

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 LA COMMINUZIONE	3
1.1 Definizione ed obiettivi	3
1.2 Parametri fondamentali	4
1.2.1 Curve granulometriche	4
1.2.2 Rapporto di riduzione	5
1.2.3 Forze in gioco	6
1.2.4 Energia di comminuzione	7
2 LA MACINAZIONE	8
2.1 Introduzione	8
2.2 Mulini	10
2.2.1 Mulini continui e discontinui	12
2.3 Potenza di macinazione	15
3 LEGGI ENERGETICHE	18
3.1 Introduzione	18
3.2 Legge di Rittinger	19
3.2 Legge di Kick	20
3.3 Legge di Charles	21
3.4 Legge di Bond	24
4 II GRES PORCELLANATO	30
4.1 Introduzione	30
4.2 Caratteristiche tecniche	31
4.3 Campi di utilizzo	33
4.4 Composizione e materie prime	34
4.5 Impasto analizzato	35
5 PROVE DI LABORATORIO	37
5.1 Strumentazione	37
5.1.1 Mulino a sfere	37
5.1.2 Setacciatrice meccanica	38
5.1.3 Granulometro laser	39
5.2 Tipologie di prova	40
5.2.1 Procedura standard	41
1) Preparazione del materiale	41
2) Macinazione e setacciatura	42
3) Analisi al laser	44
5.2.2 Procedura breve	45
5.2.2.1 Teoria di base	45
5.2.2.2 Descrizione pratica della prova	49
1) Preparazione del materiale	49
2) Macinazione	50
3) Analisi laser	52
6 CONFRONTO NUMERICO FRA LE PROCEDURE	53

6.1 Introduzione	53
6.2 Dati ottenuti con la procedura standard	54
6.3 Dati ottenuti con la procedura rapida.....	55
6.3 Calcolo dei work index e confronto	55
7 I SINGOLI MATERIALI	57
7.1 Introduzione	57
FELDSPATO POTASSICO.....	58
ARGILLA ILLITTICO-CAOLINITICA.....	60
FELDSPATO SODICO	62
SABBIA FELDSPATICA	64
ARGILLA FILTROPRESSATA	66
ARGILLA BENTONITICA	68
7.2 Considerazioni finali	70
8 CONCLUSIONI.....	72
BIBLIOGRAFIA	74
Siti internet.....	75

INTRODUZIONE

Nel seguente elaborato tratteremo in linea generale dei processi di comminazione ed in modo particolare della fase di macinazione degli stessi e della ricerca del quantitativo energetico ad essa legato. Si introdurranno concetti generici riguardo ai minerali, alle loro caratteristiche, ed ai parametri richiesti per la lavorazione nell'industria ceramica. Infine particolare spazio sarà dedicato alla descrizione delle prove di macinazione, svolte presso il Laboratorio di Georisorse e Geotecnologie del dipartimento del DICMA dell'Università di Bologna, ed alla presentazione dei risultati ottenuti.

Lo scopo che ci si prefigge è quello di confrontare due diverse metodologie per la determinazione del work index di Bond e, una volta individuata quella più conveniente, di applicarla ad una serie di materiali utilizzati nell'industria ceramica. Determinati in questo modo i work index corrispondenti si vuole verificare se esiste una correlazione con il work index totale della particolare tipologia di impasto ceramico che essi costituiscono.

Uno studio di questo genere risulta di effettivo aiuto pratico nella progettazione e realizzazione di impianti su larga scala, soprattutto per quanto riguarda l'aspetto della potenza di installazione e il punto di vista economico sul dispendio energetico. Sarebbe quindi auspicabile, apportando le dovute correzioni, l'utilizzo dei risultati ottenuti al fine di dimensionare in maniera opportuna un mulino di macinazione che tratti questo tipo di impasto.

Di seguito si riporta un breve riassunto dei contenuti dell'elaborato suddivisi per capitoli:

- Capitolo 1: si descrivono brevemente il processo di comminazione e i suoi scopi e si riportano alcuni concetti utili nell'ambito del trattamento delle rocce e dei minerali;
- Capitolo 2: si entra più nel dettaglio nella descrizione dell'operazione di macinazione, presentando le macchine di lavorazione utilizzate e contemplando le varie tecniche esistenti;
- Capitolo 3: in questo capitolo si approfondisce il concetto di energia di macinazione e viene presentata una breve panoramica delle diverse teorie

energetiche che nel corso degli anni si sono susseguite in tale ambito alla ricerca continua di miglioramento e di un'espressione valida in senso più generale. In particolare ci si sofferma sulla descrizione della teoria utilizzata anche nelle prove pratiche di laboratorio, ovvero la teoria di Bond;

- Capitolo 4: si descrive nello specifico il grès porcellanato, materiale ceramico ricavato dall'impasto costituito dai materiali analizzati;
- Capitolo 5: dopo una breve presentazione della strumentazione utilizzata si passa ad descrizione minuziosa del procedimento pratico delle diverse tipologie di prove effettuate.
- Capitolo 6: si riportano i risultati ottenuti per l'impasto di grès porcellanato con le diverse procedure e si effettua un confronto critico che giustifichi la scelta della tipologia utilizzata poi sui singoli materiali;
- Capitolo 7: si riportano i dati derivanti dall'applicazione della procedura rapida ai singoli materiali, suddivisi per tipologia di materiale ed organizzati secondo tabelle ed infine il calcolo vero e proprio del work index.
- Capitolo 8: si conclude con una riflessione sui risultati ottenuti e sull'effettiva possibilità di applicazione pratica degli stessi.

1 LA COMMINUZIONE

1.1 Definizione ed obiettivi

Con il termine generale di comminuzione si intende l'insieme delle operazioni il cui scopo è quello di realizzare una riduzione dimensionale di un qualche materiale, in particolar modo dei minerali.

Gli obiettivi che la comminuzione si prefigge sono molteplici e dettati da esigenze diverse, tuttavia possiamo riassumerli come segue:

- in primis la liberazione delle singole specie mineralogiche e quindi la separazione dei minerali utili da quelli considerati sterili, utilizzando i metodi più idonei di arricchimento. È questo il caso classico che riguarda la massima parte dei minerali di prima categoria.
- la riduzione delle dimensioni al fine di produrre materiali che abbiano una loro destinazione commerciale. La vendita risulta possibile solo a seguito di un'operazione di classificazione che consente la suddivisione del materiale in gruppi commerciabili. Citiamo come esempio la produzione delle varie classi di inerti (pietrisco, pietrischetto, sabbie).
- l'ottenimento di un materiale le cui caratteristiche favoriscano lo svolgimento di operazioni industriali successive (ulteriori processi di comminuzione o processi di concentrazione) o si adattino a particolari esigenze commerciali (talco, barite, corindone, ecc).

I vari processi che costituiscono nel loro insieme la comminuzione si possono distinguere sulla base dell'intervallo dimensionale entro il quale agiscono, ovvero a seconda delle dimensioni del prodotto in ingresso e delle dimensioni del prodotto finito. Possiamo individuare essenzialmente due gradi di comminuzione:

- **la frantumazione**; il materiale in entrata è molto grossolano, spesso proveniente direttamente dalla cava, in questo caso i blocchi in entrata sono di pezzatura anche dell'ordine del metro mentre in uscita si ottengono blocchi dell'ordine del centimetro;

- **la macinazione;** riduzione dimensionale piuttosto spinta per ottenere elevati gradi di finezza, da blocchi con pezzatura dell'ordine del centimetro circa fino a blocchi micrometrici, o, talvolta, anche oltre.

La comminazione è un'operazione fortemente energivora, sia nella sua fase primaria di frantumazione che nella fase successiva di macinazione. Tali operazioni infatti assorbono e dissipano elevati quantitativi di energia, comportando un elevato dispendio energetico per unità di prodotto.

Nella trattazione che seguirà ci occuperemo essenzialmente dei soli processi di macinazione e di come quantificare il dispendio energetico ad essa connesso tramite le leggi di comminazione. Tali leggi, altrimenti dette leggi energetiche, sono state sviluppate a partire da metà del XIX secolo e si sono evolute negli anni con l'intento di affinare la precisione del calcolo energetico e di riuscire a coglierne una trattazione valida in senso generale ed indipendente dalle condizioni sperimentali utilizzate. In particolar modo ci occuperemo della legge di Bond e della determinazione del work index di alcuni materiali utilizzati nell'industria ceramica.

1.2 Parametri fondamentali

Prima di addentrarci nella trattazione vera e propria risulta necessario definire alcuni strumenti e parametri fondamentali per la caratterizzazione e comprensione del processo di comminazione.

1.2.1 Curve granulometriche

Le curve granulometriche sono curve rappresentative della distribuzione granulometrica di un materiale graficate in un diagramma logaritmico "dimensioni particelle - passante cumulativo %". Tanto più una curva risulta espansa orizzontalmente quanto più varia sarà la granulometria del materiale corrispondente, mentre una curva tendente al verticale rappresenta un materiale di dimensioni essenzialmente omogenee.

Le curve granulometriche vengono utilizzate per caratterizzare sia il materiale in entrata sia quello in uscita dai vari processi di comminazione. Per quanto riguarda il prodotto finale della comminazione lo scopo è quello di ottenere un materiale che copra un certo intervallo dimensionale, secondo specifiche richieste di mercato, e quindi un materiale caratterizzato da una minima dispersione attorno ad un determinato valore di diametro medio. La corrispondente curva granulometrica dovrà pertanto risultare tendenzialmente verticale.

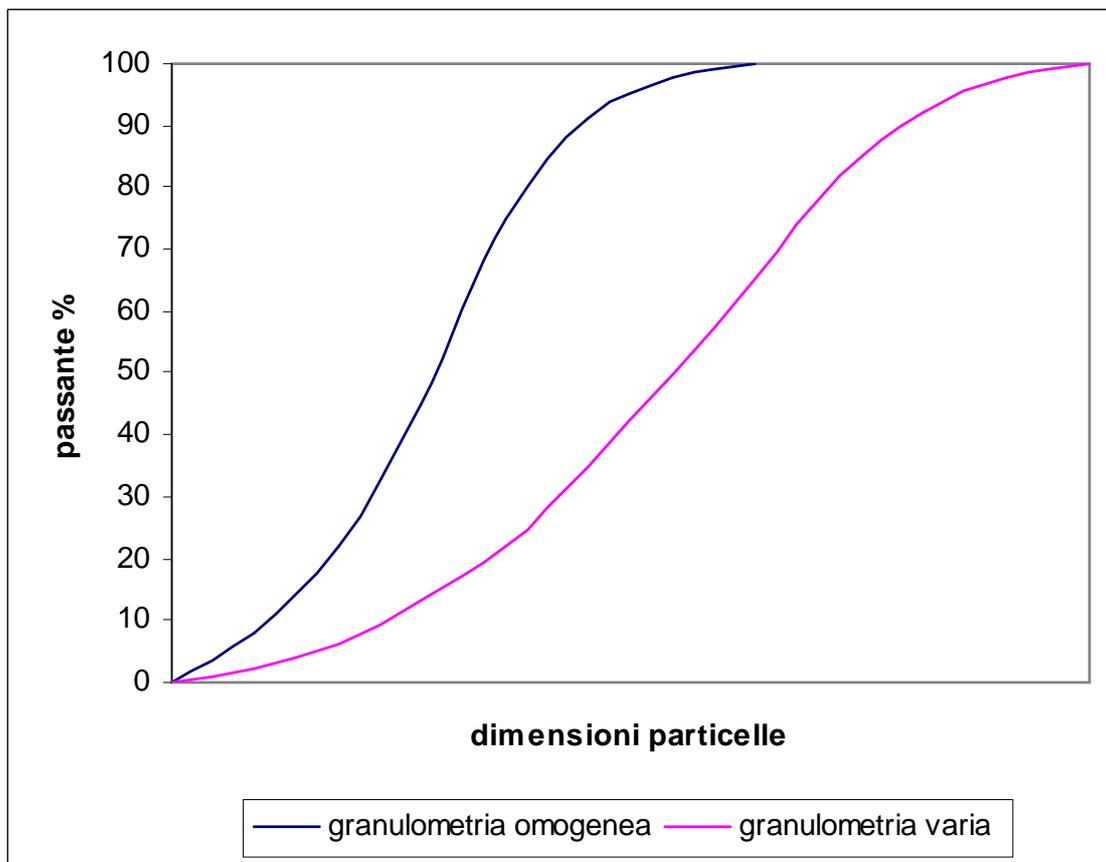


Fig. 1.1 Esempi di curve granulometriche

1.2.2 Rapporto di riduzione

Si definisce come il rapporto fra la dimensione massima del materiale da trattare e quella del materiale trattato.

Tale parametro, usualmente indicato con la lettera "n", è di fondamentale importanza nella scelta della macchina e nell'identificazione del grado di

comminuzione cui si sta lavorando. Nella pratica risulta tuttavia difficile applicare alla lettera la definizione di cui sopra quindi si è soliti fare riferimento alle dimensioni corrispondenti, sulle rispettive curve granulometriche del materiale in entrata ed in uscita, all' 80% del passante cumulato (D_{80} , d_{80}). In alcuni casi si possono utilizzare come riferimento le dimensioni corrispondenti al 95% del passato, avvicinandosi maggiormente alla definizione teorica ma ottenendo un risultato probabilmente meno attendibile.

$$n = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

I rapporti di riduzione caratteristici delle operazioni di macinazione sono più elevati (15-200) rispetto a quelli delle operazioni di frantumazione (4-30), inoltre essi aumentano tanto più la macinazione risulta spinta.

1.2.3 Forze in gioco

Nell'ambito dei processi di comminuzione sono molteplici le forze che intervengono nell'azione di rottura del materiale, in particolar modo possiamo distinguere le seguenti tipologie: compressione, flessione, taglio ed urto. Dipendentemente dal grado di comminuzione che si vuole raggiungere si prediligerà l'azione di un tipo di forza piuttosto che un'altra.

Nel caso in cui lo scopo finale sia la frantumazione del materiale gli sforzi prevalenti sono quelli di compressione e di urto, mentre se lo si vuole macinare entrano in gioco anche sforzi di taglio e di abrasione. La macinazione è tuttavia un fenomeno estremamente complesso, caratterizzato da un insieme molto vario di azioni, e, come tale, difficilmente riconducibile all'interno di una classificazione così semplificata come quella cui stiamo facendo riferimento.

1.2.4 Energia di comminuzione

Si definisce “energia di comminuzione” il lavoro richiesto per ridurre alle dimensioni volute il materiale trattato.

E' necessario chiarire la distinzione fra tale quantitativo e l'energia fornita all'intero sistema di comminuzione. Non tutta l'energia fornita al mulino, o al frantoio, viene infatti utilizzata per la rottura del materiale, ma essa viene dissipata sotto altre forme di energia, spesso in percentuali anche piuttosto consistenti. L'energia di comminuzione, anche detta energia netta, può arrivare a valori del 25-30% rispetto all'energia totale fornita, corrispondenti ad una perdita del 75-80% soprattutto sotto forma di energia termica ed acustica.

2 LA MACINAZIONE

2.1 Introduzione

Come già espresso in precedenza la macinazione costituisce solo una parte del processo di comminazione, e più precisamente la parte che consente la riduzione di rocce e minerali ad elevati gradi di finezza, fino a dimensioni dell'ordine di qualche micron. In altre parole essa consente la realizzazione di un prodotto in grado di essere già direttamente utilizzato dall'industria o essere sottoposto ai successivi trattamenti di arricchimento mineralogico. A sua volta la macinazione stessa è comprensiva di un insieme di processi successivi tra i quali possiamo distinguere nell'ordine:

- 1) **macinazione primaria** per la riduzione di blocchi della dimensione di qualche centimetro in sabbie da 6 a 0,5 mm; caratterizzata da rapporti di riduzione variabili indicativamente fra 15 e 50.
- 2) **macinazione fine o secondaria**, per la riduzione in polveri a dimensioni inferiori, fino a valori del centinaio di micron; caratterizzata da rapporti di riduzione fino a 100 circa.
- 3) **micronizzazione o polverizzazione** (macinazione finissima) per arrivare a particelle aventi dimensioni pari a qualche micron o inferiori. In questo caso i rapporti di riduzione sono ancora più elevati e possono arrivare a 200.

Esistono inoltre due differenti tecniche di macinazione:

- la macinazione a secco, in assenza di acqua;
- la macinazione a umido, in presenza di acqua.

La macinazione a secco si basa sull'impiego di alte pressioni e dispone di sistemi macinanti con proprietà meccaniche in grado di sopportare elevate sollecitazioni. Tale tecnica è la più frequentemente utilizzata e generalmente si usa per l'ottenimento di particelle fini, specialmente di morfologia piatta. Particelle di questo tipo comportano, però, qualche problema nello svolgimento di eventuali

processi successivi di concentrazione. Un ulteriore svantaggio della macinazione a secco è legato alla produzione di un elevato quantitativo di polveri finissime da sovramacinazione; risulta quindi necessario inserire dei macchinari appositi per la loro captazione ed evitarne l'immissione nel sistema di lavoro e il contatto con il personale; a questo proposito, i sistemi utilizzati possono essere tanti, tra cui sono usati, per esempio, separatori a turbina. Si deve inoltre considerare che l'umidità del materiale trattato con macinazione a secco non dovrebbe superare l'1-2%, per umidità superiori è necessario essiccare il solido prima della macinazione.

Una maggiore efficienza rispetto alla macinazione a secco, si può raggiungere attraverso la macinazione a umido che richiede una minore spesa di energia per tonnellata trattata (mediamente il 30 % in meno). Altri vantaggi della tecnica a umido riguardano i minori problemi riscontrati negli eventuali successivi processi di classificazione e l'assenza pressoché totale di polveri (vantaggio anche dal punto di vista economico in quanto si evita l'installazione di sofisticate apparecchiature per l'abbattimento). Alcune difficoltà sono tuttavia connesse alla necessità di realizzare una buona dispersione delle particelle nelle torbide (si utilizzano, quindi, dei prodotti chimici deflocculanti, che, agendo sulla quantità d'acqua presente, permettono di raggiungere dimensioni, per le particelle, anche inferiori al micron, o sicuramente inferiori ai 63 micron, dimensione utile caratteristica per l'industria ceramica), ed a garantire la reversibilità di tale dispersione al fine di assicurare una buona riuscita negli stadi d'ispessimento successivi alla classificazione, per ottenere il duplice scopo della minimizzazione della quantità d'acqua consumata e la massimizzazione del ricircolo del fluido stesso. Chiaramente, i singoli casi vanno esaminati separatamente e possono verificarsi situazioni in cui è necessaria una comminazione con concentrazioni di solido molto basse. Ulteriore inconveniente nella macinazione a umido è costituito dall'usura che interessa sia la struttura del mulino sia i corpi macinanti.

Si vuole comunque sottolineare come tra la macinazione a secco e quella ad umido non esiste possibilità alcuna di competitività o dualismo, anzi le due vie sono da considerarsi alternative e non prioritarie l'una rispetto all'altra.

2.2 Mulini

I processi di macinazione avvengono grazie all'utilizzo di apparecchiature dette mulini. Esistono varie tipologie di mulini che differiscono tra loro principalmente per il tipo di forza con cui lavorano ma generalmente i più utilizzati sono i mulini a sfere o a barre.

Si tratta di macchine cilindriche ad asse orizzontale, ruotanti a velocità elevata, al cui interno è presente una carica macinante che, per effetto di più azioni (compressione, urto, taglio, abrasione, ecc.), riduce le dimensioni del materiale da macinare posto all'interno. Tale tipologia di mulini è caratterizzata da usure e consumi di forza motrice relativamente modesti, è pertanto in grado di ottenere livelli di macinazione spinti anche su materiali particolarmente duri ed abrasivi contenendo i costi a livelli accettabili; può lavorare sia a secco che a umido.

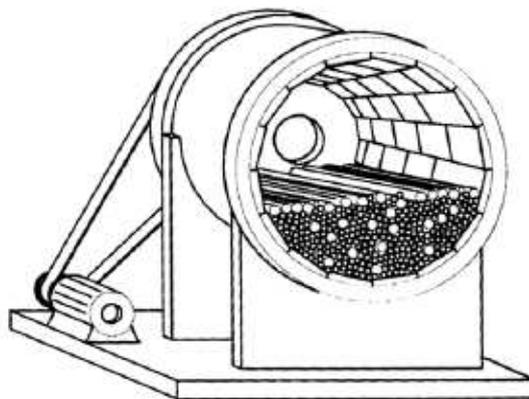


Fig. 2.1 mulino a barre

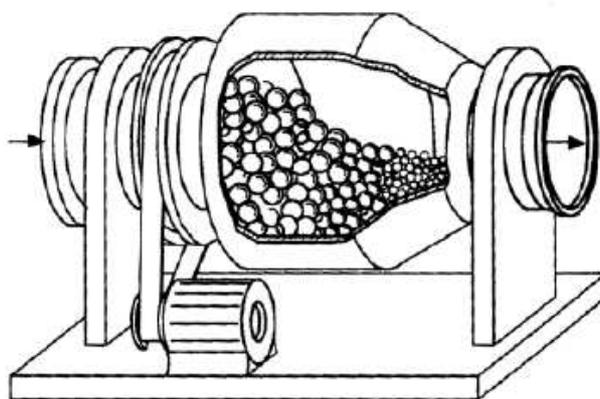


Fig. 2.2 Mulino a sfere

I corpi macinanti differiscono tra loro per forma e dimensioni e per la tipologia dei materiali che li costituiscono. Le dimensioni dei corpi macinanti sono, in genere, tanto minori quanto minori sono le dimensioni dei corpi da macinare, mentre per la forma possiamo distinguere essenzialmente fra sfere e barre (da notare che i mulini a barre lavorano con rapporti di riduzione inferiori, 15-50, rispetto a quelli a sfere, 30-200). Per quanto riguarda i materiali generalmente troviamo corpi macinanti di acciaio ad alta resistenza oppure ciottoli di silice o allumina sinterizzata nel caso dell'industria ceramica. Nel caso si voglia evitare la contaminazione dei prodotti da parte dei metalli la scelta può ricadere su ciottoli o pezzi grossolani della stessa alimentazione (frantumazione autogena). Con gli stessi materiali dei corpi macinanti si effettua il rivestimento delle parti interne del mulino al fine di ridurre il problema dell'usura, oggi molto diffusa per i rivestimenti è la gomma che ha anche il grande pregio di attutire la rumorosità della lavorazione.

I corpi macinanti possono arrivare a riempire fino circa la metà del volume interno del cilindro mentre la quantità ideale di materiale di alimentazione da macinare è quella sufficiente a riempire gli spazi vuoti tra i corpi macinanti stessi. Si definisce grado di riempimento (Δ) il rapporto percentuale fra il volume occupato dai corpi macinanti, al netto dei vuoti, ed il volume interno totale del mulino, esso varia solitamente fra il 30% ed il 50%.

Una volta effettuata la carica sotto l'effetto della rotazione del tamburo, i corpi macinanti vengono trascinati lungo le pareti, rotolano e ricadono gli uni sugli altri, sottoponendo il materiale da macinare ad azioni combinate e contemporanee di pressione, attrito e urto, realizzando così la riduzione dimensionale. E' necessario effettuare la giusta scelta della velocità di rotazione del mulino affinché si abbia l'effetto sopra descritto che garantisce una macinazione ottimale. Tale velocità è compresa tra il 60% e l'85% della velocità angolare critica, ovvero quella velocità alla quale si ha centrifugazione dei corpi macinanti all'interno del mulino (*Figura 2.3 a*); a velocità minore le sfere rotolano le une sulle altre (*Figura 2.3 b*) mentre a velocità maggiore restano aderenti alla parete del mulino per effetto della forza centrifuga (*Figura 2.3 c*).

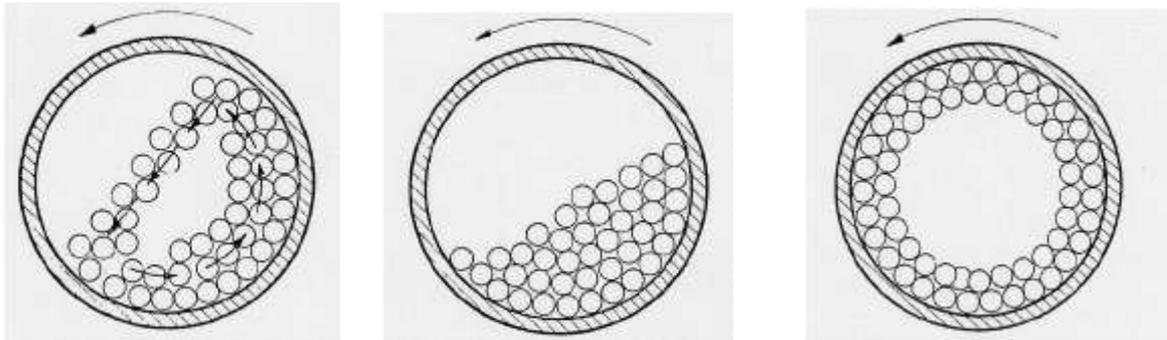


Fig. 2.3 (a)

(b)

(c)

La durata del contatto tra il materiale da macinare e i corpi macinanti dipende sia dalla velocità di avanzamento sia dalla lunghezza del tamburo.

E' importante far notare fin da ora che non esiste una macchina di comminazione o un mulino universale, cioè che possa essere adatto per qualunque tipo di materiale; infatti, la grande varietà delle proprietà dei materiali stessi determina una grande differenziazione nei principi costruttivi e di funzionamento dei macchinari, in funzione del prodotto e del grado di finezza desiderato.

2.2.1 Mulini continui e discontinui

Si possono classificare i mulini stessi, in base alla loro costruzione e principio di funzionamento, in mulini continui e mulini discontinui.

I mulini discontinui rappresentano un sistema di tipo batch e le operazioni di carico e scarico avvengono in momenti diversi rispetto a quella di riduzione dimensionale vera e propria. In questo caso ogni ciclo di macinazione ha un tempo definito o un numero di giri costante, se ci si adopera per mantenere costante sia qualitativamente sia quantitativamente la carica dei corpi macinanti. In generale, questi mulini si prestano a trattare quantitativi di materiale minori rispetto a quelli continui, ma, nonostante la loro tecnica abbastanza vecchia, conservano ancora un campo d'applicazione, specie nelle industrie ceramiche e per la produzione di pigmenti o polveri abrasive, perché possono garantire macinazioni a grandi finezze e sono di costruzione abbastanza semplice (generalmente i mulini discontinui sono mulini quadrati, ovvero la lunghezza del

tamburo è più corta rispetto a quella dei mulini continui, pur essendo sempre maggiore, anche leggermente, rispetto al diametro del tamburo stesso).

I mulini continui sono quelli ad oggi più diffusi; in questo caso le operazioni di carica, scarica e macinazione avvengono in contemporanea. Tali mulini sono impiegati quando si devono macinare grossi quantitativi di materiale, perché, in questo genere di produzione, richiedono minor quantità di personale e hanno un rendimento maggiore rispetto ai mulini discontinui. L'ingresso del prodotto avviene da un'estremità del tamburo, tramite imbuto, attraverso una cavità nel perno del tamburo stesso, mentre l'uscita avviene sempre attraverso un perno cavo, dal lato opposto rispetto a quello d'entrata. E' chiaro che, per funzionare a ciclo continuo, un mulino del genere deve necessariamente essere collegato a dispositivi di classificazione o vagliatura, posti all'uscita del prodotto, per la reintegrazione automatica degli scarti nella camera di macinazione. Questi dispositivi di classificazione possono essere vari, a seconda anche della finezza e del grado di macinazione con cui lavoriamo; possiamo quindi avere vagli o classificatori di diverse tipologie. Bisogna tener conto poi anche del fatto che la produzione di tali mulini è condizionata dalla capacità di vagliatura di queste macchine, che però non sempre lavorano nelle loro migliori condizioni.

Sia i mulini continui che quelli discontinui, come abbiamo già accennato, sono fortemente energivori e la dispersione energetica sotto forma di calore è molto forte; per questo motivo, se i prodotti devono essere tenuti sotto una certa soglia di temperatura, si è pensato anche alla possibilità di introdurre, attorno al tamburo, un circuito con fluidi di raffreddamento; ciò può anche essere associato a eventuali processi di cogenerazione (si pensi, per esempio, al preriscaldamento delle piastrelle nell'industria ceramica).

L'industria ceramica, fino a non molto tempo addietro, utilizzava preferibilmente dei mulini a ciclo discontinuo; recentemente, è stata applicata una conversione e le ragioni che hanno portato tale industria ad adottare il processo continuo sono di natura sia tecnologica sia tecnico-gestionale. I maggiori vantaggi apportati sono:

- maggiore costanza delle caratteristiche della barbotina in uscita dal processo, grazie ad una gestione automatizzata delle portate dei diversi materiali alimentanti il mulino (componenti dell'impasto, acqua e deflocculante), decisamente più affidabile delle procedure manuali che, normalmente, erano gestite da alcuni operatori;
- maggiore efficienza nell'azione dei corpi macinanti, grazie all'ottimizzazione dell'assortimento dei corpi stessi nelle varie camere e ad un rapporto in peso tra corpi macinanti e carica (circa 2,5:1) più alto di quello usato per i mulini discontinui (qui, il rapporto usato era vicino all'unità, specie per corpi ad alta densità, come quelli costituiti di allumina);
- drastica riduzione dei tempi di macinazione (i tempi di permanenza nella camera di macinazione, specialmente per i materiali duri, si riducono notevolmente, anche di oltre la metà);
- miglioramento delle caratteristiche reologiche della barbotina; la setacciatura ne risulta agevolata anche se dovesse aumentare la sua densità, riducendone il contenuto d'acqua di qualche punto percentuale; inoltre, la barbotina in uscita dalla camera ha una temperatura di 20-30 gradi centigradi in più rispetto a quella in uscita da mulini discontinui, contribuendo a mantenerne la viscosità entro limiti accettabili e, quindi, assicurandone una buona fluidità.

Oltre a quelli appena citati, bisogna tenere in considerazione i vantaggi di carattere economico; innanzitutto, grazie ad una temperatura media più alta della barbotina in uscita, il suo contenuto d'acqua si riduce, facendo calare, così, l'energia termica per l'essiccamento a spruzzo della stessa barbotina anche del 15%. Per merito della diminuzione dei tempi di macinazione, si sono registrati aumenti nella produttività anche intorno al 70%, per contro a una riduzione del personale e a una riduzione anche del 50% dell'ingombro dei macchinari.

2.3 Potenza di macinazione

La potenza di macinazione è la potenza responsabile del moto della carica, in realtà la potenza che è necessario installare per mettere in movimento il mulino è maggiore, in quanto oltre a garantire il moto della carica, si devono vincere le forze di attrito delle varie parti mobili del mulino.

La potenza di macinazione dipende da un'ampia serie di fattori, parametri geometrici del mulino stesso e parametri di processo, secondo la seguente espressione:

$$P_{MAC} = K \cdot \Phi^{2,5} \cdot L \cdot \rho_C \cdot \Delta \cdot \omega$$

dove:

Φ = diametro del mulino [m]

L = lunghezza del mulino [m]

ρ_C = densità dei corpi macinanti [g/cm^3]

Δ = grado di riempimento [%]

ω = velocità di rotazione del mulino espressa come percentuale della velocità critica [%]

K = costante dipendente dalla configurazione del mulino

Tale formula approssimata, che esprime la potenza di macinazione in kW, può essere utilizzata per dimensionare, una volta calcolata la potenza stessa tramite una qualche legge energetica, il mulino di progetto.

Possiamo inoltre analizzare come varia la potenza di macinazione in funzione del grado di riempimento e della velocità di rotazione al fine di individuare il range ottimale di esercizio (definito geometricamente un mulino questi sono, infatti, gli unici fattori di processo su cui risulta possibile intervenire, in quanto su ρ_C le possibilità di scelta sono limitate a pochi materiali).

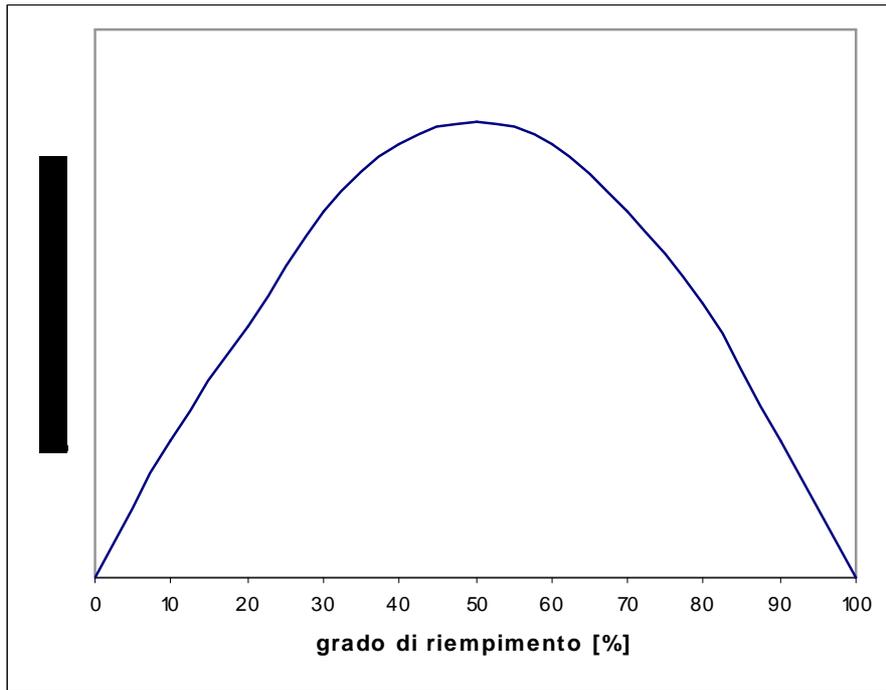


Fig.2.4 Andamento della potenza di macinazione al variare del grado di riempimento del mulino per una data velocità di rotazione.

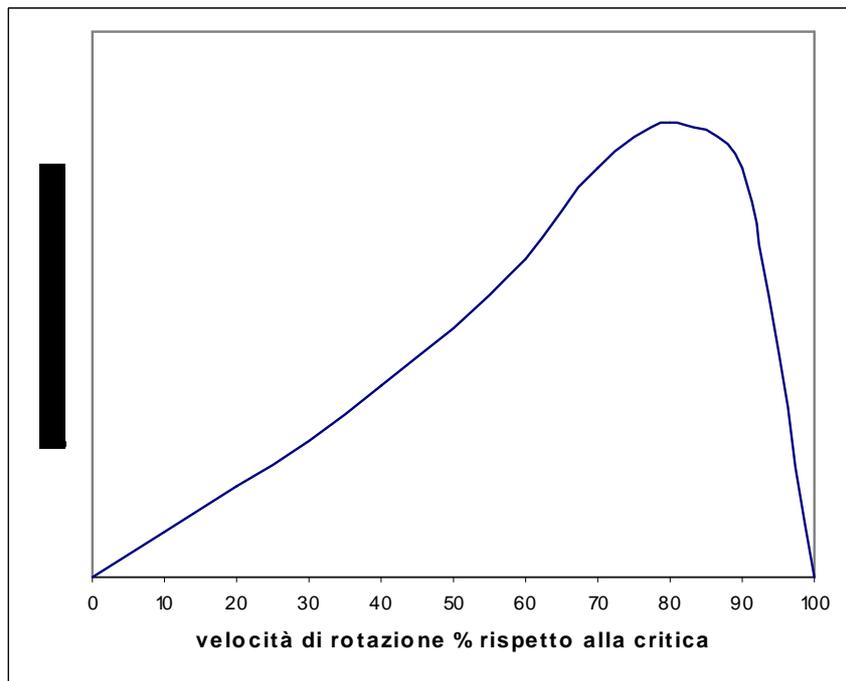


Fig. 2.5 Andamento della potenza di macinazione al variare della velocità di rotazione per un grado di riempimento costante.

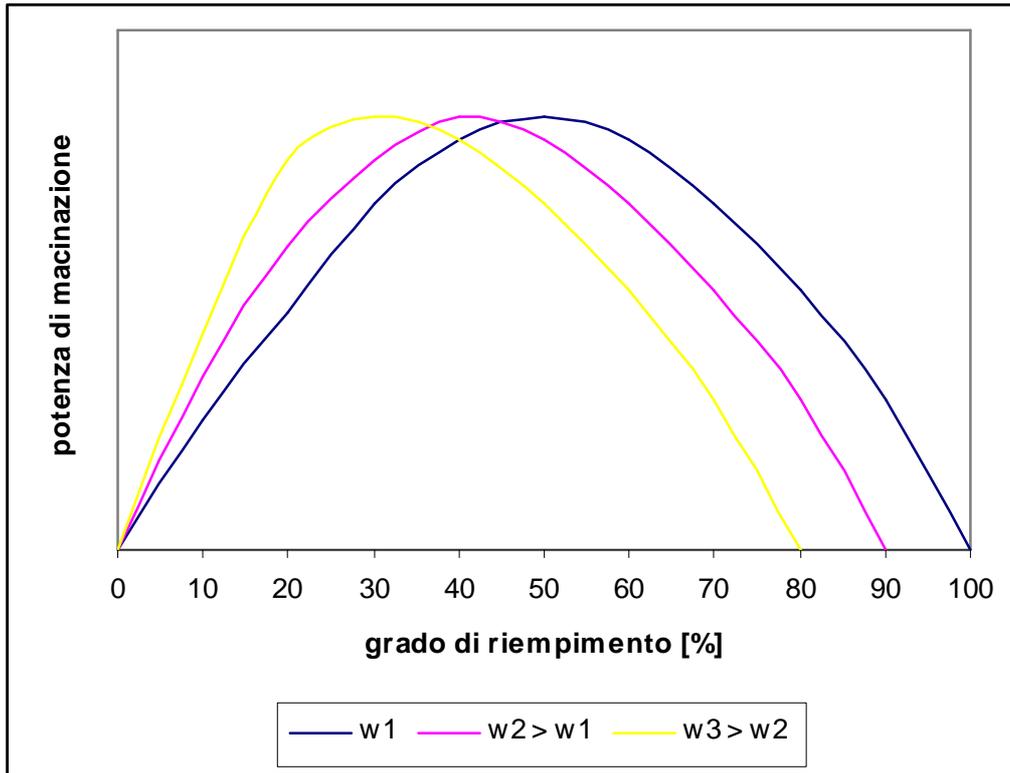


Fig. 2.6 Andamento della potenza di macinazione al variare del grado di riempimento del mulino per valori di velocità di rotazione crescenti.

Dai grafici deduciamo che :

- a parità di velocità di rotazione la potenza massima si ha per un valore del grado di riempimento attorno al 50% (Figura 2.4);
- a parità di grado di riempimento la potenza massima si ha per un valore della velocità di rotazione pari al 70-90% della velocità critica (Figura 2.5);
- all'aumentare della velocità di rotazione si riduce il valore del grado di riempimento cui corrisponde il massimo della potenza (Figura 2.6).

3 LEGGI ENERGETICHE

3.1 Introduzione

Le leggi matematiche della comminazione si basano sul rapporto che lega l'energia impiegata e l'entità della riduzione dimensionale del prodotto.

Tale legame viene espresso come una funzione delle dimensioni iniziali del materiale macinato, della distribuzione delle dimensioni ottenute e dell'entità delle nuove aree superficiali prodotte.

E' risultato possibile, tramite diverse osservazioni sperimentali nel tempo, esprimere tale legame con una relazione del tutto generale del tipo:

$$dE = \frac{dx}{x^n}$$

dove:

dE = quantità di energia impiegata;

dx = variazione di dimensione ottenuta;

x = dimensione iniziale del materiale;

n = esponente adimensionale.

Si può facilmente notare come la variazione della dimensione risulti direttamente proporzionale all'energia spesa, e come l'energia richiesta per effettuare tale variazione sia inversamente proporzionale, secondo una certa funzione dipendente dal valore di n , alla dimensione iniziale del materiale.

Diversi studiosi hanno fornito ipotesi analitiche di tale legame, più o meno verificate dall'esperienza. In questa sede riporteremo quelle principali cui si fa comunemente riferimento nella pratica e che nascono da considerazioni di carattere prevalentemente empirico, tendenti ad individuare le relazioni fra i materiali aventi un comportamento noto e quelli aventi un comportamento ancora da definire.

E' il caso dei cosiddetti indici di macinabilità che hanno fino ad oggi costituito il principale supporto teorico alla risoluzione dei problemi pratici legati alla realtà produttiva-industriale.

Riportiamo di seguito un raffronto visivo fra le diverse teorie, in termini di relazione fra energia e dimensioni del diametro del materiale, che serva ad anticipare quanto esposto nei paragrafi successivi.

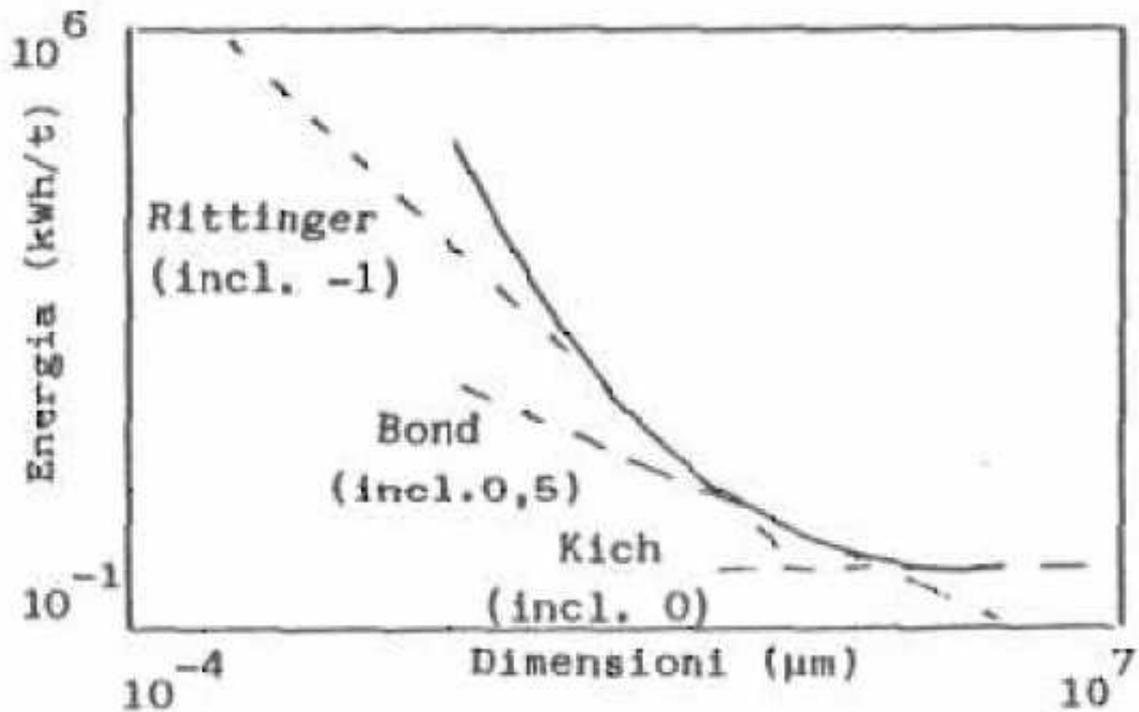


Fig.3.1 Grafico energia-dimensioni che mostra il campo di applicabilità delle diverse teorie energetiche

3.2 Legge di Rittinger

La legge di Rittinger, risalente alla seconda metà dell'Ottocento (1867), è la più antica formulazione che esprima matematicamente il valore dell'energia impiegata in un'operazione di comminazione.

Essa stabilisce che il lavoro speso è direttamente proporzionale alla nuova superficie prodotta con il processo di comminazione.

L'ipotesi fondamentale è che l'energia utile di macinazione sia integralmente trasformata in energia superficiale.

Immaginando di ridurre un blocco di dimensione iniziale D in N blocchi di dimensioni d , l'area superficiale complessivamente ottenuta per unità di volume, intesa dunque come superficie specifica, è proporzionale a $1/d$.

Pertanto l'energia di riduzione diventa:

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

che, espressa in funzione del rapporto di riduzione, diventa:

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

dove K è una costante dipendente dal tipo di materiale.

3.2 Legge di Kick

La legge di Kick, del 1885, afferma che il lavoro necessario per produrre una modifica di configurazione in corpi geometricamente simili e di materiale uniforme, è proporzionale al loro stesso volume, attraverso un'opportuna costante K' ; ovvero l'energia necessaria alla comminazione risulta proporzionale al logaritmo del rapporto di riduzione.

Tale teoria suppone che le rotture che avvengono in materiali simili siano anch'esse simili e di conseguenza avvengano con la stessa spesa di energia.

$$W = K' \cdot \log n$$

3.3 Legge di Charles

La legge di Charles, del 1972, tenta di cogliere il fenomeno sotto un aspetto più generale risultando in un certo senso riassuntiva delle tesi precedentemente esposte. L'energia di macinazione viene espressa in forma differenziale:

$$W = -C \frac{dx}{x^n}$$

dove:

x = dimensione di partenza del materiale da macinare;

dx = variazione di dimensione subita;

C = costante dipendente dalle proprietà del materiale;

n = costante dipendente dal campo di macinazione in cui si agisce.

Tale espressione che avevamo precedentemente introdotto come valida genericamente per il calcolo dell'energia spesa, consente di ottenere, a seconda dei diversi valori di n le leggi della comminazione precedentemente esaminate.

Per $n = 2$ si ottiene la legge di Rittinger:

$$W = \int_D^d -C \frac{dx}{x^2} = C \left[\frac{1}{x} \right]_D^d = C \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

con $C = K$

Per $n = 1$ si ottiene la legge di Kick:

$$W = \int_D^d -C \frac{dx}{x} = -C \left[\log x \right]_D^d = C \log \frac{D}{d}$$

con $C = K'$

Per $n = 1,5$ si ottiene la legge di Bond che vedremo in seguito:

$$W = \int_D^d -C \frac{dx}{x^{1,5}} = \frac{C}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{x}} \right]_D^d = \frac{C}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

con $C = 2K''$

Le teorie di Rittinger, di Kick e di Bond si dimostrano pertanto valide nel caso in cui ci si mantenga all'interno di uno specifico campo di azione e per un ristretto intervallo di granulometria. In particolar modo la legge di Kick si applica ai materiali più grossolani (è molto utilizzata nel campo dei rifiuti), la legge di Rittinger nel campo delle macinazioni più fini, mentre la legge di Bond mantiene una possibilità di applicazione più ampia.

La legge di Charles, invece, viene solitamente utilizzata nel caso di macinazione di materiali complessi o comunque di rocce lontane dall'ipotesi di uniformità ed omogeneità del minerale stesso.

Appoggiandosi alla legge di Gaudin sulle curve granulometriche si può facilmente ottenere un'espressione alternativa dell'equazione di Charles, che consente di valutare tutti i parametri caratterizzanti il materiale in esame, in particolar modo il valore di "n", e di conseguenza di esprimere in modo univoco il valore dell'energia di macinazione. Secondo Gaudin le curve granulometriche cumulative sono rappresentate da un'equazione matematica del tipo:

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

dove:

y = porzione in % del prodotto di dimensioni inferiori a x

K = ascissa del punto di intersezione della curva con l'ordinata corrispondente al 100% di passato. Rappresenta dunque la dimensione più grossolana del materiale trattato.

α = coefficiente angolare della retta in scala logaritmica.

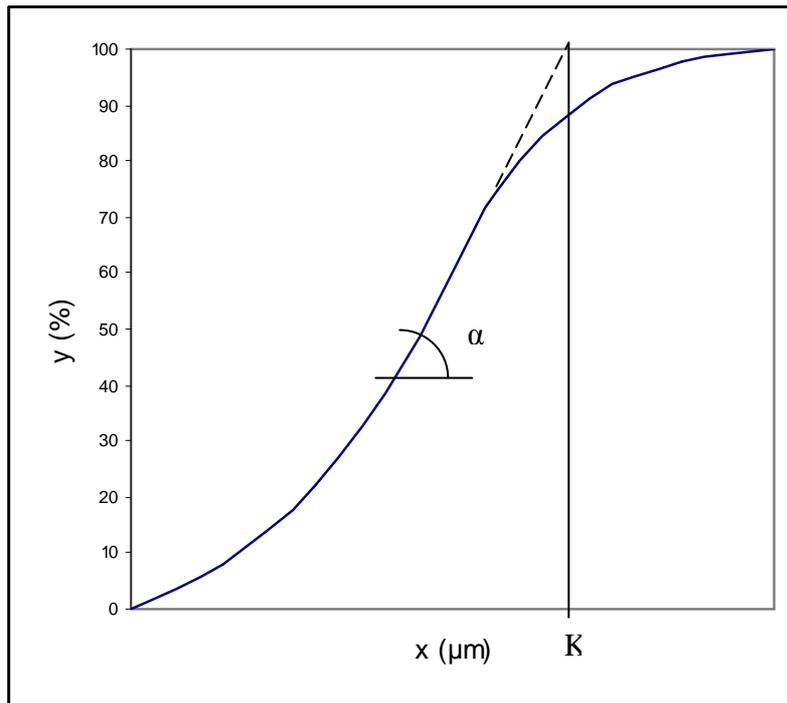


Fig. 3.2 Curva granulometrica secondo l'equazione di Gaudin.

Derivando rispetto ad "x" si ottiene l'espressione in forma differenziale:

$$dy = \frac{100 \cdot \alpha}{K^\alpha} \cdot x^{\alpha-1} \cdot dx$$

e quindi combinando tale espressione con l'equazione differenziale della legge di Charles si ricava che:

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

Se si riporta, in scala logaritmica, W in funzione di K allora tale relazione diventa lineare. Si ottiene cioè per ciascun materiale una retta di coefficiente angolare pari a "1-n", ed è quindi possibile ricavare il valore di "n" direttamente dalla pendenza della curva.

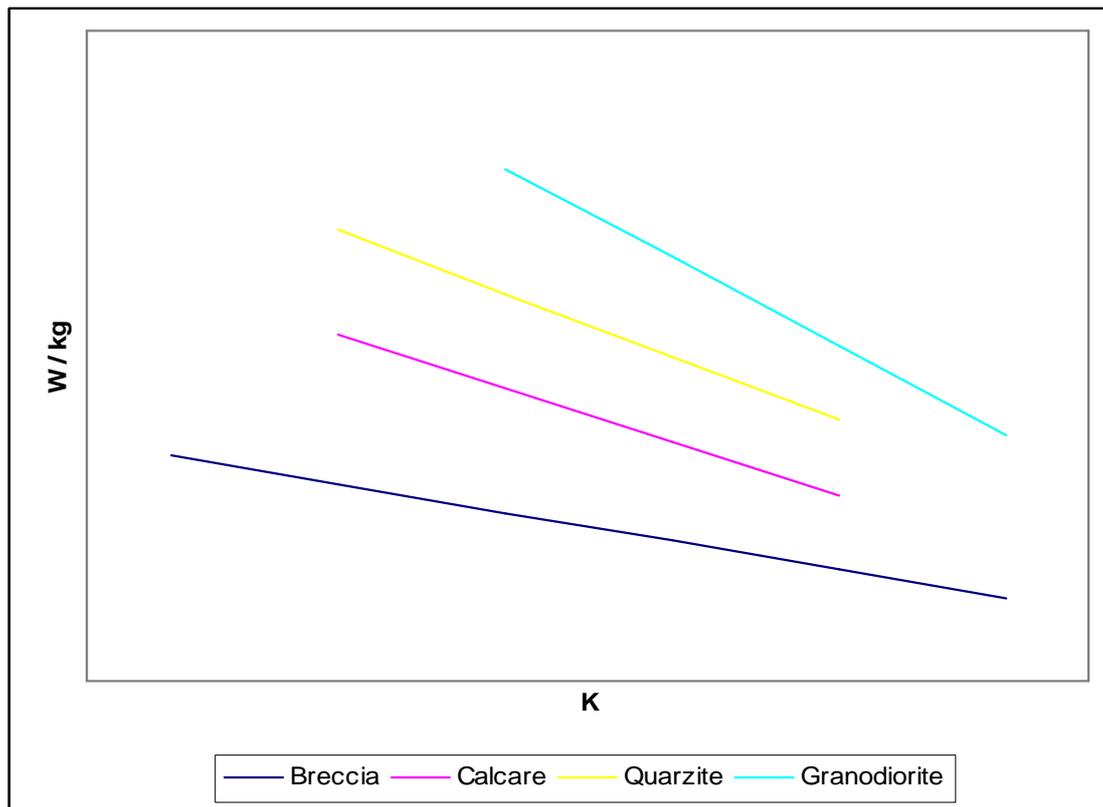


Fig. 3.3 Grafico K-W in scala logaritmica per una serie di materiali campione.

3.4 Legge di Bond

Nel 1951 Fred C. Bond propose una nuova teoria che si presentò fin dal primo momento di fondamentale importanza, soprattutto in relazione ad un suo valido impiego di carattere pratico-industriale.

Tale teoria, che si colloca temporalmente dopo la formulazione di Rittinger e di Kick, può considerarsi intermedia fra le due stesse ma viene riportata per ultima in quanto su di essa si sono basate le prove sperimentali oggetto della seguente trattazione.

Bond presuppone fisicamente che l'energia trasmessa ad un corpo solido attraverso uno sforzo di compressione si ripartisca in un primo tempo all'interno della massa, ed è quindi proporzionale a D^3 , ed in seguito, quando ha inizio la

fessurazione superficiale, tale energia venga a concentrarsi in superficie sulle labbra della fessurazione stessa diventando perciò proporzionale a D^2 .

Indicando con K'' un'opportuna costante e con ρ_s il peso specifico del materiale sottoposto a comminazione, si avrà la seguente espressione dell'energia di macinazione:

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

La teoria di Bond, poi, tiene conto del lavoro che è stato precedentemente effettuato sul materiale. Possiamo infatti considerare che l'energia necessaria per ridurre un materiale della dimensione di partenza D a quella del prodotto d sia data dalla differenza fra i quantitativi totali di energia necessari per passare da una dimensione teoricamente infinita alle dimensioni D e d rispettivamente. Tale lavoro, necessario per ridurre questa grandezza ipoteticamente infinita ad un valore standard di 100 micron, prende il nome di indice di macinabilità di Bond o di Work index (w_i) ed è definito dalla relazione:

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

Dal confronto con la precedente, dunque, il lavoro di comminazione presenterà proprio l'indice di macinabilità quale costante caratteristica del materiale e la formulazione dell'energia consumata diventa:

$$W = 10 \cdot w_i \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

Il work index risulta quindi una caratteristica propria del materiale, nota la quale, tramite la formula di Bond, è possibile determinare immediatamente l'energia necessaria per realizzare una certa operazione di comminazione. Si riportano nella tabella seguente valori tipici di work index per alcuni dei minerali più diffusi.

MINERALE	WORK INDEX [kWh/tc] ¹		
	massimo	minimo	Medio
Barite	8,9	2,4	4,7
Bauxite	14,9	0,9	8,8
Fluorite	12,8	4,4	8,9
Fosfati	13,2	6,5	9,9
Feldspato	16,4	8,4	10,8
Minerale a piombo e zinco	13,4	6,8	10,9
Dolomite	18,6	2,2	11,3
Minerale di ferro a magnetite	25,3	4,5	11,3
Carbone	16,5	6,0	11,4
Minerale di zinco	22	6,5	11,6
Minerale di piombo	15,3	8,3	11,9
Minerale di rame	26,3	6,4	12,7
Calcare	33,3	6,5	12,7
Minerale di ferro ad ematite	21,6	7,5	12,8
Clinker di cemento	36,7	9,1	13,4
Quarzo	22	12	13,6
Granito	31,9	10,7	15,1
Corindone	109,6	22,1	56,7

¹ L'unità di misura usata per il Work index è il kWh/tc, cioè il kilowattora su tonnellata corta, dove la tonnellata corta è rappresentativa di una massa di 907 chilogrammi.

Analizzando la tabella comprendiamo subito come in realtà il valore del work index non sia così facilmente determinabile in maniera univoca, esso infatti presenta escursioni notevoli tra i valori massimi e quelli minimi in ogni tipologia di minerale. Questo fenomeno dipende sia dalle disuniformità intrinseche del materiale, che variano anche all'interno di una stessa tipologia di minerali per via dei diversi processi di formazione, sia dalle macchine impiegate e dalle modalità di prova utilizzate.

Il work index è dunque un parametro dipendente da vari fattori, geometrici, strutturali e dinamici.

Proprio nella determinazione del work index si concentrano i limiti della formulazione teorica di Bond. Il calcolo di tale indice avviene infatti tramite un'equazione empirica, di seguito riportata, che coinvolge un insieme di parametri valutabili tramite una serie di prove sperimentali di laboratorio (P_i , G_{bp} , P_{80} , F_{80}).

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{P_i^{0,23} \cdot G_{bp}^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right]}$$

dove:

P_i = dimensione di screening scelta per i test;

G_{bp} = macinabilità = ricarica / n° giri;

P_{80} = dimensione corrispondente all'80% del passante del prodotto;

F_{80} = dimensione corrispondente all'80% del passante dell'alimentazione.

L'equazione empirica sopra riportata è stata appositamente tarata sul mulino a sfere costruito in laboratorio dallo stesso Bond, tuttavia esistono espressioni analoghe facenti riferimento ognuna ad una diversa tipologia di mulino che differiscono essenzialmente per i valori numerici degli esponenti e del numeratore. Si riporta ad esempio l'equazione relativa alle prove con mulino a barre.

$$w_i = 1,1 \times \frac{62}{P_i^{0,23} \cdot G^{0,625} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right]}$$

Il work index si riferisce all'energia complessivamente inclusa nel materiale prima e dopo la riduzione per cui contiene implicito il rendimento meccanico dell'apparecchio di macinazione utilizzato. A parità di efficienza dell' impianto e di comportamento del materiale in tutti i campi dimensionali, esso può essere assunto come costante, indipendente cioè dalle modalità con cui viene realizzata la comminazione e dovrà essere funzione esclusiva delle caratteristiche del minerale.

Bond sottolinea, inoltre, come gli esperimenti debbano essere condotti in modo da ottenere, in laboratorio, una pezzatura del prodotto simile a quella del circuito in scala naturale. E' stato infatti verificato dall'esperienza che una macinazione estremamente spinta richiede un quantitativo di energia addizionale rispetto a quello calcolato con previsioni teoriche, tanto più ridotte sono le dimensioni del prodotto voluto, quanto maggiore è il quantitativo energetico speso per ottenerle.

Diverse sono le possibili spiegazioni a questo fenomeno:

- le dimensioni usualmente utilizzate per le sfere di carica del mulino sono troppo elevate per produrre prodotti così fini;
- nella macinazione a secco di particelle fini il ricoprimento delle sfere può variare da incipiente a completo, in ogni caso esso attutisce gli urti e fa diminuire l'efficienza di macinazione;
- nella macinazione ad umido lo stesso effetto si ottiene per via della creazione di una polpa spessa e viscosa che va a ricoprire le sfere;
- la produzione di particelle più fini coinvolge a rottura il reticolo cristallino intatto, e richiede maggior tempo e maggiore energia rispetto alla rottura usuale che avviene lungo i piani di microfrattura.

Un procedimento del genere mostra evidenti limiti, poiché le condizioni che si verificano negli impianti di produzione industriale sono nettamente diverse da quelle che si hanno nei test in laboratorio. Bond ha cercato di ovviare a tale inconveniente e, al fine di minimizzare gli errori dovuti ad esponenti scorretti e ad altri fattori imprecisi, ha introdotto una serie di fattori correttivi, tuttora ampiamente utilizzati dai progettisti nelle applicazioni pratiche.

Ad esempio nel caso in cui la dimensione del prodotto sia minore di 70 micron l'energia ottenuta dai test di laboratorio deve essere moltiplicata per un fattore empirico correttivo A dalla seguente espressione:

$$A = \frac{P_{80} + 10,3}{1,145 \cdot P_{80}}$$

Possiamo quindi concludere che la trattazione di Bond presenta evidenti difficoltà nel rappresentare il fenomeno della macinazione e nel ricercare la quantità di energia ad esso correlata. Tali difficoltà sono dovute in particolar modo all'essenza empirica della teoria. Ciò nonostante la sua applicazione fornisce risultati pratici effettivamente utili per cui si può affermare che, a tutt'oggi, essa rimane sicuramente la teoria più utilizzata e come tale è stata applicata alla seguente trattazione.

4 II GRES PORCELLANATO

4.1 Introduzione

Il grès porcellanato è un prodotto ceramico a pasta compatta, non porosa, dura e colorata 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.

In Europa compare dal Medioevo, mentre in Oriente il suo perfezionamento in epoca molto antica ha condotto alla porcellana. Oggi il grès porcellanato è la tipologia di materiale ceramico più avanzata e il grande successo commerciale che ha incontrato nell’ultimo ventennio lo ha portato a coprire oltre l’80% della produzione italiana. Nel 2002 in Italia si registravano più di 150 aziende ceramiche produttrici di questo materiale e su tale tipo di prodotto si investono tuttora notevoli risorse, sia in termini di ricerche per l’innovazione del materiale sia per quanto riguarda il miglioramento del processo produttivo.

L’impasto del grès porcellanato è ottenuto dalla miscela di argilla magra e poco refrattaria e feldspati (materie prime simili a quelle che vengono impiegate per i sanitari). La cottura avviene in forni 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.

Variando alcuni parametri del processo di cottura, quali temperatura e tempo, è possibile ottenere grès a differente porosità e finitura superficiale.

Possiamo distinguere due diverse tipologie di grès:

- il **grès naturale**, più comunemente conosciuto come grès tecnico. In questo suo impiego vengono esaltate le caratteristiche di estrema resistenza della superficie che, inattaccabile agli acidi, offre una completa impermeabilità e resistenza al gelo; può essere levigato e lucidato presentando superfici che si avvicinano sempre più ai marmi ed ai graniti, rispetto ai quali presenta costi più contenuti pur essendo dotato di caratteristiche tecniche talvolta notevolmente superiori;
- il **grès smaltato**. Il grès porcellanato si presta ad offrire una superficie tecnica, rivestibile con smalti di varia natura, garantendo così un'ampia varietà di effetti estetici riscontrabile solo nella ceramica smaltata. In questo modo si amplia il campo di utilizzo del prodotto anche al residenziale domestico, dove l'estetica superficiale prevale sulla tecnicità del prodotto.

4.2 Caratteristiche tecniche

Abbiamo già accennato alle elevate caratteristiche tecniche del grès porcellanato, ora vogliamo analizzarle più dettagliatamente e vedere come tale prodotto si colloca nel contesto delle normative nazionali ed internazionali per la classificazione delle piastrelle ceramiche.

In breve elenchiamo di seguito i principali vantaggi ad esso connessi:

- Resistenza agli urti e sollecitazioni
- Resistenza all'usura
- Resistenza alle scalfitture
- Resistenza al gelo
- Resistenza agli attacchi chimici
- Resistenza alle macchie

Il grès porcellanato registra valori di assorbimento d'acqua più bassi rispetto alle altre tipologie produttive, sicuramente inferiori allo 0,5%, frequentemente si può arrivare a valori al di sotto dell'0,1%. Da questa caratteristica deriva anche il più alto grado di resistenza a flessione, ovvero la massima tensione che il

materiale è in grado di tollerare prima di rompersi, che raggiunge e supera i 50 N/mm². L'importanza dell'assorbimento d'acqua viene sottolineata dalle Norme Europee EN 150 che l'assumono, insieme con il metodo di formatura, come parametro di classificazione. Come riportato in tabella 1, sulla base dei due parametri citati, le piastrelle vengono suddivise in otto gruppi: i gruppi A sono quelli delle tabelle estruse, mentre i gruppi B sono quelli delle piastrelle pressate; i gruppi I sono quelli a bassa porosità e i gruppi III sono quelli a porosità maggiore.

Denominazione commerciale	Superficie	Assorbimento acqua [%]	Metodo di formazione	Classificazione
Maiolica	Smaltata	15-25	Pressatura	B III
Cottoforte	Smaltata	7-15	Pressatura	B II b, B III
Monocottura chiara	Smaltata	2-7	Pressatura	B I, B II
Monocottura rossa	Smaltata	2-10	Pressatura	B I, B II
Terraglia-pasta bianca	Smaltata	10-20	Pressatura	B III
Clinker	smaltata e non	2-6	Estrusione	A I, A IIa
Cotto	smaltata e non	3-15	Estrusione	A II, A III
Grès rosso	non smaltata	1-4	Pressatura	B I, B II a
Monoporosa (rossa e chiara)	Smaltata	> 10	Pressatura	B III
Grès porcellanato	smaltata e non	0-0,5	Pressatura	B I a

Tab. 4.1 Classificazione delle piastrelle secondo le norme EN 150

Si vede immediatamente come le piastrelle in grès porcellanato, in quanto piastrelle pressate a basso assorbimento d'acqua, appartengano al gruppo BI; in particolare esse si collocano all'estremità inferiore di tale gruppo, essendo riconducibili a quella sottoclassificazione del gruppo BI (BI a) corrispondente alle "piastrelle completamente vetrificate", per le quali il massimo valore dell'assorbimento d'acqua è lo 0,5%.

La durezza superficiale secondo la scala di Mohs, sebbene il test non sia più previsto dalle norme ISO, deve essere almeno 7 nel prodotto non levigato e 5 nel prodotto levigato.

Per quanto riguarda la resistenza all'abrasione profonda essa risulta pari a 130-135 mm³ di materiale, valore di poco superiore alla metà di quello previsto dalla norma EN ISO 10545.6.

In merito alla scivolosità del materiale distinguiamo fra i prodotti a superficie rustica che devono avere un coefficiente di attrito (somma dei valori di adesione e deformazione dipendenti dal carico applicato) superiore allo 0,6, sia su superficie bagnata che asciutta, e le tipologie antiscivolo per le quali il coefficiente di attrito sarà superiore a 0,9 nel caso di superficie asciutta e a 0,5 per superficie bagnata.

4.3 Campi di utilizzo

Per le sue prestazioni e le sue caratteristiche il grès porcellanato si presta a molteplici utilizzi; dai grandi progetti di aeroporti o centri commerciali ai più intimi interventi residenziali, dalle costruzioni contemporanee alle ristrutturazioni di edifici storici, esso trova ormai impiego in ogni tipologia edilizia. Questo grazie soprattutto alla ampia gamma di scelta, quanto a colori, tessiture e formati, che consente di trovare una soluzione ad ogni esigenza progettuale.

La resistenza alle sollecitazioni di carico e all'abrasione rendono questo materiale particolarmente indicato per i pavimenti di tutte le tipologie edilizie con un alta densità di traffico o a destinazione industriale. Inoltre il basso assorbimento d'acqua dovuto alla compattezza del materiale, e la conseguente ingelività, fa sì che il gres porcellanato risulti perfetto e durevole anche nelle applicazioni da esterni, sia nei rivestimenti di pareti che nei pavimenti. In particolar

modo nell'ambito della costruzione a secco il grès porcellanato ha trovato ampia diffusione, è ad esempio utilizzato nelle pareti ventilate e nei pavimenti sopraelevati, grazie al basso spessore e ad i grandi formati delle lastre.

Oltre alle proprietà tecniche ed estetiche, il gres porcellanato è in grado di assicurare la rispondenza alle esigenze di sicurezza fondamentali nei rivestimenti di ambienti pubblici, soprattutto per i rischi di scivolamento che riesce a contrastare creando superfici antiscivolo di grande efficacia oltre ad essere molto resistenti all'abrasione ed al fuoco.

4.4 Composizione e materie prime

Il grès porcellanato costituisce l'evoluzione del materiale conosciuto con il nome di "grès chimico", tradizionalmente prodotto in piccoli formati e legato a tecnologie di produzione oggi non più utilizzate. Le nuove composizioni adottate, l'elevato grado di finezza delle particelle, l'impiego dei forni a rulli e delle moderne presse idrauliche ad elevata pressione e precisione, hanno consentito di rivedere il prodotto accrescendone il contenuto tecnologico e sfruttando appieno le possibilità offerte dal grado di affidabilità raggiunto dalla cottura rapida.

L'evoluzione delle composizioni è dovuta al grande cambiamento che si è avuto con la velocizzazione dei processi di fabbricazione, si è infatti passati dalle cotture tradizionali a temperature di circa 1200°C con cicli di 40-50 ore a cotture con cicli di 50-70 minuti a temperature leggermente più elevate. A differenza di quanto si riscontrava con le cotture lente, dove ogni componente partecipava alla serie di reazioni che portavano alla modifica totale della composizione con formazione di nuovi composti, nelle cotture rapide i componenti quasi sempre esprimono nei materiali cotti le loro caratteristiche singole alla temperatura di cottura. Per questa ragione c'è stata una forte riduzione del contenuto di caolino (15% contro l'originale 40%), in quanto materiale che, per i cicli di cottura attuali, si comporta come elemento refrattario, mantenendo un'elevata porosità a fine cottura. Per contro sono aumentate le quantità di feldspati e di argille plastiche, materiali che si comportano come fondenti, e a volte sono state introdotte piccole quantità di energici fondenti quali il talco. Il quarzo è sempre presente e la sua

quantità dipende dal grado di purezza, per sabbie quarzose feldspatiche, ad esempio, le percentuali possono salire al 25-30% in considerazione della fusibilità apportata dal feldspato.

4.5 Impasto analizzato

Nello specifico l'impasto di grès porcellanato che è stato analizzato nelle prove di laboratorio è costituito dalle seguenti materie prime:

- Argilla grigia illittico-caolinitica;
- Argilla caolinitica filtropressata;
- Argilla bentonitica;
- Feldspato sodico;
- Feldspato potassico;
- Sabbia feldspatica.



Fig.4.1 Componenti dell'impasto di grès porcellanato: dall'alto a sinistra argilla illittico caolinitica, argilla filtropressata, feldspato sodico, feldspato potassico, argilla bentonitica e sabbia feldspatica

Tali materie prime sono state fornite dal CER (Centro Ceramico) di Bologna per conto del quale le analisi oggetto di questa trattazione sono state effettuate. Esse sono state precedentemente frantumate tal quali, ovvero all'umidità del campione di provenienza, e vagliate al setaccio da 3150 μm , in modo da facilitare e velocizzare le operazioni di preparazione del campione in laboratorio.

Si riporta in tabella la composizione dell'impasto secondo le percentuali di ogni materiale, valutata sul tal quale e quindi sul secco, tenendo conto dei rispettivi contenuti di umidità.

Materie prime	Umidità [%]	Composizione sul tal quale [%]	Composizione sul secco totale [%]
Argilla grigia illittico-caolinitica	2,5	22	23
Argilla caolinitica filtropressata	19	21	18
Argilla bentonitica	5,5	4	4
Feldspato sodico	3,5	38	39
Feldspato potassico	1,5	10	11
Sabbia feldspatica	1,5	5	5

Tab. 4.2 Composizione dell'impasto di grès porcellanato analizzato.

5 PROVE DI LABORATORIO

5.1 Strumentazione

Le prove sono state eseguite nel laboratorio di Georisorse e Geotecnologie del dipartimento del DICMA con la strumentazione a disposizione di cui si riportano di seguito brevi descrizioni.

5.1.1 Mulino a sfere

Si tratta di un mulino cilindrico a sfere appositamente costruito per la realizzazione di queste prove di macinabilità, secondo le indicazioni di Bond. Interamente in acciaio tale mulino ha un diametro di 30,5 cm, gli angoli interni sono arrotondati ed è dotato di un coperchio dal quale effettuare la carica che può essere fermato tramite quattro viti durante la fase di macinazione. E' inoltre dotato di guarnizioni che servono a minimizzare o eliminare le eventuali perdite di polveri.



Per quanto riguarda i corpi macinanti si tratta di 285 sfere di acciaio per un peso totale di 20,125 kg, di dimensione variabile tra 36,7 mm e 15,6 mm. Tali sfere differiscono leggermente da quelle utilizzate da Bond ma la differenza, come si vede chiaramente di seguito, influenza solamente il valore della superficie totale (5456 cm² contro i 5412 cm² di Bond), mentre lascia invariato il peso complessivo in quanto si è optato per l'utilizzo lo stesso come criterio di scelta.

n° sfere Bond	n° sfere nostre	Diametro Bond [mm]	Diametro nostre [mm]	Superficie Bond [cm ²]	Superficie nostre [cm ²]	Peso nostre [g]
43	43	36,8	36,7	1829,37	1819,44	8467
67	53	29,7	30,4	1856,63	1538,72	6065
/	14	/	25,5	/	285,99	1191
10	10	25,4	25,2	202,68	199,50	657
71	71	19,1	19,9	813,70	883,29	2294
94	94	15,5	15,6	709,46	718,64	1451

Tab. 5.1 Confronto fra le caratteristiche delle sfere macinanti utilizzate da Bond e quelle utilizzate per gli esperimenti di laboratorio.

5.1.2 Setacciatrice meccanica

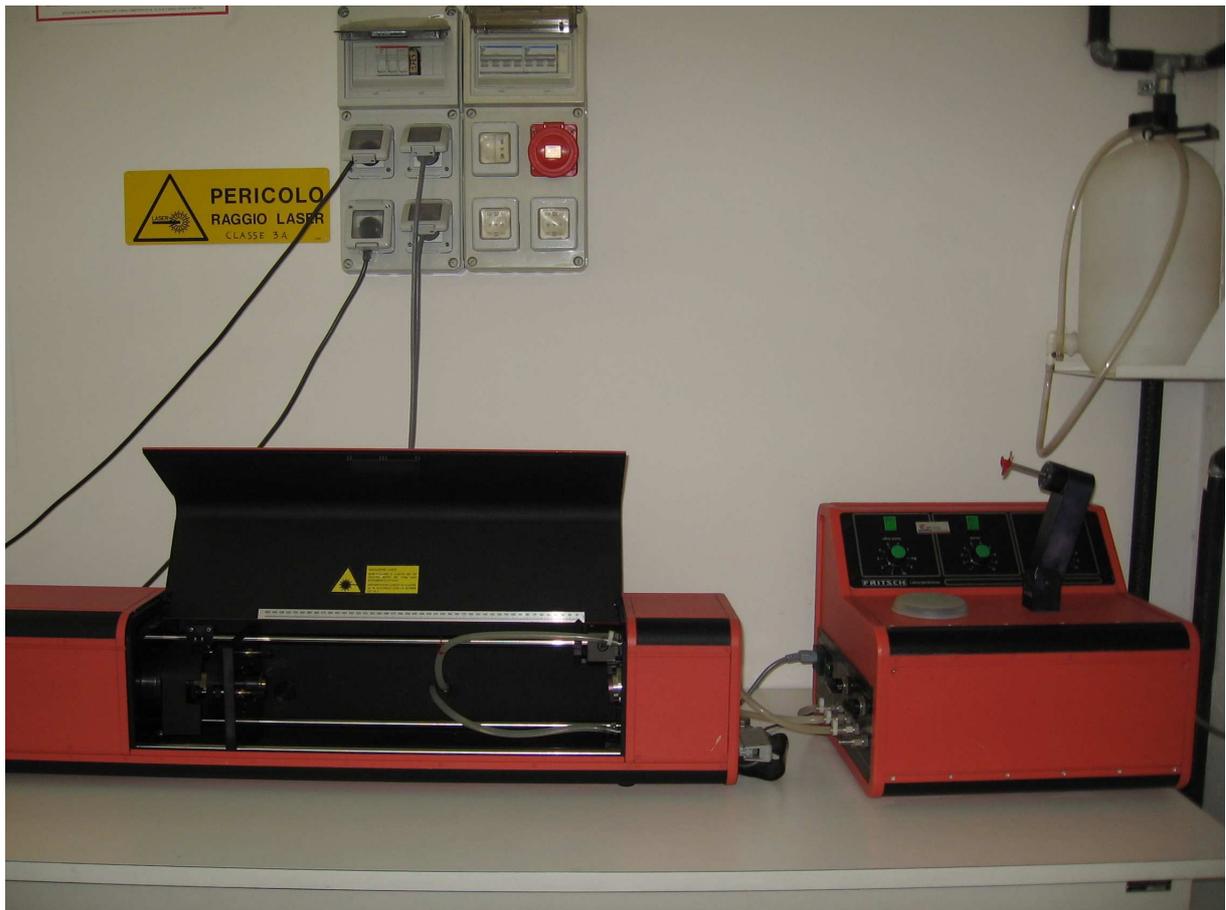
Si prepara una pila di setacci a dimensione della maglia decrescente in successione prestabilita dalle norme tecniche UNI (ogni analisi prevede però un numero massimo di 7-8 setacci). Il materiale viene posto sul primo setaccio e quindi la pila, chiusa da un coperchio, viene inserita nella setacciatrice che, azionata per una ventina di minuti, imprime una vibrazione orizzontale e verticale in modo da favorire il passaggio attraverso le maglie dei materiali di dimensioni inferiori. Terminata la setacciatura viene pesato il materiale trattenuto su ogni rete. Nel nostro caso particolare sono stati utilizzati setacci del diametro di 300 mm con la seguente sequenza per quanto riguarda la dimensione delle maglie: 1400 µm, 750 µm, 400 µm, 200 µm, 150 µm, 100 µm.



5.1.3 Granulometro laser

Uno strumento di questo tipo viene generalmente utilizzato per l'analisi di granulometrie molto fini, inferiori ai 100 μm .

Si prepara una sospensione del materiale solido in acqua in concentrazione variabile fra il 7 e il 15 % circa in peso. La sospensione quindi viene messa in circolo nel granulometro attraverso un sistema di pompaggio e passa all'interno di una cella di vetro che viene colpita dal fascio di raggi laser. Il raggio, quando colpisce una particella solida, viene deviato secondo un dato angolo di diffrazione. Sfruttando una correlazione indiretta fra l'angolo di diffrazione e la dimensione delle particelle si riesce a valutare la granulometria del materiale analizzato, in forma gabbellare e in grafici che riportano le curve di frequenza e le curve cumulative.



5.2 Tipologie di prova

Sono state inizialmente prese in considerazione due differenti tipologie di prove con le quali poter determinare il valore del work index:

- la metodologia standard di Bond,
- una modalità rapida messa a punto da Magdalinovic.

L'idea era quella di confrontare i valori ottenuti con le varie metodologie, nel solo caso dall'impasto, e scegliere quella ritenuta più adatta per procedere poi nell'effettuare le prove sui singoli materiali.

In linea di massima le prove sono sempre articolate in tre fasi:

- 1) fase preparatoria del materiale da macinare
- 2) fase di macinazione vera e propria e setacciatura
- 3) fase di analisi al laser della parte finissima

Nei paragrafi seguenti si offre una descrizione accurata del procedimento utilizzato nei tre differenti casi considerati.

5.2.1 Procedura standard

1) Preparazione del materiale

In primo luogo si rende necessaria un'operazione di scrematura del materiale a disposizione al fine di ottenere un materiale con determinate caratteristiche granulometriche, così come identificate da Bond, che si presti alla fase successiva di macinazione.

Il materiale in ingresso al nostro mulino deve infatti avere dimensioni inferiori a 3360 μm .

Come prima operazione si deve quindi procedere alla vagliatura del materiale con un vaglio avente dimensioni delle maglie pari al più a 3360 μm , per poi scartare tutto il materiale che risulta di dimensioni superiori. Nel nostro caso questa operazione è stata svolta preventivamente, come già accennato in precedenza, dal fornitore del materiale stesso, ovvero il CER, con un vaglio di dimensione delle maglie pari a 3150 μm . Un campione rappresentativo del fuso buono, risultante da questa prima operazione di vagliatura viene in seguito analizzato più a fondo dal punto di vista granulometrico e si realizza la corrispondente curva cumulativa del passante. Le curve granulometriche così ottenute consentono di identificare graficamente, come si vedrà in seguito, la dimensione corrispondente all'80% del passante del materiale in ingresso, ovvero l' F_{80} da inserire nella formula per il calcolo del work index. A questo proposito le curve granulometriche sono state realizzate in scala decimale, non in scala logaritmica come normalmente avviene.

La carica del nostro mulino deve essere pari a 700 cm^3 di materiale, quindi come seconda operazione si rende necessaria la pesatura del materiale corrispondente a questa misura di volume. Essendo il materiale fortemente eterogeneo il peso della carica non è univocamente determinabile a priori si è quindi scelto di mediare il valore del peso ottenuto con tre misurazioni successive. A questi valori si dovrà fare riferimento nella fase successiva di macinazione quando si tratta di ripristinare la carica del peso perso con la parte finissima che viene scartata dopo ogni prova.

2) Macinazione e setacciatura

La fase più significativa della prova è quella della macinazione del materiale. Essa consta, per ogni materiale, di 7-10 macinazioni in serie, ad opera del mulino di prova appositamente costruito, e di altrettante operazioni di setacciatura al fine di identificare il valore del G_{bp} corrispondente e di preparare il materiale di carica per la macinazione successiva.

Dopo aver riempito il mulino con le sfere macinanti e averlo caricato con la giusta quantità di materiale, pesata come descritto nel paragrafo precedente, si procede con la prima macinazione. Bond non indica un preciso numero di giri da utilizzare come valore di partenza, quindi si è arbitrariamente scelto di procedere con 100 giri (corrispondenti nel nostro caso ad un tempo di 1 minuto e 26 secondi, dato il funzionamento del motore a 70 giri/minuto). Il materiale macinato viene poi raccolto con cura (al fine di perdere il minor quantitativo possibile di materiale sotto forma di polveri le sfere macinanti sono state minuziosamente pulite manualmente dopo ogni operazione di macinazione) e sottoposto ad una successiva operazione di setacciatura che consenta di separare il materiale di dimensione maggiore e minore del valore scelto come P_i (100 μm).

Per l'operazione di setacciatura ci siamo serviti di una setacciatrice automatica facendole compiere un ciclo di 30 minuti, ma l'elevata finezza del materiale ha richiesto un'operazione più approfondita, eseguita quindi anche manualmente, in particolar modo per i setacci dalle maglie più fini (150 μm e 100 μm).

Si procede poi alla pesatura del materiale, così come suddiviso dall'operazione di setacciatura, anche se lo scopo di tale operazione è essenzialmente quello di identificare il quantitativo di materiale passante all'ultimo setaccio, ovvero il materiale di dimensione inferiore ai 100 µm. Tale materiale viene quindi scartato e tenuto da parte, mentre il restante verrà utilizzato nella seconda macinazione dopo essere stato reintegrato con il materiale di partenza per un quantitativo che pareggi il valore totale del peso della carica. Si deve considerare che un quantitativo di materiale, se pur molto ridotto, viene perso durante l'insieme delle operazioni svolte quindi il peso della ricarica non coincide perfettamente con il peso del materiale inferiore ai 100 µm; abbiamo ipotizzato che il materiale perso sia essenzialmente polvere di dimensioni ridottissime e pertanto facente parte del materiale di scarto.

Con i dati ricavati dall'operazione di pesatura si calcola il valore di G_{bp} proprio di quella macinazione, definito come il rapporto tra la ricarica e il numero di giri utilizzato. Il G_{bp} rappresenta in un certo qual modo il parametro fondamentale della nostra prova in quanto se ne ricerca il valore costante, tipico del materiale, da inserire nella formula per il calcolo del work index. Le macinazioni in serie di ogni materiale terminano al momento in cui si trovi la costanza di tale parametro, e solitamente questo avviene, secondo l'esperienza svolta, non prima di 7 macinazioni.

La seconda macinazione, così come le seguenti, non viene svolta con un numero di giri casuale, ma tale numero viene calcolato sulla base della carica circolante. Si valuta il numero di giri che corrisponde al passante teorico all'ultimo setaccio per un valore di carica circolante pari al 250%.

Per una maggiore chiarezza riportiamo di seguito un esempio, facente riferimento al calcolo del numero di giri della seconda macinazione per il nostro impasto di grès porcellanato.

$$Carica_circolante = \frac{materiale > 100}{ricarica} \times 100 = \frac{771,6}{370,4} \times 100 = 208$$

$$Passante_teorico = \frac{\text{materiale} > 100}{250} \times 100 = \frac{771,6}{250} \times 100 = 308,64$$

$$n^\circ \text{ giri} = \frac{passante_teorico}{G_{bp}} = \frac{308,64}{3,7} = 83$$

Tale metodo di valutazione, proposto dallo stesso Bond, porta ad un andamento altalenante del numero di giri per poi attestarsi attorno ad un dato valore una volta raggiunta una percentuale di carica circolante vicina al valore del 250%.

3) Analisi al laser

Una volta raggiunta la costanza del valore di G_{bp} si procede alla determinazione del P_{80} , l'unico parametro ancora mancante per il calcolo del work index. Per la determinazione del P_{80} si effettua l'analisi granulometrica del materiale di scarto (ovvero quello di dimensione inferiore ai 100 μm) risultante dall'ultima prova di macinazione svolta.

Differente è, rispetto all'esperimento originario, lo strumento scelto per effettuare tale analisi granulometrica: il granulometro laser invece della setacciatrice meccanica. La scelta ha una duplice motivazione, da una parte consente una maggior precisione nel trattare con le granulometrie fini rispetto al metodo tradizionale, dall'altra comporta un notevole risparmio di tempo. Si deve tuttavia sottolineare come in una prima fase di studio, per alcuni materiali di prova usati nella taratura del mulino, siano stati utilizzati entrambi i metodi al fine di individuare le eventuali differenze di risultato; differenze che si sono rivelate non trascurabili in quanto la metodologia tradizionale ha portato, in tutti i casi, a valori di P_{80} maggiori rispetto a quelli individuati con lo strumento laser. Non deve quindi stupire il fatto che lo stesso Bond suggerisca, nel caso si sia per qualche motivo impossibilitati ad effettuare tale analisi, di utilizzare come valore medio, corrispondente ad un P_i di 100 μm , un P_{80} pari a 75 μm , quindi piuttosto elevato.

5.2.2 Procedura breve

5.2.2.1 Teoria di base

Una procedura più rapida per la determinazione del work index è stata messa a punto nel 1989 da N. Magdalinovic, presso l'Università di Belgrado. Tale procedura è decisamente semplificata, in quanto consente di giungere al valore del work index dopo due sole prove di macinazione, riducendo quindi i tempi di lavoro in laboratorio e soprattutto riducendo la possibilità di incappare in errori procedurali tipici di una metodologia così prolissa e complessa come quella standard. I valori di work index ottenuti con la procedura rapida si discostano di poco dai valori derivanti dalla procedura standard del test di Bond, in particolare è stato rilevato come tale differenza non superi mai il 7%. Si riporta di seguito un confronto fra valori di work index ottenuti da Magdalinovic con entrambe le procedure nel caso di un'andesite, di un calcare e di un minerale di rame.

Materiale	P _i scelto per il test [µm]	Work index test standard [kWh/t]	Work index test rapido [kWh/t]	Differenza
				$\Delta = \frac{Wis\ tan\ dard - Wirapido}{Wis\ tan\ dard} \cdot 100$
Andesite	500	15,40	14,57	+5,4
	315	13,79	12,83	+7
	160	11,84	11,46	+3,2
	80	12,9	13,07	-1,3
Calcare	500	25,05	24,42	+2,5
	315	19,9	21,25	-6,8
	160	22,7	21,31	+6,1
	80	22,38	22,00	+1,7
Minerale di rame	500	14,26	13,33	+6,5
	315	13,57	12,78	+5,8
	160	11,04	10,48	+5,1
	80	11,7	11,41	+2,5

Tab. 5.2. Confronto fra work index ottenuti con la procedura standard e con quella rapida

La procedura rapida si basa su alcune osservazioni riguardanti la cinetica del processo di macinazione; è stato infatti appurato che dopo un breve periodo il processo segue una legge cinetica del primo ordine del tipo:

$$R = R_0 \cdot e^{-kt}$$

dove:

R = materiale superiore alla dimensione test al tempo t

R_0 = materiale superiore alla dimensione test all'inizio della macinazione ($t=0$)

k = costante di macinazione

t = tempo di macinazione

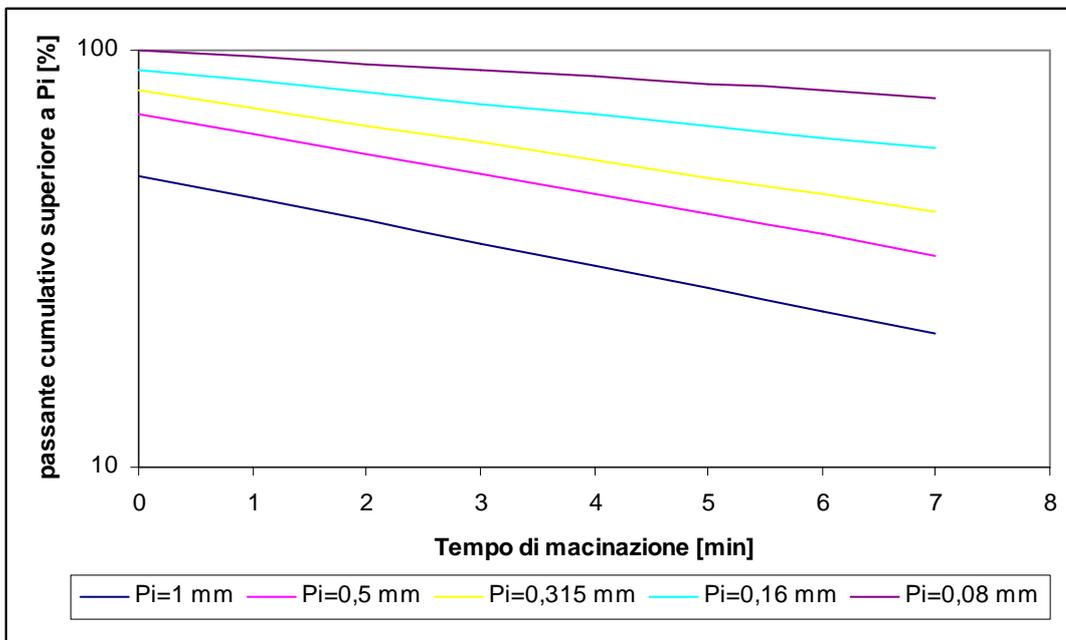


Fig. 5.1 Cinetica del processo di macinazione dell'andesite.

La costante di macinazione può essere determinata dopo una sola prova di macinazione. Dall'equazione precedente si ricava che:

$$k = \frac{\ln R_0 - \ln R}{t}$$

In uno schema di macinazione a circuito chiuso, come quello utilizzato nelle prove svolte, nel caso in cui la carica circolante sia pari al 250%, come si vuole in effetti ottenere nella realizzazione del test di Bond secondo la procedura standard, sussistono le seguenti relazioni:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{R}{U} = 2,5 \\ R + U = M \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} R = \frac{2,5}{3,5} M \\ U = \frac{1}{3,5} M \end{array}$$

dove:

R = quantità di materiale di dimensione superiore a quella del test [g]

U = quantità di materiale di dimensione inferiore a quella del test [g]

M = peso totale della carica [g]

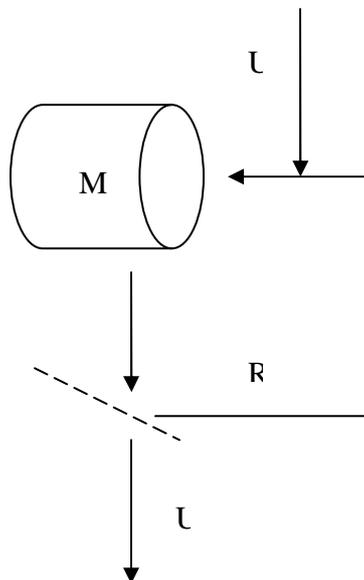


Fig. 5.2 Schema di un circuito chiuso di macinazione

Ne segue che in un ciclo standard al 250% di carica circolante all'inizio della macinazione il peso del materiale di dimensione superiore a quella scelta per il test è pari a:

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

con r_0 = porzione di materiale di dimensione superiore a quella del test nella nuova ricarica, espressa in percentuale.

Sostituendo nell'equazione cinetica iniziale si ottiene:

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

Da cui l'espressione del tempo di macinazione necessario in un ciclo standard per ottenere una quantità di materiale grossolano circa pari ad R, cui corrisponde un valore di carica circolante del 250%.

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

Nel mulino a sfere di Bond il numero di giri a cui si effettua la prova è un dato più importante rispetto al tempo di macinazione, quindi esprimendo il tempo come rapporto fra il numero di giri utilizzato (N) e il numero di giri al minuto cui funziona il motore (n) abbiamo $t = N/n$

Conseguentemente l'espressione della costante di macinazione diventa:

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

Infine si può valutare il numero di giri cui far lavorare il mulino per avere valori di R ed U che diano una carica circolante del 250%.

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

5.2.2.2 Descrizione pratica della prova

Procediamo ora nella descrizione passo dopo passo dello svolgimento pratico della prova di laboratorio secondo quanto indicato dalla procedura rapida.

1) Preparazione del materiale

Anche in questo caso la prima operazione consiste in una vagliatura del materiale per scartarne la parte più grossolana, nello specifico di dimensioni superiori a 3150 μm . Segue, anche con questa procedura, la pesatura del materiale di carica corrispondente alla misura di volume di 700 cm^3 , utilizzando un apposito cilindro graduato. Si è deciso di mediare il valore del peso ottenuto con tre misurazioni successive in modo da minimizzare gli errori casuali legati alla maggiore o minore compattazione, essendo la stessa effettuata manualmente. I valori ottenuti per i vari materiali sono riportati in tabella.

MATERIALE	PESO DELLA CARICA
Feldspato potassico	1269 g
Argilla illittico-caolinitica	1238 g
Feldspato sodico	1173 g
Sabbia feldspatica	1063 g
Argilla filtropressata	874 g
Argilla bentonitica	764 g
Mix	1142 g

Tab.5.3 *Pesi corrispondenti ad un volume di 700 cm^3 .*

Si calcolano, una volta noto il peso totale del materiale di carica al mulino (M), i valori di $R = (2,5/3,5) M$; e di $U = M - R$.

Si devono poi preparare due campioni, uno per ogni prova di macinazione da svolgere, di peso pari ad M , così composti:

- una parte, di peso pari a R , di materiale al quale è stata tolta la granulometria più fine (al di sotto della dimensione scelta per il test come P_i), ovvero di materiale con dimensioni comprese, nel nostro caso, fra $3150 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$.
- una parte, di peso pari ad U , di materiale così come si presenta dopo il primo taglio alla granulometria grossolana, ovvero di materiale con dimensioni inferiori a $3150 \mu\text{m}$.

Risulta quindi chiaro che è necessario setacciare il materiale in modo tale da ottenerne un quantitativo di peso almeno $2R$ con dimensioni superiori a quelle scelte per il test, cioè $100 \mu\text{m}$.

Si procede inoltre alla setacciatura del primo campione di peso U per poter ricavare la curva granulometrica corrispondente, la quale viene sfruttata per un duplice scopo:

- valutare l' F_{80} da inserire nella formula per il calcolo del work index,
- valutare la percentuale di fini presente nel nostro materiale di origine (r_0).

Una volta noto il valore di r_0 si può facilmente calcolare il valore di R_0 , ovvero il quantitativo di materiale di dimensione superiore a $100 \mu\text{m}$ presente nella carica del mulino.

2) Macinazione

La fase successiva è quella della macinazione vera e propria dei due campioni di materiale preparati in precedenza.

Si carica il mulino con uno dei due campioni di materiale di peso pari ad M e si procede con la prima macinazione, utilizzando un numero di giri arbitrariamente scelto. Solitamente si utilizzano 50, 100 o 150 giri, nel caso in esame si è scelto di partire con 100 giri, corrispondenti ad un tempo di macinazione di 1 minuto e 26

secondi per un motore che funziona a 70 giri/minuto. Si anticipa già che nel caso dell'argilla filtropressata la prima macinazione è stata effettuata ad un numero di giri estremamente basso, 35 per la precisione, a causa dell'elevata tenerezza del materiale.

Si procede poi alla pulizia delle sfere macinanti al fine di perdere il minor quantitativo possibile di materiale sotto forma di polveri e si raccoglie il materiale macinato per sottoporlo ad una successiva operazione di setacciatura che consenta di separare il materiale di dimensione maggiore e minore del valore scelto come P_i (100 μm).

L'operazione di setacciatura è stata effettuata ogni volta in due momenti a causa dell'elevato quantitativo di materiale da trattare, in quanto la strumentazione utilizzata consente di setacciare un massimo di 700 grammi circa per volta. I cicli di setacciatura hanno durata di 30 minuti ciascuno, ma l'elevata finezza del materiale ha richiesto un'operazione più approfondita, eseguita quindi anche manualmente, in particolar modo per i setacci dalle maglie più fini (150 μm e 100 μm).

Il materiale di dimensione superiore ai 100 μm e quello di dimensione inferiore risultanti dall'operazione di setacciatura vengono quindi pesati. Indicando con R il peso del materiale di dimensione superiore ai 100 μm si calcola la costante di macinazione k e quindi il numero di giri N_c a cui effettuare la seconda macinazione.

Caricando nel mulino il campione rimasto dei due preparati inizialmente, si effettua la seconda macinazione per un numero di giri pari al valore precedentemente calcolato. Anche in questo caso dopo la pulizia dei corpi macinanti si procede con una setacciatura che consenta di separare la parte fine da quella grossolana e si pesano il quantitativo di materiale di dimensione superiore ai 100 μm e quello di dimensione inferiore (indicato con m). Approssimativamente dovremmo ottenere i valori (R,U) calcolati inizialmente che corrispondono ad un valore di carica circolante del 250%.

3) Analisi laser

La fase finale consiste nella determinazione della distribuzione granulometrica del materiale passante al setaccio dei 100 μm nella seconda macinazione, tramite l'utilizzo del granulometro laser. Si valuta così la dimensione corrispondente all'80% del passato, il P_{80} da inserire nella formula per il calcolo del work index.

Il valore del G_{bp} da inserire nella formula del work index si calcola con la seguente espressione:

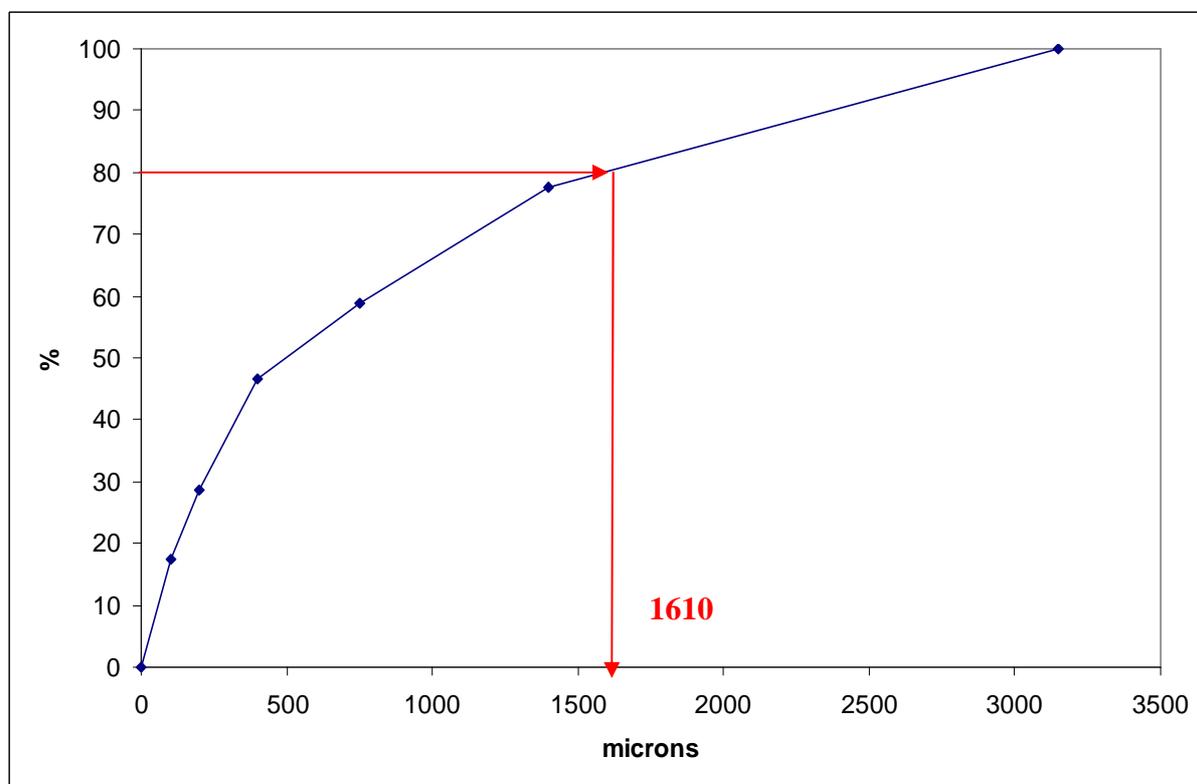
$$G_{bp} = \frac{m - \frac{1}{3,5} M(1 - r_0)}{N_c}$$

6 CONFRONTO NUMERICO FRA LE PROCEDURE

6.1 Introduzione

Nel seguente paragrafo riportiamo i risultati ottenuti sull'impasto di grès porcellanato con l'applicazione delle due differenti procedure, quella standard di Bond e quella rapida di Magdalinovic.

Riportiamo in primo luogo l'analisi granulometrica del fuso iniziale, comune ad entrambe le procedure, ed utilizzata per la valutazione dell' F_{80} .



Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	72,54	22,3	22,3	77,7
750	60,92	18,8	41,1	58,9
400	40,26	12,4	53,5	46,5
200	57,92	17,8	71,3	28,7
100	36,3	11,2	82,5	17,5
< 100	56,96	17,5	100,0	0,0
Totale	324,9	100,0		

6.2 Dati ottenuti con la procedura standard

	1°PROVA	2°PROVA	3°PROVA	4°PROVA	5°PROVA	6°PROVA	7°PROVA
N° GIRI	100	83	125	115	147	154	150
TEMPO minuti	1	1	1	1	2	2	2
Secondi	26	11	47	38	6	12	9
> 100	771,6	901	796	870	827,2	810	814
< 100	366,2	237,8	344,8	268	311,2	329	325,8
TOTALE	1137,8	1138,8	1140,8	1138	1138,4	1139	1139,8
RICARICA	370,4	241	346	272	314,8	332	328
Gbp	3,70	2,89	2,78	2,37	2,15	2,15	2,18

6.3 Dati ottenuti con la procedura rapida

	1°PROVA	2°PROVA
N°GIRI	100	113
TEMPO minuti	1	1
secondi	26	37
> 100	843	826
< 100	294,2	316
TOTALE	1137,2	1142
Gbp	2,37	2,29

6.3 Calcolo dei work index e confronto

Riassumiamo in una tabella di confronto fra le due procedure tutti i valori dei parametri di input per il calcolo del work index.

PARAMETRO	VALORE PROCEDURA STANDARD	VALORE PROCEDURA RAPIDA
P_i	100 µm	100 µm
G_{bp}	2,16	2,29
P₈₀	44 µm	43 µm
F₈₀	1610 µm	1610 µm

Sostituendo nella seguente formula:

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{P_i^{0,23} \cdot G_{bp}^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right]}$$

$$w_{i-standard} = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 2,16^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{44}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{1610}} \right) \right]} = 7,2$$

$$w_{i-rapida} = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 2,29^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{43}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{1610}} \right) \right]} = 6,75$$

I work index ottenuti sono, come era facilmente prevedibile, effettivamente differenti. Si tratta ora di quantificare tale differenza, ovvero di calcolare l'errore commesso nell'utilizzare la procedura rapida, per vedere se esso risulta inferiore al 7% come teorizzato da Magdlinovic, o se il nostro caso smentisce tale teoria. Riportiamo di seguito tale calcolo.

$$\Delta = \frac{w_{i, standard} - w_{i, rapido}}{w_{i, standard}} \cdot 100 = \frac{7,2 - 6,75}{7,2} \cdot 100 = +6,25$$

L'errore commesso risulta pari al 6,25%, quindi perfettamente entro i limiti evidenziati dalla procedura rapida anche in altri casi di studio. Si ritiene che tale errore sia accettabile, soprattutto considerando che anche nello svolgimento della prova standard è facile incappare in errori procedurali, che si ripercuotono irrimediabilmente sul valore finale del work index.

Possiamo concludere pertanto giustificando la scelta della procedura rapida, per lo svolgimento delle prove sui singoli materiali e la valutazione dei rispettivi work index, con l'entità trascurabile di tale errore.

7 I SINGOLI MATERIALI

7.1 Introduzione

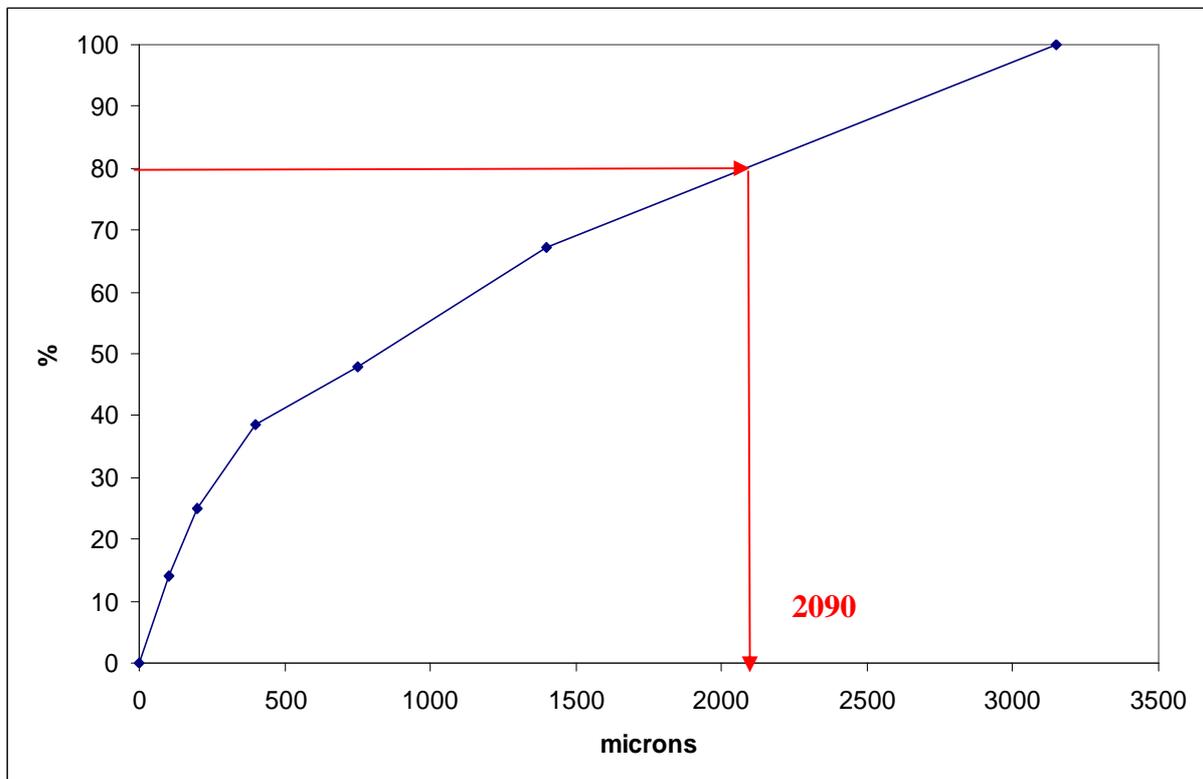
Si riportano in questo capitolo i risultati ottenuti per i singoli materiali effettuando prove con la metodologia rapida. Per ciascun materiale si riportano, in ordine:

- la curva granulometrica di partenza da cui ricavare il valore dell' F_{80} ,
- il peso del materiale di dimensione superiore a 100 μm e quello del materiale di dimensione inferiore ottenuti con le due macinazioni e rispettivi G_{bp} ;
- i risultati dell'analisi al laser per il materiale inferiore a 100 μm risultante dalla seconda ed ultima macinazione;
- una tabella riassuntiva dei valori dei parametri utilizzati nella formula del work index;
- Il calcolo del work index stesso.

Come già accennato in precedenza si potrà facilmente notare che, diversamente da quanto avviene per gli altri materiali, nel caso dell'argilla filtropressata la prima prova di macinazione è stata condotta a 35 giri. La scelta di un numero di giri così basso dipende dall'elevata tenerezza del materiale (si noti il valore del work index risultante, estremamente basso), che non consente di trattare, con i mezzi a disposizione, un materiale con le caratteristiche di quello risultante da un ciclo di macinazione condotto a 100 giri. Tale materiale, di granulometria finissima, forma infatti una sorta di strato pastoso da cui risulta difficile pulire le sfere macinanti e la superficie interna del mulino per di più senza perdere un quantitativo significativo di materiale, inoltre comporta difficoltà anche durante l'operazione di setacciatura.

FELDSPATO POTASSICO

Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	118,42	32,7	32,7	67,3
750	70,54	19,5	52,2	47,8
400	33,74	9,3	61,5	38,5
200	48,72	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	362,32	100,0		



	1° PROVA	2° PROVA
N° GIRI	100	195
TEMPO minuti	1	2
Secondi	26	48
> 100	1047	884
< 100	219	385
TOTALE	1266	1269
Gbp	1,68	1,71

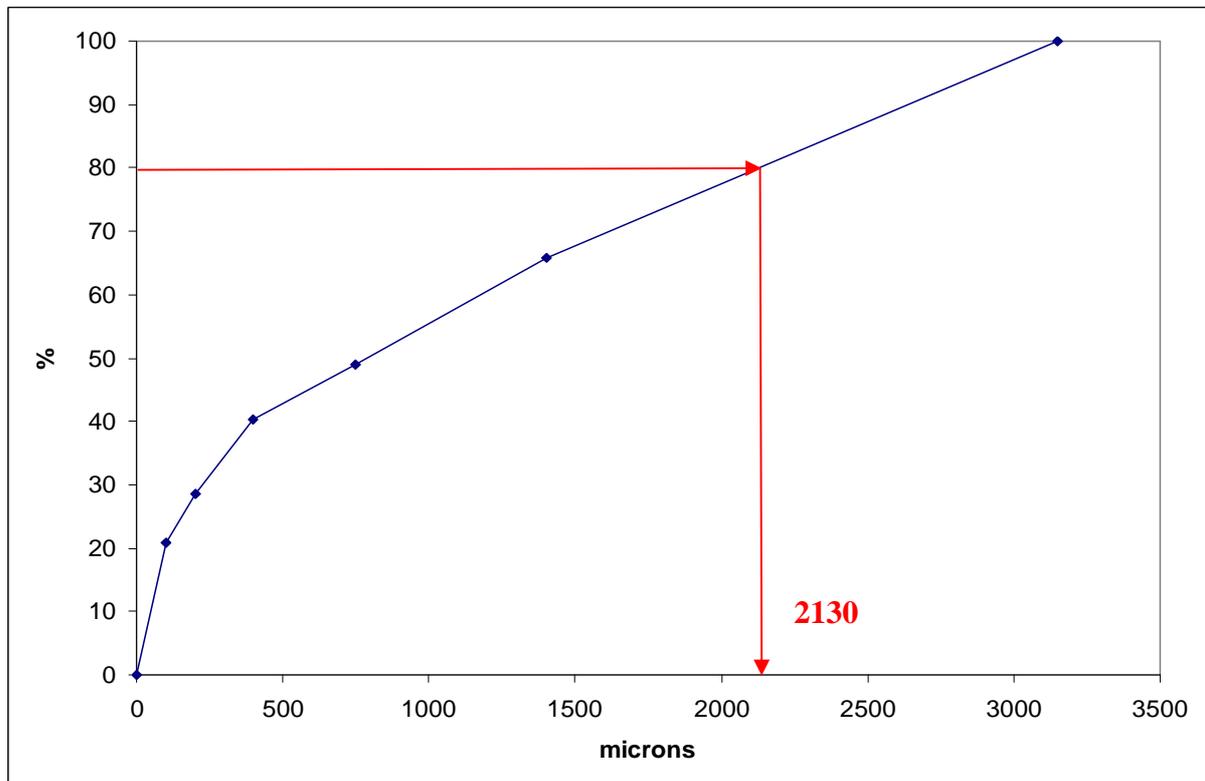
Analisi al laser: P₈₀ = 58 µm

PARAMETRO	VALORE
P_i	100 µm
G_{bp}	1,71
P₈₀	58 µm
F₈₀	2090 µm

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 1,71^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{58}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{2090}} \right) \right]} = 10$$

ARGILLA ILLITTICO-CAOLINITICA

Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	120,58	34,2	34,2	65,8
750	59,36	16,8	51,0	49,0
400	30,7	8,7	59,7	40,3
200	41,86	11,9	71,5	28,5
100	26,64	7,5	79,1	20,9
< 100	73,94	20,9	100,0	0,0
Totale	353,08	100,0		



	1° PROVA	2° PROVA
N° GIRI	100	104
TEMPO minuti	1	1
Secondi	26	29
> 100	893	876
< 100	338,8	362
TOTALE	1231,8	1238
Gbp	2,65	2,78

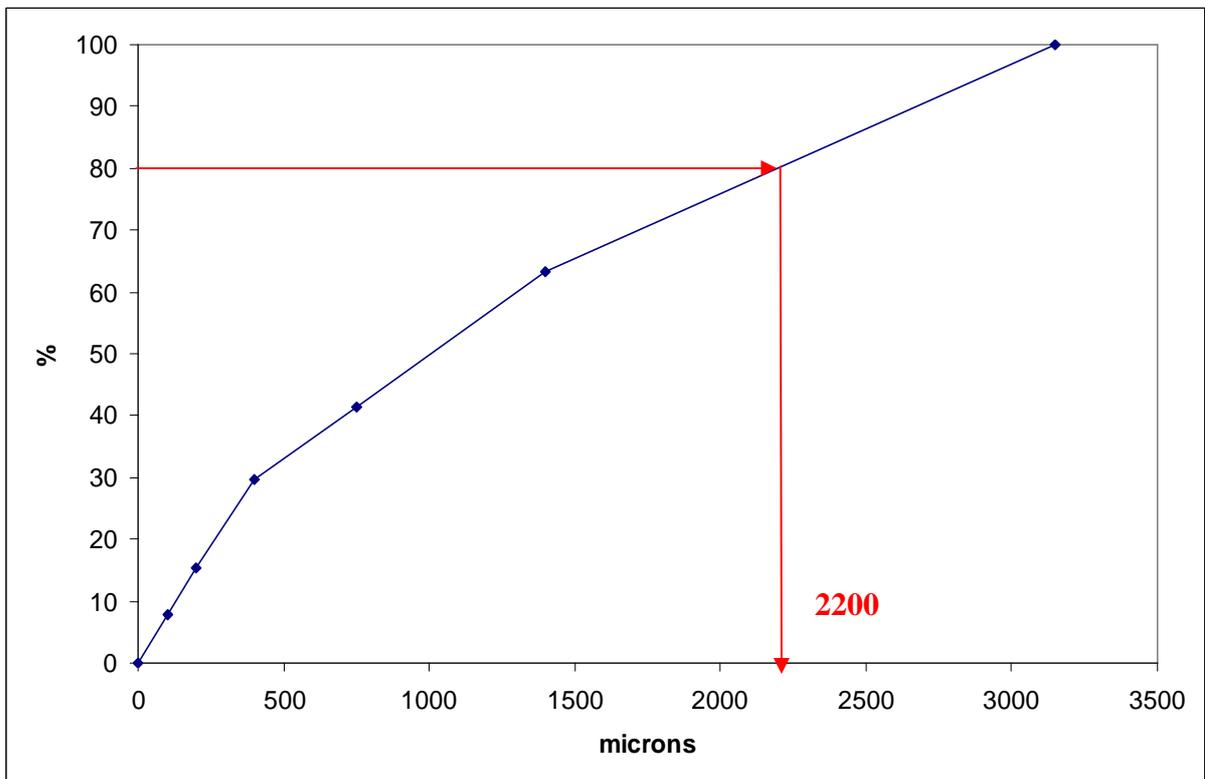
Analisi al laser: P₈₀ = 31 µm

PARAMETRO	VALORE
P_i	100 µm
G_{bp}	2,78
P₈₀	31 µm
F₈₀	2130 µm

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 2,78^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{31}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{2130}} \right) \right]} = 4,65$$

FELDSPATO SODICO

Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	122,92	36,8	36,8	63,2
750	72,76	21,8	58,6	41,4
400	39,56	11,8	70,4	29,6
200	47,58	14,2	84,7	15,3
100	25,26	7,6	92,2	7,8
< 100	25,92	7,8	100,0	0,0
Totale	334	100,0		



	1° PROVA	2° PROVA
N° GIRI	100	222
TEMPO minuti	1	3
Secondi	26	11
> 100	996	896
< 100	173	277
TOTALE	1169	1173
Gbp	1,47	1,13

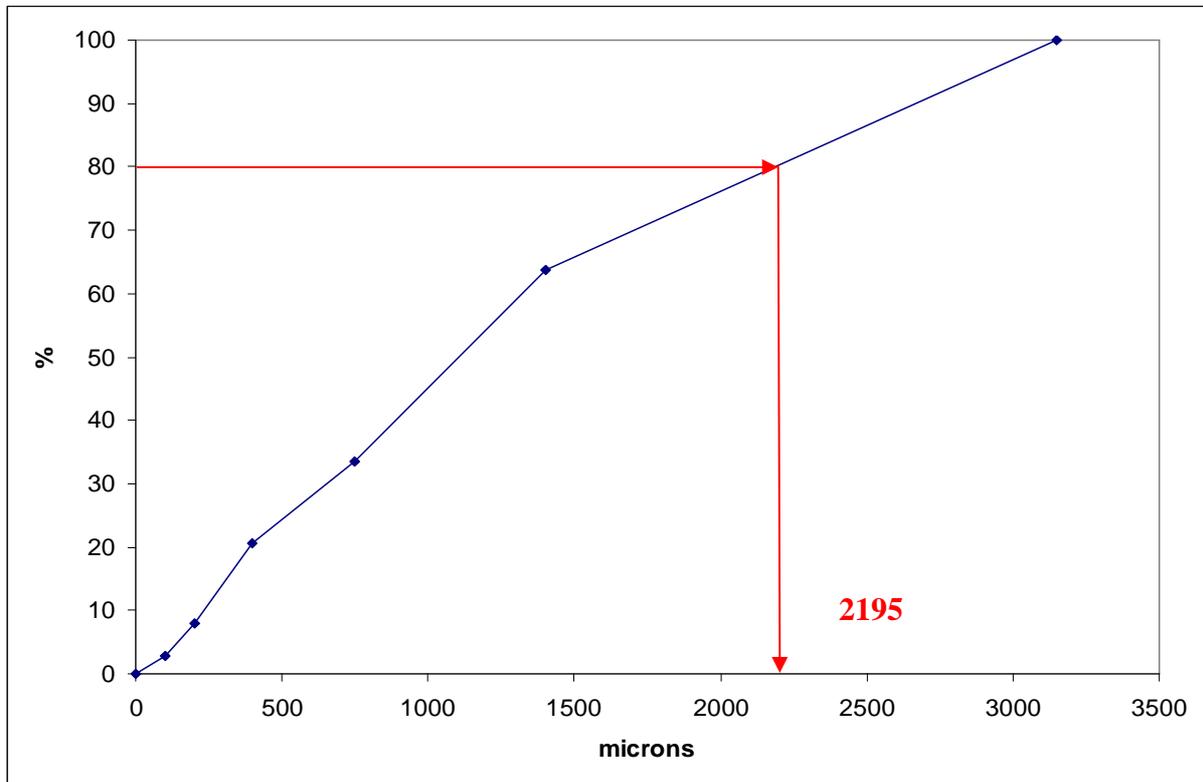
Analisi al laser: P₈₀ = 52 μm

PARAMETRO	VALORE
P_i	100 μm
G_{bp}	1,13
P₈₀	52 μm
F₈₀	2200 μm

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 1,13^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{52}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{2200}} \right) \right]} = 13,1$$

SABBIA FELDSPATICA

Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	110,64	36,4	36,4	63,6
750	91,76	30,2	66,6	33,4
400	38,82	12,8	79,4	20,6
200	38,2	12,6	92,0	8,0
100	16,02	5,3	97,2	2,8
< 100	8,44	2,8	100,0	0,0
Totale	303,88	100,0		



	1° PROVA	2° PROVA
N° GIRI	100	220
TEMPO minuti	1	3
Secondi	26	8
> 100	908	801
< 100	151,6	262
TOTALE	1059,6	1063
Gbp	1,43	1,16

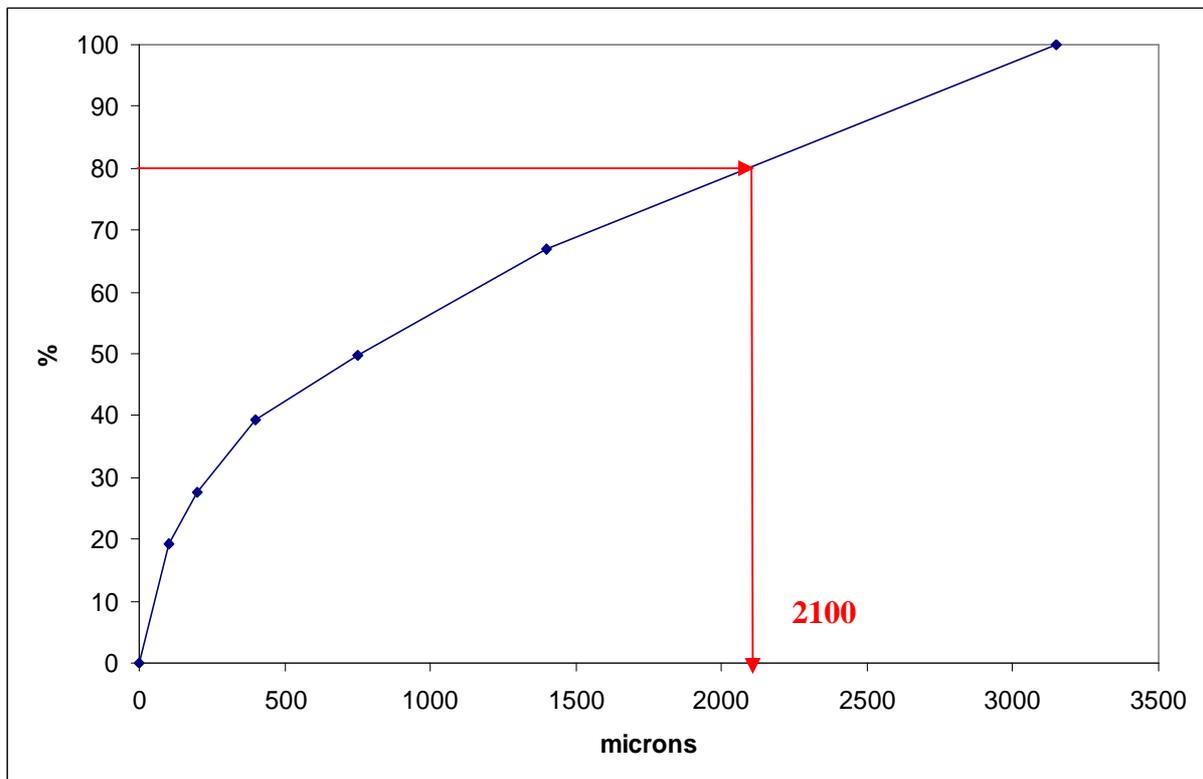
Analisi al laser: P₈₀ = 49 μm

PARAMETRO	VALORE
P_i	100 μm
G_{bp}	1,16
P₈₀	49 μm
F₈₀	2195 μm

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 1,16^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{49}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{2195}} \right) \right]} = 12,41$$

ARGILLA FILTROPRESSATA

Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	82,48	33,1	33,1	66,9
750	42,64	17,1	50,2	49,8
400	25,88	10,4	60,6	39,4
200	29,04	11,7	72,3	27,7
100	20,74	8,3	80,6	19,4
< 100	48,24	19,4	100,0	0,0
Totale	249,02	100,0		



	1° PROVA	2° PROVA
N° GIRI	35	16
TEMPO minuti	0	0
Secondi	30	14
> 100	452	617
< 100	413,6	257
TOTALE	865,6	874
Gbp	10,44	12,85

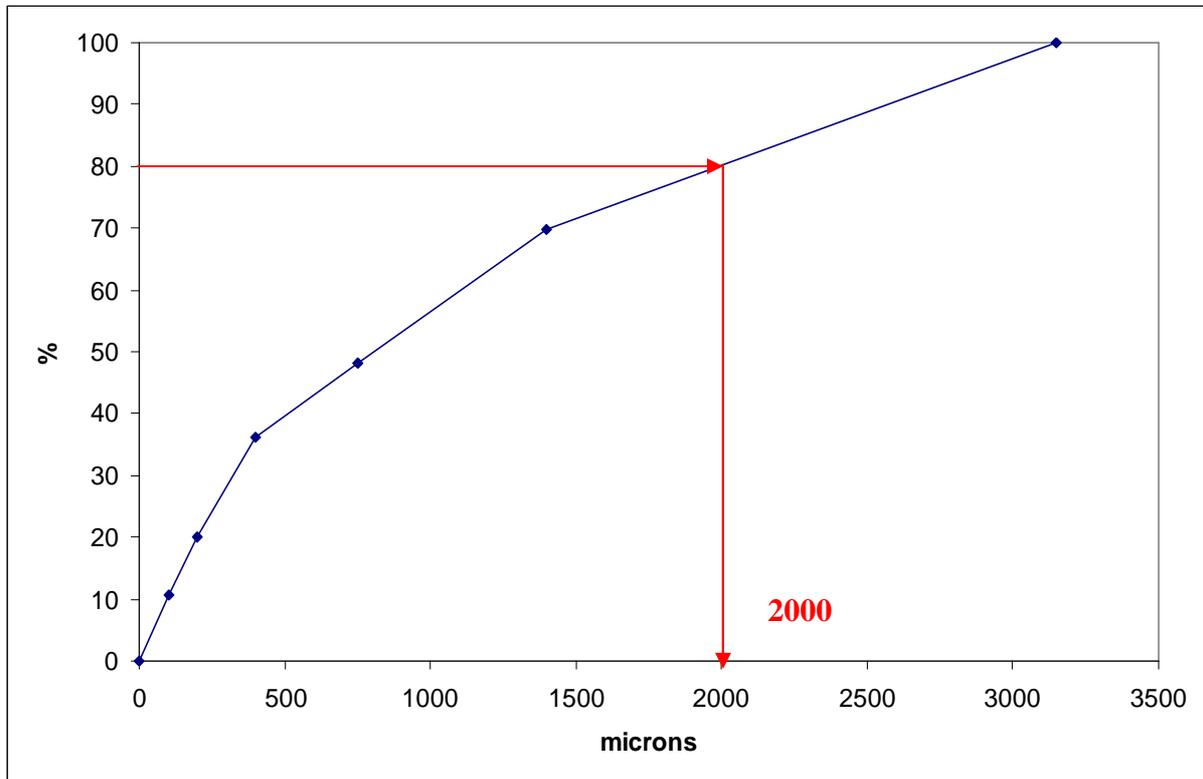
Analisi al laser: P₈₀ = 33 µm

PARAMETRO	VALORE
P_i	100 µm
G_{bp}	12,85
P₈₀	33 µm
F₈₀	2100 µm

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 12,85^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{33}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{2100}} \right) \right]} = 1,37$$

ARGILLA BENTONITICA

Dimensioni maglia setaccio	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
3150	0	0,0	0,0	100,0
1400	66,26	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	35,34	16,0	79,8	20,2
100	21,08	9,6	89,4	10,6
< 100	23,32	10,6	100,0	0,0
Totale	220,2	100,0		



	1° PROVA	2° PROVA
N° GIRI	100	162
TEMPO minuti	1	2
Secondi	26	19
> 100	613,2	518
< 100	150,6	246
TOTALE	763,8	764
Gbp	1,27	1,38

Analisi al laser: $P_{80} = 38 \mu\text{m}$

PARAMETRO	VALORE
P_i	100 μm
G_{bp}	1,38
P_{80}	38 μm
F_{80}	2000 μm

$$w_i = 1,1 \times \frac{44,5}{100^{0,23} \cdot 1,38^{0,82} \cdot \left[\left(\frac{10}{\sqrt{38}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{2000}} \right) \right]} = 9,32$$

7.2 Considerazioni finali

Ottenuti tutti i valori di work index necessari possiamo procedere alla verifica finale cui il nostro studio è rivolto, cercare un'eventuale relazione tra i work index singoli e quello dell'impasto di grès porcellanato. Riassumiamo innanzitutto in tabella i valori ottenuti:

MATERIALE	WORK INDEX [kWh/t]
Feldspato potassico	10
Argilla illittico-caolinica	4,65
Feldspato sodico	13,1
Sabbia feldspatica	12,41
Argilla filtropressata	1,37
Argilla bentonitica	9,32
Mix	6,75

Calcoliamo il valore ipotetico di work index dell'impasto come una media pesata dei valori di ogni singolo materiale, dove i pesi risultano essere le percentuali con le quali tali materiali sono presenti nell'impasto stesso.

$$w_{i,media} = 10 \cdot 0,11 + 4,65 \cdot 0,23 + 13,1 \cdot 0,39 + 12,41 \cdot 0,05 + 1,37 \cdot 0,18 + 9,32 \cdot 0,04 = 8,51$$

Il valore calcolato risulta essere più elevato rispetto al work index determinato direttamente tramite le prove, sia nel caso in cui lo si confronti col valore derivante dalla procedura standard (7,2 kWh/t), e ancora di più nel caso in cui il confronto interessi il valore derivante dalla procedura rapida (6,75 kWh/t). Ne possiamo dedurre che il quantitativo di energia richiesto per la macinazione dell'impasto risulta minore del quantitativo che si spenderebbe macinando singolarmente ogni materiale.

Vogliamo valutare l'errore commesso calcolando il work index col metodo della media pesata rispetto al valore ottenuto tramite prove di macinazione dirette, secondo entrambe le procedure.

$$\Delta = \frac{Wi, standard - Wi, media}{Wi, standard} \cdot 100 = \frac{7,2 - 8,51}{7,2} \cdot 100 = -18,19$$

$$\Delta = \frac{Wi, rapido - Wi, media}{Wi, rapido} \cdot 100 = \frac{6,75 - 8,51}{6,75} \cdot 100 = -26,07$$

L'errore commesso risulta in entrambi i casi troppo elevato, e comunque non trascurabile, pertanto si ritiene da escludere la possibilità di individuare una relazione del tipo proposto (ovvero una media pesata) fra i work index dei singoli materiali e quello dell'impasto.

8 CONCLUSIONI

L'esperienza svolta in laboratorio e la successiva elaborazione dei dati ottenuti dalle prove di macinazione portano ad esprimere delle conclusioni sia in merito alla scelta della metodologia di più corretta utilizzazione per lo svolgimento delle prove di macinazione, sia in merito alla possibilità di valutazione del work index di un mix di materiali tramite una semplice elaborazione dei singoli valori di work index degli stessi.

In primo luogo la scelta della procedura rapida risulta giustificata dalla prova che l'errore commesso, rispetto alla procedura standard, sul valore finale del work index, si mantiene sempre entro una data percentuale, in particolare il 7%, così come dimostrato da Magdalinovic in esperimenti precedenti. Nel considerare un errore di questa entità accettabile si tiene anche conto del fatto che, nell'applicazione della procedura standard, per la verità piuttosto complessa e macchinosa, è elevata la probabilità che si verifichino errori di tipo procedurale e che quindi il valore finale di work index ottenuto si discosti leggermente dal valore reale.

In secondo luogo sembra sfumare la possibilità di calcolare il work index di un impasto di materiali una volta noti i work index degli stessi e le percentuali con le quali essi compongono il mix. L'utilizzo di una media pesata porta infatti, nel caso studiato, ad un valore di work index più elevato rispetto a quello valutato in modo diretto.

Detto questo si deve considerare la possibilità che l'elaborazione di valori di work index ottenuti con la metodologia standard porti ad un valore calcolato maggiormente vicino al valore reale. Infatti nel caso in cui, fortuitamente, l'applicazione della procedura rapida abbia portato per lo più ad una stima per eccesso dei work index dei materiali, ne conseguirebbe una stima per eccesso anche del valore calcolato. A favore di questa possibile spiegazione interviene un'osservazione statistica che vede, negli esempi a noi noti, una casistica maggiore di stime per eccesso che per difetto nell'applicazione della procedura rapida.

Per quanto riguarda le possibilità di sviluppo futuro dello studio effettuato, si auspica la determinazione dei work index di tutti i materiali anche tramite l'applicazione della procedura standard. Lo scopo di una ricerca di questo tipo deve essere duplice:

- verificare ulteriormente la validità della procedura rapida;
- verificare la possibilità che i valori ricavati con la procedura rapida siano per lo più stimati per eccesso, e che questo abbia condotto, nel presente studio, ad una conclusione errata in merito all'applicabilità del metodo di calcolo della media pesata.

Un'altra osservazione che emerge dai dati ottenuti è legata alla presenza di un'elevata percentuale (45%) di materiale argilloso nell'impasto analizzato. Le argille infatti possono creare, durante la fase di macinazione, uno strato di ricoprimento delle sfere macinanti che attutisce gli urti e fa diminuire l'efficienza di macinazione. Un effetto di questo tipo, che non pare essere intervenuto nelle prove svolte, potrebbe invece comportare, in un mulino a scala industriale che lavori con un quantitativo di materiale di carica maggiore, una spesa energetica più elevata rispetto a quella valutabile tramite la formula di Bond. In questo caso potrebbe dunque risultare valido il valore di work index ottenuto con il metodo della media pesata che ci conduce ad un valore di energia di macinazione maggiore rispetto a quello valutabile con il work index della prova diretta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Belardi G., Passeri L., *“Dimensionamento di mulini pilota per la macinazione del salgemma ottenuto come sottoprodotto dopo la reazione di conversione kainite-langbeinite (processo Italkali S.p.a.) in trommel sperimentale”*, CNR, Istituto di geologia ambientale e geingegneria, Rapporti tecnici, 2006
- [2] Bond F.C., *“Crushing and grinding calculations”*, British Chemical Engineering, 1951
- [3] Bonoli A, Ciancabilla F., Fabbri S., *“La comminuzione dei materiali”*, Quarry and Construction, settembre 1986
- [4] Bonoli A., *“Macinazione dei minerali ed energia: presupposti teorici ed osservazioni sperimentali”*, 1985
- [5] Bozkurt V., Ozgur I., *“Dry grinding kinetics of colemanite”*, Powder technology 15, febbraio 2007
- [6] Deniz V., Ozdag H., *“A new approach to Bond grindability and work index: dinamic elastic parameters”*, Minerals Engineering 16 (2003), 211-217
- [7] Magdalinovic N., *“A procedure for rapid determination of the Bond work index”*, International Journal of Mineral processing, 27(1989), 125-132
- [8] Mazzolani A., *“Criteri di scelta di un mulino e conseguenze su un impianto di macinazione per la produzione ceramica”*, 2003
- [9] Palmonari C., Timellini G., *“Le piastrelle di ceramica italiane, come e perché. Guida all'acquisto e all'impiego”*, edizioni EdiCer Spa, 1999

Siti internet

www.cnr.it/istituti

www.sciencedirect.com

www.qualipiastralle.it

www.refin.it