

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Corso di laurea magistrale in Analisi e Gestione  
dell'Ambiente

## **Studio sulla polverosità dei materiali**

**Tesi di Laurea in Processi di trasporto e dispersione degli inquinanti in  
atmosfera – Chimica fisica**

**Candidato:**

*Piccininno Christian*

**Relatore:**

*Prof. Modelli Alberto*

**Correlatori:**

*Dott.ssa Pollini Elisa*

*Dott.ssa Lucialli Patrizia*

Sessione unica

Anno Accademico 2015-2016

# Indice

Introduzione.....	3
1. ....	
Capitolo I – Definizione di polverosità e dei metodi di misura .....	5
1.1. Definizione di polverosità .....	5
1.2. Fattori che influenzano il parametro della polverosità.....	6
1.3. Metodi e Apparecchiature: da quelli storici a quelli più recenti.....	8
1.3.1. Principi di base.....	8
1.3.2. Studi sulla correlazione tra polverosità ed esposizione dei lavoratori.....	10
1.3.3. Apparecchio e metodo a Singola caduta .....	11
1.3.4. Apparecchio e metodo a Tamburo rotante.....	15
1.3.5. Apparecchio e metodo a Caduta con flusso continuo.....	16
1.3.6. Tester della polverosità con gas fluidificanti .....	16
1.3.7. Camera di risospensione .....	17
1.3.8. Progettazioni speciali.....	17
1.3.9. Riflessioni critiche sulla misura Sistemática della Polverosità .....	18
2. ....	
Capitolo II – Normativa europea, ricerca di standard di riferimento per l’analisi della polverosità .....	20
2.1. Normativa europea EN 15051, 2006.....	20
2.2. Applicazione dei metodi della normativa europea EN 15051 per la valutazione della polverosità di alcuni minerali industriali.....	20
2.3. I procedimenti adottati .....	21
2.4. Metodologia .....	22
2.5. Analisi statistica.....	24
2.6. Riflessioni conclusive sui risultati degli esperimenti compiuti dai due laboratori (IGF e HSL) .....	26
3. ....	
Capitolo III – Analisi della polverosità nel porto di Ravenna con il metodo a tamburo rotante .....	29
3.1. Storia del porto di Ravenna.....	29
3.2. Contesto geografico del presente lavoro di tesi .....	29
3.3. Ordinanza autorità portuale n.4/08.....	32
3.4. Dotazioni dell’impresa portuale.....	34
3.5. Finalità.....	35
3.6. Campionamento.....	35
3.7. Trasporto del campione .....	37

3.8. Descrizione dell'apparecchiatura per il metodo a tamburo rotante (campo di applicazione e procedure).....	38
3.8.1. Preparazione del campione .....	39
3.8.2. Taratura e condizionamento del filtro.....	40
3.8.3. Preparazione della strumentazione.....	41
3.8.4. Inserimento del campione ed assemblaggio finale .....	43
3.8.5. Impostazioni strumentali.....	44
3.8.6. Rimozione della membrana.....	45
3.8.7. Verifica del funzionamento dello strumento .....	46
3.8.8. Numero minimo di determinazioni .....	46
3.8.9. Calcolo della polverosità.....	46
3.8.10. Calcolo dell'incertezza .....	47
3.8.11. Espressione dei risultati.....	48
3.8.12. Il ruolo dell'incertezza associata ai risultati di misura .....	49
3.8.13. Pulizia della strumentazione ed operazioni finali.....	50
4. ....	
Capitolo IV – Risultati e discussione.....	52
4.1. Premessa .....	52
4.2. Sabbia .....	53
4.3. Feldspato.....	58
4.4. Clinker grigio .....	63
4.5. Discussione dei risultati ottenuti nella prima parte di lavoro.....	68
4.6. Cloruro di potassio .....	72
4.7. Sepiolite.....	75
4.8. Discussione dei risultati ottenuti nella seconda parte di lavoro.....	78
4.9. Analisi di insieme.....	79
4.9.1. Frazionamento granulometrico.....	79
4.9.2. Classi di polverosità .....	80
4.9.3. Percentuali di polvere emessa dal campione .....	82
5. ....	
Capitolo V - Conclusioni .....	84
6. ....	
Bibliografia e sitografia .....	86

## Introduzione

Nel presente lavoro di tesi magistrale viene svolta un'analisi fisica per determinare la polverosità di alcuni materiali inerenti all'attività portuale della città di Ravenna. La polverosità viene definita come la propensione di un materiale a generare polvere durante la sua movimentazione o per esposizione ad eventi atmosferici come, per esempio, elevate velocità del vento. Recentemente sono stati elaborati diversi metodi di analisi al fine di caratterizzare la qualità dei materiali alla rinfusa (merci trasportate senza essere sistemate in contenitori, senza imballaggi [1]), prevedere il potenziale rischio delle polveri per la salute e la sicurezza (incendio, esplosione) e per valutare l'eventuale impatto sull'ambiente e/o la contaminazione e l'usura dei macchinari. L'Autorità Portuale di Ravenna nell'Ordinanza n. 04 del 2008 [2] ha compilato una lista di alcuni materiali alla rinfusa, suddividendoli in tre diverse classi di polverosità: classe A (poco polverose), classe B (mediamente polverose) e classe C (altamente polverose). Le attività che utilizzano tali materiali devono predisporre dotazioni, atte a diminuire le polveri emesse durante la loro movimentazione. Queste dotazioni sono elencate anch'esse all'interno dell'Ordinanza [2]. Più il materiale risulta polveroso più le dotazioni sono complesse e costose, risulta perciò di fondamentale importanza una corretta classificazione dei materiali. Un'altra osservazione da fare è che sui materiali inseriti nell'ordinanza non è stata svolta alcuna analisi di laboratorio, ma la valutazione, effettuata da esperti del settore, è di tipo qualitativo. Le analisi effettuate in questo lavoro di tesi sono state svolte su materiali non elencati all'interno dell'ordinanza n. 04/08 [2] e di cui non si hanno informazioni circa l'effettivo grado di polverosità. Quindi il presente lavoro di tesi ha come scopo l'inserimento di questi nuovi materiali nell'elenco dell'ordinanza secondo un criterio più oggettivo e di tipo scientifico basato su una metodica analitica che possa essere utilizzata anche in futuro dagli addetti ai lavori.

Relativamente alla polverosità, espressa come quantitativo di polvere emessa da un materiale stoccato e/o movimentato (in mg/kg), non esistono molti riferimenti bibliografici né materiali standard di riferimento con i quali "calibrare" le metodologie che si stanno sviluppando. Diversi gruppi di studio [3-20] hanno negli ultimi anni cercato di sviluppare diversi metodi per la determinazione strumentale della polverosità. Attualmente però non esiste una metodologia standardizzata.

L'unica normativa che cerca di fornire linee guida per il calcolo della polverosità è la normativa europea EN 15051 del 2006 [21], nella quale sono esposti e confrontati due metodi, discussi successivamente, per la

classificazione dei materiali secondo la loro polverosità. Successivamente all'analisi, la norma prevede che il materiale venga inserito in una classe di polverosità. In particolare, la norma ne prevede quattro: molto bassa, bassa, media, alta; la suddivisione è effettuata in base all'emissione di polvere che avviene quando un materiale viene sottoposto a movimentazione o stoccato in cumuli. Nella norma UNI [21] è prevista anche la distinzione fra le polveri emesse dalle diverse frazioni granulometriche del materiale: toracica, inalabile e respirabile.

La classificazione dei materiali nelle classi di polverosità risulta essere problematica, in quanto ciascuno dei due metodi, cioè il metodo a caduta continua ed il metodo del tamburo rotante [21], non risultano essere abbastanza flessibili per classificare tutte le sostanze. Ogniqualvolta la norma (EN 15051, CEN, 2006) [21] viene utilizzata ai fini di etichettatura, essa stessa richiede una revisione del sistema di classificazione in quanto i risultati non possono essere confrontabili con nessuno standard di riferimento.

# Capitolo I

## Definizione di polverosità e dei metodi di misura

### 1.1. Definizione di polverosità

La polverosità viene definita come la propensione di un materiale a generare polvere durante la sua movimentazione (che può essere di vario tipo) [22]. Per polveri si intendono tutte le particelle solide, di dimensioni variabili dal campo submicroscopico al campo visivo, disperse nell'aria e aventi la stessa composizione chimica dei materiali dai quali si originano [23]. Questo parametro fisico varia in base al tipo di stress al quale è sottoposto il materiale e può essere ricavato con tecniche standardizzate, le quali richiedono l'utilizzo di una tipologia e una quantità nota di energia meccanica per una specifica quantità di materiale da sottoporre ad analisi [3]. Questa energia serve per vincere le forze adesive che vengono a formarsi tra il materiale di prova e le particelle disperse/rilasciate dallo stesso materiale nell'aria. Inoltre, serve a riprodurre in laboratorio lo stesso stress al quale vengono sottoposti i materiali durante una specifica lavorazione. La quantità di polvere rilasciata viene misurata e, in base al suo valore, il materiale verrà classificato con un certo grado di polverosità. Lo studio sulla polverosità sta acquisendo sempre più importanza e negli ultimi anni sono stati messi a punto diversi metodi di analisi [3], utilizzati per:

- caratterizzare la qualità di materiali granulosi;
- prevedere i rischi per la salute e per la sicurezza (incendio, esplosione) dovuti alle polveri;
- determinare l'eventuale inquinamento ambientale o la contaminazione e l'usura dei macchinari associati alle polveri.

I rischi per salute dovuti all'esposizione a queste polveri, come detto, sono alti; per tale motivo Wickmann et al. [24] hanno effettuato degli studi per definirne la potenzialità, associando il fattore di rischio sulla salute umana all'inalazione di particelle di diametro  $\leq 1\mu\text{m}$  presenti nelle polveri. Sono state evidenziate malattie professionali dovute all'inalazione delle polveri definite come:

1. Bissinosi, una malattia professionale causata dalla inalazione di polveri di cotone grezzo;
2. Pneumoconiosi, un'affezione dei polmoni provocata dalla lavorazione delle polveri di amianto, silice, talco e metalli.

Inoltre, a seconda del tipo di polvere inalata, vengono distinte varie patologie [24]:

- Antracosi, altro nome della fibrosi polmonare da inalazione di carbone. È detta anche malattia del polmone nero.
- Silicosi, causata dall'inalazione della polvere di pietre, o sabbia, contenenti silice.
- Asbestosi, causata dall'amianto.
- Talcosi, causata dal talco.
- Smiridosi, causata dallo smeriglio.

Siccome la polvere che entra nei polmoni non può né essere distrutta né rimossa dal corpo, vi rimane, provocando infiammazione e cicatrizzazione (fibrosi).

Il rischio maggiore per l'affezione di queste malattie è in definitiva a carico dei lavoratori che sono quotidianamente a contatto con tali polveri e che dovrebbero essere sufficientemente tutelati con misure preventive adeguate.

La valutazione della polverosità prima della lavorazione o movimentazione di materiale risulta quindi di notevole importanza; pertanto, nel caso di utilizzo di nuovi materiali, la polverosità attesa dovrebbe essere uno dei parametri fondamentali da valutare.

Come ricordato sopra, l'interesse crescente sulla stima della polverosità deriva principalmente dalla crescente attenzione per la sicurezza sui luoghi di lavoro, la salute, l'igiene, la prevenzione di incendi ed esplosioni. L'obiettivo principale è la riduzione del carico di polveri in sospensione, già nella fase pianificatoria dei processi produttivi, attraverso il miglioramento dei modelli di stima. In alcuni casi, una corretta valutazione della polverosità consentirebbe la riduzione di misure secondarie, come ad esempio i sistemi di estrazione.

## **1.2. Fattori che influenzano il parametro della polverosità**

La polverosità è una proprietà fisico/chimica ben definita di un materiale [22]. In generale si può affermare che le caratteristiche fisiche dei materiali sono di grande rilevanza per il calcolo della polverosità; infatti questa è influenzata [3] da:

- La distribuzione granulometrica

- La forma delle particelle
- La rugosità della loro superficie
- Le caratteristiche meccaniche del materiale (elasticità)

Per quanto riguarda la distribuzione granulometrica delle particelle disperse in fase di movimentazione, vengono acquisiti i requisiti fondamentali, per esempio, da dati standardizzati nella norma DIN EN 481 [25], che classifica le particelle inalate in tre categorie di grandezza dei granuli. Questa suddivisione si basa sulla profondità di penetrazione nelle vie respiratorie delle particelle e dipende dal loro diametro aerodinamico. Le tre frazioni della polvere sono:

1. Frazione inalabile, rappresentata da una sospensione di particelle di vario diametro (generalmente compreso tra i 10 e i 100  $\mu\text{m}$ ) le cui dimensioni sono tali da determinare l'interazione con l'apparato respiratorio umano.
2. Frazione respirabile, rappresentata da una sospensione di particelle con classe granulometrica (generalmente  $< 4 \mu\text{m}$ ) tale da raggiungere, per effetto dei moti respiratori, la parte non ciliata del polmone (zona alveolare).
3. Frazione toracica, rappresentata da una sospensione di particelle di vario diametro ( $< 10 \mu\text{m}$ ). Tale frazione è la porzione di particelle inalabili le cui dimensioni permettono di penetrare nelle vie respiratorie e depositarsi oltre la laringe, quindi ovunque entro le vie aeree polmonari e le regioni di scambio gassoso.

In Figura 1 è visibile la classificazione di aerosol inalabile nel sistema respiratorio, secondo i criteri utilizzati nella medicina del lavoro.

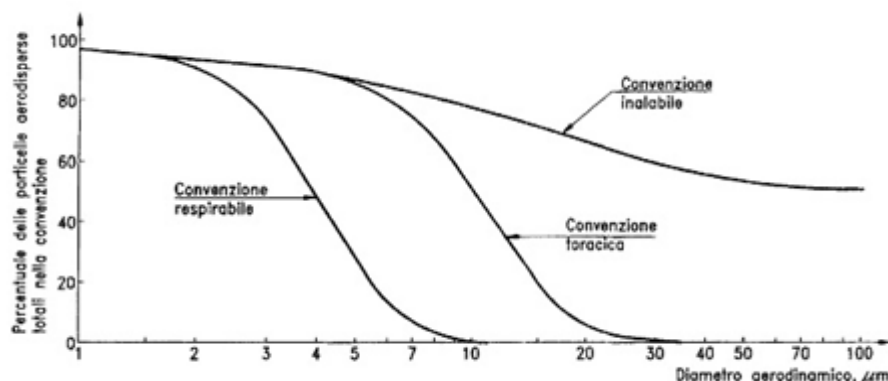


Figura 1. Classificazione delle particelle in funzione della penetrazione nel sistema respiratorio.



La forma delle particelle, come anche la rugosità, influenza un altro parametro, ovvero, la superficie specifica (cioè il rapporto tra la superficie e il volume) dei granuli. Questo parametro è fondamentale in quanto all'aumentare di questo aumenta anche la possibilità dei granuli di trattenere le polveri.

Tra i parametri esterni che influenzano la polverosità [3] del materiale abbiamo:

- Umidità;
- Temperatura;
- Pressione;
- Tempo di stoccaggio.

Il materiale è formato da granuli più grossolani uniti ai più piccoli con vari tipi di forze di legame. Quindi nelle prove di laboratorio la forza applicata al campione di materiale deve essere tale da evitare la macinazione, il taglio e la frantumazione del granulo su cui aderiscono le particelle più piccole (polvere) [26]. Questo perché, quando si effettuano delle sollecitazioni sul materiale, può accadere che l'energia applicata risulti essere così elevata da frantumare il granulo e polverizzarlo, provocando una sovrastima del valore della polverosità. Si dovrebbe invece cercare di applicare un'energia che divida solamente le particelle grossolane dalla polvere senza alterare la struttura del granulo. Quanto detto fa capire che il metodo di applicazione dell'energia meccanica diventa fondamentale per la misurazione della polverosità; per alcuni materiali le differenze tra i risultati possono essere notevoli a seconda del metodo utilizzato per la determinazione della polverosità stessa in base alle caratteristiche fisiche descritte in precedenza. In questi anni sono stati sviluppati protocolli di prova e test sia per uso generale che per una specifica applicazione o settore tecnico [26]. Il problema risiede proprio nella difficoltà di mettere a punto un metodo generale valido per tutti i casi, in quanto le polveri aero-disperse negli ambienti di lavoro si presentano con caratteristiche di qualità e livelli di concentrazione variabili da attività ad attività.

### **1.3. Metodi e Apparecchiature: da quelli storici a quelli più recenti**

#### **1.3.1. Principi di base**

In generale i metodi utilizzati per il calcolo della polverosità prevedono diverse fasi, e la polverosità totale del materiale viene nella maggior parte

dei casi ricavata senza differenziare sulla base della distribuzione granulometrica del campione analizzato. In questi casi formulare conclusioni sulla distribuzione granulometrica risulta praticamente impossibile. A tale scopo si dovranno sviluppare nuove metodologie di analisi più appropriate [27].

Le caratteristiche fisiche (descritte sotto nel Paragrafo 2) sono legate al tempo di permanenza in aria delle particelle e alla loro mobilità. Una maggiore mobilità delle particelle comporta infatti un rischio di contaminazione più alto [27]. La correlazione tra il materiale sottoposto a stress e la quantità di polvere emessa dallo stesso deve essere il risultato finale, ricavato attraverso i metodi di misurazione. La polverosità viene infatti espressa come milligrammi di polvere emessa su Kg di campione analizzato (mg/Kg). Tali metodi dovranno avere diverse caratteristiche tra cui: versatilità di utilizzo, maneggevolezza dello strumento, velocità e affidabilità dei risultati e facilità di pulizia della strumentazione. Inoltre, più il metodo risulterà efficiente più i costi saranno ridotti [27].

Si sono formati nel tempo vari gruppi di lavoro che hanno elaborato diversi metodi già prima della seconda guerra mondiale, anche se nessuno è riuscito a sviluppare un unico metodo standard adatto per la valutazione della polverosità di tutti i materiali. Il rapporto tra il peso della quantità di polvere liberata e della quantità di materiale sottoposto ad analisi è generalmente molto basso. Infatti, per la maggior parte dei materiali la polverosità risulta di molto inferiore all'1% [28]; tuttavia, per alcuni materiali questo valore risulta superiore. Per quanto riguarda invece il materiale disperso durante il rilascio per movimentazione, esso non sempre rappresenta un problema significativo, anche se in ogni caso influisce sull'igiene nei luoghi di lavoro. Sarebbe utile adottare la polverosità come parametro per predire l'esposizione dei lavoratori alle particelle aereo-disperse.

Ai fini della determinazione della polverosità risultano importanti tre aspetti [28]:

1. se possibile, bisognerebbe campionare la polvere emessa secondo le convenzioni di campionamento di aerosol nelle tre frazioni granulometriche stabilite dalla medicina del lavoro: quella inalabile, quella toracica e quella respirabile;
2. il metodo di prova dovrebbe riprodurre il più fedelmente possibile l'energia applicata al materiale in ambiente di lavoro. In teoria questo potrebbe essere fatto confrontando la classificazione della polverosità dei materiali ottenuta usando uno dei diversi metodi di prova, con la

polverosità ottenuta simulando operazioni direttamente sul posto di lavoro, cosa nella realtà non fattibile;

3. bisognerebbe riuscire a standardizzare un fattore di conversione tra i valori di polverosità misurati con il metodo di prova e l'energia meccanica applicata ai materiali nel luogo di lavoro (può essere usato come un surrogato anche l'esposizione dei lavoratori) per alcune tipologie di lavoro. Questo potrebbe servire a determinare un limite di esposizione consigliato per i lavoratori [28].

### **1.3.2. Studi sulla correlazione tra polverosità ed esposizione dei lavoratori**

Sono stati realizzati nel tempo vari tentativi nel cercare di collegare i risultati dei test di polverosità all'esposizione dei lavoratori. Il gruppo di lavoro NIOSH (the National Institute for Occupational Safety and Health) ha provato molti anni fa a fare questa operazione in quattro aziende con diverse attività lavorative. Tuttavia, il successo è stato molto blando, forse perché non si potevano controllare fattori come le pratiche di lavoro, la manutenzione delle apparecchiature, il trasporto di polvere da altre stazioni di lavoro e le perdite del processo [4].

Alcuni studiosi nel 2003 [5] hanno comparato l'esposizione per vari materiali isolanti con alcune operazioni standardizzate utilizzate nella lavorazione di materiali alla rinfusa e hanno poi confrontato questi risultati con quelli ottenuti mediante l'utilizzo di uno dei metodi di prova (metodo a tamburo rotante). Il risultato è stato l'individuazione di una chiara correlazione positiva tra la polverosità e l'esposizione; infatti, la polverosità ricavata con il metodo di prova cresceva con l'aumentare dell'energia applicata al materiale, di conseguenza l'esposizione dei lavoratori alla polvere aumentava. Tuttavia gli autori non hanno poi utilizzato questi risultati per la previsione dei valori di esposizione.

Un altro gruppo di lavoro [6] ha utilizzato materiali isolanti (fibre ceramiche refrattarie e lana di calcio di silicati di magnesio) confrontando i risultati di polverosità del metodo di prova con quelli ottenuti simulando una tipologia di lavorazione con un cassone oscillante, contenente questi materiali, in diversi posti di lavoro. I risultati hanno evidenziato che per entrambe le fibre prese in esame la polverosità era simile per cinque diverse operazioni di lavoro.

Altri autori [3] hanno correlato invece i risultati ricavati dall'utilizzo di un metodo di prova con l'esposizione durante operazioni specifiche in una stanza fornita di laboratorio ventilato, concludendo che il test riusciva a

spiegare il 70% delle variazioni dell'esposizione e derivando inoltre anche informazioni sui rapporti fra le frazioni respirabili/inalabili.

Il successo limitato di questo tipo di lavoro dimostra che queste misurazioni di polverosità non sono al momento utilizzabili come descrittori completi dell'esposizione del lavoratore. Nei luoghi di lavoro occorre controllare anche altri parametri importanti che rappresentano delle variabili influenti, quali le tipologie di lavorazione, le tecnologie di controllo delle polveri e le procedure di gestione del materiale. In generale si può affermare che non esiste una correlazione diretta fra polverosità del materiale ed esposizione del personale. Tuttavia, già il fatto che con i precedenti esperimenti sia stata determinata l'energia della movimentazione del materiale in un dato luogo di lavoro rappresenta un importante passo in avanti.

Comunque, anche in assenza di un metodo standard, diversi gruppi di studio hanno continuato ad utilizzare misure di polverosità. Di recente Madsen et al. [7] hanno esaminato i biocarburanti granulari utilizzando un metodo di prova (metodo a tamburo rotante) per esaminare vari aspetti del rilascio di polvere, e più recentemente hanno indagato sui dettagli del rilascio di particolato per ottenere risultati che valutassero i rischi sui posti di lavoro.

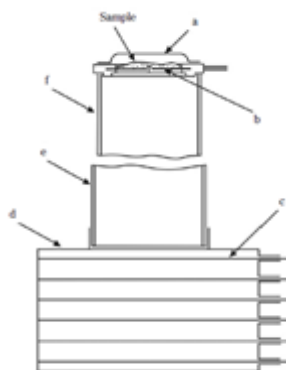
Boundy et al. [8] invece hanno esaminato la polverosità generata dai processi di sviluppo di farmaci. Affrontando il nuovo problema delle piccole quantità disponibili, hanno messo a punto un nuovo test. Ci si aspetta che l'importanza dei test sulla polverosità in relazione all'igiene nei luoghi di lavoro divenga sempre più incisiva e utile per i produttori/fornitori, che cercheranno di ridurre al minimo i rischi di generazione di polvere.

### **1.3.3. Apparecchio e metodo a Singola caduta**

Come abbiamo visto nel paragrafo precedente esistono vari metodi per la misurazione della polverosità dei materiali, ma nessuno di essi può essere ritenuto efficace in maniera esclusiva ed universale. Di conseguenza, la scelta di un'apparecchiatura appropriata risulta difficile. I fattori che determinano la scelta devono poter essere adeguati alle condizioni di campo (fattori esterni come temperatura e umidità del luogo di prelievo del campione), inoltre bisogna considerare il risultato finale che si vuole ottenere (cioè i dati in uscita). È difficile realizzare una comparazione fra i risultati dei diversi metodi anche a causa delle diverse situazioni meteorologiche, del tipo di stress a cui è sottoposto il materiale, degli strumenti di valutazione e del campionamento. Tuttavia è possibile giungere

a delle conclusioni riguardo la frazione granulometrica delle polveri emesse grazie alle moderne tecniche di misurazione delle particelle.

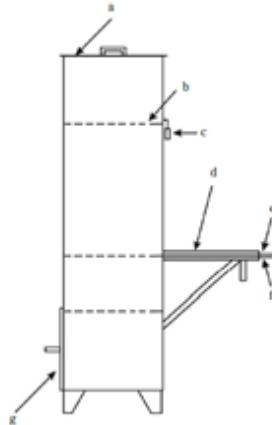
I primi studi sono stati realizzati nel 1922 da Andreasen et al. [9], che hanno misurato la polverosità di 24 sostanze campione utilizzando un apparato a singola caduta e descrivendo l'influenza che hanno le particelle più fini sulla polverosità totale e la loro diversa capacità di generare polvere. In particolare, Andreasen et al. hanno utilizzato un dispositivo (Figura 2) costituito da un contenitore di polvere (d) e da due tubi rivolti verso il basso montati e sigillati (f,e). Un diaframma a iride (b) viene usato come otturatore. Il campione è poi posto sull'iride e coperto da un vassoio piatto per evitare l'influenza dell'aria ambiente (a). Sei lamine metalliche (c) sono inserite in successione dal basso verso l'alto nella camera della polvere dopo che il campione è stato fatto cadere. Un metronomo segna l'intervallo di tempo di inserimento. Dopo la prova, le lamine vengono pesate.



*Figura 2. Apparato a singola caduta utilizzato da Andreasen. (a): vassoio piatto; (b): diaframma a iride; (c): lamine metalliche; (d): contenitore di polvere; (e-f): due tubi sigillati.*

Successivamente l'ANSI (American National Standards Institute) e l'ASTM (American Society for Testing and Materials) D547-41 hanno standardizzato un metodo già conosciuto nel 1939 [10], apportandogli delle modifiche allo scopo di indagare sull'indice di polverosità del carbon coke (materiale granulare formato nell'escavazione all'interno delle miniere). Tale metodo utilizza anche la tecnica di polverosità a singola caduta, descritta precedentemente. Il dispositivo (Figura 3) utilizzato in questo metodo prevede che la camera di polvere venga sigillata con un coperchio (a) dopo aver posto il campione (22,7 kg) sulla lamina superiore (b). A questo punto la lamina viene prelevata bruscamente ed il campione cade nel cassetto inferiore. Esattamente 5 secondi dopo, entrambe le lamine inferiori (e-f) vengono inserite rapidamente. La lamina superiore viene estratta dopo due minuti, quella inferiore dopo 10 minuti. Infine pesando le due lamine viene

generato un indice di polvere sia per la frazione grossolana del materiale che per quella sospesa.



*Figura 3. Dispositivo di rilevazione dell'indice di polverosità utilizzato da ANSI/ASTM. (a): coperchio; (b): lamina ubicata nella parte superiore; (c): cronometro; (d): guida metallica; (e): lamina per materiale grossolano; (f): lamina per materiale sospeso; (g): cassetto.*

Il metodo appena descritto si serve di:

1. Filtri campionatori;
2. Schiume;
3. Impattatori;
4. Elutriatori.

I filtri campionatori, costituiti da una scatola di filtro e dal filtro, vengono utilizzati come un metodo di misurazione standard. La totalità delle polveri in sospensione viene raccolta nel filtro, mentre le conclusioni circa la distribuzione delle dimensioni delle particelle sono possibili solo per mezzo di ulteriori misurazioni. La suddivisione della polvere nelle varie frazioni, utile per i settori della salute e sicurezza sul lavoro, si ottiene per deposito delle frazioni inalabili e respirabili [11].

Per suddividere adeguatamente il materiale granulare nelle frazioni inalabili e respirabili (secondo i requisiti richiesti dalla DIN EN 481) [25], vengono utilizzate alternativamente schiume metalliche (Figura 4.a) e polimeriche (Figura 4.b) (struttura cellulare costituita da un metallo solido, spesso alluminio) come filtri. Il volume di tali schiume è costituito in buona parte da pori d'aria con dimensioni dei pori definiti.

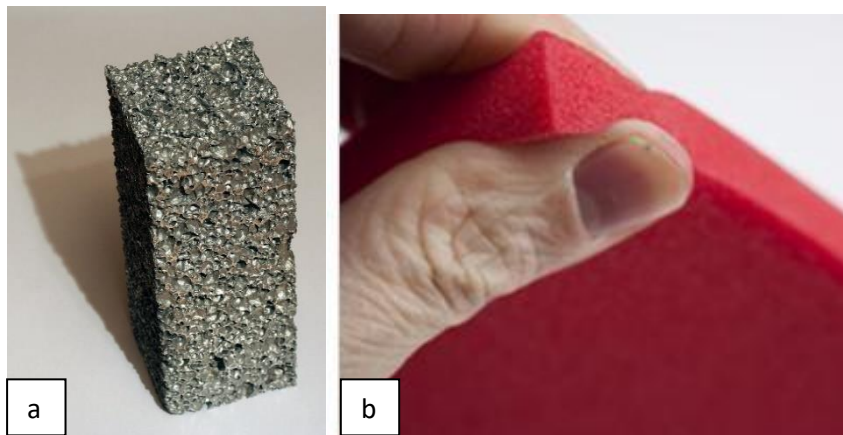


Figura 4.a. Schiuma metallica. b. Schiuma polimerica.

Vi sono poi gli impattatori (Figura 5) che vengono spesso utilizzati per suddividere in frazioni la polverosità. Essi possono sostituire i filtri campionatori nell'apparecchio del test e servono a misurare solo la concentrazione delle particelle a diametro minore. Per fare questo l'aria carica di polvere deve essere diluita. Inoltre la velocità dell'aria in ingresso deve essere sufficiente per evitare la sedimentazione delle particelle, perché se così non fosse si altererebbe la distribuzione granulometrica. Per ovviare al problema viene utilizzato il campionamento isocinetico (cioè campionamento che viene effettuato nelle medesime condizioni di velocità, rendendo la misura rappresentativa del caso in esame) combinato con la diluizione. Grazie a questa tecnica è possibile misurare sia le polveri totali che le varie frazioni. Questo metodo presenta però degli svantaggi quali la manipolazione difficile, la lunga durata della misurazione e la pulizia [12].

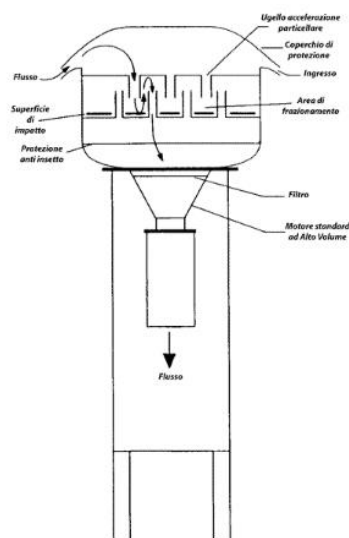


Figura 5. Impattatore.

Gli elutriatori (Figura 6) sono unità raramente utilizzate; fanno scorrere l'aria carica di particelle tra piastre parallele, consentendo il frazionamento delle particelle che si depositano, in base alla distanza tra le piastre e alla velocità dell'aria [12].



*Figura 6. Elutriatore.*

Questo metodo può essere completato mediante metodi di misura ottici. Essi vengono utilizzati comunemente nei metodi di polverosità a singola caduta. In tale metodo basse concentrazioni di polvere vengono inserite in una camera in cui passa un fascio di luce che colpisce le particelle, permettendo di definire la distribuzione granulometrica delle particelle del materiale preso in esame; infatti le particelle grandi diffonderanno la luce con angoli stretti ed alta intensità, mentre le particelle più piccole la diffonderanno con angoli più ampi e bassa intensità [13,14]. Il metodo presenta lo svantaggio di poter gestire solo basse concentrazioni di particelle, quindi utilizzando basse concentrazioni i risultati risultano imprecisi e poco rappresentativi di tutto il materiale. I vantaggi invece consistono nella maneggevolezza dello strumento, periodi di pulizia brevi e, in particolare, la capacità di fornire informazioni sulla massa delle particelle, inserita nella camera, in base all'intensità della luce che le colpisce.

#### **1.3.4. Apparecchio e metodo a Tamburo rotante**

Tale metodo si serve di un tamburo rotante con pale e sfere di acciaio che girando smuovono il campione di materiale in una camera di sospensione; una pompa genera un flusso d'aria ascendente [15]. La polvere prodotta dal campione viene trasferita ad un dispositivo di misurazione e raccolta da un filtro, oppure analizzata direttamente. Barre rialzate all'interno del tamburo impediscono al campione di rimanere bloccato sul tamburo stesso. Come unità di misurazione vengono utilizzati: filtri, impattatori e contatori ottici delle particelle. Si deve tener conto che la velocità del flusso d'aria è un fattore determinante per la distribuzione delle dimensioni delle particelle e



la loro concentrazione. Questo metodo, che è quello utilizzato nel presente studio, viene descritto nel prossimo capitolo in maniera più approfondita.

### **1.3.5. Apparecchio e metodo a Caduta con flusso continuo**

Questo metodo simula il trasferimento continuo, in quanto il trasferimento del campione è possibile tramite nastro trasportatore [26] o coclea di trasporto [16] per un periodo di tempo più lungo. La MRI (Midwest Research Institute) Tester [26] introduce il campione mediante un becher inclinabile. Il bicchiere riempito viene inclinato in continuo e il campione cade da un'altezza di circa 25 cm su una pellicola di alluminio coperta da una schiuma depositata su un tampone all'interno della camera. La polvere generata viene trasportata da una corrente d'aria che entra nel tester attraverso due setti laterali ed esce in cima. Durante questo processo, le particelle più grandi vengono setacciate a causa della loro velocità di sedimentazione più elevata. A seconda dello scopo della ricerca, viene utilizzato un filtro o un dispositivo d'urto, mentre l'utilizzo di unità di misura ottiche non compare in letteratura. Le dimensioni delle particelle più piccole sedimentabili sono definite dalla velocità dell'aria.

### **1.3.6. Tester della polverosità con gas fluidificanti**

Un altro metodo di polverosità utilizza gas fluidificanti, cioè capaci di convertire un materiale granulare dallo stato solido a fluido. Questo processo avviene utilizzando un dispositivo generalmente composto da un cilindro con moduli verticali in acciaio inox e vetro. Il campione viene posto su una piastra di sinterizzazione all'estremità inferiore dell'apparato. Tale piastra attraverso un processo termico e meccanico ha come scopo la formazione di materiale coesivo, cioè derivato dalla compattazione delle sostanze pulverulente. Il campione durante la sinterizzazione viene continuamente sottoposto ad un flusso d'aria verso l'alto. Il materiale divenuto coesivo necessita di un agente fluidificante al fine di omogeneizzare (solitamente viene utilizzata l'aria) [16]. Le particelle con bassa velocità di sedimentazione sono trasportate fino all'uscita superiore da una corrente d'aria, poi sono raccolte da un filtro [17] e infine misurate da un contatore ottico di particelle. A causa dell'elevata energia in entrata, gli agglomerati o il pellet vengono frantumati. Infatti, questo metodo è quello che maggiormente stressa il campione. Di conseguenza risulta applicabile solo ad un numero limitato di materiali e situazioni lavorative. Per esempio, potrebbe essere utilizzato per simulare lavorazioni nelle quali i materiali vengono lavorati con meccanismi di macinazione e frantumazione [17].

### 1.3.7. Camera di risospensione

Uno studio importante è stato condotto da Visser [18] nell'ultima lista è il 26 che ha studiato l'influenza della velocità e dell'umidità dell'aria sul carbone per mezzo di una camera di risospensione (Figura 7). L'apparato sperimentale è costituito da un nastro trasportatore (b), una galleria del vento rettangolare (a) e un filtro campionario (f), oltre alla camera di risospensione (e). Il nastro trasportatore, al di sopra del quale è posto il campione di carbone, è posizionato orizzontalmente a 90 gradi rispetto alla corrente d'aria principale. Lo strato di carbone è continuamente alimentato dal nastro trasportatore e cade attraverso il flusso d'aria in un contenitore al di sotto della galleria del vento. La griglia (d) separa il contenitore dalla galleria del vento ed impedisce il rientro del carbone di scarico (rifiuto). Un flusso di carbone sottile viene disperso dalla corrente d'aria nella galleria del vento, mentre le concentrazioni di polveri sono misurate a valle, dove sono posizionati anche nove campionatori verticali equidistanti (non presenti in Figura 7). Mentre i campionatori orizzontali hanno mostrato concentrazioni approssimativamente uguali di polvere, i campionatori verticali in linea hanno rilevato concentrazioni diverse. Per consentire la valutazione visiva, il tunnel è costituito da moduli in vetro.

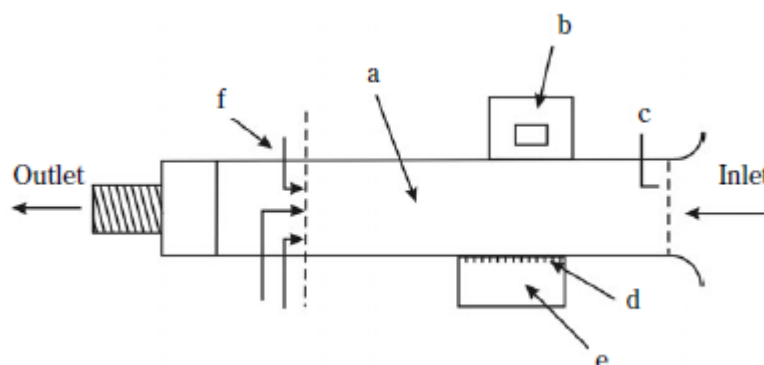


Figura 7. Camera a risospensione utilizzata da Visser. (a): galleria del vento; (b): nastro trasportatore; (c): tubo pilota; (d): griglia; (e): camera di risospensione; (f): filtro campionario.

### 1.3.8. Progettazioni speciali

Gli apparecchi e i metodi descritti in questo paragrafo possono adattarsi a diverse destinazioni d'uso, anche se alcuni sono metodi speciali unici e applicabili a una singola progettazione, mentre altri possono invece essere complementari in una combinazione di due o più metodi [20].

Per fare un esempio, un metodo applicabile solo singolarmente è quello messo a punto dal "Getreideforschungsinstitut Potsdam" [27] che

determina la polverosità della farina e gli additivi del pane. Queste polveri sono responsabili della maggior parte delle malattie professionali nel campo della panificazione. Il dispositivo utilizzato è posto su una piastra di base con dimensioni standard di 2,5 m per 1 m, circondata da 3 pareti di vetro di 0,6 m di altezza. Il dispositivo non è coperto e la miscela di gas e particelle viene movimentata da un dispersore che dosa e disperde le polveri. Quest'ultimo viene posizionato all'entrata del dispositivo, mentre la miscela di gas e particelle viene iniettata da un'altezza di 400 mm sopra la piastra di base. Ad una distanza di 1,3 m dal dispersore di polvere vengono installati campionatori per le frazioni respirabili e inalabili [29].

Un esempio, invece, di metodi combinati è dato da un progetto di ricerca europeo che prevede la combinazione di un apparato a singola caduta ed uno a tamburo rotante [22]. Questo dispositivo è costituito da due tamburi collegati ai lati opposti della camera di un dispositivo a singola caduta. Grazie al sistema modulare, il dispositivo può essere utilizzato sia come tester a singola caduta, sia come tester a tamburo rotante, oppure come combinazione dei due metodi. Questo metodo si serve di coni di aspirazione ed espirazione [17], i quali vengono modificati per garantire un flusso laminare. La forma conica dello sbocco provoca un'accelerazione dell'aria carica di polveri fino a  $4 \text{ cm/s}^2$ . All'uscita è installato un dispositivo di captazione e misurazione formato da due schiume poliuretatiche porose e da un filtro. Questo dispositivo campiona secondo le disposizioni del DIN EN 481 suddividendo la polverosità per le frazioni granulometriche inalabili e respirabili [25]. Il dispositivo di immissione è stato sviluppato per essere simile al tester per la polverosità a singola caduta [30]. Questa combinazione dei due metodi consente di effettuare simulazioni di diversi tipi di stress (per esempio di trasporto o di riempimento). Uno svantaggio però risiede nel fatto che le schiume poliuretatiche sono sensibili all'umidità e perciò è necessario il monitoraggio dell'umidità stessa [22].

### **1.3.9. Riflessioni critiche sulla misura Sistematica della Polverosità**

Tutti i metodi introdotti fin qui e le loro possibili combinazioni rivelano la complessità insita nella scelta di un metodo adeguato per la misurazione della polverosità. Molti produttori di polveri e materiali granulari ed istituti di ricerca utilizzano ognuno i propri metodi di misurazione. I risultati di tali metodi non sono comparabili o non possono essere confrontati facilmente con altri e inoltre la vastità dei campi di applicazione di questi metodi non permette l'utilizzo di un'attrezzatura uniforme. Per lo sviluppo futuro di materiali con ridotto grado di polverosità, sarà necessario migliorare i

metodi analitici utilizzati. Inoltre per diminuire la tendenza a generare polvere, bisognerà indagare sia sull'interazione tra le particelle dei materiali sia sul metodo per la stima della polverosità.

In linea di principio, una classificazione della polverosità generata dai materiali viene calcolata a partire da quattro fasi ben distinte fra loro: l'introduzione del campione nell'analizzatore, lo stress a cui è sottoposto il campione, il campionamento e l'analisi. Per le prime tre fasi la procedura può essere discontinua (ad esempio a singola caduta), continua (per esempio a caduta continua) e intermittente (ad esempio con caduta periodica). Per sistematizzare tutti i metodi bisogna creare più di un semplice elenco. Questi metodi possono essere standardizzati, ad esempio in base al tipo di stress a cui è sottoposto il campione, ma non potranno essere generalizzati. Attualmente è ancora in sviluppo un utile programma sistematico di tutti i metodi (comprese tutte le combinazioni e le permutazioni).

Sono stati condotti degli studi specifici sulle misurazioni utilizzabili per consentire il rispetto delle misure di controllo della formazione di polveri nei luoghi di lavoro [27]. Gli studi sono stati avviati per comprendere gli effetti nocivi provocati dalle polveri e per definire dei limiti di legge per le particelle inalabili e respirabili. Il monitoraggio iniziale del settore delle costruzioni ha reso evidente che in circa il 40% dei campioni d'aria ambiente prelevati i quantitativi di polveri aero-disperse erano al di sopra dei limiti di legge [31]. Sebbene il rispetto dei limiti di legge attualmente vigenti è a volte difficilmente possibile, un'ulteriore riduzione dei limiti è necessaria al fine di soddisfare i requisiti della salute sul lavoro. Ciò dimostra l'importanza di misure preventive contro la formazione di polvere, per cui la stima della polverosità assume un ruolo importante. Non sono ancora però state trovate correlazioni dirette tra gli indici di polverosità valutati con le diverse strumentazione sopra citate. La comparabilità dei risultati dei diversi metodi è quasi impossibile; non sembra quindi ragionevole mirare ad un metodo standardizzato. I problemi indicati dovrebbero essere materia di studio per lavoro futuro.

## **Capitolo II**

### **Normativa europea**

#### **Ricerca di standard di riferimento per l'analisi della polverosità**

##### **2.1. Normativa europea EN 15051, 2006**

Il CEN (comitato europeo per la standardizzazione) ha elaborato una norma europea sui test di polverosità in relazione all'esposizione negli ambienti di lavoro, la EN 15051 dell'aprile del 2006 [21]. Nella norma sono illustrate due metodologie: il metodo britannico del tamburo rotante e quello tedesco in caduta continua. In questo modo sarà possibile all'utente dello Standard di selezionare il metodo più vicino alla destinazione d'uso del materiale. Il CEN, attraverso la pubblicazione di tale standard, auspica che venga esteso l'uso dei test sulla polverosità come strumento per ridurre l'esposizione dei lavoratori.

##### **2.2. Applicazione dei metodi della normativa europea EN 15051 per la valutazione della polverosità di alcuni minerali industriali**

Prima della pubblicazione della norma EN 15051 (2006 CEN) [21], al fine di confrontare le due metodologie in essa proposte, l'Associazione Industrial Minerals d'Europa (IMA-Europe) [32] ha lanciato un importante progetto per analizzare la polverosità di diversi minerali industriali utilizzando i due metodi di polverosità presentati nella EN 15051 (CEN, 2006) [21] standard. Tale studio è stato svolto utilizzando i metodi del tamburo rotante e della caduta continua, descritti all'interno della normativa. I due metodi proposti dalla norma europea EN 15051 pubblicata nel 2006 [21] valutano e confrontano la polverosità dei materiali. Tale valutazione, riferita soprattutto ai materiali alla rinfusa, può aiutare a sviluppare prodotti meno polverosi e a ridurre l'esposizione dei lavoratori alla polvere, migliorando inoltre la lavorazione dei minerali. La norma prevede inoltre che il materiale in esame venga inserito in quattro classi di polverosità (molto bassa, bassa, media, alta) in base all'emissione di polvere che avviene quando questo viene sottoposto a movimentazione o allo stoccaggio in cumuli [4]. La classificazione ha come scopo l'etichettatura finale dei prodotti, per renderli certificati affinché possano essere utilizzati come standard di riferimento. La

norma UNI [21] prevede inoltre la possibilità di campionare le polveri emesse dai materiali in tre frazioni granulometriche (toracica, inalabile e respirabile). Questa distinzione fra le frazioni granulometriche viene effettuata per correlare l'emissione delle polveri al rischio per la salute umana, infatti il rischio aumenta all'aumentare delle concentrazioni, soprattutto delle frazioni fini. Nell'analisi vengono inoltre comparate le misure di polverosità in funzione delle sole frazioni inalabili e respirabili.

Anche se la polverosità può significativamente essere condizionata dall'umidità del prodotto, l'influenza di questo parametro non è stata studiata nei dettagli, all'interno della norma. In particolare, la classificazione delle sostanze rispetto a diverse classi di polverosità è risultata essere problematica. Infatti, non solo i due metodi non sono flessibili nella classificazione in gruppi delle sostanze e possono dare risultati non coincidenti fra di loro, ma possono anche assegnare una classe di polverosità di appartenenza diversa. In ogni caso per utilizzare lo standard [21] a fini di etichettatura è necessaria una revisione dell'attuale sistema di classificazione.

Come noto nel settore dei minerali industriali, l'emissione di polvere può comportare rischi per la salute dei lavoratori, per cui una variabilità delle condizioni durante il trattamento e la movimentazione dei minerali, spesso in grandi quantità, può causare la generazione di elevati livelli di polvere. I prodotti minerali industriali alla rinfusa sono utilizzati in un'ampia varietà di applicazioni, anche perché sono le materie prime essenziali per la maggior parte delle attività produttive. Tra queste annoveriamo l'agricoltura, l'elettronica, la fusione dei metalli, la produzione di vernici, carta, plastica, vetro, ceramica, detersivi, prodotti farmaceutici, cosmetici, materiali da costruzione. Tali materiali sono utilizzati anche come coadiuvanti tecnologici per l'industria alimentare e dei mangimi e hanno un ruolo sempre più importante nell'ingegneria ambientale (ad esempio nel trattamento delle acque).

### **2.3. I procedimenti adottati**

Per la realizzazione del progetto dell'Associazione Industrial Minerals d'Europa (IMA-Europe) [32] sono stati campionati e analizzati con i due metodi diversi minerali industriali provenienti da varie aziende associate all'IMA-Europe: quarzo, cristobalite, feldspato, argilla, caolino, argilla calcinata, talco, marmo e gesso. I materiali sono stati selezionati in base alle caratteristiche fisiche/chimiche dei materiali ed alle diverse aree geografiche di provenienza. È stato coperto un range di classi di prodotti di

differenti minerali a diverse granulometrie che andavano dal 'grossolano' al 'fino'. Successivamente i campioni sono stati analizzati e ne sono state determinate le distribuzioni dimensionali. Il contenuto di umidità, come detto nel paragrafo precedente, non è stato preso in considerazione per la selezione del campione stesso. Si è scelto, infatti, di effettuare le analisi sui prodotti minerali secondo la normativa EN 15051 [21]. Per ogni prodotto minerale industriale, due campioni di 5 kg sono stati preparati prendendoli da un lotto omogeneo. Inoltre, si è avuto cura di sigillare i prodotti per evitare cambiamenti di umidità e contaminazione esterna e per assicurare le stesse condizioni del campione. In totale, 43 campioni sono stati inviati a due laboratori indipendenti direttamente dalle rispettive aziende associate ad IMA-Europe; ogni laboratorio era dotato solo di uno dei due metodi di analisi. I partecipanti hanno fornito ai laboratori di analisi informazioni generali sul tipo di minerale e sulla composizione chimica. Ad ogni campione IMA-Europe ha assegnato un numero di riferimento per rispettare l'anonimato ed ha poi chiesto ai due laboratori di testare i campioni secondo la norma EN 15051, che prevede la misurazione del contenuto di umidità, della densità apparente e della polverosità.

#### **2.4. Metodologia**

L'Istituto fur Gefahrstoff-Forschung (IGF, Bochum, Germania) ha, per esempio, determinato la polverosità con il metodo a caduta continua [33]; le operazioni svolte consistevano nel versare continuamente il prodotto verso il basso da un serbatoio di campione, con l'aiuto di un dispositivo in un tubo verticale. Il materiale del test è fatto cadere con una portata di 8 g/min e con un'oscillazione di 2 g/min durante 10 minuti in una corrente lenta d'aria verticale. Attraverso la parte inferiore del tubo, l'aria viene aspirata con un flusso di 53 L/min (velocità di sollevamento di 0,05 m/s con un diametro del tubo di 150 mm). Questo flusso d'aria trasporta la polvere rilasciata dalla caduta del materiale nella sezione di campionamento. Le frazioni inalabili e respirabili sono campionate simultaneamente, ad un flusso di 2 L/min, su, rispettivamente, un ditale a filtro di 10x50 mm e su una membrana a filtro con diametro di 37 mm. Il risultato finale deriva dalla media di cinque test.

Con questa tecnica possono essere misurate solo le frazioni inalabili e respirabili, mentre la frazione di massa toracica non può essere valutata. In questo progetto è stato utilizzato per le cinque analisi un peso totale che va da 500 g a 2 kg. Diversi fattori determinano la quantità necessaria di materiale da testare: essa dipende dalla granulometria del campione, dalla densità del materiale e dalla polverosità stessa. Il limite di rilevazione

dell'analisi gravimetrica dei filtri determina la quantità di materiale da far cadere: maggiori volumi sono necessari per i prodotti meno polverosi, che possono anche portare alla necessità di estendere la durata della misurazione della polverosità. Tuttavia il risultato degli esperimenti è indipendente dalla durata delle misure, come recita la norma.

Un esempio, invece di analisi della polverosità con il metodo del tamburo rotante è stato effettuato dal laboratorio per la salute e la sicurezza (HSL, Buxton, UK) [22]. Premesso che questa apparecchiatura sarà oggetto di descrizione specifica più avanti, qui se ne dà un ragguglio generale. In questo caso le proporzioni e l'apparecchiatura erano costituite da un tamburo in acciaio inossidabile da 300 mm, dotato di otto alette longitudinali interne. Il materiale del test, con un volume standard di 35 cm<sup>3</sup>, veniva distribuito uniformemente lungo la parte inferiore del tamburo. Quest'ultimo ruotava a 4 giri al minuto sollevando e agitando il materiale del test continuamente con le palette per 1 min. Inoltre una corrente d'aria lenta per la setacciatura con una velocità media di 0,1 m/s (fornito da una pompa) conduceva la polvere rilasciata dal materiale caduto dal tamburo ad un sistema di campionamento delle polveri a tre stadi. Tale sistema comprendeva due componenti di schiume metalliche selettive delle dimensioni delle particelle, seguita da un filtro di supporto per la determinazione delle frazioni inalabili, toraciche e respirabili di polvere rilasciata (secondo la classificazione di EN 481) [25]. Il primo stadio comprende due schiume con 20 pori per pollice (p.p.i.) di 10 mm di spessore, mentre il secondo stadio utilizza una singola schiuma con 12 mm di spessore e 80 p.p.i. è necessario ripetere le analisi con diversi materiali filtranti per stabilire quali siano i più idonei. La frazione inalabile è determinata sommando la polvere depositata sui due componenti: le schiume e il filtro. La frazione toracica viene determinata aggiungendo la polvere depositata sul secondo stadio della schiuma a quella del filtro, mentre la frazione respirabile è determinata dalla polvere depositata solo sul filtro. La determinazione della polverosità comprende almeno tre repliche in serie. Il tamburo viene pulito tra serie successive e vengono usate schiume e filtri nuovi. I campioni rappresentativi sono preparati dal materiale granuloso secondo il DIN 51.701-3 [34] di IGF (laboratorio tedesco) e BS 3406-1 [35] o di HSL (laboratorio britannico). La determinazione della polverosità del materiale testato è effettuata per pesata dei filtri e/o delle schiume prima e dopo il test. La frazione di massa della polverosità per ogni frazione di granulometria, espressa in milligrammi per chilogrammo, viene poi calcolata dividendo la massa (in milligrammi) di polvere raccolta da ogni frazione per la massa (in chilogrammi) del materiale messo nel serbatoio a tamburo o nel



serbatoio del campione. Nel laboratorio HSL sono determinati il valore e i coefficienti medi di variazione delle repliche dei tre test. Il coefficiente di variazione deve essere minore del 10%: se questo valore viene superato verranno effettuate più misure. Nel laboratorio IGF vengono calcolati il valore medio e la relativa deviazione standard delle cinque misure.

## **2.5. Analisi statistica**

In questo paragrafo sono illustrati e confrontati i risultati ottenuti dalle analisi effettuate nel progetto della IMA-Europe, di cui precedentemente sono state illustrate le metodiche.

La media geometrica (GM) e la deviazione standard geometrica (GSD) delle frazioni di massa della polverosità inalabili e respirabili vengono determinate per ogni singolo campione, sia per i metodi con caduta continua (cinque repliche in serie) che per il tamburo rotante (tre repliche). Una panoramica della variabilità dei risultati di polverosità di questo esperimento è presentato in Tabella 1, dove per ogni minerale sono riportate: il numero dei campioni, la polverosità distinta nelle diverse frazioni (inalabile, toracica e respirabile) e i rapporti fra i dati ottenuti con il metodo a caduta continua e quello a tamburo rotante. Bisogna notare che la misura della polverosità di un materiale varia in base al luogo del prelievo, alla lavorazione al quale è sottoposto e alle condizioni meteo-climatiche a cui è soggetto.

Quattro dei campioni analizzati (tre della frazione respirabile e uno della frazione inalabile) hanno valori di polverosità al di sotto del limite di rilevazione (LOD) dello strumento, se misurata con il metodo a caduta continua, mentre, per il metodo a tamburo rotante tutti i campioni hanno valori di polverosità superiori al LOD. I valori della polverosità al di sotto del LOD sono stati sostituiti da metà del valore del LOD. Un'analisi statistica è stata effettuata con il software statistico StataCorp [32].

Dal momento che sia le frazioni di massa inalabili che quelle respirabili della polverosità mostrano distribuzioni altamente asimmetriche, tutti i dati sono stati log-trasformati. In una prima tappa sono stati studiati i fattori che possono avere una significatività statistica sulla polverosità. Inoltre una procedura multipla lineare generale è stata usata per descrivere la relazione statistica tra la variabile dipendente (sia respirabile o inalabile, come misurato dai metodi a caduta continua o a tamburo rotante) e le variabili indipendenti:  $d_{50}$ ,  $d_{97}/d_{10}$ , superficie specifica, contenuto di quarzo di massa e dal tipo di minerale. La dimensione delle particelle di ciascun campione è espressa dal valore della  $d_{50}$  (diametro delle particelle la cui dimensione per il 50% in volume del prodotto minerale è inferiore al valore

medesimo). Il rapporto d97/d10 rappresenta la larghezza della distribuzione granulometrica.

Tabella 1. Valori relativi alle frazioni di massa dei campioni minerali ottenute con i metodi a caduta continua e a tamburo rotante.

Mineral	Feldspar	Quartz	Chistobalite	Talc	Calcined clay	Clay	Kaolin	Marble	Chalk
Number of samples	8	4	4	12	3	3	3	3	3
Raking drum									
Inhalable fraction (mg kg <sup>-1</sup> )									
GM (GSD)	3037 (2.4)	130 (9.8)	750 (4.4)	2330 (2.9)	1829 (2.8)	825 (2.0)	276 (3.0)	444 (5.2)	881 (3.1)
Minimum-maximum	1006-18 163	17-3283	108-2420	642-33 853	736-5583	478-1768	85-577	135-2940	407-3284
Thoracic fraction (mg kg <sup>-1</sup> )									
GM (GSD)	1231 (1.7)	69 (8.5)	450 (4.2)	858 (2.0)	969 (2.6)	262 (1.9)	120 (2.7)	211 (3.3)	513 (3.2)
Minimum-maximum	565-2871	10-1417	65-1329	432-3971	416-2749	126-430	39-260	93-816	247-1948
Respirable fraction (mg kg <sup>-1</sup> )									
GM (GSD)	339 (1.8)	28 (6.7)	134 (6.9)	187 (1.6)	306 (2.2)	56 (1.9)	43 (1.5)	92 (2.7)	163 (2.6)
Minimum-maximum	117-814	6-436	8-512	110-572	151-722	32-115	28-61	52-284	89-495
Continuous drop									
Inhalable fraction (mg kg <sup>-1</sup> )									
GM (GSD)	11 394 (2.6)	415 (5.1)	2666 (8.1)	20 757 (2.9)	16 441 (1.4)	6054 (2.2)	5072 (1.1)	7605 (5.0)	3893 (1.2)
Minimum-maximum	4101-65 628	13-34 339	164-15 411	5786-146 903	12 333-23 269	2995-11 972	4847-5308	1831-43 957	3186-4746
Respirable fraction (mg kg <sup>-1</sup> )									
GM (GSD)	123 (1.6)	21 (5.0)	54 (7.8)	743 (3.2)	272 (1.2)	59 (2.4)	52 (1.4)	119 (4.8)	88 (1.5)
Minimum-maximum	69-273	6-191	3-293	160-6917	230-310	31-162	41-65	27-615	64-139
Ratio of dustiness mass fractions (continuous drop/rotating drum)									
Inhalable fraction									
GM (GSD)	3.75 (2.46)	3.20 (9.51)	3.55 (1.86)	8.91 (1.96)	8.99 (2.77)	7.34 (4.04)	10.2 (1.4)	17.1 (1.4)	4.42 (3.72)
Minimum-maximum	0.94-13.0	0.25-38.0	1.52-6.37	2.81-42.1	2.77-16.8	1.47-18.0	6.41-16.2	13.6-24.7	0.97-9.58
Respirable fraction									
GM (GSD)	0.36 (2.32)	0.77 (2.21)	0.40 (1.44)	3.97 (2.84)	0.89 (2.51)	1.05 (1.31)	0.97 (1.15)	1.29 (2.24)	0.54 (1.76)
Minimum-maximum	0.16-2.33	0.37-1.95	0.25-0.62	1.37-37.0	0.32-1.88	0.83-1.41	0.88-1.07	0.51-2.17	0.28-0.78

Quando il rapporto d97/d10 è uguale a 1, significa che il materiale è costituito da particelle con dimensioni poco diverse ed è caratterizzato da una distribuzione granulometrica uniforme. Se la differenza tra i valori d97 e d10 aumenta, la distribuzione delle dimensioni delle particelle diventa più

ampia e il rapporto  $d_{97}/d_{10}$  aumenterà significativamente, viceversa se la differenza diminuisce il rapporto  $d_{97}/d_{10}$  sarà più vicino ad 1. Pochi campioni sono caratterizzati da un elevatissimo rapporto  $d_{97}/d_{10}$  e ciò è principalmente dovuto al fatto che la distribuzione granulometrica del campione non risulta essere uniforme. Come risultato, i rapporti di  $d_{97}$  e  $d_{10}$  tendono a mostrare una distribuzione asimmetrica. I valori del  $d_{50}$  e dell'area della superficie specifica non mostrano una distribuzione asimmetrica nella stessa misura. L' idoneità statistica della modellazione viene controllata esaminando la normalità e la stabilità dei residui del modello. In una seconda fase, il sistema di classificazione della polverosità è guidato: sono considerati solo tre aspetti. Una delle problematiche dell'analisi statistica dei risultati, e dell'analisi della polverosità dei materiali in generale, è che non esistono standard di riferimento. Sono stati valutati il grado di accuratezza e affidabilità della classificazione statistica ed il grado di accordo fra i due metodi utilizzati [32]. Infine si è cercato di trovare una correlazione fra i due metodi e di conseguenza fra le due diverse classificazioni previste nella norma UNI EN [21] (una per il metodo a caduta continua ed una per il metodo a tamburo rotante).

## **2.6. Riflessioni conclusive sui risultati degli esperimenti compiuti dai due laboratori (IGF e HSL)**

Il comportamento dei materiali per quanto riguarda la polverosità sembra essere determinato dalla natura del materiale e dalla finezza. L'analisi statistica rivela che i fattori di influenza sono differenti quando si considerano campioni con una dimensione delle particelle con  $d_{50} < 100$  o  $> 100$  micrometri. Diverse proprietà fisiche sembrano determinare la polverosità dei materiali. Ad esempio, le forze elettrostatiche tendono a far stare attaccate le particelle fini, riducendo la liberazione di polvere. Queste forze non giocano invece un ruolo significativo nei materiali grossolani. Pertanto, l'ipotesi che i materiali 'più fini' mostrino valori di polverosità superiore, che sono attualmente ancora riportati in diverse pubblicazioni [36], non è confermato da questi risultati. Inoltre, la situazione è molto più complicata dal momento che, per molti minerali, con l'aumentare della dimensione del grano la polverosità aumenta inizialmente ma poi diminuisce. Per esempio, la polverosità del quarzo e della cristobalite aumenta per i campioni con  $d_{50}$  fino a circa 150 micrometri ma poi diminuisce improvvisamente nei prodotti minerali grossolani. Tuttavia, il feldspato mostra una polverosità poco variabile, a prescindere dalla granulometria del materiale. Questi risultati sono generalmente in linea con quelli precedenti [37].

EN 15051 [21] propone due metodi per misurare la polverosità di materiali granulari. Ricordiamo che lo scopo della norma è quello di classificare ciascun prodotto minerale secondo la tendenza a produrre polvere durante il maneggiamento. Nel caso ideale, indipendentemente dal metodo usato, la stessa classificazione dovrebbe essere ottenuta per ciascun tipo di prodotto minerale specifico. Però, quando si definiscono le classi di polverosità (in termini di molto basso, basso, moderato e alto) i limiti tra queste classi sono diversi per i due metodi; questo è dovuto ai diversi valori frazionari assoluti di massa di polverosità che risultano dalle diverse tecniche di generazione e dalla diversa energia fornita nei due metodi di analisi. Dovrebbe esser notato che i valori limite di frazione di massa della polverosità si basano sul confronto di soli 12 materiali diversi, in un progetto SMT4-CT96-2074 [22] finanziato dall'Unione Europea. Il progetto di polverosità IMA-Europe mostra, tuttavia, che circa il 50% dei 42 campioni analizzati sono classificati diversamente per la frazione respirabile. Per la frazione inalabile ancora più campioni, circa il 60%, entra in una diversa categoria di polverosità. Il progetto dimostra che i due metodi, quando sono applicati ad un numero di minerali industriali, spesso danno una diversa classificazione e quindi gli obiettivi della norma non sono attualmente stati raggiunti. L'arbitrario punto limite delle categorie, come definito nella norma EN 15051 [21], è basato su un numero limitato di campioni di riferimento e pone dei problemi. In questa fase i risultati non spiegano da quali fattori dipenda che ad un singolo campione possano essere assegnate classificazioni diverse. Sulla base dei 42 campioni misurati tramite i metodi a caduta continua e a tamburo rotante, uno spostamento di uno dei limiti di classificazione per uno dei due metodi risulta in un miglior accordo tra i due metodi stessi. Tuttavia, questo si ottiene solo quando si considerano due categorie invece di quattro, ad esempio 'molto basso/basso' e 'moderato/alto'. Inoltre, è fortemente discutibile se sia accettabile una correlazione piuttosto bassa (66% dei campioni). Entrambi i metodi simulano diversi scenari di gestione: il test a tamburo rotante è fondamentalmente un dispositivo che solleva e fa cadere lo stesso materiale più volte e quindi è in grado di simulare sia la caduta che la miscelazione; al contrario, la caduta costante utilizza materiale nuovo per tutti i 10 min di giri e può quindi simulare il carico dei camion attraverso un nastro trasportatore. La correlazione relativamente debole tra i due metodi per le frazioni respirabili e inalabili, indica spesso una classifica diversa dei prodotti minerali. La diversa classificazione di molti materiali fatta dai metodi con tamburo rotante e a caduta continua sottolinea che l'esposizione alla polvere è fortemente correlata al tipo di trattamento. In linea di principio, la polverosità potrebbe essere uno strumento molto prezioso per prevedere

l'esposizione potenziale nel corso di uno specifico tipo di movimentazione [3]. Tuttavia, non si deve trascurare il fatto che nei processi industriali ci sono molti fattori che influenzano l'esposizione del lavoro. Pertanto, i valori di polverosità non devono essere utilizzati separatamente e la selezione del metodo (a tamburo rotante o caduta continua) dovrebbe essere fatta con una chiara visione dei materiali e del loro uso previsto. Seguendo i risultati di questo studio, l'uso della polverosità per etichettare i prodotti minerali è comunque controversa: non è possibile utilizzare una singola etichetta che rispecchi tutti gli scenari industriali. Questo potrebbe significare che l'industria ha bisogno di effettuare una serie di test di polverosità a seconda di quale specifico processo subirà il materiale. La relazione tra la polverosità e il contenuto di umidità dei campioni e ogni variazione durante la determinazione non è stata considerata nel presente studio, poiché il contenuto di umidità di tutti i campioni forniti era molto basso. La norma volutamente richiede che i campioni devono essere analizzati 'come sono utilizzati', il che significa senza un'asciugatura artificiale o una fase di trattamento. Questa decisione è stata presa per i luoghi di lavoro industriali dove la polvere generata sarà sempre il risultato di materiali non trattati. Inoltre, a seconda della natura dei prodotti esaminati anche un materiale appena trattato cambierà il suo contenuto di umidità durante l'indagine analitica. Inoltre, la polverosità di un dato materiale industriale dipende da numerosi fattori aggiuntivi che causeranno una certa incertezza di misura in sé [14,26]. Pertanto, la fissazione di limiti di classificazione arbitrari influenzerà i risultati del test in modo abbastanza rilevante. Ad esempio, un materiale con una polverosità 'media', all'interno di uno dei campi di classificazione, sarà classificato senza ambiguità e in modo identico con entrambi i metodi, mentre un materiale con una polverosità vicina a uno dei limiti dei campi di classificazione sarà soggetto a diverse classificazioni con i due metodi. Come l'intera procedura ha lo scopo di facilitare la valutazione del rischio degli utenti, e di conseguenza di migliorare le condizioni di lavoro facendo uso dei meccanismi di mercato, questa situazione necessita di essere migliorata.

In ultima analisi i metodi dell'UNI EN 15051 [21] non forniscono informazioni attendibili per una stima dell'esposizione alla polvere se applicati ad una moltitudine eterogenea di prodotti industriali. Inoltre, il sistema di classificazione, come previsto nell'UNI EN 15051 [21] è inadeguato per la classificazione e per l'etichettatura dei minerali industriali. La commissione di standardizzazione competente ha quindi accettato di tenere conto di queste considerazioni.

## Capitolo III

### **Analisi della polverosità nel porto di Ravenna con il metodo a tamburo rotante**

#### **3.1. Storia del porto di Ravenna**

La tradizione portuale di Ravenna, in virtù della sua fortunata posizione geografica, risale già al I secolo a.C., quando Augusto vi dislocò una delle due flotte imperiali. Il porto continuò ad essere attivo anche dopo la crisi dell'Impero del III sec. e conobbe nuovo splendore in età bizantina.

La storia del porto è successivamente contrassegnata da diversi eventi avversi, come per esempio interramenti e alluvioni. Però con l'interessamento da parte dello Stato Pontificio si pose fine a questa situazione di crisi. Importante fu l'anno 1738, in cui venne attivato il porto Corsini (un canale che si insinua dal mare fino alla città per oltre 11 km).

Il periodo che ha segnato una determinante svolta positiva per il porto di Ravenna, verso un ruolo di primo piano per rilevanza economica e commerciale, è stato l'ultimo dopoguerra, quando numerose raffinerie e industrie petrolchimiche si sono insediate lungo le sponde del porto canale. Nuove attività, inoltre, ebbero impulso negli anni '70, quando la crisi petrolifera favorì la comparsa di nuovi terminal specializzati nella movimentazione di varie merci alla rinfusa e container [38].

Oggi si può affermare che il Porto di Ravenna è diventato un vero e proprio leader in Italia per gli scambi commerciali con i mercati del Mediterraneo orientale e del Mar Nero. Questa grande struttura è in grado di offrire la più completa gamma di servizi ad ogni tipo di merce, oggetto di grandi investimenti pubblici e privati volti a migliorare le dotazioni infrastrutturali, ad ampliare ed al contempo specializzare l'offerta di servizi per ottenere standard qualitativi sempre migliori.

#### **3.2. Contesto geografico del presente lavoro di tesi**

Attualmente al porto di Ravenna vengono sbarcati e manipolati giornalmente grandi quantità di materiali alla rinfusa, anche polverulente in grado di generare, attraverso la loro movimentazione, enormi quantitativi di polvere.

Nell'immagine sottostante è rappresentata l'area portuale di Ravenna, dove sono evidenziate le attività che ricadono all'interno dell'area (Figura 8).



Figura 8. Porto di Ravenna. In giallo è rappresentata l'area portuale ed in arancione sono numerate le strutture aziendali.

Le industrie che lavorano all'interno del porto svolgono diverse mansioni che variano dallo stoccaggio di prodotti petroliferi, al carico di fertilizzanti, alla raccolta di merci sfuse e in sacchi, alla movimentazione di container, all'imbarco e sbarco di prodotti chimici liquidi, fino allo stoccaggio e movimentazione di prodotti cerealicoli [39].

Come illustrato nei grafici di Figura 9 e 10, dall'anno 2004 al 2014 sono state movimentate fra le 15000000 e 20000000 t/anno di merci di cui più della metà alla rinfusa.

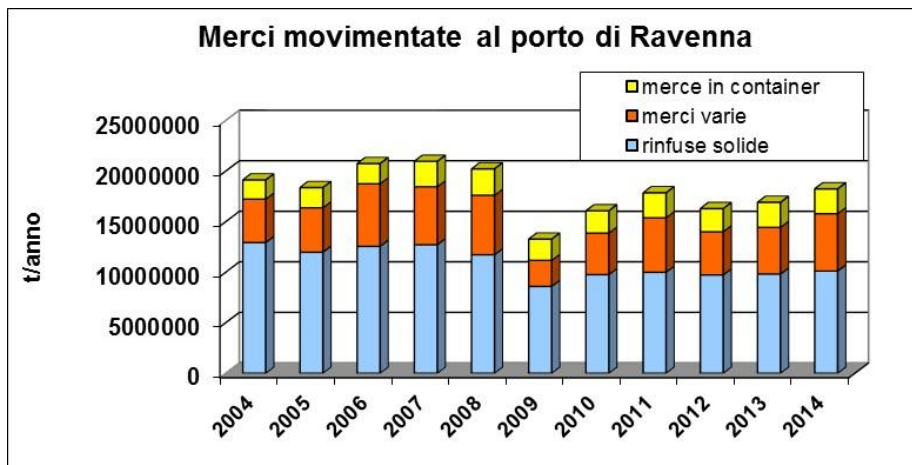


Figura 9. Grafico che evidenzia la movimentazione delle merci nel porto di Ravenna dal 2004 al 2014.

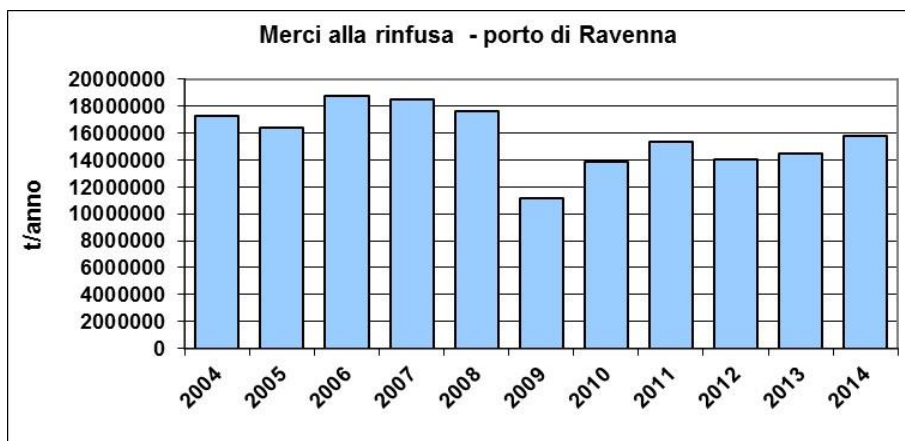


Figura 10. Grafico che evidenzia le tonnellate annue di merci alla rinfusa dal 2004 al 2014.

Lo sbarco di un prodotto può avvenire utilizzando tecniche diverse, a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche del prodotto da scaricare, delle tecnologie disponibili e di valutazioni di carattere economico.

Al porto di Ravenna il sistema di sbarco più diffuso, per prodotti polverulenti, è l'utilizzo di gru fisse o mobili dotate di benna (Figura 11), modalità che ha il vantaggio di utilizzare sistemi flessibili, adatti per lo sbarco di tipologie molto diverse di prodotti [39].



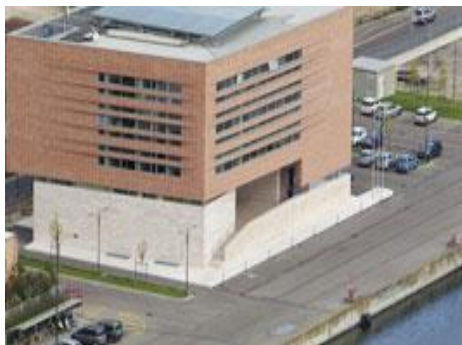
Figura 11. Gru mobile dotata di benna.

Le benne consentono alte rese orarie e possono essere impiegate anche con merci soggette ad impaccamento, come farine e fertilizzanti, ma hanno lo svantaggio di causare notevole polverosità, sia durante il tragitto della benna da fondo stiva a banchina, sia durante lo scarico in tramoggia (contenitore a forma di tronco di piramide o di cono capovolto, munito di apertura sul fondo, utilizzato per raccogliere dall'alto materiali, per poi



scaricarli verso il basso). Inoltre, rispetto ai sistemi automatizzati, la polverosità prodotta nella fase di carico/scarico dipende fortemente dalle modalità utilizzate dall'operatore addetto. In tal senso la comunità europea [40] ha definito una serie di indicazioni procedurali sul corretto uso di benne e pale meccaniche che, se correttamente eseguita, è in grado di contenere significativamente le emissioni prodotte.

In generale, della gestione di tutte queste attività si occupa l'Autorità Portuale di Ravenna (Figura 12) che opera per indirizzare, programmare, coordinare, promuovere e controllare le operazioni portuali e le altre attività commerciali ed



industriali esercitate nel porto, *Figura 12. Sede dell'autorità amministrativa dei beni del demanio portuale di Ravenna.*

marittimo, provvede al mantenimento dei fondali ed alla realizzazione delle grandi infrastrutture portuali finanziate dallo Stato e garantisce la manutenzione ordinaria e straordinaria delle parti comuni [41].

### **3.3. Ordinanza autorità portuale n.4/08**

La polverosità dei materiali alla rinfusa è definita come la tendenza ad emettere polvere in aria durante la movimentazione in condizioni specifiche [22]. Prove di polverosità sono state sviluppate e utilizzate per caratterizzare la qualità del prodotto di materiali alla rinfusa, e per prevedere il potenziale delle polveri a rappresentare rischi per la salute, rischi per la sicurezza (incendio, esplosione), inquinamento ambientale o la contaminazione e l'usura dei macchinari. Da qui nasce la necessità di analizzare i materiali che si trovano all'interno del porto di Ravenna, che ogni giorno vengono sbarcati e movimentati generando grandi quantità di polvere. L'autorità portuale di Ravenna, per ridurre l'emissione di polveri in area portuale, ha emanato l'ordinanza n.4/08 [2] in cui sono elencati gran parte dei materiali utilizzati nel porto e li ha suddivisi in base a tre diverse categorie di polverosità (Tabella 2).

Tabella 2. Classificazione del grado di polverosità dei materiali portuali effettuato dall'autorità portuale di Ravenna nell'ordinanza n. 4/08.

<b>Classe A: poco polverosi</b>	<b>Classe B: mediamente polverosi</b>	<b>Classe C: altamente polverosi</b>
<b>Argilla</b>	Allumina idrata	Allumina calcinata
<b>Calcare</b>	Antracite	Bauxite
<b>Cloruro di sodio</b>	Barite	Bentonite in polvere
<b>Ghiaia</b>	Bauxite in pezzatura	Caolino tal quale
<b>Loppa</b>	Borace	Cemento
<b>Sabbia</b>	Caolino/Chamotte in pellets/pezzatura	Clinker
<b>Sabbia di zirconio</b>	Carbonato di calcio	Concime in polvere
<b>Sabbia silicea</b>	Carbonato di sodio	Fertilizzanti in polvere
<b>Sale</b>	Carbon fossile	Fluorite
<b>Spodumene</b>	Cloruro di potassio in polvere	Fosfato di calcio
<b>Stabilizzato</b>	Concimi granulari e cristallini	Fosforite
<b>Torba</b>	Fertilizzanti granulari e cristallini	Gesso
	Coke metallurgico/fonderia	Glutine
	Feldspati	Granaglie e cereali
	Magnesite in pezzatura	Magnesite
	Nefelina	Mangimi in pellets/sfarinati
	Perlite	Manioca in fette/pellets
	Pet coke	Patate in fette/pellets
	Siderite	Sfarinati/pellets
	Solfato di sodio	Solfato ferroso
	Urea	Talco
	Wollastonite in pezzatura	Ulexite
Zolfo	Wollastonite	

A seconda dell'entità della polvere generata dal materiale, le attività di movimentazione devono prevedere accorgimenti che ne riducano l'emissione e la formazione.

### **3.4. Dotazioni dell'impresa portuale**

Come cita la stessa ordinanza dell'autorità portuale, ogni impresa che utilizzi i materiali elencati nelle tre classi di polverosità deve adottare le dotazioni strumentali citate di seguito, attrezzature e provvedimenti. In generale, ogni impresa portuale che effettua operazioni con materiali alla rinfusa deve disporre, oltre che di attrezzature, apparecchi ed impianti utili, necessari allo svolgimento delle operazioni portuali, di: macchine e impianti fissi/mobili per la pulizia delle superfici delle aree dedicate alle operazioni portuali, aree per lo stoccaggio delle merci, attrezzate con impianti/sistemi per inumidire i cumuli, automezzi per il trasporto delle merci, dotati di sistemi di chiusura (preferibilmente automatizzati) del cassone [2].

Le imprese che effettuano operazioni portuali con merci appartenenti alla classe B (mediamente polverose) hanno inoltre in dotazione [2]:

- benne con caratteristiche costruttive tali da limitare al massimo fuoriuscite della merce movimentata;
- attrezzature, e/o apparecchi, e/o impianti per la movimentazione delle merci segregati (es. tramoggia attrezzata con barriere perimetrali di contenimento, nastri trasportatori carterati);
- aree per lo stoccaggio delle merci attrezzate con impianti/sistemi per inumidire i cumuli e con approntamenti per evitare l'imbrattamento delle vie di passaggio (es. barriere contenitive).

Le imprese portuali che effettuano operazioni portuali con merci appartenenti alla classe C polverose hanno inoltre in dotazione [2]:

- attrezzature, e/o apparecchi, e/o impianti per la movimentazione delle merci segregati e dotati di dispositivi di captazione polveri per ogni punto di ricaduta (es., tramoggia con impianto di aspirazione e contenimento attrezzata con barriere perimetrali di contenimento, nastri trasportatori dotati di carter con aspirazione nei punti di caduta)
- aree al chiuso o coperte per lo stoccaggio delle merci.

### 3.5. Finalità

Il corrente studio prevede l'analisi fisica per la valutazione della polverosità di alcuni materiali che vengono sbarcati e movimentati nel porto di Ravenna. A questi materiali non è ancora stata assegnata la classe di polverosità, tra le tre definite all'interno della ordinanza n.4/08. Queste analisi sono state condotte presso i laboratori dell'Arpae



*Figura 13. Logo rappresentativo dell'Arpae.*

(Figura 13). L'Arpae è l'agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia. Alla sede di Ravenna è stato assegnato il compito di formulare una valutazione analitica e non solo qualitativa di tali materiali polverulenti. L'Arpae svolge lavori in tutti gli ambiti e comparti ambientali. La sede di Ravenna è costituita dallo Sportello accettazione-refertazione dei campioni e da vari laboratori che svolgono analisi chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche. Ha compiti di consulenza e di supporto alla attività di vigilanza del Servizio Territoriale, ai Dipartimenti di prevenzione delle Aziende USL, ad altri Enti pubblici e privati. E' integrata nella rete regionale dei laboratori Arpae, e provvede all'analisi di campioni provenienti da altre Sezioni Arpae, sia tramite i laboratori che costituiscono il riferimento analitico regionale, sia tramite l'Area analitica ambientale. L'Agenzia inoltre partecipa a circuiti di "intercalibrazione" nazionali ed internazionali, che permettono a laboratori affini di confrontare i propri risultati, assicurando il controllo costante dei processi analitici e l'uniformità dei metodi di lavoro [42].

### 3.6. Campionamento

Il campionamento dei materiali alla rinfusa costituisce il primo, e fondamentale, passo per la caratterizzazione della polverosità di un materiale. L'obiettivo del campionamento è di prelevare una piccola quantità di materiale dalla massa totale, in modo tale che questa piccola frazione rappresenti al meglio le caratteristiche fisiche e chimiche dell'intera massa di materiale [43]. Quindi, i campioni devono necessariamente essere rappresentativi di tutto il materiale alla rinfusa. Il campionamento è una fase estremamente delicata e complessa che condiziona i risultati di tutte le

operazioni successive e che incide in misura non trascurabile sull'incertezza totale del risultato finale dell'analisi. È fondamentale rispettare tutti i tempi delle procedure ed applicare le risorse necessarie affinché il campionamento sia robusto e affidabile. È altrettanto importante che la procedura di campionamento sia ripetibile ed adeguata per tutti i tipi di materiali potenzialmente sottoposti ad analisi. La procedura di campionamento dovrebbe essere sviluppata e adattata considerando le seguenti problematiche [43]:

(A) la quantità di materiale deve essere associata al tipo di campione preso in esame;

(B) bisognerebbe considerare le caratteristiche fisiche del materiale (la forma delle particelle, le dimensioni delle particelle, la tendenza a separarsi, la chimica di superficie delle particelle);

(C) testare il grado di resistenza meccanica del materiale, cioè, la sua friabilità per non rischiare la rottura delle particelle durante il trasporto o durante il campionamento;

(D) utilizzare le modalità di trasporto adeguate per al materiale;

(E) valutare la possibilità di contaminazione del campione e stabilire i limiti accettabili di contaminazione;

(F) considerare la durata del tempo necessario per effettuare il procedimento di campionamento (questo fattore richiede un attento esame, siccome le attrezzature di campionamento possono essere ingombranti e le procedure potrebbero richiedere molto tempo); il desiderio di risparmiare tempo e denaro non deve compromettere il requisito di elevato livello di rappresentatività del campione;

(G) definire l'abilità e la competenza degli operatori che conducono il processo di campionamento.

Di seguito invece sono definite le linee guida di base che possono essere seguite per aiutare ad ottenere campioni rappresentativi. Esse sono colloquialmente note come le "regole d'oro di campionamento":

1. Il materiale deve essere campionato solo dopo che è stato adeguatamente movimentato;

2. L'intero campione di materiale deve essere prelevato preferibilmente per stadi successivi piuttosto che tutto assieme.

Le procedure di campionamento possono essere integrate con l'uso di tecniche matematiche e sperimentali. Tali tecniche di "campionamento statistico" richiedono l'ispezione solo di specifiche frazioni di massa e quindi riducono notevolmente la quantità di tempo e fatica.

Il peso del campione di materiale può variare da pochi grammi a diverse tonnellate. Esistono vari dispositivi e tecniche sviluppate per facilitare il campionamento rappresentativo dei materiali polverulenti, permettendo di rispettare le "regole d'oro" nella massima misura possibile. Se applicate con le procedure di campionamento statistico, queste possono fornire un elevato grado di affidabilità e omogeneità per i campioni raccolti. Alcune di queste tecniche sono abbastanza indipendenti dall'operatore, mentre altre sono fortemente influenzate da fattori umani. È quindi necessario sviluppare e implementare le pratiche e i controlli in queste procedure con documenti per tenere traccia degli eventuali errori o variazioni causati dai fattori umani.

I campionamenti effettuati nel presente lavoro di tesi; sono stati realizzati presso numerose aziende che esercitano le loro attività nelle vicinanze del porto, dove accumulano in grandissime quantità i materiali alla rinfusa. La tipologia di campionamento utilizzata è nota come "metodo del cono e del quarto" o "quartatura". Durante questo processo con l'utilizzo di una pala il solido viene disposto a forma di cono, depositando sull'apice ogni nuova palata; poi il solido viene rimosso ripetutamente dalla base del cono all'apice. Questo passaggio serve a far sì che il materiale sia adeguatamente miscelato così che aumenti anche la sua omogeneità. A questo punto, sempre con l'utilizzo della pala, si appiattisce il cono premendo sull'apice in modo da ottenere uno strato circolare di materiale. Di seguito questo viene suddiviso in quattro parti, uguali il più possibile tra loro, tracciando due linee perpendicolari attraverso il centro del cono. Dopodiché si scartano due dei quarti opposti e sui due rimanenti si ripete il processo fino a selezionare la quantità di campione necessaria all'analisi. Come detto prima data la raccolta da parte di un operatore il rischio di errore è alto, tuttavia se i passaggi vengono effettuati correttamente e nei tempi giusti il rischio diminuisce [43].

### **3.7. Trasporto del campione**

Per i materiali alla rinfusa la quantità da prelevare solitamente non deve essere minore di 1 Kg.

Le metodiche di campionamento vengono elaborate in funzione della loro giacenza:

- a) Piccoli contenitori, sacchi, fusti, tini, “big-bags”;
- b) Ammassi, silos e tramogge;
- c) Materiali in movimento (nastri trasportatori, scivoli, cascate, coclee, viti senza fine).

Il trasporto e la conservazione del campione prima dell'analisi sono fondamentali perché potrebbero portare a problemi di sicurezza, di mantenimento delle caratteristiche chimiche e fisiche del campione, di identificazione e di ordine legale.

Nel presente lavoro di tesi si è scelto di prelevare all'incirca 5 Kg di materiale alla rinfusa; dopodiché il materiale è stato inserito in buste di polietilene per mezzo di una sessola. Le buste, raggiunto il peso massimo di campione, sono state chiuse ermeticamente per mantenere inalterate le caratteristiche del materiale nel momento in cui viene campionato [44].

### **3.8. Descrizione dell'apparecchiatura per il metodo a tamburo rotante (campo di applicazione e procedure)**

Lo strumento utilizzato nel mio lavoro di tesi per la determinazione della polverosità dei materiali è il Dustmeter Type III (Figura 14) [45].



*Figura 14. Dustmeter Type III.*

L'apparecchiatura, che qui di seguito verrà descritta, viene utilizzata per le attività eseguite nell'ambito della determinazione della polverosità di materiali stoccati in cumuli e/o comunque soggetti a movimentazione da parte di operatori. Il campione può essere in forma di polvere, granulato o

pellets. In particolare è rivolta alle attività di sbarco e stoccaggio merci in ambito portuale [45].

Per simulare la formazione di particolato derivante da processi di movimentazione del materiale, il campione viene mantenuto in movimento continuo all'interno di un mulino, costituito da una pala a quattro bracci e quattro sfere d'acciaio mantenute in movimento dalla pala. Le polveri generate nel procedimento vengono raccolte da un flusso d'aria ascendente e catturate da un filtro.

Il flusso d'aria richiesto per la determinazione strumentale è generato da un'apposita pompa. Il volume d'aria, la portata, il numero di giri della pala ed i tempi di funzionamento si possono impostare e mantenere sotto controllo durante tutte le fasi di lavoro [45,46].

### **3.8.1. Preparazione del campione**

Per quanto riguarda la preparazione del campione, è stato preso in considerazione un lavoro effettuato dalla stessa Arpa nel 2014 [47]. In tale lavoro è stato utilizzato lo stesso strumento (Dustmeter Type III) e le analisi sono state effettuate su sub-aliquote di cinque materiali di prova campionati al porto [47].

Data l'eterogeneità della pezzatura dei materiali, ogni aliquota (circa 25 g) è stata sottoposta a setacciatura. Sono state inoltre effettuate diverse prove preliminari che hanno portato ad individuare le frazioni granulometriche utili alle successive analisi:

- Frazione con diametro granulometrico  $> 2$  mm (setaccio in acciaio inox con diametro di 2 mm in Figura 15a);
- Frazione con diametro granulometrico compreso fra 0,3 mm e 2 mm (setaccio in acciaio inox con diametro 300  $\mu$  in Figura 15b);
- Frazione con diametro granulometrico  $< 0,3$  mm.





*Figura 15a. Setaccio in acciaio inox con maglie di diametro di 2 mm. Figura 15b. Setaccio in acciaio inox con maglie di diametro di 0,3 mm.*

Ogni frazione deve essere raccolta in contenitori aventi un volume di almeno 50 mL muniti di tappo a vite e opportunamente pesata, riportando il dato di ogni pesata. La frazione con diametro granulometrico  $> 2$  mm viene pesata ma non sottoposta ad analisi, perché la polverosità di materiale grossolano è ininfluenza ai fini del calcolo totale.

### **3.8.2. Taratura e condizionamento del filtro**

I filtri utilizzati (microfibra di vetro con legante GF 9 050 – ALBET LabScience) devono essere condizionati prima e dopo l'esecuzione della determinazione strumentale ponendoli in contenitori individuali, etichettati e puliti (scatoline di plastica conduttiva), lasciando il coperchio dei contenitori leggermente aperto, in equilibrio con l'ambiente in cui avverranno le operazioni di pesata per un periodo non inferiore a 24 ore, prima della pesata stessa. Per una corretta determinazione gravimetrica delle polveri campionate è fondamentale il condizionamento dei filtri ad una temperatura di  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ed una umidità relativa del  $50\% \pm 5\%$ . Le pesate vengono effettuate con bilancia analitica avente una precisione di almeno  $0,0001 \text{ g} \pm 0,0002$  [45,46].

Al fine di ottenere un dato rappresentativo, è stato necessario pesare 2 volte consecutive il medesimo filtro ed assumere come valore della determinazione la media aritmetica dei 2 valori di pesata. Questo vale per i filtri utilizzati nella determinazione strumentale.

### 3.8.3. Preparazione della strumentazione

Prima di cominciare l'assemblaggio della strumentazione occorre pulire con acqua deionizzata le componenti strumentali e lasciarle asciugare; occorre poi controllare che il gel di silice all'interno della bottiglia sia sufficientemente anidro (colore blu), come da foto in Figura 16.



Figura 15. Gel di silice anidro.

Le parti da assemblare sono riportate in Figura 17 e di seguito elencate.



Figura 16. Parti mobili dello strumento Dustmeter Type III.

1. supporto per la membrana;
2. chiusura del supporto per la membrana con ghiera;

3. attacco portagomma;
4. portacampione;
5. tornello;
6. sfere d'acciaio;
7. camera di generazione delle polveri;
8. ghiera di unione fra il portafiltro e il portacampione;
9. estrattore della membrana.

Di seguito sono elencate le istruzioni per l'assemblaggio [45,46]:

- a) Accendere lo strumento (tempo di riscaldamento di 20 min);
- b) Inserire nell'apposito portafiltro (1) la membrana in fibra di vetro con legante (diametro = 50 mm), assicurandosi che la parte più ruvida sia rivolta verso il flusso d'aria (superficie di raccolta delle polveri);
- c) Chiudere il portafiltro con apposita ghiera di serraggio (2);
- d) Inserire il componente 3 alla base di del portafiltro (1);
- e) Inserire il portacampione (4) nell'apposita nicchia posta nel corpo dello strumento (Figura 17);
- f) Avvitare il tornello (5) all'interno del portacampione;
- g) Collegare il tubo in gomma presente sul lato destro del corpo dello strumento alla bottiglia contenente il gel di silice, in corrispondenza dell'ugello di uscita dell'aria.

Al termine di queste operazioni lo strumento e il portafiltro si devono presentare come nella foto di Figura 18.



*Figura 17. Dustmeter Type III al termine delle operazioni sopra elencate.*

Terminato il riscaldamento dello strumento, bisogna accedere alla schermata delle impostazioni analitiche. Dalla schermata iniziale, si preme “Selection” e quindi “User Method”. A questo punto si è entrati nella finestra delle impostazioni manuali.

#### **3.8.4. Inserimento del campione ed assemblaggio finale**

Una volta assemblate le parti mobili occorre inserire il campione, terminare l’assemblaggio e procedere all’analisi vera e propria. L’aliquota da analizzare, va posta all’interno del portacampione prestando attenzione a non rovesciare parte di esso e a distribuirlo equamente all’interno del vano. Una volta inserito il campione, si ripongono le quattro sfere nei quattro spazi fra le pale del mulino. A questo punto è necessario assicurarsi del buon funzionamento del mulino premendo “on” sulla schermata iniziale e verificando il corretto funzionamento delle pale per circa 10 sec.

Occorre poi unire il portacampione con la camera di generazione delle polveri (7).

Per terminare l’assemblaggio dello strumento, si avvita il portafiltro, come indicato in Figura 19, e si inserisce alla sommità il tubo di gomma rimasto libero in uscita dalla bottiglia con il gel di silice. Lo strumento è ora pronto per l’analisi ed appare come nella foto di Figura 14.



*Figura 18. Unione del portacampione con il portafiltro.*

### **3.8.5. Impostazioni strumentali**

Per modificare i valori predefiniti presenti sulla schermata delle impostazioni manuali bisogna toccare i rispettivi riquadri, partendo dal primo in alto (numero di giri) e digitare il valore desiderato sulla tastiera che appare sullo schermo.

Per l'analisi di un campione ai fini della classificazione della polverosità possono essere impostati nello strumento, diversi parametri. La normativa UNI EN 15051 [21] prevede di utilizzare un flusso d'aria pari a 38 L/min per 1 minuto di analisi con un campione di 35 cm<sup>3</sup>. Lo strumento utilizzato raggiunge un flusso massimo di 20 L/min. Una fase preliminare del presente lavoro di tesi è stata dedicata alla valutazione dei risultati usando diverse impostazioni dei parametri strumentali, per mettere a punto una metodica analitica in grado di dare una risposta coerente con la classificazione effettuata dall'autorità portuale nell'ordinanza n.4/08 [2]. Per compensare il minore flusso volumetrico dello strumento utilizzato (rispetto ai 38 L/min previsti da UNI EN 15051 [21]) il tempo di analisi è stato aumentato proporzionalmente.

Sono stati analizzati tre diversi materiali di prova (sabbia fine, feldspato e clinker grigio), effettuando le misure con tre diverse impostazioni strumentali. I valori dei parametri strumentali utilizzati sono riportati nelle Tabelle 3, 4 e 5.

*Tabella 3. Impostazione strumentale con flusso a 20 L/min per determinare il grado di polverosità di un materiale.*

Numero di giri (giri/m)	Rotat. Upm	15
Flusso di Aria (L/m)	Airfl. L/min	20
Volume aria totale (L)	Volume Liters	37,7
Tempo di analisi (m)	Time sec.	113

*Tabella 4. Impostazione strumentale con flusso a 18 L/min per determinare il grado di polverosità di un materiale.*

Numero di giri (giri/m)	Rotat. Upm	15
Flusso di Aria (L/m)	Airfl. L/min	18
Volume aria totale (L)	Volume Liters	37,7
Tempo di analisi (m)	Time sec.	126

*Tabella 5. Impostazione strumentale con flusso a 15 L/min per determinare il grado di polverosità di un materiale.*

Numero di giri (giri/m)	Rotat. Upm	15
Flusso di Aria (L/m)	Airfl. L/min	15
Volume aria totale (L)	Volume Liters	37,7
Tempo di analisi (m)	Time sec.	151

Come specificato nei paragrafi seguenti, successivamente si è deciso di utilizzare le impostazioni strumentali della Tabella 3 per le analisi finalizzate alla classificazione della polverosità di due materiali (il cloruro di potassio e la sepiolite).

### **3.8.6. Rimozione della membrana**

Terminata l'analisi si deve togliere il tubo di gomma all'estremità dell'apparecchiatura e svitare la parte superiore del portafiltro (3) separandola dal resto dello strumento. Poi bisogna svitare la ghiera di unione fra il portafiltro e il portacampione (8) e separare le due parti. Infine è necessario aprire il portafiltro tenendo la parte di collegamento con il portacampione rivolta verso l'alto estraendo la membrana utilizzando l'apposito estrattore (9).

### **3.8.7. Verifica del funzionamento dello strumento**

Una volta rimossa la membrana occorre smontare la parte superiore del portacampione per riportarsi alla configurazione di Figura 16. Poi bisogna riavviare lo strumento per circa 10 sec (premendo “on” sul display) per verificare il corretto funzionamento delle pale [45,46].

### **3.8.8. Numero minimo di determinazioni**

La determinazione va eseguita sulle due frazioni granulometriche < 2 mm separate mediante l'utilizzo del setaccio in acciaio inox in Figura 15b; per la frazione avente granulometria compresa fra 0,3 e 2 mm, devono essere introdotti nell'apparecchio 6 g di materiale per 10 prove, mentre per la frazione avente granulometria inferiore a 0,3 mm, devono essere introdotti nell'apparecchio 2 g di materiale per 10 prove. Il peso dell'aliquota deve essere determinato su una bilancia tecnica avente precisione di almeno 0,01 g  $\pm$  0,02.

La determinazione della polverosità sulle due aliquote ed i relativi quantitativi sottoposti ad analisi (6 e 2 grammi rispettivamente) sono stati ricavati attraverso prove empiriche effettuate presso il laboratorio Arpae nel 2014 [47], allo scopo di non intasare il filtro e nello stesso tempo ottenere un dato finale di polverosità rappresentativo del materiale sottoposto ad analisi.

Data l'eterogeneità dei materiali sottoposti ad analisi, dovrà essere eseguito un numero minimo di 6 prove per determinare la polverosità sulle due frazioni granulometriche; la deviazione standard della media geometrica delle prove effettuate deve risultare inferiore al 15%.

### **3.8.9. Calcolo della polverosità**

Ai fini della determinazione della polverosità dei materiali va preventivamente calcolata la ripartizione granulometrica media del materiale sottoposto ad analisi a partire dalla determinazione gravimetrica delle singole aliquote.

La ripartizione granulometrica media dei diversi materiali si ricava calcolando la media geometrica e relativa deviazione standard di almeno 10 setacciature.

La quantità di polvere generata durante la prova strumentale (espressa in mg) è calcolata come differenza fra il peso della membrana prima e dopo la prova analitica.

Il rapporto tra la differenza di peso della membrana e il peso (espresso in kg) dell'aliquota di materiale introdotta nello strumento costituisce la polverosità di ogni singola aliquota (espressa in mg/kg).

Infine, dopo aver calcolato la media geometrica dei dati di polverosità relativi ad ogni frazione granulometrica, come indicato al punto 3.8.8., la polverosità del materiale in esame si ricava applicando la seguente espressione [47]:

$$P_m = [(P_{f1} * F_{f1}) + (P_{f2} * F_{f2})] / (F_{f1} + F_{f2})$$

Dove:

$P_m$  = polverosità del materiale espressa in mg/kg

$P_{f1}$  = media geometrica di polverosità della frazione fra 0,3 e 2 mm espressa in mg/kg

$P_{f2}$  = media geometrica di polverosità della frazione < 0,3 mm espressa in mg/kg

$P_{f3}$  = media geometrica di polverosità della frazione > 2 mm espressa in mg/kg

$F_{f1}$  = percentuale sul campione tal quale della frazione fra 0,3 e 2 mm

$F_{f2}$  = percentuale sul campione tal quale della frazione minore di 0,3 mm

### **3.8.10. Calcolo dell'incertezza**

Per valutare l'incertezza associata alle prove di analisi del presente lavoro di tesi è stato applicato il metodo metrologico. Questo metodo prevede la suddivisione del processo nella sequenza completa delle operazioni che lo compongono e l'attribuzione ad ognuna di esse dell'errore associato [48].

Occorre definire quali sono le variabili che hanno influenza e in che relazione sono tra loro.

Non sono reperibili materiali di riferimento certificati pertanto non si considera la componente dell'incertezza associabile a tale voce. Quindi le sorgenti di incertezza attribuibili al presente lavoro sono riportate in Figura 21.



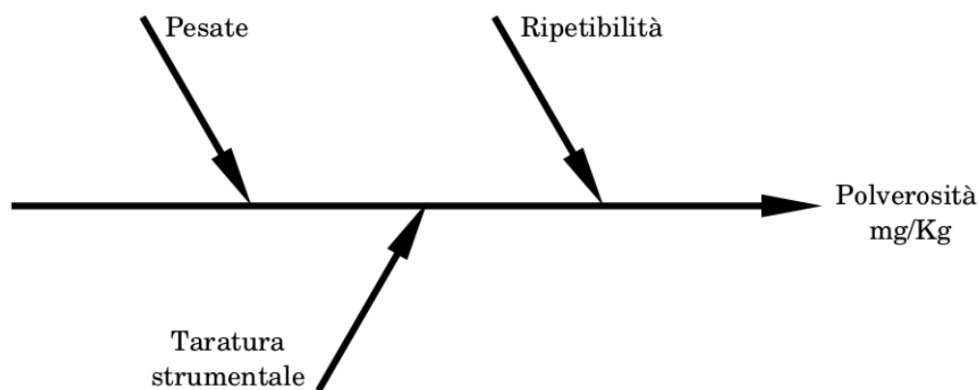


Figura 19. Sorgenti di incertezza.

Per quanto riguarda la taratura strumentale è stata effettuata una calibrazione del flusso di aspirazione con calibratore certificato Tetracal – Mesalabs modello ML/TC5 per range di misura 0,1- 30 L/min. Per quanto riguarda la pesata è stata utilizzata una bilancia analitica sottoposta a taratura e controllo.

Le componenti relative a pesata e flusso di aspirazione dell'apparecchio sono trascurabili rispetto alla componente relativa alla ripetibilità, quindi si assume la sola ripetibilità come unica componente dell'incertezza composta. L'incertezza estesa con un fattore di copertura  $k=2$  e  $P=95\%$  è quindi pari a 2 volte  $\sigma$  (deviazione standard).

### 3.8.11. Espressione dei risultati

Il dato di polverosità del materiale in esame, determinato secondo quanto descritto precedentemente, va presentato [45,46] unitamente a:

- Verbale di campionamento;
- Data di inizio e fine analisi;
- Umidità del materiale determinata secondo la UNI EN 15051 [21];
- Densità apparente del materiale determinata secondo la UNI EN 15051 [21]. La norma tecnica UNI EN 15051 la definisce come il rapporto tra la massa della sostanza e il volume effettivo da essa occupato, inclusi gli spazi vuoti tra le particelle che compongono il materiale. Tipicamente è riferita a materiali porosi e granulosi;
- Ripartizione granulometrica;
- Numero di prove effettuate;

- Classificazione della polverosità del materiale secondo la Tabella 6.

Gli intervalli di classificazione riportati in Tabella 6 non si riferiscono ai limiti indicati nella norma tecnica UNI EN 15051 [21], ma tengono conto degli accorgimenti impiantistici e logistici che le aziende ubicate in area portuale devono mettere in atto per le attività di sbarco/imbarco, movimentazione e stoccaggio di merci alla rinfusa, così come indicato nell'ordinanza dell'Autorità portuale di Ravenna N° 4/08 [2]. In riferimento alla sopraccitata ordinanza, e come riportato in Tabella 6 e nella prima parte del lavoro corrente, i materiali alla rinfusa sono classificati in 3 classi: poco polverosi (A), mediamente polverosi (B), molto polverosi (C).

*Tabella 6. Classificazione polverosità dei materiali.*

<b>Classificazione dei materiali</b>	<b>Polverosità del campione (mg/kg)</b>	<b>Classificazione Autorità portuale</b>
Poco polveroso	< 5000	A
Mediamente polveroso	5000 – 12000	B
Molto polveroso	> 12000	C

### **3.8.12. Il ruolo dell'incertezza associata ai risultati di misura**

Il dato di polverosità totale di un materiale dovrà essere accompagnato dalla sua relativa deviazione standard, quindi la polverosità del campione sarà rappresentata da un valore medio  $\pm$  una quantità espressa dalla deviazione standard [49]. Si potranno quindi verificare diversi casi, come illustrato in Figura 22.

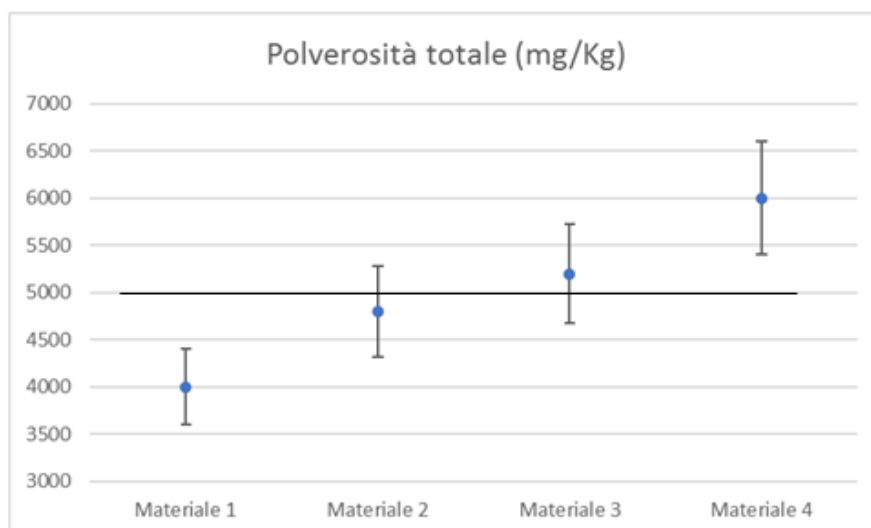


Figura 20. Esempio di classificazione dei risultati di quattro misure diverse (ricavate da quattro materiali di prova).

Per quanto riguarda il materiale 1 e il materiale 4 si evidenzia una situazione in cui il valore misurato  $\pm$  la deviazione standard ricade in una zona che non risulta al limite tra due classi.

Il materiale 1, quindi, al di sotto del valore soglia di 5000 mg/Kg anche includendo l'incertezza espressa dalla deviazione standard, sarà classificato come materiale poco polveroso. Analogamente, il materiale 4 potrà invece essere classificato come mediamente polveroso.

Al contrario, casi limite si verificano per i materiali 2 e 3, la cui polverosità, tenendo in conto la deviazione standard, potrebbe essere sia maggiore che minore del valore di 5000 mg/Kg, fissato come soglia tra i materiali poco polverosi e quelli mediamente polverosi.

Per risolvere questi casi di incertezza è stato deciso di fare riferimento al manuale e linee guida 52/2009 definito dall'ISPRA. Tale documento d'indirizzo ha lo scopo di fornire regole decisionali omogenee da adottare nel caso in cui nella normativa di riferimento non siano stabilite delle regole decisionali per la valutazione dell'incertezza associata ai risultati di misura. In questi casi si è deciso di agire considerando entrambi i materiali 2 e 3 come se fossero materiali a bassa polverosità [49].

### 3.8.13. Pulizia della strumentazione ed operazioni finali

Al termine delle operazioni di analisi vanno effettuate tutte le operazioni di smontaggio e pulizia della strumentazione, al fine di riportarla alle condizioni iniziali [45,46].

- a) Rimuovere le sfere e svitare la pala dal vano portacampione;
- b) Aspirare il campione presente;
- c) Rimuovere il vano portacampione ed aspirare nuovamente;
- d) Secondo necessità, lavare con acqua o con getto di azoto portacampione, pala e sfere.
- e) Scollegare la bottiglia contenente il gel di silice dal corpo dello strumento e riporla con il tubo di gomma a chiudere entrambi gli ingressi, così come raffigurato nella foto di Figura 16.

## Capitolo IV

### Risultati e discussione

#### 4.1. Premessa

Come anticipato nel capitolo precedente, la sperimentazione si può suddividere in due parti principali.

La prima parte riguarda le condizioni di esercizio dell'apparecchio al fine di verificare la variabilità di classificazione di tre diversi materiali di prova:

1. Sabbia derivante da macinazione di materiali minerali;
2. Feldspato;
3. Clinker grigio.

I tre materiali sono stati già contemplati dall'ordinanza dell'autorità portuale (AP) e quindi classificati nelle tre classi di polverosità da un punto di vista qualitativo; le classi di appartenenza sono le seguenti:

Classe A: poco polverosi	Classe B: mediamente polverosi	Classe C: altamente polverosi
Sabbia	Feldspati	Clinker grigio

Lo strumento può lavorare con diverse impostazioni strumentali e nel corrente lavoro si è deciso, in coerenza con quanto contenuto nella norma tecnica 15051/06 [21], di mantenere costante il volume di campionamento (37,7 l) e di mantenere comunque costante il numero di giri del mulino a 15 giri/min. La scelta di mantenere costante anche la rotazione del mulino modificando invece il flusso dipende dalla eterogeneità dei materiali indagati; rotazioni più elevate potrebbero portare al blocco delle pale del mulino, mentre velocità di rotazione inferiori risulterebbero poco rappresentative delle movimentazioni che vengono effettuate sui materiali nella realtà produttiva del porto di Ravenna.

Al fine di uniformare la risposta strumentale a quanto contenuto nella ordinanza dell'autorità portuale e per utilizzare una metodologia di analisi che dia una risposta coerente per le diverse tipologie di materiali che potrebbero anche in futuro essere sottoposti ad analisi, prima di procedere con la sperimentazione sono state verificate le risposte strumentali a diversi flussi. Nella fattispecie sono state condotte tre prove con diversi flussi (15, 18 e 20 L/min) e, di conseguenza, diversi tempi (151, 126 e 113 secondi,

rispettivamente) per mantenere costante il volume totale di campionamento.

Ogni materiale inoltre è stato caratterizzato secondo due parametri fisici che incidono sul grado di polverosità: la densità apparente e l'umidità totale. Anche secondo la norma tecnica, questi due parametri devono sempre accompagnare il risultato delle analisi di polverosità del materiale.

Nella seconda parte sono state effettuate le analisi per definire il grado di polverosità di due materiali su cui non si hanno informazioni riportate in letteratura, con lo scopo di classificarle rispetto alle tre classi di polverosità definite dall'autorità portuale.

## 4.2. Sabbia

La sabbia è una roccia sedimentaria clastica, incoerente e derivata dalla disgregazione di rocce preesistenti. In genere è costituita da piccoli frammenti di minerali e rocce, scarsamente alterabili e di notevole durezza. Le sue dimensioni variano in base alla zona e al tipo di formazione. È abbondante sulla superficie terrestre, talora in formazioni di notevole estensione (spiagge, deserti, fondi marini). Inoltre è largamente utilizzata, a seconda della composizione, nella preparazione di malte e calcestruzzi, nell'industria metallurgica, come materia prima nell'industria vetraria e in quella della ceramica [50].



*Figura 21. Sabbia derivante da macinazione dei minerali.*

Per quanto riguarda la densità e l'umidità della sabbia i risultati sono evidenziati nelle Tabelle 7 e 8.

Tabella 7. Densità della sabbia con relativa deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Volume (ml)	35,00	35,00	35,00
Peso (g)	53,87	49,60	49,45
Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,539	1,417	1,413
<b>Densità apparente campione (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,456</b>		
<b>Dev. Stand.</b>	<b>0,072</b>		

Tabella 8. Umidità della sabbia con relativa deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Peso capsula vuota (g)	44,4858	46,1971	44,0504
Peso capsula iniziale (g)	54,4005	56,1027	54,0209
Peso capsula finale (g)	54,3868	56,0876	54,0064
Umidità (%)	0,138	0,152	0,145
<b>Umidità del campione (%)</b>	<b>0,145</b>		
<b>Dev. Stand.</b>	<b>0,007</b>		

È stata analizzata una sabbia piuttosto grossolana derivante dalla macinazione di minerali (Figura 23), come si può evincere dalla Tabella 9 che riporta le frazioni granulometriche con diametro > 2 mm, compreso tra 0,3 e 2 mm e < 0,3 mm determinate in 10 campioni da 25 g ciascuno.

Tabella 9. Frazionamento granulometrico della sabbia.

N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso iniziale campione (g)	25,2	25,05	25,22	25,04	25,21	25,23	25,04	25,02	25,09	25,14
Peso > 2 mm (g)	14,7	14,98	17,02	14,18	16,31	15,61	16,38	14,67	15,58	12,77
Peso fra 0.3 - 2 mm (g)	7,59	7,95	6,91	8,6	6,34	7,7	6,87	7,68	7,27	10,43
Peso < 0.3 mm (g)	2,7	1,9	1,17	2,09	2,45	1,82	1,67	2,47	2,06	1,75

In base alla Tabella 9 è stato costruito l'istogramma di Figura 24 che evidenzia le percentuali delle tre frazioni granulometriche.

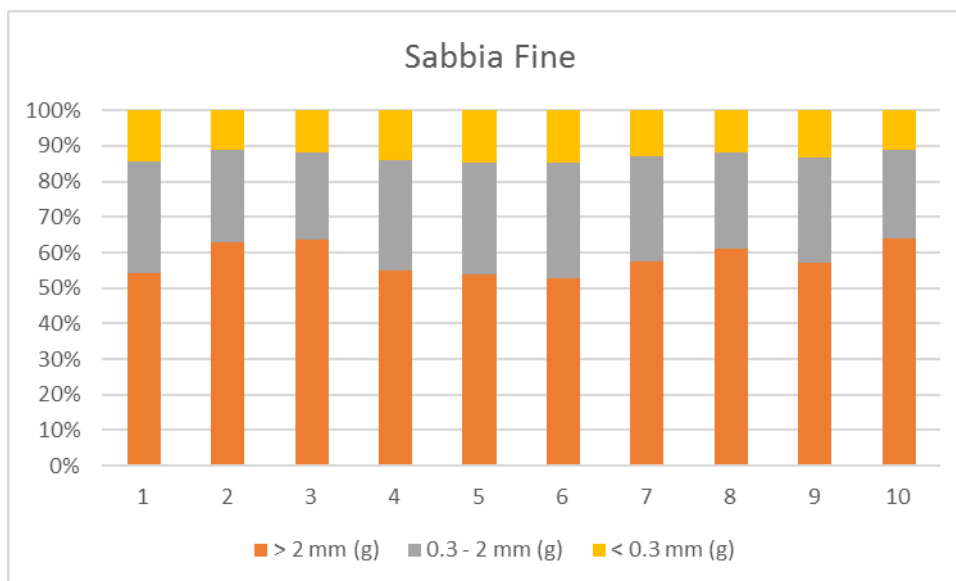


Figura 22. Istogramma delle frazioni granulometriche della sabbia.

In Tabella 10 e in Tabella 11 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini della sabbia, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 3.

Tabella 10. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie di 6 campioni di sabbia con flusso di 20 L/min con e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 – 2 mm (g)	0,00111	0,00100	0,00184	0,00179	0,00150	0,00134
ID filtro	116	117	118	119	120	121
l pesata bianco (g)	0,16300	0,16703	0,16931	0,15693	0,15893	0,15871
l pesata filtro (g)	0,16411	0,16803	0,17115	0,15872	0,16043	0,16005
peso campione 0,3-2	6,01	6,01	6,04	6,02	6,02	6,02
Polverosità 0,3-2	185	166	305	297	249	223

<b>Media Geometrica 0,3 – 2 mm</b>	<b>Dev St. Geom.</b>	<b>% dev</b>
<b>232</b>	<b>21,41</b>	<b>9,24%</b>



Tabella 11. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini di 6 campioni di sabbia con flusso di 20 L/min con e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,05149	0,03576	0,03828	0,03737	0,05283	0,04194
ID filtro	122	123	124	125	126	128
l pesata bianco (g)	0,16088	0,16444	0,16415	0,15278	0,16368	0,16627
l pesata filtro (g)	0,21237	0,20020	0,20243	0,19015	0,21651	0,20821
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,00	2,01	2,01	2,00
Polverosità < 0,3	25745	17880	19140	18592	26284	20970

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
21180	1381,20	6,52%

In Tabella 12 è riportato il valore della polverosità totale della sabbia ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 20 L/min.

Tabella 12. Polverosità totale della sabbia con flusso a 20 L/min e relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>6725</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>8,40%</b>

Nelle Tabelle 13 e 14 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini della medesima sabbia utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 4.

Tabella 13. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie della sabbia con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 – 2 mm (g)	0,00153	0,00203	0,00169	0,00179	0,00151	0,00287
ID filtro	129	130	131	132	133	134
l pesata bianco (g)	0,16358	0,16648	0,16310	0,16227	0,15893	0,15563
l pesata filtro (g)	0,16511	0,16851	0,16479	0,16406	0,16044	0,15850
peso campione 0,3-2	6,03	6,00	6,02	6,02	6,03	6,00
Polverosità 0,3-2	254	338	281	297	250	478

Media Geometrica 0,3 – 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
308	32,07	10,40%

Tabella 14. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini della sabbia con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,05063	0,03039	0,03696	0,03745	0,04224	0,03919
ID filtro	135	136	137	138	139	140
l pesata bianco (g)	0,15656	0,16462	0,15953	0,16018	0,15939	0,14962
l pesata filtro (g)	0,20719	0,19501	0,19649	0,19763	0,20163	0,18881
peso campione < 0,3	2,01	2,02	2,03	2,04	2,01	2,08
Polverosità < 0,3	25189	15045	18207	18358	21015	18841

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
<b>19204</b>	<b>1271,97</b>	<b>6,62%</b>

In Tabella 15 è riportato il valore della polverosità totale della sabbia ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 18 L/min.

Tabella 15. Polverosità totale della sabbia con flusso a 18 L/min e relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>6165</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>9,23%</b>

In Tabella 16 ed in Tabella 17 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini della sabbia, rispettivamente, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 5.

Tabella 16. Polverosità misurate nelle le frazioni granulometriche intermedie della sabbia con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 – 2 mm (g)	0,00153	0,00085	0,00094	0,00077	0,00091	0,00100
ID filtro	141	142	143	144	145	146
l pesata bianco (g)	0,16403	0,15191	0,16541	0,16123	0,15359	0,14815
l pesata filtro (g)	0,16556	0,15276	0,16635	0,16200	0,15450	0,14915
peso campione 0,3-2	6,01	6,01	6,04	6,02	6,02	6,02
Polverosità 0,3-2	255	141	156	128	151	166

Media Geometrica 0,3 – 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
<b>162</b>	<b>16,94</b>	<b>10,47%</b>

Tabella 17. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini della sabbia con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,02286	0,01491	0,02217	0,03058	0,02727	0,02488
ID filtro	147	148	149	150	151	152
l pesata bianco (g)	0,17000	0,15995	0,14971	0,15726	0,15346	0,16298
l pesata filtro (g)	0,19286	0,17486	0,17188	0,18784	0,18073	0,18786
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,00	2,01	2,01	2,00
Polverosità < 0,3	11430	7455	11085	15214	13567	12440

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
11591	987,97	8,52%

In Tabella 18 è riportato il valore della polverosità totale della sabbia ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 15 L/min.

Tabella 18. Polverosità totale della sabbia con flusso a 15 L/min con relativa deviazione standard.

Polverosità totale (mg/kg)	3704
Deviazione standard	9,86%

### 4.3. Feldspato



Figura 23. Feldspato.

I feldspati (Figura 25) sono un gruppo di minerali costituenti circa il 60% della crosta terrestre. Sono delle rocce di formazione magmatica sia intrusive che effusive. Possono essere costituiti da diversi gruppi di minerali che includono silicio, ossigeno, alluminio, sodio, calcio, bario e potassio. Nella struttura chimica di questa roccia il silicio si trova al centro di tetraedri con atomi di ossigeno ai vertici. Il rilascio di silicio sotto forma di polvere

può provocare un'afezione polmonare detta silicosi (vedere Capitolo I). Per questo motivo è molto importante monitorare e controllare il rilascio della frazione di polvere respirabile del silicio cristallino [51]. Le applicazioni che prevedono l'utilizzo di feldspato sono molteplici, importante annoverare la lavorazione per la produzione di ceramica e di vetro.

Per quanto riguarda la densità e l'umidità del feldspato i risultati sono evidenziati nelle Tabelle 19 e 20.

*Tabella 19. Densità del feldspato con relativa deviazione standard.*

N° aliquota	1	2	3
Volume (ml)	35,00	35,00	35,00
Peso (g)	34,44	34,84	35,63
Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,984	0,995	1,018

Densità apparente campione (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0,999</b>
Dev. Stand.	<b>0,017</b>

*Tabella 20. Umidità del feldspato con relativa deviazione standard.*

N° aliquota	1	2	3
Peso capsula vuota (g)	41,9000	61,0132	66,2755
Peso capsula iniziale (g)	51,6680	70,7245	76,0336
Peso capsula finale (g)	51,6660	70,7201	76,0305
Umidità (%)	0,020	0,045	0,032

Umidità del campione (%)	<b>0,033</b>
Dev. Stand.	<b>0,012</b>

Il feldspato analizzato nella presente sperimentazione ha mostrato una frazione fine particolarmente significativa (Tabella 21) presente in tutte le 10 aliquote da 25 g con una percentuale di circa il 50% (Figura 26).

*Tabella 21. Frazionamento granulometrico del feldspato.*

N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso iniziale campione (g)	25,04	25,00	25,01	25,02	25,00	25,01	25,00	25,01	25,02	25,01
Peso > 2 mm (g)	5,79	7,53	7,28	5,38	6,12	6,21	7,21	4,97	4,67	5,97
Peso fra 0.3 - 2 mm (g)	5,34	4,74	5,15	6,15	5,70	5,71	5,10	5,59	5,47	5,12
Peso < 0.3 mm (g)	12,85	12,04	11,83	12,48	12,26	12,30	12,09	13,72	14,31	13,52

Nell'istogramma di Figura 26 sono riportati i valori percentuali delle varie frazioni granulometriche del feldspato.

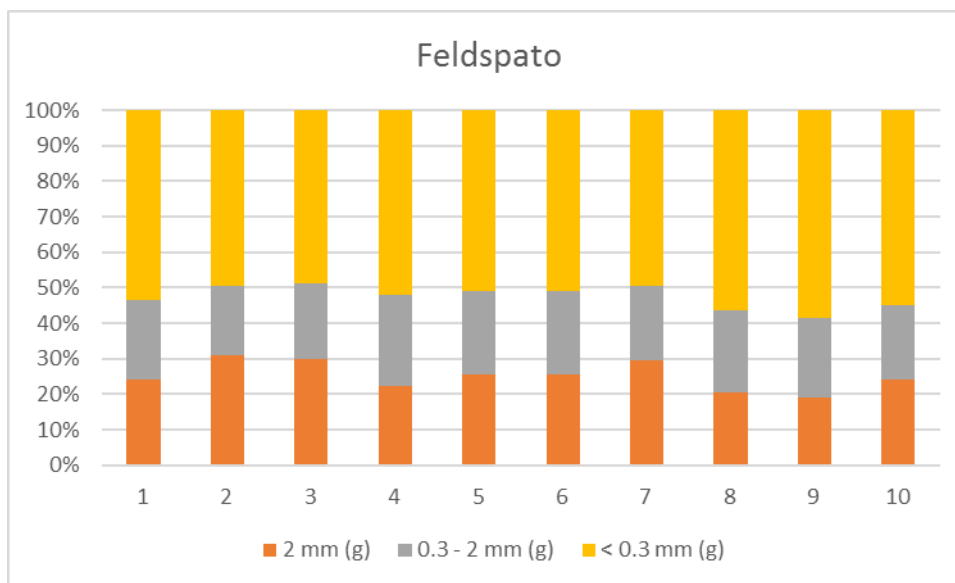


Figura 24. Frazioni granulometriche percentuali del feldspato analizzato.

Le Tabelle 22 e 23 sono riportano le polverosità misurate per le frazioni granulometriche intermedie e fini del feldspato, rispettivamente, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 3.

Tabella 22. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del feldspato con flusso di 20 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm										
N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso 0.3 - 2 mm (g)	0,01468	0,02009	0,02169	0,01335	0,01971	0,02639	0,01777	0,02430	0,01935	0,01894
ID filtro	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
I pesata bianco (g)	0,14252	0,14325	0,13524	0,13480	0,13469	0,13570	0,14282	0,13852	0,12971	0,12887
II pesata bianco (g)	0,14252	0,14325	0,13534	0,13481	0,13478	0,13577	0,14290	0,13861	0,12980	0,12898
I pesata filtro (g)	0,15720	0,16334	0,15698	0,14815	0,15444	0,16212	0,16063	0,16286	0,14910	0,14786
peso campione 0,3-2	6,00	6,00	6,00	6,02	6,03	6,01	6,04	6,04	6,01	6,00
Polverosità 0,3-2	2447	3348	3615	2217	3268	4390	2942	4022	3219	3156

Media Geometrica 0,3 - 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
3202	197,29	6,16%

Tabella 23. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del feldspato con flusso di 20 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm										
N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso < 0.3 mm (g)	0,01597	0,02140	0,02865	0,02589	0,02252	0,04414	0,02441	0,03705	0,04636	0,04750
ID filtro	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
I pesata bianco (g)	0,13549	0,14546	0,13933	0,14434	0,13795	0,13574	0,13755	0,14311	0,13991	0,13880
II pesata bianco (g)	0,13554	0,14548	0,13935	0,14436	0,13795	0,13576	0,13754	0,14315	0,13988	0,13880
I pesata filtro (g)	0,15148	0,16687	0,16799	0,17024	0,16047	0,17989	0,16195	0,18018	0,18625	0,18630
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,01	2,00	2,00
Polverosità < 0,3	7983	10700	14325	12945	11260	22070	12203	18433	23178	23750

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
14750	1742,08	11,81%

In Tabella 24 è riportato il valore della polverosità totale del feldspato ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 20 L/min.

Tabella 24. Polverosità totale del feldspato con flusso di 20 L/min con relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>11309</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>10,13%</b>

Nelle Tabelle 25 e 26 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini del feldspato, rispettivamente, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 4.

Tabella 25. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del feldspato con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm				
N° aliquota	1	2	3	4
Peso 0.3 – 2 mm (g)	0,02258	0,02754	0,01649	0,02113
ID filtro	76	77	78	79
I pesata bianco (g)	0,14147	0,1416	0,14336	0,14281
II pesata bianco (g)	0,14138	0,14157	0,14332	0,14277
I pesata filtro (g)	0,16400	0,16912	0,15983	0,16392
peso campione 0,3-2	6,00	6,00	6,00	6,00
Polverosità 0,3-2	3763	4589	2748	3522

Media Geometrica 0,3 – 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
3595	329,62	9,17%

Tabella 26. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del feldspato con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm					
N° aliquota	1	2	3	4	5
Peso < 0.3 mm (g)	0,01975	0,01984	0,01391	0,02068	0,02732
ID filtro	71	72	73	74	75
I pesata bianco (g)	0,13692	0,13760	0,14389	0,14081	0,13770
II pesata bianco (g)	0,13699	0,13761	0,14393	0,14086	0,13774
I pesata filtro (g)	0,15670	0,15744	0,15782	0,16151	0,16504
peso campione < 0,3	2,00	2,03	2,00	2,00	2,00
Polverosità < 0,3	9873	9771	6955	10338	13660

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
9892	959,92	9,70%

In Tabella 27 è riportato il valore della polverosità totale del feldspato ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 18 L/min.

Tabella 27. Polverosità totale del feldspato con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità totale (mg/kg)	8016
Deviazione standard	9,54%

Nelle Tabelle 28 e 29 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini del feldspato, rispettivamente, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 5.

Tabella 28. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del feldspato con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 – 2 mm (g)	0,01056	0,01034	0,00997	0,01264	0,01637	0,01824
ID filtro	65	66	67	68	69	70
I pesata bianco (g)	0,13113	0,13307	0,14330	0,13593	0,13580	0,13958
II pesata bianco (g)	0,13119	0,13311	0,14337	0,13599	0,13585	0,13963
I pesata filtro (g)	0,14172	0,14343	0,15330	0,14860	0,15219	0,15784
peso campione 0,3-2	6,00	6,01	6,01	6,01	6,01	6,01
Polverosità 0,3-2	1760	1720	1658	2103	2723	3034

Media Geometrica 0,3 – 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
2106	218,01	10,35%

Tabella 29. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del feldspato con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,02087	0,02572	0,01345	0,01550	0,02653	0,01908
ID filtro	59	60	61	62	63	64
I pesata bianco (g)	0,13361	0,14231	0,13662	0,13247	0,12962	0,13229
II pesata bianco (g)	0,13369	0,14239	0,13670	0,13257	0,12970	0,13236
I pesata filtro (g)	0,15452	0,16807	0,15011	0,14802	0,15619	0,15140
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,00	2,00	2,02	2,00
Polverosità < 0,3	10435	12860	6725	7750	13134	9538

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
9782	981,33	10,03%

In Tabella 30 è riportato il valore della polverosità totale del feldspato ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 15 L/min.

Tabella 30. Polverosità totale del feldspato con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>7495</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>10,13%</b>

#### 4.4. Clinker grigio

Il clinker (o klinker) è un materiale di origine ceramica (Figura 27) ottenuto da lavorazioni ad alte temperature di una miscela controllata di materie prime naturali composte da ossidi di calcio, di silicio, di alluminio e di ferro e quantità minimali di altri elementi. Inoltre è un materiale solido inorganico granulare, grigio scuro o bianco. Il clinker è usato per la produzione dei cementi comuni o di altri leganti idraulici nelle installazioni industriali [52].

Il clinker, se inalato, può provocare una grave forma di irritazione del sistema respiratorio. Inoltre, quando la polvere di clinker diventa umida forma una soluzione fortemente alcalina che può provocare irritazione della pelle e degli occhi attraverso il contatto. Infine sono stati riscontrati anche rari casi di forme allergiche a causa della presenza del Cromo VI nella sua struttura molecolare.





Figura 25. Clinker grigio.

Per quanto riguarda la densità e l'umidità del clinker grigio, i risultati sono evidenziati nelle Tabelle 31 e 32.

Tabella 31. Misure di densità del clinker grigio e deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Volume (ml)	35,00	35,00	35,00
Peso (g)	58,64	58,95	59,61
Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,675	1,684	1,703

Densità apparente campione (g/cm <sup>3</sup> )	1,688
Dev. Stand.	0,014

Tabella 32. Umidità del clinker grigio con relativa deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Peso capsula vuota (g)	41,8943	61,0136	66,2747
Peso capsula iniziale (g)	51,8882	71,0620	76,3493
Peso capsula finale (g)	51,8805	71,0534	76,3403
Umidità (%)	0,077	0,086	0,089

Umidità del campione (%)	0,084
Dev. Stand.	0,006

Il frazionamento del clinker grigio ha evidenziato che la frazione > 2 mm è presente in quantità significativa; la frazioni intermedia (0,3-2 mm) e la frazione fine (< 0,3 mm) hanno, invece, masse circa uguali. In Tabella 33 sono visibili i risultati del frazionamento.

Tabella 33. Frazionamento granulometrico del clinker grigio.

N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso iniziale campione (g)	25,50	25,12	25,26	25,11	25,09	25,25	25,36	25,14	25,09	25,25
Peso > 2 mm (g)	12,86	12,64	16,09	14,65	14,18	12,68	14,15	13,97	13,67	14,31
Peso fra 0.3 - 2 mm (g)	6,91	6,79	5,28	5,61	6,22	6,66	6,83	6,04	6,16	6,16
Peso < 0.3 mm (g)	5,55	5,57	3,82	4,77	4,58	5,84	4,37	5,07	5,19	4,74

Nell'istogramma di Figura 28 sono riportati i valori percentuali delle varie frazioni di clinker grigio.

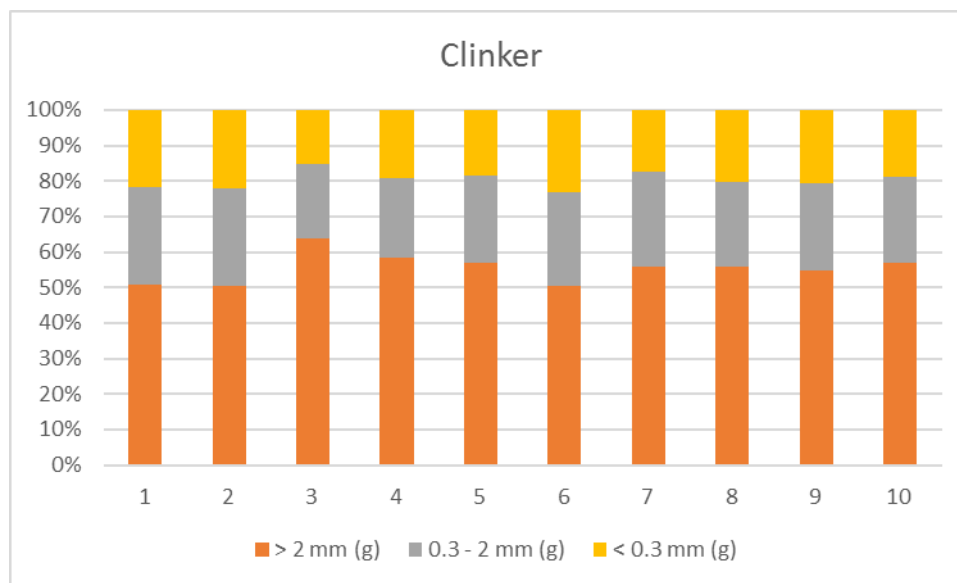


Figura 26. Frazioni granulometriche del clinker grigio.

Nelle Tabelle 34 e 35 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini, rispettivamente, del clinker grigio, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 3.

Tabella 34. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del clinker grigio con flusso di 20 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 - 2 mm (g)	0,00057	0,00145	0,00143	0,00137	0,00146	0,00209
ID filtro	80	81	82	83	84	85
l pesata bianco (g)	0,14029	0,13739	0,13846	0,14294	0,14346	0,13918
Il pesata bianco (g)	0,14026	0,13736	0,13844	0,14293	0,14341	0,13915
l pesata filtro (g)	0,14084	0,13883	0,13988	0,14430	0,14490	0,14125
peso campione 0,3-2	6,00	6,01	6,02	6,00	6,00	6,05
Polverosità 0,3-2	94	242	238	228	244	345

<b>Media Geometrica 0,3 – 2 mm</b>	<b>Dev St. Geom.</b>	<b>% dev</b>
<b>217</b>	<b>18,25</b>	<b>8,42%</b>

Tabella 35. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del clinker grigio con flusso di 20 L/min con relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,05428	0,04945	0,08297	0,06722	0,07344	0,03897
ID filtro	86	87	88	89	90	91
I pesata bianco (g)	0,14060	0,14474	0,14103	0,14187	0,13834	0,14136
II pesata bianco (g)	0,14056	0,14470	0,14097	0,14179	0,13827	0,14133
I pesata filtro (g)	0,19486	0,19417	0,22397	0,20905	0,21174	0,18031
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,00	2,00	2,01	2,01
Polverosità < 0,3	27140	24725	41485	33610	36535	19386

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
29527	1844,95	6,25%

In Tabella 36 è riportato il valore della polverosità totale del clinker grigio ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 20 L/min.

Tabella 36. Polverosità totale del clinker grigio con flusso a 20 L/min con relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>13153</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>7,46%</b>

Nelle Tabelle 37 e 38 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini, rispettivamente, del clinker grigio, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 4.

Tabella 37. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del clinker grigio con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 - 2 mm (g)	0,00047	0,00087	0,00076	0,00089	0,00099	0,00128
ID filtro	92	93	94	95	96	97
I pesata bianco (g)	0,13590	0,14163	0,14471	0,13966	0,13826	0,14468
II pesata bianco (g)	0,13586	0,14155	0,14463	0,13963	0,13822	0,14462
I pesata filtro (g)	0,13635	0,14246	0,14543	0,14054	0,13923	0,14593
peso campione 0,3-2	6,02	6,02	6,01	6,01	6,00	6,01
Polverosità 0,3-2	78	145	126	149	165	213

Media Geometrica 0,3 - 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
140	10,04	7,18%

Tabella 38. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del clinker grigio con flusso di 18 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,06660	0,04078	0,04535	0,03948	0,04561	0,04872
ID filtro	98	99	100	101	102	103
I pesata bianco (g)	0,14145	0,13843	0,14337	0,14281	0,13819	0,13470
II pesata bianco (g)	0,14142	0,13838	0,14333	0,14287	0,13819	0,13472
I pesata filtro (g)	0,20803	0,17918	0,18870	0,18232	0,18380	0,18343
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,01	2,00	2,03	2,03
Polverosità < 0,3	33298	20388	22562	19740	22468	24000

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
<b>23373</b>	<b>1106,70</b>	<b>4,73%</b>

In Tabella 39 è riportato il valore della polverosità totale del clinker grigio ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 18 L/min.

Tabella 39. Polverosità totale del clinker grigio con flusso a 18 L/min e relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>10394</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>6,10%</b>

Nelle Tabelle 40 e 41 sono riportate le determinazioni della polverosità per le frazioni granulometriche intermedie e fini, rispettivamente, del clinker grigio, utilizzando le impostazioni strumentali riportate in Tabella 5.

Tabella 40. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del clinker grigio con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso 0.3 – 2 mm (g)	0,00207	0,00112	0,00090	0,00141	0,00168	0,00135
ID filtro	104	105	106	107	108	109
I pesata bianco (g)	0,14595	0,13236	0,13872	0,13973	0,15864	0,16924
I pesata filtro (g)	0,14802	0,13348	0,13962	0,14114	0,16032	0,17059
peso campione 0,3-2	6,01	6,13	6,00	6,00	6,00	6,00
Polverosità 0,3-2	344	183	150	235	280	225

Media Geometrica 0,3 – 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
<b>228</b>	<b>15,64</b>	<b>6,87%</b>

Tabella 41. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del clinker grigio con flusso di 15 L/min e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm						
N° aliquota	1	2	3	4	5	6
Peso < 0.3 mm (g)	0,02021	0,02323	0,04249	0,02642	0,01830	0,02002
ID filtro	110	111	112	113	114	115
l pesata bianco (g)	0,16596	0,16578	0,15898	0,15955	0,15585	0,15955
l pesata filtro (g)	0,18617	0,18901	0,20147	0,18597	0,17415	0,17957
peso campione < 0,3	2,01	2,00	2,01	2,00	2,03	2,03
Polverosità < 0,3	10055	11615	21139	13210	9015	9862

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
<b>11941</b>	<b>1013,74</b>	<b>8,49%</b>

In Tabella 42 è riportato il valore della polverosità totale del clinker grigio ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni con flusso di 15 L/min.

Tabella 42. Polverosità totale del clinker grigio con flusso a 15 L/min e relativa deviazione standard.

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>5398</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>7,58%</b>

#### 4.5. Discussione dei risultati ottenuti nella prima parte di lavoro

Per quanto concerne l'analisi effettuata sui primi tre materiali di prova (sabbia, feldspato e clinker grigio) con lo strumento Dustmeter Type III, i risultati hanno evidenziato che cambiando il flusso e il tempo di analisi, pur mantenendo il loro prodotto costante, la polverosità totale misurata per il materiale cambia notevolmente. Nei grafici delle Figure 29, 30 e 31 sono rappresentati i tre risultati ottenuti per le tre diverse portate di 15, 18 e 20 litri/min. Si può notare che la polverosità totale misurata diminuisce al diminuire del flusso per tutti e tre i materiali.

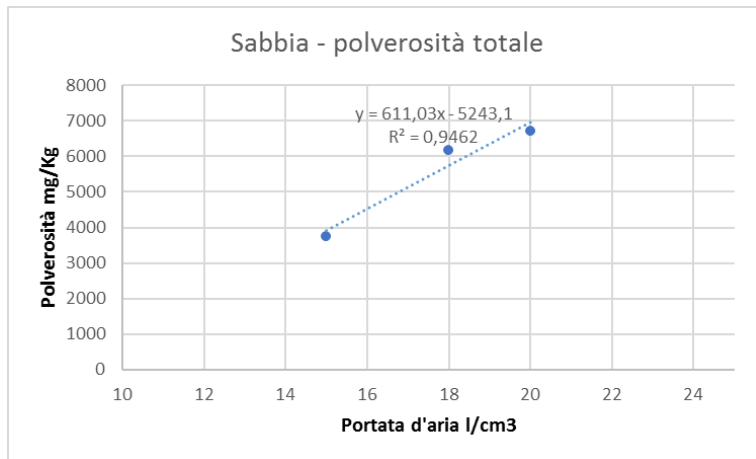


Figura 27. Polverosità totale misurata per la sabbia con le tre impostazioni strumentali.

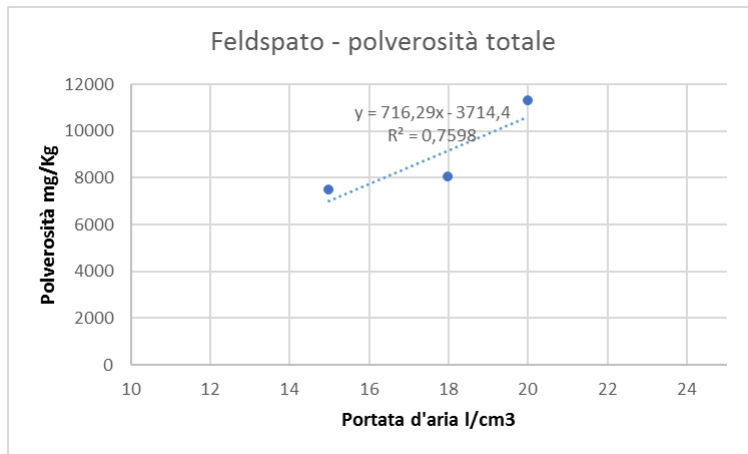


Figura 28. Polverosità totale misurata per il feldspato con le tre impostazioni strumentali.

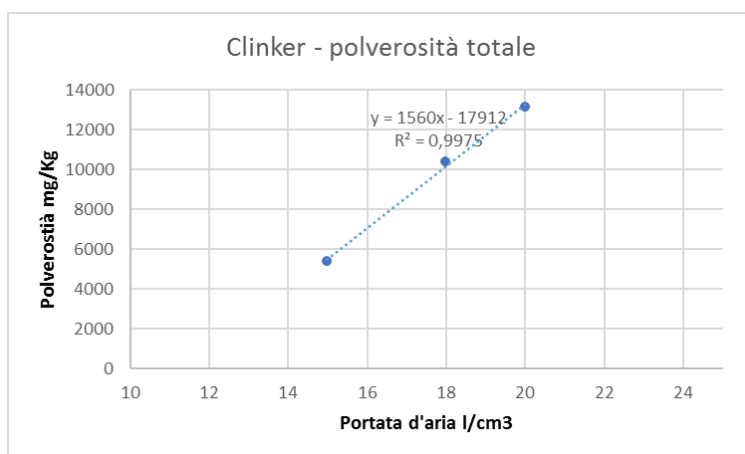


Figura 29. Polverosità totale misurata per il clinker grigio con le tre impostazioni strumentali.

In base a questi risultati si è deciso infine di utilizzare il flusso di 20 litri/min per le analisi successive, poiché risulta essere il flusso più coerente con la classificazione effettuata dall'ordinanza dell'autorità portuale n. 4/08 [2].

Infine, i valori di polverosità ottenuti per i vari materiali con un flusso di 20 L/min indicano che:

- la sabbia ha una polverosità totale pari a  $6725 \pm 8\%$  mg/Kg;
- il feldspato ha una polverosità totale pari a  $11309 \pm 10\%$  mg/Kg;
- il clinker grigio ha una polverosità totale pari a  $13153 \pm 7\%$  mg/Kg.

Quindi, la sabbia derivante da macinazione di materiali minerali rientra nei materiali classificati come mediamente polverosi, mentre secondo la catalogazione dell'autorità portuale è catalogata come materiale poco polveroso. Si può ipotizzare che la sabbia campionata in questo lavoro sia differente da quella su cui era stata fatta la valutazione qualitativa dell'autorità portuale. Quindi è utile ricordare che la polverosità è una proprietà intrinseca di ciascun materiale specifico e dipende dalle sue caratteristiche fisico/chimiche.

Per quanto riguarda il valore ottenuto per la polverosità del feldspato, considerando la sua deviazione standard, risulta trovarsi nella zona di soglia tra media ed alta polverosità. Come spiegato nel paragrafo 3.8.12. Il feldspato è considerato un materiale a media polverosità. In questo caso il risultato risulta essere confrontabile con la classificazione definita dalla stessa ordinanza n. 4/08 [2].

Infine, per quanto riguarda il valore di polverosità totale del clinker grigio, anch'esso si trova nella zona di soglia tra media ed alta polverosità. Come spiegato nel paragrafo 3.8.12., anche in questo caso il materiale è considerato a media polverosità. Anche in questo caso la presente classificazione si discosta da quella (alta polverosità) prevista nell'ordinanza n. 4/08 [2].

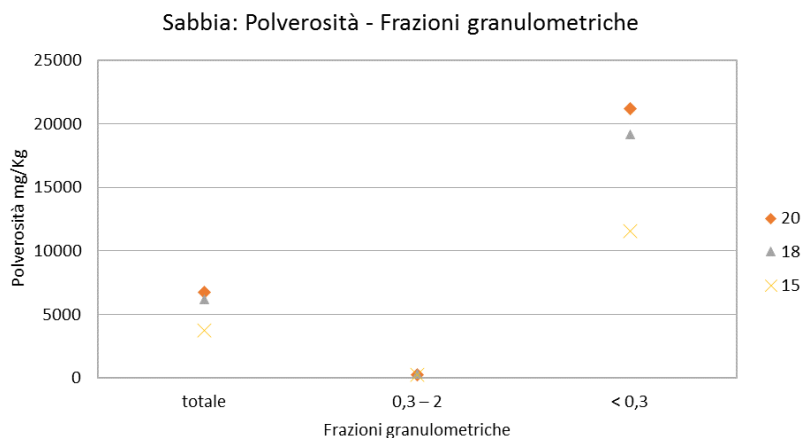


Figura 30. Polverosità totale e delle due frazioni granulometriche della sabbia.

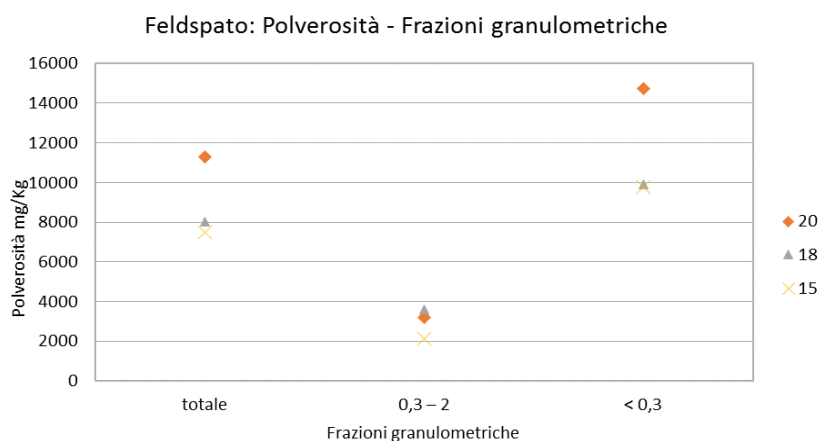


Figura 31. Polverosità totale e delle due frazioni granulometriche del feldspato.

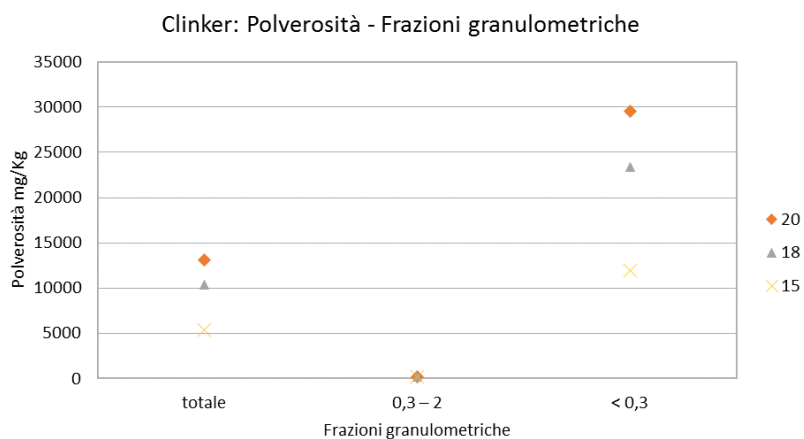


Figura 32. Polverosità totale e delle due frazioni granulometriche del clinker grigio.



Nei grafici delle Figure 32, 33 e 34 è rappresentata la polverosità totale, la polverosità per la frazione da 0,3-2 mm e la polverosità per la frazione < 0,3 mm per tutti e tre i materiali. Si può notare come la variabilità della polverosità totale dipenda in tutti i casi dalla variabilità della polverosità della frazione fine, mentre la polverosità della frazione intermedia cambiando risente poco del flusso d'aria.

#### 4.6. Cloruro di potassio

Il cloruro di potassio KCl (Figura 35) è il sale di potassio dell'acido cloridrico. A temperatura ambiente si presenta come una polvere bianca cristallina. È impiegato come fertilizzante e come materia prima per la produzione di potassio metallico e idrossido di potassio [53].

Dai dati a disposizione è noto che la sua pericolosità si presenta solo per ingestione di elevate quantità che provocano aritmie e blocchi cardiovascolari; pertanto non è considerato in generale un materiale tossico.



Figura 33. Cloruro di potassio.

Per quanto riguarda la densità e l'umidità del cloruro di potassio, i risultati sono riportati nelle Tabelle 43 e 44.

Tabella 43. Misure di densità del cloruro di potassio e deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Volume (ml)	35,00	35,00	35,00
Peso (g)	40,74	39,53	40,81
Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,164	1,129	1,166

<b>Densità apparente campione (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,153</b>
<b>Dev. Stand.</b>	<b>0,021</b>

*Tabella 44. Umidità del cloruro di potassio e relativa deviazione standard.*

<b>N° aliquota</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso capsula vuota (g)</b>	64,3283	46,1966	44,0497
<b>Peso capsula iniziale (g)</b>	74,3346	56,2589	53,9818
<b>Peso capsula finale (g)</b>	74,3166	56,2333	53,9572
<b>Umidità (%)</b>	0,180	0,254	0,248

<b>Umidità del campione (%)</b>	<b>0,227</b>
<b>Dev. Stand.</b>	<b>0,041</b>

Il frazionamento di questo materiale ha evidenziato che la frazione > 2 mm è pressoché assente e che le frazioni intermedia (0,3-2 mm) e fine (< 0,3 mm) hanno masse circa uguali. In Tabella 10 sono riportati i pesi delle varie frazioni ottenute dalle 10 aliquote da 25 grammi di campione, ciascuna poi setacciata e pesata.

*Tabella 45. Frazionamento granulometrico del cloruro di potassio.*

<b>N° aliquota</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Peso iniziale campione (g)</b>	25,07	25,00	25,02	25,03	25,03	25,11	25,12	25,25	25,22	25,23
<b>Peso &gt; 2 mm (g)</b>	0,14	0,11	0,30	0,11	0,20	0,16	0,12	0,25	0,56	0,20
<b>Peso fra 0.3 - 2 mm (g)</b>	14,05	14,81	14,9	14,89	14,15	14,69	14,23	15,28	14,89	14,93
<b>Peso &lt; 0.3 mm (g)</b>	10,47	9,90	9,72	10,12	10,34	10,30	10,77	10,03	9,78	9,95

Nell'istogramma di Figura 36 sono riportati i valori percentuali delle varie frazioni del cloruro di potassio.

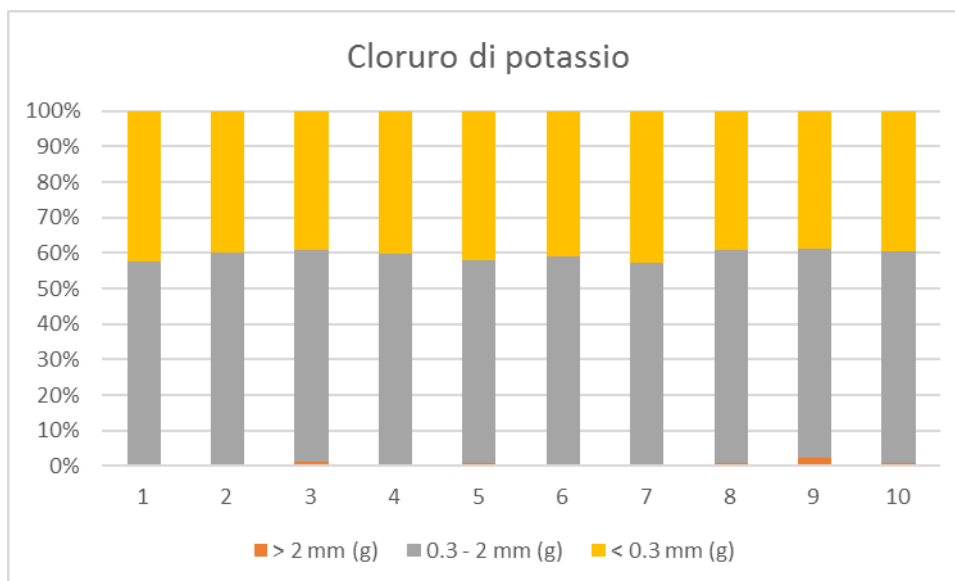


Figura 34. Frazioni granulometriche del cloruro di potassio.

I risultati ricavati dall'analisi per la determinazione del grado di polverosità della frazione intermedia (0,3-2 mm) e di quella fine (< 0,3 mm) del cloruro di potassio sono riportati nelle Tabelle 46 e 47.

Tabella 46. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie del cloruro di potassio e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm										
N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso 0.3 - 2 mm (g)	0,00274	0,00309	0,00222	0,00295	0,00627	0,00337	0,00268	0,00301	0,00375	0,00286
ID filtro	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162
I pesata bianco (g)	0,15346	0,15302	0,16029	0,15898	0,15856	0,15856	0,15981	0,15531	0,16022	0,16131
I pesata filtro (g)	0,15620	0,15606	0,16246	0,16175	0,16475	0,16189	0,16247	0,15833	0,16388	0,16411
II pesata filtro (g)	0,15620	0,15616	0,16256	0,16211	0,16491	0,16197	0,16251	0,15831	0,16406	0,16422
peso campione 0,3-2	6,02	6,06	6,12	6,01	6,03	6,03	6,01	6,04	6,00	6,01
Polverosità 0,3-2	455	510	363	491	1040	559	446	498	625	475

Media Geometrica 0,3 - 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
<b>525</b>	<b>56,42</b>	<b>10,75%</b>

Tabella 47: Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini del cloruro di potassio e relativa deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm										
N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso < 0.3 mm (g)	0,03145	0,03629	0,03099	0,03306	0,02861	0,02755	0,03158	0,02634	0,01807	0,02550
ID filtro	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172
I pesata bianco (g)	0,15018	0,16325	0,15397	0,15518	0,16225	0,15189	0,16052	0,16150	0,15886	0,15316
I pesata filtro (g)	0,18159	0,19953	0,18507	0,18839	0,19083	0,17953	0,19226	0,18782	0,17691	0,17868
II pesata filtro (g)	0,18166	0,19954	0,18485	0,18808	0,19089	0,17934	0,19194	0,18785	0,17694	0,17864
peso campione < 0,3	2,00	2,01	2,01	2,00	2,00	2,04	2,01	2,11	2,03	2,02
Polverosità < 0,3	15723	18052	15418	16528	14305	13502	15711	12481	8899	12624

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
14087	779,67	5,53%

Infine, la polverosità totale e la sua deviazione standard sono riportate in Tabella 48.

*Tabella 48. Polverosità totale del cloruro di potassio e deviazione standard.*

<b>Polverosità totale (mg/kg)</b>	<b>6065</b>
<b>Deviazione standard</b>	<b>8,62%</b>

#### 4.7. Sepiolite

La sepiolite (Figura 37) è un minerale granulare appartenente al gruppo delle argille ed ha un alto potere assorbente; infatti, trova largo impiego come sgrassante, riuscendo ad attrarre e trattenere l'unto di macchie di olio e burro.

La sepiolite è pressoché innocua in quanto non sono necessarie precauzioni per l'uso; in accordo, è chimicamente inerte, non è né corrosiva né ossidante. È inodore per via della sua forte capacità di ritenzione degli odori e non è abrasiva per l'assenza di quarzo nella propria composizione e per il tipo di struttura. Infine, ha un'alta resistenza meccanica ed anche sotto forte pressione mantiene la sua forma granulare [54].



*Figura 35. Sepiolite.*

Per quanto riguarda la densità e l'umidità della sepiolite, i risultati sono riportati nelle Tabella 49 e 50.

Tabella 49. Misure di densità della sepiolite e deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Volume (ml)	35,00	35,00	35,00
Peso (g)	32,43	33,63	33,76
Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,927	0,961	0,965
<b>Densità apparente campione (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>0,951</b>		
<b>Dev. Stand.</b>	<b>0,021</b>		

Tabella 50. Umidità della sepiolite e deviazione standard.

N° aliquota	1	2	3
Peso capsula vuota (g)	65,0025	44,4860	44,1259
Peso capsula iniziale (g)	75,0214	54,4534	54,2081
Peso capsula finale (g)	74,3851	53,8365	53,5583
Umidità (%)	6,351	6,189	6,445
<b>Umidità del campione (%)</b>	<b>6,328</b>		
<b>Dev. Stand.</b>	<b>0,129</b>		

Il frazionamento della sepiolite, come mostrato in Tabella 15, ha evidenziato un'elevata quantità di particelle grossolane (> 2 mm). In Tabella 51 sono riportati i pesi delle varie frazioni ottenute dalle 10 aliquote da 25 grammi di campione, ciascuna poi setacciata e pesata.

Tabella 51. Frazionamento granulometrico della sepiolite.

N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso iniziale campione (g)	25,20	25,05	25,22	25,04	25,21	25,23	25,04	25,02	25,09	25,14
Peso > 2 mm (g)	14,70	14,98	17,02	14,18	16,31	15,61	16,38	14,67	15,58	12,77
Peso fra 0.3 - 2 mm (g)	7,59	7,95	6,91	8,60	6,34	7,70	6,87	7,68	7,27	10,43
Peso < 0.3 mm (g)	2,70	1,90	1,17	2,09	2,45	1,82	1,67	2,47	2,06	1,75

Nell'istogramma di Figura 38 sono riportati i valori percentuali delle varie frazioni della sepiolite.

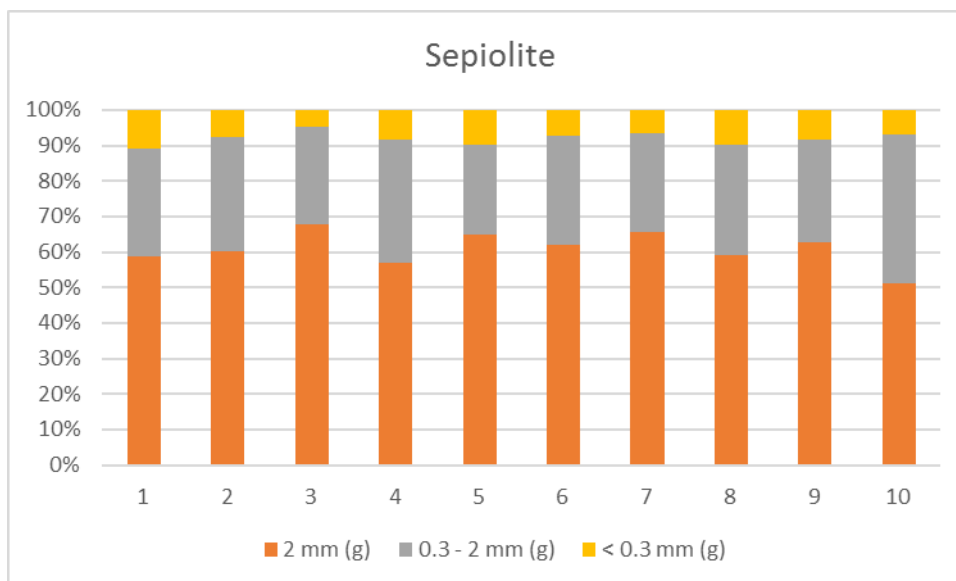


Figura 36. Frazioni granulometriche della sepiolite.

I risultati ricavati dall'analisi per la determinazione del grado di polverosità della frazione intermedia (0,3-2 mm) e di quella fine (< 0,3 mm) della sepiolite sono riportati nelle Tabelle 52 e 53.

Tabella 52. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche intermedie della sepiolite e deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria fra 0.3 - 2 mm										
N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso 0.3 - 2 mm (g)	0,00122	0,00139	0,00104	0,00139	0,00237	0,00181	0,00242	0,00136	0,00104	0,00201
ID filtro	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
I pesata bianco (g)	0,16186	0,15228	0,16163	0,16436	0,16169	0,15197	0,15728	0,16371	0,16700	0,15642
I pesata filtro (g)	0,16306	0,15372	0,16267	0,16573	0,16403	0,15376	0,15969	0,16504	0,16804	0,15839
II pesata filtro (g)	0,16310	0,15362	0,16266	0,16578	0,16408	0,15380	0,15971	0,16510	0,16805	0,15847
peso campione 0,3-2	6,00	6,03	6,01	6,00	6,10	6,00	6,02	6,00	6,14	6,01
Polverosità 0,3-2	203	231	172	232	388	302	402	227	170	334

Media Geometrica 0,3 – 2 mm	Dev St. Geom.	% dev
254	25,78	10,13%

Tabella 53. Polverosità misurate nelle frazioni granulometriche fini della sepiolite e deviazione standard.

Polverosità aliquota con granulometria < 0.3 mm										
N° aliquota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Peso < 0.3 mm (g)	0,01844	0,02643	0,02409	0,01551	0,01332	0,02928	0,01455	0,02002	0,02499	0,01300
ID filtro	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192
I pesata bianco (g)	0,15662	0,15389	0,16002	0,16299	0,15644	0,16758	0,17427	0,16592	0,15613	0,16886
I pesata filtro (g)	0,17497	0,18032	0,18412	0,17855	0,16973	0,19682	0,18889	0,18595	0,18106	0,18196
II pesata filtro (g)	0,17515	0,18032	0,18410	0,17845	0,16979	0,19689	0,18874	0,18593	0,18117	0,18175
peso campione < 0,3	2,00	2,00	2,05	2,01	2,06	2,01	2,00	2,01	2,01	2,04
Polverosità < 0,3	9220	13215	11751	7716	6466	14565	7273	9960	12430	6370

Media Geometrica < 0,3 mm	Dev St. Geom.	% dev
9497	897,59	9,45%

In Tabella 54 è riportato il valore della polverosità totale della sepiolite ricavato dalla media pesata delle polverosità delle due frazioni.

Tabella 54. Polverosità totale della sepiolite e deviazione standard.

Polverosità totale (mg/kg)	2159
Deviazione standard	9,99%

#### 4.8. Discussione dei risultati ottenuti nella seconda parte di lavoro

L'analisi sui materiali cloruro di potassio e sepiolite ha portato alla valutazione delle seguenti polverosità totali:

- 6065 ± 9% per il cloruro di potassio;
- 2159 ± 10% per la sepiolite.

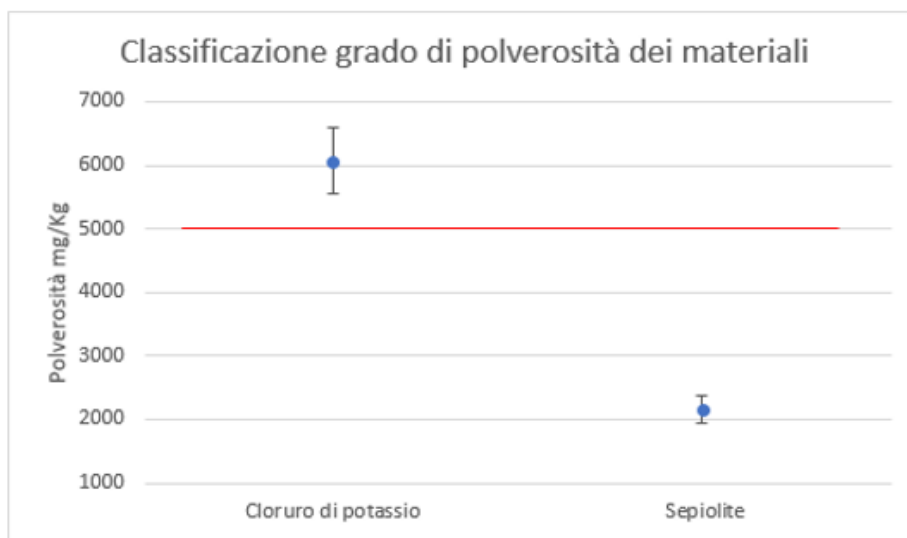


Figura 37. Classificazione del grado di polverosità del cloruro di potassio e della sepiolite.

Nel Grafico di Figura 39 si può vedere che il cloruro di potassio è classificato come materiale a media polverosità, mentre la sepiolite è classificata come materiale a bassa polverosità.

## 4.9. Analisi di insieme

In questo paragrafo viene presentato un confronto generale tra tutti i materiali analizzati durante il lavoro di tesi. I materiali sono stati comparati secondo differenti aspetti, quali:

- Il frazionamento granulometrico;
- La classe di polverosità;
- Le percentuali di polvere emessa dal campione.

### 4.9.1. Frazionamento granulometrico

Per quanto riguarda il frazionamento granulometrico, in Figura 40 sono riportate le percentuali, rispetto ai campioni analizzati dei 5 materiali, delle 3 frazioni ottenute tramite setacciamento.

Ogni istogramma rappresenta la media delle 10 prove eseguite per ogni materiale, riportate nelle figure 21, 23, 25, 33, 35, in cui ogni istogramma rappresenta una singola prova nel quale viene presa un'aliquota da 25 g di materiale, che in seguito viene setacciato e distinto nelle tre frazioni granulometriche con diametro: > 2 mm, 0,3 – 2 mm, < 0,3 mm. Ogni frazione è stata poi pesata separatamente.

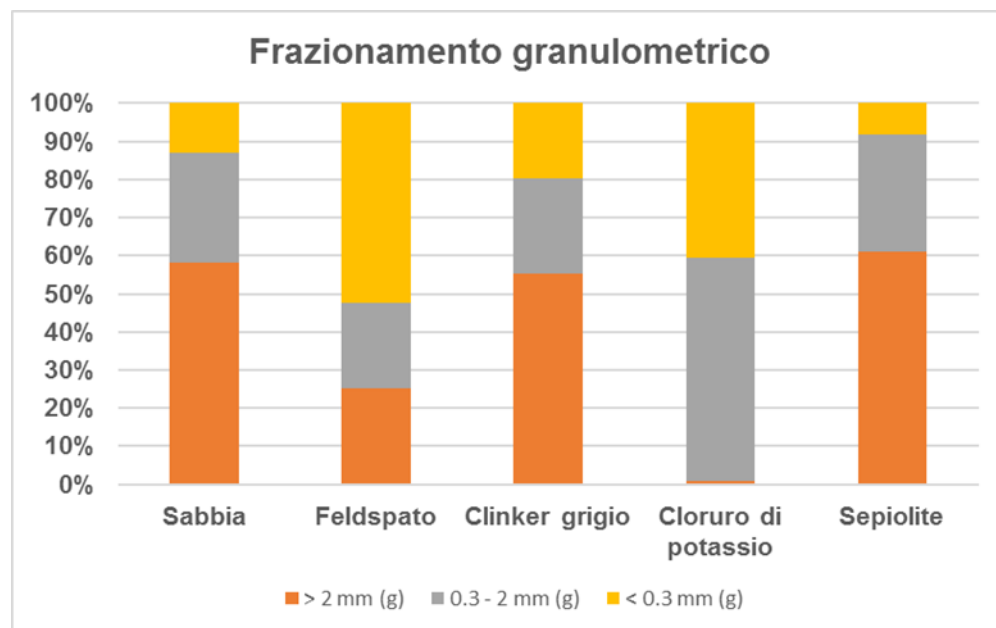


Figura 38. Istogramma frazioni granulometriche dei cinque materiali analizzati.

Dal grafico risulta evidente che i materiali analizzati sono molto diversi fra loro, ad eccezione di sabbia e sepiolite, che hanno distribuzioni molto simili. La sabbia risulta essere piuttosto grossolana con una frazione > 2 mm poco al di sotto del 60% del totale. la sepiolite ha una percentuale di particelle



grossolane (> 2 mm) maggiore del 60% ed una frazione fine (< 0,3 mm) presente a basse percentuali, infatti non supera il 10% del totale.

Il feldspato al contrario è costituito invece da particelle molto fini, infatti la frazione < 0,3 mm è presente con una percentuale superiore al 50%, mentre la frazione intermedia (0,3 – 2 mm) e quella grossolana (> 2 mm) sono equamente distribuite.

Il clinker grigio ha una frazione grossolana (> 2 mm) che supera il 50% del materiale, con una frazione intermedia (0,3 – 2 mm) poco più abbondante della frazione fine (< 0,3 mm) in termini di percentuale.

Infine il cloruro di potassio è invece l'unico tra i cinque materiali in cui la frazione grossolana (> 2 mm) è pressoché assente, mentre la frazione intermedia (0,3 – 2 mm) è poco superiore alla frazione fine (< 0,3 mm).

#### 4.9.2. Classi di polverosità

Per quanto concerne le classi di polverosità i risultati sono riportati in Figura 41, dove sono rappresentati i risultati della polverosità totale dei materiali analizzati e le relative deviazioni standard (esprese dalle barre di errore).

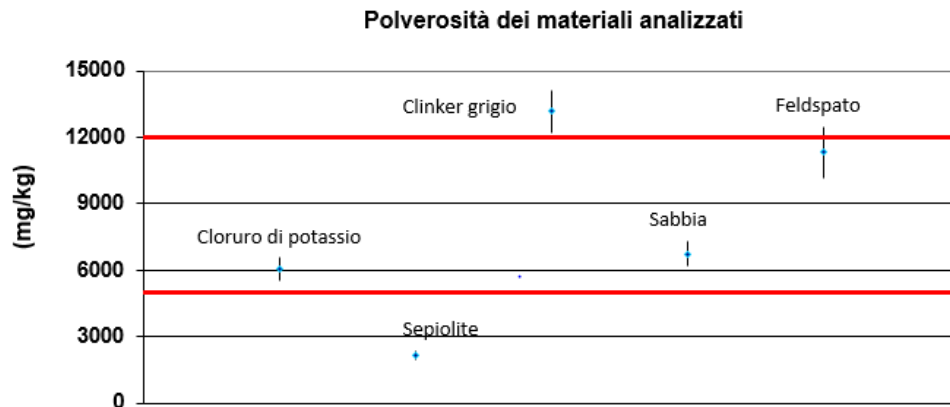


Figura 39. Polverosità totale con relative deviazioni standard inerenti ai cinque materiali analizzati.

Dalla Figura 41 si evince che i materiali hanno dato risultati molto differenti tra loro. I limiti di soglia per la classificazione della polverosità, come riportato in Tabella 6, sono:

- 5000 mg/Kg;
- 12000 mg/Kg.

La prima soglia stabilisce il valore limite tra la classe dei materiali a bassa polverosità e la classe dei materiali a media polverosità.

La seconda soglia, invece, identifica il valore limite tra la classe dei materiali a media polverosità e la classe dei materiali ad alta polverosità.

La sepiolite risulta essere l'unico materiale a bassa polverosità.

Ben tre materiali (cloruro di potassio, sabbia, feldspato), invece, appartengono alla classe dei materiali a media polverosità.

Il clinker grigio è l'unico materiale ad alta polverosità.

Le deviazioni standard associate alle analisi sono abbastanza uniformi e tutte comprese tra il 7 e il 10% circa, questo significa che all'aumentare del valore di polverosità (mg/Kg), aumenta, in valore assoluto, anche l'intervallo di incertezza dell'errore e di conseguenza l'intervallo di incertezza è maggiore. Per esempio la sepiolite ha il più basso valore medio di polverosità (2159 mg/Kg) con un intervallo di incertezza di 216 mg/Kg. Di conseguenza le analisi e i successivi calcoli determinano un valore di polverosità compreso tra  $2159 \pm 216$  (mg/Kg) per la sepiolite. Al contrario per il materiale con maggior valore di polverosità, il clinker grigio, il valore medio trovato è stato 13153 mg/Kg e il suo intervallo di errore risulta essere di 981 mg/Kg. Il valore determinato per questo materiale è compreso tra  $13153 \pm 981$  (mg/Kg).

In Tabella 55 sono riportati i valori delle polverosità totali dei materiali e gli intervalli di incertezza associati. L'aumento dell'intervallo di incertezza dell'errore con l'aumentare della polverosità si verifica per tutti i casi eccetto per il feldspato ed il clinker. Questo perché la percentuale della deviazione standard del feldspato (10,13%) è superiore a quella del clinker grigio (7,46%).

*Tabella 55. Polverosità ed intervallo di incertezza di errore per i cinque materiali.*

<b>Materiali</b>	<b>Valore media geo. Polverosità (mg/Kg)</b>	<b>Dev. Standard <math>\sigma</math> (%)</b>	<b>Incertezza <math>2\sigma</math> (mg/Kg)</b>
<b>Sepiolite</b>	2159	9,99%	$\pm 216$
<b>KCl</b>	6065	8,62%	$\pm 523$
<b>Sabbia</b>	6725	8,40%	$\pm 565$
<b>Feldspato</b>	11309	10,13%	$\pm 1146$
<b>Clinker grigio</b>	13153	7,46%	$\pm 981$

### 4.9.3. Percentuali di polvere emessa dal campione

Un'ulteriore analisi comparativa è stata effettuata tra i cinque materiali per risalire alla quantità di polvere liberata in base alla quantità di materiale sottoposto ad analisi.

Il grafico in Figura 42 rappresenta la percentuale di emissione di polvere delle due frazioni in base alla quantità di materiale inserito nello strumento, rispettivamente di 6 g per la frazione da 0,3 – 2 mm e di 2 g per la frazione < 0,3 mm.

Per la frazione intermedia (asse secondario del grafico) i risultati hanno evidenziato che per tutti i materiali c'è una bassa tendenza ad emettere polvere. Il materiale a più alta emissione è risultato essere il feldspato, infatti circa lo 0,3% del campione viene emesso nel momento in cui viene movimentato. Gli altri materiali, invece, emettono una quantità di polvere pressoché irrilevante (< o = a 0,05%).

Per la frazione granulometrica fine (< 0,3 mm, asse principale) i risultati hanno evidenziato che la propensione ad emettere polvere aumenta di circa un ordine di grandezza al diminuire del diametro aerodinamico delle particelle. Questo fenomeno si verifica per ogni materiale. Come ci si potrebbe aspettare dai risultati ottenuti nelle analisi, il materiale la cui frazione fine tende maggiormente a disperdersi durante la movimentazione è il clinker grigio.

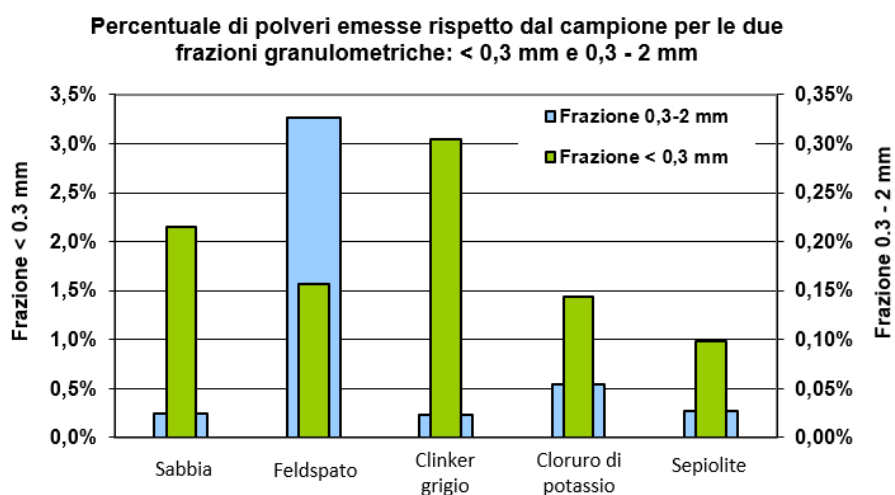


Figura 40. Istogrammi dei cinque materiali che indicano le percentuali di polveri emesse per le due frazioni granulometriche fini ed intermedie.

In Figura 43 è rappresentata l'emissione percentuale considerando la totalità del campione, una modalità grafica alternativa di espressione della polverosità totale, rispecchiando quindi la classificazione del grado di polverosità effettuata nel sotto-paragrafo 4.9.2.

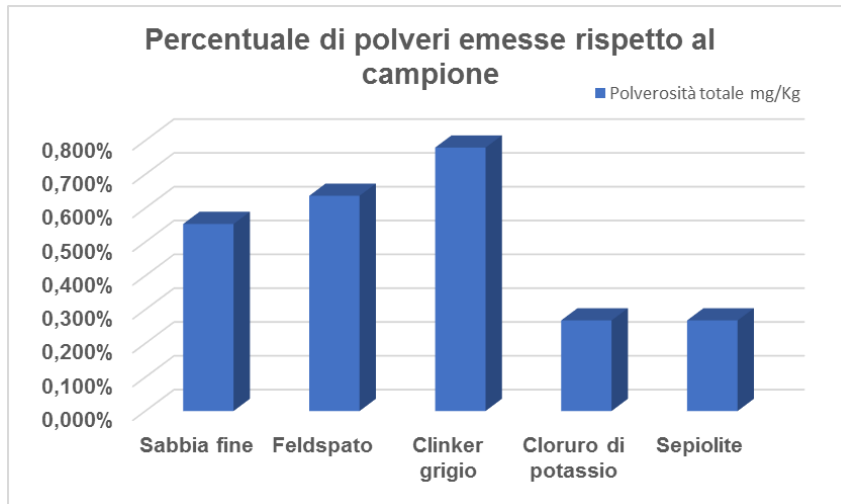


Figura 41. Istogrammi dei cinque materiali che indicano le percentuali di polvere emessa dal campione.

## Capitolo V

### Conclusioni

Alla luce del lavoro svolto nella presente tesi è importante far presente che il campo di studio riguardante la polverosità è ancora in fase di crescita. Solo recentemente si è iniziato a considerare la polverosità dei materiali come parametro utile a comprendere il livello di esposizione dei lavoratori che operano a contatto con materiali alla rinfusa. Ricordiamo infatti che l'inalazione delle polveri fini può portare a malattie professionali come la brossite e la pneumoconiosi [24]. In Italia l'ordinanza n.4/08 [2] dell'Autorità Portuale di Ravenna è una delle poche normative che impone alle aziende portuali di limitare la formazione di polvere durante la movimentazione di materiali alla rinfusa. Tali materiali sono elencati in una lista che ne definisce la classe di polverosità di appartenenza. Tale ordinanza, seppure redatta in modo qualitativo dagli addetti ai lavori, ha avuto un impatto positivo e significativo nella riduzione della polverosità nell'area portuale ravennate. Infatti, tali aziende sono state obbligate dalla medesima ordinanza a dotarsi di apparecchiature più o meno restringenti, in base al grado di polverosità dei materiali trattati.

Il lavoro sui materiali alla rinfusa svolto nel porto ravennate ha permesso di sviluppare una metodologia di analisi per la determinazione della polverosità coerente con la classificazione effettuata dall'Autorità Portuale. Tale metodologia prevede l'utilizzo di uno strumento a tamburo rotante, denominato Dustmeter Type III e prende spunto dalla norma tecnica UNI EN 15051 [21]. La metodologia di analisi nasce nella prima parte del presente lavoro, nel quale prima di procedere con la sperimentazione sono state verificate le risposte strumentali a diversi flussi. Nella fattispecie sono state condotte tre prove con tre diversi flussi (15, 18 e 20 L/min) e, di conseguenza, diversi tempi (151, 126 e 113 secondi, rispettivamente) per mantenere costante il volume totale di campionamento a 38 l, così come previsto dalla norma UNI. I materiali di prova utilizzati sono stati tre: sabbia derivante dalla macinazione di minerali, feldspato, clinker grigio. I tre materiali erano già stati inseriti nell'elenco stilato dall'ordinanza portuale e ad ognuno di essi era stata attribuita una classe di polverosità. La scelta del flusso e quindi del metodo è avvenuta sulla base dell'accordo dei risultati analitici con le classi di polverosità assegnate nell'ordinanza dell'autorità

portuale n.4/08 [2]. Il flusso in grado di soddisfare al meglio la classificazione dei tre materiali di prova è risultato essere il flusso a 20 L/min.

In seguito sono stati analizzati due materiali campionati anch'essi presso il porto ma non presenti nell'elenco dell'Autorità Portuale di Ravenna, su cui è stata effettuata l'analisi con il metodo sviluppato. I due materiali analizzati sono il cloruro di potassio e la sepiolite. Dalle analisi effettuate il cloruro di potassio è risultato un materiale a media polverosità e la sepiolite uno a bassa polverosità.

Visto l'impatto positivo dell'applicazione dell'Ordinanza 04/08 [2] nella realtà ravennate, in termini di riduzione della polverosità generata in area portuale durante la movimentazione e lo stoccaggio dei materiali alla rinfusa, si auspica, per una sempre migliore gestione delle attività potenzialmente in grado di generare polvere, una revisione della classificazione che includa tutti i materiali alla rinfusa trattati al porto di Ravenna.

Infine, relativamente alla metodologia messa a punto in questo lavoro di tesi, l'ulteriore sviluppo della problematica e delle relative metodiche analitiche a livello europeo, potrebbero portare allo sviluppo di materiali certificati, che garantirebbero di condurre le analisi tenendo sotto controllo tutte le fasi del processo.

## Bibliografia e sitografia

- 1) [http://dizionari.corriere.it/dizionario\\_italiano/R/rinfusa.shtml](http://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/R/rinfusa.shtml).
- 2) Ravenna, Ordinanza comunale dell'autorità portuale, n. 4, 2008.
- 3) D.H. Brouwer, I.H. Links, S.A. De Vreede, Y. Christopher, *Size selective dustiness and exposure; simulated workplace comparisons*. *Annals of Occupational Hygiene*, 50, 2006, 445–452.
- 4) W.A. Heitbrink, W.F. Todd, T.C. Cooper, D.M. O'Brien, *The application of dustiness tests to the prediction of worker dust exposure*, *The American Industrial Hygiene Association Journal*, 51, 1990, 217-223.
- 5) N.O. Breum, T. Schneider, O. Jørgenson, T.V. Rasmussen, S.S. Eriksen, *Cellulosic building insulation versus mineral wool, fiberglass or perlite: installer's exposure by inhalation of fibres, dust, endotoxin and fire-retardant additives*, *Annals of Occupational Hygiene*, 47, 2003, 653-669.
- 6) P. Class, P. Deghilage, R.C. Brown, *Dustiness of different high-temperature insulation wools and refractory ceramic fibres*, *Annals of Occupational Hygiene*, 45, 2001, 381-384.
- 7) A.M. Madsen, L. Mårtensson, T. Schneider, L. Larsson, *Microbial dustiness and particle release of different biofuels*, *Annals of Occupational Hygiene*, 48, 2004, 327-338.
- 8) M. Boundy, D. Leith, T. Polton, *Method to evaluate the dustiness of pharmaceutical powders*, *Annals of Occupational Hygiene*, 50, 2006, 453-458.
- 9) A.H.M. Andreasen, N. Hofman-Bang, N.H. Rasmussen, *Über das Stäubungsvermögen der Stoffe*, *Kolloid-Zeitschrift*, 86, 1939, 70-77.
- 10) ANSI/ASTM D547-41, *Standard Test Method for index of dustiness of coal and coke*, 1980.
- 11) P.C. Storm, B. Geyer, *Umweltrecht*, CH Bech, 2002.
- 12) J. W. Schünemann, *Den Staub in den Griff bekommen*, *Schüttgut*, 3, 1997, 323.
- 13) A. Bürkholz, *Ein Verfahren zur Messung der Staubungsfähigkeit von pulverförmigen Produkten*, *Staub. Reinhaltung der Luft*, 49, 1989, 433-438.
- 14) K. Hjemsted, *An Investigation of Dustiness with a Rotating Drum Method*, Ph. D. Thesis, 1996, University of Copenhagen.

- 15) D. Dahmann, G.D. Hartfiel, K. Möcklinghoff, *Ein Verfahren zur wirklichkeitsnahen Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern*, Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 57, 1997, 503-507.
- 16) S.A. Sethi, T. Schneider, *A gas fluidization dustiness tester*, Journal of Aerosol Science, 27, S305-S306.
- 17) BOHS Technology Committee, British Occupational Hygiene Society *Technical Guide No. 4: Dustiness Estimation Methods for Dry Materials Part 1, Their Uses and Standardization and Part 2, Towards a Standard Method*, 1985, British Occupational Hygiene Society, London.
- 18) G.T. Visser, *A wind-tunnel study of the dust emissions from the continuous dumping of coal*, Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 26, 1992, 1453-1460.
- 19) M. Plinke, B. Homburg, *Vorhersage der Staubentstehung bei der industriellen Handhabung von Pulvern*, VDI, 1995.
- 20) J.C. Chow, J.G. Watson, J.E. Houck, L.C. Pritchett, C.F. Rogers, C.A. Frazier, B.M. Ball, *A laboratory resuspension chamber to measure fugitive dust size distributions and chemical compositions*, Atmospheric Environment, 28, 1994, 3463-3481.
- 21) EN UNI. 15051, *Workplace atmospheres, measurement of the dustiness of bulk materials, requirements and test methods*. Bruxelles, European Committee for Standardization, 2006.
- 22) G. Burdett, L. Armbruster, K. Gardiner, K. Y. K. Chung, D. Mark, N. O. Breum, *Development of a method for dustiness testing. EU contract SMT4-CT96-2074*, 2000, Sheffield, United Kingdom: Health and Safety Laboratory.
- 23) <http://www.treccani.it/vocabolario/polvere/>
- 24) H.E. Wichmann, J. Heinrich, A. Peters, *Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub*, Fortschritte in der Umweltmedizin, 2002, Ecomed-Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech.
- 25) DIN EN 481, *Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel*, Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- 26) M.A. Plinke, R. Maus, D. Leith, *Experimental examination of factors that affect dust generation by using Heubach and MRI testers*, The American Industrial Hygiene Association Journal, 53, (1992), 325-330.
- 27) F. Hamelmann, E. Schmidt, *Methods of dustiness estimation of industrial powders*, KONA Powder and Particle, 21, 2003, 7-17.



- 28) G. Lide'n, *Dustiness testing of materials handled at workplaces*, *Annals of Occupational Hygiene*, 50, 2006, 437-439.
- 29) DIN 33897-3, *Arbeitsplatzatmosphäre – Bestimmung des Staubungsverhaltens Teil 3: Verstaubung im Staubkanal*, Vorschlag, 2002.
- 30) Dust Particle Analysis (2001), <http://www.roaches.co.uk/products/products.htm>.
- 31) H. Karsten, D. Schneider, *Möglichkeiten des technischen Arbeitsschutzes und der arbeitsmedizinischen Prävention bei Staubbelastung*, Vortrag, 2001, A+A Düsseldorf.
- 32) I. Pensis, J. Mareels, D. Dahmann, D. Mark, *Comparative evaluation of the dustiness of industrial minerals according to European standard EN 15051, 2006*, *Annals of occupational hygiene*, 2009, mep077.
- 33) D. Dahmann, K. Möcklinghoff, *Das Staubungsverhalten quarzfeinstaubhaltiger Produkte*, *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, 60, 2000, 213-216.
- 34) DIN 51701-3, *Testing of solid fuels – Sampling and sample preparation*, 2006.
- 35) BS 3406-1, *Methods for determination of particle size distribution. Guide to powder sampling*, 1986.
- 36) R. Packroff, B. Görner, C. Guhe, E. Lechtenberg-Auffarth, G. Lotz, M. Tischer, *Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe*, Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2005, Dortmund.
- 37) S.L. Upton, D.J. Hall, G.W. Marsland, *Some experiments on material dustiness*, *Aerosol Society Annual Conference*, 1990, University of Surrey, Guildford, Surrey, UK.
- 38) <http://www.port.ravenna.it/pagina-porto-2/storia/>
- 39) [http://www.ravennacargo.it/porto\\_di\\_ravenna.htm](http://www.ravennacargo.it/porto_di_ravenna.htm)
- 40) CE, *Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage*, 2006.
- 41) <http://www.port.ravenna.it/pagina-porto-1/>
- 42) [https://www.arpae.it/dettaglio\\_generale.asp?id=1194&idlivello=1907](https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=1194&idlivello=1907)
- 43) <http://www.ambientalesrl.it/it/wp-content/uploads/2016/01/PT-01-campionamenti-rev.071.pdf>

- 44) [file:///C:/Users/acer/Downloads/2015\\_m00-catalogo\\_mr.pdf](file:///C:/Users/acer/Downloads/2015_m00-catalogo_mr.pdf)
- 45) *Dustmeter type III Instruction manual.*
- 46) *Dustmeter type I and type II Instruction manual.*
- 47) P. Lucially, D. Panniello, E. Pollini, I. Scaroni, *Determinazione della polverosità dei materiali: messa a punto di una metodologia*, PM 2014 sesto convegno sul particolato atmosferico, Genova, 2014.
- 48) I. Scaroni, M. Ferrari, M. Morelli, *Validazione calcolo dell'incertezza di misura dei metodi di prova chimici*, Istruzione Operativa I50451/LM, 2016, 51-54.
- 49) G. Sartori, R. Mufato, D. Argentini, P. Vannini, P. Ammazalorso, B. Griselli, B.P. Andreini, M. Belli, M.G. Simeone, ISPRA, *L'analisi di conformità con i valori limite di legge: il ruolo dell'incertezza associata a risultati di misura*, Manuali e linee guida 52, 2009.
- 50) <http://www.treccani.it/vocabolario/sabbia/>
- 51) <http://www.treccani.it/vocabolario/feldspato/>
- 52) [http://www.italcementi.it/NR/rdonlyres/C2E16136-BE56-4878-B549-A2D55072FC08/0/Schedadisicurezza\\_CLINKER.pdf](http://www.italcementi.it/NR/rdonlyres/C2E16136-BE56-4878-B549-A2D55072FC08/0/Schedadisicurezza_CLINKER.pdf)
- 53) <http://arpafertilizzanti.com/prodotto/potassici-it/cloruro-potassico-62-polvere/>
- 54) <http://www.treccani.it/enciclopedia/sepiolite/>

## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione di questo lavoro. Tutte le persone citate in questa pagina hanno svolto un ruolo fondamentale nella stesura della tesi, ma desidero precisare che ogni errore o imprecisione è imputabile soltanto a me.

Ringrazio per primo il professor Alberto Modelli per avermi indirizzato a svolgere questo lavoro presso l'Arpa di Ravenna. Inoltre esprimo gratitudine per tutte le indicazioni e per l'indispensabile pazienza che ha permesso la redazione dell'elaborato.

Vorrei ringraziare tutti coloro che hanno sostenuto e reso possibile lo svolgimento della sperimentazione in tempi ristretti. In particolare un doveroso ringraziamento è rivolto alla dott.ssa Elisa Pollini che ha supportato e guidato tutte le fasi del lavoro. Infine ringrazio anche Davide Paniello, che ha aiutato con costanza e grande professionalità lo svolgimento delle analisi essenziali per la stesura di questo elaborato.