

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea in
Valorizzazione delle risorse primarie e secondarie - LS

**Aspetti energetici nella macinazione di
un impasto ceramico: determinazione
sperimentale dell'indice di Bond**

Candidato:

Daniela Benini

Relatore:

Prof. Ing. Alessandra Bonoli

Correlatore:

Prof. Ing. Guido Nasseti

Sessione I

Anno Accademico 2008-2009

Indice

Introduzione	i
1 Il processo di comminuzione	1
1.1 Definizioni generali	1
1.2 La frantumazione	6
1.2.1 Macchine per la frantumazione: i frantoi	7
1.3 La macinazione	15
1.3.1 Macchine per la macinazione: i mulini	16
2 Energia nella comminuzione	21
2.1 Principi generali	21
2.2 Leggi energetiche	22
2.2.1 Leggi energetiche precedenti a quella di Bond	22
2.2.2 Legge energetica di Bond	24
2.2.3 Indice di macinabilità di Bond	25
2.2.4 Leggi energetiche successive a quella di Bond	28
3 Materiali e impasti analizzati	31
3.1 Materiali	31
3.2 Mix	33
3.2.1 Il grès porcellanato	35
3.3 Mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica	36
3.4 Caratterizzazione di alcuni materiali: microdurezza Knoop	38
3.4.1 Preparazione dei campioni	39

3.4.2	Il microdurimento e la prova di microdurezza	41
3.4.3	Risultati ottenuti	44
4	Prove sperimentali per la determinazione dell'indice di Bond	49
4.1	Prova standard di Bond	50
4.1.1	Operazioni preliminari	50
4.1.2	Macinazione	50
4.2	Prova rapida di Magdalinovic	56
4.2.1	Cenni teorici sulla prova rapida	56
4.2.2	Operazioni preliminari	59
4.2.3	Macinazione	59
4.3	Strumentazione utilizzata	62
4.3.1	Mulino a sfere	62
4.3.2	Setacciatrice automatica	65
4.3.3	Granulometro laser	66
4.3.4	Bilancia di precisione	66
5	Risultati sperimentali ottenuti	69
5.1	Indici di Bond ottenuti con la procedura standard	70
5.1.1	Feldspato potassico	70
5.1.2	Feldspato sodico	73
5.1.3	Sabbia felspatica	77
5.1.4	Argilla bentonitica	80
5.1.5	Argilla illitico caolinitica	83
5.1.6	Mix	86
5.1.7	Mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica	89
5.2	Indici di Bond ottenuti con la procedura rapida e calcolo degli errori	93
5.3	Prova di perdita al fuoco	95
	Conclusioni	99
	Bibliografia	103

Introduzione

Nel settore della lavorazione dei materiali l'operazione di comminazione è quella che tra tutte richiede il maggior consumo di energia. A livello pratico risulta importante riuscire ad associare ad un certo processo di riduzione dimensionale il rispettivo dispendio energetico per realizzarlo. In questo elaborato si vuole focalizzare l'attenzione sull'energia coinvolta in particolare nella fase di macinazione: mediante una specifica procedura, la *prova standard di macinabilità*, si è determinato l'*indice di Bond* di una serie di materiali impiegati nell'industria ceramica. Quest'ultimo parametro, come si vedrà in seguito, gioca un ruolo fondamentale all'interno della legge energetica sviluppata da Fred.C.Bond nel 1951.

Il lavoro che verrà illustrato è nato in collaborazione con il Centro Ceramico di Bologna che ha dato un importante contributo sia nella pianificazione degli obiettivi da raggiungere che nell'elaborazione dei risultati ottenuti, nonchè in una prova finale di perdita al fuoco.

Le prove sperimentali sono state realizzate presso il laboratorio di Georisorse e Geotecnologie del dipartimento DICMA dell'Università di Bologna che ha messo a disposizione tutta la strumentazione necessaria.

Lo scopo dell'analisi svolta è riassumibile nei seguenti punti:

- applicare la prova standard di macinabilità di Bond ad una serie di materiali per poterne determinarne il rispettivo indice di lavoro;
- confrontare i risultati ottenuti con la prova standard con quelli ricavati mediante un'altra metodologia chiamata *procedura rapida di Magdalinovic*;
- analizzare nel dettaglio il processo di macinazione di un impasto di materiali cercando di valutare come le differenti caratteristiche di ciascuna

componente possano incidere sulla quantità totale di energia necessaria per la macinazione.

I primi due capitoli del presente elaborato sono dedicati al processo di comminazione. Dopo aver introdotto alcune importanti definizioni, viene riportata una trattazione sulle principali macchine utilizzate per ottenere la riduzione dimensionale di un materiale. Nel seguito si pone l'attenzione agli aspetti energetici legati al processo di comminazione, facendo riferimento alle leggi empiriche che sono state messe a punto nel corso degli anni da vari studiosi.

Nella seconda metà dell'elaborato viene illustrata la parte sperimentale del lavoro: nel terzo capitolo si descrivono i materiali e gli impasti analizzati; nel quarto verranno trattate le due metodologie per la determinazione sperimentale dell'indice di Bond (prova standard e procedura rapida); il quinto capitolo è dedicato all'esposizione di tutti i risultati ottenuti e all'analisi dati ad essi collegata.

Capitolo 1

Il processo di comminuzione

Questo capitolo ha l'obiettivo di introdurre alcuni concetti fondamentali legati al campo della preparazione dei materiali rocciosi. L'estrazione di un minerale, da una cava o da una miniera, richiede una serie di operazioni successive che permettano al materiale considerato di diventare prodotto finito o comunque materia prima impiegabile all'interno di particolari processi industriali.

In questa sede ci si limiterà solamente a considerare l'aspetto legato alla riduzione dimensionale del materiale, l'importanza di tale operazione è dovuta al fatto che l'energia necessaria per realizzarla corrisponde molto spesso alla voce più onerosa all'interno del bilancio energetico totale richiesto per la lavorazione di un materiale. Come si vedrà più avanti il termine comminuzione è riferito sia alla riduzione dimensionale delle frazioni grossolane di un materiale che alle sue parti più fini, questo secondo campo di applicazione è quello su cui si concentrerà principalmente questo lavoro di tesi, al centro dell'attenzione sono poste infatti la macinazione e l'energia da essa richiesta.

1.1 Definizioni generali

Si definisce *comminuzione* o *frammentazione* [1] l'insieme delle operazioni aventi lo scopo di ridurre dimensionalmente un materiale e di suddividerlo in più corpi solidi distinti attraverso l'applicazione di energia meccanica. A seconda delle dimensioni finali del materiale considerato la comminuzione può essere

suddivisa in due determinati processi: la *frantumazione* e la *macinazione*, la prima permette di ottenere materiali con particelle di dimensioni fino al millimetro, la seconda si applica alle granulometrie più fini che vengono così ridotte fino a dimensioni dell'ordine del micrometro.

La necessità di svolgere operazioni di questo tipo può derivare dalle seguenti motivazioni:

- esigenze di mercato: la vendita può risultare infatti possibile solo realizzando materiali caratterizzati da particolari dimensioni e classificati secondo criteri richiesti a livello commerciale;
- esigenze funzionali: lo scopo della riduzione dimensionale può essere quello di favorire la manipolazione, il trasporto o lo stoccaggio del materiale;
- necessità di estrarre un particolare componente: un agglomerato roccioso può essere formato da più componenti, la separazione delle varie specie mineralogiche può essere realizzata a partire dalla scomposizione di un ammasso di roccia in parti di dimensioni minori;
- necessità di aumentare la superficie specifica di un materiale: questo si vuole quando ad esempio si devono favorire alcuni processi di trattamento del materiale come, ad esempio, l'avvenimento di una particolare reazione chimica.

Le forze che determinano la rottura del materiale, portando così una sua riduzione dimensionale, possono agire singolarmente o in maniera combinata. In particolare, in un processo di comminuzione industriale, si possono avere: compressione, taglio, flessione ed urto. Una roccia sottoposta a sollecitazioni meccaniche subisce in un primo tempo un certo numero di deformazioni elastiche, plastiche o elastoplastiche, la rottura del materiale avviene nel momento in cui la deformazione raggiunta supera un certo valore limite.

Definiamo *diametro equivalente* di una particella di materiale il diametro di una particella di forma sferica avente lo stesso volume della particella reale considerata. Nelle formule dei passaggi seguenti ogniqualvolta comparirà il diametro di

un frammento di materiale ci riferirà implicitamente al concetto appena esposto. Un parametro importante in sede di riduzione dimensionale di un materiale è il cosiddetto *rapporto di riduzione*[2], generalmente viene indicato con n ed è definito come il rapporto tra la dimensione D del materiale in ingresso al processo di comminuzione e la dimensione d del prodotto finale ottenuto. La formula per esprimere n è la seguente:

$$n = \frac{D}{d} \quad (1.1)$$

Nel caso in cui il materiale considerato sia composto da differenti granulometrie l'equazione 1.1 viene così modificata:

$$n = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (1.2)$$

dove i parametri D_{80} e d_{80} corrispondono all'ipotetica dimensione della maglia di un setaccio attraverso cui riescono a passare rispettivamente l'80% del materiale in ingresso al processo e l'80% del materiale ottenuto dopo la comminuzione. Il rapporto di riduzione è il principale parametro di riferimento nella scelta di una macchina che realizza riduzioni dimensionali, ogni macchinario ha il suo caratteristico valore di n ed è su questo che è stato progettato. Come si vedrà più avanti i rapporti di riduzione corrispondenti alla frantumazione risultano essere decisamente inferiori a quelli relativi alla macinazione, inoltre tanto maggiore è n tanto più alto sarà il quantitativo energetico richiesto dalla macchina per compiere la comminuzione.

Con *analisi granulometrica* di un materiale si intende l'operazione che permette di valutare le dimensioni di un insieme di elementi solidi e di rappresentarle in forma grafica: le percentuali dei frammenti delle varie dimensioni si distribuiscono infatti secondo curve ben distinte chiamate *curve granulometriche*. Per effettuare tale analisi è necessario preparare una pila di setacci, in genere sette o otto, con dimensione delle maglie decrescente e posti in successione prestabilita dalle norme tecniche UNI. Il materiale viene poi posto sul primo setaccio e quindi la pila, chiusa da un coperchio, viene inserita in una setacciatrice. Questa, azionata per una ventina di minuti, imprime una vibrazione orizzontale e verticale in modo da

favorire il passaggio del materiale attraverso le maglie. Terminata la setacciatura viene pesato il materiale trattenuto su ogni maglia e ne viene calcolato il rapporto percentuale rispetto al peso totale iniziale (frequenza):

$$f_i = \frac{p_i}{P_{tot}} 100 \quad (1.3)$$

dove p_i rappresenta il peso trattenuto da ciascuna maglia del setaccio e P_{tot} il peso totale del materiale su cui è stata effettuata l'analisi granulometrica. Le frequenze riportate in un grafico si dispongono secondo una curva a gradini che può essere interpolata dando luogo a una curva a campana più o meno regolare.

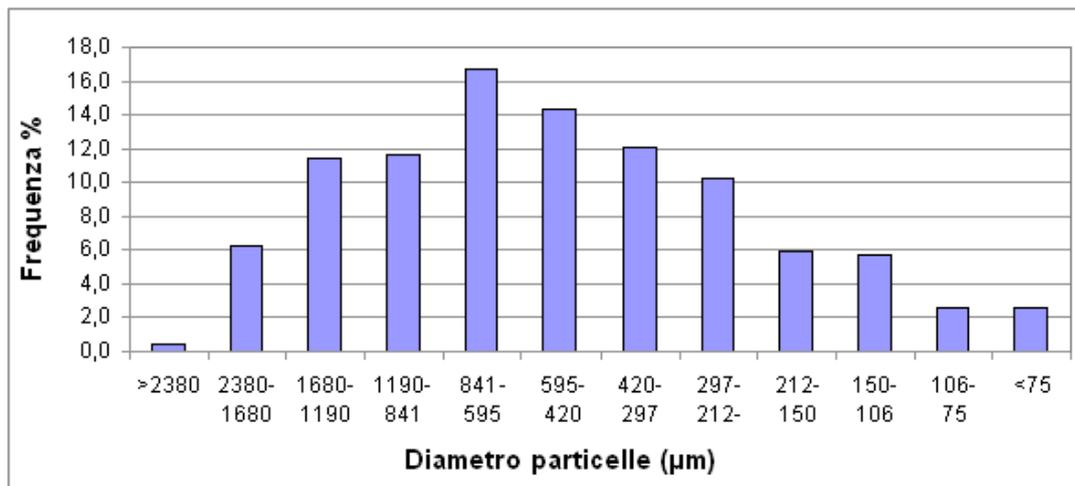


Figura 1.1: Grafico delle frequenze di un'analisi granulometrica.

Si definisce *curva granulometrica cumulativa del passato* il diagramma semilogaritmico che si ottiene setacciando una certa quantità di materia prima e riportando il peso cumulativo percentuale del materiale passato, attraverso le maglie dei setacci, in funzione delle dimensioni delle particelle. Nella figura seguente è riportato un esempio di curva granulometrica del passato:

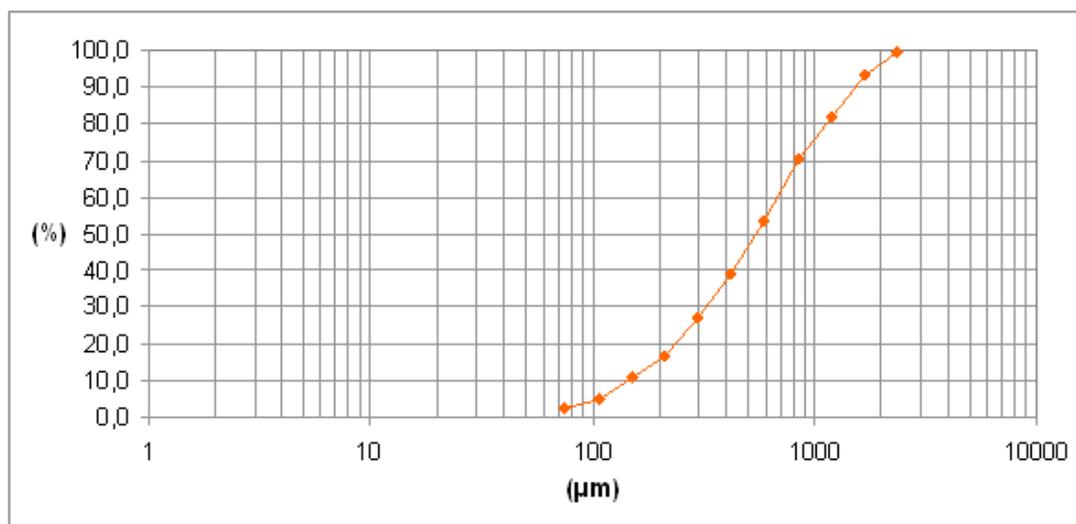


Figura 1.2: Curva cumulativa del passato.

Analogamente, sostituendo ai precedenti valori in ordinata i pesi cumulativi percentuali del materiale trattenuto dalle varie maglie della pila di setacci, può essere tracciata la *curva granulometrica cumulativa del rifiuto*.

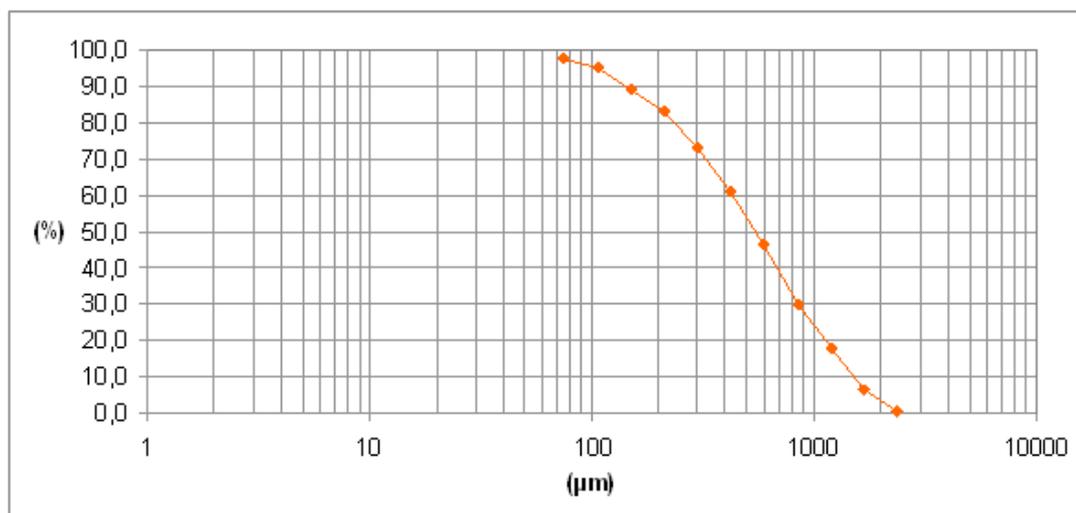


Figura 1.3: Curva cumulativa del rifiuto.

Come si può osservare dalle figure 1.2 e 1.3 le due curve granulometriche risultano essere complementari, presi infatti due punti in ciascun grafico, entrambi relativi ad una particolare dimensione delle particelle, e andando a sommare le

corrispondenti percentuali del passato e del rifiuto si ottiene come risultato 100%. Si ha inoltre che tanto più una curva risulta essere schiacciata tanto più è da considerarsi vario lo spettro delle dimensioni dei frammenti del materiale, una curva quasi verticale indicherà invece che particelle considerate si distribuiscono principalmente attorno ad un unico valore di diametro. L'utilità di questi ultimi due grafici è che permettono di individuare molto rapidamente, all'interno del materiale campione, quali sono le quantità percentuali di materiale che risultano essere maggiori o minori di una certa dimensione delle particelle.

1.2 La frantumazione

La frantumazione è un'operazione meccanica che permette di ridurre le dimensioni di un materiale di grandi dimensioni in frammenti più piccoli. Può essere applicata sia a blocchi unici di materiale sia a solidi già ridotti in frammenti e dei quali si vuole ulteriormente ridurre il volume. Come già detto tale processo è riferito soltanto ad una gamma limitata di riduzioni dimensionali cioè quelle che portano ad ottenere frammenti fino al millimetro di diametro.

Analizzando il processo nel dettaglio lo si può suddividere nelle seguenti operazioni [3]:

- *frantumazione primaria o pre-frantumazione*: si realizza con macchine chiamate *frantoi primari* che effettuano una riduzione dimensionale su blocchi naturali di materiale portando così ad ottenere un prodotto di dimensione uguale o superiore a 100 mm;
- *frantumazione*: si basa sull'utilizzo di macchinari chiamati *frantoi* che danno in uscita un materiale delle dimensioni del pietrisco, comprese cioè tra 25 e 100 mm;
- *granulazione*: è l'operazione che si effettua con macchine chiamate *granulatori* le quali realizzano un prodotto delle dimensioni del pietrischetto, il diametro di questo varia infatti tra i 6 e i 25 mm.

A differenza di quanto si vedrà più avanti per la macinazione la frantumazione è un processo che viene fatto avvenire a secco.

1.2.1 Macchine per la frantumazione: i frantoi

I *frantoi* sono macchine che compiono l'operazione di frantumazione. Gli impianti che prevedono la realizzazione di tale riduzione dimensionale sono generalmente composti da una serie più o meno numerosa di frantoi che consentono di partire da blocchi di roccia molto grandi fino ad arrivare a granulometrie finali anche molto piccole.

E' possibile fare riferimento alla seguente classificazione:

- *frantoi a compressione*: fanno parte di questa categoria i frantoi a mascelle, i frantoi rotativi e i frantoi a cilindri;
- *frantoi a urto*: comprendono principalmente i frantoi a martelli.

La scelta del tipo di macchina da utilizzare dipende in buona parte anche dalle caratteristiche dell'alimentazione in ingresso al processo, in particolare occorre tenere conto che materiali duri richiedono l'uso di frantoi a compressione, materiali poco abrasivi possono essere trattati con frantoi a urto, materiali agglomeranti necessitano di frantoi a cilindri o di frantoi a urto.

Si riporta di seguito una breve trattazione relativa alle tipologie di macchine sopra riportate facendo particolare riferimento al principio di funzionamento che le caratterizza.

Frantoi a mascelle

I *frantoi a mascelle* sono macchine che operano per compressione lenta, applicano sforzi di compressione sul materiale in modo da superare il suo limite elastico e generarne così la rottura.

Sono composti principalmente da due superfici rettangolari, dette *mascelle*, tra le quali viene interposto il materiale da frantumare. Una di queste, detta *mascella*

fissa, è collegata al telaio del frantoio, l'altra, detta mobile, si muove grazie ad un albero di comando che le imprime un movimento oscillatorio attorno ad un asse orizzontale. L'avvicinamento delle due superfici permette di far avvenire la rottura del materiale, lo spazio in cui questo si trova è detto *camera di frantumazione*. Il ritorno della mascella mobile alla posizione di partenza consente ai frammenti ottenuti di scivolare verso la parte inferiore della macchina dove subiranno, con un nuovo ritorno della mascella mobile, un'ulteriore compressione. I prodotti della frantumazione escono da un'apertura presente nella parte inferiore del frantoio, la fuoriuscita del materiale è permessa solo quando le dimensioni raggiunte sono tali da garantirne il passaggio attraverso il foro d'uscita. Come si può osservare nella figura 1.4 la camera di frantumazione ha una forma particolare data dall'inclinazione della mascella mobile rispetto a quella fissa, l'angolo α formato dalle due superfici è detto *angolo di presa*.

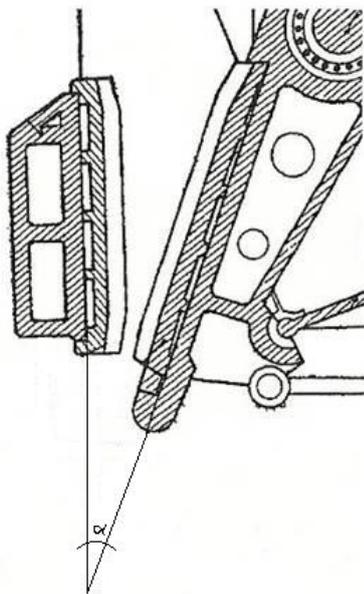


Figura 1.4: L'angolo di presa formato dalle mascelle del frantoio a compressione.

L'angolo α è un parametro molto importante, per riuscire ad avere una certa stabilità del materiale tra le due mascelle, e realizzare così una buona frantumazione.

zione, deve verificarsi la condizione seguente:

$$\alpha \leq 2\varphi \quad (1.4)$$

dove φ è l'angolo di attrito. Se la 1.4 non è soddisfatta il materiale sotto carico tende a scivolare verso l'alto. Valori tipici di α sono $\alpha = 22 \div 33^\circ$.

Esistono diversi tipi di frantoi a mascelle, in particolare distinguiamo quelli a *doppio effetto* e quelli a *semplice effetto*. Una macchina del primo tipo, detta anche *frantoio di Blake*, prevede che la mascella mobile si apra e si chiuda due volte per un movimento dell'albero di comando pari a 360° , nel secondo caso invece il punto fisso della mascella mobile è imperniato direttamente all'albero e una rotazione completa di questo fa compiere alla superficie che si muove una sola corsa avanti e indietro.

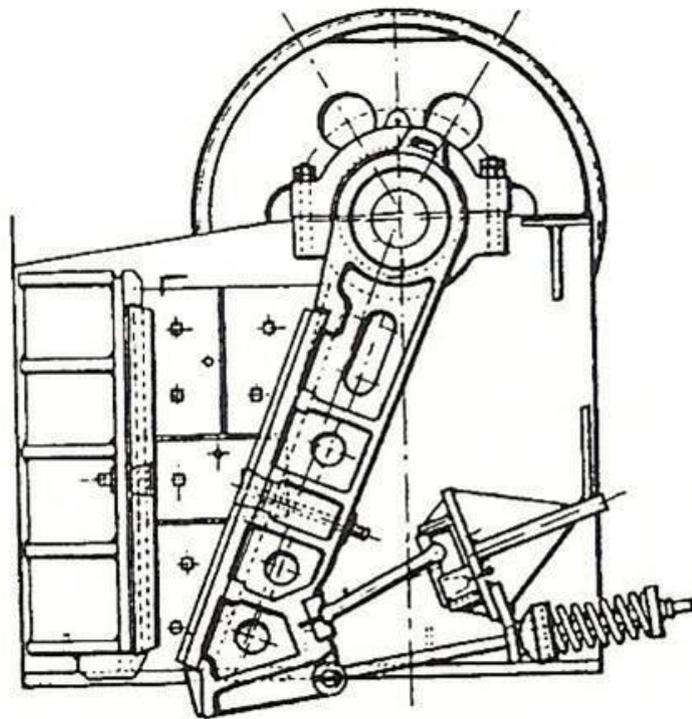


Figura 1.5: Schema di un frantoio a semplice effetto.

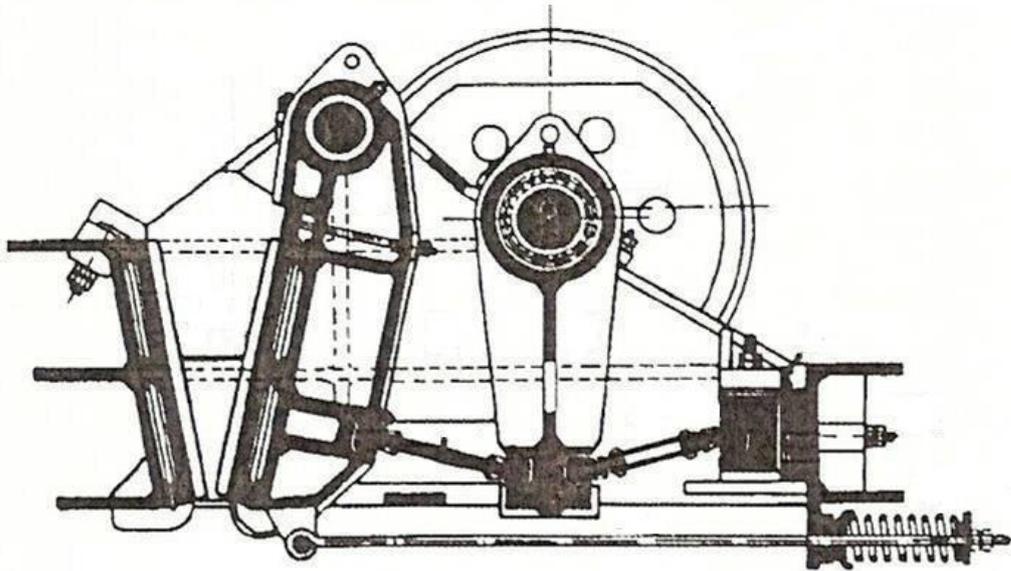


Figura 1.6: Schema di un frantoio a doppio effetto.

I vantaggi offerti dai frantoi a semplice effetto, rispetto a quelli a doppio effetto, consistono nel fatto di possedere una maggiore semplicità costruttiva e quindi minore peso e minor costo, danno inoltre il vantaggio di essere dotati di un rapporto di riduzione $n = 10$, contro $n = 4 \div 6$ dei frantoi a doppio effetto, permettendo così di ottenere prodotti più fini. Gli svantaggi che presentano, rispetto al frantoio Blake, sono dovuti alla componente di moto nel piano della mascella mobile che provoca lo slittamento di questa sulla roccia, o della roccia rispetto alla mascella fissa. Ciò comporta una maggiore usura delle mascelle impedendone l'utilizzo quando si ha a che fare con materiali molto duri e abrasivi. Un secondo svantaggio è costituito dall'ampiezza di movimento alla bocca, questa provoca urti e sforzi notevoli sulla mascella mobile, che si trasmettono direttamente all'albero. Presentano inoltre anche il limite di non poter essere impiegati nella frantumazione di grossi blocchi.

Frantoi rotativi

I *frantoi rotativi* sono macchine in cui il materiale da frantumare, rotto per schiacciamento, viene posto tra una parete fissa di forma conica o cilindro-conica

ad asse verticale e un corpo conico, dotato di un movimento eccentrico, posto all'interno dello spazio delimitato dalle pareti. Il cono mobile compie un movimento tale da essere prima avvicinato e poi allontanato dalla parete concava fissa, una volta che il materiale viene frantumato scende per gravità in una zona inferiore del frantoio dove viene così sottoposto ad una nuova compressione. Il funzionamento di questo tipo di frantoio rispecchia esattamente quello del frantoio a mascelle, la differenza tra i due è che in questo caso si ottengono una serie ininterrotta di azioni alternate di pressione ed allontanamento. Ciò si traduce nel fatto che il frantoio rotativo lavora in continuazione in metà del suo volume mentre il frantoio a mascelle lavora la metà del tempo nella totalità del suo volume. Nella figura seguente è possibile lo schema di una parte del frantoio rotativo.

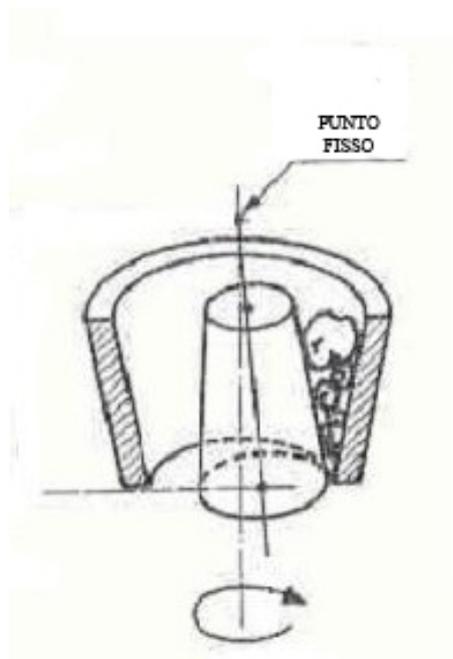


Figura 1.7: Schema di un particolare di un frantoio rotativo.

Frantoi a cilindri

I *frantoi a cilindri* presentano una camera di frantumazione che si forma nello spazio compreso tra due *cilindri*, questi ruotano l'uno verso l'altro attorno ai loro assi orizzontali, la distanza tra questi due corpi ruotanti determina le dimensioni

del materiale frantumato. I cilindri lisci frantumano il materiale esercitando su di esso uno sforzo di compressione lenta che ne provoca la rottura.

L'angolo θ viene definito angolo di presa, il valore assunto da tale parametro è molto importante perché da esso dipende il buon esito dell'operazione di frantumazione. L'angolo α formato dalla linea orizzontale con il raggio corrispondente al punto di contatto del materiale con il cilindro dovrà essere:

$$\theta = 2\alpha \leq 2\varphi \quad (1.5)$$

Anche in questo caso la condizione $\theta \leq 2\varphi$ è chiamata condizione di presa ed è necessaria affinché si verifichi la frantumazione; essa si impone maggiormente se i cilindri lavorano ad una velocità tangenziale relativamente elevata.

I cilindri che costituiscono questa tipologia di macchine sono di solito realizzati in acciaio. Oltre alle più comuni forme di frantoi a rulli lisci esistono, ad esempio, frantoi a rulli dentati dove diverse possono essere le forme di dentatura: sporgenze alternate, lame di coltelli, punte più o meno aguzze, piramidi tronche, denti di squalo, ondulazioni, scanalature diritte o incrociate. L'impiego di forme di dentature molto elaborate ha come fine la ricerca di una frantumazione perfettamente regolare, con produzione di un minimo di materiale molto fine.

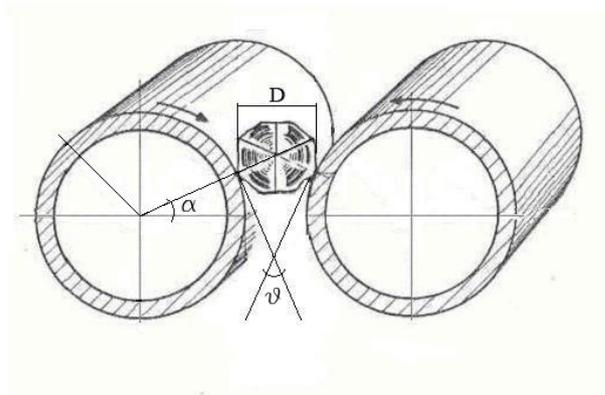


Figura 1.8: Schema di un particolare di un frantoio a cilindri.

I frantoi a cilindri presentano un basso consumo energetico, una facile installazione e uno scarso ingombro. Richiedono, per contro, una sorveglianza continua,

un'alimentazione regolare e un'accurata manutenzione dovuta all'usura irregolare dei cilindri. Sono infine caratterizzati da un basso rapporto di riduzione $n = 2 \div 3$.

Frantoi a martelli

I *frantoi a martelli* realizzano la frantumazione del materiale grazie ad un effetto di shock prodotto dalla rapida applicazione di energia d'urto, le forze necessarie per la rottura del materiale si ottengono accumulando l'energia in volani ruotanti ad elevata velocità e dotati di protuberanze che urtano violentemente contro il materiale roccioso. La frantumazione si ha quindi sia per effetto dell'azione dinamica esercitata sulla roccia dalle sporgenze, dette *martelli*, sia di quella statica dovuta alla corazzatura su cui il materiale viene proiettato. I martelli possono essere montati secondo diverse configurazioni e avere quindi una disposizione a 90° , 180° o 270° tra loro. La velocità periferica del rotore varia generalmente tra 15 e 50 m/s . La camera di frantumazione è aperta dall'alto per consentire l'ingresso del materiale.

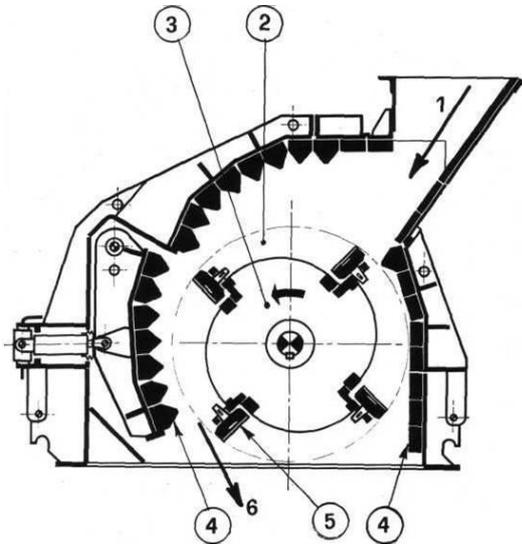


Figura 1.9: Schema di un frantoio a martelli.

La figura 1.9 riporta lo schema di un frantoio a martelli, in particolare è possibile osservare i suoi componenti: 1. Alimentazione, 2. Camera di frantumazione, 3. Rotore, 4. Piastre di rivestimento, 5. Martelli, 6. Scarico del materiale frantumato.

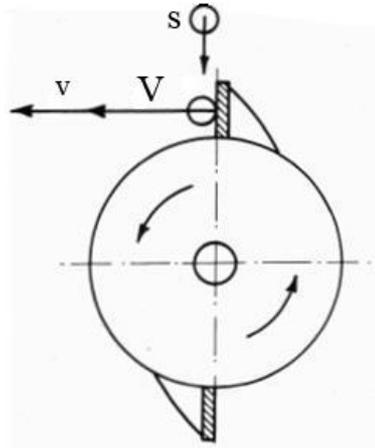


Figura 1.10: Particolare di un frantoio a martelli.

In figura 1.10 viene indicata con V la componente tangenziale della velocità dei martelli, v rappresenta invece la velocità della particella s di materiale dopo l'urto. I frantoi a martelli vengono normalmente impiegate negli stadi avanzati del processo di frantumazione dove arriva quindi un materiale già ridotto nelle dimensioni. I frantoi ad urto sono caratterizzati da un elevato rapporto di riduzione compreso tra 15 e 30. Inoltre si ha che l'applicazione di una forza d'urto genera una risposta più fragile del materiale rispetto al caso di un'azione di compressione. Questi frantoi, per contro, richiedono una maggiore potenza motrice, nel caso poi di materiali agglomeranti quali rocce umide ad elevato contenuto argilloso si ha che l'effetto di riduzione viene ad essere notevolmente attenuato. In passato la maggiore limitazione di queste macchine era determinata dall'abrasività del materiale da lavorare: se questa risultava essere troppo elevata non risultava conveniente l'uso di tali frantoi per via degli eccessivi costi determinati dalle troppo rapide e diffuse usure. L'attuale impiego di nuovi materiali nella preparazione dei martelli e delle piastre di rivestimento sembra consentire un ottimale funzionamento per lavorazione di materiali anche più abrasivi.

1.3 La macinazione

La macinazione è un'operazione meccanica che permette di ridurre le dimensioni dei frammenti di un materiale così da ottenere un livello di finezza elevato, si arriva infatti all'ordine dei micrometri. Come visto già visto per la frantumazione anche la macinazione può essere suddivisa in più sottoprocessi:

- *macinazione primaria*: è l'operazione che permette di ridurre frammenti di materiale di qualche centimetro di diametro in sabbie, si ottiene quindi un prodotto di dimensioni comprese tra gli 0,5 e i 6 mm;
- *macinazione secondaria o fine*: si ottengono polveri fino all'ordine del centinaio di micrometri;
- *micronizzazione o polverizzazione*: il prodotto in uscita è molto fine e ha quindi dimensioni pari o inferiori al micrometro.

Oltre a questa suddivisione si possono distinguere anche le seguenti modalità di macinazione:

- *macinazione a secco*: viene realizzata quando in un processo industriale i passaggi successivi alla macinazione devono essere realizzati a secco o quando i corpi macinanti impiegati nei macchinari non possono essere bagnati;
- *macinazione ad umido*: si realizza quando in un processo il materiale viene lavorato ad umido, in questo caso anche la macinazione viene fatta avvenire in queste condizioni. Tale operazione prevede che si realizzi un impasto bagnato detto torbida con una consistenza sufficientemente elevata da riuscire ad aderire ai corpi macinanti ma allo stesso tempo una fluidità tale da permettere una corretta circolazione dell'impasto all'interno della macchina. La diluizione ottimale varia con la composizione granulometrica, sarà tanto maggiore quanto più fine risulta essere il materiale.

1.3.1 Macchine per la macinazione: i mulini

I *mulini* sono macchine di forma generalmente cilindrica ad asse orizzontale che ruotano a velocità elevata e al cui interno vengono posti dei corpi macinanti. Le dimensioni del materiale in ingresso al processo vengono ridotte per effetto di più azioni che ad esempio possono essere compressione, urto, taglio e abrasione. I corpi macinanti differiscono tra loro per le dimensioni e per la tipologia dei materiali che li costituiscono, solitamente risultano essere tanto più piccoli quanto minori sono le dimensioni del materiale da trattare. I principali mezzi macinanti utilizzati sono due: sfere e barre.

Si riporta di seguito un breve riassunto dei parametri caratteristici di tali macchine e di alcuni fattori importanti da tenere in conto:

- *Grado di riempimento*: viene indicato con Δ ed è chiamato anche *volume della carica*, il valore di tale parametro viene espresso come percentuale del volume interno del mulino. La formula per il calcolo di tale parametro è la seguente:

$$\Delta = \frac{V_{carica}}{V_{totale}} 100 \quad (1.6)$$

dove V_{carica} è il volume occupato dai corpi macinanti e dal materiale da macinare e V_{totale} è il volume della giara del mulino

- *Velocità critica*: è definita come la velocità di rotazione del mulino in corrispondenza della quale si ha centrifugazione del materiale posto al suo interno. Può essere calcolata nel seguente modo:

$$w_c = \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (1.7)$$

dove D è il diametro interno del mulino e g è l'accelerazione di gravità, a seconda delle dimensioni del mulino è necessario trovare un compromesso tra velocità critica e velocità periferica. Il parametro velocità di rotazione del mulino viene quindi espresso come percentuale della velocità critica;

- *Consumo dei corpi macinanti*: nella macinazione a umido le cause di questo fenomeno sono dovute principalmente all'abrasione che il mezzo macinante subisce entrando in contatto con il materiale coinvolto o con gli altri corpi macinanti e alla corrosione della superficie esposta alla macinazione. Nel caso di macinazione a secco la seconda causa viene meno e rimane solamente la prima;
- *Potenza di macinazione*: corrisponde alla potenza che deve essere applicata alla trasmissione del mulino per poter macinare una determinata quantità di materiale e per portarlo da una certa dimensione di partenza ad una finale di granulometria più fine. Nota l'energia richiesta per macinare la potenza può essere ricavata semplicemente nel seguente modo:

$$P = W Q \quad (1.8)$$

dove con P viene appunto indicata la potenza, con W l'energia impiegata per macinare il materiale e con Q la portata di alimentazione del processo. Esiste una relazione che permette di associare la potenza di macinazione P , espressa in kW , alle caratteristiche geometriche del mulino utilizzato:

$$P = K D^{2.5} L \Delta u \rho_c \quad (1.9)$$

dove i parametri coinvolti sono:

- D : diametro del mulino (m);
- L : lunghezza del mulino (m);
- u : fattore dipendente dalla velocità di rotazione del mulino (% della velocità critica);
- Δ : grado di riempimento del mulino (%);
- ρ_c : peso specifico della carica macinante (g/cm^3);
- K : costante dipendente dalla configurazione del mulino.

L'applicazione della 1.9 può essere utilizzata per dimensionare il mulino, il parametro P deve però essere già stato determinato a partire dall'energia W necessaria;

- *Rapporto di riduzione*: alcuni mulini permettono di lavorare ad elevati rapporti di riduzione, per quanto riguarda le tipologie di macchine riportate in questa trattazione si ha $n = 15 \div 50$ per i mulini a barre e $n = 30 \div 200$ per i mulini a sfere.

Mulini a barre

Nei *mulini a barre* il materiale da frantumare entra in un cilindro, cavo e orizzontale, avente all'interno delle barre metalliche pesanti che, sollevate per effetto della rotazione, ricadono sul materiale stesso macinandolo. Attraverso la regolazione del peso dei corpi interni e della velocità di rotazione può essere modificato il grado di finezza del prodotto che si vuole ottenere.

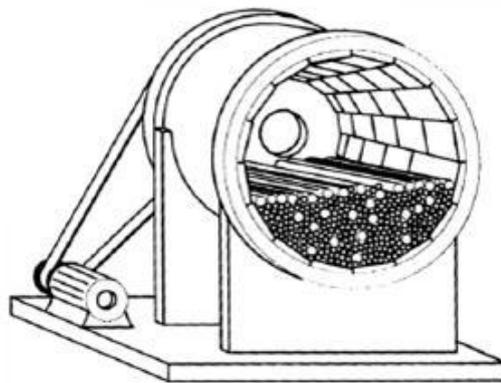


Figura 1.11: Esempio di mulino a barre.

La lavorazione può avvenire in ciclo aperto o in ciclo chiuso: nel primo caso il materiale entra nel tamburo ed esce senza controllo delle dimensioni raggiunte, nel secondo caso il sistema è dotato di un classificatore che rinvia al mulino le pezzature ancora troppo grandi rispetto a quanto desiderato.

Come già visto la macinazione può essere fatta avvenire anche ad umido, in questo

modo si possono avere i seguenti vantaggi: miglior controllo della produzione, eliminazione delle polveri e recupero della frazione fine di quanto si è macinato. Con i mulini a barre si ottengono sabbie di buona granulometria, molto adatte per i fusi richiesti per i calcestruzzi. Il prodotto è caratterizzato da una curva granulometrica abbastanza stretta e la percentuale di fini e finissimi è sempre limitata.

Mulini a sfere

I *mulini a sfere* sono macchine in cui vengono utilizzati corpi macinanti sferici che in seguito all'urto con il materiale da macinare ne provocano la rottura, le sfere possono riempire il mulino fino a quasi la metà e possono essere costruite in acciaio o in ghisa. L'alimentazione del processo deve essere tale da avere un D_{80} massimo pari a $10 \div 25 \text{ mm}$, una dimensione superiore richiederebbe infatti l'impiego di mulini di grande diametro e porterebbe ad ottenere una minore efficienza di macinazione. Sono normalmente impiegati nei circuiti di macinazione che richiedono prodotti di granulometrie comprese fra i 10 e i 500 μm circa, sono ad esempio impiegati nel campo dell'industria ceramica.

A differenza dei mulini a barre i mulini a sfere sono liberi dai vincoli dimensionali imposti dalla lunghezza delle barre, per questo possono presentare maggiori variazioni nel rapporto lunghezza/diametro, questo rapporto può variare da 1 : 1 a 2 : 1 ed anche oltre, non vi sono regole fisse per la scelta del valore del rapporto L/D in relazione al tipo di circuito, al tipo di minerale, alla dimensione massima dell'alimentazione e alle richieste complessive di macinazione.

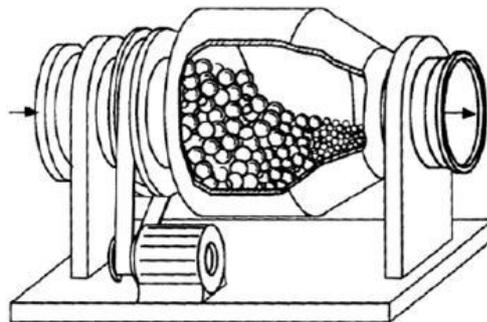


Figura 1.12: Esempio di mulino a sfere.

Mulini a martelli

I *mulini a martelli* sono molto simili ai frantoi ad urto perchè sono formati da un rotore che ha la funzione di proiettare il materiale da macinare contro le pareti della macchina, in questo modo ne viene provocata la disgregazione. Differiscono tuttavia da questi ultimi per diversi motivi: presentano una camera di frantumazione chiusa inferiormente da griglie la cui apertura delle maglie determina la pezzatura del materiale in uscita, i martelli del rotore non sono fissi ma liberi di oscillare attorno ad un perno di fissaggio, le piastre a copertura della carcassa sono fisse e provviste di denti. In questa macchina tutto ciò che non ha subito una riduzione tale da passare la griglia inferiore viene ripescato dai martelli e riposto in movimento. Questa tipologia di mulini si presta bene a molti campi di applicazioni industriali.

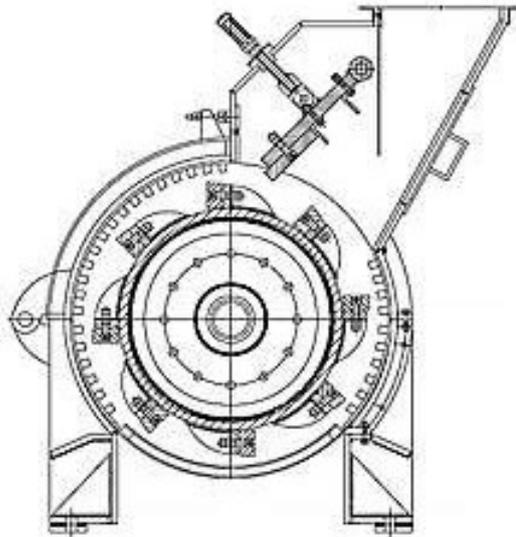


Figura 1.13: Esempio di mulino a martelli.

Capitolo 2

Energia nella comminuzione

In questo capitolo si tratterà di comminuzione dal punto di vista energetico, in particolare si farà riferimento al calcolo dell'energia richiesta da tale processo. Verranno esposte le principali teorie che si sono susseguite nel corso degli anni sottolineando in particolare quella proposta da *Fred C. Bond* nel 1951, è su quest'ultima infatti che si basano le prove sperimentali oggetto di studio in questo lavoro di tesi.

2.1 Principi generali

L'importanza di valutazioni sul consumo energetico, all'interno di impianti che prevedono la riduzione dimensionale di un materiale, nasce dal fatto che operazioni di questo tipo sono caratterizzate da un'elevata richiesta di energia. Su scala industriale risulta necessario tenere conto di questo fattore visto che questo rappresenterà una voce di costo elevata nel bilancio economico finale.

Nel campo dei materiali grossolani, in cui si hanno granulometrie dimensionalmente superiori ad 1 *mm*, esiste una relazione lineare tra il rapporto di riduzione n e l'energia richiesta per la comminuzione. Un legame di tipo esponenziale, crescente con l'aumentare di n , si ha invece nel campo dei materia fini cioè quelli in cui si hanno particelle di dimensioni inferiori ad 1 *mm*. Ciò che nella comminuzione gioca un ruolo molto importante è in definitiva la relazione esistente tra l'energia fornita per il processo e la riduzione dimensionale realizzata.

Un'espressione molto generale, relativa alla richiesta energetica, può essere del tipo:

$$dE \cong \frac{dx}{x^m} \quad (2.1)$$

si evidenzia quindi come la variazione dx della dimensione delle particelle sia direttamente proporzionale all'energia spesa e come l'energia dE richiesta per effettuare tale variazione sia inversamente proporzionale, secondo una certa funzione dipendente dal parametro m , alla dimensione iniziale x del materiale. L'esponente adimensionale m può assumere diversi valori: sarà pari a 1 in caso di materiale grossolano, sarà invece un numero maggiore di 1 nel caso di materiale più fine.

2.2 Leggi energetiche

Diversi studiosi si sono occupati di trovare delle leggi in grado di correlare l'energia fornita ad una macchina e l'entità della riduzione dimensionale che si vuole realizzare su un materiale. Nei sottoparagrafi successivi vengono riportate alcune teorie, nate da considerazioni di carattere prevalentemente empirico, a cui si può fare riferimento in molti casi pratici del campo industriale.

2.2.1 Leggi energetiche precedenti a quella di Bond

La prima legge energetica formulata nel passato è quella di *P. Von Rittinger* del 1867, questa si basa sul concetto teorico che l'energia necessaria per ridurre dimensionalmente un materiale sia direttamente legata all'aumento superficiale realizzato dalla comminuzione. L'ipotesi fondamentale alla base di tale teoria è che l'energia utile di frammentazione sia integralmente trasformata in energia superficiale, le particelle del materiale si rompono cioè senza deformarsi. Un'ulteriore ipotesi necessaria richiede che i materiali di partenza siano strutturalmente integri e che le superfici che si formano, in seguito alla rottura, siano quindi effettivamente nuove e non derivanti da eventuali fratture già presenti ancora prima di realizzare la comminuzione. In quest'ultimo caso infatti l'aumento di energia

superficiale realizzato è minore di quello che si realizzerebbe in un materiale perfettamente integro. Rittinger afferma che riducendo un blocco di materiale di dimensione iniziale D in N blocchi di dimensioni d la superficie specifica che si realizza risulta proporzionale ad $1/d$, dove per superficie specifica si intende l'area superficiale ottenuta per unità di volume di materiale. L'energia di riduzione cercata può essere espressa con la relazione seguente:

$$W = K \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (2.2)$$

dove K è un parametro dipendente dal tipo di materiale. Introducendo il rapporto di riduzione n l'equazione 2.2 può essere così riscritta:

$$W = K \left(\frac{1-n}{D} \right) \quad (2.3)$$

La legge di Rittinger si applica solitamente a materiali molto fini in cui l'aumento superficiale per unità di massa è molto elevato.

Una seconda teoria, proposta da *Kick* nel 1885, si basa sul presupposto che il lavoro necessario per produrre una modifica di configurazione in corpi di materiale uniforme e geometricamente simili è proporzionale al loro stesso volume secondo una certa costante K' dipendente dal materiale e dalla macchina utilizzata. Secondo questo modello l'energia teorica per la rottura è tutta energia di deformazione e il legame con il rapporto di riduzione è di tipo logaritmico:

$$W = K' \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad (2.4)$$

dove D è la dimensione di partenza dei blocchi del materiale e d è la dimensione ottenuta con la frammentazione. Per le ipotesi fatte da *Kick* l'energia teorica per rompere le particelle non coinvolge la superficie specifica, ma qualunque sia la dimensione di partenza del materiale si ha che l'energia per unità di massa, necessaria per la rottura, risulta essere sempre uguale. Ad esempio, considerando la riduzione dimensionale da D_1 a D_2 e quella da D_2 a D_3 , se D_1/D_2 è uguale a D_2/D_3 allora l'energia di riduzione è la stessa in entrambi i casi indipendentemente dalle dimensioni di partenza D_1 e D_2 del materiale. La legge di *Kick* viene in genere applicata ai materiali più grossolani, ad esempio ai rifiuti.

2.2.2 Legge energetica di Bond

La legge energetica di *Fred C. Bond*, risalente al 1951, può essere vista come un modello intermedio tra quello di Rittinger e quello di Kick: l'energia legata alla comminuzione dipende sì infatti dalla dimensione di partenza delle particelle del materiale, ma ciò avviene in maniera più debole rispetto a quanto visto nel modello di Rittinger. In particolare l'idea di base di questa teoria è che l'energia trasmessa ad un corpo solido, attraverso uno sforzo di compressione, si ripartisca in un primo tempo all'interno della massa, risultando quindi proporzionale a D^3 , ed in seguito, con l'inizio della fessurazione superficiale, l'energia venga a concentrarsi sulla superficie delle labbra di fessurazione diventando perciò proporzionale a D^2 . Il modello di Bond risulta essere largamente applicabile, ad esempio in campo industriale, per il fatto che le particelle dei materiali con cui si ha spesso a che fare hanno caratteristiche intermedie rispetto a quelle per cui sono validi i modelli di Rittinger e di Kick, si possono ad esempio avere particelle non completamente prive di fratture e di dimensioni intermedie tra quelle molto fini e quelle grossolane. L'energia di comminuzione, secondo quanto riportato da Bond, può essere calcolata facendo riferimento all'espressione seguente:

$$W = \frac{K''}{\rho_s} \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (2.5)$$

dove K'' è un'opportuna costante e ρ_s il peso specifico del materiale sottoposto a comminuzione.

Secondo la teoria di Bond l'energia necessaria per passare da un materiale di dimensione iniziale D ad uno di dimensione finale d è calcolabile a partire dalla differenza dei due singoli valori di energia che occorrono per passare da una dimensione iniziale teoricamente infinita del materiale alle due rispettive dimensioni finali D e d . In particolare la richiesta energetica necessaria per passare da un ipotetico materiale infinitamente grande ad uno caratterizzato da una dimensione finale standard pari a $100 \mu m$ prende il nome di *indice di macinabilità di Bond*, indicato con W_i :

$$W_i = \frac{K''}{\rho_s} \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) \quad (2.6)$$

si può osservare come l'indice così definito contenga già al suo interno le caratteristiche intrinseche del materiale, la possibilità di conoscere il valore di W_i di una materia prima permette di poter calcolare direttamente quale valore di energia si deve associare ad una qualsiasi riduzione dimensionale tra due diametri delle particelle D e d .

L'espressione 2.5 può essere riscritta inserendo al suo interno W_i :

$$W = 10 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (2.7)$$

2.2.3 Indice di macinabilità di Bond

L'*indice di Bond*, detto anche *Bond Work Index (BWI)* e convenzionalmente indicato con W_i , è definito come l'energia necessaria per ridurre una tonnellata di un certo materiale da una dimensione teoricamente infinita a quella corrispondente all'80% del passante attraverso un vaglio di maglia pari a $100 \mu m$.

Per una serie di materiali, dei quali si conosce tale indice, nasce la possibilità di calcolare immediatamente il dispendio energetico necessario per svolgere su ognuno di questi una determinata operazione di comminuzione, da qui anche il vantaggio di poter effettuare previsioni e confronti sull'energia richiesta per la riduzione dimensionale.

La necessità di riferirsi ad una dimensione pari al d_{80} e non genericamente a d nasce dal fatto un materiale può non essere costituito da particelle di un'unica dimensione, ma sarà invece composto da elementi appartenenti a diverse classi granulometriche. La scelta di riportarsi ad una dimensione di riferimento delle particelle pari a $100 \mu m$ è invece dovuta al fatto che a questa si riesce ad applicare bene il modello fisico di Bond.

L'indice di Bond esprime quindi la resistenza che un materiale oppone alla comminuzione ed è un parametro dipendente da vari fattori: geometrici, strutturali e dinamici. A parità di efficienza di impianto e di uguale comportamento del materiale il work index può essere assunto come costante, lo si può quindi considerare indipendente dalle modalità con cui viene realizzata la comminuzione e risulta essere invece funzione solamente delle caratteristiche del materiale analizzato.

Dall'esame della tabella 2.1 si può osservare come valori minimi e massimi dell'indice di Bond, riportati per alcuni minerali, presentino escursioni notevoli. Tali differenze possono dipendere sia dalle disuniformità intrinseche del materiale, per via ad esempio dei vari processi di formazione subiti, sia dalle macchine impiegate e dalle modalità di prova, riuscire a determinare univocamente il W_i di un materiale risulta non essere quindi un'operazione del tutto semplice.

Minerale	Work index (<i>kWh/short ton</i>)		
	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio
Barite	2,4	8,9	4,7
Bauxite	0,9	14,9	8,8
Fluorite	4,4	12,8	8,9
Fosfati	6,5	13,2	9,9
Feldspato	8,4	16,4	10,8
Minerale a piombo e zinco	6,8	13,4	10,9
Dolomite	2,2	18,6	11,3
Minerale di ferro a magnetite	4,5	25,3	11,3
Carbone	6,0	16,5	11,4
Minerale di zinco	6,5	22,0	11,6
Minerale di piombo	8,3	15,3	11,9
Minerale di rame	6,4	26,3	12,7
Calcare	6,5	33,3	12,7
Minerale di ferro ad ematite	7,5	21,6	12,8
Clinker di cemento	9,1	36,7	13,4
Quarzo	12,0	22,0	13,6
Granito	10,7	31,9	15,1
Corindone	22,1	109,6	56,7

Tabella 2.1: Valori dell' indice di Bond per alcuni minerali.

La determinazione sperimentale del W_i è possibile mediante l'applicazione di un particolare test che è stato messo a punto dall'autore stesso e viene chiamato *prova standard di macinabilità di Bond* [4]. In questa sede, in particolare nel

capitolo 4, verrà riportata una descrizione dettagliata di tale metodo e degli strumenti necessari per la sua realizzazione. Anticipiamo solo l'espressione empirica per il calcolo del work index:

$$W_i = 1,1 \frac{44,5}{P_i^{0,23} G_{bp}^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (2.8)$$

Una formula di questo tipo, essendo di tipo sperimentale, può essere applicata solo nel caso in cui si utilizzi un mulino a sfere costruito secondo le indicazioni riportate da Bond. I parametri coinvolti sono essenzialmente quattro e possono essere così riassunti:

- P_i : è la dimensione delle particelle del materiale presa come riferimento nella prova, è pari a $100 \mu m$;
- G_{bp} : è chiamato macinabilità del materiale ed è una caratteristica di quest'ultimo;
- F_{80} : corrisponde all'ipotetica dimensione della maglia di un setaccio attraverso la quale riesce a passare l'80% del materiale da testare mediante la prova di Bond;
- P_{80} : corrisponde all'ipotetica dimensione della maglia di un setaccio attraverso la quale riesce a passare l'80% del materiale fine prodotto con la prova di Bond.

Altre formule sono state ricavate sempre da Bond in riferimento a differenti condizioni di misura del work index, nel caso di un mulino a barre invece che a sfere è ad esempio possibile applicare la seguente espressione:

$$W_i = 1,1 \frac{62}{P_i^{0,23} G_{bp}^{0,625} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (2.9)$$

E' importante sottolineare che nella seguente trattazione l'indice di Bond viene dimensionalmente espresso in kWh/t , in alcuni casi però lo si può trovare

espresso anche in $kWh/short\ ton$, in quest'ultimo caso si fa riferimento alla tonnellata corta che corrisponde a 907,18 kg. Nell'espressione 2.9 viene applicato il coefficiente moltiplicativo 1,1 in modo da portarsi dall'unità di misura del sistema anglosassone ai kilowattora su tonnellata.

Dal punto di vista applicativo l'indice di Bond può essere considerato un utile strumento per poter studiare la risoluzione di problemi pratici legati al campo industriale, come ad esempio: calcolare il dispendio energetico necessario per compiere una particolare operazione di comminuzione e poter prevedere quindi il comportamento dei materiali utilizzati. In ogni caso è necessario tener conto che la determinazione di questo indice rimane comunque legata all'ambito sperimentale di laboratorio e che le condizioni così realizzate possono differire molto da quelle presenti su scala industriale. A tal proposito Bond stesso aveva già provveduto ad inserire dei coefficienti correttivi che potessero risolvere tali problemi, molte di queste correzioni sono ancora attualmente utilizzate da molti progettisti di impianti industriali.

2.2.4 Leggi energetiche successive a quella di Bond

Nel 1972 viene messa a punto da *Charles* una legge energetica generale in grado di riassumere in un'unica espressione tutte le teorie dei precedenti studiosi. L'energia di comminuzione, indicata con W , viene così definita:

$$W = -C \frac{dx}{x^n} \quad (2.10)$$

I parametri che compaiono nell'equazione sono i seguenti:

- C : costante determinabile in base alle proprietà del materiale;
- x : dimensione di partenza del materiale da macinare;
- dx : variazione dimensionale subita dal materiale;
- n : costante determinabile in base alle dimensioni di partenza del materiale. Come già visto in precedenza le leggi di Rittinger e Kick valgono laddove si considerino materiali rispettivamente fini e grossolani, la legge di Bond

rappresenta invece una via intermedia tra le due. E' possibile ottenere una di queste tre particolari leggi energetiche integrando l'espressione di Charles dopo aver provveduto a compiere una delle seguenti sostituzioni:

- $n = 2$ per ottenere la legge di Rittinger;
- $n = 1$ per ottenere la legge di Kick;
- $n = 1,5$ per ottenere la legge di Bond.

Esiste anche un'ulteriore espressione della legge energetica di Charles:

$$W = 100 \frac{C \alpha}{(n-1)(\alpha-n+1)} K^{1-n} \quad (2.11)$$

La 2.11 si può ottenere a partire dall'equazione di *Gaudin*, la 2.12, sulle curve granulometriche cumulative di un prodotto di comminuzione:

$$y = 100 \left(\frac{x}{K} \right)^\alpha \quad (2.12)$$

Tali curve, riportate in un diagramma in scala logaritmica, assumono soprattutto nel tratto iniziale la configurazione di una retta. I parametri che compaiono dell'espressione sono:

- x : dimensione delle particelle del materiale;
- y : frazione percentuale di prodotto che risulta dimensionalmente inferiore a x ;
- K : ascissa del punto di intersezione della curva con l'ordinata a cui corrisponde il 100% di passato;
- α il coefficiente angolare della retta.

Differenziando la 2.12 rispetto ad x si ottiene:

$$dy = 100 \frac{\alpha}{K^\alpha} x^{\alpha-1} dx \quad (2.13)$$

Integrando la legge di Charles, anche tenendo conto dell'ultima espressione, si ottiene l'equazione 2.11 cercata. Riportando su un grafico in scala logaritmica

l'energia W in funzione di K si ottiene una retta di coefficiente angolare $1/n$, da questo è possibile quindi determinare il valore di n per ciascun materiale considerato.

Capitolo 3

Materiali e impasti analizzati

Questo capitolo tratterà delle materie prime che sono state testate in laboratorio attraverso l'applicazione di prove sperimentali per la determinazione dell'indice di Bond. Oltre ai singoli materiali verranno presi in considerazione anche due impasti, caratterizzati da composizioni differenti, dei quali si vuole determinare il work index: il primo, di seguito denominato mix, è quello a partire dal quale viene realizzato il grès porcellanato, il secondo, composto solamente da due materie prime, verrà analizzato con l'ulteriore scopo di verificare alcuni aspetti della macinazione legati alle differenti proprietà di alcuni materiali.

3.1 Materiali

I materiali su cui è stata applicata la prova standard di Bond sono i seguenti:

- Feldspato potassico;
- Feldspato sodico;
- Sabbia feldspatica;
- Argilla bentonitica;
- Argilla illitico caolinitica.

Al fine di questo lavoro di tesi non è stato possibile effettuare la prova di Bond sull'argilla filtropressata, caratterizzata comunque, come si evince dalla letteratura e da altre prove sperimentali, da un valore del work index pari a circa $1 \div 1,5$. Di seguito si continuerà in ogni caso a citare questo materiale in quanto comunque presente all'interno del mix.

In figura 3.1 è possibile osservare una foto delle materie prime.



Figura 3.1: I materiali testati in laboratorio. Da in alto a sinistra: feldspato potassico, feldspato sodico, sabbia feldspatica, argilla bentonitica, argilla illitico caolinitica, argilla filtropressata.

I materiali sono stati messi a disposizione dal Centro Ceramico di Bologna che ha provveduto alla preparazione in termini di frantumazione e vagliatura. In questo modo si è ottenuto un materiale caratterizzato da una granulometria di dimensioni inferiori ai $3150 \mu m$ come richiesto dalla prova di macinabilità di Bond.

Nella tabella 3.1 sono riportati i dati relativi alle umidità caratteristiche dei materiali; si può osservare come le argille presentino valori di questa anche molto

superiori a quelli di altri materiali:

Materiale	Umidità (%)
Feldspato potassico	1,5
Feldspato sodico	3,5
Sabbia feldspatica	1,5
Argilla bentonitica	5,5
Argilla illitico caolinitica	2,5
Argilla filtropressata	19,0

Tabella 3.1: Valori di umidità percentuale dei materiali.

La prova è stata applicata ai materiali secchi: prima di iniziare il processo di macinazione si è provveduto infatti a porli in stufa per almeno 24 ore ad una temperatura di circa $76^{\circ}C$.

La determinazione sperimentale del work index dei materiali è stata condotta con lo scopo di poter confrontare i valori della prova standard di Bond con quelli che si possono ottenere attraverso la prova rapida di Magdalinovic [5], in letteratura viene giustificato l'uso di questa seconda prova, più semplice e veloce rispetto alla prima, in quanto porterebbe a risultati che non si discostano di oltre il 7% da quelli della procedura di Bond. In un lavoro di tesi precedente a questo [6] è già stata eseguita una verifica di questo tipo, quello che si è fatto però è stato considerare solo l'indice del mix, in questa sede si provvederà a calcolare gli errori anche per i work index delle singole materie prime.

3.2 Mix

Il mix dei sei materiali è stato realizzato a partire dalle indicazioni fornite dal Centro Ceramico di Bologna sulla base delle percentuali di composizione riportate in tabella 3.2, i valori considerati sono quelli che a livello industriale vengono utilizzati per preparare l'impasto del grès porcellanato.

Materiale	Composizione sul tal quale (%)	Composizione sul secco (%)
Feldspato potassico	10	11
Feldspato sodico	38	39
Sabbia feldspatica	5	5
Argilla bentonitica	4	4
Argilla illitico caolinitica	22	23
Argilla filtropressata	21	18

Tabella 3.2: Composizione dal mix analizzato.



Figura 3.2: Il Mix composto da tutti i materiali.

L'impasto è stato preparato in modo da avere a disposizione una quantità superiore rispetto a quella necessaria per iniziare la prova, nel capitolo 4 si vedrà come in alcune fasi della procedura sarà importante avere da parte una riserva del mix originario in modo da poter così andare ad integrare, secondo un particolare criterio, una frazione del materiale che è stata macinata.

Applicando la prova standard di Bond al mix si è potuto determinare sperimentalmente il suo work index, un'interessante verifica su questo parametro è il confronto con l'eventuale valore teorico calcolato a partire dalla media pesata dei singoli indici dei materiali. Un'operazione di questo tipo è stata già precedentemente effettuata utilizzando i dati relativi alla procedura rapida di Magdalinovic, ciò che si è ottenuto è stato un riscontro negativo in quanto il valore teorico

ricavato dal calcolo della media è risultato essere più alto di quello determinato sperimentalmente in laboratorio. L'ipotesi fatta per spiegare la differenza rilevata tra i due work index è legata, come si vedrà più avanti, alla presenza nell'impasto di materiali di durezza differente. A questo proposito si sono ottenuti interessanti risultati eseguendo alcune prove di verifica sul mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica preparato in laboratorio (vedi paragrafo 3.3).

3.2.1 Il grès porcellanato

Il *grès porcellanato* è un prodotto ceramico a pasta compatta, non porosa, che viene ottenuto per pressatura. Il termine di origine francese grès indica che la massa ceramica della piastrella è estremamente greificata, compatta, da cui deriva l'eccezionale resistenza del materiale ceramico. L'aggettivo porcellanato sottolinea la raffinata eleganza che lo caratterizza e deriva dall'utilizzo del caolino, una argilla bianca che viene utilizzata anche per la produzione di porcellana. Possiamo distinguere due diverse tipologie di grès:

- il grès naturale, più comunemente conosciuto come grès tecnico, ha un effetto marmorizzato del tutto simile al marmo naturale e mantiene le caratteristiche tecniche del grès porcellanato;
- il grès smaltato, dalla varietà di colori, stili, formati e decori riscontrabile solo nella ceramica smaltata.

Il grès porcellanato è un impasto ottenuto dalla mescola di argilla magra e poco refrattaria e feldspati, cotta al forno a temperature estremamente elevate (1200 – 1400 °C), fino a raggiungere uno stato di vetrificazione non porosa e l'impermeabilità che rende la piastrella completamente idrorepellente e con elevate caratteristiche di resistenza meccanica anche senza smaltatura. L'alto rapporto di pressatura (350 – 400 kg/cm²) e le elevate temperature di cottura rendono le piastrelle in grès porcellanato quasi completamente vetrificate, conferendo loro elevate caratteristiche meccaniche, di resistenza al gelo, all'abrasione e agli agenti chimici. In base al processo di cottura (temperatura e tempo) si ottengono grès a differente porosità e finitura superficiale. Al contrario dei prodotti ceramici

a superficie smaltata, nei quali si riescono a distinguere, in sezione, il supporto, (che determina le caratteristiche di resistenza meccanica della piastrella) e lo smalto (che ne determina l'aspetto estetico e le caratteristiche di usura), nel grès porcellanato superficie e massa sono identiche: la piastrella in grès presenta una continuità di composizione tra superficie e supporto e l'usura riporta alla superficie uno strato identico al precedente, senza alterare le caratteristiche estetiche e funzionali del pavimento. La superficie vetrificata, parte integrante della struttura della piastrella, fa del grès un materiale dotato di un'estetica elegante e durevole nel tempo. Per quanto riguarda le caratteristiche di antigelività, resistenza agli urti, ai graffi, alle macchie e agli attacchi chimici, il grès porcellanato è un materiale ceramico estremamente resistente e igienico. E' il materiale che registra valori di assorbimento d'acqua (cioè la quantità di acqua che, in particolari condizioni, la lastra può assorbire) inferiori allo 0,5%, ovvero tra i più bassi di tutti i prodotti da pavimento e rivestimento. Da questa caratteristica (che è anche uno dei due parametri su cui si basa la classificazione delle norme EN ISO) deriva anche il più alto grado di resistenza alla flessione, vale a dire la massima tensione che il materiale, sottoposto ad una crescente azione di flessione, può tollerare prima di rompersi. Il grès presenta inoltre elevatissima resistenza all'abrasione.

Oggi il grès porcellanato è la tipologia di materiale ceramico più avanzata e copre oltre l'80% della produzione italiana ceramica.

3.3 Mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica

Un secondo mix testato in laboratorio è stato preparato a partire da due sole materie prime, feldspato sodico e argilla illitico caolinitica, entrambe presenti al 50%. Un impasto di questo tipo risulta essere abbastanza rappresentativo di quello che effettivamente viene preparato per il grès porcellanato, questo è caratterizzato infatti da un contenuto di argille pari al 45% (di cui il 23% di argilla illitico caolinitica) e da una presenza di materiali duri pari al 55% (di cui il 39%

di feldspato sodico). La scelta di applicare la prova standard di Bond ad un mix di questo tipo ha permesso di andare a valutare alcuni aspetti della macinazione legati alla differente durezza dei materiali coinvolti. Il feldspato sodico è uno dei materiali duri presenti all'interno dell'impasto ceramico, l'argilla, viceversa, ne rappresenta la componente tenera. L'ipotesi da verificare è se, macinandoli insieme, così come effettivamente accade nel mix, il primo tende a compiere sulla seconda un'ulteriore operazione di macinazione oltre a quella già svolta dalle sfere macinanti.



Figura 3.3: Mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica.

Per compiere le necessarie verifiche è stata applicata al mix considerato la procedura standard di Bond, campionando il materiale nelle diverse fasi della procedura: si sono separati 10 g dei seguenti fusi granulometrici:

- feldspato sodico originario
- argilla illitico caolinitica originaria
- mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica originario
- sette frazioni fini (corrispondenti alla granulometria minore di 100 μm) di tutte le macinazioni effettuate
- frazione grossolana (corrispondente alla granulometria maggiore di 100 μm) ottenuta con l'ultima macinazione.

Su tutti i campioni prelevati è stata eseguita (presso il Centro Ceramico di Bologna) la *prova di perdita al fuoco*. Questa analisi permette di valutare la perdita in peso, in percentuale, che un campione di materiale subisce una volta che viene portato alla temperatura di 1050 °C. Ciò che in particolare risulta interessante è la possibilità di rilevare la presenza di frazioni argillose, un materiale come l'argilla infatti, portato ad elevate temperature, è infatti particolarmente predisposto a perdere peso, in relazione alla presenza di quantità non trascurabili di sostanze organiche e acqua (chimica e di costituzione) all'interno del materiale. Il calo ponderale è quindi dovuto alla liberazione di CO_2 e H_2O . Nel caso in esame la prova di perdita al fuoco ha permesso di valutare la percentuale di argillosi presenti nella miscela argilla/feldspato nelle diverse classi granulometriche ottenute nel corso delle macinazioni.

3.4 Caratterizzazione di alcuni materiali: microdurezza Knoop

La prova di *microdurezza Knoop* consente di quantificare, attraverso l'uso di uno strumento chiamato microdurimetro, il valore mediano di durezza di una superficie lapidea lavorata e di individuarne l'indice di disuniformità dato dalla presenza di minerali di diversa durezza. La misura si basa sulla realizzazione di una serie di 20 o 40 impronte prodotte da un penetratore di diamante su una superficie del provino lucidata a specchio.

Nel campo di studio delle rocce una misura di questo tipo è ampiamente utilizzata perché relativamente semplice (viene infatti realizzata un'impronta a pianta rombica la cui diagonale risulta essere facilmente misurabile anche quando la roccia tende a sfaldarsi), permettendo di ottenere risultati molto più precisi rispetto a quelli di prove fatte con altri penetratori. La microdurezza Knoop, generalmente indicata con HK , viene espressa come rapporto tra il carico agente sul penetratore e l'area dell'impronta ottenuta.

I tre materiali su cui è stata eseguita la prova sono i seguenti: feldspato potassico, feldspato sodico e sabbia feldspatica.

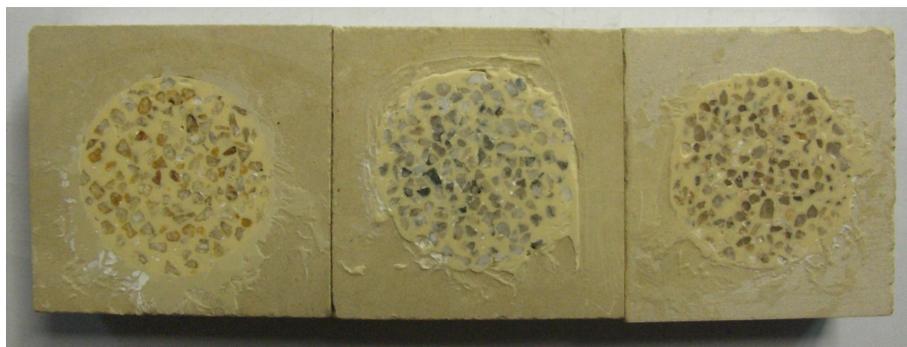


Figura 3.4: I campioni su cui è stata effettuata la prova, da sinistra: feldspato potassico, feldspato sodico, sabbia feldspatica.

Nei sottoparagrafi seguenti viene riportato il procedimento utilizzato per la preparazione dei campioni, segue una descrizione delle modalità con cui si è condotta la prova ed infine si riportano i risultati ottenuti.

3.4.1 Preparazione dei campioni

Per la preparazione dei campioni si è prelevata una quantità di materiale pari a circa 400 g e con l'ausilio di un setaccio di maglia pari a 2000 μm si è provveduto a separarne la granulometria più grossolana.



Figura 3.5: Fase di pesatura e setacciatura del materiale.

Con supporti lapidei delle dimensioni di $5 \times 5 \times 2$ cm e un impasto indurente si è realizzato uno strato del materiale facendo uso delle sole particelle più grosse.

Da un campione granulare si è quindi realizzata una lastra compatta di materia prima su cui applicare la prova.



Figura 3.6: Lastra di materiale preparata utilizzando un supporto lapideo e un impasto indurente.

I provini ottenuti sono stati lasciati riposare per 2 ore dando modo alla resina di asciugarsi e quindi di saldarsi alle particelle di materiale; con l'ausilio di un comparatore a disco diamantato si è poi provveduto a rettificare il più possibile la superficie dei campioni.



Figura 3.7: Operazione di rettifica della superficie dei provini.

Infine le lastre sono state lucidate con un disco diamantato di finezza pari a $10\ \mu m$ e sono state analizzate col microdurimetro, figura 3.8, per valutarne la microdurezza secondo Knoop.



Figura 3.8: Il microdurimento utilizzato nella prova.

Nelle figure 3.5, 3.6 e 3.7 sono stati riportati i passaggi che hanno permesso di ottenere i provini di feldspato potassico e di feldspato sodico; analoga è stata la preparazione per la sabbia feldspatica.

E' importante sottolineare che la procedura appena esposta, messa in atto per preparare i campioni, non è quella comunemente prevista dalla normativa; la necessità di agire in questo modo è stata dettata dall'esigenza di trattare un campione di tipo granulare.

3.4.2 Il microdurimento e la prova di microdurezza

Il *microdurimetro* è uno strumento costituito da un tavolo porta campione, da un microscopio per la misurazione dell'impronta e da un penetratore intercambiabile. Questo è dotato di un meccanismo che realizza un'applicazione graduale del carico e ne permette il sollevamento a penetrazione ultimata. Lo strumento

è sensibile alle vibrazioni e agli spostamenti, viene perciò fatto poggiare su un tavolo antivibrazioni.

La prova si esegue misurando la diagonale maggiore di una serie di 20 impronte (40 in caso di materiale disomogeneo o di granulometria grossolana) prodotte da un microdurimetro Knoop sulla superficie di un campione di materiale. Lo strumento ha una punta diamantata e applica una forza pari a $1,96 N$.

Ciò che si va a calcolare è il parametro HK determinabile mediante la seguente espressione:

$$HK = 14,23 \frac{P}{L^2} \quad (3.1)$$

dove:

- HK è la microdurezza Knoop (MPa);
- P è il peso sulla punta (N);
- L è lunghezza della diagonale maggiore dell'impronta (mm).

Altri parametri interessanti sono:

- $HK25$: valore della microdurezza corrispondente alla frequenza cumulativa del 25% (detto anche quartile inferiore);
- $HK50$: valore della microdurezza corrispondente alla frequenza cumulativa del 50% (detto anche o valore mediano);
- $HK75$: valore della microdurezza corrispondente alla frequenza cumulativa del 75% (detto anche quartile superiore).

Quanto più il rapporto tra $HK75$ e $HK25$ risulta essere vicino a 1 tanto più la durezza del materiale risulta essere uniforme.

Il campione viene posto sul piano micrometrico dello strumento. Con una procedura standard di messa a fuoco si ottiene la misura di lunghezza della diagonale maggiore (ad esempio, come nel caso in figura 3.9, $50 \mu m$). Sulla scala micrometrica si andrà poi a leggere la restante parte della misura ($4 \mu m$). Il valore

finale ($54 \mu m$) si otterrà sommando quanto letto sul micrometro a quanto invece rilevato sulla scala macrometrica. La prova prosegue spostando orizzontalmente il campione di $1 mm$ e ripetendo il procedimento finchè si è realizzato il numero di impronte necessario.

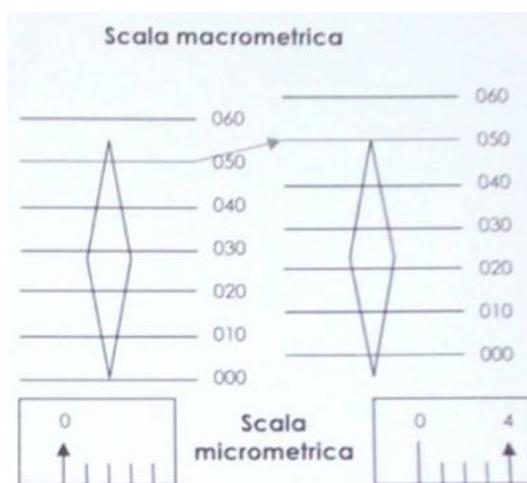


Figura 3.9: La scala di riferimento su cui leggere la misura.

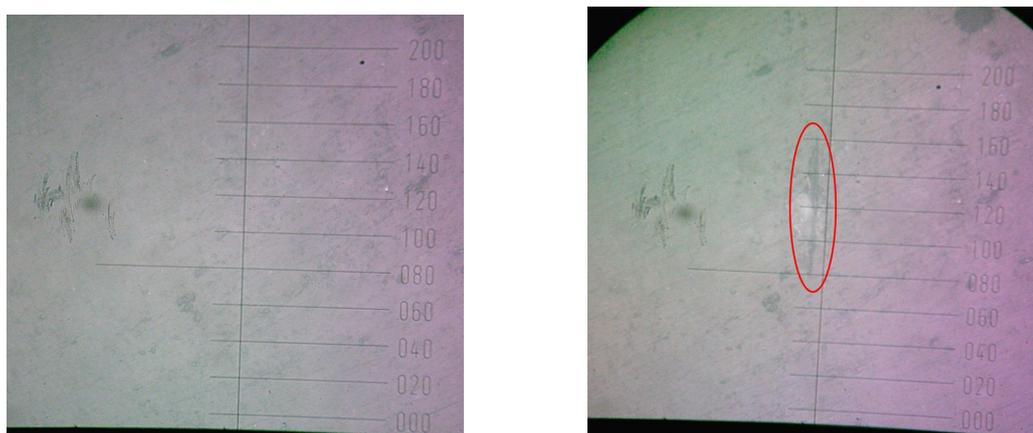


Figura 3.10: Misura con il microdurimetro Knoop, a sinistra si osserva la visione al microscopio prima della misura, a destra è possibile osservare l'impronta realizzata dalla punta diamantata sul grano di materiale, in questo caso feldspato di sodico.

3.4.3 Risultati ottenuti

Per ciascun campione è stata realizzata una serie di 40 impronte così da ottenere un risultato accurato ed eliminare eventuali errori di misura, si è provveduto inoltre a ripetere il procedimento più di una volta in modo da poter controllare quanto ottenuto in precedenza. Di seguito, per ciascun provino, si riportano i risultati ottenuti con una sola delle operazioni effettuate. In particolare per ciascun campione si riportano il grafico dei valori di microdurezza HK in funzione del numero di impronta e il calcolo del valore del rapporto HK_{75}/HK_{25} che sta ad indicare il grado di uniformità dei valori di durezza misurati.

Feldspato potassico

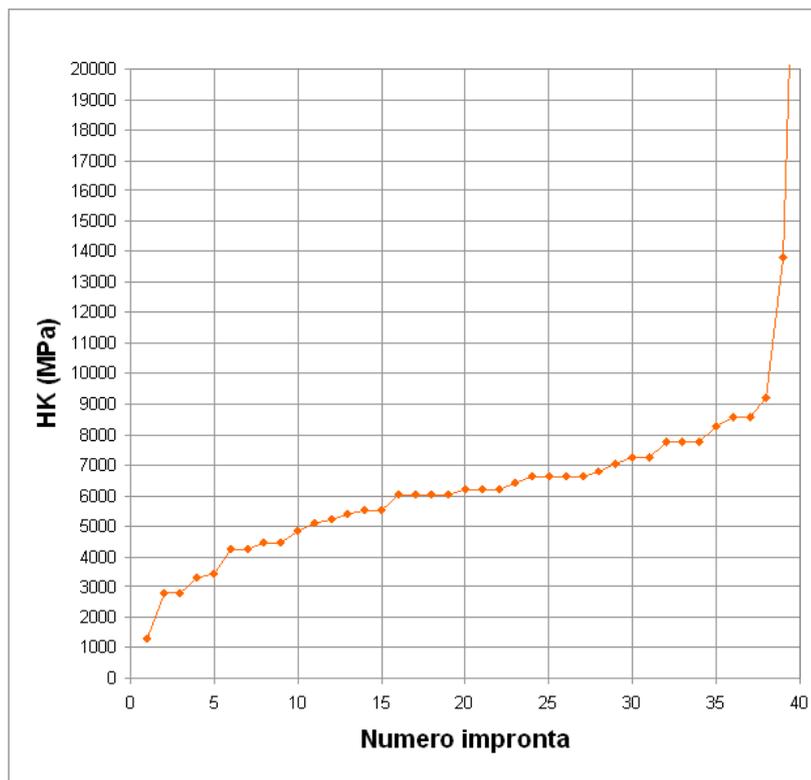


Figura 3.11: Frequenza cumulativa di microdurezza Knoop del feldspato potassico.

Valore di HK medio = 6736 MPa

Valore HK_{25} = 4831 MPa

Valore HK_{50} = 6216 MPa

Valore HK_{75} = 7259 MPa

Da cui segue:

$$\frac{HK_{75}}{HK_{25}} = 1,50$$

Feldspato sodico

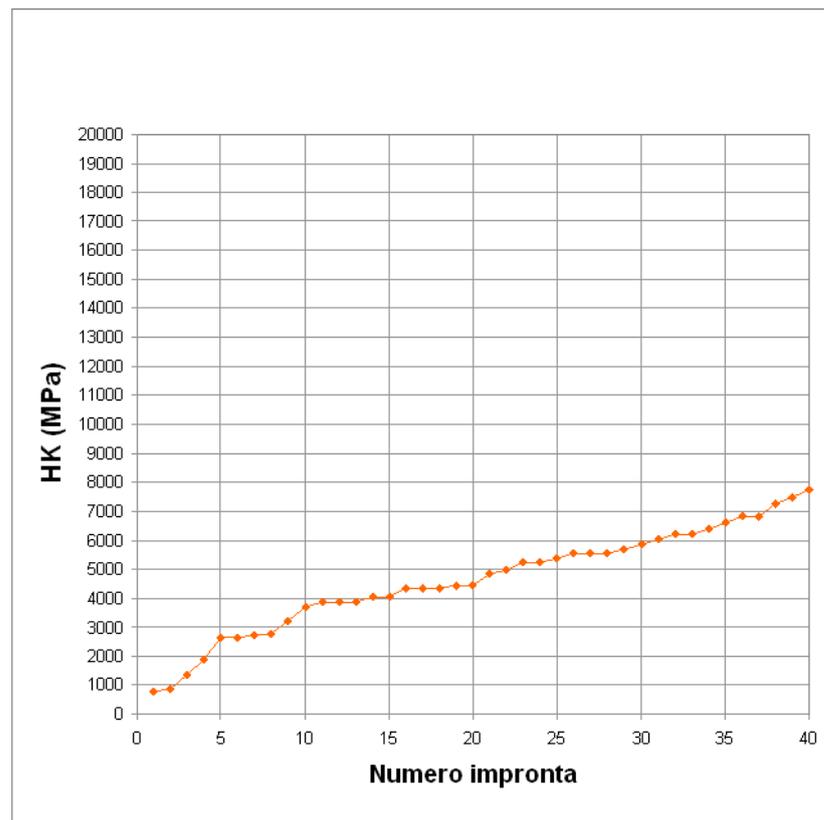


Figura 3.12: Frequenza cumulativa di microdurezza Knoop del feldspato sodico.

Valore di HK medio = 4644 MPa

Valore HK_{25} = 3687 MPa

Valore $HK_{50} = 4471 \text{ MPa}$

Valore $HK_{75} = 5861 \text{ MPa}$

Da cui segue:

$$\frac{HK_{75}}{HK_{25}} = 1,59$$

Sabbia feldspatica

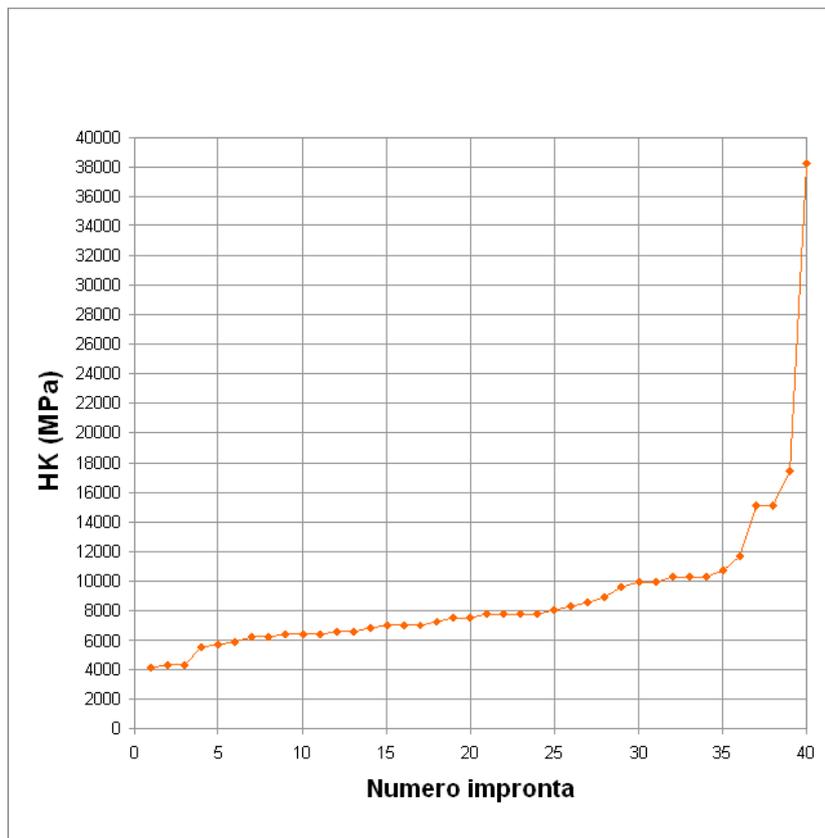


Figura 3.13: Frequenza cumulativa di microdurezza Knoop della sabbia feldspatica.

Valore di HK medio = 8961 MPa

Valore $HK_{25} = 6406 \text{ MPa}$

Valore $HK_{50} = 7499 \text{ MPa}$

Valore $HK_{75} = 9934 \text{ MPa}$

Da cui segue:

$$\frac{HK75}{HK25} = 1,55$$

Da una prima analisi dei risultati ottenuti è possibile concludere che la sabbia feldspatica risulta essere il materiale caratterizzato dal più alto valore di microdurezza; a questa segue il feldspato potassico ed infine il feldspato sodico. Per quanto riguarda i rapporti $HK75/HK25$ è possibile affermare che la durezza dei materiali risulta essere abbastanza uniforme, attestandosi infatti tutti attorno al valore 1,5.

Può essere interessante effettuare un confronto tra quanto ottenuto con la prova di Knoop e i valori di work index determinati applicando agli stessi materiali la prova standard di macinabilità di Bond. Facendo riferimento ai risultati riportati nel capitolo 5 è possibile affermare che la durezza di un materiale e l'energia di macinazione ad esso associato sono due parametri non correlabili direttamente a causa della probabile influenza di altri parametri quali ad esempio la fragilità del materiale. Per riuscire a trovare una correlazione tra l'indice di Bond e la microdurezza Knoop si presume sia necessario svolgere un'analisi più dettagliata del processo di rottura del materiale.

Capitolo 4

Prove sperimentali per la determinazione dell'indice di Bond

Nel seguente capitolo si focalizzerà l'attenzione sulle procedure sperimentali che permettono di determinare il *work index* di un materiale.

Una prima prova, proposta da Bond nel 1951 e chiamata *prova standard di macinabilità*, è stata il principale oggetto di studio in questo lavoro di tesi. La sua realizzazione è stata possibile presso i laboratori di Georisorse e Geotecnologie del dipartimento DICMA dell'Università di Bologna dove sono stati analizzati una serie di materiali legati al campo dell'industria ceramica: in particolare si è fatto riferimento ai componenti impiegati su larga scala per la preparazione dell'impasto di grès porcellanato.

Una seconda procedura, messa a punto da Magdalinovic nel 1989 e chiamata *prova rapida di macinabilità*, viene di seguito descritta in quanto nel capitolo 5 si confronteranno tra loro valori di work index ottenuti applicando ad ogni materiale le due differenti procedure.

Si vuole precisare che per questo lavoro è stata realizzata concretamente soltanto la prova standard di Bond, mentre i valori riferiti alla prova rapida provengono

da un altro lavoro sperimentale¹.

4.1 Prova standard di Bond

La procedura standard si basa su una sequenza di macinazioni svolte in serie con lo scopo di determinare il G_{bp} di un materiale. Questo parametro è detto macinabilità e risulta essere una caratteristica del solo materiale in esame.

Per prima cosa verranno riportate le operazioni preliminari da svolgere su ogni materiale, nel sottoparagrafo 4.1.2 verrà poi esposta la procedura vera e propria per effettuare una singola macinazione, permettendo di ottenere un determinato valore di G_{bp} . Il metodo prevede che si continui a macinare il materiale finché il parametro sopra citato non si sarà stabilizzato attorno ad un valore costante. La media dei G_{bp} ottenuti nelle ultime tre macinazioni sarà il valore che verrà inserito nella formula di Bond per il calcolo del work index.

Le informazioni riguardanti la strumentazione utilizzata vengono riportate a fine capitolo nel paragrafo 4.3.

4.1.1 Operazioni preliminari

Il materiale deve innanzitutto essere sottoposto ad una fase di vagliatura che permetta di ottenere particelle di dimensioni inferiori ai $3150 \mu m$, tale operazione è stata preventivamente svolta dal Centro Ceramico di Bologna che ha fornito i materiali.

Una seconda fase preparatoria richiede che il materiale venga seccato per fargli perdere la sua umidità caratteristica; a tal proposito un quantitativo di materiale pari a circa $4 kg$ è stato posto in stufa a $76 ^\circ C$ per 24 ore.

4.1.2 Macinazione

Per iniziare la prova è necessario separare un volume di materiale pari a $700 cm^3$ e determinare la massa a questo corrispondente. Per fare ciò si riempie

¹v. tesi di Beatrice Daghia

un cilindro graduato opportunamente tarato e si pesa con la bilancia il quantitativo ottenuto. La massa così ricavata verrà di seguito indicata con M e sarà quella utilizzata per caricare la giara nella prima macinazione. Per ottenere un valore accurato del peso del materiale è consigliabile ripetere tre volte la misura di volume, pesare i tre diversi quantitativi e calcolare la media dei valori ottenuti. Si procede mettendo all'interno della giara i corpi macinanti e il quantitativo di materiale misurato nei passaggi precedenti. La prima macinazione viene effettuata facendo compiere al mulino un numero di giri pari a 100, ad accezione del caso dell'argilla filtropressata in cui si procede partendo da 35 giri, questo per via dell'elevata tenerezza del materiale. La durata della macinazione può essere calcolata considerando che il motore compie 70 giri al minuto.



Figura 4.1: Il mulino con la giara montata.

Trascorso il tempo di macinazione si procede aprendo la giara e provvedendo con un pennello alla pulizia manuale dei corpi macinanti. Durante questa operazione è necessario recuperare tutto il materiale rimasto sulla superficie delle sfere e sulla superficie interna della giara.

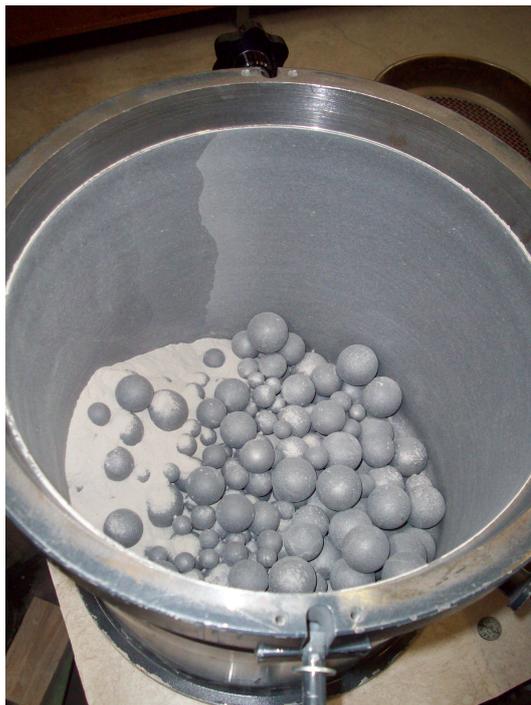


Figura 4.2: La giara smontata dal mulino subito dopo la macinazione.



Figura 4.3: La giara dopo la pulizia manuale.

Terminata questa prima fase di macinazione è necessario far seguire un'operazione di setacciatura che permetta di separare da quanto macinato la parte più fine. Con l'ausilio dei setacci, impilati come riportato nel sottoparagrafo 4.3.2 e fatti lavorare nella setacciatrice automatica per 30 minuti, viene effettuato il cosiddetto taglio a 100 μm : tutto ciò che scende dall'ultimo setaccio viene pesato e messo da parte, la restante quantità, corrispondente alla frazione più grossolana, viene pesata e reintegrata con del materiale originario secco in quantità pari a quella della frazione fine scartata, sul materiale appena reintegrato si compirà quindi la macinazione successiva.

Avendo compiuto molti passaggi è realistico pensare di aver perso una piccola parte di materiale, la quantità di questo che si aggiungerà alla frazione maggiore di 100 μm sarà quindi pari al valore della massa iniziale meno la massa corrispondente alla frazione sopra i 100 μm . Per una setacciatura più accurata si è scelto di separare il materiale in due metà e di processarle separatamente, al lavoro della setacciatrice automatica è stata poi fatta seguire un'operazione di vagliatura manuale con lo scopo di perfezionare, in particolar modo, il lavoro meccanico compiuto sugli ultimi tre setacci, quelli corrispondenti alla frazione più fine.

Noti i pesi del materiale dimensionalmente maggiore e minore di 100 μm si procede andando a calcolare il numero di giri che si dovranno far compiere al mulino nella macinazione successiva. Per fare ciò è necessario calcolarsi alcuni parametri applicando le formule seguenti:

$$\text{Carica circolante} = \frac{\text{materiale} > 100}{\text{ricarica}} 100 \quad (4.1)$$

$$\text{Passante teorico} = \frac{\text{materiale} > 100}{250} 100 \quad (4.2)$$

$$G_{bp} = \frac{\text{ricarica}}{\text{numero di giri}} \quad (4.3)$$

$$\text{Numero di giri} = \frac{\text{passante teorico}}{G_{bp}} \quad (4.4)$$

Come già detto precedentemente sarà necessario proseguire con le macinazioni fino a che il valore di G_{bp} ottenuto non sarà divenuto costante, ciò avviene quando

la carica circolante ha raggiunto un valore prossimo al 250%. Le indicazioni di Bond riguardo al numero di macinazioni da compiere in serie stabiliscono un intervallo compreso tra 7 e 12, difficilmente prima della settima macinazione si riuscirà ad ottenere una stabilizzazione del G_{bp} . Per il calcolo del work index sono richiesti, oltre a quest'ultimo parametro, altri tre valori:

- F_{80} : lo si trova dall'analisi granulometrica del materiale e quindi dalla costruzione della curva del passante cumulativo percentuale in funzione della dimensione delle particelle (curva granulometrica). Graficamente occorre identificare a quale dimensione del materiale corrisponde una percentuale di passante pari all' 80% del totale. La distribuzione granulometrica andrà determinata per ogni materiale: ponendo una piccola quantità di questo (circa 300-400 g) nei setacci e azionando la setacciatrice automatica si provvederà a separare le particelle secondo la dimensione delle maglie dei setacci. Pesando quanto rimasto sopra ogni maglia si potrà quindi costruire il grafico e quindi risalire al valore dell' F_{80} ;
- P_{80} : concettualmente corrisponde al parametro visto nel punto precedente, in questo caso però l'analisi granulometrica viene effettuata sulle frazioni fini di ogni materiale che sono state scartate nelle ultime tre macinazioni. In pratica si otterranno tre diversi valori, si provvederà a calcolarne la media e ad inserirla nella formula del calcolo del work index. L'analisi granulometrica, essendo il materiale molto fine, viene effettuata con l'ausilio del granulometro laser (vedi sottoparagrafo 4.3.3);
- P_i : corrisponde alla dimensione scelta nella prova per effettuare il taglio della frazione fine, è pari quindi a 100 μm .

Come già visto nel capitolo 2 la formula da applicare per il calcolo del work index è la 2.9, di seguito riscritta:

$$W_i = 1,1 \frac{44,5}{P_i^{0,23} G_{bp}^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (4.5)$$

Per una maggiore chiarezza terminologica si riassumono infine i parametri coinvolti nella fase di macinazione della prova:

- Ricarica: è la quantità di materiale originario secco con cui si integra la frazione dimensionalmente maggiore di $100 \mu m$ ottenuta con la setacciatura, in questo modo è possibile tornare ad avere la massa iniziale M ;
- Carica circolante: per una massa di materiale pari ad M è definita come il rapporto tra i pesi delle frazioni di materiale rispettivamente maggiori e minori di $100 \mu m$. A livello pratico il peso della frazione di materiale fine che si scarta coincide con quello della ricarica, nella formula della carica circolante viene quindi riportato quest'ultimo valore;
- Passante teorico: in una singola macinazione corrisponde alla teorica quantità di frazione fine, presente in una massa di materiale pari ad M , che permette di ottenere per avere un valore di carica circolante pari a 250%;
- Numero di giri: è il parametro che stabilisce quanto dovrà essere spinta ogni macinazione successiva, viene valutato in modo da raggiungere progressivamente un valore di carica circolante pari a 250%. Può essere anche visto nel seguente modo:

$$\text{Numero giri successivo} = \frac{\text{passante teorico}}{\text{ricarica}} \text{ numero giri precedente} \quad (4.6)$$

In pratica i giri di due macinazioni successive sono legati dal rapporto che c'è tra la quantità ideale di materiale fine presente in M (passante teorico) e la quantità di materiale fine che invece si ottiene concretamente con la setacciatura (ricarica). Quando tale rapporto diventa pari a 1 allora si è raggiunto il valore di carica circolante cercato, il peso ideale di materiale fine nella massa M viene a coincidere con il peso della frazione fine ottenuto realmente setacciando e il numero di giri della macinazione successiva diviene uguale a quello della precedente. Avvenuto ciò la prova standard di un singolo materiale è terminata;

- G_{bp} : è detto macinabilità ed un parametro caratteristico di ogni materiale.

4.2 Prova rapida di Magdalinovic

La prova rapida permette determinare il G_{bp} di un materiale a partire da un procedimento molto più veloce di quello previsto per la procedura standard: sono richieste infatti una sequenza di sole due macinazioni in serie rispetto alle 7 – 12 previste dalla prova di Bond.

Calcolato il work index di un materiale risulta interessante il confronto di tale valore con quello ottenuto con la prova lunga, secondo quanto riportato in letteratura l'errore relativo tra le due misure non dovrebbe infatti risultare superiore al 7%. A livello pratico una considerazione di questo tipo permette di affidarsi ad una metodologia molto più semplice e veloce, quale effettivamente è la procedura rapida, per ottenere il work index di un materiale.

La strumentazione necessaria per la prova è identica a quella richiesta dal metodo di Bond e descritta nel paragrafo 4.3.

4.2.1 Cenni teorici sulla prova rapida

Test sperimentali sulla cinetica di macinazione, svolti da alcuni studiosi con un mulino a sfere di Bond, hanno mostrato come su un breve periodo di macinazione il processo segua una legge cinetica del primo ordine, cioè:

$$R = R_0 e^{-kt} \quad (4.7)$$

dove:

- t esprime il generico istante di tempo durante la macinazione;
- R , al generico istante t , è la quantità di materiale che risulta essere superiore alla dimensione P_i scelta nella prova per effettuare il taglio della frazione fine;

- R_0 , all'istante di tempo iniziale t_0 , è la quantità di materiale che risulta essere superiore alla dimensione P_i scelta nella prova per effettuare il taglio della frazione fine;
- k è detta costante di macinazione, può essere determinata dopo un solo ciclo del mulino a partire dalla formula 4.7:

$$k = \frac{\ln R_0 - \ln R}{t} \quad (4.8)$$

Un'osservazione come quella appena citata permette di ottenere notevoli risparmi di tempo grazie alla possibilità di applicare una metodologia semplificata per il calcolo del *work index*. In uno schema di macinazione a secco (vedi figura 4.4), quale quello proposto da Bond nella prova standard, sussistono alcune relazioni valide nel caso in cui la carica circolante assuma un valore pari a 250%, tali relazioni sono:

$$R = \frac{2,5}{3,5} M \quad (4.9)$$

$$U = \frac{1}{3,5} M \quad (4.10)$$

dove:

- R è la quantità di materiale dimensionalmente superiore alla dimensione P_i di screening (nel caso in esame pari a $100 \mu m$);
- U è la quantità di materiale dimensionalmente inferiore alla dimensione P_i di screening;
- M è il peso di materiale corrispondente ad un volume di 700 cm^3 di materiale.

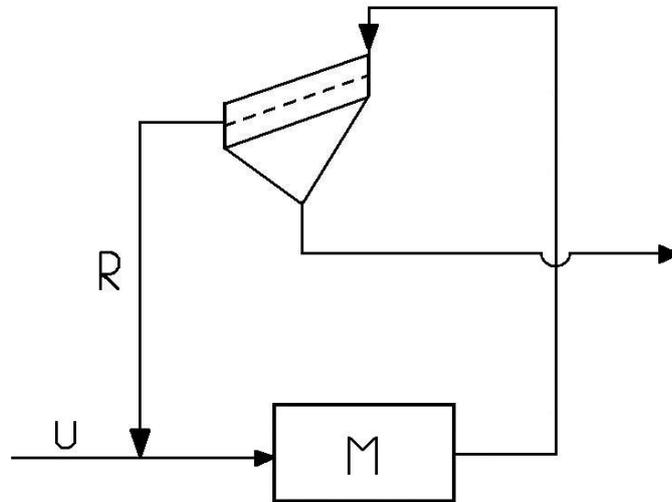


Figura 4.4: Schema del circuito di macinazione a secco proposto da Bond per la prova standard.

In una singola macinazione della prova standard, ipotizzando di aver già raggiunto un valore di carica circolante pari a 250% e prima di avviare il mulino, si ha che il peso di materiale dimensionalmente superiore a P_i risulta essere pari a R_0 , ovvero uguale a:

$$R_0 = R + U r_0 = \left(\frac{2,5}{3,5} + \frac{1}{3,5} r_0 \right) M \quad (4.11)$$

Nell'espressione 4.11 r_0 corrisponde alla frazione di materiale, con particelle di diametro superiore a P_i , che è presente nella ricarica. Praticamente è un parametro che può essere ottenuto prendendo una quantità di materiale originario pari ad U e separando le due seguenti frazioni: quella maggiore e quella minore di $100 \mu m$. La quantità più grossolana trovata divisa per la quantità di materiale totale U dà il valore cercato. Tornando all'equazione 4.7 e sostituendo i parametri R ed R_0 , così come espressi nelle formule 4.9 e 4.11, si ottiene:

$$\frac{2,5}{3,5} = \left(\frac{2,5}{3,5} + \frac{1}{3,5} r_0 \right) e^{-kt_c} \quad (4.12)$$

Con qualche passaggio matematico è possibile ricavarsi il tempo di macinazione t_c che permette di ottenere, con la prova rapida, una quantità pari ad R di

materiale dimensionalmente superiore a P_i e un valore di carica circolante pari a 250%. Tale tempo è:

$$t_c = \frac{\ln(1 + 0,4 r_0)}{k} \quad (4.13)$$

Il numero di giri N_c , riferiti al tempo di macinazione t_c , lo si trova considerando il fatto che la giara compie un numero giri al minuto pari a $n = 70$:

$$N_c = t_c n \quad (4.14)$$

L'espressione 4.8 della costante di macinazione k può essere infine riscritta nel seguente modo:

$$k = n \frac{\ln R_0 - \ln R}{N} \quad (4.15)$$

Viste la complessità e la durata della prova standard si potrebbe pesare di utilizzare come numero di giri del mulino, nella prima macinazione, un valore non arbitrario ma pari al numero N_c trovato con la procedura rapida, un accorgimento di questo tipo potrebbe portare ad anticipare il raggiungimento di un valore costante di G_{bp} e quindi ad abbreviare i tempi di prova.

4.2.2 Operazioni preliminari

Come già visto per la prova standard è necessario compiere due operazioni preliminari prima di procedere con la fase di macinazione vera e propria. In primo luogo il materiale deve subire un processo di vagliatura che permetta di avere particelle dimensionalmente inferiori a $3150 \mu m$, in secondo luogo si deve provvedere a far seccare la materia prima in modo che perda la sua umidità.

4.2.3 Macinazione

La quantità di materiale necessaria per la prova è quella corrispondente ad un volume pari a 700 cm^3 . Il peso di tale quantitativo, misurato con la bilancia, verrà d'ora in poi indicato con M . Con le formule sotto riportate si vanno a

calcolare altri due parametri: R e U . Questi vengono cercati in modo da avere un valore di carica circolante pari a 250%.

$$R = \frac{2,5}{3,5} M \quad (4.16)$$

$$U = M - R \quad (4.17)$$

Con il materiale è ora necessario preparare due distinti campioni, di peso pari a M , composti ciascuno dall'unione delle parti seguenti:

- una, di peso pari a R , ottenuta setacciando una certa quantità di materiale secco e prendendo solamente la frazione dimensionalmente superiore ai $100 \mu m$;
- una, di peso pari a U , di materiale originario secco.

Per riuscire a preparare entrambi i suddetti campioni è richiesta un'operazione di setacciatura che dia una quantità di materiale, con particelle maggiori di $100 \mu m$, pari a $2R$.

Si prosegue con la macinazione vera e propria di uno dei due campioni appena preparati: si monta sul mulino la giara e si aziona la macchina scegliendo di farle compiere un numero arbitrario di giri, genericamente indicato con N , pari a 100. Anche in questo caso si ha l'eccezione dell'argilla filtropressata con la quale si inizia con 35 giri. Come già visto per la prova standard è poi necessaria un'operazione di pulizia manuale delle sfere macinanti e dalla giara in modo da poter raccogliere tutto il materiale macinato senza perderne significative quantità. Stessa operazione già vista nel sottoparagrafo 4.1.2 è quella della setacciatura, prima meccanica e poi manuale, svolta per separare il materiale maggiore di $100 \mu m$ da quello inferiore a tale dimensione. Con la bilancia si provvede a pesare le due parti appena separate e la quantità più grossolana la indicheremo con R : tale valore ci occorre per calcolare i due parametri k (costante di macinazione) ed N_c (numero di giri nella macinazione successiva) così determinabili:

$$k = n \frac{\ln R_0 - \ln R}{N} \quad (4.18)$$

$$N_c = n \frac{\ln(1 + 0,4r_0)}{k} \quad (4.19)$$

dove n è il numero di giri che il motore compie in un minuto, nel nostro caso 70, ed R_0 è valutabile come:

$$R_0 = R + U r_0. \quad (4.20)$$

Dopo questi passaggi si prosegue effettuando la seconda e ultima macinazione caricando la giara con il secondo dei due campioni già preparati. Il numero di giri da far compiere al mulino è pari al valore N_c appena calcolato. Come già visto occorre ora pulire la giara e i corpi macinanti ed effettuare nuovamente la setacciatura per separare la parte di materiale dimensionalmente maggiore di $100 \mu m$ da quella invece minore. Pesando tali quantità andiamo ad indicare con R quella più grossolana e con m quella più fine. Se non ci sono stati errori tali parametri dovranno risultare simili rispettivamente ad R ed U calcolati nel primissimo passaggio di tale paragrafo. Come già esposto nel paragrafo sull'introduzione teorica della prova rapida, il parametro r_0 lo si trova setacciando una quantità di materiale pari ad U così da separare la frazione fine (minore di $100 \mu m$ da quella grossolana. Il rapporto tra U e la quantità di materiale sopra la dimensione P_i dà il valore cercato. Quest'ultimo passaggio di setacciatura può risultare comodo per costruire anche la curva granulometrica del materiale, in tal caso risulta però necessario pesare tutte le frazioni di materiale rimaste sopra ogni singolo setaccio.

E' possibile ora calcolare il valore del G_{bp} con la formula seguente:

$$G_{bp} = \frac{m - \frac{M(1-r_0)}{3,5}}{N_c} \quad (4.21)$$

Per il calcolo del *work index* sono richiesti, oltre a quest'ultimo parametro, altri tre valori: F_{80} , P_{80} , P_i . Le indicazioni per determinare tali parametri sono già state esposte nel sottoparagrafo 4.1.2.

Il calcolo del *work index* è ora possibile applicando la seguente espressione:

$$W_i = 1,1 \frac{44,5}{P_i^{0,23} G_{bp}^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (4.22)$$

4.3 Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata per la realizzazione della prova standard di Bond è quella che è stata messa a disposizione dai laboratori di Georisorse e Geotecnologie del dipartimento DICMA di Bologna. Nei sottoparagrafi seguenti viene riportata un'attenta descrizione delle macchine e degli strumenti utilizzati.

4.3.1 Mulino a sfere

Il mulino utilizzato nella procedura sperimentale è stato costruito appositamente, secondo quanto suggerito da Bond, per effettuare misure sulla macinabilità dei materiali. Tale macchina è composta da una giara di acciaio di forma cilindrica, del diametro di $30,5\text{ cm}$ e di altezza pari a $30,5\text{ cm}$, e da un motore in grado di imprimerle un movimento rotatorio di 70 giri al minuto. La giara viene chiusa mediante un coperchio che viene fissato alla stessa mediante quattro viti.



Figura 4.5: La giara chiusa dal coperchio.

La rotazione compiuta dal mulino permette di realizzare la riduzione dimensionale del materiale, questo viene posto dentro la giara insieme a dei corpi macinanti liberi di muoversi ovvero 285 sfere di acciaio aventi una massa totale di $20,125\text{ kg}$. La prova proposta da Bond prevede che vengano impiegate sfere di

determinate dimensioni e caratterizzate secondo quanto riportato nella tabella seguente (4.1):

Numero sfere	Diametro sfere (<i>mm</i>)	Superficie macinante (<i>cm</i> ²)
43	36,8	1829,4
67	29,7	1856,7
10	25,4	202,7
71	19,1	813,7
94	15,5	709,5
Totale	285	5412,0

Tabella 4.1: Le caratteristiche dei corpi macinanti indicate da Bond.

Le sfere disponibili in laboratorio presentano lievi differenze rispetto a quelle indicate da Bond. In tabella 4.2 è possibile osservare quali sono stati i diametri effettivamente utilizzati rispetto a quelli proposti nella tabella soprastante. Le differenze rilevate possono in definitiva essere considerate trascurabili dal momento che la massa totale viene mantenuta uguale a quella prevista da Bond. A livello di superficie macinante totale si ottengono 5446 *cm*² contro i 5412 *cm*² richiesti dalla prova.

Numero sfere	Diametro sfere (<i>mm</i>)	Superficie macinante (<i>cm</i> ²)	Massa sfere (kg)
43	36,7	1819,5	8,467
53	30,4	1538,8	6,065
14	25,5	286,0	1,191
10	25,2	199,5	0,657
71	19,9	883,3	2,294
94	15,6	718,7	1,451
Totale	285	5445,7	20,125

Tabella 4.2: Le caratteristiche dei corpi macinanti utilizzati in laboratorio.



Figura 4.6: I corpi macinanti utilizzati nella prova.



Figura 4.7: Due sfere macinanti a confronto: in quella di destra è possibile osservare l'effetto dell'usura dovuto alla macinazione.

4.3.2 Setacciatrice automatica

Tale macchina permette di separare dimensionalmente le particelle di un materiale mediante l'utilizzo di una pila di 7 setacci a dimensione delle maglie decrescente. Posizionando il materiale nel primo setaccio questo tratterrà le particelle di dimensione maggiore o uguale a quella della sua maglia, le particelle più fini tenderanno invece a scendere fino a che non incontreranno un setaccio con una maglia di una dimensione in grado di trattenerle. La setacciatrice automatica imprime ai setacci un movimento mirato a favorire la discesa del materiale. La sequenza dei setacci utilizzata nella prova è quella prevista dalle norme tecniche UNI: $3150\ \mu m$, $1400\ \mu m$, $750\ \mu m$, $400\ \mu m$, $200\ \mu m$, $150\ \mu m$, $100\ \mu m$.



Figura 4.8: La setacciatrice automatica con la pila di setacci montata.

4.3.3 Granulometro laser

E' uno strumento che permette di effettuare l'analisi granulometrica di un materiale molto fine. E' necessario preparare una sospensione del materiale solido in acqua con una concentrazione variabile tra il 7 e il 15%, questa passa all'interno dello strumento fino ad arrivare ad una cella di vetro nella quale verrà attraversata da un fascio di raggi laser. Quando il raggio di luce incide sulle particelle, viene deviato secondo un angolo di diffrazione che risulta proporzionale alle dimensioni delle particelle stesse. Una volta terminata la misura è possibile avere informazioni riguardo alle curve granulometriche cumulative e di frequenza.



Figura 4.9: Il granulometro laser.

4.3.4 Bilancia di precisione

Tale strumento viene utilizzato per pesare il materiale nelle varie fasi della procedura sperimentale, la bilancia adoperata nelle prove svolte è caratterizzata da una sensibilità di 0,1 g.



Figura 4.10: La bilancia.

Capitolo 5

Risultati sperimentali ottenuti

In questo capitolo verranno illustrati i risultati delle prove sperimentali svolte per questo lavoro di tesi presso i laboratori di Georisorse e Geotecnologie del dipartimento DICMA dell'Università di Bologna. Nel primo paragrafo vengono riportati i work index dei singoli materiali ottenuti applicando a questi la prova standard di Bond, a seguire viene dedicato spazio agli indici ottenuti con la prova rapida di Magdalinovic e al calcolo degli errori relativi rispetto ai work index della prova di Bond, infine si sposterà l'attenzione sui risultati della prova di perdita al fuoco effettuata sul mix di feldspato sodico ed argilla illitico caolinitica preparato con lo scopo di verificare alcune ipotesi relative alla macinazione di un impasto composto da più di un materiali.

Per ogni materiale analizzato viene riportato nell'ordine:

- la tabella contenente i dati relativi all'analisi granulometrica;
- le curve granulometriche del passante cumulativo percentuale in funzione del diametro delle particelle del materiale (scala lineare e semilogaritmica);
- la tabella relativa ai dati sulle macinazioni;
- la curva granulometrica, relativa alla frazione fine dell'ultima macinazione, ottenuta con il granulometro laser;
- la media dei valori di G_{bp} delle ultime macinazioni e il work index W_i ottenuto applicando la formula sperimentale di Bond.

5.1 Indici di Bond ottenuti con la procedura standard

5.1.1 Feldspato potassico



Figura 5.1: Feldspato potassico.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 1260,4 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	118,4	32,7	32,7	67,3
750	70,5	19,5	52,2	47,8
400	33,7	9,3	61,5	38,5
200	48,7	13,4	74,9	25,1
100	39,6	10,9	85,8	14,2
< 100	51,3	14,2	100,0	0,0
Totale	-	362,3	100,0	-

Tabella 5.1: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del materiale.

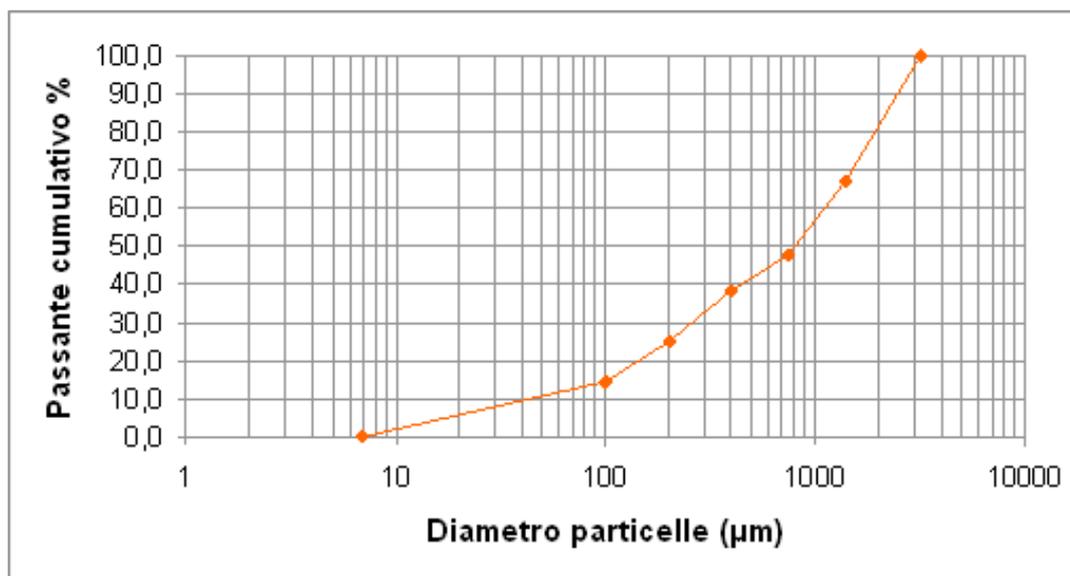


Figura 5.2: Curva granulometrica del feldspato potassico.

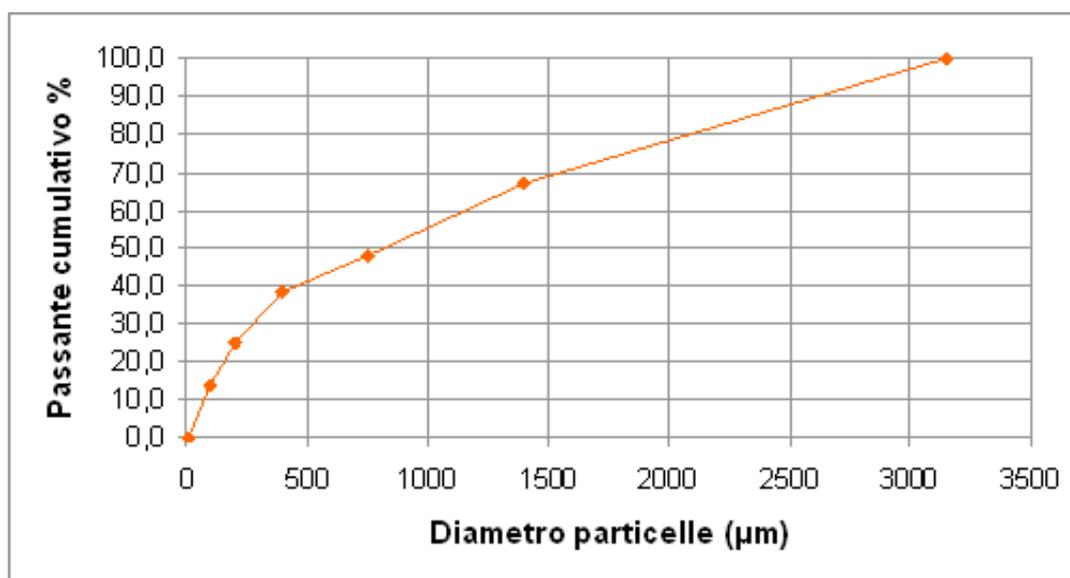


Figura 5.3: Curva granulometrica del feldspato potassico (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 2090 \mu m$

Macinazione	1	2	3	4	5	6	7
Giri mulino	100	121	199	198	187	193	194
Durata macinazione	1'26"	1'44"	2'51"	2'49"	2'40"	2'45"	2'46"
Setacciatura							
peso > 100 μm (g)	947,2	1014,0	898,4	885,2	908,8	901,8	904,2
peso < 100 μm (g)	313,2	243,0	355,4	368,0	347,8	354,6	352,6
totale (g)	1260,4	1257,0	1253,8	1253,2	1256,6	1256,4	1256,8
Ricarica (g)	313,2	246,4	362,0	375,2	351,6	358,3	356,2
Carica circolante (%)	302,4	411,5	248,2	235,9	258,5	251,5	253,8
Passante teorico (g)	378,9	405,6	359,4	354,1	363,5	360,7	361,7
G_{bp} (g/numero giri)	3,13	2,04	1,82	1,90	1,88	1,86	1,84

Tabella 5.2: Dati relativi alle macinazioni del materiale.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 1,86$ g/numero di giri

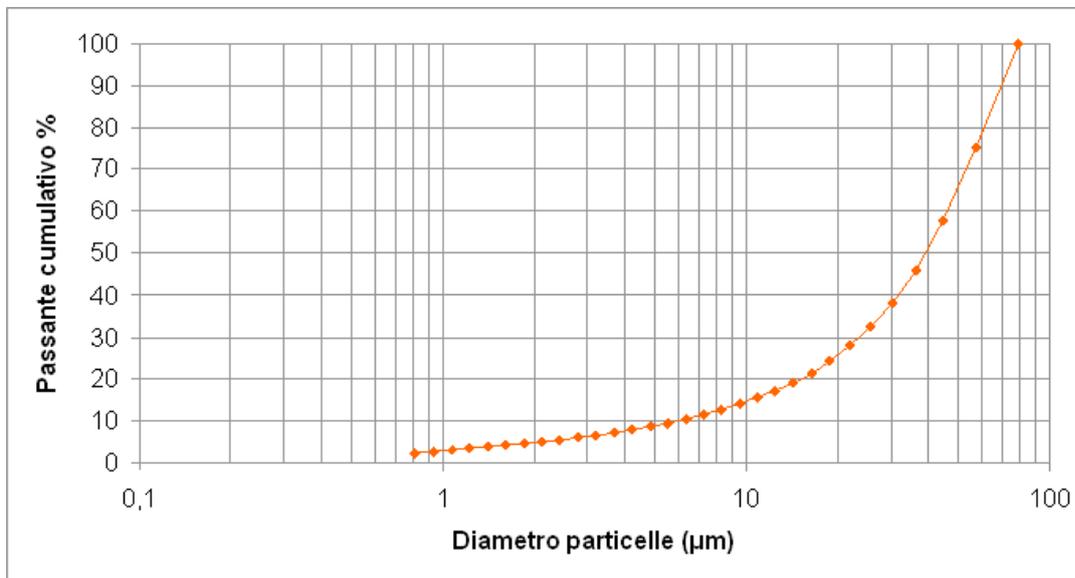


Figura 5.4: Curva granulometrica del feldspato potassico (frazione < 100 μm).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 61,0$ μm

Indice di Bond ottenuto: $W_i = 9,61$ kWh/t

5.1.2 Feldspato sodico



Figura 5.5: Feldspato sodico.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 1159,7 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	122,9	36,8	36,8	63,2
750	72,8	21,8	58,6	41,4
400	39,6	11,8	70,4	29,6
200	47,6	14,2	84,7	15,3
100	25,3	7,6	92,9	7,8
< 100	25,9	7,8	100,0	0,0
Totale	-	334,0	100,0	-

Tabella 5.3: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del materiale.

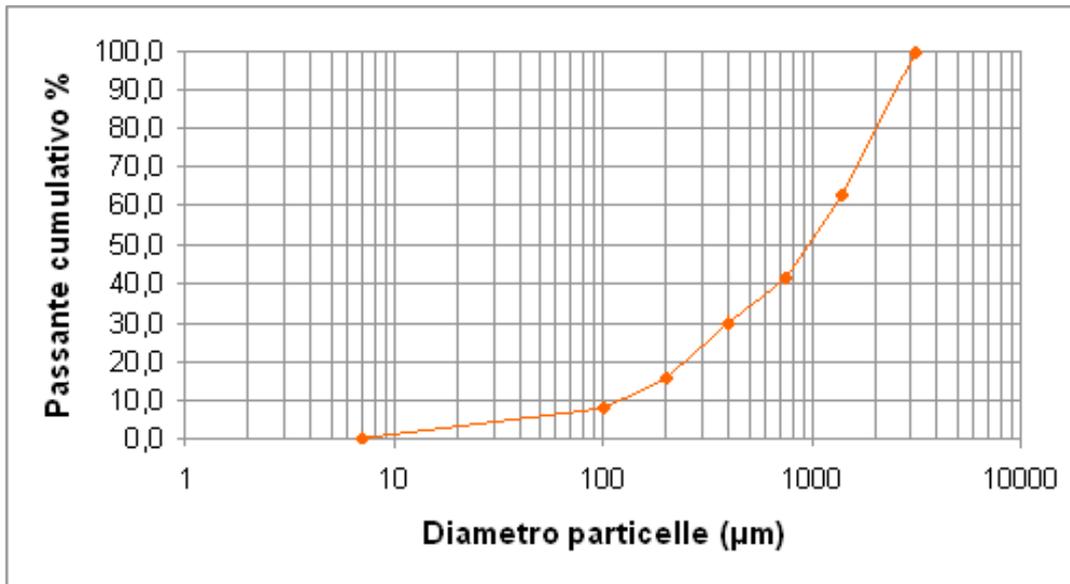


Figura 5.6: Curva granulometrica del feldspato sodico.

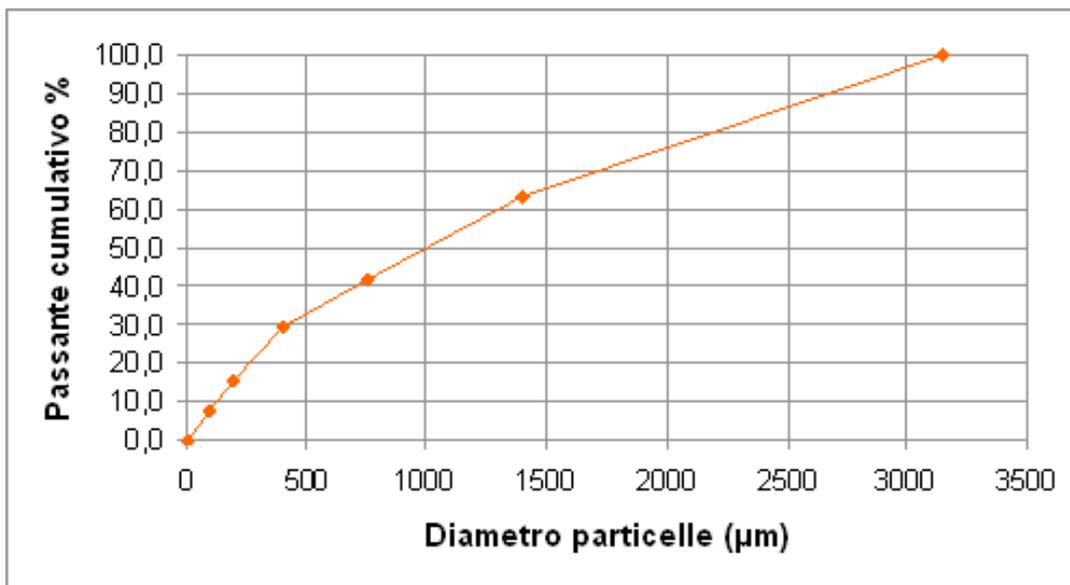


Figura 5.7: Curva granulometrica del feldspato sodico (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 2200 \mu m$

Macinazione	1	2	3	4	5	6
Giri mulino	100	160	306	302	270	260
Durata macinazione	1'26"	2'17"	4'23"	4'18"	3'51"	3'43"
Setacciatura						
peso > 100 μm (g)	927,2	959,8	824,6	801,2	819,8	812,2
peso < 100 μm (g)	228,2	195,4	330,6	355,0	336,8	347,0
totale (g)	1155,4	1155,2	1155,2	1156,2	1156,6	1159,2
Ricarica (g)	232,5	199,9	335,1	358,5	339,9	347,5
Carica circolante (%)	398,8	480,1	246,1	223,5	241,2	233,7
Passante teorico (g)	370,9	383,9	329,8	320,5	327,9	324,9
G_{bp} (g/numero giri)	2,33	1,25	1,09	1,19	1,26	1,34
Macinazione	7	8	9	10	11	
Giri mulino	243	272	263	229	240	
Durata macinazione	3'28"	3'53"	3'45"	3'16"	3'26"	
Setacciatura						
peso > 100 μm (g)	854,0	820,2	795,0	839,6	828,8	
peso < 100 μm (g)	302,2	336,0	361,8	319,4	329,6	
totale (g)	1156,2	1156,2	1156,8	1159,0	1158,4	
Ricarica (g)	305,7	339,5	364,7	320,1	330,9	
Carica circolante (%)	279,4	241,6	218,0	262,3	250,5	
Passante teorico (g)	341,6	328,1	318,0	335,8	331,5	
G_{bp} (g/numero giri)	1,26	1,25	1,39	1,40	1,38	

Tabella 5.4: Dati relativi alle macinazioni del materiale.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 1,39$ g/numero di giri

Durante lo svolgimento della prova si è verificato un problema con la setacciatura automatica. Un evento di questo tipo potrebbe aver inciso sul valore finale del G_{bp} e portato quindi ad una sottostima del W_i . Una conferma di questa affermazione si ha dall'errore relativo del work index della prova rapida di Magdalinovic, questo è risultato essere pari a 11% (vedi tabella 5.17), in letteratura tra i risultati delle

due metodologie viene indicata come discrepanza massima il 7%. Anche il numero elevato di macinazioni che si sono dovute compiere è legato al problema della setacciatrice e alla necessità di raggiungere un stabilizzazione del G_{bp} per poter considerare la prova terminata.

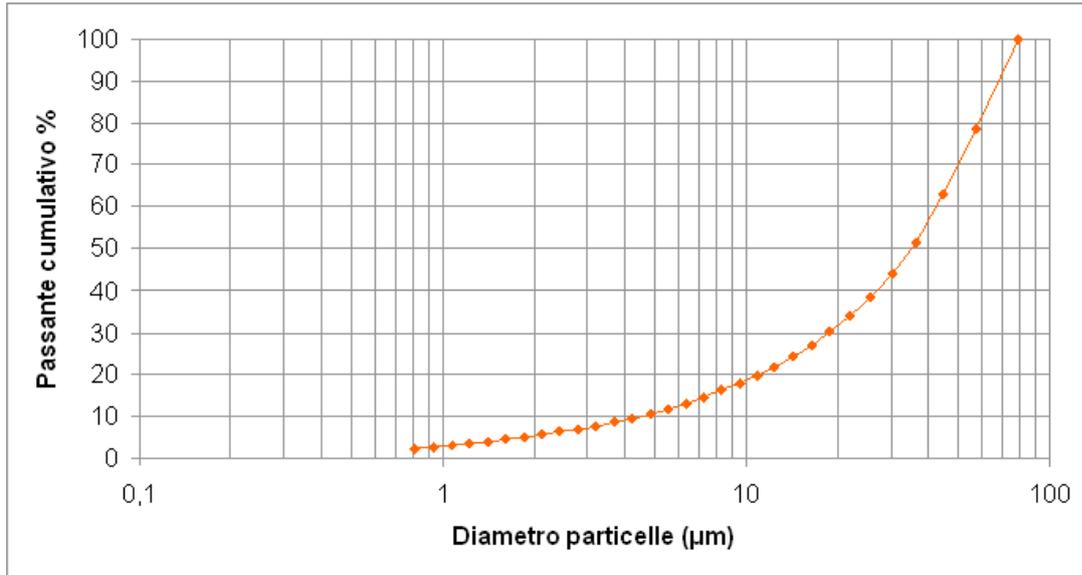


Figura 5.8: Curva granulometrica del feldspato sodico (frazione $< 100 \mu m$).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 58,1 \mu m$

Indice di Bond ottenuto: $W_i = 11,81 kWh/t$

5.1.3 Sabbia felspatica



Figura 5.9: Sabbia Feldspatica.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 1109,1 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	110,6	36,4	36,4	63,6
750	91,8	30,2	66,6	33,4
400	38,8	12,8	79,4	20,6
200	38,2	12,6	92,0	8,0
100	16,0	5,3	97,0	2,8
< 100	8,4	2,7	100,0	0,0
Totale	-	303,9	100,0	-

Tabella 5.5: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del materiale.

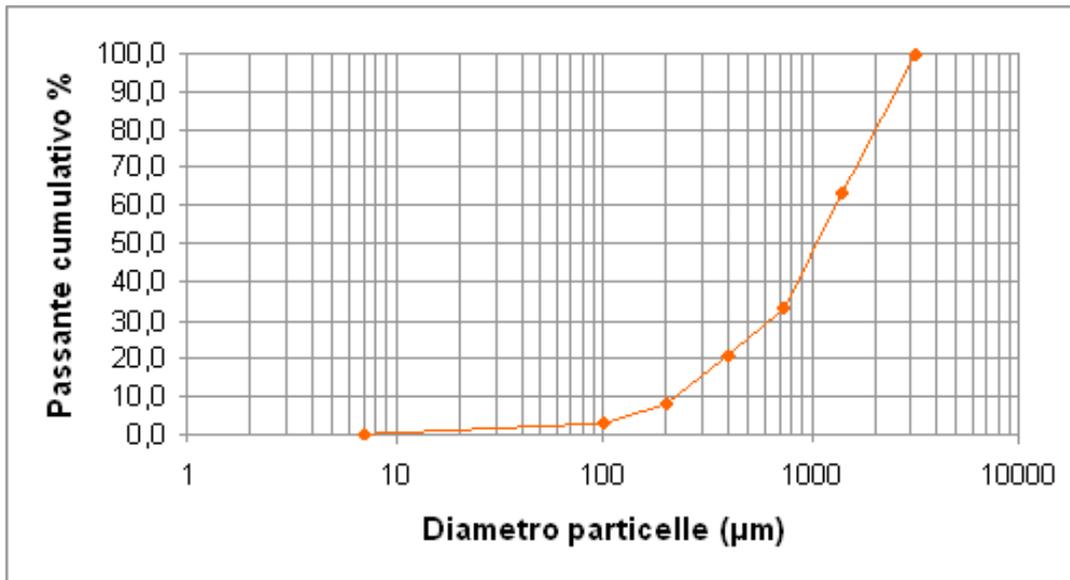


Figura 5.10: Curva granulometrica della sabbia feldspatica.

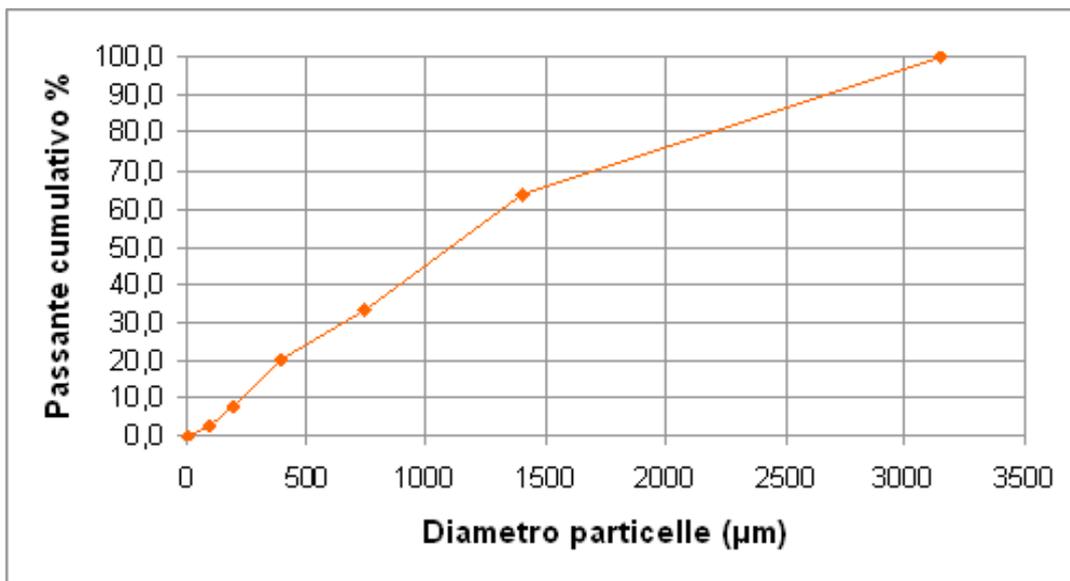


Figura 5.11: Curva granulometrica della sabbia feldspatica (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 2195 \mu m$

Macinazione	1	2	3	4	5	6	7
Giri mulino	100	228	302	261	251	258	251
Durata macinazione	1'26"	3'16"	4'19"	3'44"	3'46"	3'41"	3'35"
Setacciatura							
peso > 100 μm (g)	943,8	851,8	758,0	783,6	798,0	786,2	794,6
peso < 100 μm (g)	164,9	255,6	350,8	325,2	310,0	322,4	313,8
totale (g)	1108,7	1107,4	1108,8	1108,8	1108,0	1108,6	1108,4
Ricarica (g)	165,3	257,3	351,1	325,5	311,1	322,9	314,5
Carica circolante (%)	571,0	331,1	215,9	240,7	256,5	243,5	252,7
Passante teorico (g)	377,5	340,7	303,2	313,4	319,2	314,5	317,8
G_{bp} (g/numero giri)	1,65	1,13	1,16	1,25	1,24	1,25	1,25

Tabella 5.6: Dati relativi alle macinazioni del materiale.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 1,25$ g/numero di giri

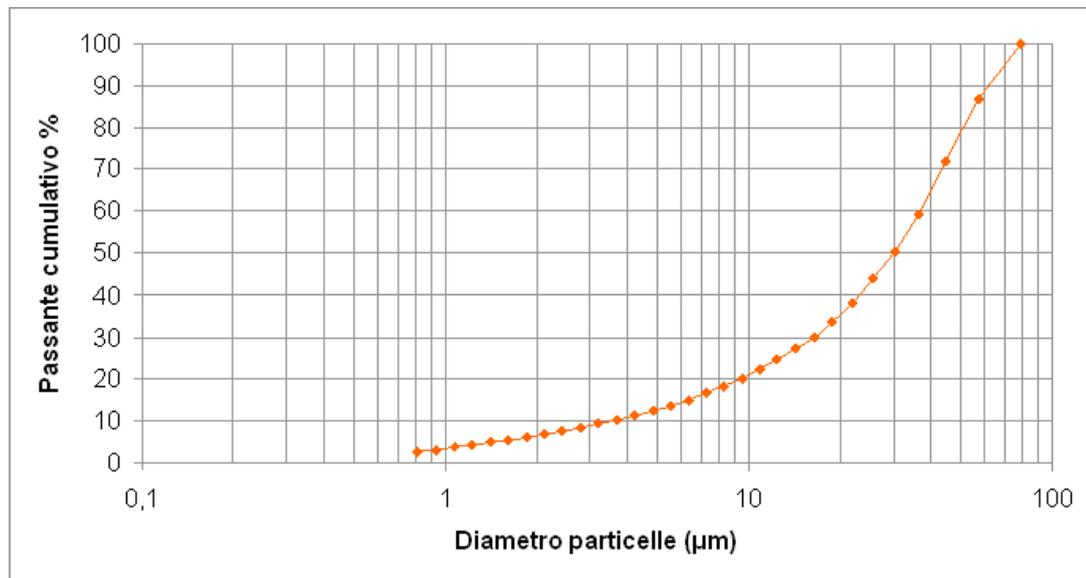


Figura 5.12: Curva granulometrica della sabbia feldspatica (frazione < 100 μm).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 53,9$ μm

Indice di Bond ottenuto: $W_i = 12,33$ kWh/t

5.1.4 Argilla bentonitica



Figura 5.13: Argilla bentonitica.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 823,5 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	66,3	30,1	30,1	69,9
750	47,8	21,7	51,8	48,2
400	26,4	12,0	63,8	36,2
200	35,3	16,0	79,8	20,2
100	21,1	9,6	89,4	10,6
< 100	23,3	10,6	100,0	0,0
Totale	-	220,2	100,0	-

Tabella 5.7: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del materiale.

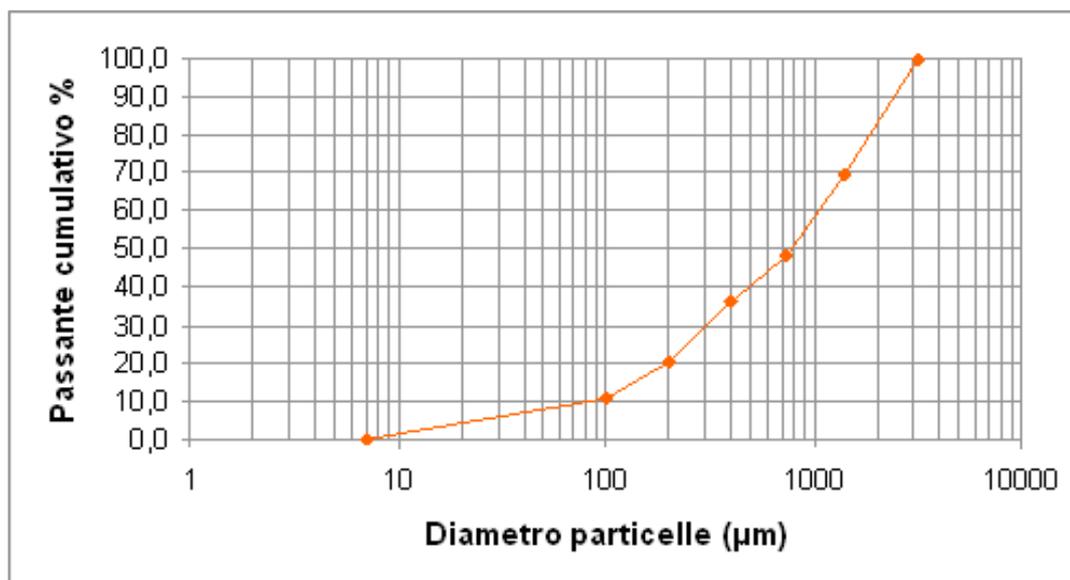


Figura 5.14: Curva granulometrica dell'argilla bentonitica.

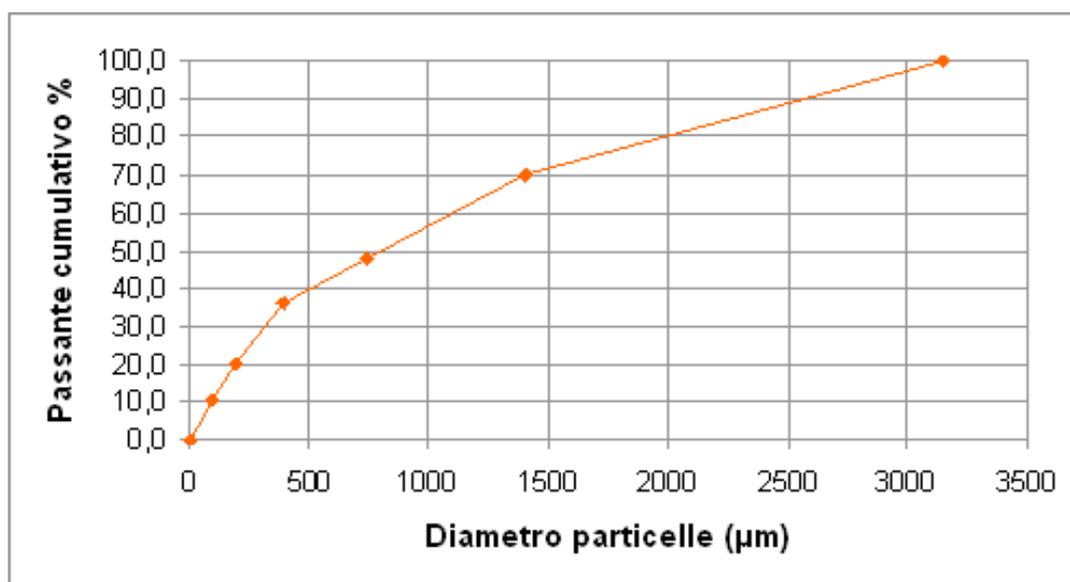


Figura 5.15: Curva granulometrica dell'argilla bentonitica (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 2000 \mu m$

Macinazione	1	2	3	4	5
Giri mulino	100	100	154	135	129
Durata macinazione	1'26"	1'25"	2'12"	1'55"	1'50"
Setacciatura					
peso > 100 μm (g)	587,6	654,4	564,8	580,4	581,0
peso < 100 μm (g)	235,6	171,2	260,2	250,2	245,6
totale (g)	823,2	825,6	825,0	830,6	826,6
Ricarica (g)	235,9	169,1	258,7	243,1	242,5
Carica circolante (%)	249,1	387,0	218,3	238,7	239,6
Passante teorico (g)	235,0	261,8	225,9	232,2	232,4
G_{bp} (g/numero giri)	2,36	1,70	1,68	1,80	1,89

Tabella 5.8: Dati relativi alle macinazioni del materiale.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 1,85$ g/numero di giri

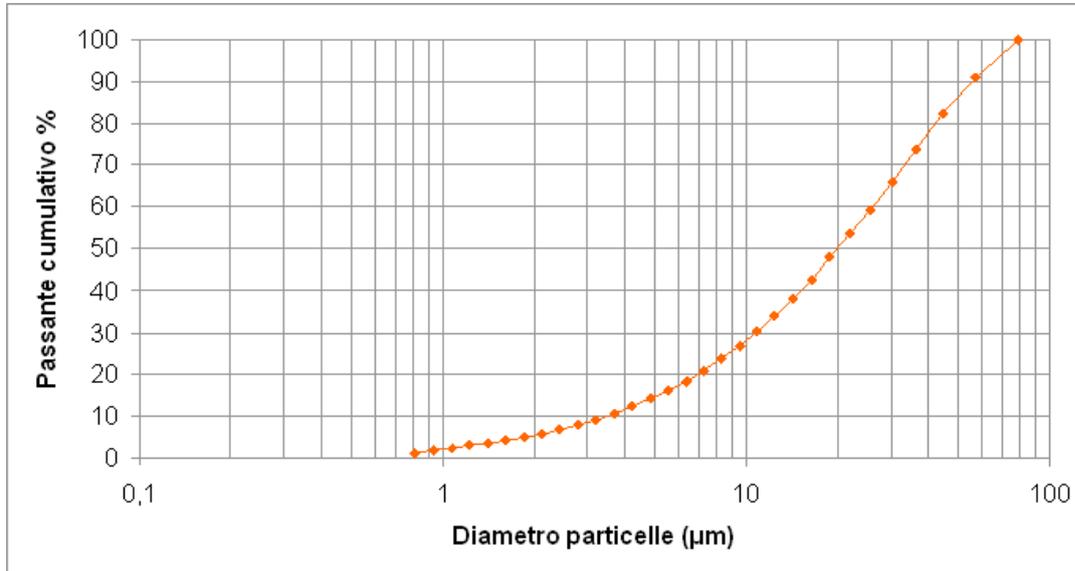


Figura 5.16: Curva granulometrica dell'argilla bentonitica (frazione < 100 μm).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 42,5$ μm

Indice di Bond calcolato: $W_i = 7,84$ kWh/t

5.1.5 Argilla illitico caolinitica



Figura 5.17: Argilla illitico caolinitica.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 1279,4 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	120,6	34,2	34,2	65,8
750	59,4	16,8	51,0	49,0
400	30,7	8,7	59,7	40,3
200	41,9	11,9	71,5	28,5
100	26,6	7,5	79,1	20,9
< 100	73,9	20,9	100,0	0,0
Totale	-	353,1	100,0	-

Tabella 5.9: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del materiale.

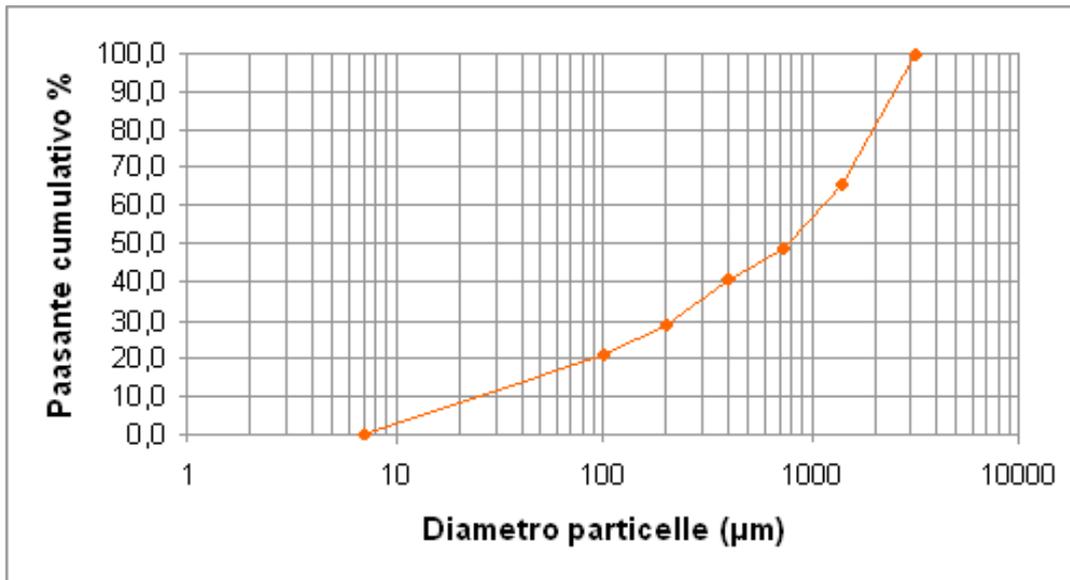


Figura 5.18: Curva granulometrica dell'argilla illitico caolinitica.

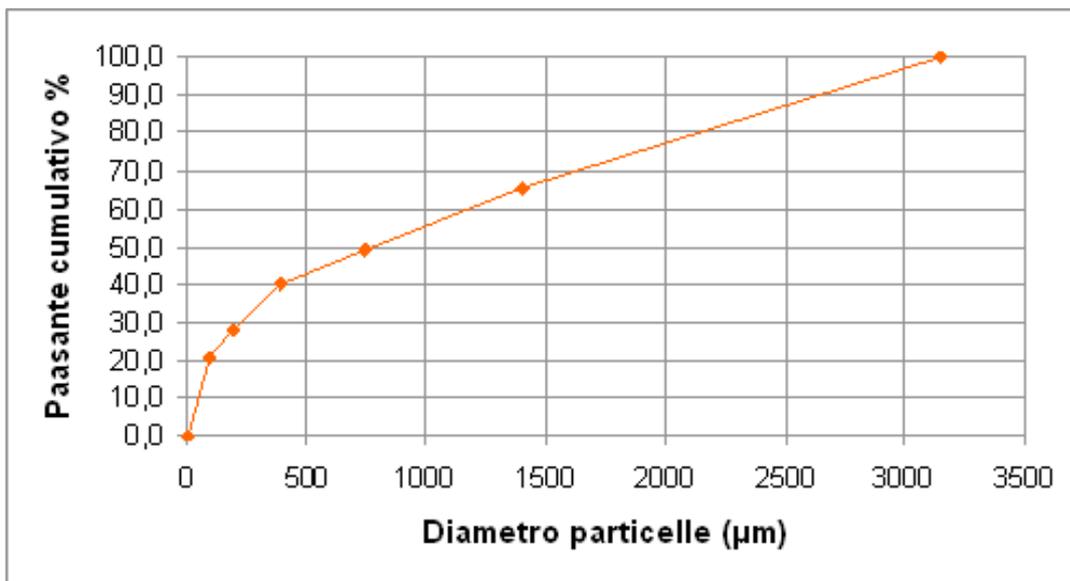


Figura 5.19: Curva granulometrica dell'argilla illitico caolinitica (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 2130 \mu\text{m}$

Macinazione	1	2	3	4	5	6	7
Giri mulino	100	71	96	113	111	96	91
Durata macinazione	1'26"	1'01"	1'22"	1'37"	1'35"	1'22"	1'18"
Setacciatura							
peso > 100 μm (g)	819,2	986,6	955,8	908,4	873,8	901,0	912,8
peso < 100 μm (g)	461,8	292,8	321,6	368,6	403,6	378,2	363,6
totale (g)	1281,0	1279,4	1277,4	1277,0	1277,4	1279,2	1276,4
Ricarica (g)	460,2	292,8	323,6	371,0	405,6	378,4	366,6
Carica circolante (%)	178,0	337,0	295,4	244,9	215,4	238,1	249,0
Passante teorico (g)	327,7	394,6	382,3	363,4	349,5	360,4	365,1
G_{bp} (g/numero giri)	4,60	4,11	3,37	3,27	3,65	3,95	4,02

Tabella 5.10: Dati relativi alle macinazioni del materiale.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 3,99$ g/numero di giri

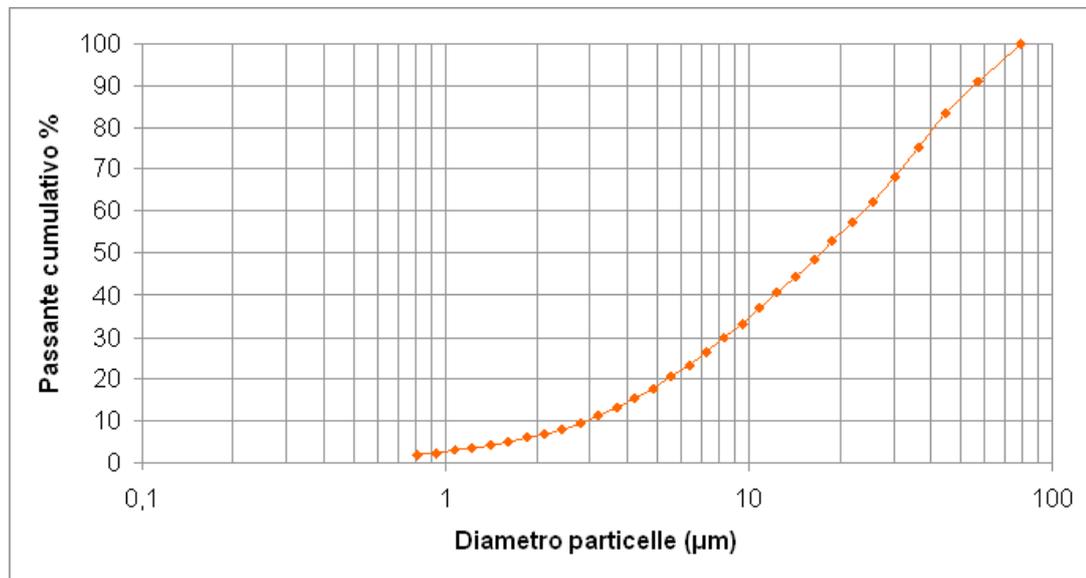


Figura 5.20: Curva granulometrica argilla illitico caolinitica (frazione < 100 μm).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 39,9$ μm

Indice di Bond calcolato: $W_i = 4,00$ kWh/t

5.1.6 Mix



Figura 5.21: Mix di tutti i materiali analizzati.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 1142,0 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	72,5	22,3	22,3	77,7
750	60,9	18,8	41,1	58,9
400	40,3	12,4	53,5	46,5
200	57,9	17,8	71,3	28,7
100	36,3	11,2	82,5	17,5
< 100	57,0	17,5	100,0	0,0
Totale	-	324,9	100,0	-

Tabella 5.11: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del mix.

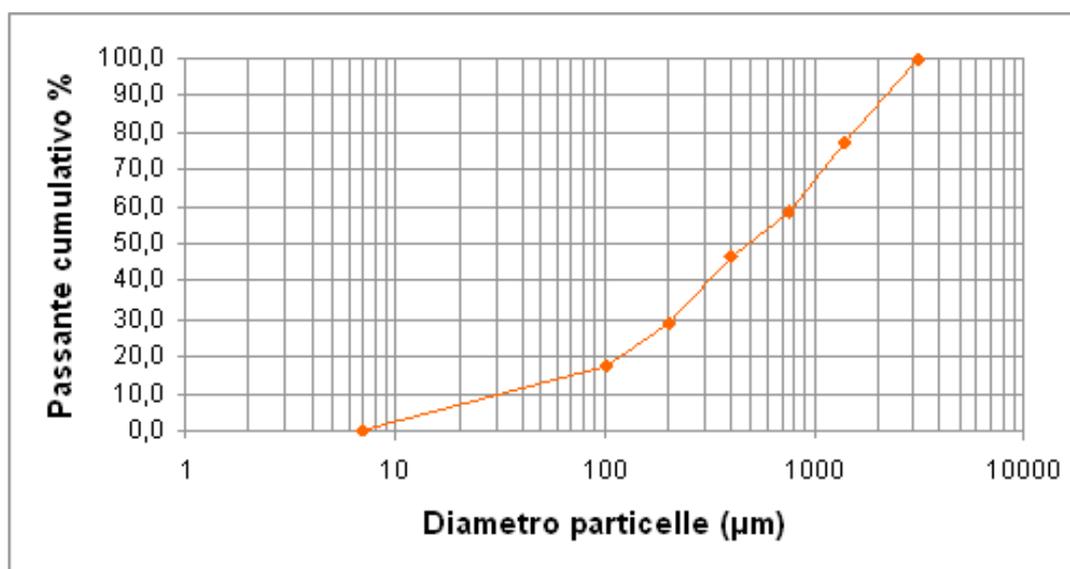


Figura 5.22: Curva granulometrica del mix.

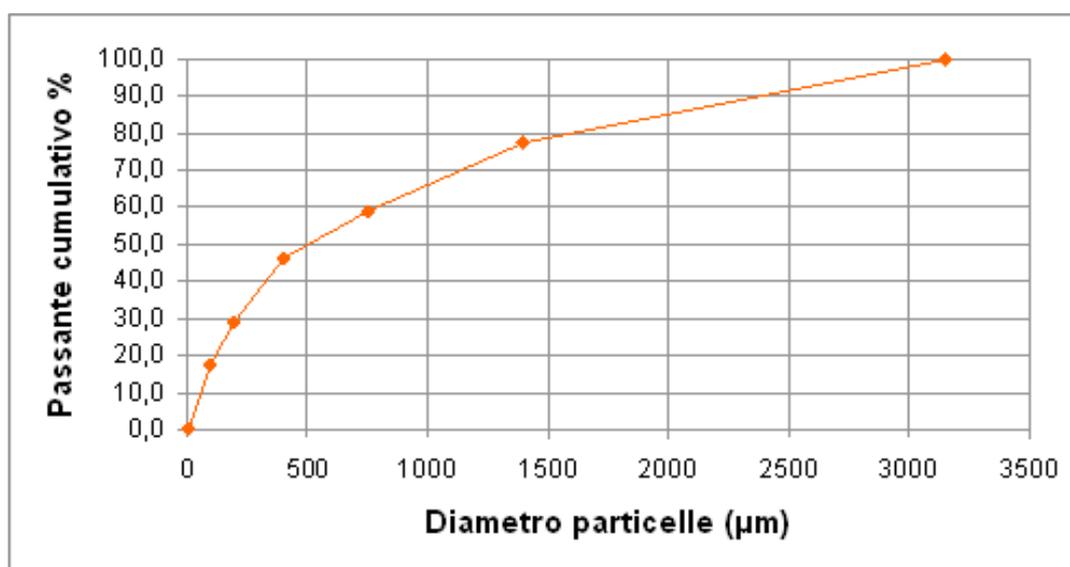


Figura 5.23: Curva granulometrica del mix (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 1610 \mu m$

Macinazione	1	2	3	4	5	6	7
Giri mulino	100	83	125	115	147	154	150
Durata macinazione	1'26"	1'11"	1'47"	1'38"	2'06"	2'12"	2'09"
Setacciatura							
peso > 100 μm (g)	771,6	901,0	796,0	870,0	827,2	810,0	814,0
peso < 100 μm (g)	366,2	237,8	344,8	268,0	311,2	329,0	325,8
totale (g)	1137,8	1138,8	1140,8	1138,0	1138,4	1139,0	1139,8
Ricarica (g)	370,4	241,0	346,0	272,0	314,8	332,0	328,0
Carica circolante (%)	208,3	373,9	230,1	319,9	262,8	244,0	248,2
Passante teorico (g)	308,6	360,4	318,4	348,0	330,9	324,0	325,6
G_{bp} (g/numero giri)	3,70	2,89	2,78	2,37	2,15	2,15	2,18

Tabella 5.12: Dati relativi alle macinazioni del mix.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 2,16$ g/numero di giri

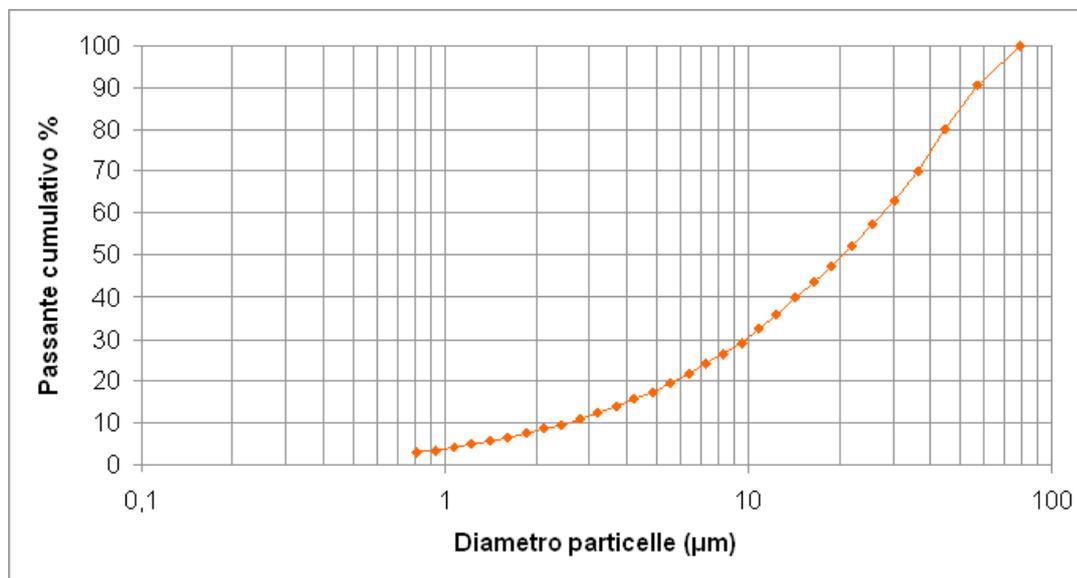


Figura 5.24: Curva granulometrica del mix (frazione < 100 μm).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 44,0$ μm

Indice di Bond calcolato: $W_i = 7,17$ kWh/t

5.1.7 Mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica



Figura 5.25: Mix di feldspato sodico e argilla illitico caolinitica.

Massa corrispondente a 700 cm^3 di materiale: $M = 1290,5 \text{ g}$

Dimensione scelta per il taglio della frazione fine: $P_i = 100 \mu\text{m}$

Dimensione maglia setaccio (μm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
3150	0,0	0,0	0,0	100,0
1400	115,6	36,8	36,8	63,2
750	58,0	18,4	55,2	44,8
400	27,8	8,8	64,1	35,9
200	33,2	10,6	74,6	25,4
100	23,0	7,3	81,9	18,1
< 100	56,8	18,1	100,0	0,0
Totale	-	314,4	100,0	-

Tabella 5.13: Dati relativi alla costruzione della curva granulometrica del mix feldspato/argilla.

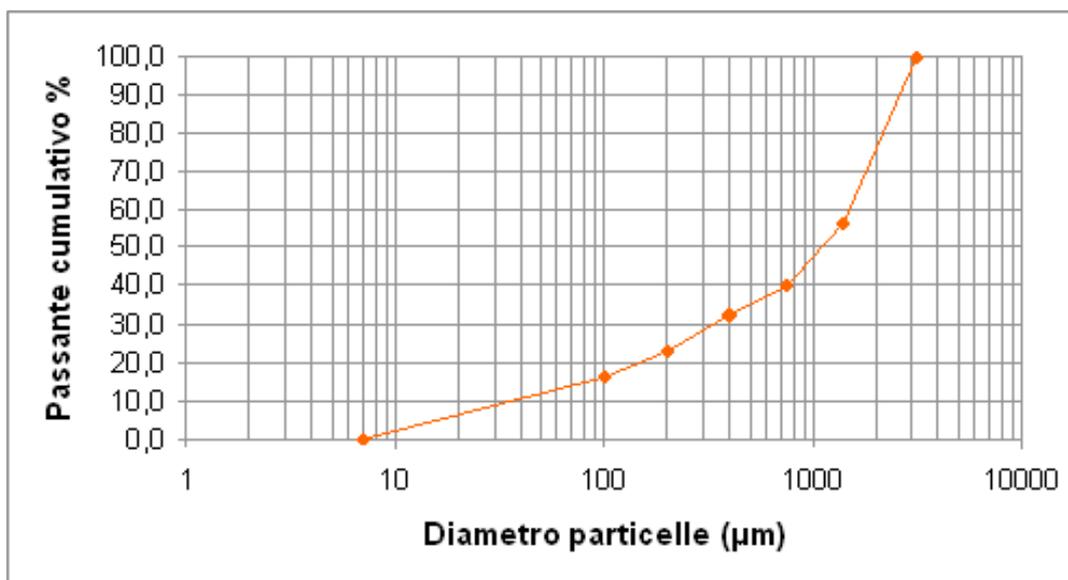


Figura 5.26: Curva granulometrica del mix feldspato/argilla.

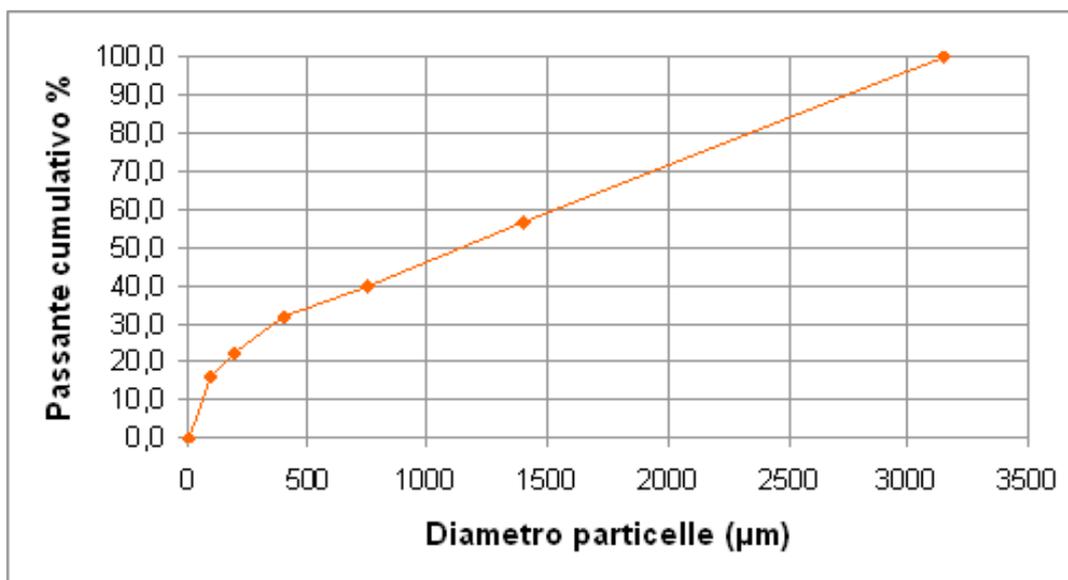


Figura 5.27: Curva granulometrica del mix feldspato/argilla (scala lineare).

Valore dell' F_{80} estrapolato dalla curva granulometrica: $F_{80} = 2200 \mu m$

Macinazione	1	2	3	4	5	6	7
Giri mulino	100	100	152	188	180	177	178
Durata macinazione	1'26"	1'26"	2'10"	2'41"	2'35"	2'31"	2'32"
Setacciatura							
peso > 100 μm (g)	921,2	1021,8	975,0	911,2	916,4	923,2	926,2
peso < 100 μm (g)	370,2	266,4	313,8	376,6	371,8	364,8	361,8
totale (g)	1291,4	1288,2	1288,8	1287,8	1288,2	1288,0	1288,0
Ricarica (g)	369,3	268,7	315,5	379,3	374,1	367,3	364,3
Carica circolante (%)	249,4	380,3	309,0	240,2	245,0	251,3	254,2
Passante teorico (g)	368,5	408,7	390,0	364,5	366,6	369,3	370,5
G_{bp} (g/numero giri)	3,69	2,69	2,08	2,02	2,08	2,08	2,05

Tabella 5.14: Dati relativi alle macinazioni del mix feldspato/argilla.

Valore di G_{bp} ottenuto: $G_{bp} = 2,07$ g/numero di giri

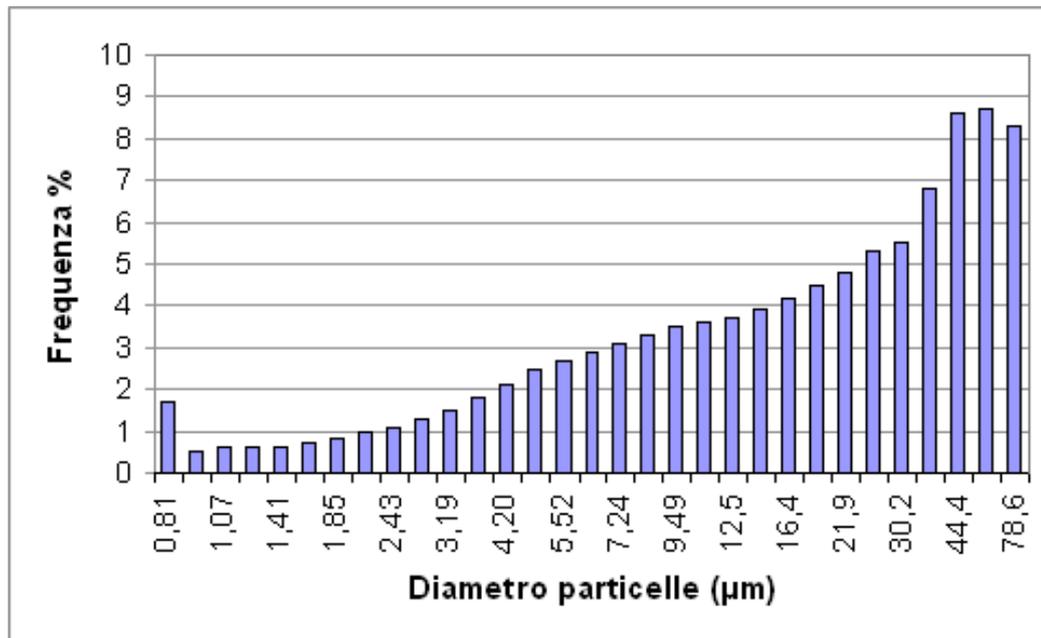


Figura 5.28: Curva di frequenza % del mix feldspato/argilla (frazione < 100 μm), prima macinazione.

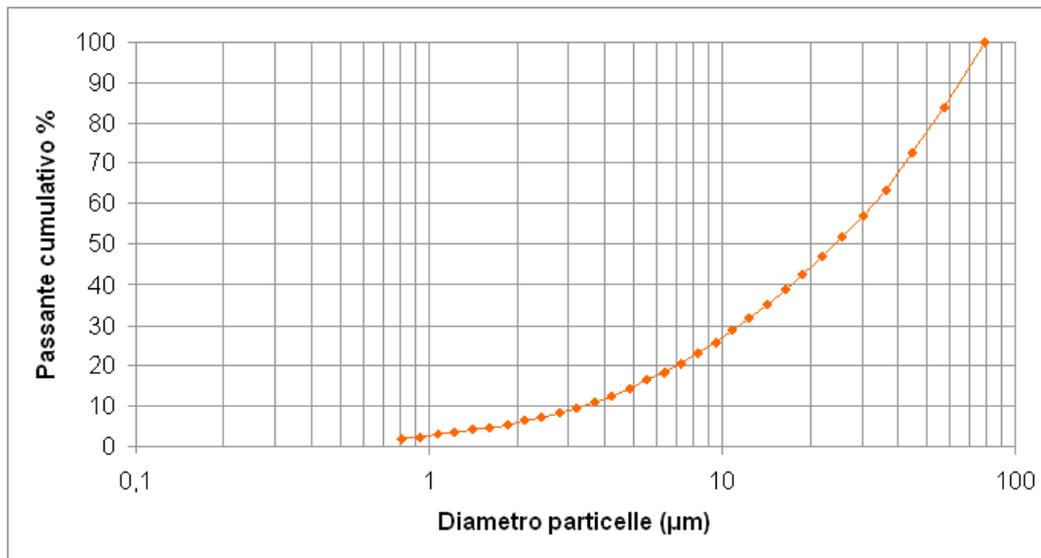


Figura 5.29: Curva granulometrica del mix feldspato/argilla (frazione < 100 μm).

Valore del P_{80} misurato con il granulometro laser: $P_{80} = 51,5 \mu m$

Indice di Bond calcolato: $W_i = 7,92 kWh/t$

5.2 Indici di Bond ottenuti con la procedura rapida e calcolo degli errori

I valori riportati nella tabella seguente sono quelli già precedentemente determinati¹.

Materiale	G_{bp} (g/numero giri)	Indice di Bond (kWh/t)
Feldspato potassico	1,71	10,0
Feldspato sodico	1,13	13,1
Sabbia feldspatica	1,16	12,4
Argilla bentonitica	1,38	9,3
Argilla illitico caolinitica	2,78	4,7
Argilla filtropressata	12,85	1,4
Mix	2,29	6,8

Tabella 5.15: Dati dei G_{bp} e degli indici di Bond ottenuti con la prova rapida.

Nella tabella seguente si riportano i valori dei work index, relativi alla prova standard di Bond, che sono stati determinati sperimentalmente per poter effettuare il calcolo degli errori relativi rispetto alla procedura rapida di Magdalinovic.

Materiale	G_{bp} (g/numero giri)	Indice di Bond (kWh/t)
Feldspato potassico	1,86	9,6
Feldspato sodico	1,39	11,8
Sabbia feldspatica	1,25	12,3
Argilla bentonitica	1,85	7,8
Argilla illitico caolinitica	3,99	4,0
Mix	2,16	7,2
Mix (feldspato/argilla)	2,07	7,9

Tabella 5.16: Dati dei G_{bp} e degli indici di Bond ottenuti con la prova standard.

¹v. tesi di Beatrice Daghia

Si riportano gli errori relativi riferiti alla procedura rapida rispetto alla prova standard:

Materiale	Errore (%)
Feldspato potassico	4,0
Feldspato sodico	11,0
Sabbia feldspatica	0,5
Argilla bentonitica	18,9
Argilla illitico caolinitica	16,4
Mix	6,3

Tabella 5.17: Gli errori relativi degli indici di Bond ottenuti con la procedura rapida.

Per quanto riguarda il calcolo degli errori relativi, riportati in tabella 5.17, è stata applicata la seguente espressione:

$$\Delta = \frac{W_{i,standard} - W_{i,rapida}}{W_{i,standard}} \quad (5.1)$$

Come si può osservare dai risultati ottenuti non è possibile confermare quanto riportato in letteratura riguardo alla possibilità di ricadere in un errore relativo minore o uguale al 7%; in alcuni casi, infatti, il dato ottenuto supera anche di molto quello di riferimento. Quello che si può osservare è che i risultati che più si discostano da quelli attesi sono quelli relativi all'argilla illitico caolinitica e all'argilla bentonitica. Materiali di questo tipo sono sicuramente più difficili da trattare rispetto a qualsiasi altra materia prima analizzata: l'elevata percentuale di frazione fine di cui sono composti e l'elevata umidità che li caratterizza possono essere fattori che incidono negativamente sull'esito delle prove effettuate.

Provando a confrontare i valori relativi alle due procedure con quelli riportati in letteratura è tuttavia facile riscontrare che la procedura rapida tende a stimare per eccesso il valore di work index di un materiale, i valori della procedura standard potrebbero quindi essere quelli che più si avvicinano al caso reale. Resta da verificare se la prova rapida di Magdalinovic, applicata ai materiali argillosi, possa portare a risultati interessanti o sia caratterizzata da un errore troppo alto che la rende non applicabili a casi di questo tipo.

5.3 Prova di perdita al fuoco

La prova di perdita al fuoco permette di valutare la percentuale di calo ponderale che un campione di materiale subisce quando viene portato ad una temperatura di 1050 °C. Nel caso in esame si è analizzato un mix di due materiali costituito dal 50% di feldspato sodico e da una stessa percentuale di argilla illitico caolinitica. Questa prova viene compiuta per verificare se la frazione argillosa presente nell'impasto si macini più velocemente della restante parte: una duplice causa della rottura del materiale può essere infatti ricondotta all'azione delle sfere del mulino e alla presenza nel mix di una componente dura come il feldspato sodico. Il verificarsi di un fenomeno di questo tipo andrebbe a spiegare la discrepanza rilevata tra l'indice di Bond determinato sperimentalmente e il rispettivo valore ottenuto facendo la media pesata dei work index dei singoli materiali che compongono l'impasto.

Temperatura di prova: 1050 °C		
Campione	% di perdita al fuoco	% argillosi
Feldspato sodico	2,85	-
Argilla illitico caolinitica	7,05	-
Mix 50 : 50 feldspato/argilla	4,40	50,00
< 100 prima macinazione (100 giri)	6,35	72,20
< 100 seconda macinazione (100 giri)	6,00	68,15
< 100 terza macinazione (152 giri)	5,62	63,85
< 100 quarta macinazione (188 giri)	5,30	60,28
< 100 quinta macinazione (180 giri)	5,14	58,48
< 100 sesta macinazione (177 giri)	5,10	57,97
< 100 settima macinazione (178 giri)	5,01	56,98
> 100 settima macinazione (178 giri)	3,35	38,13

Tabella 5.18: Dati relativi alla prova di perdita al fuoco.

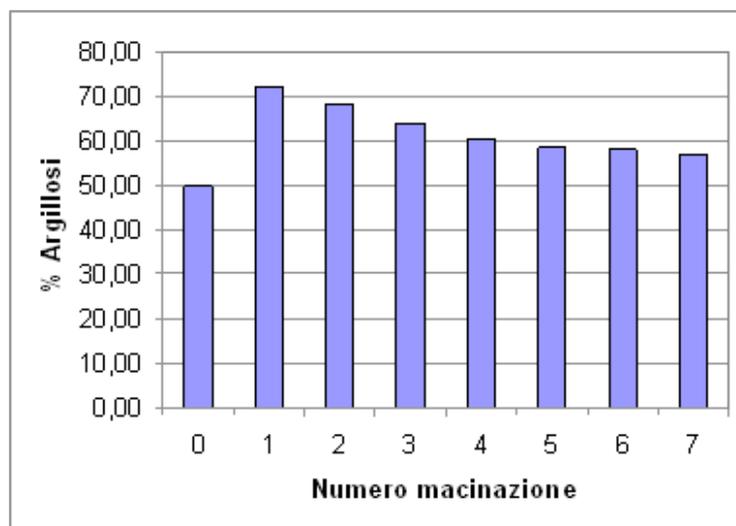


Figura 5.30: La percentuale di argillosi in funzione del numero di macinazione.

Nella tabella 5.18 sono stati riportati i risultati della prova di perdita al fuoco effettuata presso il Centro Ceramico di Bologna. I dati ottenuti avrebbero un valore quantitativo se il feldspato utilizzato fosse privo di perdita al fuoco, così come in effetti ci si aspetta da un feldspato teorico (il feldspato turco commerciale ha ad esempio una *P.F.* trascurabile e pari al 0,2 – 0,3%). In questo caso, il feldspato impiegato nella composizione dell'impasto oggetto di studio, ha una *P.F.* non irrilevante che si attesta attorno al 2,85%. I risultati ottenuti assumono quindi un significato solo qualitativo e possono essere utilizzati come indicativi di un certo andamento. A questo proposito è sicuramente possibile attribuire l'incremento della perdita al fuoco nelle diverse macinazioni, rispetto al valore riferito al mix 50:50 e pari a 4,40%, ad un probabile arricchimento nella frazione argillosa. Con il progressivo avanzamento della prova di Bond la % di argillosi è iniziata a calare perchè contemporaneamente all'argilla ha iniziato a macinarsi anche il feldspato: l'attenuarsi del fenomeno riscontrato è proprio dovuto alla diluizione della frazione fine argillosa con quella invece proveniente dalla componente feldspatica. Le percentuali riportate nell'ultima colonna della tabella 5.18 sono state ottenute considerando una proporzionalità diretta tra la *P.F.* e la % di argillosi. Per la prima macinazione, ad esempio, è stata impostata una proporzione del tipo:

$$4,40 : 50,00 = 6,35 : x$$

da cui si ottiene $x = 72,20\%$.

Dal grafico 5.30 si può osservare come la % di argillosi diminuisca dalla 1^a alla 7^a macinata: si passa infatti da una percentuale iniziale pari a circa 70% ad una finale attorno al 50%. Ciò che si può quindi concludere è che la frazione argillosa dell'impasto si macina effettivamente prima di quella più dura di feldspato e risulta quindi essere verificata l'ipotesi iniziale legata alla diversa velocità di macinazione dei componenti dell'impasto.

Conclusioni

I dati ottenuti dalle prove di laboratorio portano ad interessanti conclusioni riguardo ad alcuni obiettivi che ci si era prefissati di raggiungere all'inizio di questo lavoro di tesi; i risultati sperimentali raggiunti si possono osservare in modo dettagliato nel capitolo 5.

La determinazione sperimentale del work index dei materiali analizzati, ottenuto attraverso la prova standard di macinabilità di Bond, ha permesso di poter effettuare un confronto con quelli riferiti alla procedura rapida di Magdalinovic. Un esito non del tutto positivo si è avuto proprio da un confronto di questo tipo (paragrafo 5.2): osservando la differenza tra i valori ottenuti con le due tecniche, si nota che per alcune materie prime si è ottenuto un errore relativo molto inferiore a quello massimo riportato in letteratura (7%), tuttavia per i materiali di tipo argilloso si è avuto un riscontro opposto. Un risultato di questo tipo porta a concludere che la prova di Magdalinovic apporti sicuramente diversi vantaggi dal punto di vista della rapidità e di una minore complessità della prova, ma d'altro canto dia come risultati stime non del tutto precise dei work index di alcuni materiali.

Ciò che ha portato a considerare maggiormente corretti i dati della prova standard di Bond rispetto agli altri sono i valori di massima riportati in letteratura riguardo agli indici di Bond delle argille. Si deve anche notare che una prova lunga e impegnativa quale la procedura standard di Bond non può essere sicuramente considerata un facile mezzo per la determinazione sperimentale del work index di un materiale: a livello industriale sarebbe impensabile potersi basare su un test che richiede diversi giorni di prova, un lavoro di manodopera non indifferente e che presenta una certa predisposizione a fare incappare l'operatore in errori

procedurali. Nonostante la procedura rapida di Magdalinovic dia risultati meno precisi rimane comunque la via più facile e veloce per giungere al work index di una materia prima.

Un secondo aspetto, emerso dal lavoro qui illustrato, riguarda lo studio di un impasto di più materiali (mix) e in particolare un'ipotesi nata con l'idea di riuscire a spiegare la discrepanza rilevata tra l'indice di Bond di un impasto determinato sperimentalmente e quello ottenuto a partire da una media pesata dei singoli indici dei materiali che lo compongono. Un calcolo di questo tipo non può infatti essere effettuato in quanto fornisce risultati non del tutto soddisfacenti: l'indice di Bond del mix di sei materie prime determinato sia con la prova standard ($7,2 \text{ kWh/t}$) che con la prova rapida ($6,8 \text{ kWh/t}$) risultava essere sempre inferiore a quello calcolato a partire dalla media pesata dei work index dei materiali ($8,5 \text{ kWh/t}$). Da quanto emerso nei paragrafi 5.3 e 5.1.7 si evidenzia come l'analisi della perdita al fuoco su un impasto studiato appositamente (feldspato sodico e argilla illitico caolinitica) e la curva granulometrica della frazione fine della prima macinata di questo mix confermino l'ipotesi che una media dei singoli work index dei materiali fornisca una stima per eccesso dell'indice cercato. Ciò accade perchè miscelando materiali duri come i feldspati assieme a materie prime morbide come le argille si determina un meccanismo di diversa velocità di macinazione delle seconde rispetto ai primi: le frazioni argillose tendono cioè a macinarsi prima delle componenti feldspatiche. Il work index medio tende a comprendere al suo interno anche una frazione di energia che nella realtà non viene effettivamente assorbita dal mulino. Un contributo alla riduzione dimensionale dell'impasto deve essere attribuita al lavoro realizzato dai materiali duri che sono presenti all'interno dell'impasto stesso e la argille, in definitiva, non vengono macinate solo dalle sfere della macchina, ma subiscono un ulteriore processo di rottura dovuto alla presenza di feldspati. Per riepilogare come si è riusciti a giungere ad un risultato di questo tipo si riassumono di seguito le due verifiche effettuate:

- attraverso la prova della perdita al fuoco si è potuto valutare la percentuale di arricchimento della frazione argillosa in funzione del numero di macinazioni previste della prova standard di Bond. In seguito alla più rapida

macinazione delle argille rispetto ai feldspati si è visto che tale % cresce da un valore iniziale pari a 50,00% ad uno rilevato subito dopo la prima macinata corrispondente al 72,20%. Con l'avanzamento della prova si è osservato un progressivo calo dell'arricchimento degli argillosi fino al raggiungimento, al termine del test, di una percentuale pari al 56,98%. Ciò che determina un andamento di questo tipo è la progressiva diluizione della frazione fine argillosa con quella dei rispettivi feldspati che iniziano a macinarsi;

- effettuando l'analisi al laser della frazione fine, corrispondente alla granulometria di dimensione inferiore a $100\ \mu m$, si è potuto osservare come il profilo rilevato sia quello di una curva bimodale: la presenza di due picchi, uno relativo all'argilla ed uno relativo ai feldspati, è servita come ulteriore verifica del fatto che materiali teneri e materiali duri tendano a macinarsi con differenti velocità.

Sviluppi futuri di questo lavoro sono volti ad approfondire meglio il rapporto esistente tra la prova standard di Bond e la procedura rapida di Magdalinovic, in riferimento soprattutto all'errore relativo tra i risultati. In particolare, si ritiene necessario focalizzare l'attenzione sui materiali argillosi che più di tutti, in questa sede, hanno mostrato un comportamento non del tutto coerente con quello atteso.

Bibliografia

- [1] A. Bonoli, F. Ciancabilla, S. Fabbri. *La comminuzione dei minerali*. Quarry and Construction, 1986.
 - [2] A. Bonoli. *Macinazione dei minerali ed energia: presupposti teorici ed osservazioni sperimentali*, 1986.
 - [3] M. Bringiotti. *Frantoi & Vagli*. PEI, 2002.
 - [4] F. C. Bond. *Crushing & grinding calculations*, Part I. British Chemical Engineering, 1951.
 - [5] N. Magdalinovic. *A procedure for rapid determination of the Bond work index*. International Journal of Mineral processing, 1989.
 - [6] B. Daghia. *Studio sperimentale sull'energia di macinazione attraverso la determinazione dell'indice di Bond per un impasto ceramico*, 2008.
 - [7] J. Levin. *Observations on the Bond standard grindability test, and a proposal for standard grindability test for fine materials*. Journal of the south african institute of mining and metallurgy, 1989.
 - [8] V. Deniz, H. Ozdag. *A new approach to Bond grindability and work index: dynamic elastic parameters*. Minerals Engineering, 2003.
- Siti internet consultati:
- [9] Sito web REFIN ceramiche, www.refin.it
 - [10] Sito web sul Grès Porcellanato, www.gresporcellanato.biz

Ringraziamenti

I ringraziamenti credo siano la parte più bella di una tesi perchè permettono di ripercorrere tutte le fasi che hanno portato alla realizzazione di un lavoro e in questo caso anche alla conclusione di un percorso. Proprio ora che il traguardo si sta per avvicinare mi accorgo sempre più di quanto sia stato prezioso il contributo di tutte le persone che ho avuto accanto e con cui ho avuto il piacere di collaborare.

Per cominciare ringrazio la prof.ssa Alessandra Bonoli che mi ha dato l'opportunità di intraprendere questo lavoro tanto bello quanto faticoso, la possibilità di compiere uno studio sperimentale all'interno di un laboratorio è stata davvero un'esperienza di cui sentivo il bisogno perchè mi ha permesso di ritrovare quegli stimoli che la "stanchezza" accumulata sui libri negli ultimi esami aveva un po' offuscato. Più di ogni altra cosa credo che ricorderò con piacere la gentilezza e disponibilità che hanno contribuito a rendere particolarmente sereno questo periodo di tesi, insieme alla capacità di trovar sempre anche solo istante per poter seguire in prima persona l'avanzamento del lavoro.

Un ringraziamento non meno importante va ai collaboratori del Centro Ceramico di Bologna, in particolare all'Ing. Guido Nasseti, alla dott.ssa Adelia Albertazzi e al dott. Maurizio Magagnoli. La grande competenza messa a disposizione ha permesso di ottenere ottimi risultati così come la celerità nello svolgimento delle prove presso i loro laboratori è stata di fondamentale importanza quando le cose da fare erano ancora tante e il tempo a disposizione davvero poco.

Un contributo fondamentale alla buona riuscita della parte sperimentale di questa

tesi va sicuramente attribuito ai tecnici del Laboratorio di Georisorse e Geotecnologie del Dipartimento DICMA della Facoltà di Ingegneria di Bologna. Vorrei ringraziare infinitamente Celso Vescogni, Fausto Peddis e Barbara Ravaglia per avermi costantemente seguito durante tutta la realizzazione delle prove e per essere riusciti con pazienza a porre rimedio a tutti i più improbabili guasti dei macchinari utilizzati. Senza il loro aiuto il lavoro non sarebbe andato molto avanti.

Credo sia giusto aggiungere un piccolo ringraziamento a Valentina con cui ho avuto il piacere di condividere questo ultimo mese di laboratorio. Il suo aiuto è stato molto gradito sia nella realizzazione delle prove di microdurezza che in quelle fasi della macinazione in cui essere in due faceva la differenza.

Una parte di questo lavoro la vorrei infine dedicare a tutti i miei compagni di università che hanno reso questi anni di studio davvero piacevoli. In particolare vorrei ringraziare Beatrice per aver effettuato un passaggio di consegne a regola d'arte ed aver quindi facilitato fin dall'inizio la realizzazione di questo lavoro.