti presentano una sensibilità all'essiccamento ottimale, ed un indice di sensibilità all'essiccamento accettabile, pertanto si può affermare che gli impasti formulati presentano un buon comportamento in fase di estrusione.

### 6.3.3.2 CARATTERIZZAZIONE TECNOLOGICA DEI LISTELLI COTTI

Al fine di studiare il comportamento in cottura dei laterizi oggetto di questo studio è stato necessario, in primo luogo, analizzare gli aspetti tecnologici dei materiali ottenuti attraverso la simulazione del ciclo produttivo.

L'obiettivo di questa parte di lavoro è di determinare i principali parametri tecnologici dei cotti (ritiro, resistenza meccanica, assorbimento d'acqua, attitudine alle efflorescenze saline, colore) al fine di poter, in seguito valutare l'influenza della composizione mineralogica e granulometria delle materie prime sulle proprietà di tali prodotti.

### 6.3.3.2.1 DETERMINAZIONE DEL RITIRO LINEARE IN COTTURA PERCENTUALE

Nel corso del procedimento di cottura ha luogo una contrazione del campione, generalmente dovuta all'evaporazione delle fasi volatili, alla dissociazione dei carbonati e alla conseguente ristrutturazione del materiale con diffusione di Ca e Mg a formare nuove fasi cristalline.

L'entità di tale ritiro è stata calcolata misurando, al termine della cottura, il solco di 7 cm effettuato sui listelli verdi. Relazionando tale misura con la lunghezza media di tale solco sui corrispondenti campioni essiccati si è in grado di calcolare l'entità del ritiro lineare percentuale in seguito alla cottura (tab. 6.11).

$$\text{RLC \%} = \frac{L_s - L_c}{L_c} \cdot 100$$

dove:

RLC %: ritiro lineare in cottura percentuale

$L_c$ : lunghezza solco nei listelli cotti (mm)

$L_s$ : lunghezza solco nei listelli essiccati (mm)

campioni		MO	MTA1	MTA2	SO	STA1	STA2	GO	GTA1	GTA2
RLC	Media	0,54	0,54	1,08	0,46	0,49	1,01	0,43	0,74	1,19
%	d.s.	0,14	0,14	0,13	0,31	0,25	0,28	0,35	0,35	0,33

Tabella 6.11- Valori relativi al ritiro lineare in seguito alla fase di cottura dei listelli prodotti.

Dai dati determinati per il ritiro lineare in cottura, si evidenzia un andamento confrontabile tra gli impasti che sono stati realizzati impiegando la sabbia naturale (MO, SO, GO) e quelli realizzati con l'aggregato di riciclo TA1(d) (MTA1, STA1, GTA1), ed in generale tale ritiro risulta avere valori inferiori rispetto agli impasti formulati usando l'aggregato riciclato TA2(d) (MTA2, STA2, GTA2).

### 6.3.3.2.2 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA MECCANICA A FLESSIONE DEI LISTELLI COTTI

Il valore della resistenza meccanica a flessione del cotto è un punto di arrivo del processo tecnologico e una delle proprietà funzionali più importanti dei laterizi. Tale parametro, infatti, è sempre influenzato in maniera complessa dalle caratteristiche microstrutturali del prodotto, le quali, a loro volta sono dipendenti dalla composizione dell'impasto argilloso e dalle condizioni del processo di lavorazione. Il prodotto cotto possiede valori di resistenza meccanica superiori a quelle del prodotto essiccato in quanto, durante la cottura, hanno luogo modificazioni strutturali che conferiscono al materiale una maggiore coesione.

Già durante il preriscaldamento si verificano trasformazioni del reticolo cristallino delle argille, le quali perdono l'acqua e gli ossidrili, distruggendo i legami preesistenti.

Aumentando ancora le temperature avvengono reazioni chimiche che danno luogo a nuove fasi mineralogiche, tenute assieme da nuovi legami chimici (all'interno delle nuove fasi mineralogiche), e di nuovi punti di contatto tra i grani, chiamati impropriamente "legami ceramici". Durante queste trasformazioni si verificano variazioni di volume e talvolta casi di fusione parziale.

Tale indagine è stata pertanto effettuata allo scopo di valutare la presenza di eventuali correlazioni tra i caratteri mineralogici e microstrutturali del prodotto finito.

La prova è stata svolta determinando, secondo normativa, la resistenza a flessione su listelli interi delle dimensioni di 10x2x1 cm (tab. 6.12), utilizzando un crometro *Gabbrielli* (fig. 6.13).

La resistenza a flessione come già visto in precedenza, è espressa in N/mm<sup>2</sup> (MPa) ed è data:

$$\rho = \frac{3FL}{2bh^2}$$

dove:

$\rho$ : resistenza a flessione (MPa)

F: carico di rottura applicato dallo strumento (N)

L: distanza tra i rulli di supporto (mm)

b: larghezza del provino (mm)

h: spessore minimo del campione misurato dopo la prova lungo il bordo di rottura (mm)



Figura 6.13- Crometro *Gabbrielli*.

I valori di resistenza a flessione rilevati sono riportati nella tabella sottostante.

campioni		MO	MTA1	MTA2	SO	STA1	STA2	GO	GTA1	GTA2
ρ (MPa)	Media	10,95	10,55	8,32	16,30	18,10	17,99	14,81	15,45	15,58
	d.s.	0,28	0,59	0,70	1,55	1,90	0,68	0,87	0,63	0,53

Tabella 6.12- Valori di resistenza a flessione rilevati sui listelli cotti.

Dai dati ricavati dalla misurazione della resistenza a flessione in cottura (tab. 6.12), emerge un andamento quasi confrontabile tra gli impasti che sono stati realizzati impiegando le argille S e G. In particolare si evidenzia che l'aggiunta delle frazioni di sabbia di riciclo TA1(d) e TA2(d) portano a valori simili e comunque maggiori di quelli ottenuti dalla cottura dell'impasto realizzato con le medesime argille e con la sabbia Colombara, tali valori misurati presentano inoltre un andamento costante nonostante il calo di densità, come si vedrà in seguito. Gli impasti realizzati con l'argilla M presentano una resistenza più bassa rispetto agli impasti realizzati con le altre due argille S e G. In particolare l'impasto MTA1 dove la sabbia Colombara viene sostituita con la frazione di riciclo TA1(d), non presenta variazioni di resistenza rispetto all'impasto MO, realizzato con la sabbia Colombara, mentre l'inserimento della frazione TA2(d) all'argilla M, provoca una diminuzione abbastanza vistosa della resistenza a flessione.

I dati di resistenza misurati, rientrano, comunque, pienamente entro i limiti previsti per i laterizi (tab. 6.13).

	<b>Mattoni, blocchi Comuni e alveolati</b>	<b>Tramezze, blocchi Da solaio, tavelloni</b>	<b>Tegole e coppi; laterizi di alta qualità</b>
RFC (MPa)	5-15	12-20	15-25

Tabella 6.13- Valori di resistenza a flessione in cottura di alcuni prodotti in laterizio.

#### 6.3.3.2.3 DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO D'ACQUA

Una importante proprietà dei materiali solidi è la porosità, cioè la caratteristica di presentare spazi vuoti (pori) nelle particelle che li costituiscono.

La porosità di un laterizio dipende dalle frazioni granulometriche dei componenti che lo costituiscono, dal metodo con il quale essi sono mescolati, e da processi di formatura e cottura. Durante il trattamento termico ad alte temperature la porosità aumenta a causa della fuoriuscita di gas, dovuta alla combustione di sostanze organiche ed alla dissociazione di carbonati di calcio e magnesio. Solo successivamente, nel momento in cui si ha la formazione di fasi liquide che vanno ad occludere i pori, la porosità inizia a ridursi.

A causa della porosità, in un corpo si può considerare il suo volume apparente distinto da quello reale, cioè da quello che il corpo occuperebbe se in esso fossero assenti i pori. Per la stessa ragione, nei corpi solidi porosi si possono distinguere due densità, una apparente sulla base del volume totale e una reale sulla base del solo volume realmente occupato dal materiale solido.

La determinazione dell'assorbimento d'acqua, della porosità aperta e della densità apparente dei laterizi in questione è stata effettuata secondo la normativa ISO EN UNI 10545-3, su 4 listelli (10x1x2 cm) per ogni impasto.

I dati raccolti attraverso questa determinazione sono:

*Peso secco:* D (g), misurato prima di iniziare l'analisi dopo aver fatto permanere i campioni a 100-120°C per 24 ore.

*Peso saturo sospeso:* S (g), corrispondente al peso immerso in acqua distillata del campione.

*Peso saturo:* M (g), misurato pesando il campione impregnato d'acqua, dopo aver assorbito con un panno di daino l'acqua situata sulla superficie del campione.

Grazie alle sopraelencate determinazioni è possibile ricavare, mediante l'impiego di formule matematiche, i seguenti parametri:

$$\text{Volume del provino: } V \text{ (cm}^3\text{)} = M - S$$

$$\text{Assorbimento d'acqua: } E \text{ (\%)} = \frac{(M - D)}{100 \cdot D}$$

$$\text{Porosità apparente: } P \text{ (\%)} = \frac{(M - D)}{100 \cdot V}$$

$$\text{Peso specifico apparente: } T \text{ (adimensionale)} = \frac{D}{(D - S)}$$

$$\text{Densità apparente: } B \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{D}{V}$$

Impasto		E (%) Assorbimento d'acqua	P (%) Porosità aperta	T Peso specifico apparente	B (g/cm <sup>3</sup> ) Densità apparente
M0	Media	9,68	19,28	2,467	1,992
	d.s.	0,08	0,013	0,004	0,004
MTA1	Media	10,53	20,61	2,465	1,957
	d.s.	0,11	0,17	0,006	0,007
MTA2	Media	11,01	21,36	2,470	1,942
	d.s.	0,75	1,18	0,005	0,028
S0	Media	14,20	25,79	2,446	1,815
	d.s.	0,17	0,28	0,015	0,008
STA1	Media	14,91	26,73	2,446	1,792
	d.s.	0,21	0,22	0,011	0,012
STA2	Media	16,34	28,53	2,442	1,746
	d.s.	0,18	0,20	0,006	0,008
G0	Media	14,93	26,58	2,426	1,780
	d.s.	0,24	1,31	0,152	0,083
GTA1	Media	15,75	28,14	2,486	1,786
	d.s.	0,16	0,21	0,007	0,006
GTA2	Media	17,31	30,23	2,503	1,746
	d.s.	0,22	0,28	0,008	0,007

Tabella 6.14- Parametri microstrutturali e porosi metrici determinati su listelli cotti (10x2x1 cm) per mezzo di assorbimento d'acqua sotto vuoto.

Dai parametri microstrutturali misurati (tab. 6.14) si riscontra che la sostituzione della sabbia Colombara con le sabbie di riciclo TA1(d) e TA2(d) porta un aumento della porosità e quindi dell'assorbimento.

È possibile inoltre notare un assorbimento maggiore per gli impasti realizzati con l'argilla Sila (S) e Giomo (G) rispetto a quelli realizzati con l'argilla Mosso (M), tali differenze potrebbero essere dovute a valori di composizione iniziale differenti.

#### 6.3.3.2.4 DETERMINAZIONE DELL'ATTITUDINE ALLE EFFLORESCENZE SALINE PER SALI PRIMARI

Per efflorescenza si intende il deposito salino sulla superficie dei mattoni causato dall'evaporazione dell'acqua in cui esso è disciolto. Nel momento in cui, al sopraggiungere delle condizioni ambientali più asciutte, l'acqua sulla superficie del mattone evapora, la soluzione diventa satura e il sale precipita.

La struttura a porosità intercomunicanti del corpo ceramico forma una rete di capillari tramite i quali l'acqua di imbibizione del mattone viene portata in superficie, creando un flusso continuo. L'evaporazione di tale acqua fa sì che gli eventuali sali disciolti si depositino, dando luogo a incrostazioni sotto forma cristallina, spesso espandibili.

Tali efflorescenze provocano nelle murature la comparsa di vistosi affioramenti salini, la cui colorazione è attribuibile alla presenza di particolari composti chimici. Si hanno ad esempio

efflorescenze di colore bianco, nel caso di solfati, carbonati e cloruri, verde-giallastro, nel caso di vanadati e color ruggine, nel caso di sali ferrosi.

Un problema fondamentale legato a questo fenomeno, oltre al forte danno estetico, consiste nella riduzione della resistenza e dell'affidabilità delle murature. I cristalli igroscopici come gli ossidi di calcio, trasformandosi in idrossidi, si dilatano con l'umidità provocando danni quali la scagliatura del mattone o il distacco dell'intonaco.

Il meccanismo che porta alla formazione delle efflorescenze saline sulla superficie dei mattoni, è strettamente correlato alla porosità del corpo ceramico, alla composizione delle argille, all'interazione con le malte utilizzate durante la posa e all'assorbimento di acqua ricca in sali dall'ambiente.

La determinazione dell'attitudine alle efflorescenze sui listelli cotti è stata svolta seguendo le indicazioni contenute nelle norme UNI 8942/3 e UNI 9730/3 per le condizioni sperimentali e la valutazione dei risultati.

I campioni, tre per ciascun impasto, sono stati immersi in acqua distillata per un quarto della loro altezza e sono stati fatti rimanere in queste condizioni per 4 giorni, al termine dei quali sono stati estratti dal bagno e posti ad essiccare in stufa.

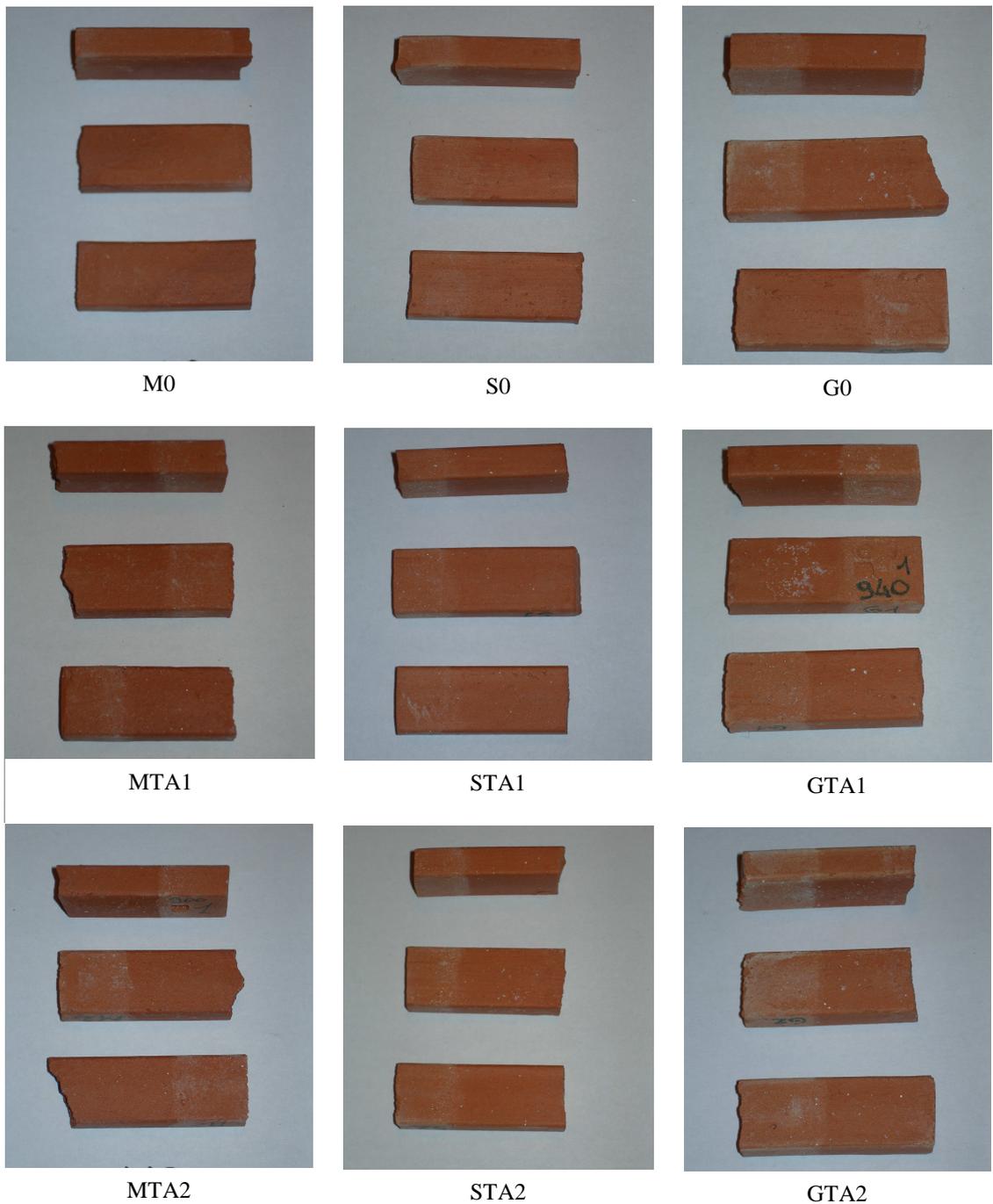


Figura 6.14- Immagini dei campioni sottoposti alla determinazione delle efflorescenze saline.

Le uniche efflorescenze emerse (fig. 6.14) si evidenziano negli elementi ceramici prodotti con l'argilla G, sia nella miscela con la sabbia naturale (sabbia colombara), sia dove la sabbia naturale è stata sostituita con la frazione di aggregato riciclato TA1. Per il fatto che le efflorescenze saline appaiono anche nell'impasto realizzato unicamente con materie prime naturali è lecito pensare che l'argilla stessa presenti al suo interno elementi che portano alla formazione di efflorescenze saline, seppur in scarsa quantità.

### 6.3.3.2.5 ANALISI COLORIMETRICA

Il colore rosso di un laterizio dipende sostanzialmente dall'ossidazione dei composti di ferro, che si ritrovano alla fine come ossido ferrino.

Questa determinazione è stata svolta grazie all'utilizzo di un colorimetro *Hunterlab MiniScan XE Plus*. Tale apparecchio consente di fornire dati quantitativi, espressi con parametri fisici indipendenti dall'occhio umano. Prima di iniziare la determinazione, occorre analizzare un bianco assoluto e una trappola di luce.

Nel nostro caso, lo strumento esprime il colore in un sistema di assi cartesiani con 3 parametri caratteristici:

L: esprime la luminosità dal bianco al nero (100 bianco puro; 0 nero assoluto)

a: esprime la variabilità dal verde (+ a) a rosso (- a)

b: esprime la variabilità dal giallo (+ b) a blu (- b).

Campione		PARAMETRI COLORIMETRICI		
		L*	a*	b*
<b>M0</b>	Media	52,97	22,67	26,95
	d.s.	0,15	0,21	0,12
<b>MTA1</b>	Media	51,27	23,15	26,88
	d.s.	0,18	0,17	0,56
<b>MTA2</b>	Media	50,34	23,70	27,04
	d.s.	0,43	0,28	0,68
<b>S0</b>	Media	57,08	22,35	27,57
	d.s.	0,96	0,80	0,91
<b>STA1</b>	Media	55,86	23,10	28,81
	d.s.	0,45	0,13	0,13
<b>STA2</b>	Media	56,47	23,20	29,45
	d.s.	0,45	0,21	0,54
<b>G0</b>	Media	56,31	21,26	26,29
	d.s.	0,34	0,29	0,67
<b>GTA1</b>	Media	55,98	21,55	27,33
	d.s.	0,34	0,29	0,32
<b>GTA2</b>	Media	55,22	21,85	27,79
	d.s.	0,08	0,36	0,70

Tabella 6.15- Dati colorimetrici ottenuti utilizzando un colorimetro *Hunterlab MiniScan XE Plus*.

Dai dati colorimetrici (tab. 6.15) emerge che gli elementi ceramici prodotti subiscono leggere variazioni di colore con l'introduzione degli aggregati riciclati, in particolare abbiamo che il parametro "a" tende ad aumentare e quindi si sposta verso una colorazione più verde, il parametro "b" aumenta anch'esso spostando la colorazione verso il giallo, ed infine il parametro "L" diminuisce portando ad una perdita di luminosità. Pertanto la sostituzione porta le ceramiche verso una colorazione più giallo-verde con una diminuzione di luminosità.

### 6.3.3.2.6 ANALISI MINERALOGICA QUANTITATIVA DEI PRODOTTI DI COTTURA

Al fine di individuare e quantificare le fasi mineralogiche che si cristallizzano in seguito al processo di cottura, è stata indispensabile un'analisi mineralogica quantitativa.

I campioni cotti, pertanto, sono stati ridotti in polvere impalpabile (<10 µm) attraverso l'uso di un mortaio d'agata.

Le analisi sono state effettuate con il metodo della diffrazione di raggi X da campioni policristallini, XRD con uno strumento Philips Analytical x-ray. I diffrattogrammi ottenuti sono stati quindi interpretati mediante il metodo Rietveld, nel quale si utilizza l'intero spettro osservato e lo si confronta con uno teorico, calcolato tenendo in considerazione tutti i fattori che contribuiscono alla diffrazione. Viene quindi analizzato l'intero spettro e non solo i singoli picchi, avendo così risultati più attendibili, in quanto si riducono i problemi derivanti dalla sovrapposizione di più picchi e dall'orientazione preferenziale.

Le condizioni sperimentali adottate durante la raccolta dati sono sotto riportate:

Tubo anodico: Cu  
 Generatore di tensione: 40 Kv  
 Generatore di corrente: 25 mA  
 Lunghezza d'onda Alfa1 ( $\alpha_1$ ): 1,54060  
 Lunghezza d'onda Alfa2 ( $\alpha_2$ ): 1,54439  
 Rapporto di intensità ( $\alpha_1/\alpha_2$ ): 0,500  
 Slitta divergente: 1°  
 Slitta ricevente: 0,1  
 Monocromatore: inserito  
 Angolo 2θ range: 5°-80°  
 Dimensioni dello step (passo di 2θ): 0,020  
 Tempo per step: 4s

campioni	Quarzo		Plagioclasio		Illite		K-feldspati		Diopside		Ematite		Fase vetrosa	
	media	d.s.	media	d.s.	media	d.s.	media	d.s.	media	d.s.	media	d.s.	media	d.s.
<b>M0</b>	28,9	0,1	4,7	0,3	4,7	0,4	2,4	0,3	8,4	0,3	2,3	0,1	48,7	1,5
<b>MTA1</b>	35,3	0,1	9,0	0,3	5,9	0,2	2,7	0,1	8,2	0,5	3,2	0,1	35,7	1,3
<b>MTA2</b>	33,6	0,2	5,4	0,1	3,9	0,2	2,2	0,3	8,5	0,3	3,6	0,3	42,8	1,4
<b>S0</b>	32,0	0,2	34,9	0,1	4,2	0,1	4,3	0,4	16,1	0,4	2,7	0,3	5,8	1,5
<b>STA1</b>	32,0	0,4	36,1	0,1	4,8	0,4	7,7	0,1	11,5	0,2	3,5	0,1	4,3	1,3
<b>STA2</b>	19,4	0,3	22,4	0,1	4,0	0,3	2,9	0,3	9,2	0,2	2,2	0,2	39,9	1,4
<b>G0</b>	30,0	0,1	39,7	0,4	6,2	0,2	5,6	0,1	5,6	0,3	3,0	0,2	9,8	1,3
<b>GTA1</b>	19,9	0,3	24,7	0,1	4,2	0,4	3,0	0,1	6,9	0,5	2,3	0,3	39,0	1,7
<b>GTA2</b>	29,4	0,1	33,3	0,1	7,0	0,2	5,8	0,1	12,3	0,2	4,1	0,1	8,3	0,8

Tabella 6.16- Analisi mineralogica quantitativa dei prodotti di cottura.

Dalle analisi mineralogiche effettuate è emerso che, in quasi tutti i campioni, la fase più abbondante è il quarzo, seguito da plagioclasio, diopside, illite, K-feldspato ed ematite. E' inoltre presente in quantità variabile la fase vetrosa: in un range da 36-49% per i campioni M da 4-39% per S e da 8-39% per G. Nel dettaglio, si evidenzia quanto segue:

- per i campioni contenenti l'argilla Mosso l'inserimento degli aggregati di riciclo non altera significativamente la composizione mineralogica delle fasi presenti. Si nota, con l'aggiunta dell'aggregato TA1(d) un incremento del contenuto di plagioclasio che va ovviamente a discapito della quantità della fase vetrosa.
- per i campioni contenenti l'argilla Sila l'introduzione dell'aggregato TA2(d) apporta notevoli variazioni nei rapporti quantitativi delle fasi presenti, con una netta diminuzione del contenuto di quarzo, plagioclasio e K feldspato ed un conseguente brusco aumento della fase vetrosa.
- per i campioni contenenti l'argilla mosso l'inserimento dell'aggregato TA1(d) ha alterato significativamente la composizione mineralogica apportando come nel caso del campione STA2(d) un decremento del contenuto di quarzo e K- feldspato ed un incremento del contenuto di fase vetrosa.

Le differenze più rilevanti nell'analisi quantitativa coinvolgono la fase vetrosa, che presenta valori percentuali più bassi negli impasti realizzati con la sabbia Colombara (M0, S0, G0), e maggiori per le ceramiche realizzate con le frazioni di materiale di riciclo (MTA1, MTA2, STA2, GTA1). Si hanno delle eccezioni per i due impasti ceramici, (STA2-GTA1) realizzati con le frazioni di materiale da riciclo che si comportano inesplicabilmente in modo anomalo e cioè presentano una percentuale bassa di fase vetrosa.

## VII. UTILIZZO DEGLI AGGREGATI DA RICICLO NEL CONFEZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO

In questa parte di ricerca è stata sviluppata allo scopo di verificare la possibilità di recuperare nel campo delle costruzioni come aggregati per confezionare calcestruzzi, gli aggregati riciclati provenienti da rifiuti derivanti dall'attività di costruzione e demolizione, prelevati nel centro di riciclaggio della ditta Fenza Daniela di Rovigo.

In particolare sono state campionate tre frazioni di aggregati riciclati normalmente prodotti nell'impianto, che sono:

- Sabbia riciclata;
- Materiale riciclato frazione 0-30 mm;
- Materiale riciclato frazione 30-60 mm.

Prendendo a riferimento la normativa tecnica per l'utilizzo di aggregati nella produzione di calcestruzzo è stata eseguita una caratterizzazione chimica e fisica delle tre frazioni. (La norma a cui si è fatto principalmente riferimento per tale caratterizzazione è la UNI 8520/2:2005, che presenta molte analogie con la UNI EN 12620:2005, norma di riferimento per dotare di marcatura CE gli aggregati da calcestruzzo).

La prima fase della sperimentazione è quindi consistita nella caratterizzazione degli aggregati utilizzati.

In seguito si è proceduto, alla progettazione e realizzazione di impasti preliminari attraverso i quali individuare sia la composizione ottimale del conglomerato, che l'eventuale additivo meglio compatibile con il tipo di materie prime utilizzate. Definito l'impasto si è eseguita la completa caratterizzazione fisico-meccanica dei calcestruzzi prodotti, attraverso le seguenti misure distinte a seconda del calcestruzzo fresco o indurito.

### calcestruzzo fresco:

- Massa volumica (UNI EN 12350-6);
- Contenuto d'aria (UNI EN 12350-7);
- Prova di abbassamento del cono a 0, 15 e 30 min dalla fine della miscelazione (UNI EN 12350-2);
- Prova di spandimento alla tavola a scosse a 0, 15 e 30 min dalla fine della miscelazione (UNI EN 12350-5);

### calcestruzzo indurito:

- Massa volumica (UNI EN 12390-7);
- Resistenza alla compressione (UNI EN 12390-3);
- Ritiro igrometrico (UNI EN 12390-6);

## 7.1 CENNI SUL CALCESTRUZZO ED IL SUO CONFEZIONAMENTO

Il calcestruzzo, detto anche beton di cemento, è un conglomerato artificiale costituito da materiali inerti di diverse dimensioni (sabbia e ghiaia o pietrisco) uniti da un legante idraulico (il cemento) la cui attivazione avviene grazie alle reazioni chimiche con l'acqua, in modo da dare origine ad una massa monolitica, dura e resistente.

Pertanto i componenti essenziali del calcestruzzo sono:

- il cemento;
- gli aggregati (o inerti);
- l'acqua.

### 7.1.1 IL CONFEZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO

Il confezionamento del calcestruzzo è oggi effettuato nelle centrali di betonaggio o in appositi impianti di cantiere dotati, in genere, di un sistema automatico di gestione della produzione e della registrazione delle pesate; è quasi scomparso il confezionamento artigianale/manuale, se non per piccolissime quantità. Di conseguenza, le richieste di calcestruzzo "a composizione" o "a dosaggio", in cui si specifica la quantità dei singoli componenti, sono diventate molto meno frequenti (30 % del mercato). Oggi si tende infatti a richiedere un calcestruzzo con prestazioni ben definite e la sua composizione, in base ai requisiti che esso dovrà possedere, è oggetto di un apposito studio, chiamato mix design, effettuato dal produttore, tenendo conto di numerose variabili quali resistenza, durabilità, aggressività dell'ambiente, contenuto d'aria inglobata, rapporto acqua/cemento, additivi e via dicendo.

Le fasi di produzione del calcestruzzo possono essere quindi fissate nei seguenti punti:

- progettazione del mix design;
- pesatura dei vari componenti quali aggregati, cemento e acqua;
- miscelazione dei componenti.

## 7.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AGGREGATI PER IL CONFEZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO.

Gli aggregati per calcestruzzo sono una miscela di più frazioni ciascuna delle quali gioca un ruolo fondamentale per la qualità dell'impasto finale. Le prestazioni degli aggregati ed il loro effetto sulla durabilità del prodotto vengono caratterizzati dal punto di vista meccanico, fisico, geometrico, chimico e petrografico.

### *Proprietà degli aggregati e proprietà del calcestruzzo*

Le caratteristiche dell'aggregato influenzano in modo più o meno importante le proprietà del calcestruzzo allo stato sia fresco sia indurito; ciò si può facilmente comprendere considerando che in un calcestruzzo di composizione normale il volume dell'aggregato si aggira intorno ai 650-750 l/m<sup>3</sup> di calcestruzzo.

L'aggregato nel conglomerato ha diverse funzioni:

- costituisce lo scheletro del calcestruzzo contribuendo in modo essenziale alle sue caratteristiche meccaniche;
- avendo un elevato modulo elastico, si oppone al ritiro della pasta legante, che, essendo molto elevato, non permetterebbe di usarla da sola;
- riducendo la quantità di legante, riduce il calore di idratazione;
- riducendo il tenore di cemento, riduce il costo del conglomerato.

Le proprietà più importanti, che rendono un materiale naturale idoneo come aggregato per il calcestruzzo, sono certamente:

- proprietà fisiche (porosità, permeabilità, caratteristiche termiche, caratteristiche di forma e dimensionali ecc.);
- proprietà chimiche (insolubilità, inerzia chimica verso la pasta legante, stabilità a contatto con gli agenti naturali durante l'esercizio);
- proprietà meccaniche (resistenza a compressione, a trazione, all'abrasione, non saldabilità e resistenza all'urto).

## *7.2.1 PROPRIETA' FISICHE DEGLI AGGREGATI*

### *7.2.1.1 CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA DEGLI AGGREGATI*

La distribuzione granulometrica degli aggregati viene determinata con la cosiddetta "analisi granulometrica" cioè per vagliatura, usando una serie di vagli (setacci o crivelli), ciascuno dei quali ha dei fori di apertura o "luce" tali che l'intera serie copra un certo intervallo dimensionale. Le aperture dei setacci impiegate variano spesso secondo la progressione avente ragione 2. Per eseguire l'analisi granulometrica, i vagli si dispongono uno sopra l'altro con apertura crescente, su un apposito apparecchio che, mediante vibrazione, produce la classificazione del materiale introdotto sul setaccio più alto. Partendo da un peso noto di materiale, dopo il trattamento si determinano le percentuali di aggregato rimaste nei vari setacci; il materiale, passante ad un vaglio e trattenuto al successivo, si chiama "classe granulometrica". Si ottiene così una tabella (tab. 7.1-7.2), che può essere trasformata in una curva (fig. 7.1 -7.2 ), riportando in ascisse l'apertura dei vagli (in mm) del setaccio e in ordinate la percentuale di aggregato in esso passante o trattenuto

(cioè tutto quello che rimane dentro il setaccio), che si ottiene facendo la differenza tra 100 e la % del passante cumulativo (curva granulometrica dei trattenuti).

La norma EN 12620, per la determinazione della granulometria dell'aggregato, prevede due serie di setacci: quella ottenuta impiegando i setacci della "serie base" cui aggiungere quelli della "serie 1" oppure della "serie 2".

Per caratterizzare gli aggregati oggetto di studio sono stati impiegati i setacci appartenenti alla "serie base" più quelli della "serie 2".

Apertura setaccio [mm]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	100
25	18,4	10,3	18,4	10,3	81,6
20	37,3	25,1	55,7	35,4	44,3
16	23,9	25,8	79,6	61,2	20,4
12,5	14,5	18,3	96	79,5	6
10	3,2	11,2	97,3	90,7	2,7
8	0,8	4,2	98	95	2
6,3	0,1	1,1	98,2	96	1,8
4	0,1	0,5	98,2	96,5	1,8
3,15	0,0	0,1	98,2	96,6	1,8
2	0,0	0,1	98,3	96,7	1,7
1,6	0,0	0,1	98,3	96,8	1,7
1	0,1	0,1	98,4	96,9	1,6
0,5	0,2	0,3	98,6	97,2	1,4
0,25	0,6	1,1	99,2	98,3	0,8
0,2	0,2	0,3	99,4	98,6	0,6
0,125	0,3	0,5	99,6	99,2	0,4
0,063	0,3	0,8	100	100	0

Tabella 7.1- Distribuzione granulometrica materiale riciclato frazione 0-30 mm.

Apertura setaccio [mm]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
16	0	0	0	100	100
12,5	0,9	0,7	0,9	99,1	99,3
10	2,1	3,1	3,0	97,0	96,2
8	6,9	5,9	9,9	90,1	90,3
6,3	7,7	8,6	17,6	82,4	81,6
4	10,3	10,2	27,9	72,1	71,4
3,15	3,0	3,1	30,9	69,1	68,3
2	6,0	5,5	36,8	63,2	62,8
1,6	2,2	2,3	39,0	61,0	60,5
1	4,9	4,6	43,9	56,1	55,9
0,5	8,8	8,3	52,8	47,2	47,6
0,25	23,8	23,3	76,5	23,5	24,3
0,2	6,7	7,0	83,2	16,8	17,3
0,125	8,7	8,9	91,9	8,1	8,4
0,063	8,1	8,4	100,0	0,0	0,0

Tabella 7.2- Distribuzione granulometrica materiale riciclato frazione 0-30 mm.

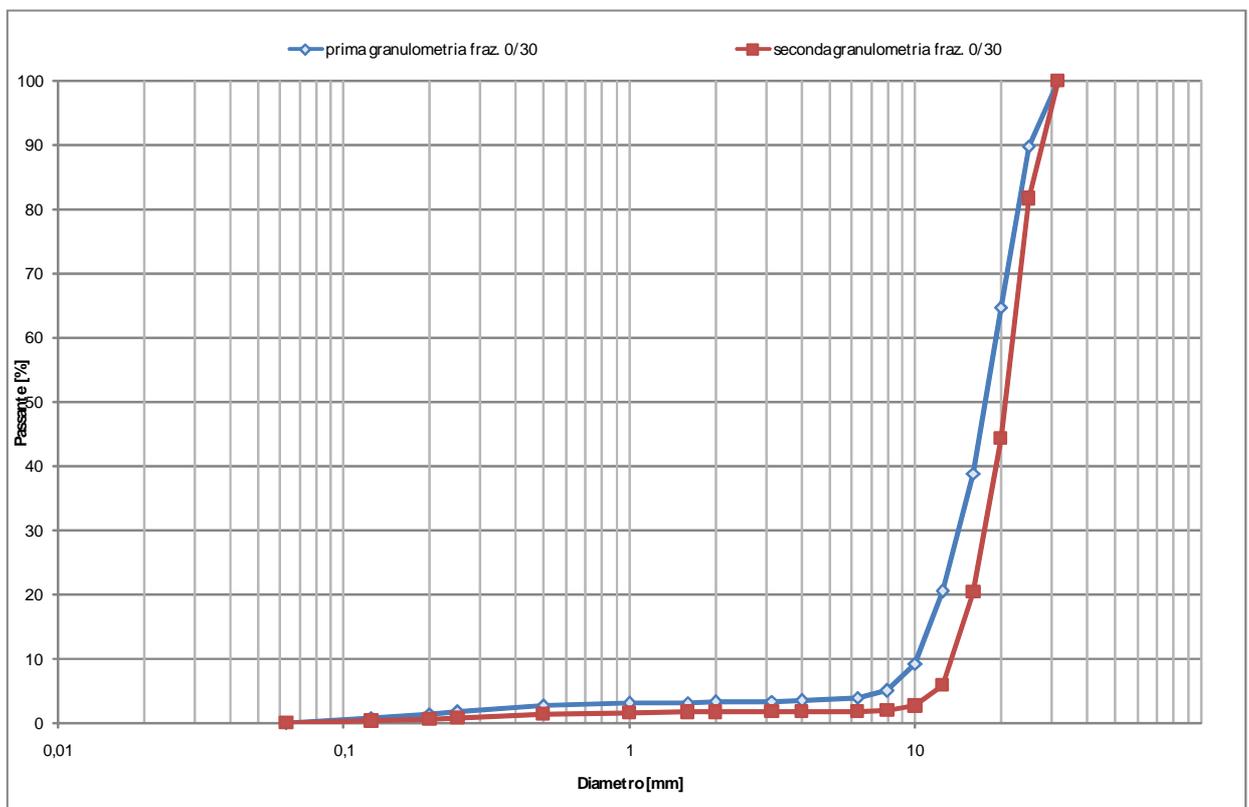


Figura 7.1- Analisi granulometrica materiale riciclato fraz. 0/30.

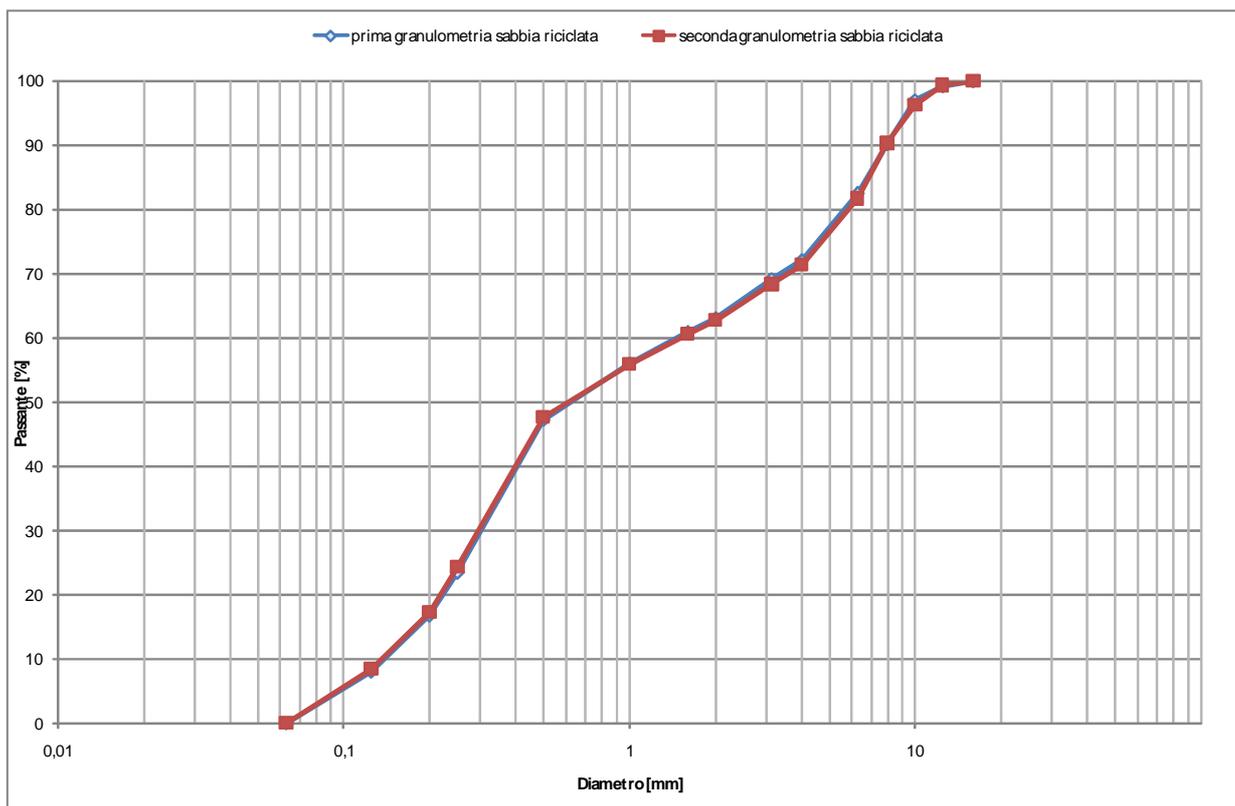


Figura 7.2- Analisi granulometrica sabbia riciclata.

Da quanto emerge dalle analisi granulometriche effettuate sugli aggregati sia grossolani che fini ottenuti dall'impianti di riciclaggio è possibile notare che l'aggregato definito "Materiale riciclato frazione 0-30 mm" è piuttosto omogeneo e corrisponde ad una ghiaia, mentre l'aggregato definito "Sabbia riciclata" è più eterogeneamente distribuito dal punto di vista dimensionale e può essere definito come una sabbia grossolana.

#### 7.2.1.2 FORMA E ANGOLARITA' DEGLI AGGREGATI

Oltre che dalla distribuzione granulometrica, la reologia del calcestruzzo è influenzata anche dalla forma dell'aggregato, dallo stato di usura degli spigoli dell'elemento lapideo e dalla tessitura superficiale dei granuli. La forma individua la prevalenza di una dimensione dell'aggregato rispetto alle altre: questa caratteristica può essere quantificata attraverso l'indice di forma (UNI EN 933-4). Con la norma UNI EN 933-4 i granuli in un campione di aggregato grosso sono classificati in base al rapporto esistente tra la loro lunghezza  $L$  e lo spessore  $E$  utilizzando, dove necessario, un calibro a cursore. L'indice di forma è calcolato come la massa dei granuli aventi un rapporto di dimensioni  $L/E$  maggiore di 3 espresso come percentuale sulla massa secca complessiva dei granuli. Più grande è l'indice di forma tanto più l'aggregato si discosta dalla sfericità.

L'indice di forma (SI) viene definito come:

$$SI = (M_1/M_2) \times 100$$

Dove:

- $M_1$  è la massa del campione di prova;
- $M_2$  è la massa dei granuli non cubici.

Le norme EN 12620 e UNI 8520/2 non impongono alcuna restrizione riguardo a questa caratteristica dell'aggregato. Tuttavia, il produttore di calcestruzzo deve considerare che aggregati contraddistinti da indici di forma maggiori di 15 sono caratterizzati da una maggiore superficie specifica rispetto ad inerti pressoché sferici, e quindi, possono determinare sostanziali aumenti nella richiesta d'acqua e del dosaggio del cemento per poter lasciare invariate le prestazioni reologiche e meccaniche del conglomerato. Gli aggregati possono risultare spigolosi o spigoli smussati, e inoltre presentarsi in forma sferoidale, con una dimensione maggiore delle altre (allungati) oppure con una dimensione minore delle altre (piatti). Per avere la stessa lavorabilità del calcestruzzo fresco l'impiego di aggregati a forma spigolosa comporta una maggiore richiesta d'acqua di impasto, perché la scorrevolezza fra i diversi elementi è minore. È bene limitare a non più del 20-25% il contenuto di elementi piatti e allungati, perché aggregati oltre a nuocere alla lavorabilità, tendono a disporsi parallelamente gli uni agli altri, determinando nell'impasto indurito una certa anisotropia, con conseguente anisotropia delle varie proprietà.

Nel caso degli aggregati studiati in questo lavoro, per classificare in modo più accurato le forme delle particelle, si è preferito analizzarle secondo il metodo di Zingg (1935) (fig.7.3). Questo metodo individua in un ciottolo con  $a$  la dimensione dell'asse maggiore, con  $b$  la massima dimensione perpendicolare ad  $a$ , e con  $c$  la massima dimensione normale al piano  $ab$  (tab.7.3). In base alla loro forma i ciottoli possono essere assegnati a diverse classi: discoidali (1), sferoidali (2), piatti e allungati (3), allungati (4).

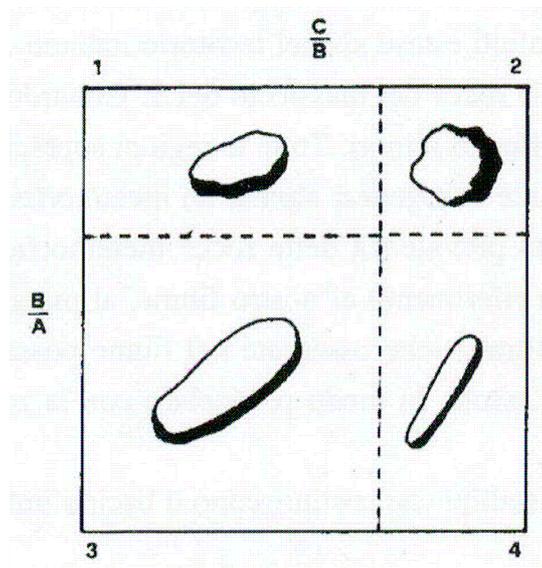


Figura 7.3- Diagramma di Zingg (1935)

n°	a [mm]	b [mm]	c [mm]	n°	a [mm]	b [mm]	c [mm]
1	45,30	38,16	11,06	26	39,02	17,8	11,32
2	34,40	21,59	20,10	27	35,99	27,71	20,69
3	35,41	27,53	15,62	28	36,32	22,02	14,38
4	43,96	27,64	11,27	29	29,80	23,03	18,99
5	46,82	32,60	22,03	30	28,27	24,35	4,06
6	35,80	17,28	14,45	31	36,37	30,74	18,46
7	42,34	21,87	13,80	32	26,82	17,12	12,87
8	48,86	23,62	14,22	33	20,95	16,64	5,11
9	43,46	35,22	24,08	34	22,74	18,8	10,76
10	52,20	23,23	10,51	35	24,84	20,88	10,48
11	43,11	32,74	22,12	36	22,40	15,98	11,01
12	38,32	34,93	23,43	37	32,16	18,67	12,62
13	32,27	22,52	19,45	38	38,07	25,26	6,49
14	34,59	31,84	15,12	39	35,68	25,53	18,65
15	25,04	17,92	11,41	40	30,60	13,13	6,6
16	27,46	18,36	5,46	41	36,03	19,05	6,41
17	33,09	28,60	10,57	42	26,19	22,18	9,82
18	37,87	13,95	8,51	43	30,12	26,65	11,07
19	39,92	34,17	6,20	44	31,68	22,93	12,42
20	14,56	12,28	7,82	45	17,17	11,63	9,69
21	32,65	28,25	8,68	46	16,72	11,42	8,25
22	34,49	22,19	10,86	47	15,76	10,17	7,65
23	40,89	30,86	7,19	48	31,48	23,81	13,14
24	37,49	24,20	17,75	49	22,54	18,84	11,24
25	35,28	18,00	10,29	50	23,42	17,84	15,87

Tabella 7.3- Dati relativi al coefficiente di forma dell'aggregato riciclato frazione 0-30.

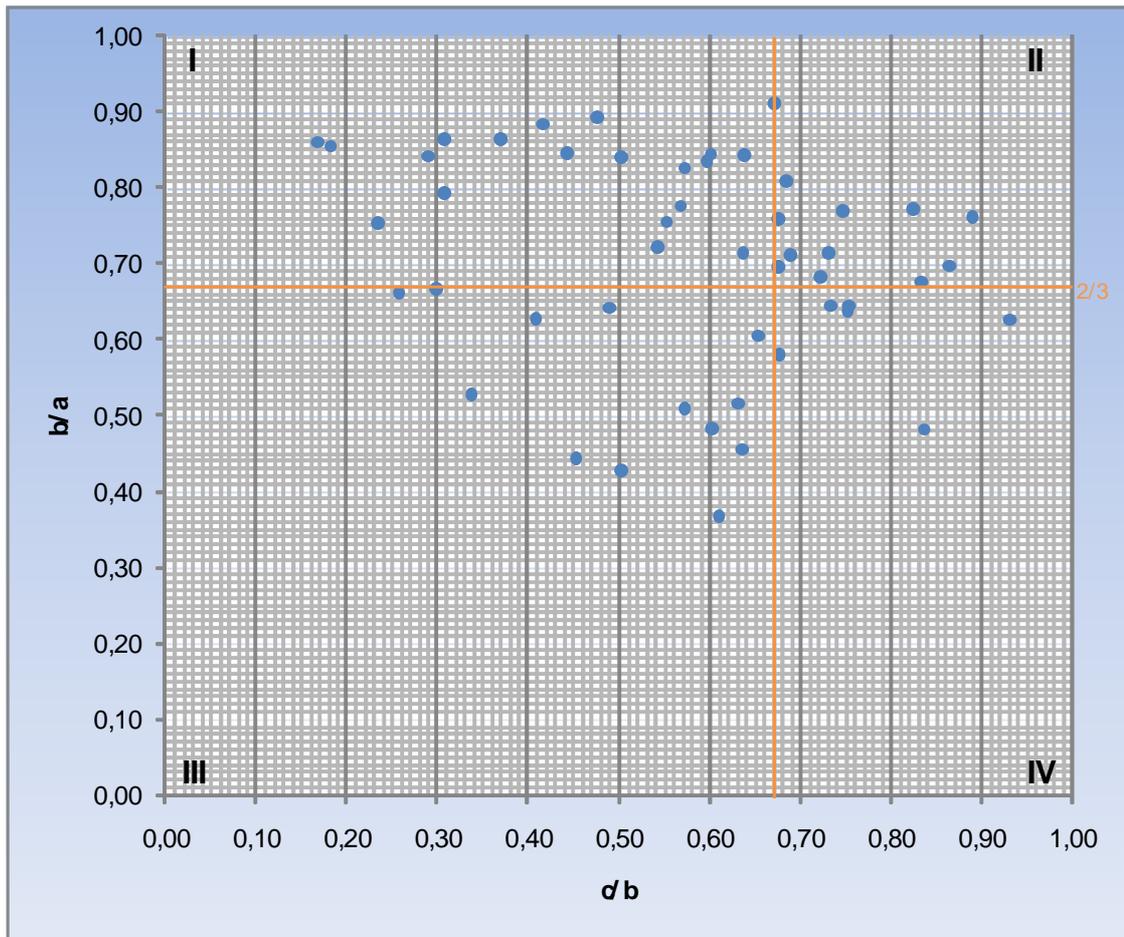


Figura 7.4- Diagramma di Zingg, ottenuto dall'analisi dei campioni.

Dal diagramma di Zingg (fig. 7.4) emergono le seguenti forme:

I: discoidale (20 punti) 40%;

II: sferica (12 punti) 24%;

III: lamellare (12 punti) 24%;

IV: allungata (6 punti) 12%.

Pertanto la forma prevalente dei granuli di aggregato è quella che ricade nel primo quadrante, discoidale, seguita in eguale percentuale dalla forma sferica e lamellare del secondo e terzo quadrante, ed in misura inferiore dalla forma allungata del quarto quadrante.

Relativamente alla forma degli aggregati, una ulteriore caratteristica di particolare interesse è rappresentata dalla qualità degli elementi piatti, stimati attraverso l'indice di appiattimento (UNI-EN 933-3) che rappresenta la percentuale di granuli che posseggono una delle dimensioni inferiore a circa 0,6 volte la dimensione media della frazione granulometrica cui essi appartengono (tab. 7.4).

La prova consiste in due operazioni di stacciatura. Dapprima, usando stacci di prova, il campione viene separato in varie classi granulometriche  $d_i/D_i$ . Ogni classe granulometrica  $d_i/D_i$  viene quindi stacciata usando stacci che hanno aperture parallele di larghezza pari a  $D_i/2$ .

Il coefficiente di appiattimento globale viene calcolato considerando la massa totale dei granuli che passano attraverso le aperture delle barre, espressa come percentuale della massa totale secca dei granuli esaminati.

L'indice di appiattimento (FI) viene definito come:

$$FI = (M_2/M_1) \times 100$$

Dove:

- $M_1$  è la somma dei granuli delle classi  $d_i/D_i$  in cui viene suddiviso per vagliatura;
- $M_2$  è la somma delle masse dei granuli di ciascuna classe passanti a uno speciale vaglio a barre cilindriche parallele, che delimitano aperture rettangolari, distanti tra loro  $D_i/2$  e all'incirca  $0,63 d_i$ .

$M_1$	$M_2$	FI
9544,4	1903,7	19,95

Tabella 7.4- Valori misurati per il "materiale riciclato fraz. 0-30"

Sebbene la norma UNI 8520/2 non imponga alcun limite alla percentuale di elementi piatti è evidente che un loro eccesso può accentuare, per la naturale tendenza degli stessi a disporsi secondo direzioni preferenziali, sia il comportamento anisotropo del calcestruzzo che il fenomeno del bleeding interno. Perciò, l'impiego di aggregati con indice di appiattimento superiore a 15 sarebbe da evitare in particolar modo nella realizzazione dei cosiddetti pannelli in "ghiaio lavato".

### 7.2.1.3 MASSA VOLUMICA IN MUCCHIO

Un'altra proprietà, che dipende dalla distribuzione granulometrica, è la massa volumica del calcestruzzo. È importante ottenere un calcestruzzo con massa volumica elevata, perché parallelamente a questa aumentano di solito le resistenze meccaniche. Se la distribuzione granulometrica è tale che gli aggregati fini riempiono i vuoti fra gli aggregati grossi, si ottiene nel calcestruzzo una massa volumica più elevata. La massa volumica in mucchio dell'aggregato asciutto è definita dalla norma EN 1097-3, si determina mediante pesate dopo essiccazione di aggregati contenuti in uno specifico recipiente (fig. 7.5), e calcolando quindi il rapporto tra la massa del materiale ed il suo volume (tab. 7.6).



Figura 7.5- determinazione della massa volumica in mucchio.

	Sabbia riciclata	Materiale riciclato fraz. 0/30
Massa volumica in mucchio [Mg/m <sup>3</sup> ]	1,40	1,04

Tabella 7.6- Massa volumica in mucchio degli aggregati di riciclo (EN 1097-3:1998).

Di seguito vengono anche riportati in tabella 7.7 dati di letteratura relativi alla massa volumica in mucchio di alcuni aggregati naturali.

		Massa volumica in mucchio [Mg/m <sup>3</sup> ]
ROCCE IGNEE	Granito, sienite e porfido di quarzo	1,35
	Diorite, gabbri e basalti	1,45
ROCCE SEDIMENTARIE	Calcere tenero	1,05
	Calcere compatto e dolomite	1,35
	travertino	1,15
ROCCE METAMORFICHE	Gneiss	1,40
	Scisti, marmo e quarziti	1,35

Tabella 7.7- Massa volumica in mucchio di alcuni aggregati naturali.

Come emerge dal confronto tra i valori di massa volumica in mucchio ottenuti dagli aggregati di riciclo oggetto di studio, con i valori di letteratura di alcuni aggregati naturali, è facile intuire che la massa volumica degli aggregati di riciclo è piuttosto bassa e di conseguenza non ci si potranno aspettare resistenze meccaniche molto elevate.

#### 7.2.1.4 MASSA VOLUMICA DEI GRANULI ED ASSORBIMENTO D'ACQUA

Tutti gli aggregati sono caratterizzati da una porosità che può essere sia comunicante con la superficie, o aperta, sia non comunicante, o chiusa.

La porosità aperta può essere valutata mediante pesata prima e dopo l'assorbimento d'acqua, secondo la UNI 8520/13 e /16. In merito agli stati di assorbimento d'acqua si distinguono:

- L'aggregato asciutto per essiccamento in stufa a 110 °C;
- L'aggregato umido internamente ma non saturo;
- L'aggregato che ha assorbito acqua fino alla saturazione e contiene acqua libera in superficie; in tal caso contiene acqua in eccesso rispetto a quella di saturazione (acqua libera);
- L'aggregato è saturo, ma la superficie è asciutta; tale stato viene indicato con s.s.a. (saturo superficie asciutta). La differenza fra il peso dell'aggregato s.s.a. e quello dopo essiccamento a 110 °C ci consente di misurare la porosità aperta dell'aggregato e anche l'assorbimento d'acqua deve avere la condizione s.s.a.

L'acqua contenuta complessivamente dall'aggregato è l'umidità, se l'umidità è maggiore dell'assorbimento, la parte in eccesso è chiamata acqua libera.

La conoscenza dello stato dell'aggregato nei riguardi dell'acqua assorbita è importante ai fini del calcolo delle quantità di acqua da usare per la confezione del calcestruzzo, in modo da ottenere un dato rapporto  $a/c$ . Solo l'accurata determinazione del contenuto di acqua dell'aggregato consente di controllare con esattezza il rapporto  $a/c$ , in modo da consentire lo sviluppo delle migliori resistenze meccaniche. Se l'aggregato non è saturo esso sottrae acqua all'impasto; se presenta acqua libera, esso accresce il rapporto  $a/c$ .

Il peso specifico, o meglio, la massa volumica dell'aggregato, è una caratteristica importante, ai fini del proporzionamento del calcestruzzo, sia di altre proprietà come permeabilità, assorbimento, gelività, resistenza meccanica, e massa volumica del calcestruzzo.

La massa volumica è definita come il rapporto tra la massa del materiale ed il suo volume. Dato però che gli aggregati hanno una porosità sia chiusa sia aperta e che, inoltre, ci si può riferire agli aggregati accumulati disordinatamente, sono possibili diverse definizioni di massa volumica:

- massa volumica reale media;
- massa volumica media;
- massa volumica media dell'aggregato saturo a superficie asciutta (s.s.a.).

Per gli aggregati oggetto di studio sono state determinate la massa volumica media ( $m$ ) e la massa volumica media dell'aggregato a superficie asciutta ( $m_{sa}$ ), e sono state determinate seguendo la norma UNI EN 1097-6, mediante l'uso di picnometri (fig. 7.6). La massa si ottiene per pesate del campione essiccato in stufa. Il volume è determinato come spostamento dell'acqua da parte delle particelle essiccate in un picnometro di volume noto.



Figura 7.6- Determinazione della massa volumica media e assorbimento.

I dati ottenuti sono riportati nella tabella 7.8:

CAMPIONI	$m$ [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	$m_{sa}$ [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	A [%]
Materiale riciclato fraz. 0/30	2080	2270	9,13
Sabbia riciclata	2136	2283	6,91

Tabella 7.8- Massa volumica media ( $m$ ), massa volumica media a superficie asciutta ( $m_{sa}$ ), e assorbimento.

I risultati ottenuti evidenziano un elevato assorbimento d'acqua, fattore da tenere ben in considerazione nel momento di confezionare il calcestruzzo.

## 7.2.2 PROPRIETA' FISICHE DEGLI AGGREGATI

### 7.2.2.1 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE MEDIANTE IL METODO DI PROVA LOS ANGELES

Un'altra proprietà degli aggregati importante per il confezionamento del calcestruzzo, è l'attitudine di questi di resistere alla frammentazione.

Questo parametro è determinato secondo la norma UNI EN 1097-2, che definisce la resistenza alla frammentazione mediante la prova Los Angeles (LA). Tale prova si effettua in un cilindro rotante (fig. 7.7) all'interno del quale viene fatto rotolare il campione di aggregato (fig. 7.8), precedentemente preparato, insieme a delle sfere di acciaio. Al campione vengono fatti compiere 500 giri ad una velocità compresa fra 31 e 33 giri al minuto, con 11 sfere di acciaio (fig. 7.9). Completata la rotazione viene determinata la quantità di materiale trattenuta da uno staccio con luce di maglia 1,6 mm.



Figura 7.7- Prova di resistenza alla frammentazione Los Angeles.



Figura 7.8- Campione prima della prova e biglie usate nella prova



Figura 7.9- Materiale residuo dopo la prova.

Il coefficiente di resistenza alla frammentazione Los Angeles LA viene determinato mediante la seguente equazione:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

dove:

m: è la massa essiccata (in grammi) del campione trattenuto sullo staccio di 1,6 mm

5000: è la massa iniziale (in grammi) del campione, preparato conformemente al prEN 932-2.

La prova è stata eseguita solo sul materiale riciclato di frazione 0-30 mm, ed ha prodotto i risultati riportati in tabella (tab. 7.9).

	m [g]	LA [%]
Materiale riciclato fraz. 0/30	3133	37

Tabella 7.9- Valore di LA misurato per il “materiale riciclato fraz. 0-30”.

Confrontando il valore di LA trovato con quello di alcune rocce naturali (tab. 7.10), si evidenzia che non è un valore molto elevato, ma assimilabile a rocce tenere, e pertanto si comprende che il materiale oggetto di studio è piuttosto tenero e poco resistente alla disgregazione per urto ed abrasione.

	LA [%]
Rocce ignee molto tenaci	10
Rocce basaltiche	20
Rocce calcaree compatte	20-30
Rocce tenere	>30

Tabella 7.10- Valori di LA tipici per alcune rocce naturali.

Il coefficiente LA in genere mostra una buona correlazione non solo con la resistenza all’abrasione dei granuli dell’aggregato, ma anche con la resistenza a compressione e a trazione per flessione del calcestruzzo confezionato con l’aggregato analizzato.

### *7.2.3 PROPRIETA' CHIMICHE DEGLI AGGREGATI*

Non tutti gli inerti, siano essi naturali, provenienti da roccia frantumata, o da materiali di riciclo, sono necessariamente idonei alla produzione del calcestruzzo. Esistono alcuni requisiti fondamentali, definiti come criteri di idoneità o di accettazione, in assenza delle quali il calcestruzzo rischia di essere degradato anche in ambienti non aggressivi. Questi requisiti prevedono l'assenza, innanzitutto, di sostanze nocive alla durabilità del calcestruzzo.

La lista delle sostanze nocive include il cloruro, il solfato, la silice alcali-reattiva, i limi argillosi e la sostanza organica. Inoltre, deve essere assente il comportamento gelivo degli inerti, cioè la caratteristica di frantumarsi quando, dopo essere stati saturati con acqua, sono esposti a temperature che favoriscono la formazione del ghiaccio.

Nel seguente studio sono stati presi in considerazione solo alcune delle sopraesposte sostanze nocive, cioè quelle ritenute più significative per il tipo di materiale di riciclo oggetto di studio.

In particolare si è provveduto ad analizzare la silice alcali-reattiva, i limi argillosi e la sostanza organica.

#### *7.2.3.1 SILICE ALCALI-REATTIVA*

Alcune forme di silice presenti nell'aggregato lapideo, quelle amorfe, mal cristallizzate o comunque deformate ancorché cristalline, possono reagire con gli alcali del cemento (sodio e potassio) per formare silicati alcalini idrati dal carattere espansivo e fortemente dirompenti nei confronti della circostante matrice cementizia. Questa reazione nota come reazione alcali-silice, oppure ASR (Alkali-Silica-Reaction), si manifesta attraverso fessurazioni irregolari o espulsioni localizzate di materiali (pop-out) che possono pregiudicare seriamente la durabilità delle opere in calcestruzzo.

Attualmente la presenza di silice reattiva nell'inerte rappresenta la più insidiosa forma di degrado del calcestruzzo. Ciò dipende dal concorso di più cause:

- a) La presenza di silice reattiva in un inerte – a differenza di cloruro o solfato rilevabile con una semplice e rapida analisi chimica – può essere accertata con molta difficoltà e tempi lunghi.
- b) La silice reattiva è distribuita in forma discreta (per esempio, è presente in qualche granulo di inerte, ma è completamente assente in altri): ciò comporta il rischio di non evidenziare la sua presenza se il campione d'inerte sotto esame non contiene alcun granulo di silice reattiva e di considerare, quindi, accettabile un inerte che dovrebbe, invece, essere scartato.
- c) La reazione alcali-silice dipende dal contenuto di alcali nel calcestruzzo: un contenuto di alcali oltre la soglia di 2 Kg (biblio di rif) per metro cubo di calcestruzzo è considerato pericoloso; a causa della variazione del contenuto in alcali (da cemento a cemento, con il

dosaggio di cemento, e talvolta da un periodo all'altro per lo stesso cemento) la reazione alcali-silice presenta una certa erraticità e si può manifestare o meno in condizioni apparentemente uguali.

- d) La reazione alcali-silice può decorrere solo in presenza di umidità e si verifica, quindi, più frequentemente in ambienti esterni, ma anche in ambienti chiusi, come avviene nei pavimenti industriali non protetti con barriera a vapore ed esposti alla risalita capillare di acqua dal terreno.
- e) La reazione alcali-silice è in generale molto lenta ed è accelerata alle temperature più elevate; tuttavia, a seconda delle circostanze (grado di reattività della silice, umidità e temperatura ambientale, contenuto di alcali) il fenomeno può richiedere da qualche mese ad una decina di anni per potersi manifestare.

La reazione alcali-silice risulta molto pericolosa poiché viene a manifestarsi dopo diverso tempo, qualche mese o addirittura qualche anno, dal getto del calcestruzzo, e pertanto risulta difficoltoso qualsiasi intervento di ripristino al fine di bloccare il fenomeno espansivo, in quanto la struttura è ormai già in servizio. Per questo motivo la norma UNI 8520/2 impone che gli aggregati per il calcestruzzo vengano sottoposti, prima di essere utilizzati negli impasti di calcestruzzo, ad un esame petrografico fatto secondo la norma UNI EN 932-3, al fine di accertare la presenza di minerali alcali reattivi. Qualora da questo primo esame petrografico venga rilevata la presenza di alcune forme di silice pericolose (tab. 7.11), l'aggregato non è ancora da scartare, ma si effettua una seconda prova secondo la norma UNI 8520/22, una prova di espansione accelerata su prismi di malta confezionati con l'aggregato in esame e con un cemento volutamente ricco in alcali ( $\text{Na}_2\text{O} > 1\%$ ), mantenuti all'interno di una soluzione di idrossido di sodio (1N) alla temperatura di  $80^\circ\text{C}$  per 16 giorni. Decorso i 16 giorni viene calcolata l'espansione che deve risultare al massimo pari allo 0,1%.

FORMA MINERALOGICA	NATURA CHIMICA	STRUTTURA
Opale	$\text{SiO}_2 \bullet \text{H}_2\text{O}$	Amorfa
Tridimite	$\text{SiO}_2$	Cristallina
Cristobalite	$\text{SiO}_2$	Cristallina
Calcedonio	$\text{SiO}_2$	Micro o criptocristallina
Ossidiana	$\text{SiO}_2$	Micro o criptocristallina
Quarzo stressato (ad estinzione ondulata)	$\text{SiO}_2$	Micro o criptocristallina

Tabella 7.11- Principali forme mineralogiche alcali-reattive.



Figura 7.10- Strumentazione utilizzata per la prova di espansione accelerata, e travetti prodotti.

		provini	massa provini			dimensioni provini			
			valori singoli	media	variaz. media	valori singoli	media	variaz. media	variaz. media
			g	g	g	mm	mm	mm	%
Dopo sformatura a 24 ore		1	373	371,7	-	6,122	6,111	-	-
		2	370,0			6,129			
		3	372,0			6,081			
Dopo 24 di immersione in acqua a 80°C (misura di riferimento)		1	374	372,7	-	6,22	6,213	-	-
		2	371,0			6,241			
		3	373			6,179			
giorni di immersione in soluzione 1 N di NaOH ad 80°C	1 g	1	374	372,7	0,0	6,236	6,221	0,008	0,003
		2	371,0			6,247			
		3	373			6,18			
	4 gg	1	376	374,7	2,0	6,289	6,273	0,059	0,024
		2	373,0			6,292			
		3	375			6,237			
	7 gg	1	376	375,0	2,3	6,319	6,304	0,091	0,036
		2	373,0			6,325			
		3	376			6,268			
	10 gg	1	0	-	-	0	-	-	-
		2	0,0			0,000			
		3	0			0			
14 g	1	379	377,7	5,0	6,51	6,496	0,283	0,113	
	2	376,0			6,517				
	3	378			6,462				

Tabella 7.12- Valori ottenuti per la fraz. 0/30, dalla prova di espansione accelerata.

Dalla prova in espansione accelerata (fig. 7.10) risulta un'espansione al termine dei 16 giorni di 0,113% che è maggiore di 0,1%, cioè il valore massimo ammesso dalla norma (tab. 7.12).

Di conseguenza a questo punto sarebbe stato necessario sottoporre l'aggregato ad un'ulteriore verifica che consiste nel misurare l'espansione in condizioni meno severe, infatti i prismi di malta, confezionati con le stesse modalità della prova accelerata, vengono

mantenuti in ambiente umido alla temperatura di 38°C. Perché l'aggregato sia ritenuto idoneo al confezionamento del calcestruzzo l'espansione sui provini di malta deve risultare inferiore a 0,005% dopo 3 mesi e a 0,1% dopo 6 mesi di conservazione in ambiente umido. Solo qualora anche questa terza prova fornisca esito negativo l'aggregato deve essere opportunamente scartato. Nel caso in studio, nonostante la seconda prova in espansione accelerata non rientri nel limite di legge, si è comunque scelto di non procedere ulteriormente con la terza prova e di considerare comunque l'aggregato idoneo, in quanto il valore ottenuto non supera di molto il limite imposto dalla norma, considerando che i provini sono stati totalmente realizzati con il materiale di riciclo, mentre il calcestruzzo è stato realizzato solo con una percentuale di tale aggregato di riciclo miscelata con un'altra percentuale di materiale naturale.

### 7.2.3.2 SOSTANZE LIMO-ARGILLOSE

Le prestazioni meccaniche del calcestruzzo sono, influenzate dalla presenza sulla superficie dei granuli di particelle di materiale finissimo che possono ridurre l'adesione con la matrice cementizia. Le particelle fini che sono in grado di inquinare gli aggregati sono costituite da residui di polvere derivanti dal processo produttivo e da materiale di natura limo-argilloso. Entrambi questi materiali fini, per l'elevata superficie caratteristica che li contraddistingue, determinano un incremento della richiesta d'acqua per conseguire la lavorabilità prefissata; a questi inconvenienti le frazioni limo-argillose associano anche una drastica riduzione dell'aderenza all'interfaccia matrice-aggregato che conduce anche un abbattimento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo. Per tutti questi motivi la norma UNI 8520/2 impone un limite al contenuto di frazioni fini passanti allo staccio di 0,063 mm in funzione della natura dell'aggregato (tab. 7.13).

<b>AGGREGATO</b>	<b>NATURA</b>	<b>PERCENTUALE MASSIMA DI FINE PASSANTE ALLO STACCIO 0,063 mm</b>
GROSSO	Non frantumato, frantumato da depositi alluvionali	1,5
GROSSO	Frantumato da roccia	4,0
FINE	Non frantumato	3,0
FINE	Frantumato da depositi alluvionali	10
FINE	Frantumato da roccia	16
MISTO		3
0/D	Non frantumato, frantumato da depositi alluvionali	3
0/D	Frantumato da roccia	11

Tabella 7.13- Limiti ammissibili per il contenuto di polveri degli aggregati.

Come si comprende dai valori in tabella la norma tiene in considerazione un maggiore contenuto di finissimi per le sabbie, e in generale per gli aggregati prodotti mediante frantumazione delle rocce. Se gli aggregati possiedono un contenuto in finissimo maggiore di quello riportato in tabella, prima del loro utilizzo nel conglomerato devono essere sottoposti ad una ulteriore prova, allo scopo di accertare se le sostanze finissime sono di natura limo-argillose, in quanto, se così fosse, oltre ad incrementare la richiesta d'acqua risulterebbero anche pericolose per il possibile abbattimento delle prestazioni meccaniche del conglomerato.

Di seguito vengono riportati le percentuali di fine passante allo staccio 0,063 mm (tab. 7.14), trovati per i materiali di riciclo oggetto di studio, dalla quale è possibile notare un'elevata percentuale di fine per la frazione di sabbia riciclata, per tanto secondo la normativa questa frazione di aggregato di riciclo deve essere sottoposto ad un'ulteriore test.

	Sabbia riciclata [%]	Materiale riciclato fraz. 0/30 [%]
PERCENTUALE DI FINE PASSANTE ALLO STACCIO 0,063 mm	19,6	2,8

Tabella 7.14- Valori della percentuale di fine passante allo staccio 0,063 mm.

A questo punto è necessario eseguire la valutazione dei finissimi mediante un test di sedimentazione, come prevede la norma UNI EN 933-8, che misura l'equivalente in sabbia (SE). In tale prova una porzione di sabbia e una piccola quantità di soluzione flocculante vengono versati in un cilindro graduati e quindi agitati per rimuovere il rivestimento argilloso dalle particelle di sabbia nella porzione di prova. La sabbia viene quindi "irrigata" utilizzando un'ulteriore soluzione flocculante che forzi le particelle fini in sospensione sulla sabbia. Dopo 20 minuti, il valore dell'equivalente in sabbia (SE) viene calcolato come l'altezza del sedimento espressa come percentuale dell'altezza complessiva del materiale flocculato sul cilindro.

L'aggregato risulta accettabile se il valore di SE non è inferiore a 80 per aggregati naturali e 70 per aggregati di frantumazione, altrimenti è necessario eseguire un'ultima prova prima di valutare definitivamente se scartare l'aggregato.

Per la frazione di sabbia riciclata si è ottenuto un valore di SE pari a 28, nettamente inferiore rispetto a 70, quindi occorre eseguire l'ultima verifica prima di decidere di scartare l'aggregato.

Quest'ultima verifica consiste nella valutazione del blu di metilene (fig. 7.11), in accordo con la UNI EN 933-9, la quale prevede che gocce di una soluzione di blu di metilene vengano aggiunte ad una sospensione del campione in acqua. Dopo ogni aggiunta della soluzione colorata, viene verificato l'assorbimento da parte del campione osservando la macchia su una carta filtrante, per

rilevare la presenza di colore libero. Quando la presenza di colorante non assorbito viene confermata, il valore del blu di metilene (MB) viene calcolato ed espresso come grammi di colorante assorbito per Kilogrammo della frazione provata.

L'aggregato risulta accettabile se il valore di blu è inferiore a 1,2 g/Kg.

Per quest'ultima prova della valutazione dei finissimi, non è stato possibile determinare chiaramente un dato, in quanto si è deciso di fermarsi dopo aver ottenuto un valore di 4,5 g/Kg, poiché superava già ampiamente il limite accettato dalla norma, anche se la prova non era ancora terminata.



Figura 7.11- Prova del blu di metilene.

### 7.2.3.3 SOSTANZE ORGANICHE

Le sostanze organiche in un inerte (per lo più di origine vegetale) possono interagire negativamente con il processo di idratazione del cemento e rallentare o ridurre lo sviluppo delle resistenze meccaniche. Anche in questo caso, come per i limi e le argille, si tratta più di un inconveniente che riduce le prestazioni del calcestruzzo senza un vero e proprio pregiudizio per la durabilità dell'opera. L'entità dell'abbattimento delle prestazioni meccaniche (spesso solo alle brevi stagionature), e quindi l'accettabilità o meno dell'inerte inquinato da sostanze organiche, può essere valutata attraverso le prestazioni del calcestruzzo in confronto con quelle ottenute con un inerte privo di sostanze organiche e di comprovata qualità. La presenza di frammenti in legno, o di carbone o di altro materiale organico poroso, può comportare un rigonfiamento localizzato soprattutto in pavimenti esposti all'umidità: si possono manifestare espulsioni localizzate molto

simili a quelle che si verificano nei pop-out da aggregati reattivi. Il contenuto di sostanze organiche viene determinato con un metodo colorimetrico, per confronto con una soluzione standard di colore determinato, con la colorazione assunta da un liquido surnatante posto a contatto con l'aggregato, come previsto dalla norma UNI EN 1744-1 (*Componenti che influiscono sulla presa e indurimento del calcestruzzo*). Se la colorazione del liquido a contatto con l'aggregato dovesse risultare più scura di quella del liquido di riferimento, l'aggregato non deve essere scartato ma deve essere effettuata una valutazione del contenuto in acido fulvico.

Per gli aggregati oggetto di studio si sono ottenute le colorazioni visibili nelle foto sotto riportate (fig. 7.12 – 7.13), dalle quali è evidente che il materiale riciclato fraz. 0/30 presenta una colorazione più chiara della soluzione di riferimento e risulterebbe quindi idoneo al confezionamento di calcestruzzo per quanto riguarda il contenuto in sostanza organica, mentre la sabbia riciclata presenta una colorazione molto più scura della soluzione di riferimento e sarebbe pertanto da scartare.



Figura 7.12- Colorazione risultata dalla prova del contenuto in sostanza organica per il materiale riciclato fraz. 0/30.



Figura 7.13- Colorazione risultata prova del contenuto in sostanza organica per la sabbia riciclata.

#### 7.2.4 STUDIO PETROGRAFICO

Per completare la caratterizzazione degli aggregati da riciclo è stato fatto l'esame petrografico operando sia con il microscopio ottico che con il SEM (microscopio elettronico a scansione), si è inoltre ritenuto utile determinate le composizioni chimiche e mineralogiche tramite analisi in XRF e in XRD.

Le osservazioni e le analisi sono state condotte non sull'intero campione ma su alcune frazioni ottenute dall'analisi granulometrica, in particolare sono state esaminate le frazioni 1-2 mm e 2-4 mm di tutti i campioni prelevati dal centro di riciclaggio.

Le frazioni selezionate sono state in parte inglobate per l'analisi petrografica al microscopio, ed in parte polverizzate per le analisi in XRF ed XRD.

##### 7.2.4.1 DESCRIZIONE PETROGRAFICA

Dopo aver inglobato si è provveduto a realizzare delle sezioni sottili di spessore 30  $\mu\text{m}$ , che servono appunto per le osservazioni al microscopio (fig. 7.14).

Le osservazioni hanno permesso di affermare che in tutte le granulometrie indagate sono presenti gli stessi frammenti, sia litici che litoidi, in particolare è stato possibile riconoscere la presenza di materiali eterogenei che spaziano da: materiali ceramici, frammenti di calcestruzzo, intonaci e clasti carbonatici spesso contenenti dei fossili.

All'interno dei frammenti ceramici sono spesso riconoscibili cristalli di quarzo, plagioclasio, k-feldspati, ossidi e fillosilicati come la muscovite.

Sporadicamente è stata riscontrata la presenza di quarzo microcristallino, alcuni cristalli di questa fase minerale presentano anche bordi di reazione con la pasta di cemento, osservazione di notevole importanza per l'applicazione nel settore dei calcestruzzi, in quanto questa fase mineralogica può generare problemi di reattività agli alcali con fenomeni di pop-out.

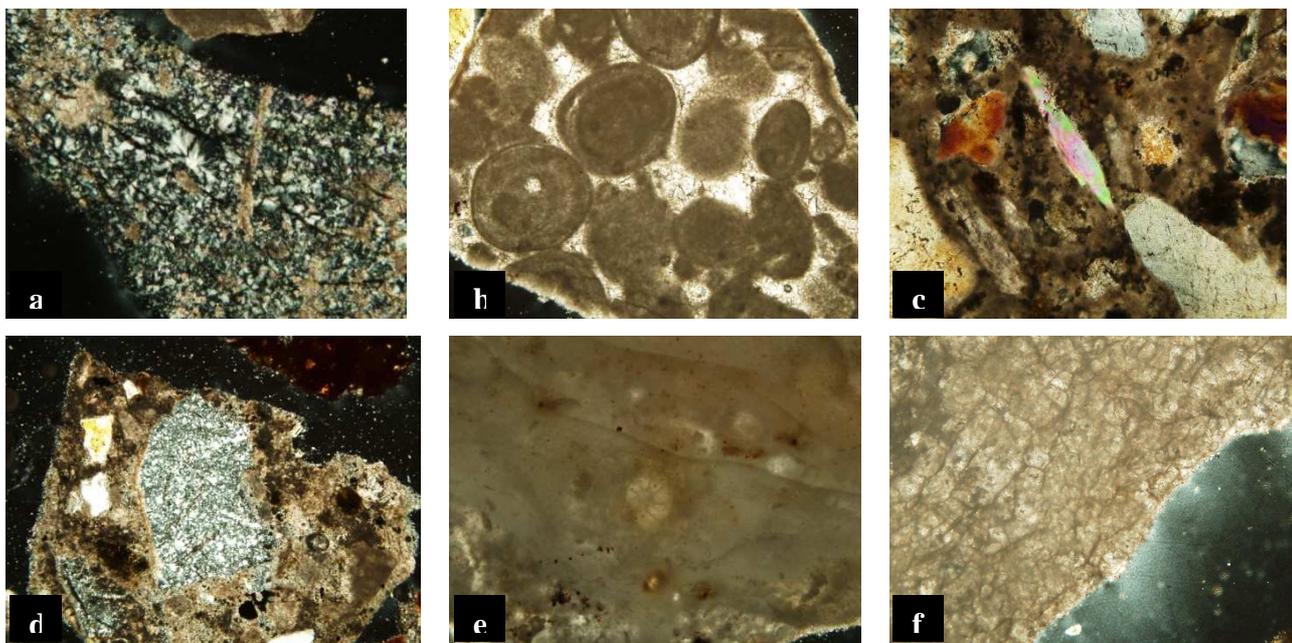


Figura 7.14- Osservazioni al microscopio ottico: a) quarzo microcristallino; b) Clasto carbonatico con fossili; c) cristallo di muscovite; d) frammento di calcestruzzo con incluso un cristallo di quarzo microcristallino; e) clasto carbonatico con incluso un fossile; f) carbonato dolomitizzato.

#### *7.2.4.2 ANALISI CHIMICA QUANTITATIVA DEL MATERIALE MEDIANTE ANALISI ALLA FLUORESCENZA X (XRF)*

La composizione chimica delle frazioni indagate, espressa in percentuale in peso per gli elementi maggiori, consente di caratterizzare i componenti e di definire la qualità della frazione inorganica.

L'analisi si esegue mediante spettrofotometria di fluorescenza dei raggi X, metodologia che si basa sul riconoscimento delle radiazioni componenti lo spettro discontinuo emesso dal campione (analisi qualitativa) e sulla valutazione dell'intensità di determinate radiazioni, confrontata con quella di campioni a composizione nota (analisi quantitativa).

Agli ossidi maggiori si aggiunge la percentuale di perdita al fuoco (L.O.I.) ovvero la diminuzione di peso, fino al valore costante, che subisce un campione di materiale per effetto del riscaldamento a 1000° C.

I dati ottenuti permettono di evidenziare una notevole somiglianza nei valori tra i campioni di “Materiale riciclato frazione 0-30 mm” e “Materiale riciclato frazione 30-60 mm”, mentre appare evidentemente differente il campione di “sabbia riciclata” che al contrario degli altri è più ricco in silice e più povero in calcio, oltre a presentare una perdita al fuoco notevolmente più bassa, mentre per il resto i valori sono confrontabili (tab. 7.15).

	<b>Sabbia riciclata</b>	<b>Materiale riciclato frazione 0-30 mm</b>	<b>Materiale riciclato frazione 30-60 mm</b>
LOI	13,10 %	21,44 %	22,27 %
SiO <sub>2</sub>	56,66 %	38,69 %	38,09 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,74 %	6,97 %	6,31 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,06 %	2,55 %	2,26 %
CaO	10,77 %	21,60 %	21,61 %
MgO	2,92 %	4,80 %	5,71 %
SO <sub>3</sub>	0,28 %	0,34 %	0,47 %
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,61 %	1,34 %	1,21 %
K <sub>2</sub> O	1,99 %	1,55 %	1,38 %
SrO	<0,03 %	<0,03 %	<0,03 %
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10 %	0,06 %	0,07 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,16 %	0,10 %	0,09 %
TiO <sub>2</sub>	0,39 %	0,31 %	0,29 %

Tabella 7.15- Percentuale in peso degli ossidi maggiori, ottenuta mediante fluorescenza a raggi X.

#### 7.2.4.3 ANALISI MINERALOGICA QUALITATIVA MEDIANTE DIFRATTOMETRIA ALLA FLUORESCENZA X (XRD)

L'analisi mineralogica porta al riconoscimento dei minerali presenti nel materiale in esame.

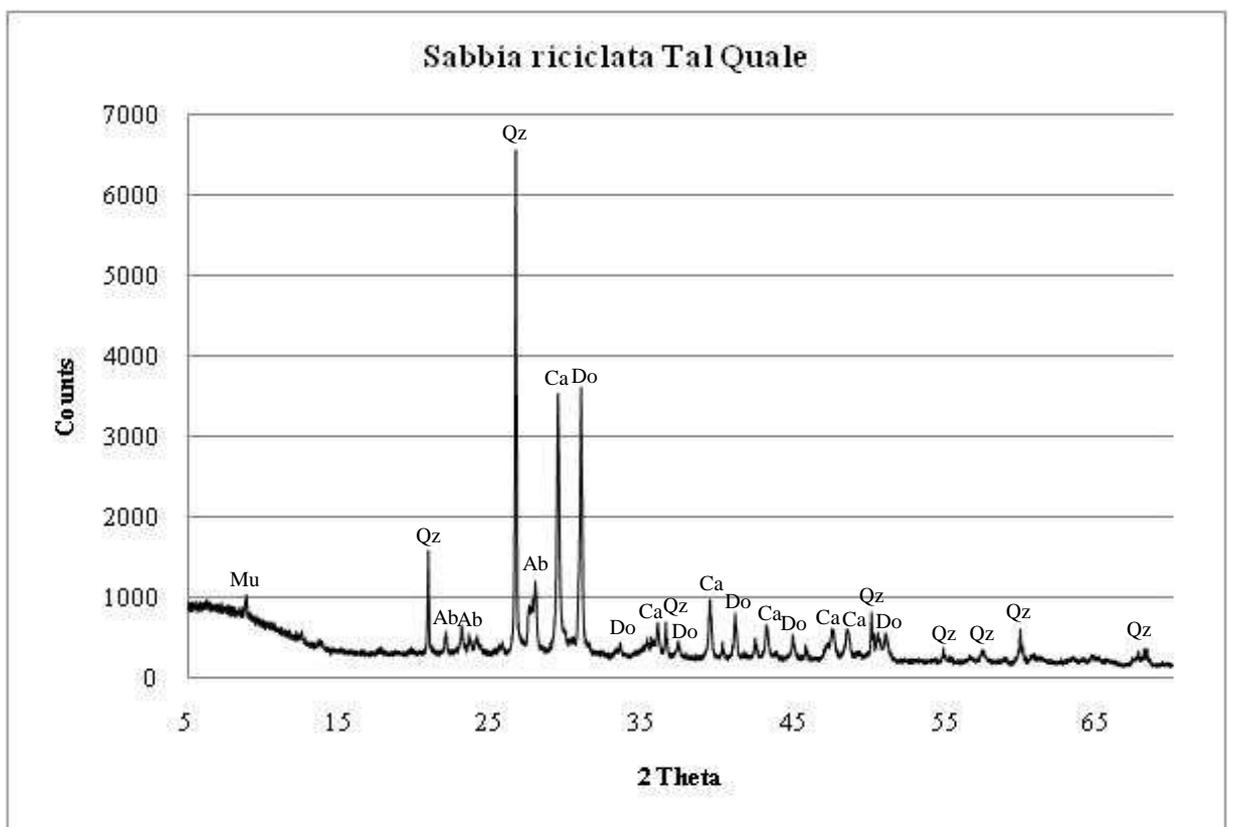
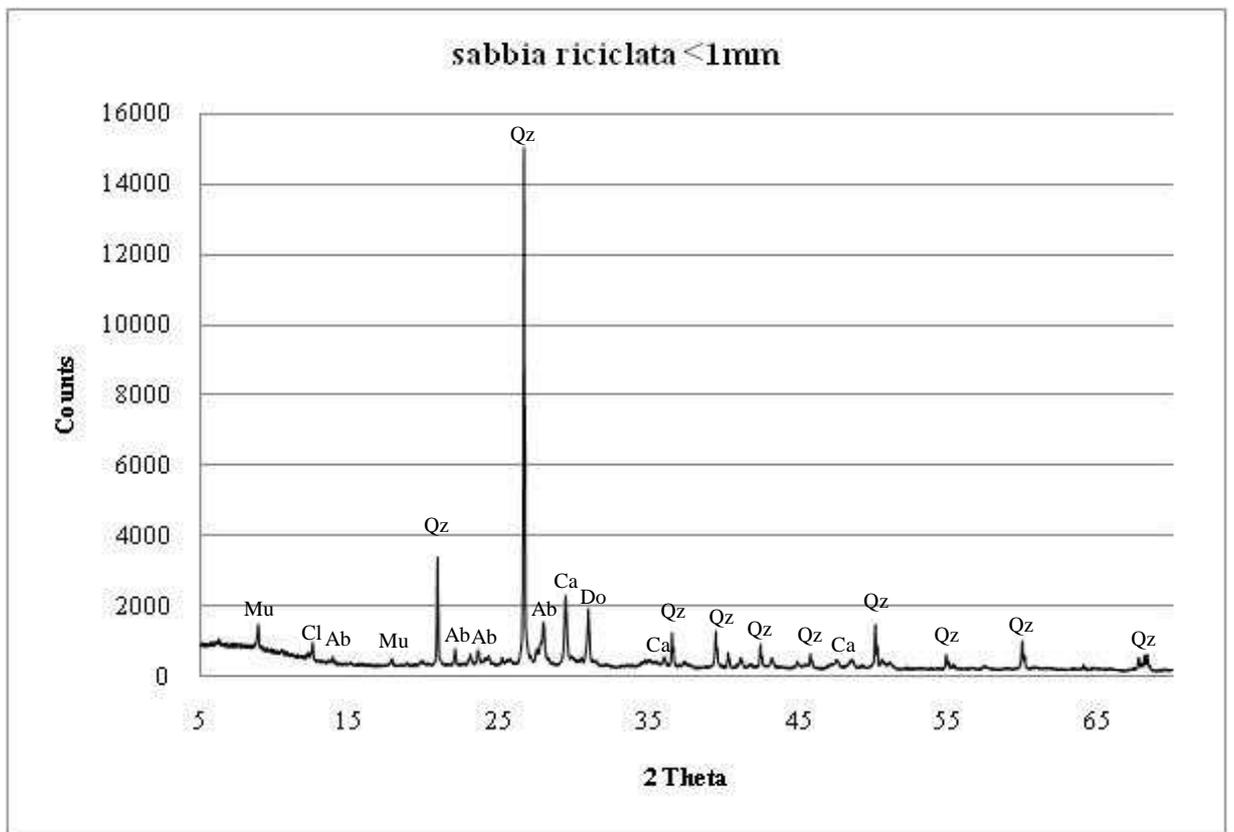
Le analisi sono state effettuate con il metodo della diffrazione di raggi X da campioni policristallini, ridotti in polvere impalpabile. Il riconoscimento delle fasi cristalline viene fatto dai picchi dei diffrattogrammi (fig. 7.15), i quali per tutti i campioni analizzati hanno evidenziato la presenza delle seguenti fasi cristalline: quarzo, calcite, dolomite, albite, microclino, muscovite e in minor quantità clinoclorite, orneblenda e antigorite.

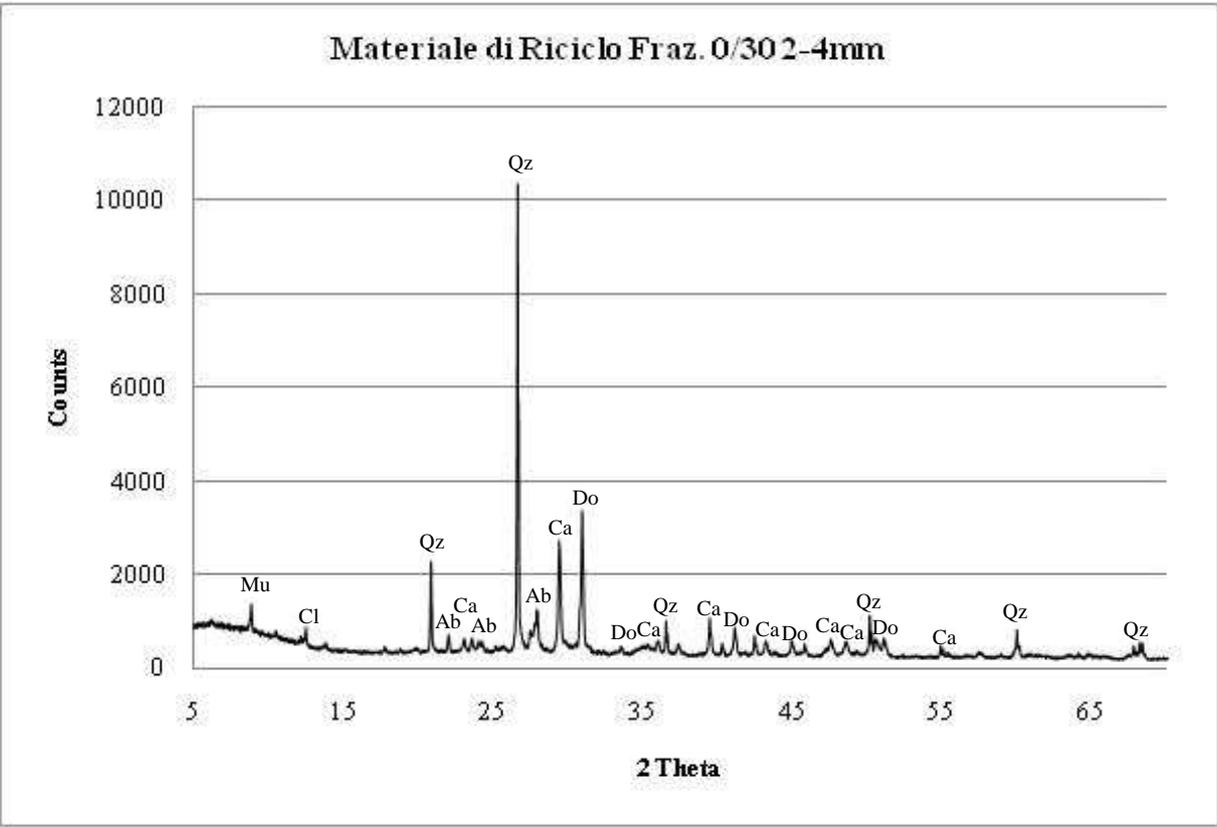
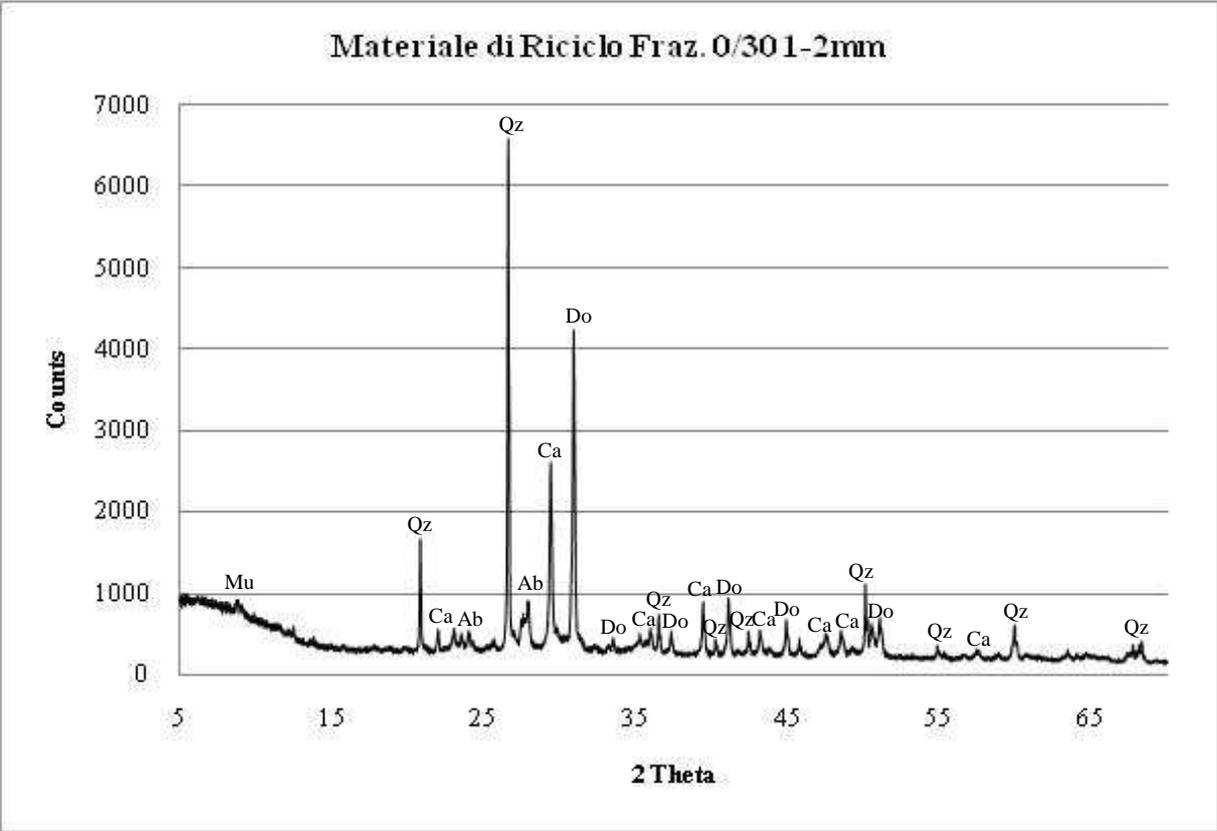
È importante evidenziare che il quarzo è una delle fasi mineralogiche più abbondanti, per tanto è risultata ancor più importante la precedente osservazione al microscopio, perché solo quella ha permesso di individuare la presenza di fasi del quarzo che possono creare problemi di reattività, in quanto non in tutte le sue forme esso risulta reattivo.

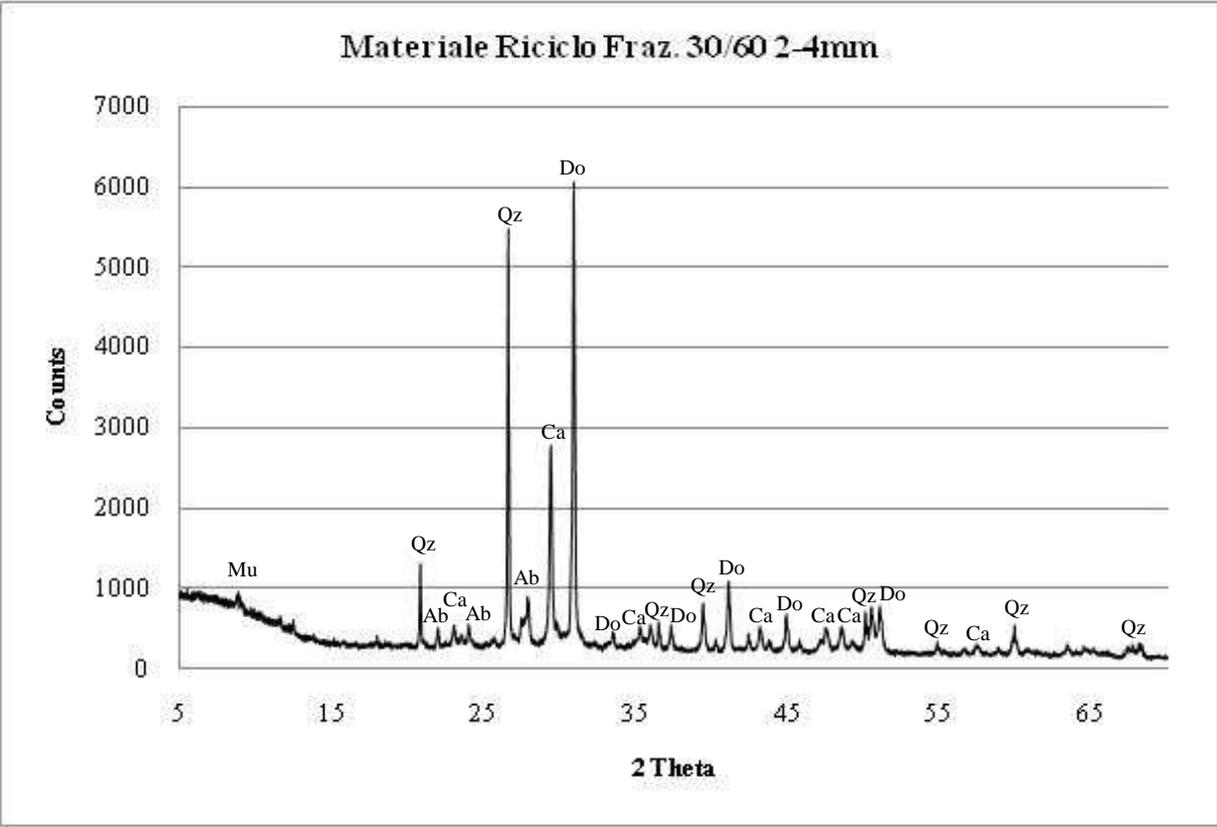
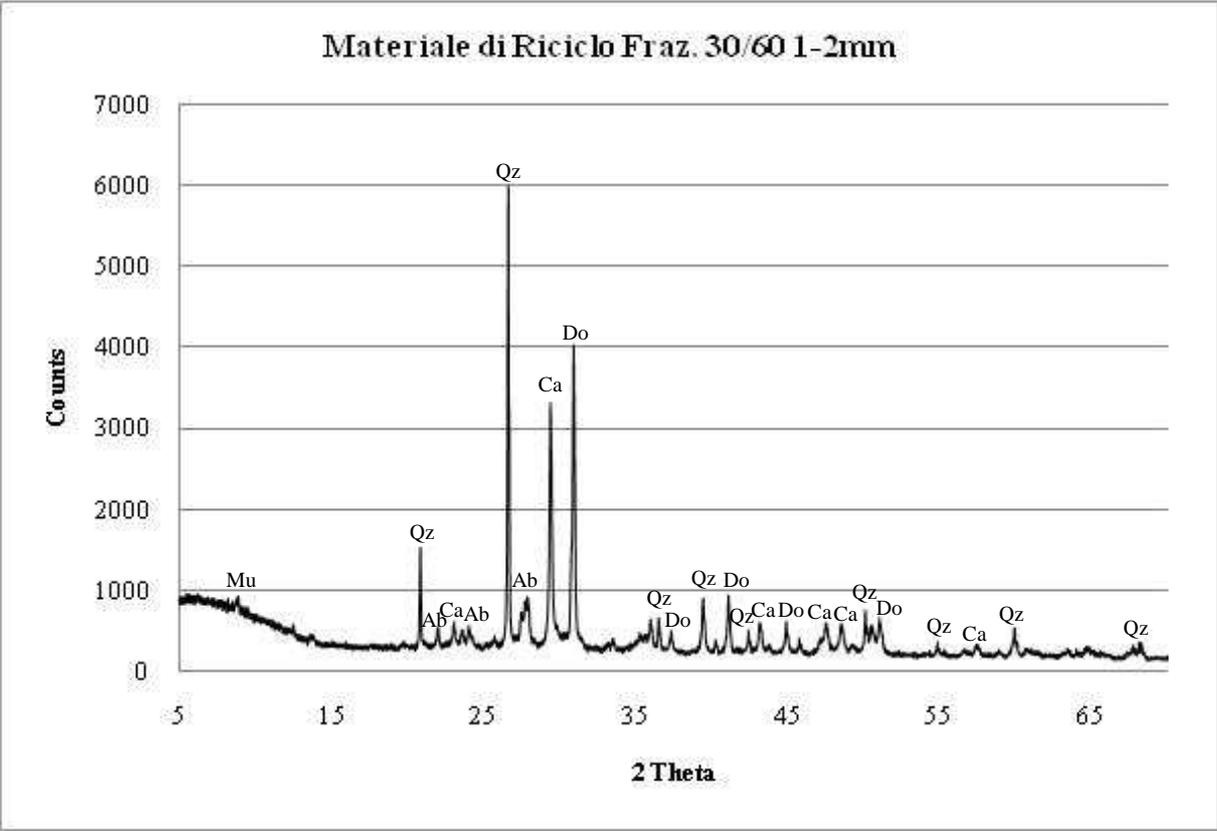
Di seguito vengono riportati i diffrattogrammi con le relative interpretazioni di fase, dove:

Do= dolomite; Ab= albite; Ca= calcite; Qz= quarzo; Mu= muscovite; Cl= clinoclorite.

Figura 7.15







### 7.3 PROGETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO ED IL MIX-DESIGN

In seguito alla prima fase della sperimentazione consistita nella caratterizzazione degli aggregati utilizzati, si è proceduto alla realizzazione di vari impasti preliminari attraverso i quali individuare sia la composizione ottimale del conglomerato, che l'eventuale additivo meglio compatibile con il tipo di calcestruzzo studiato, sul quale eseguire la completa caratterizzazione fisico-meccanica.

Sono stati quindi realizzati una serie di impasti di dimensioni ridotte, 30 litri, al fine di individuare al meglio un paio di miscele da riprodurre in seguito in volumi maggiori tali da permettere la completa caratterizzazione del calcestruzzo prodotto. Questi impasti di prova sono stati ottenuti mescolando gli aggregati di riciclo precedentemente caratterizzati con aggregati naturali denominati "Sataf", le cui caratteristiche sono già note e che vengono normalmente utilizzati per il confezionamento di calcestruzzo. In particolare sono stati realizzati 7 impasti preliminari, ottenuti studiandone il mix-design.

#### *Il mix-design*

Il calcestruzzo si ottiene miscelando in diverse proporzioni, a seconda delle caratteristiche richieste dal suo uso, degli aggregati (sabbia e ghiaia) e del cemento con acqua ed eventuali acceleranti di presa. Per determinare in quali proporzioni i vari ingredienti verranno a far parte del calcestruzzo, occorre fare da prima una progettazione della miscela, chiamata "Mix design", che permette di valutare il dosaggio dei singoli elementi che entrano a far parte del calcestruzzo, sulla base delle caratteristiche che quest'ultimo deve avere.

#### *7.3.1 DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA OTTIMALE*

La migliore distribuzione granulometrica può essere desunta in base a considerazioni relative al volume dei vuoti fra gli aggregati. Quando infatti due aggregati monogranulari di dimensioni differenti vengono mescolati, il volume dei vuoti risulta inferiore a quello di ciascun componente e vi è un particolare rapporto fra le quantità relative dei due aggregati per il quale il volume dei vuoti risulta minimo.

Bisogna aggiungere agli aggregati grossi degli aggregati più fini per riempire gli interstizi della struttura, cioè per ridurre i volumi dei vuoti.

#### *La granulometria.*

Come si è detto la granulometria degli aggregati è molto importante. Essa viene determinata per vagliatura. Per ottenere un conglomerato con la massima densità possibile, la curva granulometrica completa degli aggregati dovrebbe seguire la seguente formula, proposta da Fuller e Thompson:

$$P = \sqrt{\frac{d}{D_{MAX}}} \cdot 100$$

Dove:

P = percentuale di passante al setaccio con apertura d

$D_{MAX}$  = diametro massimo dell'aggregato analizzato.

Assumendo nel nostro caso un diametro massimo per l'aggregato di valore pari a 31,5 mm, si otterrà una curva come quella in figura 7.16.

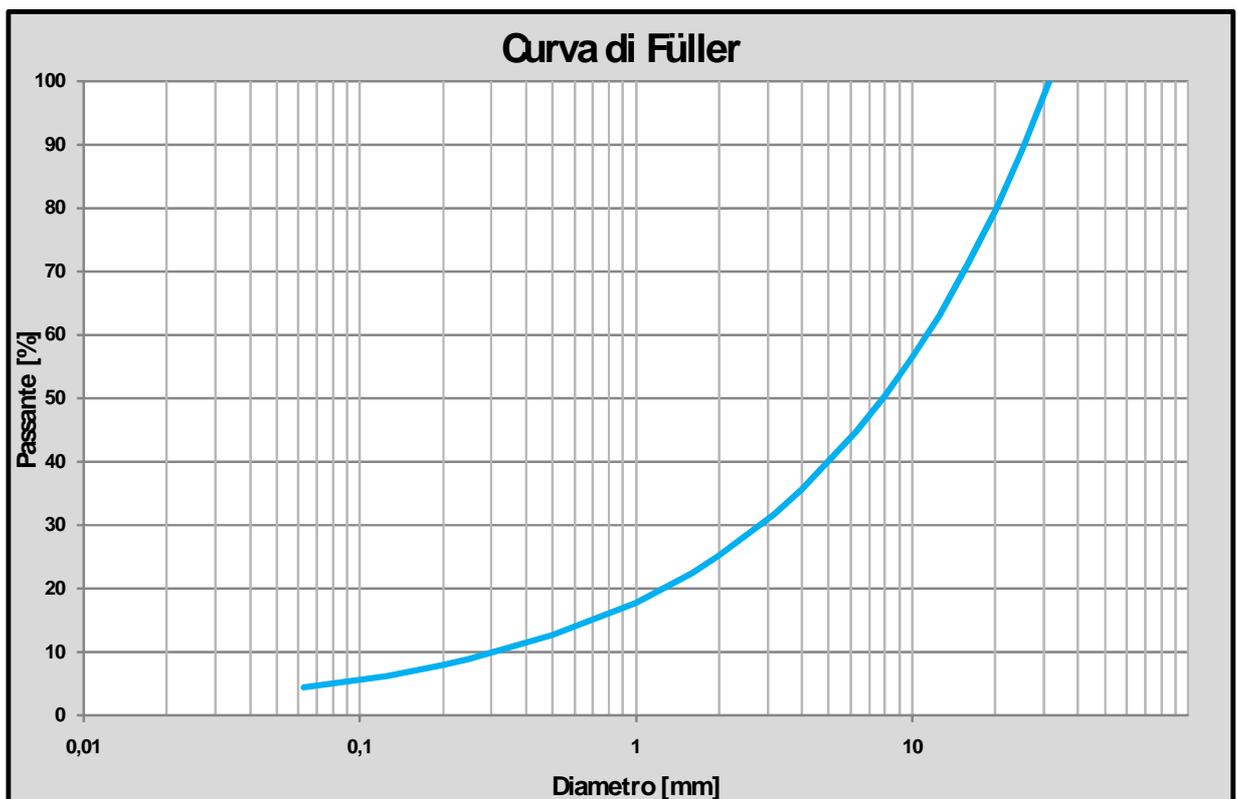


Figura 7.16- Curva di Füller

Con questa espressione, però, si ottiene un calcestruzzo a massima densità, nel quale, cioè si raggiunge il massimo “impacchettamento” dei granuli possibile.

Per queste sue caratteristiche, quindi, il calcestruzzo risulterà poco lavorabile, richiedendo in cantiere mezzi di compattazione molto efficienti.

Bolomey propose una modifica a questa formula, con l'introduzione di un parametro funzione della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile.

La formula di Bolomey si presenta così:

$$P = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{MAX}}}$$

Dove:

P = percentuale di passante al setaccio con apertura d;

$D_{MAX}$  = diametro massimo dell'aggregato analizzato;

A = parametro in funzione del tipo di aggregato e della lavorabilità (tab. 7.17).

Tipo di aggregato	Valore di A per calcestruzzi con consistenza di:		
	Terra umida	Plastica semifluida	Fluida superfluida
Alluvionali	8	10	12
Frantumati	10	12	14

Tabella 7.17- Valori del parametro A.

Il parametro A cresce all'aumentare della lavorabilità e anche passando da aggregati alluvionali, più tondeggianti, ad aggregati frantumati, più irregolari.

Inoltre un aumento di A fa sì che aumenti anche la quantità di fini presenti nell'aggregato.

Assumendo nel caso oggetto di questo studio ancora un diametro massimo per l'aggregato di valore pari a 31,5 mm, con un aggregato frantumato, si otterranno curve come quelle in figura 7.17 a seconda della lavorabilità (parametro A), che vado a prendere in considerazione.

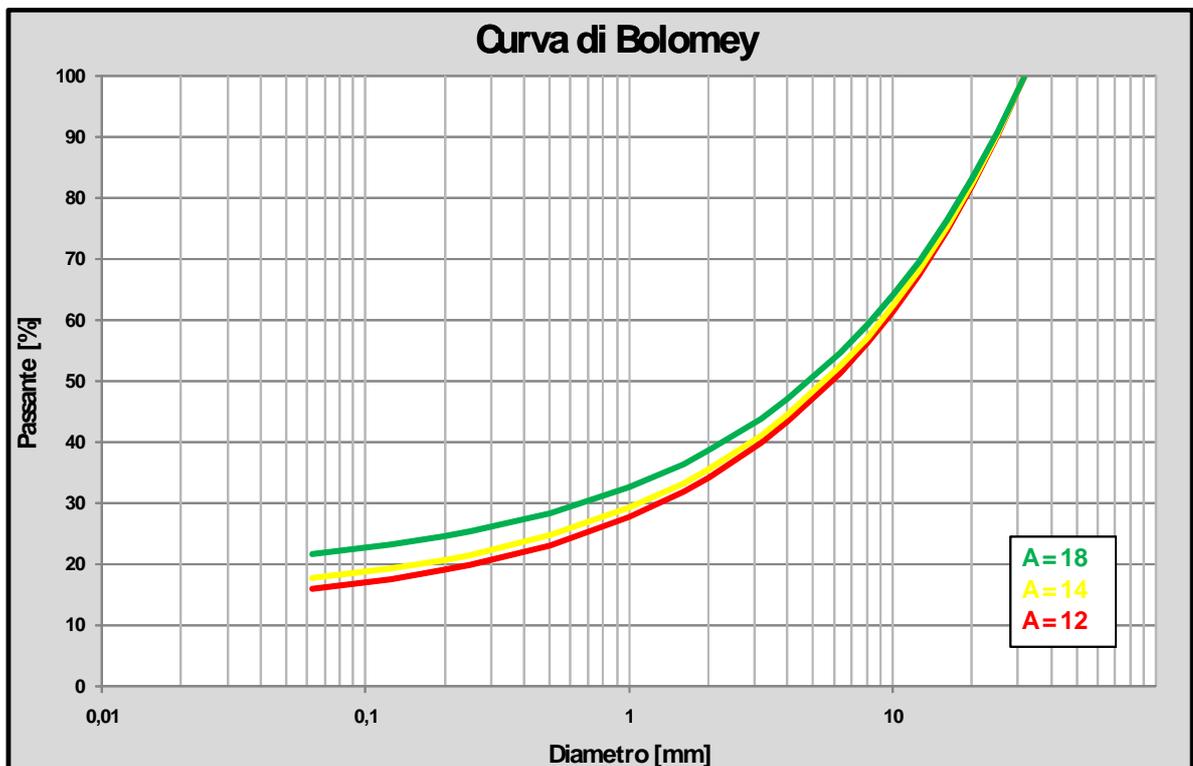


Figura 7.17- Possibili curve di Bolomey a seconda del parametro A che si considera.

Le curve di Füller e Bolomey differiscono tra loro nella quantità di fini (maggiore per quella di Bolomey) e quindi anche nella quantità di ghiaia (maggiore per quella di Füller).

In genere durante la progettazione di un calcestruzzo, si utilizza la curva di Bolomey per calcestruzzi più lavorabili o che si debbano pompare.

*La combinazione di più granulometrie.*

Spesso, come nel caso oggetto del seguente studio, sono fornite le granulometrie di alcune classi di aggregati e non la composizione continua (un'unica classe da 0 mm a DMAX).

Per questo motivo occorre costruire la combinazione ottimale delle classi granulometriche a disposizione, prese in diverse percentuali, in modo da ottenere la granulometria migliore per il calcestruzzo (ossia più prossima ad una delle curve teoriche precedente spiegate).

Questo metodo prevede di partire dalle curve granulometriche estese a disposizione per ciascuna classe, per fare ciò si estende ciascuna curva fino ai due estremi del passante (0% e 100%), in modo che tutte e due le classi granulometriche a disposizione abbiano un valore di passante per tutte le aperture degli stacci utilizzati (anche di dimensioni differenti da quella della classe considerata) (fig. 7.18).

Fatto questo è sufficiente elaborare tutte le possibili combinazioni delle due classi e moltiplicare per le varie percentuali le due granulometria di base.

In seguito, prendendo a riferimento una delle curve tra quella di Füller o di Bolomey, si può valutare tra tutte le possibili combinazioni ipotizzate, quella che presenta la minore distanza dalla curva ideale, oppure come nel caso studiato si può prendere a riferimento un fuso che considera la composizione granulometrica ideale secondo la norma UNI EN 480-1 e valutare la migliore composizione calcolata rientrante all'interno di tale fuso.

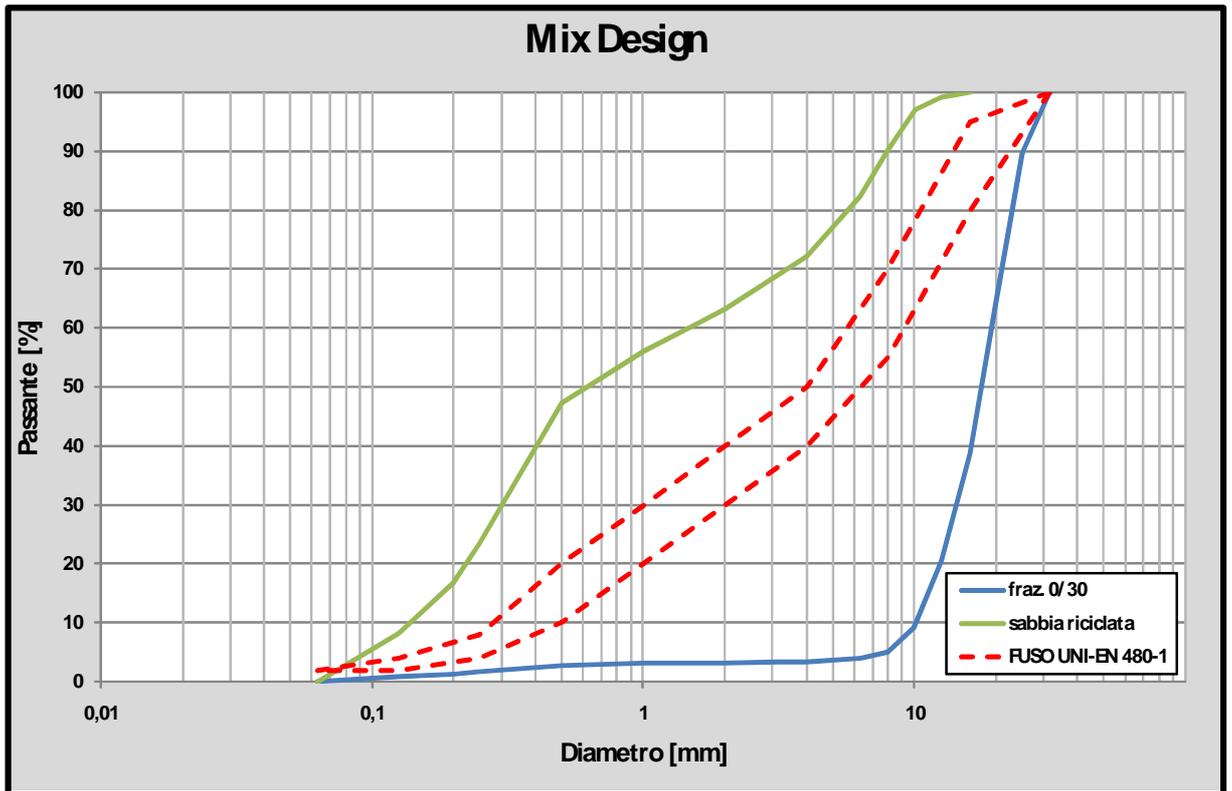


Figura 7.18- Curve granulometriche estese e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

Nel progettare la composizione granulometrica ideale, è stato necessario prendere in considerazione non soltanto le curve granulometriche degli aggregati riciclati caratterizzati precedentemente, ma si è deciso inoltre di miscelare tali materiali con frazioni di aggregato naturale, identificato con il nome “Sataf” (tab. 7.18 - fig. 7.19), comunemente usato da Italcementi per testare dei mix per calcestruzzo.

setacci	Filler ventilato Cremaschi	2%	113	10%	103	13%	117R	15%	107	5%	109	25%	10.20	30%	MISCELA CALCOLATA
31,5	100,0	2,0	100,0	10,0	100,0	13,0	100,0	15,0	100,0	5,0	100,0	25,0	100,0	30,0	100,0
16	100,0	2,0	100,0	10,0	100,0	13,0	100,0	15,0	100,0	5,0	100,0	25,0	77,9	23,4	93,4
8	100,0	2,0	100,0	10,0	100,0	13,0	100,0	15,0	100,0	5,0	80,6	20,2	0,9	0,3	65,4
4	100,0	2,0	100,0	10,0	100,0	13,0	100,0	15,0	97,2	4,9	2,2	0,6	0,0	0,0	45,4
2	100,0	2,0	100,0	10,0	100,0	13,0	63,2	9,5	1,9	0,1	0,6	0,4	0,0	0,0	34,7
1	100,0	2,0	100,0	10,0	99,3	12,9	2,1	0,3	0,1	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0	25,3
0,5	100,0	2,0	100,0	10,0	13,5	1,8	1,2	0,2	0,1	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	14,0
0,25	100,0	2,0	49,4	4,9	1,4	0,2	0,7	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	7,3
0,125	100,0	2,0	3,1	0,3	0,7	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	2,5
0,063	99,8	2,0	0,8	0,1	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	2,2

Tabella 7.18- Granulometrie aggregato Sataf.

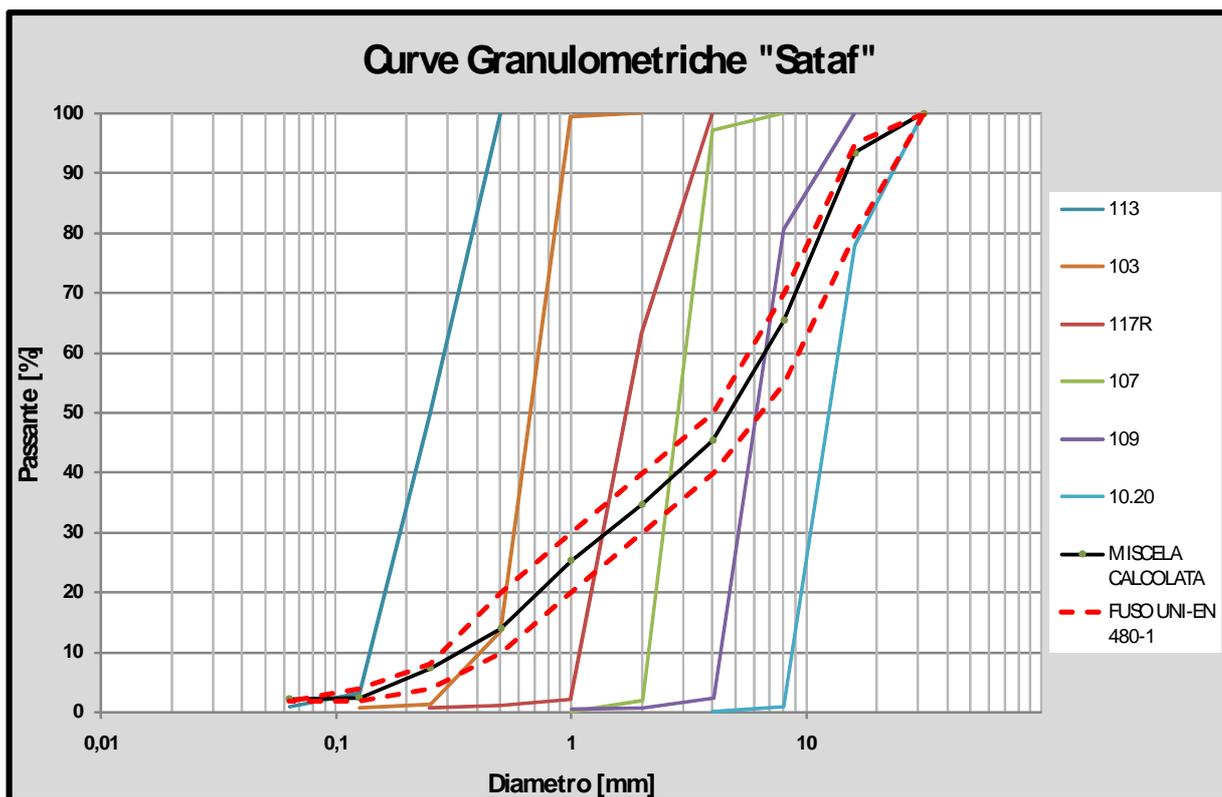


Figura 7.19- Curve granulometriche estese “Sataf” e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

Dall’elaborazione di tutte le possibili combinazioni, sia con solo aggregato di riciclo, sia con una miscela di aggregato di riciclo e aggregato naturale “Sataf”, sono state progettate 7 curve granulometriche ideali, in accordo con il fuso della norma UNI EN 480-1, di cui una realizzata con soli aggregati di riciclo (curva G), una realizzata come riferimento impiegando solo aggregati naturali “Sataf” (curva A) (fig. 7.20), e cinque sono state realizzate con miscele di aggregato di riciclo e aggregato naturale ( curve: B – fig. 7.21, C – fig. 7.22, D – fig. 7.23, E – fig. 7.24, F – fig. 7.25, G –fig. 7.26) (tab. 7.19).

		impasti da 30 l						
		A	B	C	D	E	F	G
aggregati sataf	filler Cremaschi	2%	-	-	2%	-	-	-
	113	10%	5%	5%	10%	7,6%	8,3%	-
	103	13%	6,5%	6,5%	13%	10%	11%	-
	117F	7,5%	3,75%	3,75%	7,5%	5,7%	7,0%	-
	117R	7,5%	3,75%	3,75%	7,5%	5,7%	7,0%	-
	107	5%	2,5%	2,5%	5%	4%	5%	-
	109	25%	12,5%	12,5%	25%	19%	20%	-
	10.15	15%	15%	-	-	-	-	-
	15.20	10%	10%	-	-	-	-	-
aggregati diga	6,3-31,5	5%	5%	-	-	-	-	
aggregati riciclati	sabbia riciclata	-	36%	36%	-	18%	12%	70%
	mat. Riciclato 0/30	-	-	30%	30%	30%	30%	30%

Tabella 7.19- Curve granulometriche estese “Sataf” e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

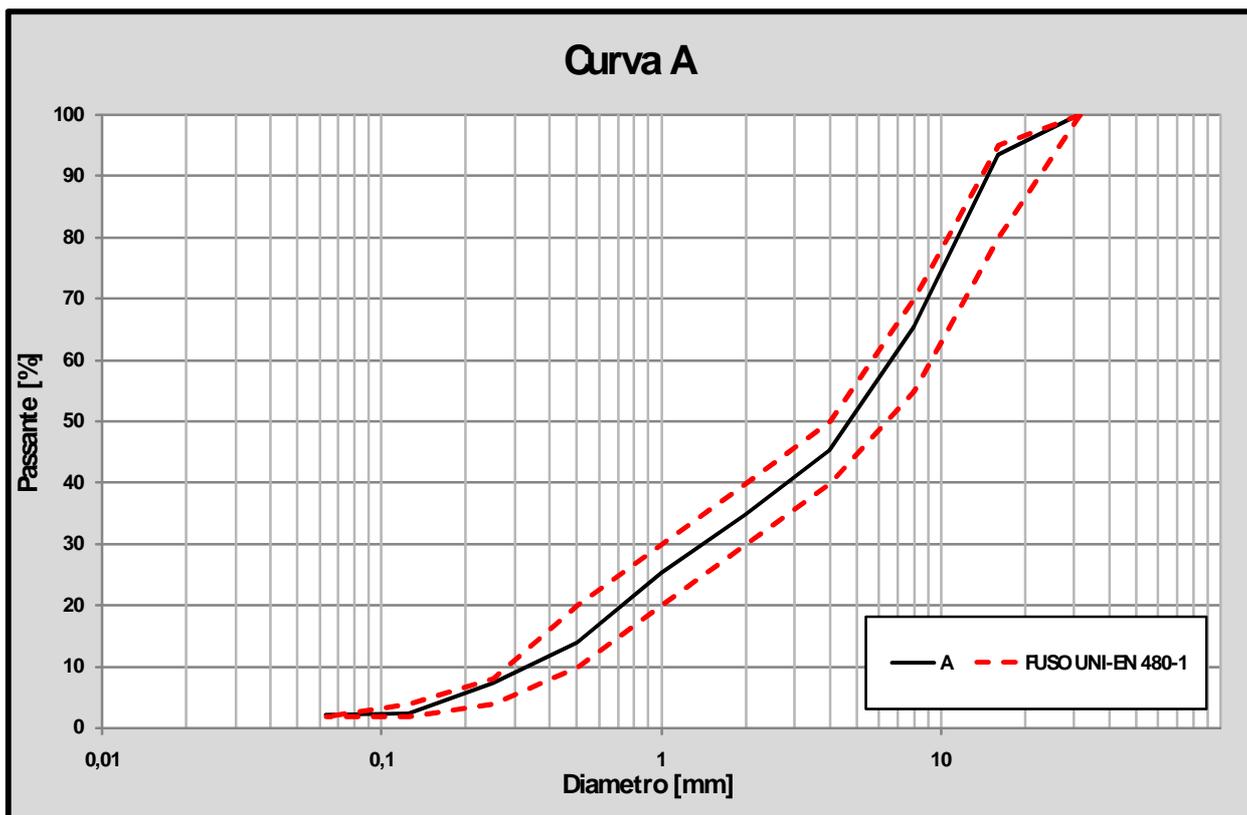


Figura 7.20- Curve granulometriche miscela A e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

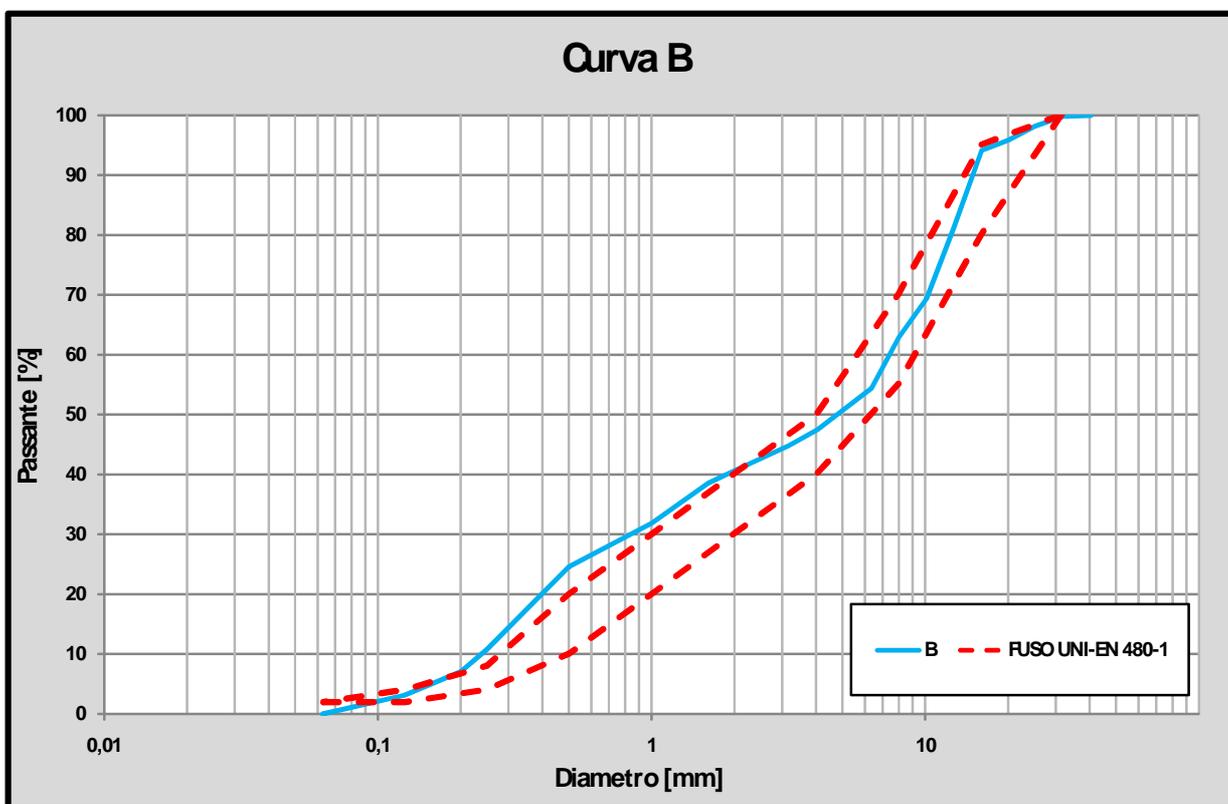


Figura 7.21- Curve granulometriche miscela B e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

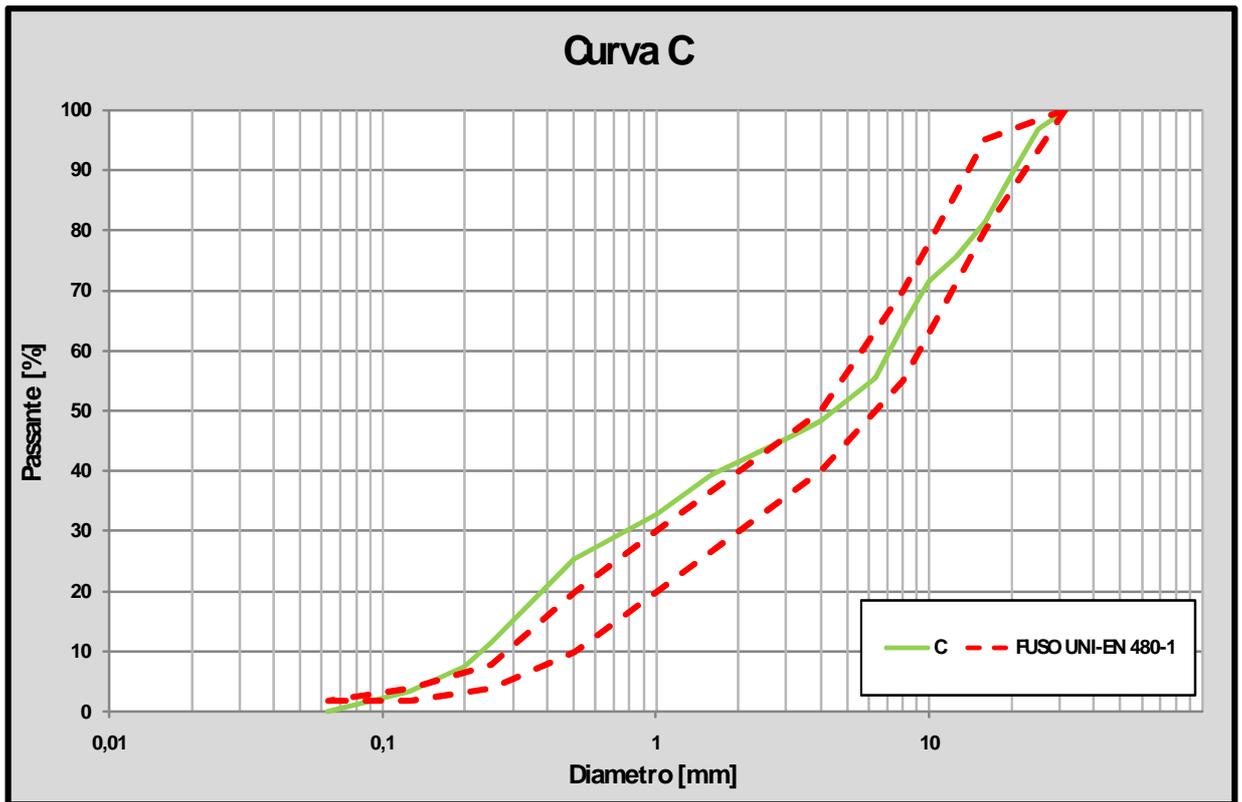


Figura 7.22- Curve granulometriche miscela C e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

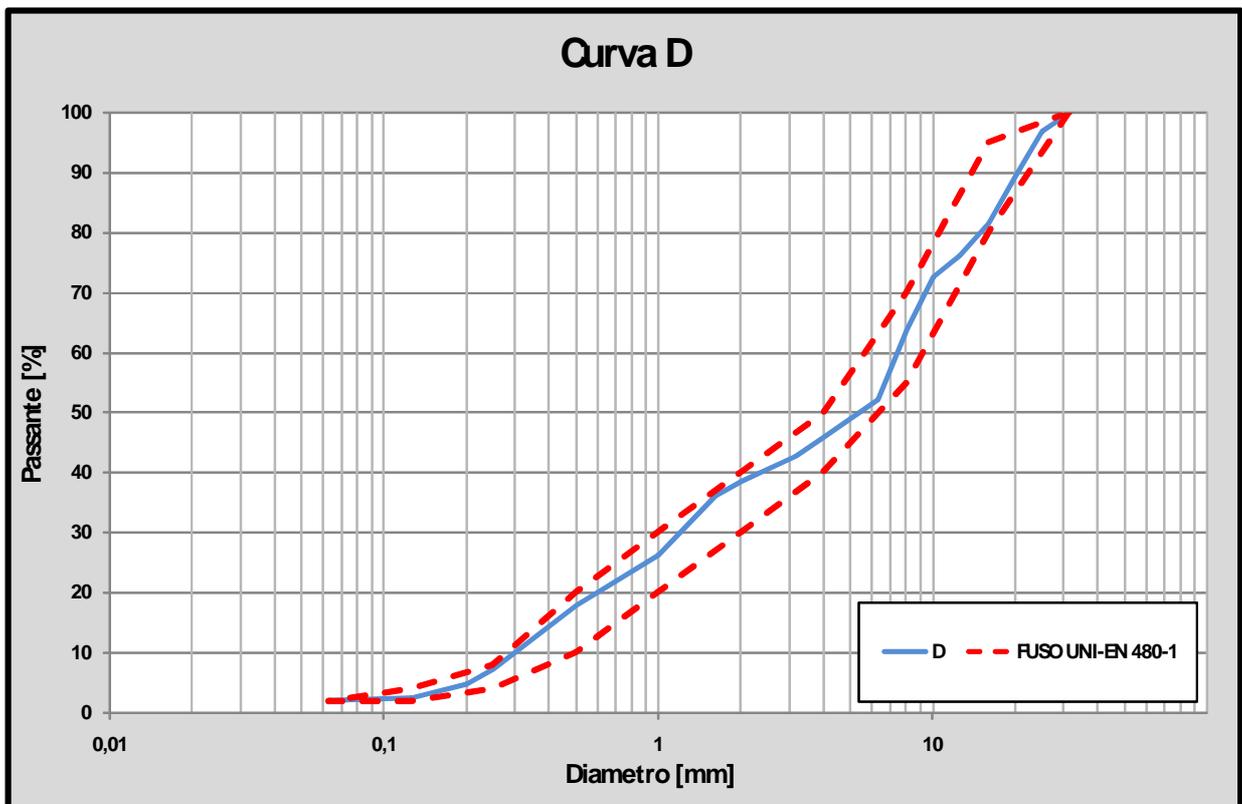


Figura 7.23- Curve granulometriche miscela D e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

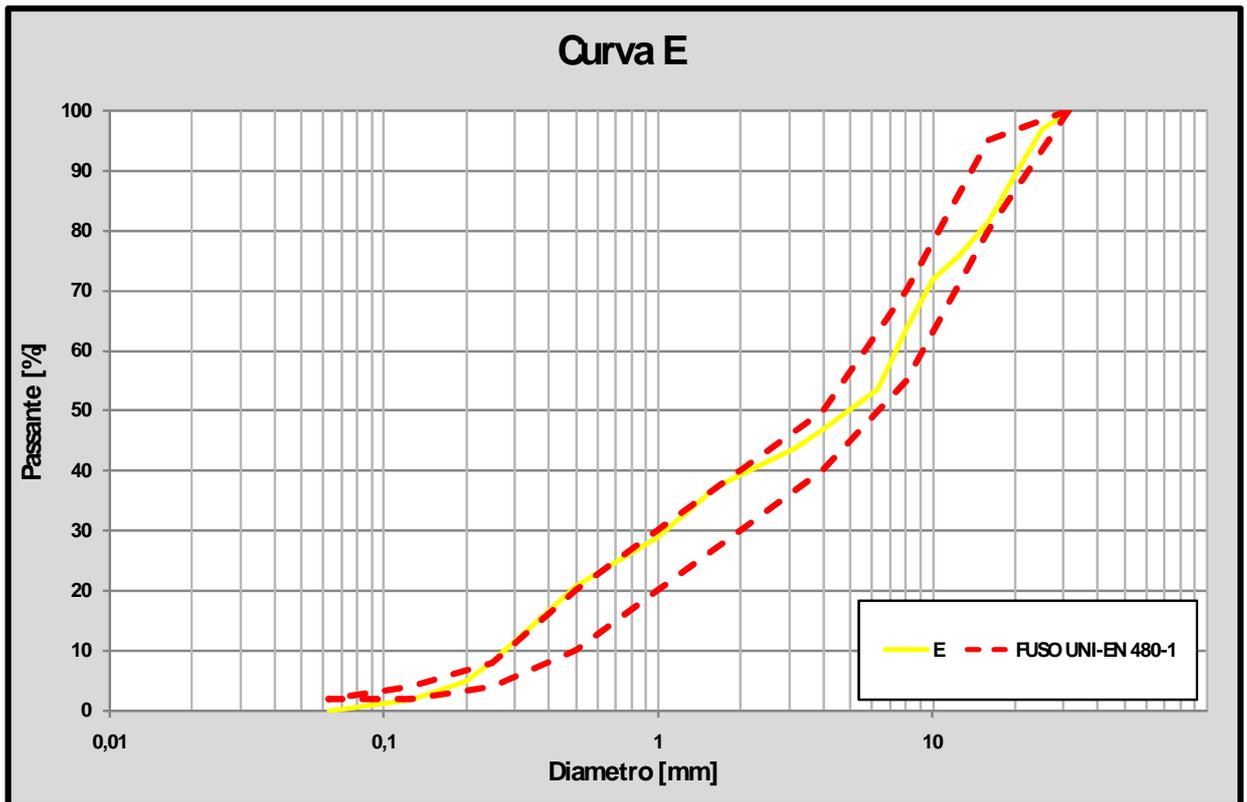


Figura 7.24- Curve granulometriche miscela E e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

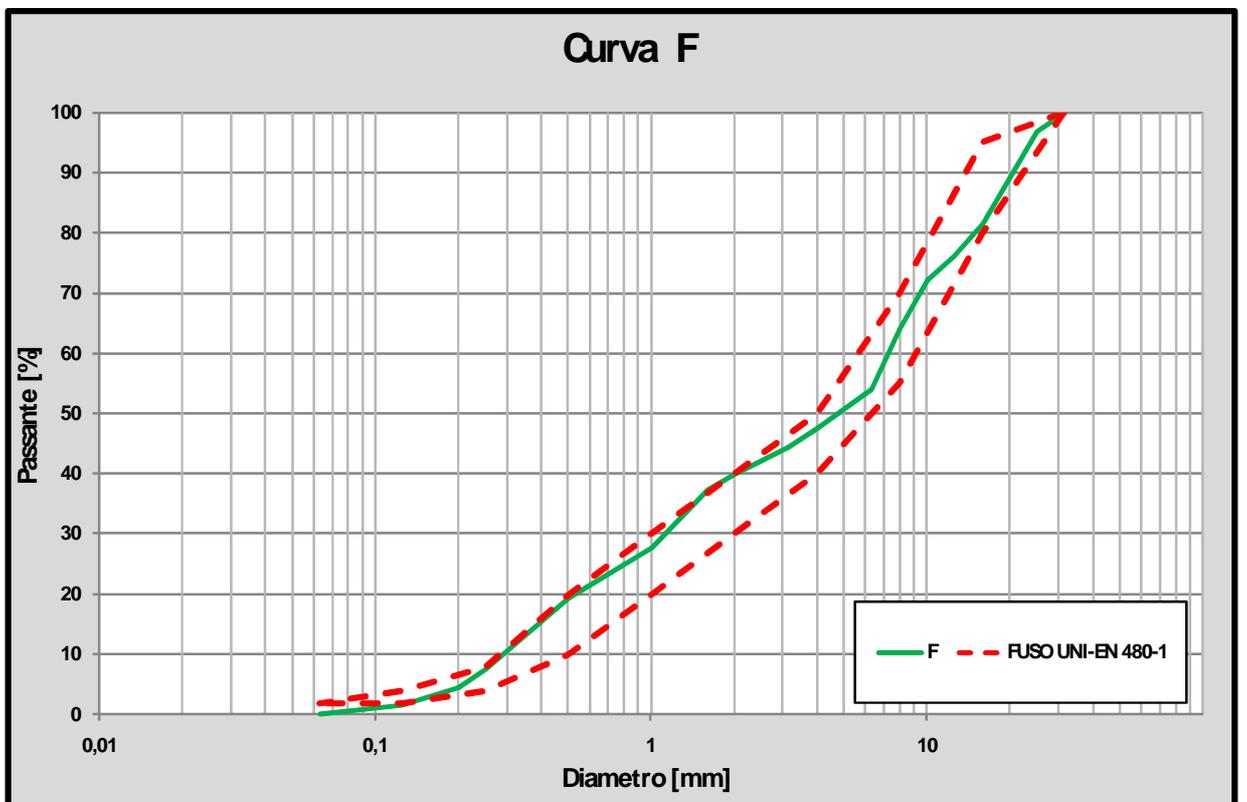


Figura 7.25- Curve granulometriche miscela F e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

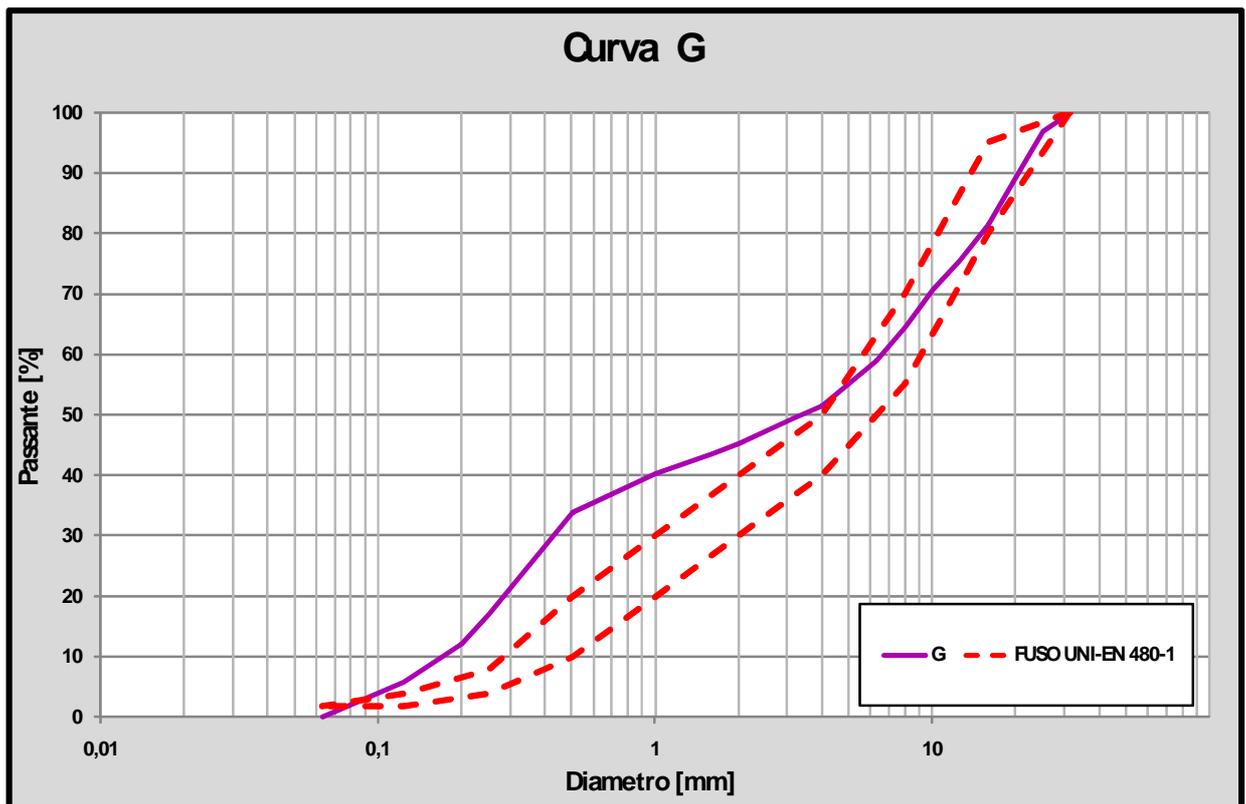


Figura 7.26- Curve granulometriche miscela G e intervallo ottimale secondo la UNI EN 480-1.

### 7.3.2 L'ACQUA E IL CEMENTO PER IL MIX-DESIGN

L'acqua è un elemento importante nel confezionamento del calcestruzzo. Senza di essa non è possibile l'indurimento, ma un eccesso di acqua determina una riduzione delle caratteristiche di resistenza meccanica del calcestruzzo stesso, ed una carenza d'acqua può comprometterne la lavorabilità. Per questi motivi l'acqua è un altro degli elementi di cui si deve tenere conto nel mix-design.

Normalmente nel progettare il mix-design si tiene conto di due principi fondamentali, o meglio due regole di base entrambe legate alla quantità di acqua impiegata per il confezionamento del calcestruzzo:

- La regola di Lyse;
- La legge di Abrams.

#### *La regola di Lyse*

La regola di Lyse fa riferimento alla quantità di acqua necessaria al confezionamento di calcestruzzi con differente consistenza, e le classi di consistenza cui si fa riferimento corrispondono ad un intervallo di lavorabilità espressa per mezzo dello slump.

La scelta della lavorabilità appropriata per l'opera da realizzare è funzione del tipo di struttura e della tecnica costruttiva che si intende utilizzare (esempi in tab. 7.20).

Classe di consistenza	Slump [mm]	Applicazioni
S1 (terra umida)	10-40	Pavimenti messi in opera con vibro-finitrice
S2 (plastica)	50-90	Strutture circolari (silos, ciminiere) messe in opera con casseri rampanti
S3 (semi-fluida)	100-150	Strutture non armate o poco armate o con pendenza
S4 (fluida)	160-210	Strutture mediamente armate
S5 (super-fluida)	> 210	Strutture fortemente armate, di ridotta sezione e/o complessa geometria

Tabella 7.20- Classe di consistenza richiesta per alcune tipologie strutturali.

In generale si può dire che una maggiore lavorabilità garantisce una esecuzione più affidabile, rapida e soprattutto semplice.

La regola di Lyse si può enunciare in due modi differenti e tra loro complementari:

- Per un dato diametro massimo dell'aggregato, maggiore è la classe di consistenza richiesta per il calcestruzzo fresco, maggiore deve essere la quantità di acqua nell'impasto (tab. 7.21).

Diametro [mm]	Richiesta d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ]				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Tabella 7.21- Richiesta d'acqua in funzione del diametro massimo dell'aggregato e della classe di consistenza.

### La legge di Abrams

La legge di Abrams (1918), lega tra loro il rapporto acqua/cemento con la resistenza meccanica (fig. 7.27. Secondo questa legge, infatti, la resistenza meccanica ad una determinata stagionatura e ad una determinata temperatura aumenta al diminuire del rapporto acqua/cemento, secondo la seguente equazione:

$$R = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

dove R è la resistenza meccanica a compressione, K1 e K2 sono due costanti che dipendono dal tipo di cemento e dal tempo e dalla temperatura di stagionatura, a/c è il rapporto acqua/cemento. Questa relazione vale a condizione che il calcestruzzo sia stato compattato al massimo (la resistenza a compressione diminuisce proporzionalmente al grado di compattazione).

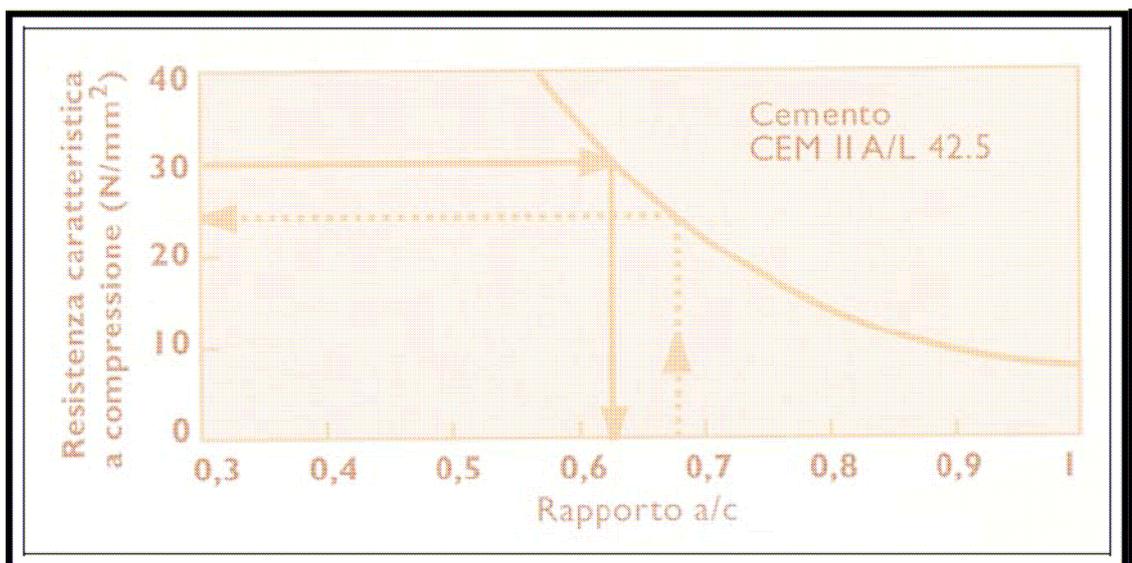


Figura 7.27- Resistenza caratteristica in funzione del rapporto a/c.

Nel caso di questo studio si è deciso di ipotizzare ed utilizzare un contenuto d'acqua pari a 200 Kg/m<sup>3</sup>, in quanto il diametro massimo dell'aggregato raggiunge i 31,5 mm e si è ipotizzato di poter ottenere un calcestruzzo con lavorabilità S3-S4.

Per quanto concerne il cemento, invece, si è deciso di usare per gli impasti un cemento CEM II A/L 42,5 e si è ipotizzato un rapporto acqua/cemento pari a circa 0,66 per cui il quantitativo di cemento per mantenere idealmente tale rapporto, deve essere pari a 300 Kg/m<sup>3</sup>.

### 7.3.3 GLI ADDITIVI

Gli additivi per calcestruzzo sono sostanze chimiche di natura prevalentemente organica (generalmente impiegati in forma liquida) che vengono aggiunti in percentuali variabili tra lo 0,5 e il 2%, producendo sensibili modifiche alle caratteristiche del conglomerato sia allo stato fresco che a quello indurito. Negli ultimi anni l'impiego di additivi è di routine nella produzione del conglomerato cementizio.

L'aggiunta di additivi è regolamentata dalla norma UNI EN 934-2, la quale prevede appunto l'uso di additivi durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo, i quali consentono di modificare le proprietà della miscela nello stato fresco e/o indurito. Generalmente possono essere impiegate sostanze fluidificanti, superfluidificanti e iperfluidificanti atte a ridurre il contenuto di acqua nell'impasto senza influenzare la consistenza, ritardanti o acceleranti della presa o dell'indurimento, additivi aeranti o ritenitori di acqua, che consentono di incorporare microbolle d'aria omogeneamente distribuite o ridurre la perdita d'acqua e agenti resistenti all'acqua che riducono l'assorbimento capillare del calcestruzzo indurito.

Nel caso studiato, durante la progettazione della miscela di calcestruzzo, non è stato preso in considerazione l'impiego di additivo, rimandando l'eventuale aggiunta durante la fase di miscelazione. Infatti durante la miscelazione dei mix progettati si è reso utile aggiungere piccoli quantitativi di additivo fluidificante solo per taluni impasti che durante la fase di miscelazione apparivano eccessivamente asciutti nonostante l'introduzione del quantitativo d'acqua progettato. In particolare si è deciso di aggiungere l'additivo creactive L (Axim Italia), il quale è stato aggiunto agli impasti secondo quanto riportato nella seguente tabella (tab. 7.22).

Impasto	A	B	C	D	E	F	G
Aggiunta di additivo	-	1,5%	1%	-	0,5%	0,5%	2%

Tabella 7.22- Percentuale di additivo aggiunto durante la fase di miscelazione.

## 7.4 MISCELAZIONE DEGLI INGREDIENTI E CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO FRESCO

Stabiliti gli ingredienti e le quantità con cui essi entrano nella miscela del calcestruzzo, sono state realizzate le miscele di calcestruzzo usando una betoniera idonea ad impastare i litri di calcestruzzo progettato cioè 30 litri.

Gli impasti preliminari realizzati sono stati caratterizzati, secondo la norma UNI EN 206-1 per quanto riguarda le proprietà allo stato fresco:

- massa volumica;
- lavorabilità;

- coesione;

e le proprietà allo stato indurito:

- resistenza meccanica a compressione.

È importante ricordare che durante la fase di miscelazione degli ingredienti, si è scelto di utilizzare gli aggregati di riciclo previa saturazione d'acqua, questo per ovviare all'eventuale probabile sottrazione d'acqua di miscelazione, e quindi di ridurre l'acqua che serve alla reazione con il cemento. Oltre a saturare gli aggregati da riciclo, si è poi proceduto a calcolare la reale aggiunta d'acqua, andando a togliere ai 200 Kg/m<sup>3</sup> ipotizzati, l'acqua di assorbimento dell'aggregato "Sataf".

Nella tabella 7.23, sono pertanto riportati i reali valori del rapporto acqua-cemento per ciascun impasto (a/c), che com'è evidente sono inferiori al rapporto ipotizzato da progetto.

Impasto	A	B	C	D	E	F	G
Rapporto a/c	0,59	0,53	0,66	0,61	0,63	0,62	-

Tabella 7.23- Valori dei rapporti acqua/cemento ottenuti per i differenti impasti.

#### 7.4.1 LA LAVORABILITA'

Dopo il mescolamento dei suoi ingredienti, il calcestruzzo fresco, cioè nello stato plastico, deve essere trasportato, messo in opera, costipato e rifinito in maniera tale da presentare una massa omogenea che garantisca durabilità e resistenza meccanica nello stato indurito.

Questo è possibile se l'impasto possiede un'adequata combinazione di proprietà reologiche, di compattabilità e di coesione, ovvero che si muova facilmente sotto l'azione di una forza, consenta una facile rimozione dei vuoti e che sia resistente alla segregazione, quindi abbia scarsa attitudine a dar luogo alla separazione degli aggregati grossi da quelli fini. Tuttavia queste caratteristiche non sono tra loro univocamente correlate, anzi, vista la natura eterogenea del calcestruzzo, l'influenza dei vari fattori sulle proprietà reologiche e di compattabilità da una parte e quelle di coesione dall'altra può risultare in antitesi o comunque variare sensibilmente a seconda dei casi.

I molteplici aspetti, che devono dunque coesistere in un impasto fresco, sono sintetizzati col termine lavorabilità definita come l'attitudine del calcestruzzo fresco ad essere manipolato per la posa in opera ed il costipamento nella cassaforma, al fine di ottenere una massa compatta ed uniforme.

Pertanto essa rappresenta un indice delle proprietà e del comportamento del calcestruzzo nell'intervallo di tempo tra la produzione e la compattazione dell'impasto in situ e quindi non può assumere un valore univoco, ma è ovviamente da correlarsi con le diverse esigenze operative: è condizionata dai metodi e dai sistemi di getto, dalla geometria della cassaforma, dalla densità di

armatura metallica, dalla tipologia dell'opera nonché dai mezzi di costipamento, per cui ad ogni utilizzazione compete un appropriato grado di lavorabilità.

Le proprietà del calcestruzzo fresco collegate con la lavorabilità sono:

1. la stabilità, ossia la capacità dell'impasto a mantenere, sotto l'azione di forze esterne, l'uniformità di distribuzione dei componenti;
2. la mobilità, ossia la facilità con la quale l'impasto fluisce nella cassaforma fino a raggiungere le zone meno accessibili;
3. la compattabilità, ossia la facilità con la quale l'impasto può essere assestato nella cassaforma e l'aria intrappolata rimossa.

La lavorabilità influenza inoltre il peso specifico del calcestruzzo in opera, perché un impasto che sia facilmente lavorabile riempie bene le casseforme e riducendo il volume dei vuoti produce un benefico effetto sulle resistenze. Quindi tale proprietà, tipica del calcestruzzo fresco, finisce con il condizionare anche le prestazioni del calcestruzzo in servizio.

#### *Misura della lavorabilità*

La lavorabilità è, come già visto, un termine che si riferisce ad un complesso di proprietà piuttosto diverse tra loro, per questo motivo esistono molti procedimenti per la sua misura, ognuno dei quali permette di rilevare uno o più aspetti particolari, anche se in realtà nessuno dei metodi correnti dà una misura "vera".

In pratica, per valutare se un impasto è lavorabile, ovvero se è idoneo alle caratteristiche del lavoro da eseguire, si fa riferimento alla sua consistenza, caratteristica facilmente e rapidamente determinabile sia mediante ispezione visiva che tramite semplici procedure di controllo. Pertanto la consistenza di un impasto fresco, definita come la resistenza che la massa oppone al cambiamento di forma, diviene sinonimo di lavorabilità e quindi tutti i metodi per la sua valutazione sono basati sulla deformazione che l'impasto subisce quando è soggetto ad una certa sollecitazione.

L'attuale normativa sul calcestruzzo (UNI EN 206-1) contempla i seguenti metodi di prova:

- abbassamento al cono in conformità alla UNI EN 12350-2;
- Vébé in conformità alla UNI EN 12350-3;
- indice di compattabilità in conformità alla UNI EN 12350-4;
- tavola a scosse in conformità alla UNI EN 12350-5;

ma nel caso oggetto di studio, i calcestruzzi allo stato fresco sono stati caratterizzati solo con la prova del cono di Abrams e la prova di spandimento con la tavola a scosse.

Ciascuno di questi metodi fornisce valori di riferimento diversi che non sono direttamente correlabili tra loro, si possono perciò stabilire delle classi di consistenza relative soltanto a ciascun metodo di prova; la scelta del metodo va fatta di volta in volta secondo il tipo di conglomerato da controllare.

### *Prova di abbassamento al cono di Abrams o slump test*

La prova di abbassamento al cono di Abrams, detta anche slump test, grazie alla sua semplicità, rapidità e modesta apparecchiatura richiesta è la prova più diffusa sia in cantiere che in laboratorio per misurare la consistenza del calcestruzzo.

L'apparecchiatura è costituita da un recipiente tronco-conico in lamiera, perfettamente liscio all'interno ed aperto alle estremità, avente altezza  $30 \pm 0.2$  cm, diametro di base  $20 \pm 0.2$  cm e sommità  $10 \pm 0.2$  cm, provvisto di maniglie e di due staffe inferiori per tenerlo fermo durante il riempimento. Il cono, poggiato con la base maggiore su un piano metallico, viene riempito in tre strati successivi di uguale spessore con un campione di impasto che rappresenti il più possibile la miscela da testare. Ogni strato viene costipato con 25 colpi di un tondino di ferro del diametro di 16 mm e lunghezza di 60 cm, con estremità arrotondata (fig. 7.28).

Completato il riempimento e livellata la superficie, il cono viene rimosso sollevandolo lentamente e perpendicolarmente al piano d'appoggio: l'impasto, liberato dalla forma, per azione della forza di gravità tende a spandersi sulla base d'appoggio finché non si raggiunge un equilibrio tra le forze interne resistenti e quelle esterne.

L'abbassamento dell'impasto rispetto alla forma originaria costituisce la misura della consistenza (fig. 7.29), tale valore, letto tramite un'apposita asta che scorre su un regolo graduato, viene espresso in millimetri ed indicato con la lettera S, dall'inglese slump (cedimento).

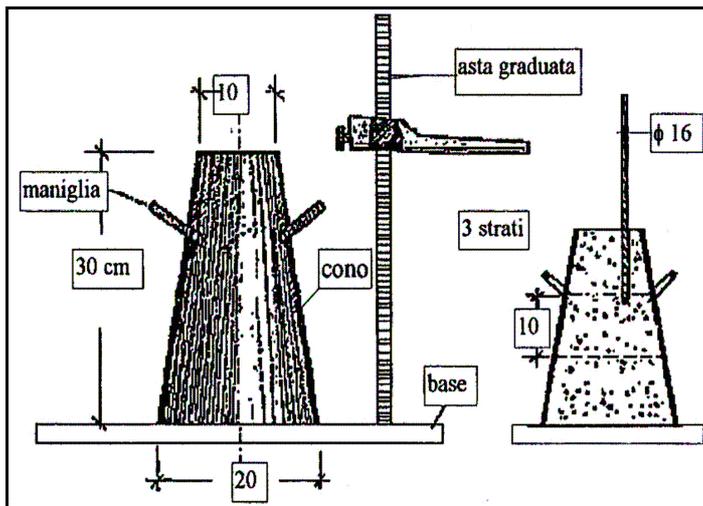


Figura 7.28- Struttura del cono di Abrams.



Figura 7.29- Prova con cono di Abrams

La norma UNI EN 206-1 raggruppa in cinque classi di consistenza gli abbassamenti al cono, si riporta di seguito tale classificazione affiancata dalla corrente denominazione italiana, tabella 7.24.

Classe di consistenza	Abbassamento al cono in mm	Denominazione corrente
S1	da 10 a 40	terra umida
S2	da 50 a 90	plastica
S3	da 100 a 150	semi-fluida
S4	da 160 a 210	fluida
S5	> 220	super-fluida

Tabella 7.24- classi di consistenza mediante misura dell'abbassamento al cono UNI EN 206-1.

Ad illustrazione si riportano di seguito (fig. 7.30) le immagini raffiguranti tutte le classi di consistenza contemplate dalla norma per la prova di abbassamento al cono.

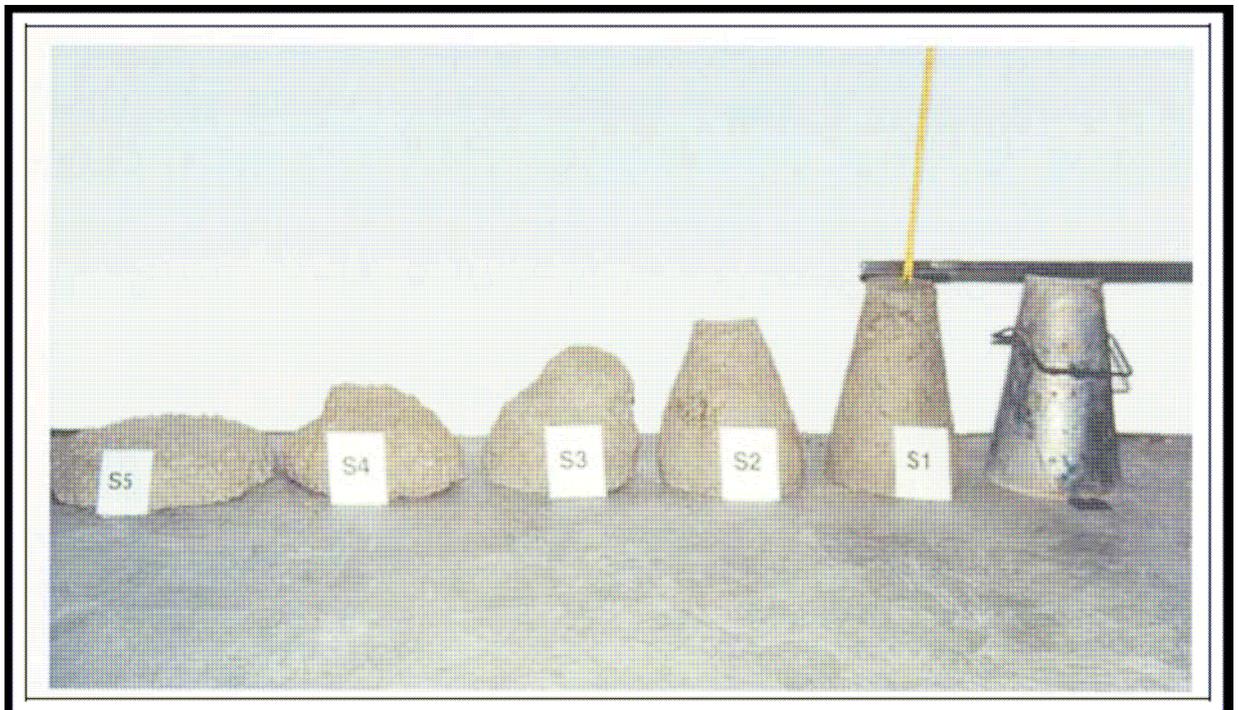


Figura 7.30- Calcestruzzi a classe di consistenza crescente da destra a sinistra accanto al cono di Abrams.

Questa prova non è sempre significativa: non è adatta per impasti molto asciutti, per i quali l'abbassamento al cono è pressoché nullo e risulta difficile valutare le differenze di consistenza, né per impasti molto fluidi con slump maggiori di 25 cm, inoltre non si applica a calcestruzzi con aggregati di dimensione maggiore di 40 mm.

	Abbassamento al cono [mm]			CLASSE DI CONSISTENZA CORRISPONDENTE		
	0 minuti	15 minuti	30 minuti	0 minuti	15 minuti	30 minuti
A	160	140	90	S4	S3	S2
B	110	70	-	S3	S2	-
C	110	110	90	S3	S3	S2
D	150	150	125	S3	S3	S3
E	195	175	175	S4	S4	S4
F	210	165	140	S4	S4	S3
G	130	-	-	S3	-	-

Tabella 7.25- Valori ottenuti con il cono di Abrams per gli impasti preliminari e classi di consistenza corrispondenti.

Lo slump misurato (tab. 7.25) varia a zero minuti dalla classe di consistenza S3 alla S4 che individua un abbassamento generalizzato, detto di collasso, che indica miscele magre oppure molto umide o calcestruzzi autolivellanti additivati con superfluidificanti, sono valori che rispecchiano una miscela semi-fluida e fluida. Importante è notare che con il passare del tempo la consistenza tende a diminuire per quasi tutti gli impasti, tranne che per l'impasto D e l'impasto E.

#### *Prova di spandimento con Tavola a Scosse*

La prova con la Tavola a Scosse permette di determinare la consistenza del calcestruzzo.

Si procede riempiendo una forma metallica troncoconica, di dimensioni standardizzate, con il calcestruzzo in esame, secondo modalità prefissate. Sollevata la forma, il cono di calcestruzzo è sottoposto a 15 cadute, una al secondo, da un'altezza di 1,25 cm (fig. 7.31 – tab. 7.26). Il movimento sussultorio provoca l'appiattimento dell'impasto. L'incremento del diametro, calcolato come percentuale del diametro di base del cono, indica le proprietà di flusso o l'attitudine allo spandimento. La prova alla tavola a scosse è utile e applicabile per i calcestruzzi molto lavorabili. Il metodo mostra i suoi limiti con gli impasti poco coesivi che danno incrementi, relativamente elevati, a causa della separazione di malta liquida ai bordi.

Classe	Diametro spandimento Misurato secondo UNI EN 12350-5	Denominazione corrente
F1	≤ 340	Terra umida
F2	da 350 a 410	Plastica
F3	da 420 a 480	Semi fluida
F4	da 490 a 550	Fluida
F5	da 560 a 620	Superfluida
F6	≥ 630	Autolivellante

Tabella 7.26- Classi di spandimento secondo la norma UNI EN 12350-5.



Figura 7.31- Tavola a scosse e cono di Abram usati per misurare la lavorabilità del calcestruzzo.

	Diametro Spandimento in mm			CLASSE DI CONSISTENZA CORRISPONDENTE		
	0 minuti	15 minuti	30 minuti	0 minuti	15 minuti	30 minuti
Impasto						
A	427,5	400	383	F3	F2	F2
B	380	356	-	F2	F2	-
C	405	392,5	387,5	F2	F2	F2
D	410	417,5	383	F2	F2	F2
E	436	430	427	F3	F3	F3
F	483	455	418	F3	F3	F3
G	-	-	-	-	-	-

Tabella 7.27- Valori di spandimento ottenuti dagli impasti preliminari e relative classi di spandimento.

I valori di spandimento misurati (tab. 7.27) variano dalla classe di consistenza F2 alla F3 che individuano rispettivamente una miscela plastica e semi fluida. Le classi di consistenza tendono generalmente a mantenersi costanti nel tempo per le varie miscele, tranne che per la miscela A, quella realizzata interamente con aggregato “Sataf”.

#### 7.4.2 DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO D'ARIA OCCLUSA NEL CALCESTRUZZO FRESCO

Il contenuto d'aria occlusa in un calcestruzzo è un parametro rilevante per la qualità del calcestruzzo, in quanto più è elevato più ci si aspetta una minore resistenza alla compressione, per il fatto che un elevato valore del contenuto in aria sta a rappresentare un'elevata presenza di vuoti all'interno della matrice del calcestruzzo, e come è prevedibile e facile immaginare questi non intervengono a sostenere, ma rappresentano una fragilità.

La norma UNI EN 12350-7 contempla due metodi di prova per misurare il contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco, ed entrambi utilizzano l'apparecchiatura che si basa sul principio della legge di Boyle-Mariotte. Per motivi di praticità, i due metodi sono designati come “metodo a colonna d'acqua” e “metodo manometrico”. Per questo studio la misura della quantità di bolle d'aria occlusa nel calcestruzzo è stata effettuata con un porosimetro (fig. 7.32) che si basa sul metodo manometrico, secondo il quale un volume noto d'aria a una pressione nota, in un contenitore sigillato, viene equalizzato con il volume d'aria sconosciuto presente nel campione di calcestruzzo. Per effettuare questa prova il calcestruzzo viene sottoposto ad una pressione doppia di quella atmosferica, e la variazione di volume del calcestruzzo letta sullo strumento corrisponde alla % d'aria (tab. 7.28).

Impasto	A	B	C	D	E	F	G
Aria inglobata	1,7%	7,5%	5,7%	2,2%	3,2%	5%	8%

Tabella 7.28- Valori d'aria inglobata negli impasti preliminari.



Figura 7.32- Porosimetro usato per misurare il contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco

I dati ottenuti dalla prova mettono in evidenza valori piuttosto elevati per alcune miscele ipotizzate, soprattutto la miscela B e G, le quali contengono percentuali molto elevate di sabbia riciclata, probabile responsabile dell'elevato contenuto in aria. Si ha invece un valore buono, prossimo allo standard (miscela A) per quanto riguarda la miscela D dove la sabbia riciclata non è stata utilizzata, infine si ritiene sia stato commesso un errore durante la prova per quello che concerne la miscela F, in quanto dai presupposti di progetto e cioè dalle valutazioni fatte sul contenuto di sabbia riciclata, ci si aspettava un valore inferiore, essendo il contenuto di sabbia minore anche rispetto alla miscela E.

#### 7.4.3 DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA APPARENTE DEL CALCESTRUZZO

La massa volumica apparente di un calcestruzzo fresco viene determinata secondo le prescrizioni della norma UNI EN 12350-6. Questo parametro (tab. 7.29) si ricava dal rapporto tra la sua massa ed il volume che occupa quando viene introdotto, o introdotto e compattato in modo determinato, in un recipiente di misurazione avente capacità nota.

Il contenitore destinato a questa prova deve essere rigido e a tenuta d'acqua ed avere un volume minimo di 5 litri.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Dove:

D = è la massa volumica del calcestruzzo fresco in Kg/m<sup>3</sup>;

m<sub>1</sub> = è la massa del contenitore in Kg;

m<sub>2</sub> = è la massa del contenitore più la massa del campione di calcestruzzo nel contenitore in Kg;

V = è il volume del contenitore, in m<sup>3</sup>.

Impasto	A	B	C	D	E	F	G
V	0,00986	0,00986	0,00986	0,00986	0,00986	0,00986	0,00986
m <sub>1</sub>	6,900	6,900	6,900	6,900	6,900	6,900	6,900
m <sub>2</sub>	30,730	29,160	28,350	29,860	29,110	28,640	26,290
D	2369	2211	2129	2281	2206	2205	1966

Tabella 7.29- Valori di massa volumica del calcestruzzo fresco.

## 7.5 CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO INDURITO

### 7.5.1 PROPRIETÀ FISICO MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO INDURITO

Per effetto dell'indurimento, un calcestruzzo diventa una pietra artificiale, le cui caratteristiche principali sono la durezza e la resistenza meccanica. Le sollecitazioni cui può essere sottoposto un calcestruzzo sono quelle tipiche di ogni materiale da costruzione, cioè compressione, trazione, urto, abrasione. Il calcestruzzo presenta capacità di resistenza alle sollecitazioni in misura diversa in funzione della propria composizione e qualità delle condizioni esterne nelle quali si trova.

Il requisito più importante richiesto al calcestruzzo nelle normali applicazioni è la resistenza a compressione, che è pure il parametro base per giudicare la qualità di un conglomerato in generale. Una elevata resistenza a compressione, infatti, denota la presenza di una massa compatta, con una bassa presenza di vuoti o irregolarità nell'interno, e garantisce prestazioni elevate anche sotto tutti gli altri aspetti. La resistenza rappresenta il criterio base di classificazione dei calcestruzzi.

#### 7.5.1.1 RESISTENZA A COMPRESSIONE

La resistenza a compressione del calcestruzzo,  $R_{cm}$ , viene determinata secondo la norma UNI EN 12390-3 su provini cubici o cilindrici maturati per 28 giorni secondo la norma UNI 12390-2. La norma UNI EN 206-1 classifica il calcestruzzo in base alle resistenze caratteristiche determinate su provini cubici ( $R_{ck}$ ) o cilindrici ( $f_{ck}$ ).

Ogni calcestruzzo è caratterizzato dalla sigla C seguita da due numeri (tab. 7.30), il primo dei quali indica la resistenza caratteristica cilindrica, il secondo quella cubica, entrambe espresse in  $N/mm^2$ ; tra i due valori esiste una correlazione empirica.

CLASSI di RESISTENZA	$f_{ck}$ [ $N/mm^2$ ]	$R_{ck}$ [ $N/mm^2$ ]	
C8/10 C12/15	8 12	10 15	NON STRUTTURALE
C16/20 16 20 C20/25 20 25 C30/37 30 37 C35/45 35 45 C40/50 40 50 C45/55 45 55	C16/20 16 20 C20/25 20 25 C30/37 30 37 C35/45 35 45 C40/50 40 50 C45/55 45 55	C16/20 16 20 C20/25 20 25 C30/37 30 37 C35/45 35 45 C40/50 40 50 C45/55 45 55	ORDINARIO
C50/60 50 60 C55/67 55 67 C60/75 60 75	C50/60 50 60 C55/67 55 67 C60/75 60 75	C50/60 50 60 C55/67 55 67 C60/75 60 75	ALTE PRESTAZIONI
C70/85 70 85 C80/95 80 95 C90/105 90 105 C100/115 100 115	C70/85 70 85 C80/95 80 95 C90/105 90 105 C100/115 100 115	C70/85 70 85 C80/95 80 95 C90/105 90 105 C100/115 100 115	ALTA RESISTENZA

Tabella 7.30- Classi di resistenza del calcestruzzo riferite a provini cilindrici di diametro 150 mm ed altezza 300 mm ed a provini cubici di 150 mm di spigolo.

La resistenza a compressione del calcestruzzo coinvolge le resistenze della pasta e i relativi rapporti qualitativi e quantitativi. La resistenza della pasta aumenta con l'indurimento: la massima resistenza si raggiunge soltanto dopo alcuni anni, ma lo sviluppo più rapido si ha durante i primi giorni, tanto che dopo circa un mese si ottiene già una frazione rilevante della resistenza finale. Inoltre la classe del cemento influenza direttamente il livello di resistenza ottenibile.

Molto importante è l'influenza sulla resistenza della quantità d'acqua impiegata: la pasta di cemento può essere assimilata ad una colla, perciò si può dire che aumentando la diluizione diminuisce il potere collante. La resistenza degli aggregati dipende dalla loro natura mineralogica. Gli aggregati normali provengono da rocce che hanno generalmente resistenza a compressione e modulo elastico più elevati di quella della pasta di cemento, rispetto alla quale risultano quindi meno deformabili. Quando un calcestruzzo è sollecitato da uno sforzo di compressione, le tensioni nell'interno della massa si scaricano sui granuli degli aggregati, più rigidi: di conseguenza i punti di contatto tra pasta e granulo sono fortemente sollecitati, tanto che l'aderenza nella superficie di contatto può venire meno, generando fratture locali. Pertanto, unita agli effetti della resistenza a compressione, assume importanza l'aderenza tra pasta e aggregati, maggiore quando si sviluppa una specie di legame chimico, minore se dipende solo da ancoraggio meccanico, influenzato quest'ultimo dalla struttura superficiale dei granuli degli aggregati e dall'assenza di impurità sugli stessi (in genere un aggregato calcareo sviluppa adesione maggiore di un aggregato siliceo, a causa dell'interazione calcare - cemento che rinforza il legame fra i due materiali). La presenza di eventuali punti deboli nella massa del calcestruzzo può quindi alterare sensibilmente la distribuzione delle sollecitazioni: un punto debole può essere rappresentato da granuli non compatti o alterati, in corrispondenza dei quali può verificarsi il cedimento che innesca la rottura. Considerato che la resistenza degli aggregati è maggiore di quella della pasta, ciò che interessa soprattutto è la omogeneità degli aggregati stessi, cioè l'assenza di elementi deboli o degradati. I vuoti presenti nella massa sono certamente punti deboli, specialmente se sono di una certa dimensione. Essi possono provenire da una non corretta composizione della miscela, in particolare da una quantità insufficiente di pasta di cemento in rapporto alla quantità e dimensione degli aggregati, o a seguito di un insufficiente costipamento della massa. I granuli devono essere completamente avvolti dalla pasta cementizia, la quale deve riempire tutti gli spazi esistenti fra i granuli stessi: per questo occorre una quantità adeguata di pasta, correlata con la dimensione dei granuli da avvolgere, in particolare con la loro superficie. All'aumentare della superficie complessiva, aumenta la quantità di pasta richiesta. In una distribuzione granulometrica corretta, quando aumenta il diametro medio dei granuli, diminuisce la superficie complessiva da ricoprire, quindi il fabbisogno di pasta.

Nella definizione del rapporto pasta - aggregati influisce, oltre alla dimensione dei granuli, la loro scorrevolezza al fine di ottenere una buona lavorabilità: dimensione dei granuli e lavorabilità dell'impasto sono fattori che dipendono dalle condizioni di impiego della miscela.

Si può quindi affermare che la resistenza a compressione è influenzata:

- dalla classe di cemento;
- dal rapporto acqua - cemento;
- dal rapporto cemento - aggregati;
- dalla qualità degli aggregati, in particolare dalla loro omogeneità e capacità di aderenza con il cemento;
- dalla densità della massa, a sua volta della corretta composizione e del costipamento.

La resistenza a compressione può essere definita potenziale, in quanto quella reale, effettiva, si ha soltanto dopo la posa in opera e la maturazione dei getti: durante queste fasi lo sviluppo della resistenza può subire accelerazioni, ritardi o scostamenti dai valori previsti. Una riduzione della resistenza potenziale può essere causata da un insufficiente costipamento, oppure dalla troppo rapida evaporazione dell'acqua di impasto, per effetto dell'evaporazione in zone a clima caldo e asciutto.

Una differente velocità di sviluppo della resistenza è generalmente causata dalla temperatura: temperature troppo elevate accelerano lo sviluppo, se l'acqua di impasto gela, non può avviarsi il processo di idratazione. Una temperatura iniziale troppo alta può causare un'alterazione riduttiva nello sviluppo del processo.

#### *Misura della resistenza a compressione del calcestruzzo*

Per la prova di compressione si impiegano provini cubici (in Italia e in numerosi altri paesi europei) o cilindrici (Inghilterra, Stati Uniti, Canada, Australia). Con l'introduzione della normativa europea si ammette l'impiego di entrambi i tipi di provino, mentre l'Eurocodice, pur ammettendo entrambi i provini, fa essenzialmente riferimento a quelli cilindrici.

Le diverse norme per la misura della resistenza a compressione, come pure le UNI 6126 e 6135, indicando in genere:

- materiali, dimensioni e tolleranze delle forme per i provini, che non si devono deformare a seguito del riempimento o della compattazione del conglomerato;
- dimensioni delle forme in relazione al valore di  $D_{max}$  (la dimensione minima della cassaforma dovrebbe essere almeno 5 volte quella del diametro massimo);
- modalità del prelievo del calcestruzzo, modalità di riempimento e compattazione delle forme (si usa in genere la vibrazione, onde ottenere il minor volume di vuoti), procedimento di lisciatura della superficie libera dei provini;
- tempo intercorrente tra l'impasto e la sformatura dei provini (secondo UNI: 24 ore);
- condizioni di stagionatura (secondo UNI: 20°C e umidità relativa = 90%);
- tempo massimo tra la fine della stagionatura e l'inizio della prova (secondo UNI: 2 ore);
- tolleranza di planarità delle superfici del provino su cui è applicata la compressione (secondo UNI:  $\pm 0,05$  mm);
- angoli tra le facce di  $90^\circ \pm 30'$ ;

- precisione della lettura del carico applicato dalla pressa idraulica;
- velocità di applicazione del carico (secondo UNI:  $0,5 \pm 0,2$  N/mm<sup>2</sup>sec).

Naturalmente anche la pressa idraulica, impiegata per l'esecuzione della misura della resistenza a compressione, è standardizzata nei suoi diversi organi e deve rispondere alla specifica UNI 6686/72.

Per caratterizzare a compressione le miscele progettate e realizzate, si sono realizzati dei provini cubici di lato 150 mm, che sono stati messi a maturare in camera a nebbia alla temperatura di 20°C e con un'umidità relativa pari al 90%. Tali provi sono stati quindi misurati e rotti a compressione dopo 1, 3, 7 e 28 giorni di stagionatura (tab. 7.31).

Impasto	A [N/mm <sup>2</sup> ]	B [N/mm <sup>2</sup> ]	C [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	F [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]
1 giorno	15,5	12,0	6,5	11,5	8,0	9,8	-
3 giorni	24,0	20,0	13,0	21,1	15,5	16,5	8,5
7 giorni	29,0	23,5	15,0	25,5	18,5	20,0	10,5
28 giorni	35,5	28,5	19,1	30,0	23,0	26,5	13,5

Tabella 7.31- Valori di resistenza alla compressione in [N/mm<sup>2</sup>] degli impasti preliminari, misurati ad uno, tre, sette e ventotto giorni.

Dai valori ottenuti con la prova di compressione emerge una notevole variabilità di dati tra i differenti impasti realizzati. L'impasto che presenta i valori di resistenza più elevati è l'impasto A, quello che rappresenta per l'appunto il campione di riferimento in quanto costituito interamente da aggregato naturale "Sataf". È però importante notare che ci sono un paio di impasti, per la precisione D e F, che presentano valori non troppo inferiori rispetto all'impasto di riferimento A. Altri impasti, in particolare il campione C hanno dato invece un valore di resistenza a compressione notevolmente inferiore; mentre per quanto concerne l'impasto G, cioè quello interamente costituito con aggregati di riciclo, non sono state effettuate le prove di resistenza meccanica a tutte le scadenze, in quanto già dai risultati delle prove di lavorabilità, contenuto d'aria e le prime resistenze a compressione, si presentava come una miscela di scarso interesse.

## 7.6 REALIZZAZIONE IMPASTI DEFINITIVI

I valori ottenuti in seguito alle prove di caratterizzazione eseguite per gli impasti preliminari hanno permesso di scegliere tra tutti un paio di impasti da riprodurre in maggiore quantità, cioè 200 litri, sui quali eseguire la caratterizzazione completa in accordo con la norma UNI-EN 206-1.

Sulla valutazione delle caratteristiche reologiche e meccaniche dei mix preliminari si è quindi deciso di riprodurre tre impasti, e precisamente: l'impasto A, interamente composto da aggregato naturale, allo scopo di utilizzarlo come campione di riferimento, e gli impasti D ed F, che presentavano caratteristiche più prossime e confrontabili con i valori dell'impasto A.

Già durante la fase di miscelazione dei nuovi impasti, si sono verificati miglioramenti, nel senso che durante la miscelazione si è verificata una variazione positiva all'occhio ed al controllo mediante cazzuola, del grado di miscelazione, probabilmente perché miscelando quantità maggiori di materiale, la distribuzione degli ingredienti avviene in modo più omogeneo. Inoltre durante la fase di miscelazione dell'impasto A, si è reso utile aggiungere un quantitativo inferiore d'acqua, in quanto a mano a mano che questa veniva introdotta nella miscela ci si accorgeva di aver raggiunto prima le caratteristiche desiderate.

Per tanto i nuovi impasti presentano la composizione percentuale riportata nella tabella che segue (tab. 7.32).

		Impasti da 200 l		
		A	D	F
Aggregati Sataf	Filler cremaschi	2 %	2 %	-
	113	10 %	10 %	8,5 %
	103	13 %	13 %	11 %
	117F	7,5 %	7,5 %	7,0 %
	117R	7,5 %	7,5 %	7,0 %
	107	5 %	5 %	5 %
	109	25 %	25 %	20 %
	10.15	15 %	-	-
	15.20	10 %	-	-
Aggregati diga	6,3-31,5	5 %	-	-
Aggregati riciclati	Sabbia riciclata	-	-	12
	Mat. Riciclato 0/30	-	30 %	30 %
Cemento CEM II/A-LL 42,5 [Kg/m <sup>3</sup> ]		300	300	300
Acqua [Kg/m <sup>3</sup> ]		192	200	200

Tabella 7.32- Composizione impasti prodotti in scala maggiore.

### 7.6.1 CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO FRESCO

Stabiliti gli impasti da riprodurre, sono state fatte le pesate dei vari ingredienti ed è iniziata la fase di miscelazione, andando ad usare betoniere di dimensioni maggiori, idonee appunto a miscelare il quantitativo di calcestruzzo progettato, cioè 200 litri.

Terminata la miscelazione ha avuto luogo la caratterizzazione del calcestruzzo fresco, eseguita con le medesime modalità di prova precedentemente viste per gli impasti preliminari.

La caratterizzazione del calcestruzzo fresco è quindi consistita nelle seguenti prove, secondo la norma UNI EN 206-1:

- massa volumica;
- lavorabilità;
- contenuto d'aria.

Dalle prove condotte si sono ricavati i seguenti dati riportati nella tabella 7.33.

Impasto		A		D		F	
Massa Volumica [Kg/m <sup>3</sup> ]		2367		2239		2241	
Aria inglobata		2,3%		2,2%		2,2%	
Rapporto a/c		0,59		0,61		0,62	
Abbassamento al cono [mm]	0'	220	S4	200	S4	190	S4
	15'	210	S4	170	S4	175	S4
	30'	195	S4	170	S4	160	S4
Diametro Spandimento [mm]	0'	545	F4	535	F4	490	F4
	30'	500	F4	485	F4	470	F3

Tabella 7.33- Dati ricavati dalle prove sul calcestruzzo fresco.

I dati ricavati dalle prove sul calcestruzzo fresco mettono in evidenza valori corrispondenti con quelli ottenuti dalle indagini sugli impasti preliminari, si è invece ottenuto un miglioramento nella lavorabilità passando da una classe F3 ad una F4 e quindi da un impasto

### 7.6.2 CARATTERIZZAZIONE E DEL CALCESTRUZZO INDURITO

Per ciascun impasto sono stati realizzati una serie di provini con forme e dimensioni differenti allo scopo di caratterizzare, nel modo più completo, gli impasti prodotti allo stato indurito.

In particolare per ciascun impasto sono stati confezionati:

- 12 provini cubici di lato 150 mm per eseguire la prova a compressione;
- 2 travetti 100x100x400 mm per la misura del ritiro igrometrico.

#### 7.6.2.1 MISURA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO

Le miscele definitive, progettate e realizzate, sono state caratterizzate a compressione, andando a rompere appunto per compressione, i provini cubici di lato 150 mm, che sino alle varie scadenze sono rimasti a maturare in camera a nebbia alla temperatura di 20°C e con un'umidità relativa pari al 90%. I vari provini cubici sono stati quindi misurati e rotti a compressione dopo 1, 28, 60 e 90 giorni di stagionatura (tab. 7.34).

Impasto		A	D	F
Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	1 giorno	18,0	14,0	13,0
	28 giorni	36,0	28,0	25,5
	60 giorni	37,5	29,0	27,0
	90 giorni		30,0	28,0

Tabella 7.34- Valori di resistenza alla compressione in [N/mm<sup>2</sup>] degli impasti definitivi, misurati ad uno, ventotto, sessanta e novanta giorni.

#### 7.6.2.2 MISURA DELL'ASSORBIMENTO TOTALE E DELLA SUZIONE CAPILLARE DEL CALCESTRUZZO INDURITO

Una struttura in calcestruzzo asciutta o parzialmente satura è in grado di assorbire acqua, per un volume pari a quello dei pori capillari non ancora occupato dall'acqua stessa. Pertanto, l'assorbimento è funzione della qualità del calcestruzzo, ma è anche strettamente dipendente dal grado di saturazione dei pori capillari. L'assorbimento d'acqua può quindi essere utilizzato per

valutare comparativamente la porosità di due o più conglomerati, come nel caso in studio per confrontare l'assorbimento tra o differenti calcestruzzi progettati.

Nelle prove di laboratorio la determinazione dell'assorbimento d'acqua viene condotta su provini di conglomerato cilindrici di diametro Ø150 mm e altezza h 300 mm, essiccati in stufa a 105°C fino a raggiungere una massa costante. Valori tipici dell'assorbimento sono compresi nell'intervallo 2 ÷ 10% dove, ovviamente, quelli più bassi corrispondono a calcestruzzi di basso rapporto a/c ed elevata resistenza meccanica a compressione (> 40 N/mm<sup>2</sup> a 28 giorni).

Per fare la prova i campioni sono sigillati lateralmente in modo da essere resi impermeabili all'acqua, e vengono nuovamente pesati. Fatto questo la faccia superiore del campione viene immersa in un bagno d'acqua (alla temperatura di 20 ± 2 °C) per un'altezza di circa 5 mm (in una posizione inclinata, al fine di evitare possibili accumuli di aria sotto il campione) dove viene lasciato per 24 ore. Trascorse le 24 ore il campione viene pesato, ed in seguito nuovamente immerso sotto uno strato di un'acqua che varia da 25 a 50 mm fino a raggiungere una massa costante (cambiamento di massa inferiore o uguale a 0,1% in 24 h) e per una durata di almeno 3 giorni. Allo scadere del terzo giorno il campione pesato ancora una volta dopo aver rimosso le gocce d'acqua che non sono aderite al campione, con una spugna umida.

L'assorbimento d'acqua capillare è calcolato usando la formula:

$$W_{24h} = \frac{m_{h,24} - m_{ds}}{S}$$

Dove:

$W_{24h}$  : è l'assorbimento d'acqua capillare per unità sotto pressione atmosferica dopo 24 h (g/cm<sup>2</sup>);

$m_{h,24h}$  : è la massa del campione dopo 24h di assorbimento d'acqua per capillarità;

$m_{ds}$  : è la massa costante del campione allo stato secco;

$S$  : è la superficie del campione (faccia di aspirazione).

Per quanto riguarda invece l'assorbimento d'acqua totale si è utilizzata la seguente formula:

$$W_{m,a} = \frac{m_{h,c} - m_{d,s}}{m_{d,s}} \times 100\%$$

Dove:

$W_{m,a}$  : è l'assorbimento totale d'acqua;

$m_{h,c}$  : è la massa costante del campione dopo l'immersione in acqua;

$m_{ds}$  : è la massa costante del campione allo stato secco.

I valori ricavati dalla prova sono riportati in tabella (tab. 7.35).

Impasto	provino	Superficie campione (S) [cm <sup>2</sup> ]	Massa costante stato secco ( $m_{ds}$ ) [g]	Massa con superfici laterali sigillate ( $m_{dss}$ ) [g]	Massa dopo 24 h di assorbimento d'acqua ( $m_{h,24h}$ ) [g]	Massa costante dopo immersione in acqua ( $m_{h,c}$ ) [g]	Assorbimento capillare di acqua dopo 24 h ( $W_{24h}$ )	Assorbimento totale di acqua (%) ( $W_{m,a}$ )
A	1	176,2	11638	11680	11764	12324	0,48	5,53
	2	176,2	11465	11509	11593	12110	0,48	5,24
	3	176,2	11595	11649	11729	12117	0,45	4,04
								<b>0,47</b>
D	1	176,2	11007	11054	11207	11975	0,87	8,37
	2	176,2	10973	11012	11160	11998	0,84	8,99
	3	176,2	10976	11018	11091	11873	0,41	7,79
								<b>0,71</b>
F	1	176,2	10730	10771	10900	11791	0,73	9,51
	2	176,2	10795	10824	10930	11775	0,60	8,81
	3	176,2	10727	10758	10846	11768	0,50	9,42
								<b>0,61</b>

Tabella 7.35- Valori di assorbimento capillare e totale degli impasti definitivi.

I dati ricavati mettono in evidenza un assorbimento capillare così come l'assorbimento totale d'acqua, notevolmente maggiore per i calcestruzzi realizzati con il materiale da riciclo, un aspetto legato all'assorbimento degli aggregati utilizzati, infatti gli aggregati di riciclo hanno assorbimenti elevati, che inoltre sono maggiori per la frazione 0/30 mm rispetto alla frazione 0/6 mm.

### 7.6.2.3 MISURA DEL RITIRO IGROMETRICO

Il ritiro da essiccamento (o ritiro igrometrico) del calcestruzzo indurito, dovuto al ritiro della pasta cementizia, è un fenomeno che si manifesta in tutti gli elementi costruttivi mantenuti a umidità relativa minore del 95% (in pratica in tutte le strutture non immerse). Tale ritiro può causare fessurazione del calcestruzzo. La fessurazione che può conseguire al ritiro è un grave problema, sia perché costituisce la perdita di monoliticità delle strutture, sia perché, nel caso di calcestruzzo armato, mette l'armatura direttamente a contatto con l'ambiente, generando eterogeneità di esposizione e corrosione.

Il fenomeno del ritiro igrometrico si sviluppa lentamente e per tempi molto lunghi, esso dipende dall'umidità relativa, ed a umidità relative più basse l'acqua perduta e il ritiro sono maggiori. La principale variabile che influisce sul ritiro è il contenuto d'acqua, maggiore è il contenuto d'acqua e maggiore è il ritiro.

Per misurare il ritiro delle miscele di calcestruzzo prodotte (fig. 7.33), si è operato secondo la norma UNI 6555-73 su provini di dimensioni

La prova consiste nel misurare i provini a determinate scadenze, e durante la fase di stagionatura i provini vengono conservati in un ambiente condizionato a  $20 \pm 1$  °C di temperatura e con umidità relativa  $50 \pm 3$  %.

Le prove vengono eseguite a scadenze fisse che sono, un giorno dal confezionamento del calcestruzzo e poi a tre, sette, quattordici e ventotto giorni di stagionatura (tab. 7.36).

Impasto		<b>A</b>	<b>D</b>	<b>F</b>
Variazioni dimensionali in seguito al ritiro igrometrico valori medi [mm/m]	1 giorno	- 0,028	- 0,027	- 0,020
	3 giorni	- 0,080	- 0,075	- 0,067
	7 giorni	- 0,155	- 0,141	- 0,159
	14 giorni	- 0,257	- 0,248	- 0,301
	28 giorni	- 0,365	- 0,400	- 0,495
	60 giorni	- 0,514	- 0,608	- 0,709

Tabella 7.36- Valori di ritiro igrometrico in [mm/m] degli impasti definitivi, misurati ad uno, tre, sette, quattordici, ventotto giorni e sessanta giorni.

Dai valori di ritiro igrometrico si evidenzia una maggiore ritiro per gli impasti realizzati con gli aggregati di riciclo, e questo è in linea con l'assorbimento.



Figura 7.33- Misurazioni durante la prova di ritiro igrometrico.

## VIII. DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

### 8.1 CORRELAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE PRELIMINARI INDAGINI CHIMICHE CON DATI OTTENUTI DA STUDI PRECEDENTI

Le indagini chimiche preliminari sui materiali oggetto di questo studio, messe a confronto con dati ottenuti da studi precedenti hanno permesso di evidenziare che tali materiali non presentano variazioni sostanziali della composizione nel tempo.

Tale aspetto è un fattore di notevole importanza, soprattutto nell'ottica di un possibile riutilizzo di tali materiali in settori industriali importanti, come può essere il settore delle ceramiche o del calcestruzzo.

Queste indagini preliminari rafforzano per tanto, ulteriormente lo stimolo a ricercare nuovi settori di impiego per questi materiali, ancora molto sottovalutati, e impiegati principalmente come materiali per rilevati stradali o ferroviari, o come materiale di tombamento.

### 8.2 CORRELAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA SOSTITUZIONE NEGLI IMPASTI CERAMICI

Le proprietà tecnologiche di un laterizio dipendono da numerosi fattori, legati sia alla natura delle materie prime utilizzate nella progettazione dell'impasto ceramico, sia al processo di lavorazione adottato. Nel corso di questo studio, è stato simulato, su scala di laboratorio, un intero percorso produttivo e sono state determinate le proprietà tecnologiche, fisiche e chimiche dei prodotti finiti. I dati misurati dalle differenti proprietà tecnologiche e fisiche vengono di seguito riportati in un'unica tabella (tab. 8.1) che ci consente di correlare i vari parametri tra di loro e di trarne le conclusioni.

Prima di analizzare i risultati ottenuti è importante ricordare che dalle analisi granulometriche effettuate sulle sabbie utilizzate negli impasti come smagranti per le argille, si sono riscontrate differenze granulometriche sia nella distribuzione che nelle dimensioni. In particolare si è riscontrato che la sabbia Colombara è tra le tre sabbie quella maggiormente dispersa, cioè la meno selezionata, mentre le sabbie TA1(d) e TA2(d) presentano una migliore selezione. In merito alle dimensioni, tra le tre sabbie quella che presenta clasti di dimensioni inferiori è la sabbia Colombara, e le frazioni di sabbia riciclata messe a confronto tra loro mostrano per TA1(d) un valore medio dei clasti inferiore a quello misurato per TA2(d), pertanto TA1(d) è più fine di TA2(d).

PROPRIETA' MISURATA	M0	MTA1	MTA2	S0	STA1	STA2	G0	GTA1	GTA2
ACQUA IMPASTAMENTO % peso	20,4	20,6	21,2	26,7	27,9	29,9	25,6	26,2	26,7
RITIRO LINEARE ESSICCATO cm/m	5,51 ± 0,24	5,46 ± 0,18	5,1 ± 0,1	6,77 ± 0,35	6,77 ± 0,30	6,5 ± 0,2	7,00 ± 0,27	6,71 ± 0,18	6,10 ± 0,27
RESISTENZA FLESSIONE SECCO Mpa	8,3 ± 0,2	8,2 ± 0,6	8,0 ± 0,2	8,6 ± 0,5	9,7 ± 0,4	7,2 ± 0,5	9,4 ± 1,0	10,0 ± 0,8	8,4 ± 0,4
DENSITA' APPARENTE ESSICCATO g/cm <sup>3</sup>	1,995 ± 0,019	2,003 ± 0,007	1,955 ± 0,010	1,916 ± 0,023	1,892 ± 0,005	1,859 ± 0,009	1,932 ± 0,058	1,917 ± 0,019	1,891 ± 0,015
LIMITE PLASTICO	20,3 ± 0,5	20,3 ± 0,5	21,2 ± 0,5	26,9 ± 0,6	28,2 ± 0,9	30,1 ± 1,3	24,2 ± 0,5	25,5 ± 0,7	25,8 ± 0,7
LIMITE LIQUIDO	36,0 ± 1,8	38,5 ± 4,5	40,7 ± 3,5	51,7 ± 7,4	53,4 ± 2,6	53,7 ± 2,5	46,1 ± 4,1	46,6 ± 2,8	47,4 ± 2,7
INDICE DI PLASTICITA'	15,7 ± 1,1	18,1 ± 2,5	19,5 ± 2,0	24,8 ± 4,0	25,3 ± 1,8	23,6 ± 1,9	21,9 ± 2,3	21,1 ± 1,8	21,7 ± 1,7
RITIRO LINEARE COTTO (TOTALE) %	6,09 ± 0,13	5,94 ± 0,13	6,17 ± 0,12	7,14 ± 0,29	7,17 ± 0,23	7,37 ± 0,26	7,40 ± 0,33	7,26 ± 0,27	7,26 ± 0,31
RITIRO LINEARE COTTO %	0,54 ± 0,14	0,54 ± 0,14	1,08 ± 0,13	0,46 ± 0,31	0,49 ± 0,25	1,01 ± 0,28	0,43 ± 0,35	0,74 ± 0,35	1,19 ± 0,33
ASSORBIMENTO ACQUA %	9,68 ± 0,08	10,53 ± 0,11	11,01 ± 0,75	14,20 ± 0,17	14,91 ± 0,21	16,34 ± 0,18	14,93 ± 0,24	15,75 ± 0,16	17,31 ± 0,22
POROSITA' APERTA %	19,28 ± 0,13	20,61 ± 0,17	21,36 ± 1,18	25,79 ± 0,28	26,73 ± 0,22	28,53 ± 0,20	28,58 ± 1,31	28,14 ± 0,21	30,23 ± 0,28
DENSITA' APPARENTE g/cm <sup>3</sup>	1,992 ± 0,004	1,957 ± 0,007	1,942 ± 0,028	1,815 ± 0,008	1,792 ± 0,012	1,746 ± 0,008	1,780 ± 0,083	1,786 ± 0,006	1,746 ± 0,007
PESO SPECIFICO APPARENTE	2,467 ± 0,004	2,465 ± 0,006	2,470 ± 0,005	2,446 ± 0,015	2,446 ± 0,011	2,442 ± 0,006	2,426 ± 0,152	2,486 ± 0,007	2,503 ± 0,008
RESISTENZA A FLESSIONE COTTO MPa	10,95 ± 0,28	10,55 ± 0,59	8,32 ± 0,70	16,30 ± 1,55	18,10 ± 1,90	17,99 ± 0,68	14,81 ± 0,87	15,45 ± 0,63	15,58 ± 0,53

Tabella 8.1- Tabella riassuntiva dei parametri misurati.

Per valutare l'influenza dei materiali da riciclo sui limiti di Attemberg, si mettono in relazione in un grafico binario il limite liquido ed il limite plastico (Fig. 8.1).

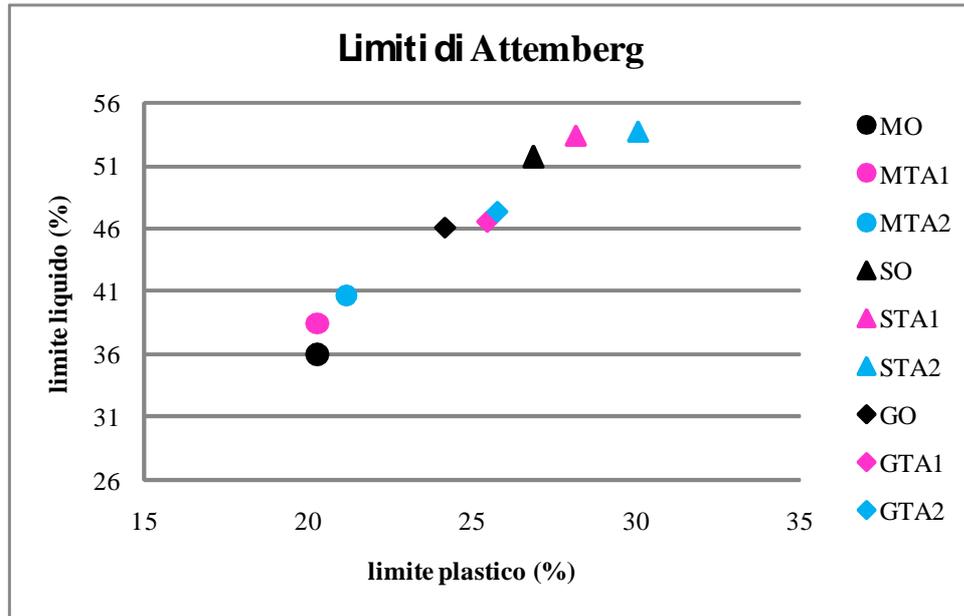


Figura 8.1- Relazione tra limite plastico e limite liquido.

Il primo aspetto che si nota dal grafico è la formazione di campi, che sono legati all'argilla usata per l'impasto, come si poteva intuire dal fatto che gli impasti sono formati per l'85% di argilla e per un 15% di sabbia, pertanto è normale che le caratteristiche delle argille prevalgano su talune proprietà. Andando poi a valutare le variazioni dovute all'introduzione delle frazioni TA1(d) e TA2(d) in sostituzione della sabbia Colombara si vede che queste portano sempre ad un aumento dei limiti di Attemberg ed in particolare tali valori risultano maggiori quando viene inserito TA2(d) e un po' più bassi quando si inserisce TA1(d), rispetto agli impasti che utilizzano la sabbia Colombara.

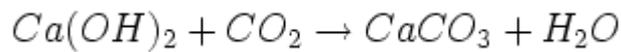
Questo aspetto potrebbe essere legato alla presenza nelle frazioni di riciclo di minerali argillosi, che quindi portano ad assorbire un maggiore quantitativo d'acqua, e di conseguenza ad avere un dei valori maggiori per quanto riguarda i limiti misurati.

I valori ottenuti con i limiti di Attemberg si rispecchiano poi nell'acqua d'impastamento, cioè l'acqua necessaria per umidificare gli impasti. Emerge che la sostituzione con i materiali di riciclo richiede una maggiore quantità d'acqua d'impastamento non solo per la presenza di una frazione argillosa libera in questi materiali, ma anche per la presenza di calce. Infatti gli impasti eseguiti con TA2(d) richiedono un quantitativo superiore d'acqua d'impastamento rispetto a quelli eseguiti con TA1(d). Tale aspetto è legato alla presenza di calce spenta nelle frazioni di riciclo rispetto alla sabbia Colombara, ed inoltre la quantità di calce spenta risulta essere maggiore per TA2(d) che già dalle analisi chimiche mostrava una quantitativo di CaO doppio rispetto a TA1(d).

Confrontando i valori di ritiro ottenuti dopo la fase di essiccamento, si vede che questi tendono a diminuire quando si inseriscono le frazioni di riciclo (TA1(d) e TA2(d)). Si osserva che il campione di riferimento, realizzato con la sabbia Colombara, ha un ritiro maggiore rispetto al campione contenente la frazione TA1(d), l'inserimento di TA2(d) diminuisce ulteriormente questi valori, in conclusione si ha che gli impasti M0-G0-S0 hanno un ritiro maggiore degli impasti MTA1-GTA1-STA1 che a loro volta danno valori di ritiro maggiori degli impasti MTA2-GTA2-STA2. (d)

Tale aspetto è probabilmente legato alla presenza di calce spenta ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formatasi in seguito all'umidificazione degli impasti, che durante la fase di essiccamento all'aria reagisce con la  $\text{CO}_2$  presente nell'atmosfera per dare acqua e  $\text{CaCO}_3$ , che va a riempire i vuoti.

La reazione che avviene è semplificabile nel seguente modo:



Cioè una volta che la calce spenta si è essiccata, a contatto con l'anidride carbonica presente nell'atmosfera inizia un lento processo che la trasforma in calcare (carbonatazione).

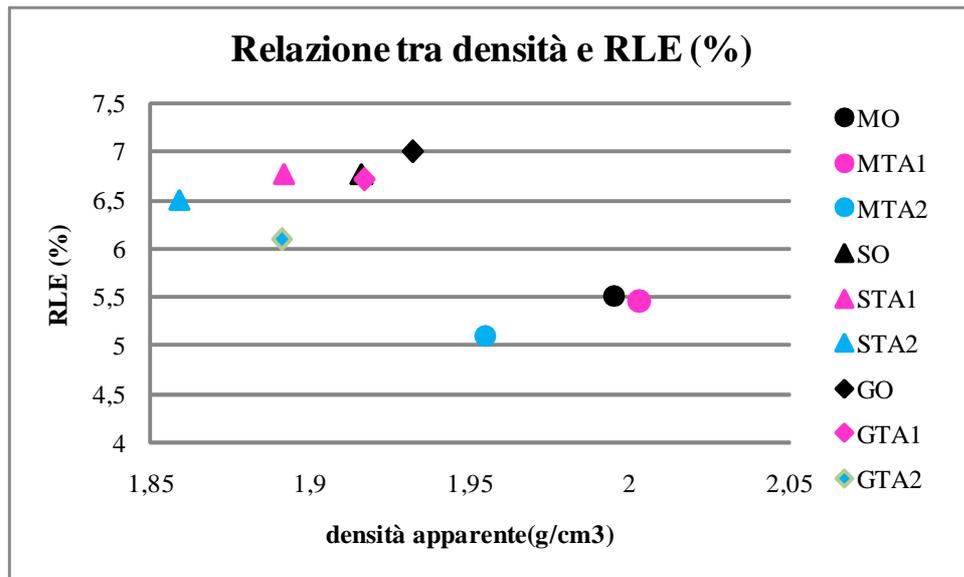


Figura 8.2- Relazione tra ritiro lineare dei prodotti secchi e densità apparente.

Dalla figura 8.2 si nota inoltre una relazione tra densità apparente dei listelli secchi e del ritiro lineare in essiccamento, in particolare si vede che il ritiro diminuisce al diminuire della densità apparente, e nel particolare l'introduzione delle frazioni di riciclo porta una diminuzione della densità rispetto agli impasti con la sabbia Colombara (M0, S0, G0). Gli impasti che contengono la frazione TA2(d) presentano valori di densità inferiori a TA1(d), e tale aspetto è probabilmente legato a una differenza granulometrica, TA2(d) è più grossolana di TA1(d), e pertanto è probabile che presenti vuoti di maggiori dimensioni.

Analizzando la resistenza meccanica a flessione dei listelli essiccati, e mettendo i valori in relazione con la densità apparente (Fig. 8.3),

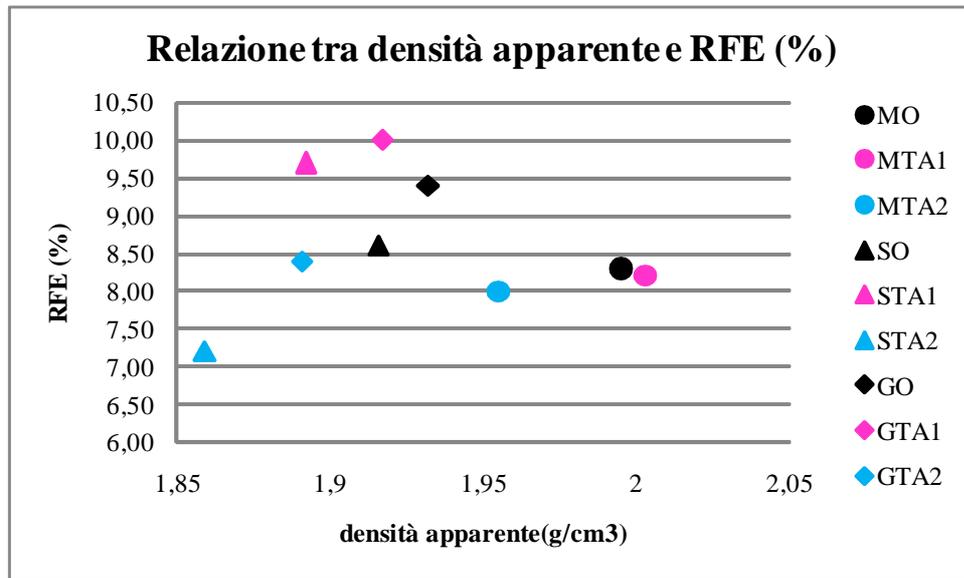


Figura 8.3- Relazione tra resistenza a flessione dei prodotti cotti e densità apparente.

si nota una relazione tra le due grandezze, nel particolare si vede che a parità di argilla, le miscele con densità apparente minore presentano anche una minore resistenza a flessione. E' da notare però che le miscele realizzate con l'inerte TA1(d) mostrano dei valori più elevati di quelle realizzate utilizzando l'inerte TA2(d) rispetto a quelli che ci si dovrebbe attendere. Questo aspetto è probabilmente legato sia ad una differenza composizionale, TA1(d) presenta un minore contenuto in carbonati di TA2(d), ed anche ad una differenza granulometrica, TA1(d) è più fine di TA2(d).

Passando a valutare le proprietà degli impasti ottenuti in seguito alla cottura, viene preso in considerazione come primo aspetto la porosità (Fig. 8.4).

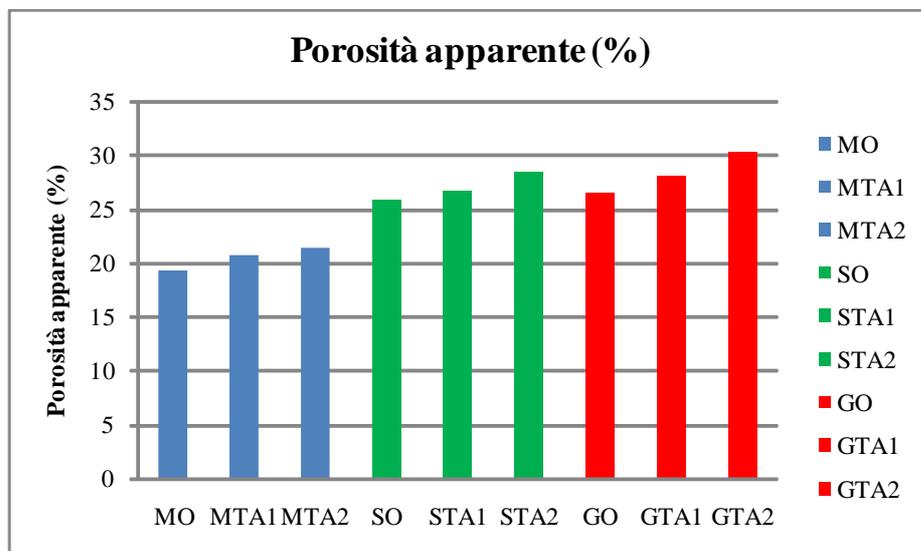


Figura 8.4- Variazione della porosità apparente.

Dall'istogramma di figura 8.4 si vede che l'inserimento delle frazioni di riciclo porta a delle variazioni di porosità, in particolare la loro introduzione porta un aumento di porosità. Queste variazioni sono probabilmente legate a differenze di composizione, come già detto le frazioni di riciclo sono più ricche in frazione carbonatica che durante la cottura si dissocia, lasciando un maggior numero di vuoti nell'impasto. Abbiamo quindi che la sabbia Colombara è silicatica e quindi non soggetta al fenomeno sopradescritto, mentre le sabbie di riciclo TA1(d) e TA2(d), sono più ricche in carbonati, in particolare TA2(d) contiene più carbonati di TA1(d), e quindi da luogo, durante la cottura, alla formazione di un maggior numero di vuoti. Questo aspetto si riscontra nella porosità, infatti negli impasti che utilizzano la sabbia Colombara abbiamo una porosità minore rispetto a quelli dove sono stata utilizzata le sabbie TA1(d) e questi ultimi hanno porosità minore rispetto a quelli con TA2(d).

Essendo poi la porosità collegata all'assorbimento è naturale riscontrare che dove si evidenziano valori di porosità maggiori si avranno di conseguenza maggiori valori di assorbimento, e pertanto i materiali di riciclo portando un aumento di porosità, portano anche un aumento dell'assorbimento.

Analizzando la resistenza a flessione dei prodotti dopo la cottura, ci si aspetterebbe di trovare valori inferiori negli impasti contenenti le frazioni di riciclo rispetto agli impasti che contengono la sabbia Colombara, a causa di una maggiore porosità e di una minore densità.

Invece viene a verificarsi una differente tendenza, come si vede dalla figura 8.5.

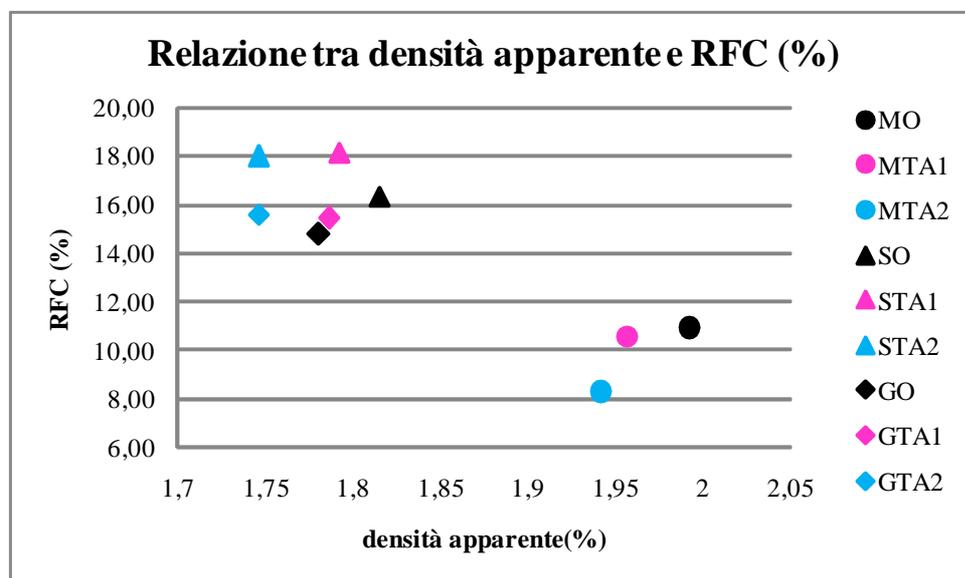


Figura 8.5- Correlazione tra densità apparente e resistenza a flessione dei prodotti di cottura.

Studiando il comportamento dell'argilla Mossò (M), si nota una relazione tra densità apparente e resistenza a flessione dei prodotti di cottura, infatti al diminuire della densità apparente abbiamo anche valori inferiori di resistenza a flessione. Prendendo in considerazione le argille Sila (S) e Giomo (G) notiamo che queste innanzitutto presentano valori simili, inoltre vediamo che

sostituendo la sabbia Colombara con TA1(d) e TA2(d), nonostante una diminuzione di densità apparente, si ha un aumento di resistenza meccanica. Questo aspetto è ancora una volta correlabile alla differente composizione dei campioni, e cioè al loro contenuto in carbonati, maggiore per TA2(d) rispetto a TA1(d). Da letteratura (Dondi et al.) è dimostrato che la presenza di carbonati in un impasto ceramico influenza la resistenza meccanica dei prodotti, in quanto favorisce la formazione durante la cottura di silicati di calcio. È dimostrato che un aumento dell'1% del tenore di carbonati produce mediamente un incremento di circa 2 kg×cm-2 della resistenza a flessione. Pertanto una maggiore resistenza a flessione è dovuta proprio alla composizione chimica e mineralogica dei materiali di partenza.

Per quel che riguarda l'attitudine alle efflorescenze saline dall'analisi dei campioni è emerso un'attitudine alle efflorescenze saline in generale assente o comunque scarsa. Gli unici impasti che hanno dato efflorescenze sono quelli realizzati con l'argilla Giomo (G), e si notano sia nell'impasto dove tale argilla è stata miscelata con la sabbia naturale (sabbia Colombara), sia dove la sabbia naturale è stata sostituita con la frazione di aggregato riciclato TA1(d). Questo fenomeno rende lecito pensare che l'argilla stessa presenti al suo interno elementi che portano alla formazione di efflorescenze saline, seppur in scarsa quantità, e che quindi non sia l'introduzione delle frazioni di riciclo a compromettere ed interferire con tale attitudine.

Prendendo ora in analisi l'effetto delle sostituzioni sul colore, è emerso che l'introduzione delle frazioni di riciclo TA1(d) e TA2(d) portano le ceramiche verso una colorazione più giallo-verde con una diminuzione di luminosità.

Confrontando infine i valori ottenuti dalla sperimentazione (tab. 8.2) con quelli attesi, secondo letteratura, dalle varie proprietà fisiche e tecnologiche condotte sugli impasti ceramici (tab. 8.3).

PARAMETRO	M0	MTA1	MTA2	S0	STA1	STA2	G0	GTA1	GTA2
Acqua d'impastamento	20,4	20,6	21,2	26,7	27,9	29,9	25,6	26,2	26,7
RLE	5,51	5,46	5,1	6,77	6,77	6,5	7	6,71	6,1
RFE	8,3	8,2	8	8,6	9,7	7,2	9,4	10	8,4
Densità apparente essiccato	1,995	2,003	1,955	1,916	1,892	1,859	1,932	1,917	1,891
RLC	0,54	0,54	1,08	0,46	0,49	1,01	0,43	0,74	1,19
Assorbimento d'acqua	9,68	10,53	11,01	14,2	14,91	16,34	14,93	15,75	17,31
RFC	10,95	10,55	8,32	16,3	18,1	17,99	14,81	15,45	15,58

Tabella 8.2- Valori ottenuti durante la sperimentazione per le principali proprietà fisiche e tecnologiche.

PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	VALORI OTTIMALI	VALORI ACCETTABILI
Acqua d'impastamento	%	20 - 28	18 - 36
RLE	%	5 - 8	3 - 10
RFE	MPa	3 - 10	2 - 15
Densità apparente essiccato	g/cm <sup>3</sup>	1,85 - 2,10	1,70 - 2,15
RLC	%	< 1,5	< 3
Assorbimento d'acqua	%	12 - 24	10 - 30
RFC	MPa	12 - 22	4 - 30

Tabella 8.3- Valori attesi dalle principali proprietà fisiche e tecnologiche.

Sui parametri del secco, si riscontrano dei valori per lo più ottimali per quanto riguarda l'acqua d'impastamento, il ritiro lineare in essiccamento (RLE), la resistenza a flessione in essiccamento (RFE), ed anche la densità apparente dei prodotti essiccati.

Anche in cottura i parametri ottenuti dalla sperimentazione, messi a confronto con quelli attesi, evidenziano sempre valori che ricadono nel campo dei valori ottimali.

Alla luce di quest'ultimo confronto è quindi possibile concludere che la sostituzione della sabbia naturale (Colombara), con le frazioni ottenute dagli aggregati di riciclo (TA1(d) e TA2(d)), è fattibile e da anche buoni risultati.

### 8.3 CORRELAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA SOSTITUZIONE DEGLI AGGREGATI DI RICICLO NELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO

Le proprietà tecnologiche di un calcestruzzo dipendono, da numerosi fattori legati alla natura delle materie prime utilizzate nella progettazione dell'impasto di calcestruzzo. Nel corso di questo studio è stata valutata l'influenza degli aggregati di riciclo negli impasti in calcestruzzo, facendo dapprima la caratterizzazione degli aggregati di riciclo secondo le normative per il calcestruzzo, ed inseguito la progettazione e realizzazione di miscele in calcestruzzo con tali materiali, su scala di laboratorio. Gli impasti realizzati sono stati quindi caratterizzati determinando le proprietà fisiche e tecnologiche dei calcestruzzi confezionati.

Di seguito si riportano in un'unica tabella (tab. 8.4) i valori misurati per i vari parametri nei differenti impasti in calcestruzzo, in modo da poter correlare i vari parametri tra loro e di trarne le conclusioni. Dalla tabella è possibile riscontrare che per tutti gli impasti la quantità di cemento usata nel confezionamento del calcestruzzo è di 300 Kg/m<sup>3</sup>, mentre il quantitativo d'acqua richiesto

cambia a seconda dell'impasto, questo a causa di un diverso assorbimento degli aggregati utilizzati, in particolare si vede che la richiesta d'acqua aumenta andando a sostituire gli aggregati di riciclo a quelli naturali, ed è maggiore nell'impasto F dove la quantità di aggregato di riciclo arriva ad un 42%. Una richiesta maggiore d'acqua va di conseguenza ad influenzare il rapporto acqua/cemento, e porta ad avere dei valori maggiori per tale rapporto negli impasti che contengono i materiali di riciclo.

		A	D	F
aggregati sataf	filler Cremaschi	2%	2%	-
	113	10%	10%	8,3%
	103	13%	13%	11%
	117F	7,5%	7,5%	7,0%
	117R	7,5%	7,5%	7,0%
	107	5%	5%	5%
	109	25%	25%	20%
	10.15	15%	-	-
	15.20	10%	-	-
aggregati diga	6,3-31,5	5%	-	-
aggregati riciclati	sabbia riciclata	-	-	12%
	mat. Riciclato 0/30	-	30%	30%
	CEM II/A-LL 42,5 [Kg/m <sup>3</sup> ]	300	300	300
	acqua [Kg/m <sup>3</sup> ]	172	184	187
	additivo	-	-	0,5%
	massa volumica [Kg/m <sup>3</sup> ]	2367	2239	2241
	rapporto a/c	0,57	0,61	0,62
lavorabilità [mm]	0'	220	200	190
	15'	210	170	175
	30'	175	170	160
Resistenza a compressione Rcm [Mpa]	1 giorno	18,0	14,0	13,0
	28 giorni	36,0	28	25,5
	60 giorni	37,5	29	27
	90 giorni	-	30,0	28,0
contenuto d'aria [%]		2,3	2,2	2,2
Assorbimento totale [%]		4,94	8,38	9,24
Assorbimento capillare [%]		0,47	0,71	0,61
Variazioni dimensionali in seguito al ritiro igrometrico valori medi [mm/m]	1 giorno	- 0,028	- 0,027	- 0,020
	3 giorni	- 0,080	- 0,075	- 0,067
	7 giorni	- 0,155	- 0,141	- 0,159
	14 giorni	- 0,257	- 0,248	- 0,301
	28 giorno	- 0,365	- 0,400	- 0,495
	60 giorni	- 0,514	- 0,608	- 0,709

Tabella 8.4- Tabella riassuntiva degli impasti, e delle principali proprietà fisiche e tecnologiche.

Andando ora ad analizzare le proprietà tecnologiche misurate sugli impasti realizzati, il primo parametro che emerge è la lavorabilità, che in seguito all'introduzione degli aggregati di riciclo continua a dare valori che rimangono all'interno della classe S4 (impasto fluido) come è stato misurato per l'impasto di riferimento (A). E' possibile inoltre evidenziare che la lavorabilità si mantiene nel tempo, come evidenziato nel grafico sotto riportato (fig. 8.6).

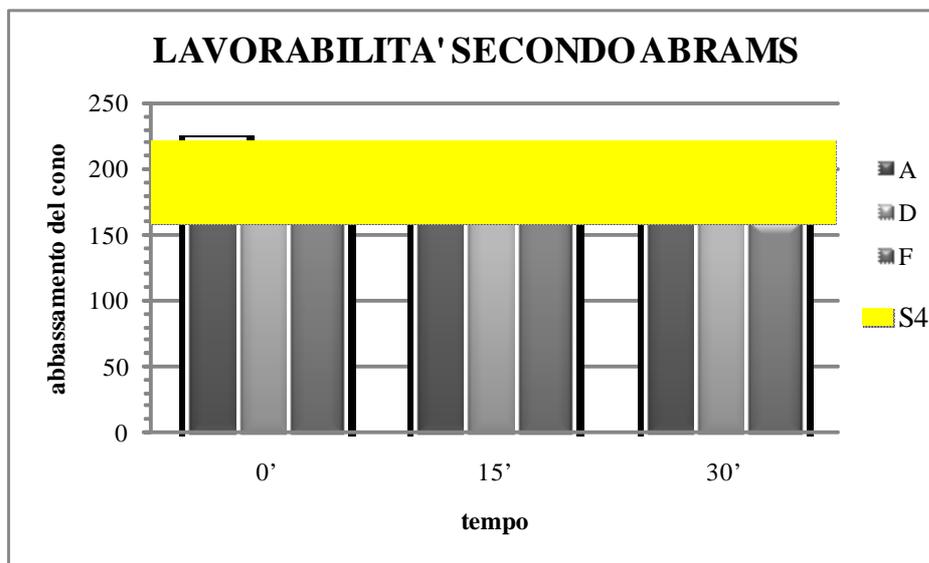


Figura 8.6- Variazione di lavorabilità nel tempo.

Un altro parametro misurato sul calcestruzzo fresco è il contenuto d'aria che per tutti e tre gli impasti ha dato valori simili e accettabili del 2,2%.

Sempre nel calcestruzzo fresco viene determinata la massa volumica, che ha evidenziato valori minori nei calcestruzzi che contengono anche l'aggregato di riciclo, impasti D ed F, rispetto all'impasto realizzato con i soli inerti naturali, A. Tale variazione è indubbiamente legata alla natura stessa dei materiali impiegati, infatti già durante la fase preliminare di caratterizzazione degli aggregati, i materiali di riciclo hanno dato valori bassi di massa volumica, rispetto ai valori dell'aggregato naturale, e questo aspetto si rispecchia poi nel calcestruzzo.

Analizzando le proprietà del calcestruzzo indurito, il primo parametro che prendiamo in considerazione è la resistenza a compressione (Rcm). I valori di Rcm che devono essere presi in considerazione secondo la normativa, sono quelli a 28 giorni, in quanto è dimostrato che a quella scadenza il calcestruzzo ha ormai acquisito le proprietà tecnologiche finali, che non dovrebbero subire ulteriori variazioni nel tempo, aspetto che come si può notare nel grafico di figura 8.7, è rispettato nel tempo, anche per gli impasti realizzati con frazioni di aggregato riciclato. Sempre in tale grafico è possibile notare che l'introduzione degli aggregati di riciclo negli impasti in calcestruzzo (impasto D e F), porta ad una diminuzione di resistenza a compressione Rcm, che

continua comunque a rimanere entro la resistenza di 25 MPa che ci si era prefissi di raggiungere durante la fase di progettazione del calcestruzzo.

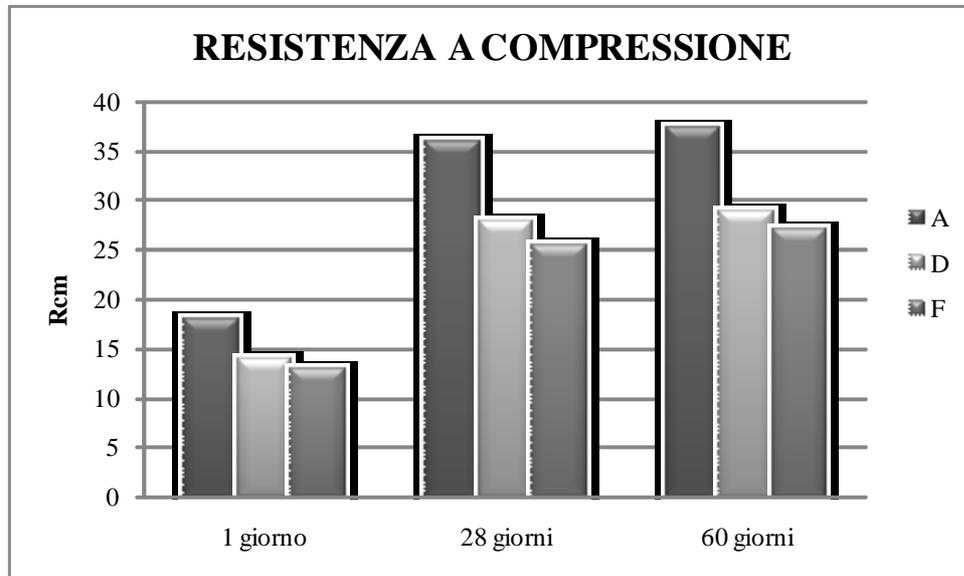


Figura 8.7- Variazione di resistenza a compressione (Rcm) nel tempo.

Mettendo ora in relazione la massa volumica del calcestruzzo con la resistenza a compressione (Rcm) misurato a 28 giorni, come prevede la normativa (fig. 8.8), si nota una proporzionalità diretta tra la resistenza e la massa volumica, infatti a valori di massa volumica maggiori abbiamo che anche la resistenza è maggiore. In particolare, si vede che il calcestruzzo di riferimento A, presenta i valori maggiori sia di resistenza che di massa volumica, e i calcestruzzi realizzati con l'aggiunta di frazioni di riciclo mostrano massa volumica inferiore e di conseguenza un Rcm minore.

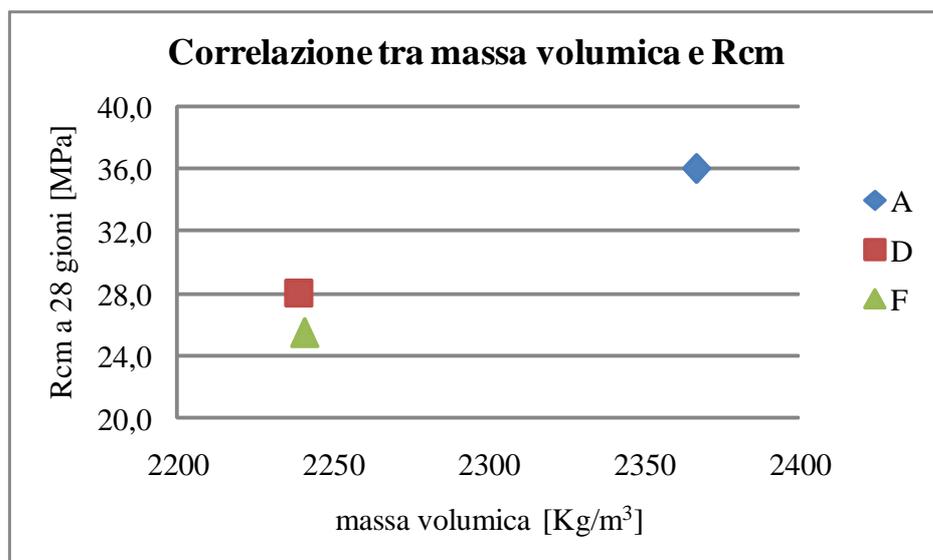


Figura 8.8- Correlazione tra Rcm a 28 giorni e massa volumica.

Un'altra proprietà fisica molto importante per i calcestruzzi è la prova di assorbimento.

I valori ottenuti per i tre impasti vengono riportati nell'istogramma di figura 8.10, dove è possibile notare un aumento nell'assorbimento negli impasti realizzati con l'aggiunta delle frazioni di aggregato di riciclo (impasto D ed F). Tale variazione è giustificata ancora una volta dalle proprietà stesse degli aggregati di riciclo, i quali avevano dimostrato già nella preliminare fase di caratterizzazione, valori elevati di assorbimento.

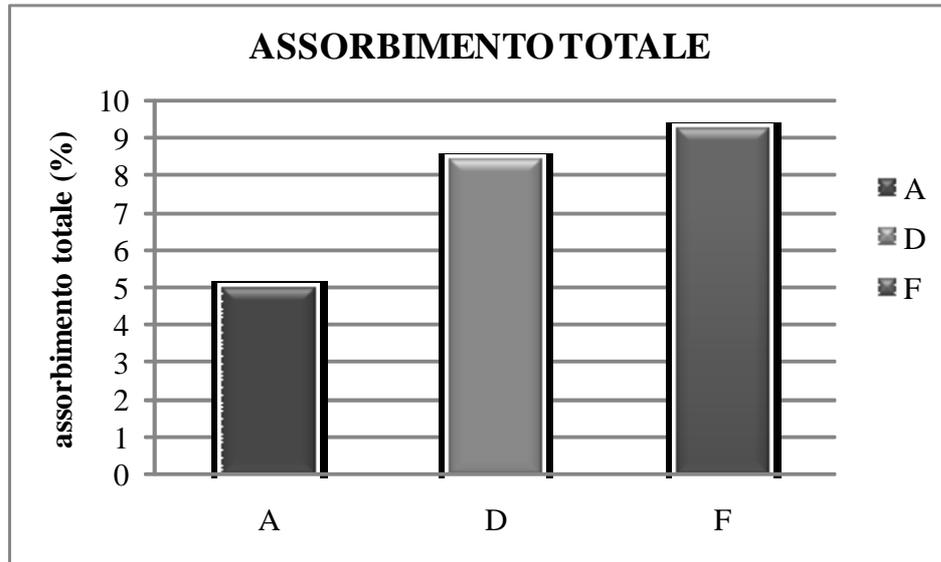


Figura 8.10- Assorbimento totale misurato nei diversi impasti.

Analizzando infine i risultati ottenuti con la misurazione del ritiro igrometrico (fig. 8.11), è possibile notare che gli impasti con l'aggregato di riciclo danno valori maggiori di ritiro, e tale fenomeno è legato all'assorbimento, in quanto il maggiore assorbimento d'acqua da parte di questi calcestruzzi, porta ad un maggiore rilascio d'acqua igroscopica nel tempo, e di conseguenza a valori maggiori di ritiro.

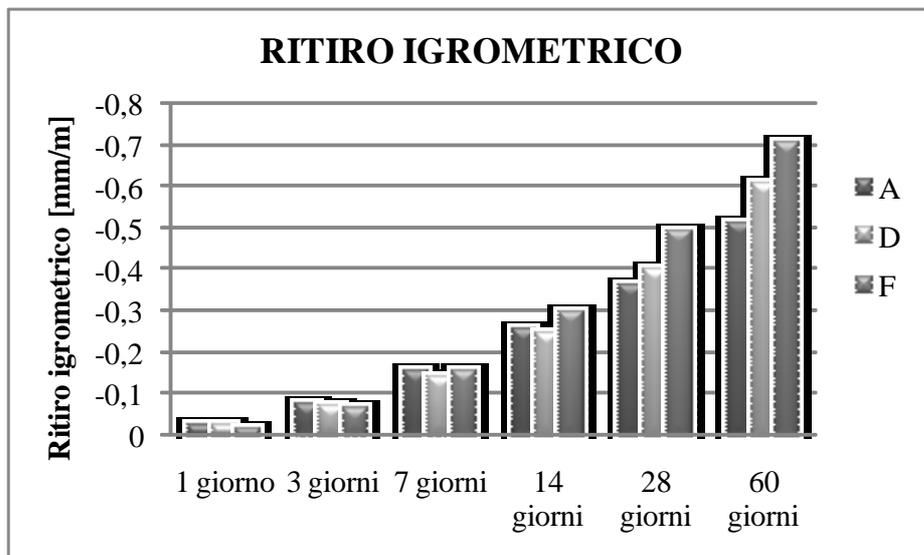


Figura 8.11- Variazione del ritiro igrometrico nel tempo.

Dai dati emersi dalle prove di caratterizzazione fisica e tecnologica degli impasti, è possibile affermare che l'introduzione degli aggregati di riciclo, in sostituzione di parte degli aggregati naturali, nel calcestruzzo è un'operazione fattibile anche oltre i limiti consentiti dalle attuali normative, che consentono un inserimento massimo del 5%, per calcestruzzi strutturali.

Il calcestruzzo realizzato potrebbe essere utilizzato per realizzare elementi in calcestruzzo, come dissuasori del traffico, o elementi assimilabili.

È inoltre importante sottolineare, che oltre agli aggregati nel calcestruzzo un ruolo molto importante è dato dal cemento, e negli impasti realizzati si è deciso di impiegare un cemento standard, ma per ottenere resistenze e risultati migliori si potrebbe pensare di miscelare gli aggregati con dosi maggiori di cemento, o con cementi aventi particolari caratteristiche.

## ALLEGATI

### PREPARAZIONE DELLE PASTICCHE

La pasticca è il risultato di un metodo, che ingloba il materiale da analizzare, per permettere l'analisi dei campioni ai raggi X.

Le dimensioni delle pasticche sono standardizzate, così come la quantità di materiale necessario per comporle, e che viene successivamente analizzato.

Metodo pratico per realizzare la pasticca.

Si prende un cucchiaino da caffè della polvere impalpabile, preparata in precedenza con la giara, la si mette sopra una lente di vetro, si aggiungono alcune gocce di un legante liquido organico che ha la caratteristica di non modificare la composizione originale del campione, e si amalgama il tutto con una scatola d'acciaio.

La polvere così preparata è messa in un particolare marchingegno d'acciaio composto da una camicia posta in un cilindro cavo, che ha come base ad incastro un oggetto a forma di T capovolta. Mediante un pistone trasparente, si procede a distribuire uniformemente la polvere inserita, stando molto attenti che questa non aderisca alle pareti della camicia e che non si vengano a formare delle screpolature.

Una volta tolto il pistone trasparente, si aggiunge dell'acido borico alla polvere, quindi si inserisce un pistone d'acciaio e si posiziona il tutto all'interno di una pressa idraulica, tarata per una pressione di  $80 \text{ kg/mm}^2$ , per un periodo di circa trenta secondi.

Pressato il tutto si libera la pasticca che si è formata, si sigla lasciandole il nome dato alla polvere e si lascia esposta all'aria per permettere al legante inizialmente aggiunto di asciugare, quindi viene inserita in una busta plastificata.

Si ripete la medesima procedura per tutti i campioni, dopo aver accuratamente pulito tutti gli strumenti utilizzati con alcol, per evitare di inquinare la pasticca che si andrà a costituire in seguito.

### DETERMINAZIONE DELLA LOI

E' un procedimento che serve per determinare il contenuto d'acqua della struttura dei campioni, e questo è svolto in più giorni. Il primo giorno: si inizia la mattina, si puliscono accuratamente le provette assicurandosi che queste siano perfettamente asciutte, si procede quindi a riempirle con una quantità di polvere di circa di circa 0,8 gr e si siglano le provette rispettando la denominazione dei campioni. Nel pomeriggio le provette vengono introdotte nel forno dove rimarranno alla temperatura di  $110^\circ \text{ C}$  per un'intera notte, tutto questo ha lo scopo di eliminare l'umidità contenuta nei campioni.

- Secondo giorno: al mattino, si prelevano le provette dal forno e s'inseriscono nella campana. Si preparano i crogioli e si mettono nella muffola vi rimangono per circa due ore ad una temperatura di 550° C. Scadute le due ore si tolgono i crogioli dalla muffola e s'inseriscono secondo un ordine prestabilito nella campana di vetro che contiene dei sali per assorbire il vapore acqueo. Nel pomeriggio si riprende pesando i crogioli con una bilancia elettronica, che arriva alla quarta cifra decimale dopo la virgola, facendo molta attenzione a toccarli solo con le pinze evitando di toccarli con le mani, pesato il crogiolo vuoto vi si aggiungono 0,6 gr di polvere del campione. terminate le operazioni di pesatura si rimettono i crogioli in campana di vetro dove rimarranno sino alla sera quando verranno prelevati e inseriti nella muffola ad una temperatura di 1050° C per tutta la notte.
- Terzo giorno: al mattino presto si spegne la muffola, e si lasciano raffreddare per un paio di ore i crogioli dentro la muffola, quindi si tolgono i campioni usando guanti e pinze e si ripongono nelle campane di vetro. E' bene suddividere i crogioli in più muffole per evitare sbalzi termici troppo accentuati che potrebbero creparle. Dopo un'ora si prendono i crogioli e si pesano nuovamente. Nel pomeriggio si rimettono i campioni in forno per un'altra notte alla temperatura di 1050° C.

## ANALISI AI RAGGI X

Le tecniche adottate per analizzare i campioni sfruttano i diversi comportamenti che la radiazione x ha con la materia.

I raggi x sono generalmente realizzati attraverso il bombardamento di un bersaglio, detto anticatodo, da parte d'elettroni emessi da un catodo per effetto termoionico e accelerati da un forte campo elettrico (la differenza di potenziale fra catodo e anticatodo è dell'ordine delle decine di migliaia di volt).

Tutto l'apparato è racchiuso in un tubo sottovuoto.

L'emissione radioattiva dell'anticatodo è fatta di uno spettro continuo che comprende radiazioni di tutte le lunghezze d'onda, a partire da una lunghezza d'onda minima che dipende soltanto dalla tensione applicata, e di uno spettro a righe, sovrapposto al precedente con righe ben determinate che dipendono dalla natura dell'anticatodo.

La perdita d'intensità che avviene quando un fascio di raggi x attraversa una qualsiasi materiale è dovuta a due fenomeni distinti, l'assorbimento e la diffusione.

I due effetti sono sfruttati nella tecnica della diffrazione e della spettrometria dei raggi di fluorescenza.

## DIFFRATTOMETRIA

Esistono diverse metodologie sperimentali che sfruttano la diffrazione dei raggi x, tra cui il rifrattometro di Bragg, che oggi ha un interesse puramente storico, ma il cui principio di funzionamento è ampiamente sfruttato negli attuali diffrattogrammi.

Nel diffrattogramma di Bragg un fascio di raggi x paralleli e monocromatici incide su un cristallo il quale è montato su un asse, girevole e perpendicolare all'asse di rotazione. Ruotando il cristallo sarà possibile portare il piano reticolare in condizione di diffrazione. Il raggio di fratto contenuto in un piano perpendicolare all'asse di rotazione è raccolto da un rilevatore di raggi x, il quale è montato su di un supporto che può rotare coassialmente con l'asse portacristallo.

Questo permette, ogni volta che il cristallo è aggiustato in modo che un suo piano reticolare formi un angolo  $\vartheta$  con i raggi x incidenti, al rilevatore di essere messo in una posizione tale da poter ricevere i raggi x diffratti sotto un angolo  $2\vartheta$ .

Gli apparecchi moderni differiscono dai rifrattometri di Bragg, per essere dotati di dispositivi che consentono di orientare in qualsiasi maniera il cristallo rispetto al fascio di raggi x incidenti, e sono dotati di dispositivi che raccolgono automaticamente le intensità delle diffrazioni.

Una tecnica che permette di studiare la diffrazione dei raggi x, anche utilizzando materiali che si trovano allo stato d'aggregato cristallino finissimo incoerente, quale si può ottenere anche artificialmente per macinazione di materiale più grossolano, o coerente, è la XRD (diffrazione da polveri di raggi x).

La XRD è una delle tecniche più potenti per le analisi qualitative, per l'analisi quantitativa, è complementare o alternativa ad altri metodi di analisi chimico-fisico.

La XRD utilizza la seguente equazione:

$$N\lambda = 2D \sin\vartheta.$$

Questa è la legge di Bragg che esprime la posizione dei massimi d'intensità di fratta (riflessi). Nella diffrazione sono usati raggi x di lunghezza d'onda nota, per ottenere informazioni sulle distanze di un campione cristallino diffrangente e per identificare le diverse fasi cristalline del campione.

Infatti nella legge di Bragg si ha:

- D che rappresenta la distanza interplanare, incognita, fra i piani reticolari diffrangenti del campione;
- $\vartheta$  è l'angolo sotto di cui vengono diffratti i raggi x di lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) nota, emessi dall'anticatodo del tubo a raggi x.

Il risultato di un'analisi a raggi XRD è un diffrattogramma che riporta sull'asse delle ascisse l'angolo  $\vartheta$  sotto il quale vengono diffratti i raggi x e sull'asse delle ordinate riporta il valore dell'intensità relativa di ciascun riflesso.

L'intensità è descritta dalla seguente equazione generale:

$$I_{hkl} = K \frac{1}{2\mu} M |F_{hkl}|^2 LP \frac{1}{V^2}$$

Dove:

- K costante dello strumento
- $\mu$  il coefficiente d'assorbimento lineare
- V il volume della cella elementare
- M molteplicità del riflesso
- $F_{hkl}$  fattore di struttura di (hkl)
- LP fattore di Lorentz polarizzazione

Oggi a disposizione del ricercatore ci sono migliaia di schede, corrispondenti ad altrettante fasi cristalline, ciascuna delle quali riporta, oltre ad una serie di notizie generali, la distanza in  $\text{Å}$  e l'intensità delle diffrazioni osservabili nello spettro di polveri della fase cristallina descritta dalla scheda stessa. Lo schedario è accompagnato da un indice nel quale sono elencate, in ordine di distanze reticolari decrescenti, le tre diffrazioni più intense di ogni fase cristallina della quale esiste la corrispondente scheda.

## SPETTROMETRIA DEI RAGGI X

Nella spettrometria a dispersione angolare, l'analisi di un dato campione è eseguita disperdendo lo spettro dei raggi X emessi dal campione mediante un monocristallo analizzatore.

Anche nella spettrometria vale la legge di Bragg:

$$n\lambda = 2D \sin\vartheta.$$

In questo caso il parametro D indica la distanza interplanare, conosciuta, fra i piani diffrangenti del cristallo analizzatore, mentre  $\vartheta$  definisce l'angolo sotto il cui vengono diffratti i raggi X di lunghezza d'onda  $\lambda$  degli elementi presenti nel campione.

Per un'analisi qualitativa è quindi sufficiente determinare sotto quale angolo avviene la diffrazione dei raggi X emessi dal campione, mentre per l'analisi quantitativa si misura l'intensità dei raggi X di fluorescenza, scegliendo la più opportuna riga dello spettro caratteristico dell'elemento in esame. Quindi la distanza interplanare conosciuta è usata per analizzare lo spettro di fluorescenza del campione per rilevarne così gli elementi presenti, indipendentemente dall'edificio cristallino, dallo stato d'aggregazione e dalla combinazione chimica dell'elemento stesso.

Nella spettrometria dei raggi X sono interessati normalmente solo gli elettroni degli orbitali più interni.

La spettrometria dei raggi X di fluorescenza è essenzialmente un metodo di confronto, quindi per un'accurata analisi quantitativa occorre disporre di una serie di campioni a composizione ben determinata (campioni tarati o standard), per tracciare delle curve di taratura, riportando l'intensità dei raggi X di fluorescenza, in funzione della concentrazione dell'elemento da determinare.

I vantaggi di questa tecnica sono:

- L'esame non è distruttivo;
- L'analisi è molto veloce, precisa ed accurata;
- Gli elementi di comportamento chimico molto simile, si possono facilmente differenziare, perché l'analisi si basa sulla differenza del numero atomico;
- Sono analizzabili tutti gli elementi con numero atomico maggiore di 8.

Nella nostra analisi si sono adoperati gli spettrometri a dispersione angolare con cristalli analizzatori, questi possono essere di due tipi, sequenziali in cui il rilevatore si posiziona sequenzialmente sulle righe caratteristiche degli elementi in esame o effettua una scansione di tutto lo spettro emesso dal campione, e quelli a canali fissi o simultanei.

Gli spettri sequenziali sono molto versatili, in quanto disponendo di più cristalli analizzatori, di almeno due rilevatori e d'altri parametri di misura inseribili singolarmente o automaticamente secondo l'elemento in esame, permettendo l'analisi di tutti gli elementi senza apportare modifiche allo strumento. Questi però risultano più lenti rispetto a quelli a canali fissi poiché il tempo necessario per analizzare il campione è dato dalla sommatoria dei singoli tempi necessari per determinare un particolare elemento e del tempo necessario a variare alcuni parametri di misura.

L'elemento principale di questo strumento è il cristallo analizzatore che può essere con cristallo piano in riflessione o con cristallo curvo in riflessione.

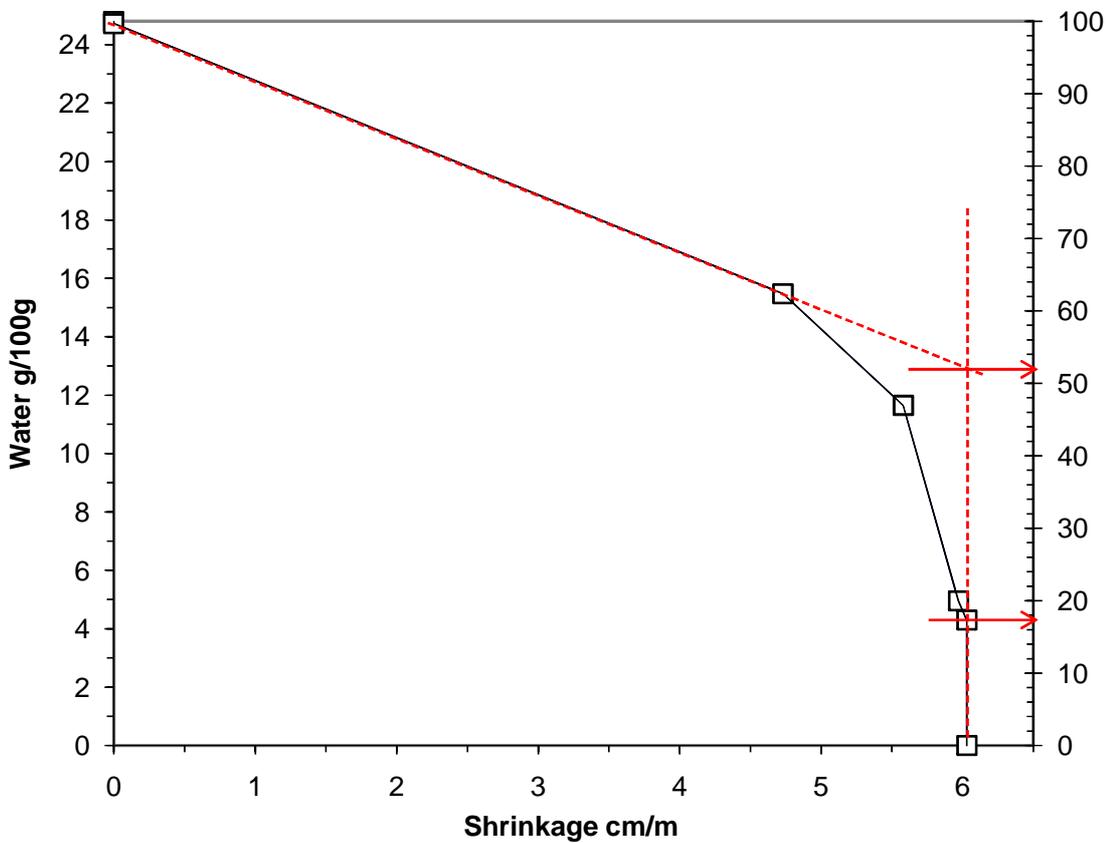
In un cristallo piano, una parte della radiazione di fluorescenza che il campione in esame emette, in tutte le direzioni, viene raccolta da un sistema di collimazione (collimazione primaria), e va successivamente ad incidere sul cristallo analizzatore dove viene diffrattato secondo la legge di Bragg; dopo il passaggio attraverso un secondo sistema di collimazione (collimazione secondaria) la radiazione di fluorescenza viene finalmente rilevata da un rilevatore opportuno.

Quindi con l'analisi quantitativa con un'apparecchiatura sequenziale il cristallo analizzatore può essere ruotato, con velocità angolare costante, e riflette via via nel rilevatore, che ruota a sua volta con velocità angolare doppia, tutte quelle radiazioni che hanno lunghezza d'onda tale da obbedire, nel momento della loro rivelazione, alla legge di Bragg. Le geometrie normalmente adottate in questi strumenti, sono denominate a semifocalizzazione e a focalizzazione completa, con cristalli monocromatori curvati rispettivamente secondo Johan o secondo Johansson.

## CURVE DI BIGOT

Sample: **G0**

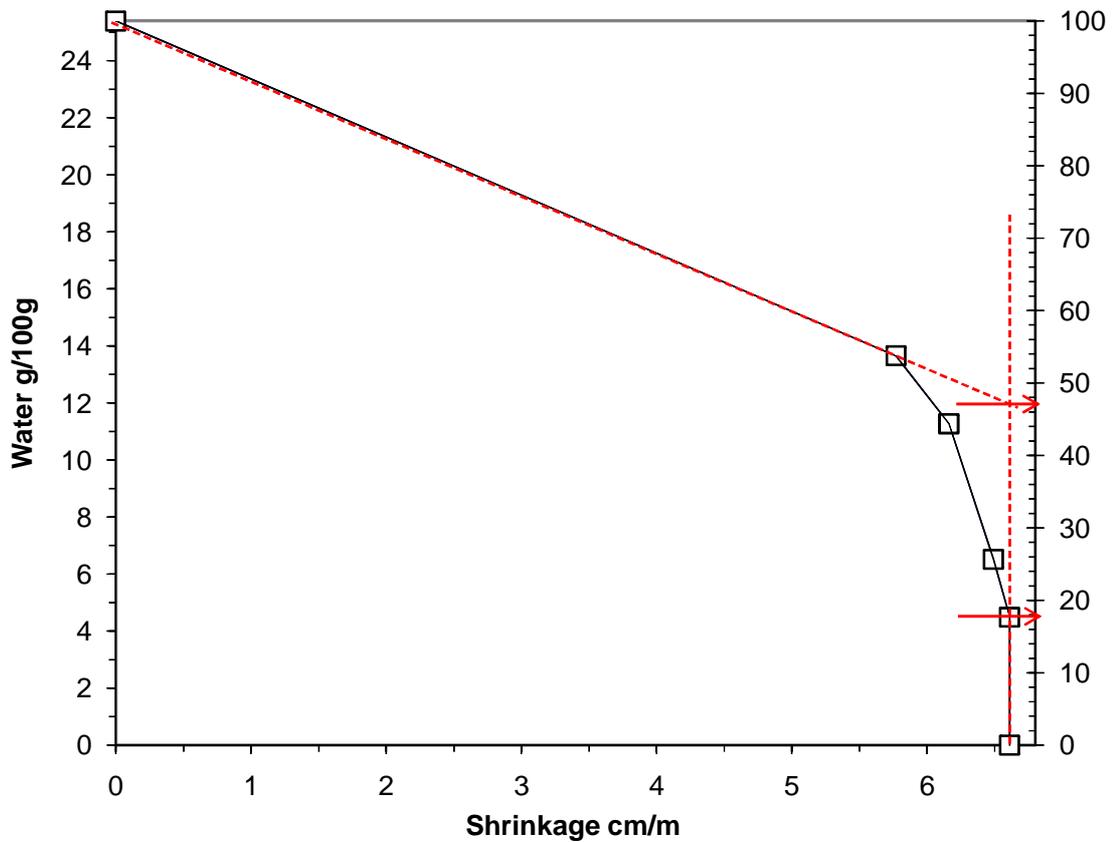
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	26,94	0	0,00	-	20,43	100,0	24,8
Weight dry 20°C	22,10	1	0,00	100,00	-	99,7	24,7
Weight dry 105°C	21,60	2	4,73	55,44	-	62,4	15,5
Weight loss 20°C	21,90	3	5,58	41,73	-	47,0	11,6
Weight loss 105°C	24,72	4	5,97	17,74	-	20,0	5,0
Ratio 105/20	1,13	5	6,03	0,00	-	17,3	4,3
Working moisture %	24,80	6	6,03	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	48,0	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	34,5	%	82,5
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	17,5	%	
Ratio Ws1/Ws2+Wws			0,92	1	
Final shrinkage			6,0	cm/m	

Sample: **GTA1**

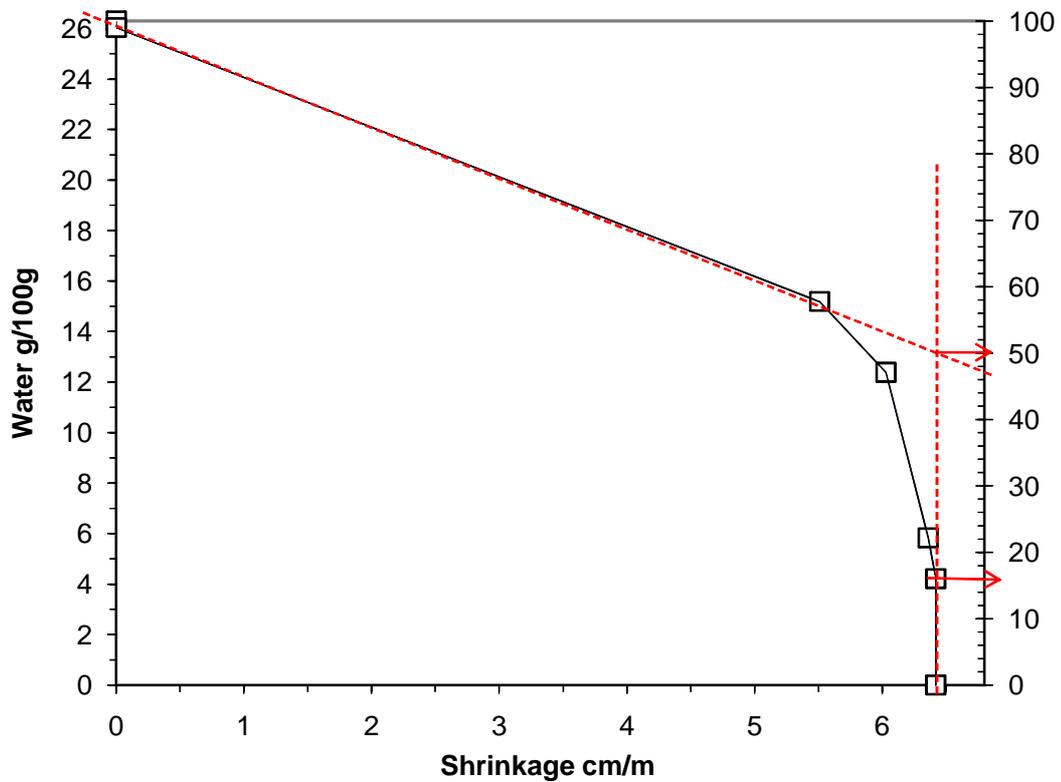
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	27,84	0	0,00	-	20,92	100,0	25,4
Weight dry 20°C	22,82	1	0,00	100,00	-	100,0	25,4
Weight dry 105°C	22,20	2	5,77	46,53	-	53,7	13,7
Weight loss 20°C	22,00	3	6,16	38,42	-	44,4	11,3
Weight loss 105°C	25,41	4	6,49	22,22	-	25,7	6,5
Ratio 105/20	1,15	5	6,61	0,00	-	17,7	4,5
Working moisture %	25,40	6	6,61	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	53,0	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	29,0	%	82,0
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	18,0	%	
Ratio Ws1/Ws2+Wws			1,13	1	
Final shrinkage			6,6	cm/m	

Sample: **GTA2**

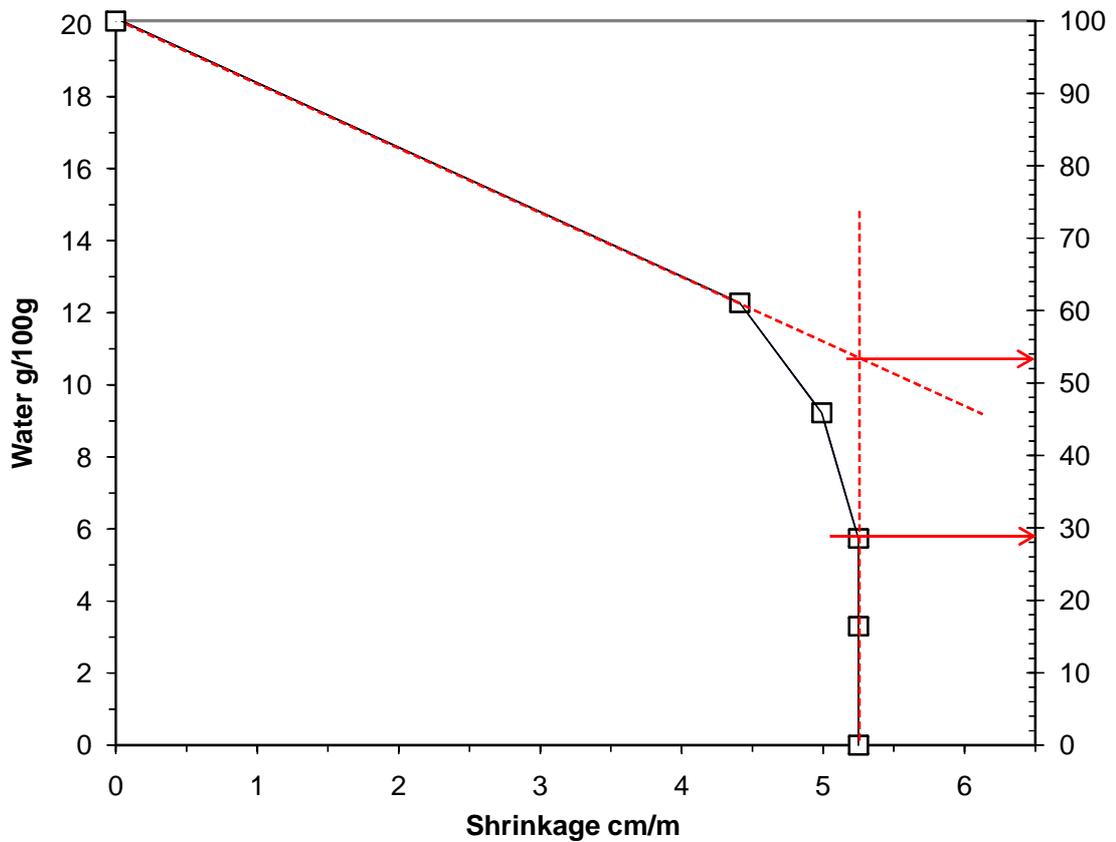
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	27,25	0	0,00	-	21,83	100,0	26,3
Weight dry 20°C	22,12	1	0,00	100,00	-	99,0	26,0
Weight dry 105°C	21,62	2	5,51	51,95	-	57,8	15,2
Weight loss 20°C	23,19	3	6,03	42,34	-	47,1	12,4
Weight loss 105°C	26,04	4	6,36	19,92	-	22,1	5,8
Ratio 105/20	1,12	5	6,42	0,00	-	16,0	4,2
Working moisture %	26,30	6	6,42	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	49,5	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	34,0	%	
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	16,5	%	83,5
Ratio Ws1/Ws2+Wws			0,98	1	
Final shrinkage			6,4	cm/m	

Sample: **M0**

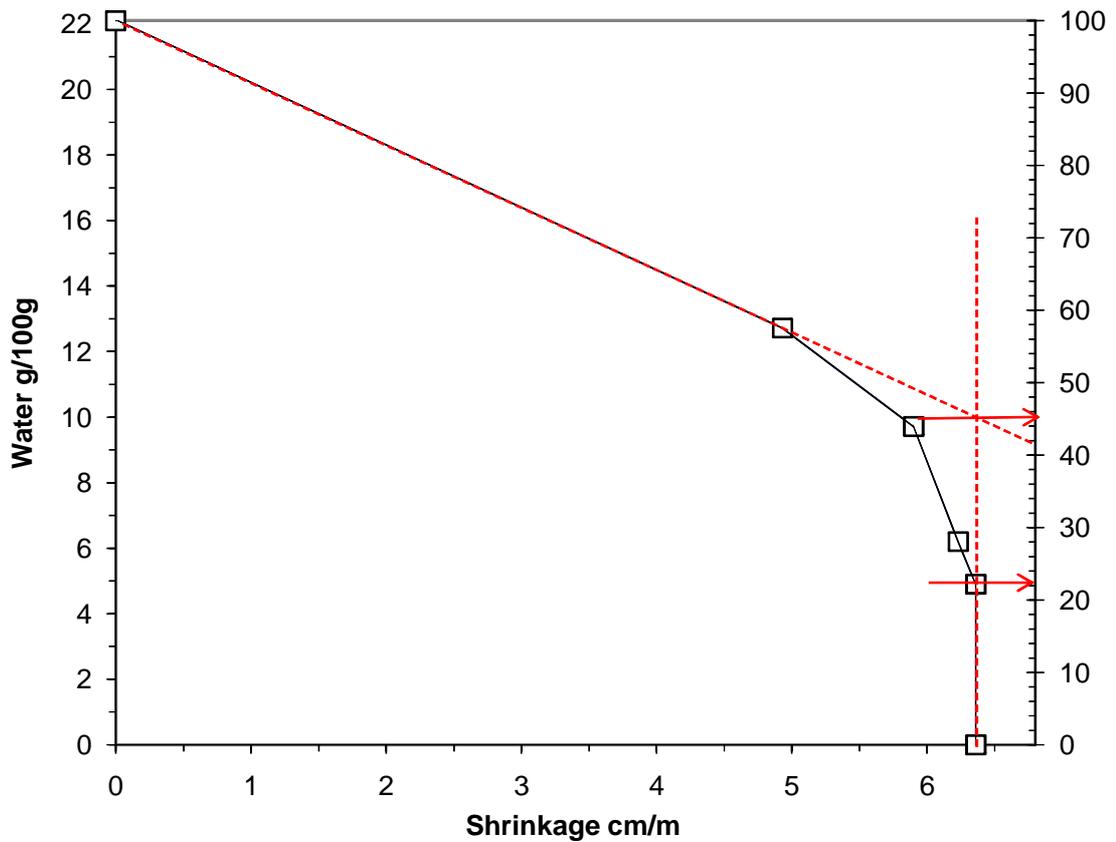
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	28,66	0	0,00	-	16,87	100,0	20,1
Weight dry 20°C	24,38	1	0,00	100,00	-	100,3	20,2
Weight dry 105°C	23,85	2	4,41	52,98	-	61,1	12,3
Weight loss 20°C	17,56	3	4,99	39,81	-	45,9	9,2
Weight loss 105°C	20,17	4	5,25	24,76	-	28,5	5,7
Ratio 105/20	1,15	5	5,25	0,00	-	16,4	3,3
Working moisture %	20,10	6	5,25	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	47,0	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	24,0	%	
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	29,0	%	71,0
Ratio Ws1/Ws2+Wws			0,89	1	
Final shrinkage			5,3	cm/m	

Sample: **MTA1**

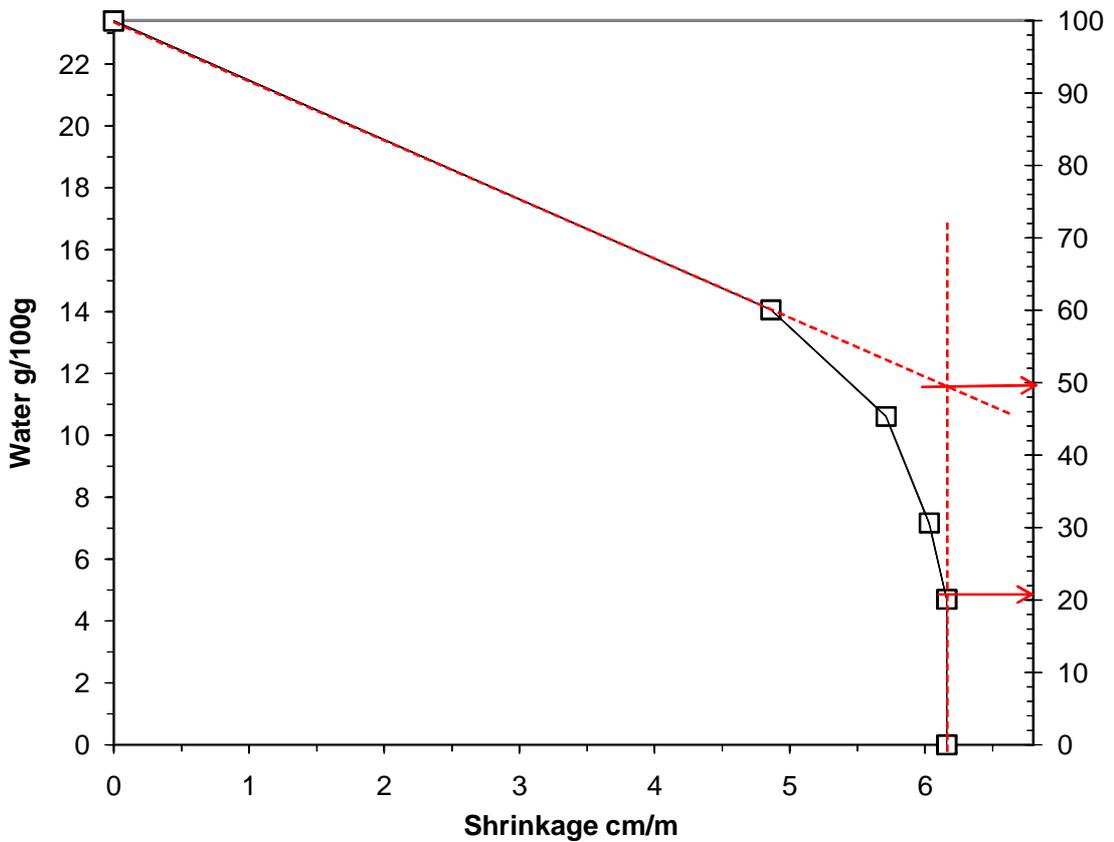
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	27,43	0	0,00	-	17,23	100,0	22,1
Weight dry 20°C	23,05	1	0,00	100,00	-	100,1	22,1
Weight dry 105°C	22,46	2	4,93	49,37	-	57,6	12,7
Weight loss 20°C	19,00	3	5,90	37,69	-	43,9	9,7
Weight loss 105°C	22,13	4	6,23	24,06	-	28,1	6,2
Ratio 105/20	1,16	5	6,36	0,00	-	22,2	4,9
Working moisture %	22,10	6	6,36	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	55,0	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	22,5	%	77,5
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	22,5	%	
Ratio Ws1/Ws2+Wws			1,22	1	
Final shrinkage			6,4	cm/m	

Sample: **MTA2**

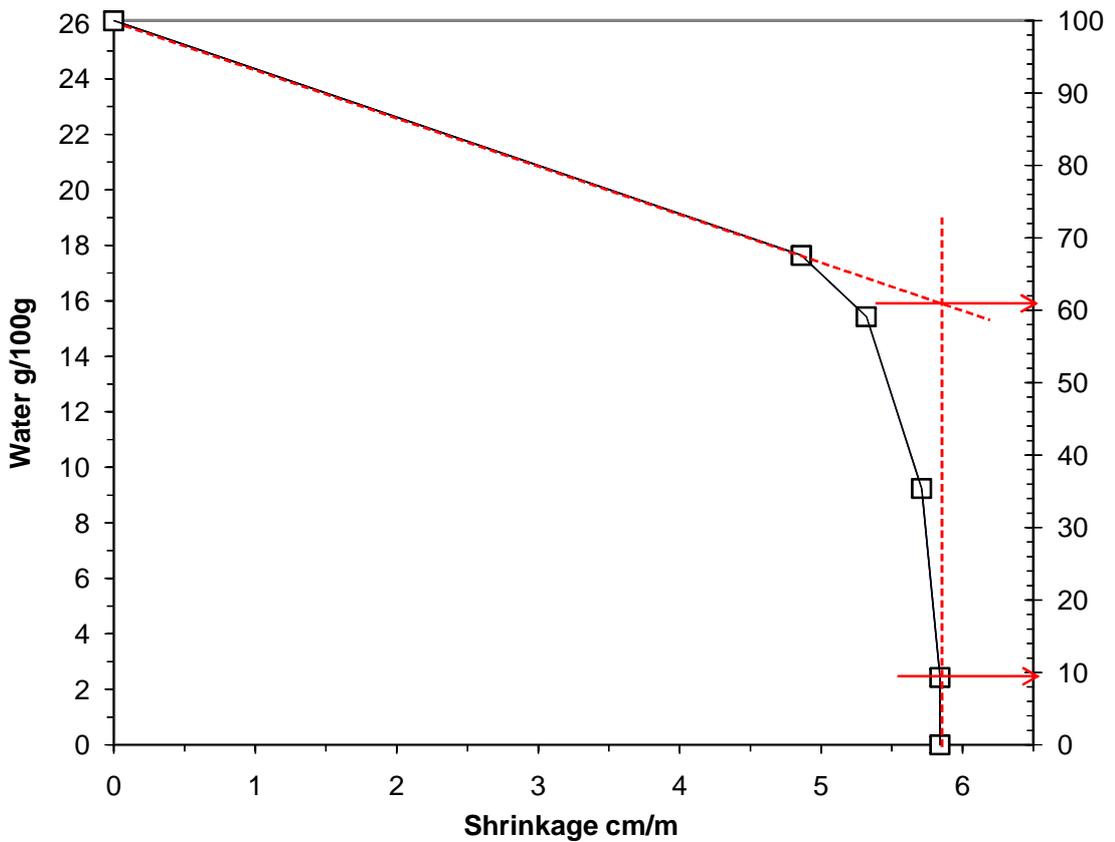
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	27,59	0	0,00	-	18,69	100,0	23,4
Weight dry 20°C	22,99	1	0,00	100,00	-	100,0	23,4
Weight dry 105°C	22,36	2	4,86	51,40	-	60,1	14,1
Weight loss 20°C	20,01	3	5,71	38,80	-	45,3	10,6
Weight loss 105°C	23,39	4	6,03	26,21	-	30,6	7,2
Ratio 105/20	1,17	5	6,16	0,00	-	20,1	4,7
Working moisture %	23,40	6	6,16	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	50,5 %	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	29,0 %	
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	20,5 %	79,5
Ratio Ws1/Ws2+Wws			1,02	1
Final shrinkage			6,2	cm/m

Sample: **S0**

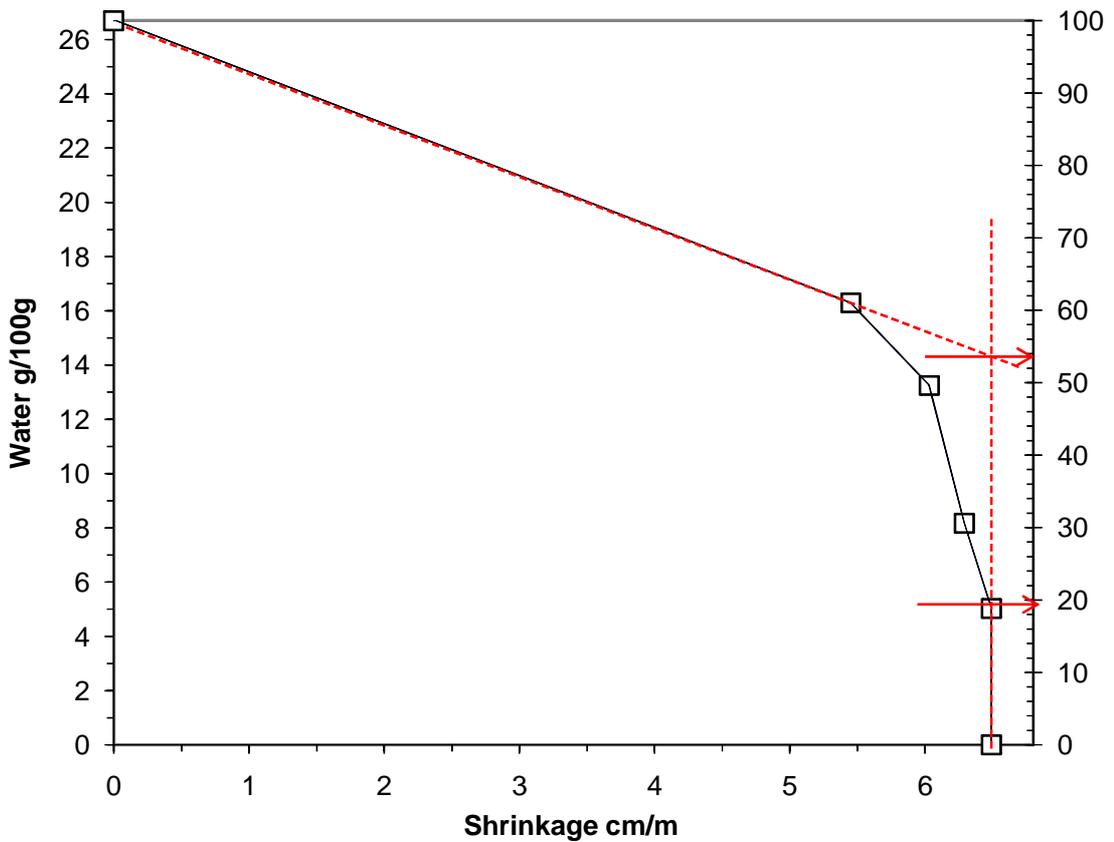
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	27,20	0	0,00	-	23,68	100,0	26,1
Weight dry 20°C	22,17	1	0,00	100,00	-	100,0	26,1
Weight dry 105°C	21,57	2	4,86	58,75	-	67,6	17,6
Weight loss 20°C	22,69	3	5,32	51,38	-	59,1	15,4
Weight loss 105°C	26,10	4	5,71	30,76	-	35,4	9,2
Ratio 105/20	1,15	5	5,84	0,00	-	9,3	2,4
Working moisture %	26,10	6	5,84	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	39,0	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	51,5	%	
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	9,5	%	90,5
Ratio Ws1/Ws2+Wws			0,64	1	
Final shrinkage			5,8	cm/m	

Sample: **STA1**

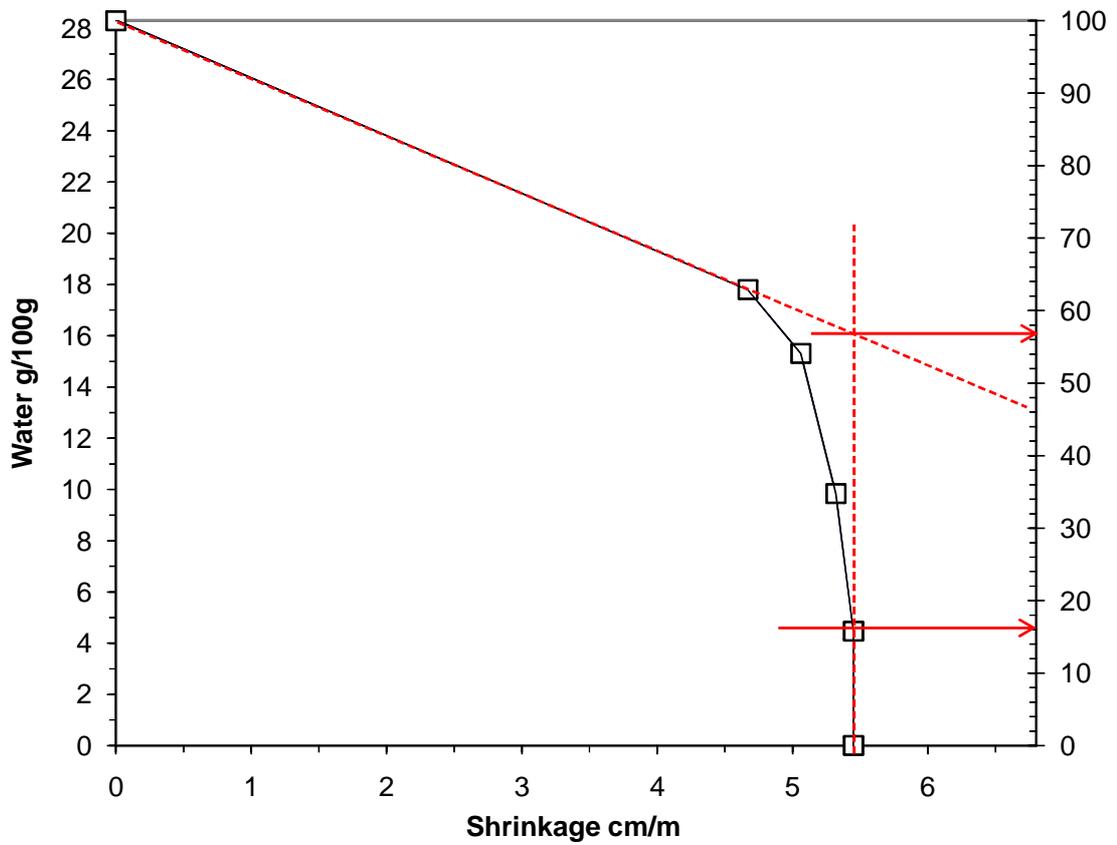
	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	27,12	0	0,00	-	21,70	100,0	26,7
Weight dry 20°C	22,11	1	0,00	100,00	-	100,1	26,7
Weight dry 105°C	21,40	2	5,45	51,68	-	61,0	16,3
Weight loss 20°C	22,66	3	6,03	42,02	-	49,6	13,2
Weight loss 105°C	26,73	4	6,29	25,91	-	30,6	8,2
Ratio 105/20	1,18	5	6,49	0,00	-	18,8	5,0
Working moisture %	26,70	6	6,49	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	46,5 %	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	34,5 %	
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	19,0 %	81,0
Ratio Ws1/Ws2+Wws			0,87	1
Final shrinkage			6,5	cm/m

Sample: **STA2**

	g	Point	Shrinkage %	Water %	Data Graph	Weight loss %	Water g/100g
Weight Wet sample	26,23	0	0,00	-	23,86	100,0	28,3
Weight dry 20°C	21,00	1	0,00	100,00	-	100,1	28,3
Weight dry 105°C	20,44	2	4,67	55,23	-	62,9	17,8
Weight loss 20°C	24,90	3	5,06	47,51	-	54,1	15,3
Weight loss 105°C	28,33	4	5,32	30,53	-	34,8	9,8
Ratio 105/20	1,14	5	5,45	0,00	-	15,8	4,5
Working moisture %	28,30	6	5,45	-	-	0,0	0,0



Weight loss with shrinkage	Phase I	Ws1	43,0	%	
Weight loss with shrinkage	Phase II	Ws2	41,0	%	
Weight loss without shrinkage	Phase III	Wws	16,0	%	84,0
Ratio Ws1/Ws2+Wws			0,75	1	
Final shrinkage			5,5	cm/m	

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Neville, “Le proprietà del cls”, Sansoni, Firenze (1980)
- [2] AA.VV., “Calcestruzzo leggero strutturale”, Levi AITEC (1974)
- [3] AA.VV., Guida all’industria estrattiva ed al riciclaggio, Edizioni PEI, Parma 2002.
- [4] Alessandra Bonoli, La valorizzazione degli inerti da C&D, Edizioni PEI, Recycling n° 5 settembre 2004.
- [5] ANPAR, Il recupero dei residui da costruzione e demolizione, Per risparmiare risorse naturali, Edizioni PEI, Recycling n° 1 gennaio 2002.
- [6] Ardenzo Felloni (a cura di ), Gli aggregati riciclati, Riciclare per l’Ambiente, Hyper Edizioni, Padova 2004.
- [7] ATECAP - Manuale del calcestruzzo di qualità (1996)
- [8] Bertola, “I calcestruzzi leggeri”, Hoepli, Milano (1983)
- [9] F. Biasioli – Il progetto dell’aggregato misto Calcestruzzo parte II (2002)
- [10] G. Dalla Chiara – Problematiche connesse all’attività produttiva in fornace: Indagini sull’essiccazione (2003)
- [11] L. Bertolini, P. Pedefferi – Tecnologia dei materiali leganti e calcestruzzo (1996)
- [12] L. Bertolini, P. Pedefferi, “ Scienza e tecnologia dei materiali, leganti e calcestruzzo”, Città Studi Edizioni, Milano
- [13] L. Cunico, G. Dircetti, M. Dondi, G. Ercolani, G. Guarini, F. Mazzanti, M. Raimondo, A. Ruffini, I. Venturi – Steel slag re cycling in clay brick production, Tile & Brick Internat-Volume 19 (2003)
- [14] L’ ABC del calcestruzzo - *A come acqua: fatti e misfatti sui cantieri* da Enco-journal n° 1 (1999)
- [15] L’ ABC del calcestruzzo - *I come inerte* da Enco-journal n° 9 (1999)
- [16] L’ ABC del calcestruzzo – *L come lavorabilità ...per l’affidabilità della struttura* da Enco-journal n° 10 (1999)

- [17] L' ABC del calcestruzzo - *M come mix-design* da Enco-journal n°11 (1999)
- [18] L' ABC del calcestruzzo - *S come ...Superfluidificanti ed altri additivi* da Enco-journal n°17 (1999)
- [19] Luca Alberti, Indagine petrografico-applicativa dei materiali inerti della discarica di Ca Leona Ferrara, tesi di laurea, università di Ferrara, Facoltà di Scienza Matematiche, Fisiche e Naturali, anno accademico 1997-1998.
- [20] M. Collepari – Il nuovo calcestruzzo (2003)
- [21] M. Collepari, “scienza e tecnologia del cls”, Hoepli, Milano (1991)
- [22] M. De Bonis –Automazione della produzione di calcestruzzo: muscolazione, trasporto e scarico (2004)
- [23] M. Dondi – Caratterizzazione tecnologica delle argille per ceramic e dei prodotti di cottura (1997)
- [24] M. Dondi, M. Marsigli – Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura (1997)
- [25] M. Dondi, M. Marsigli, I. Venturi – Comportamento in cottura delle argille italiane per laterizi (1998)
- [26] M. Dondi, M. Marsigli, I. Venturi – Sensibilità all'essiccamento e caratteristiche porosimetriche delle italiane per laterizi (1998)
- [27] M. Dondi, M. Marsigli, I. Venturi – Technological requirements of raw materials for heavy clay products (1998)
- [28] Manning D.A.C., Cement and plasters industrial minerals, Chapman & Hall, Londra 1995.
- [29] Mukesh C Limbachiya, John J Roberts ( a cura di), Costruction Demolition Waste, Thomas Telford, Londra 2004.
- [30] P.Pozzi, C. Galassi – La reologia dei materiali ceramici tradizionali ( 1994)
- [31] Paola Ficco ( a cura di ), Il codice dei rifiuti, Edizioni Ambiente, Milano 2004.
- [32] Raffaella Chierici, Basilicata, una tra le prime, Edizioni PEI, Recycling n° 6 novembre 2004.
- [33] Robert E. Carter, Procedure in sedimentary petrology, Wiley-Interscience, New York.

- [34] Stefano Bonatti, Marco Franzini, *Cristallografia Mineralogica*, Bollati Boringhieri, Torino 1984.
- [35] UNI EN 206-1 Calcestruzzo Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- [36] V. Rossetti – Laterizi: caratterizzazione petrografico-mineralogica e miglioramento degli aspetti tecnologici degli impasti (2003)
- [37] V. Alunno Rossetti – *Il calcestruzzo* (1999)
- [38] V. Alunno Rossetti, “*Il calcestruzzo: materiali e tecnologia*”, McGraw Hill libri Italia, Milano (1995)
- [39] Wentworth C.K., A scale of grade and class terms for clastic sediment, *Journal of Geology* 30, 1922.

*Ringraziamenti:*

*La realizzazione di questo lavoro non può concludersi senza ringraziare tutti coloro che vi hanno contribuito.*

*Desidero da subito esprimere un particolare ringraziamento a Elena Marrocchino, per la collaborazione ed il supporto datomi in questi tre anni di lavoro.*

*Ringrazio la professoressa Vaccaro Carmela per l'occasione che mi ha dato.*

*Ringrazio i tecnici del mio dipartimento Verde Massimo e Tassinari Renzo, per la disponibilità ad eseguire le mie analisi.*

*Ringrazio tutti coloro che mi hanno aiutata presso il CNR-IRTEC di Faenza, durante le sperimentazioni e l'interpretazione dei risultati.*

*Ringrazio Italcementi s.p.a. e l'aiuto datomi dall'Ing. Borsa Massimo, l'Ing. Cangiano Stefano ed il Geom. Fogaccia Cesarino.*

*Un ringraziamento speciale ai ragazzi del laboratorio calcestruzzi del CTG - Italcementi, in particolar modo il signor Franco per avermi aiutata e supportata con la sua esperienza.*

*Ringrazio la mia famiglia ed il mio ragazzo per il supporto datomi e la tanta pazienza che hanno avuto.*

*Ringrazio tutti coloro che hanno creduto in me.*

*Alice Toffano*