

Influenza delle dimensioni, della densità e della concentrazione delle particelle sull'usura erosiva nel trasporto pneumatico

A. Bianchini^a, M.S.A. Bradley^b, T. Deng^{b*}, R. Macchini^a

^a Università di Bologna, II Facoltà di Ingegneria, Via Fontanelle, 40 Forlì (FC) 47521 Italy

^b The Wolfson Centre for Bulk Solids Handling Technology, Medway School of Engineering, University of Greenwich, Medway Campus, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, UK

Abstract

La concentrazione di particelle è uno dei fattori principali che influenzano la velocità di erosione delle superfici in caso di urto delle particelle, come accade per esempio nelle curve dei trasportatori pneumatici. È noto che una riduzione della velocità di erosione si verifica per alte concentrazioni di particelle, un fenomeno denominato "effetto schermo". La causa della schermatura si crede risiedere nella maggiore probabilità di collisioni inter-particella quando la concentrazione aumenta. In questo studio sono stati indagati gli effetti della concentrazione sull'erosione di una superficie curva in acciaio utilizzando tre diversi materiali in un impianto di trasporto pneumatico. I materiali sono stati scelti in modo che due avessero la stessa densità, ma granulometria molto diversa, e allo stesso tempo due avessero granulometria molto simile ma la densità diversa. Risultati sperimentali confermano l'effetto schermante al variare della concentrazione di particelle e mostrano che la densità ha un effetto molto più significativo rispetto alla dimensione delle particelle sull'effetto di schermatura.

È stato stabilito un nuovo metodo di correzione per tener conto del degradamento del materiale dovuto a passaggi multipli nella stessa linea di trasporto. Inoltre, è stato formulato un nuovo modello empirico del tasso di erosione specifico basandosi sulla definizione della resistenza all'usura. Con il modello è stato possibile trovare il tasso specifico di erosione quando la concentrazione di particelle tende a zero, e valutare il comportamento dei diversi materiali alla variazione di concentrazione delle particelle..

Parole chiave: dimensione, densità e concentrazione delle particelle, usura erosiva, effetto schermante, trasportatori pneumatici, modello empirico

I problemi di usura erosiva sono uno dei fattori limitanti la diffusione su larga scala del trasporto pneumatico di materiali granulari o polverosi. L'usura erosiva (o erosione) ha origine quando le particelle in un fluido scivolano e rotolano a velocità relativamente alta contro una superficie. Ogni particella a contatto con la superficie taglia una minuscola porzione di materiale. Individualmente, ogni particella rimossa è insignificante, ma un grande numero di particelle in un periodo di tempo lungo possono provocare un'erosione rilevante.

Nel caso del trasporto pneumatico il materiale da movimentare è solitamente un solido sotto forma di polvere o granuli, il quale viene immesso in un condotto pressurizzato (o depressurizzato negli impianti funzionanti in depressione) contenente un fluido motore. Il materiale viaggia in sospensione con il fluido

(solitamente aria) attraverso condotti e giunge a destinazione, dove poi viene estratto grazie a separatori o filtri.

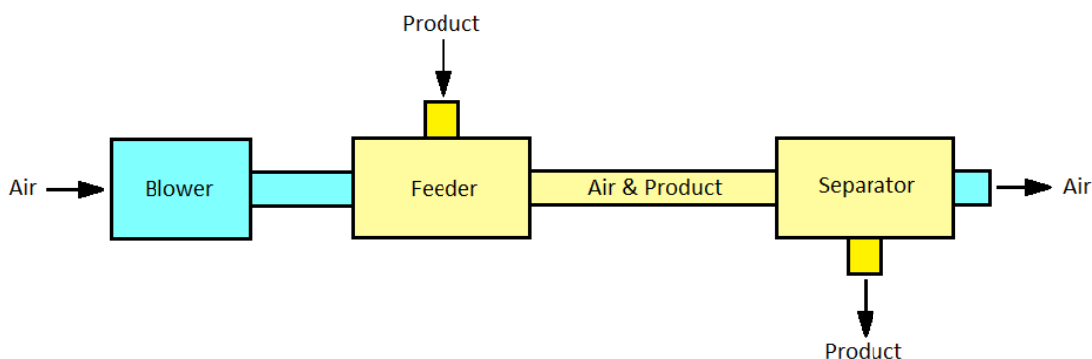


Figura 1: Schema di un impianto di trasporto pneumatico in pressione

Affinché rimanga in sospensione, la componente solida deve essere trasportata ad una velocità nel range 14 - 30 m/s , variabile in base al tipo di materiale, al diametro del condotto e ad altre condizioni. L'energia cinetica in seno alle particelle viene in parte persa quando quest'ultime incidono contro la linea di trasporto. In particolare questo avviene nei cambi di direzione o nelle discontinuità della condotta. Gli elementi che per primi manifestano fori dovuti all'usura erosiva sono dunque solitamente le curve ed è su queste che sono condotti i principali esperimenti volti a comprendere e prevedere il fenomeno dell'usura nel trasporto pneumatico.

Il fattore più influenzante l'usura erosiva è la velocità con la quale le particelle urtano i materiali strutturali e quindi è buona norma mantenerla più bassa possibile. Esiste però una velocità minima con la quale il materiale deve essere trasportato affinché rimanga in sospensione con il fluido. Nel caso di trasporto pneumatico in fase densa (il materiale non rimane in sospensione ma si sposta solidalmente) sono necessarie velocità di trasporto minori e quindi questo tipo di impianti soffrono meno il problema dell'usura. In fase di progettazione si cerca sempre quindi di mantenere la velocità sopra un valore minimo e di non oltrepassare una soglia massima ($\approx 30 m/s$). Linee di trasporto a sezione variabile vengono utilizzate appositamente per controllare la velocità, per mantenere controllate le perdite di carico e per limitare l'usura.

La concentrazione della fase solida è un altro fattore principale che influenza il tasso di erosione delle superfici in caso di urto di particelle. È noto che una riduzione del tasso di erosione specifico si verifica quando la concentrazione di

particelle aumenta, un fenomeno denominato "effetto schermo ". La causa della schermatura si ritiene essere la maggiore probabilità di collisione inter-particella e la maggiore probabilità di collisione tra le particelle che hanno già urtato le superfici e quelle in arrivo, riducendo quindi la frequenza e la gravità degli impatti tra il materiale trasportato e le superfici del condotto.

In questo studio, gli effetti della concentrazione del materiale solido sull'usura di una curva di acciaio dolce sono stati studiati in dettaglio utilizzando tre materiali con dimensioni e densità differenti.

I test sono stati eseguiti utilizzando un impianto pneumatico sperimentale in scala industriale (Figura 2) composto da:

- 2 compressori a vite che garantiscono la necessaria portata di aria in pressione;
- 1 propulsore pneumatico (blow tank) di $1,5 m^3$ di capacità, utilizzato fluidificare il materiale e pressurizzarlo;
- 130 m di linea di trasporto a sezione circolare di 100 mm di diametro nominale (Figura 3);
- 1 serbatoio di immagazzinamento e ricezione del materiale trasportato;
- 1 sistema di filtrazione a maniche.

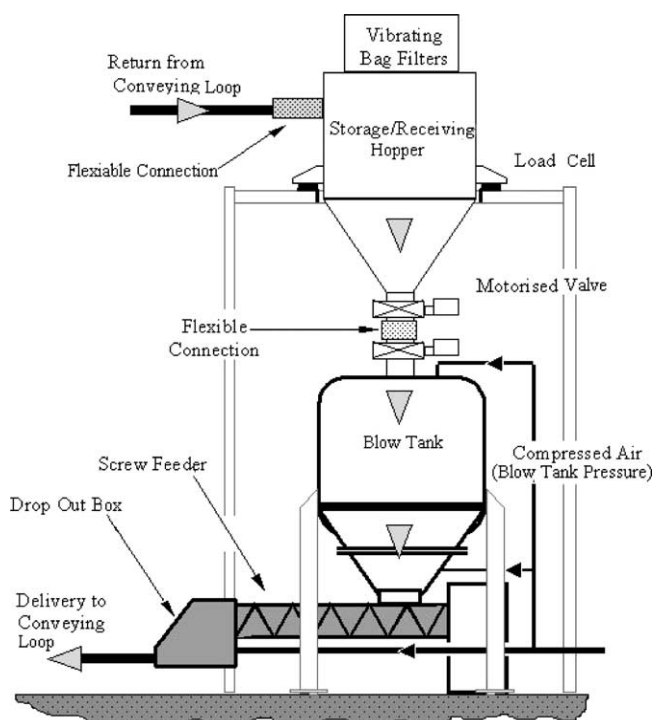


Figura 2: Impianto pneumatico sperimentale

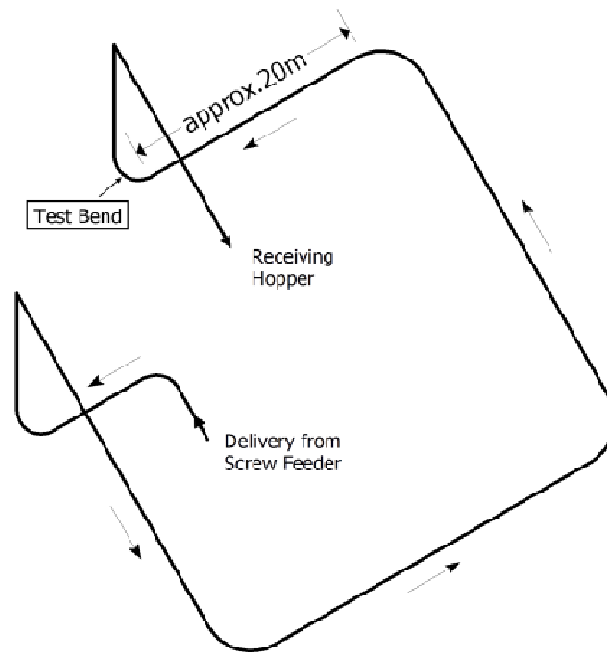


Figura3: Layout approssimativo della linea di trasporto pneumatico

I materiali sono stati scelti in modo che due avessero la stessa densità, ma diametri medi delle particelle molto diversi, e allo stesso tempo due avessero dimensioni molto simili ma la diversa densità.

POLVERE DI LEGNO

Diametro medio: 45 μm

Densità della particella: 0.443 g/cm^3

Durezza Moh's: 2.0



FARINA DI SILICE

Diametro medio: 17 μm

Densità della particella: 2.69 g/cm^3

Durezza Moh's: 7.0



SABBIA DI OLIVINA

Diametro medio: 190 μm

Densità della particella: 3.14 g/cm^3

Durezza Moh's: 6.5-7.0



Il materiale inizialmente contenuto nel serbatoio (Hopper) era scaricato attraverso l'ausilio di un sistema vibrante all'interno del propulsore pneumatico, dopodiché quest'ultimo era pressurizzato e il materiale cominciava ad essere trasportato lungo la linea per poi ritornare nel serbatoio. Una coclea aiutava l'ingresso nel materiale all'interno della condotta.

Lo scopo di questi cicli era simulare il trasporto di materiale da una stazione di partenza ad una di arrivo all'interno di un reale contesto produttivo, misurando la quantità di materiale perso per usura in una curva della linea.

Al fine di facilitare il montaggio e smontaggio e di utilizzare una bilancia con un'alta precisione (0.1 mg) non è stata utilizzata un'intera curva ma solo la sezione esterna (estradosso), costruita partendo da un foglio sottile di acciaio dolce e successivamente lavorata a caldo per ottenere la forma desiderata. Questa soluzione permetteva anche un'accurata pulizia dell'oggetto da pesare. Il "target" è stato fissato alla curva attraverso delle fascette metalliche, interponendo delle guarnizioni per evitare perdite di aria.

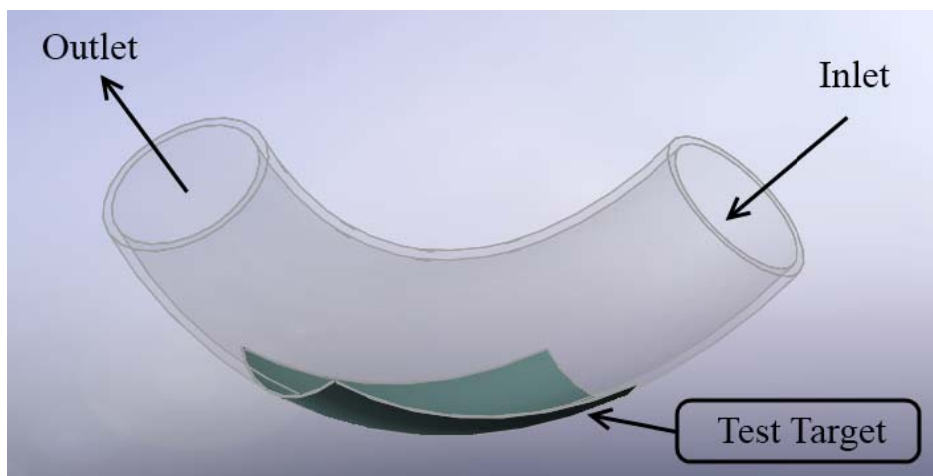




Figura 4: Test target

Dopo aver convogliato un tutto il materiale presente nel propulsore (o dopo averlo fatto per almeno 9 volte nel caso della polvere di legno in quanto poco erosiva) il test target veniva smontato, accuratamente pulito ed infine pesato. La fase di pesatura era molto delicata poiché si ricercava una precisione di 0.1 mg e quindi venivano eseguite almeno 7 misure e fatta una media.

La curva sulla quale era montato il target era l'ultima della linea, in prossimità del ricevitore e quindi era ragionevole assumere che la pressione dell'aria fosse vicina a quella atmosferica. In queste condizioni è stata considerata una densità dell'aria pari a 1.2 kg/m^3 . La portata massica dell'aria era mantenuta costante in tutti i diversi test ad un valore pari a 0.35 kg/s , il che significa che la velocità con la quale l'aria attraversava l'ultima curva era pari a 34 m/s .

Diversi valori di portate di solido sono stati ottenuti variando la velocità della coclea di scarico e variando il rapporto tra aria fornita al propulsore e aria supplementare (aria direttamente iniettata all'inizio della condotta e non all'interno del propulsore pneumatico).

Il materiale trasportato durante ogni test run è stato registrato attraverso celle di carico poste sul serbatoio ricevitore e grazie all'analisi in funzione del tempo del solido convogliato nel ricevitore è stato possibile estrarre anche la portata massica. È stato così possibile definire la concentrazione volumetrica (volumetric phase density) come indicata nell'Eq. 1.

$$\varphi = \frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_{air}} \quad (1)$$

dove:

□ φ : concentrazione volumetrica [$\text{m}^3/\text{m}^3_{air}$];

- \dot{V}_s : portata volumetrica di solido [m^3_s];
- \dot{V}_{air} : portata volumetrica di aria [m^3_{air}].

Per stimare l'usura provocata dal passaggio di materiale all'interno della condotta è stata definita un'usura specifica (specific erosion rate), cioè un rapporto tra la quantità di materiale asportato dal target e la quantità di materiale trasportato.

$$E = \frac{\Delta m_b}{M_s} \quad (2)$$

dove:

- E : usura specifica [g/Tonne];
- Δm_b : materiale asportato per usura [g];
- M_s : solido trasportato per sessione [Tonne].

In una situazione reale il materiale viene trasportato da una zona di partenza ad una destinazione nel quale viene utilizzato nel processo produttivo che ne richiede l'utilizzo e quindi solitamente viene trasportato una sola volta. In questo caso, per poter eseguire più misure, lo stesso materiale è stato trasportato più volte. Questo significa un progressivo degrado del materiale che ne comporta una diminuzione del "potenziale erosivo".

Al fine di eliminare gli effetti dovuti ai cambiamenti nel materiale dovuti a multipli passaggi, osservati in alcuni test precedenti, l'erosione specifica è stata sottoposta ad una nuova tecnica di correzione. Si è pensato di introdurre un "fattore di degradazione standard del materiale per run", ϵ_0 . Questo è stato pensato in modo che eseguendo un test alle stesse condizioni del primo (dove il materiale era ancora vergine) ma svolto dopo più passaggi del materiale fornisce un'usura specifica pari a quella misurata nel primo caso. In pratica si trasformava un materiale degradato in uno vergine applicando un'opportuna correzione.

Per ogni materiale è stato quindi determinato sperimentalmente un fattore ϵ_0 eseguendo un test finale ("Check Value") alle stesse condizioni del primo cercando di ottenere la stessa usura specifica. I valori trovati sono stati:

- **Polvere di legno**: 0.33%;
- **Sabbia di olivina**: 0.25%;
- **Farina di silice**: -0.5% (indica un incremento dell'usura specifica).

Il valore trovato per la farina di silice è stato del tutto inaspettato. In letteratura non si trova nessun autore che propone un incremento del potenziale erosivo dovuto a ripetuti passaggi. Al fine di verificarne l'esattezza, l'intero programma di test è stato ripetuto ben 3 volte, ottenendo gli sempre gli stessi risultati. Con certezza in questo particolare caso si manifestava un incremento del potenziale erosivo (valore negativo di ε_0). Questo valore inaspettato può essere dovuto al fatto che quando le particelle urtano le superfici ne creano di più spigolose e quindi maggiormente usuranti.

Lo stesso fattore di degradazione standard necessitava di un'ulteriore correzione per tener conto della concentrazione di materiale solido in aria. Questo perché è stato osservato in ambito industriale che per concentrazioni maggiori si ha una degradazione del materiale minore, cioè una proporzionalità di tipo inverso.

L'effettivo valore del fattore di degradazione del materiale, ε_n , non era quindi costante ma variava in base alla concentrazione del materiale nell' n-esimo test run. Questo valore è dunque stato calcolato come segue:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 \left(\frac{\varphi_0}{\varphi_n} \right) \quad (3)$$

dove:

- ε_0 : usura specifica standard per ogni materiale [g/Tonne];
- φ_n : concentrazione volumetrica n-esima [m^3_s/m^3_{air}];
- φ_0 : concentrazione volumetrica standard (1° run) [m^3_s/m^3_{air}].

L'usura specifica corretta per ogni test run (o per sessione di 9 run successivi nel caso della polvere di legno) è stata quindi calcolata introducendo un fattore correttivo ε_n nella seguente equazione:

$$E_{cn} = \frac{E_{mn}}{(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3) \dots (1 - \varepsilon_n)} \quad (4)$$

dove:

- E_{cn} : usura specifica "corretta" [g/Tonne];
- E_{mn} : usura specifica misurata nel run n-esimo [g/Tonne];
- ε_n : fattore di degradazione nel run n-esimo;
- n : test run n-esimo.

N.B.: Nel caso del run 1 non si applica nessuna correzione.

A questo punto sono stati rappresentati i valori dell'usura specifica per ognuno dei materiali testati in un grafico dove alle ascisse era presente la concentrazione volumetrica.

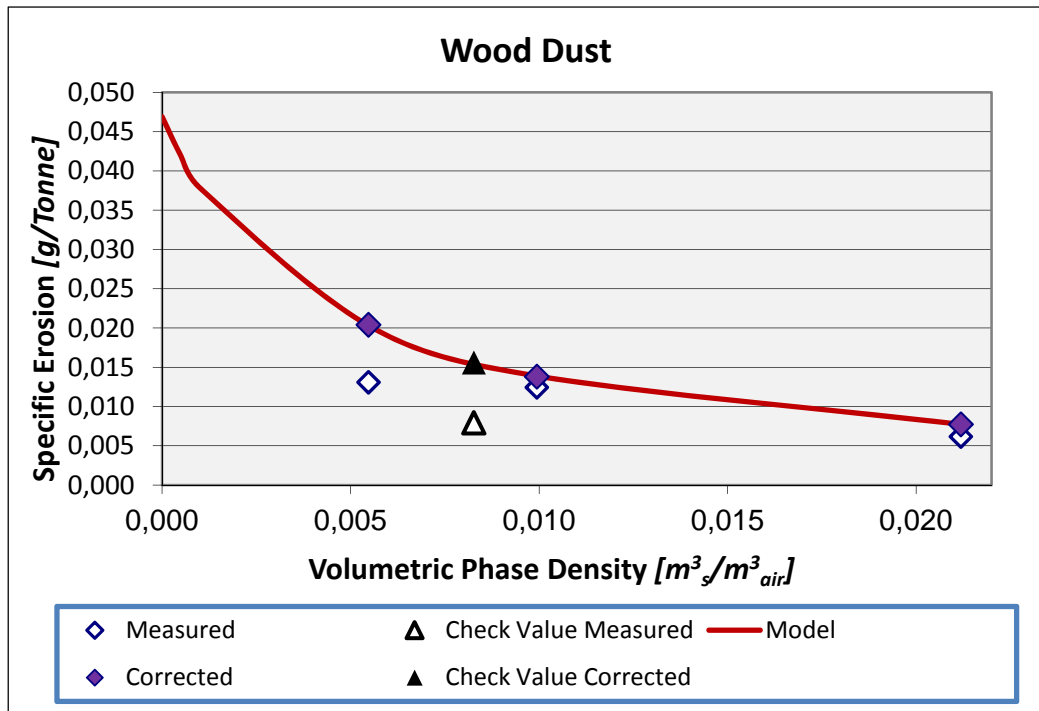


Figura 5: Effetto della concentrazione di particelle sull'usura specifica causata dalla polvere di legno su una curva di un trasportatore pneumatico.

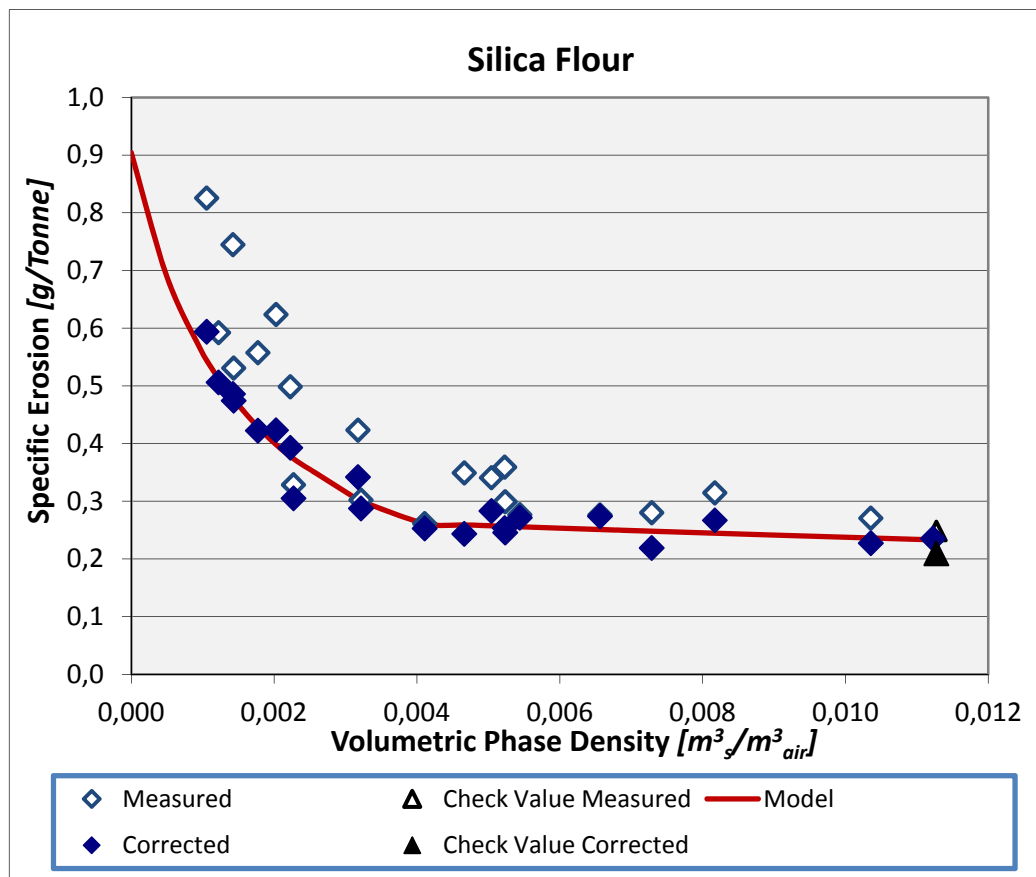


Figura 6: Effetto della concentrazione di particelle sull'usura specifica causata dalla farina di silice su una curva di un trasportatore pneumatico.

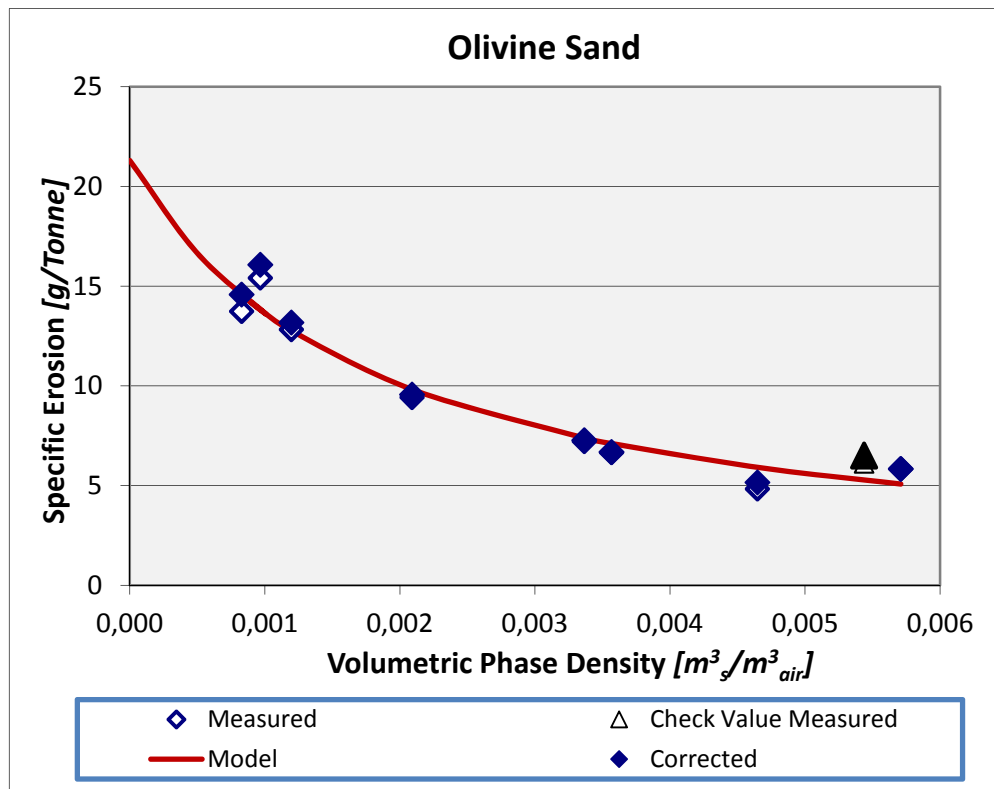


Figura 7: Effetto della concentrazione di particelle sull'usura specifica causata dalla sabbia di olivina su una curva di un trasportatore pneumatico.

Nelle Figure 5,6,7 sono rappresentati sia i valori misurati sia quelli corretti dell'erosione specifica. È presente inoltre una curva denominata "Model" che è stata ottenuta utilizzando un modello empirico spiegato successivamente.

Si può chiaramente notare come al diminuire della concentrazione della fase solida si ha un incremento dell'usura specifica per tutti e 3 i materiali testati. Il valore di quest'ultima però è fortemente dipendente dal tipo di materiale utilizzato. In Fig. 8 tutti e 3 i materiali sono rappresentati in un unico grafico in scala semilogaritmica.

Un aspetto interessante da notare è la grande differenza di usura specifica tra i tre diversi materiali, alcuni dei quali con proprietà molto simili.

Polvere di legno e farina di silice hanno dimensioni medie delle particelle paragonabili ma una diversa densità e durezza e questo provoca un'usura specifica di circa 10 volte più grande, e quindi sarebbe ragionevole pensare che la durezza e densità abbiano un ruolo piuttosto importante.

Farina di silice e sabbia di olivina hanno durezza e densità molto simili ma dimensioni molto differenti e questo causa un'usura specifica molto differente.

In questo caso le dimensioni appaiono una variabile molto influenzante.

In seguito a queste considerazioni appare ovvio quanto ogni variabile influenzi l'usura specifica e quanto sia difficile prevederne il comportamento se non dopo specifici test.

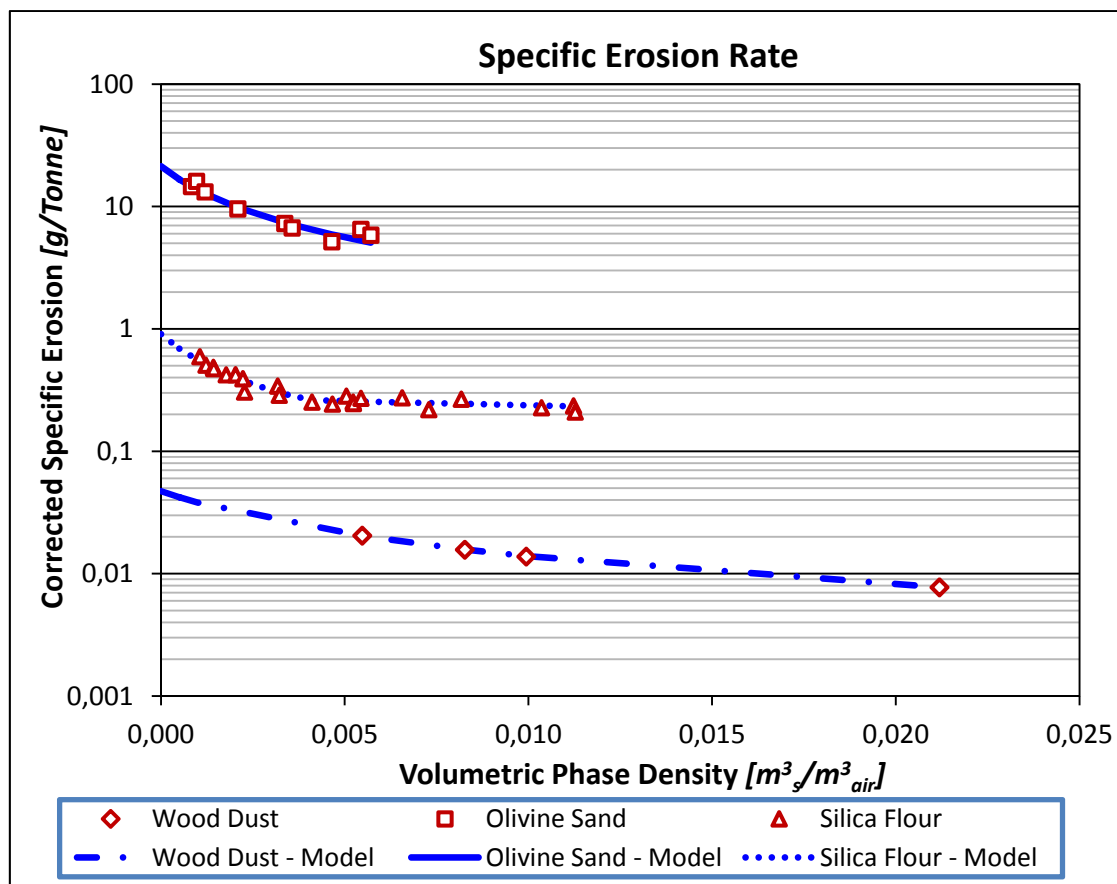


Figura 8: Effetto della concentrazione di particelle sull'usura specifica corretta per i tre diversi materiali testati.

Modello empirico

Uno degli obiettivi di questo lavoro era trovare un modello abbastanza semplice che riuscisse a descrivere l'andamento dell'usura specifica in funzione della concentrazione di particelle. In particolare un valore interessante è l'usura specifica quanto la concentrazione di solido tende a zero, una situazione in cui si risente poco dell'effetto schermo e quindi valori di usura misurati nei trasportatori pneumatici si avvicinano a quelli ricavabili grazie a piccoli misuratori di usura da laboratorio. Molti tipi di curve potevano essere utilizzati per approssimare i dati raccolti durante i test ma si è preferito un approccio che risultasse semplice e allo stesso tempo abbastanza fedele. L'idea è stata quella di rappresentare su un grafico l'inverso dell'usura specifica in funzione della concentrazione volumetrica di particelle. Questo valore può essere considerato una resistenza all'usura ed è stata indicata con:

$$\tau = \frac{1}{E_{cn}} \quad (5)$$

dove:

- τ : resistenza all'usura [Tonne/g];
- E_{cn} : usura specifica corretta [g/Tonne].

La resistenza all'usura rappresenta quanto materiale può essere trasportato prima di asportare un grammo di materiale strutturale. Rappresentando questo valore in funzione della concentrazione volumetrica si è notato che avesse un andamento piuttosto lineare e che quindi potesse essere approssimato con l'equazione di una semplice retta.

$$\tau = s \varphi + i \quad (6)$$

dove:

- s : pendenza della curva approssimante;
- i : intercetta sull'asse delle ordinate.
- φ : concentrazione volumetrica [m^3_s/m^3_{air}].

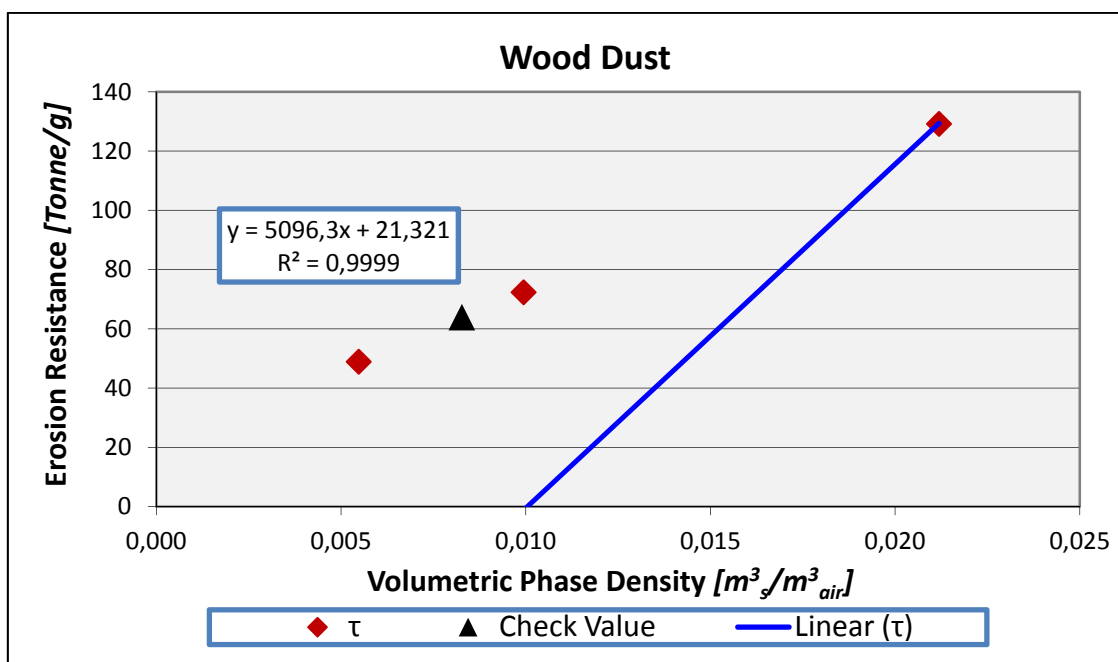


Figura 9: Effetto della concentrazione volumetrica di polvere di legno sulla resistenza all'usura di una curva in acciaio di un trasportatore pneumatico

Nel caso di farina di silice sono stati raccolti molti dati siccome l'intero programma di test è stato ripetuto ben 3 volte. Questo ha introdotto una maggiore incertezza nei dati poiché per valori molto simili di concentrazione di solido si aveva una discreta concentrazione di dati. La Fig. 10 mostra la soluzione adottata nel caso della farina di silice, cioè dividere l'approssimante della resistenza all'usura in due tratti lineari, una ad elevata pendenza per basse

concentrazioni ed una a pendenza più bassa per le alte concentrazioni. Sono stati fatti diversi tentativi di utilizzare un'unica approssimante lineare ma questi portavano alla generazione di modelli piuttosto incoerenti con i dati raccolti. Un simile fenomeno sembrerebbe presentarsi anche nel caso della sabbia di olivina ma in questo caso le concentrazioni volumetriche raggiunte sono troppo piccole per riuscire a validare un modello a due spezzate.

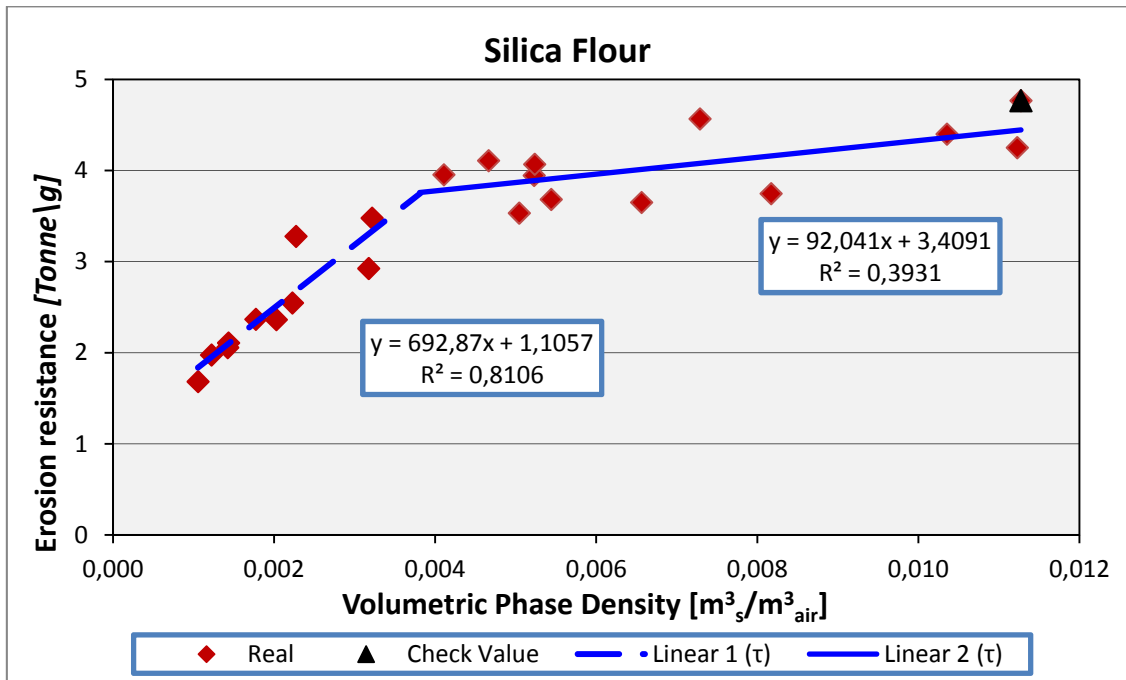


Figura 10: Effetto della concentrazione volumetrica di farina di silice sulla resistenza all'usura di una curva in acciaio di un trasportatore pneumatico

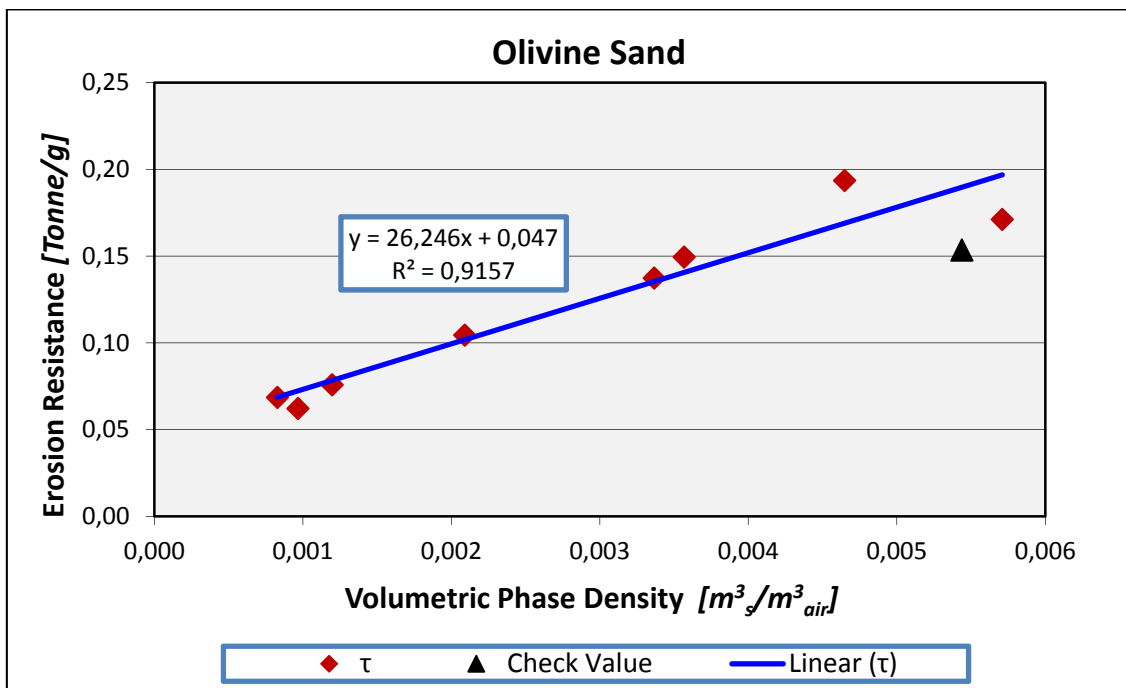


Figura 11: Effetto della concentrazione volumetrica di sabbia di olivina sulla resistenza all'usura di una curva in acciaio di un trasportatore pneumatico

Utilizzando i valori raccolti dall'approssimazione della resistenza all'usura, è possibile costruire un semplice modello empirico che descriva l'andamento dell'usura specifica in funzione della concentrazione volumetrica.

$$E_m = \frac{1}{s \varphi + i} \quad (7)$$

dove:

□ E_m : usura specifica teorica [g/Tonne].

In Fig. 5,6,7 sono rappresentati anche gli andamenti dell'usura teorica per i tre materiali utilizzati nei test.

Utilizzando l' Eq. 7 è possibile ricavare il valore teorico dell'usura specifica per concentrazioni volumetriche tendenti a zero, E_{m0} , cioè il valore meno influenzato dall'effetto schermo.

$$E_{m0} = \lim_{\varphi \rightarrow 0} \left(\frac{1}{s \varphi + i} \right) = \frac{1}{i} \quad (8)$$

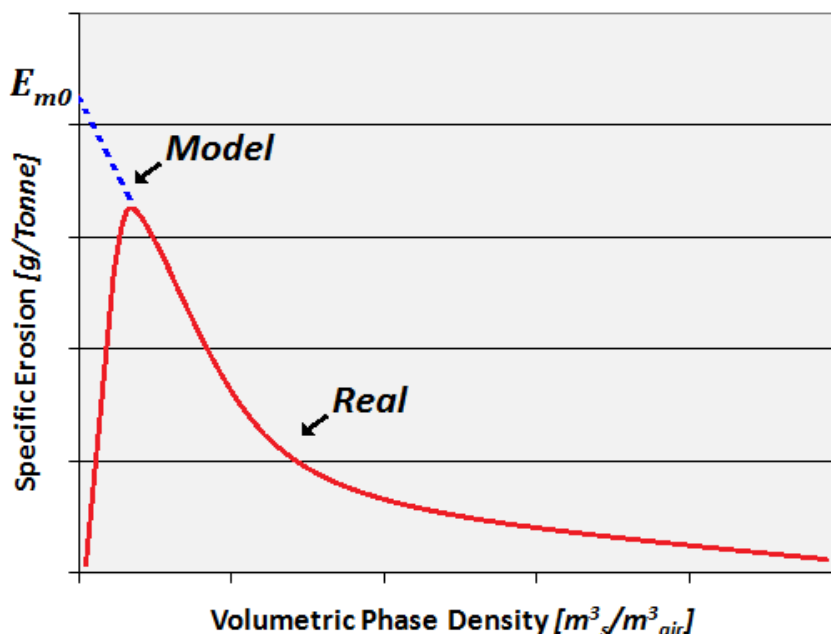


Figura 12: Differenze tra l'andamento reale dell'erosione specifica e quello del modello utilizzato

Il valore di E_{m0} così trovato non è un valore reale, poiché, in realtà se non c'è trasporto di solido non avviene alcuna erosione e quindi il valore del limite è zero. E_{m0} è un valore strettamente teorico, utile per essere in grado di confrontare l'andamento dell'usura specifica nei tre casi differenti.

Quando la concentrazione di solido (volumetrica o massica) aumenta, l'usura specifica diminuisce, e questo significa che E_{m0} è un valore critico e può essere utilizzato da progettisti per prevedere la vita minima di una curva in un

trasportatore pneumatico eseguendo anche solo semplici test in laboratorio con misuratori di usura centrifughi.

Infine per ogni materiale sono stati definiti due rapporti utilizzati per valutare quanto velocemente il potenziale erosivo diminuisce aumentando la concentrazione volumetrica.

$$r_m = \frac{E_m}{E_{m0}} \quad (9)$$

Il rapporto r_m è stato calcolato utilizzando l'erosione specifica teorica mentre un analogo rapporto r_c è stato calcolato utilizzando i valori corretti.

$$r_c = \frac{E_{cm}}{E_{m0}} \quad (10)$$

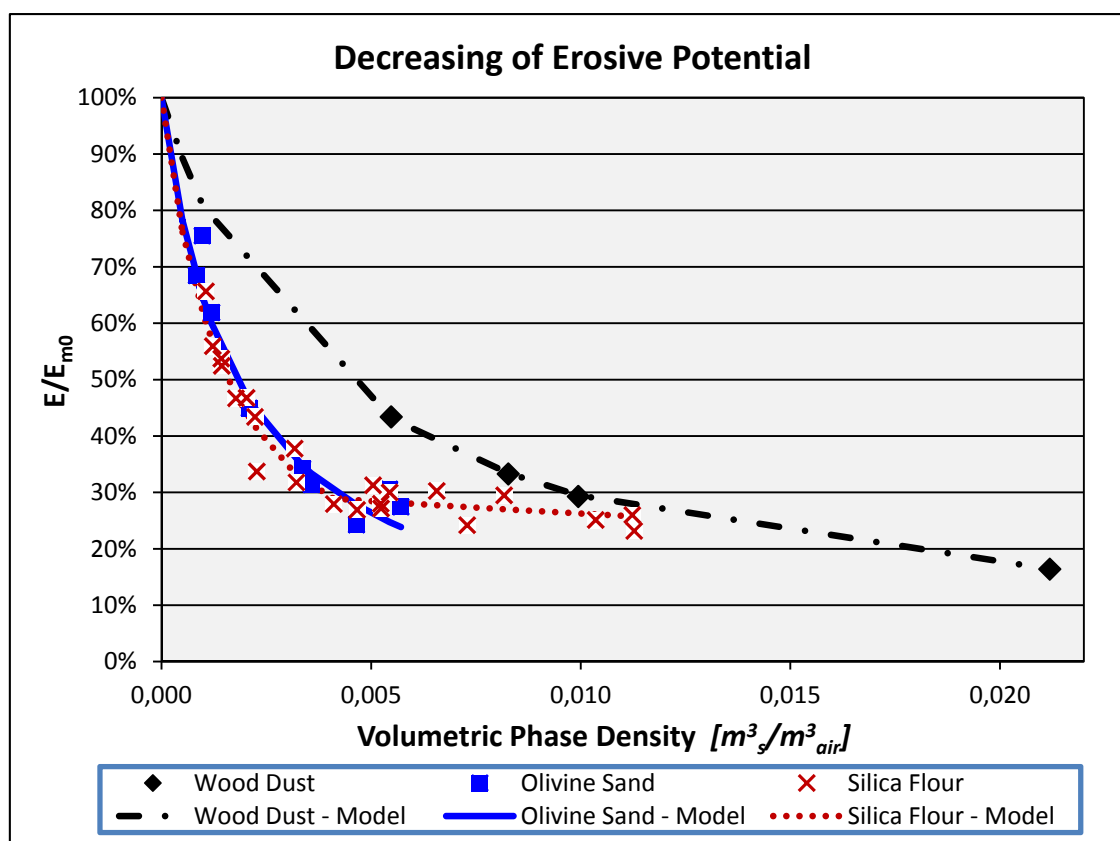


Figura 13: Decremento dell'usura specifica in funzione della concentrazione volumetrica di tre differenti materiali trasportati pneumaticamente.

Influenza della concentrazione volumetrica – Effetto schermo

Osservando le Figure 5,6,7 si può notare che il modello costruito utilizzando la resistenza all'usura sembra approssimare in maniera soddisfacente i dati raccolti e corretti dell'usura specifica per tutti e tre i materiali utilizzati.

Un'usura specifica maggiore a basse concentrazioni indica che quando la fase solida aumenta questo non corrisponde ad un aumento di usura. Questo effetto è

stato denominato “effetto schermo” in quanto si ritiene che particelle che incidono contro la superficie usurata si comportino successivamente da barriera contro ulteriori particelle potenzialmente usuranti. In Fig. 13 è possibile valutare quanto i diversi materiali risentono di questo effetto.

Da una prima analisi si evince che farina di silice e sabbia di olivina hanno un comportamento molto simile mentre nel caso della polvere di legno si risente meno dell’effetto schermo. Tuttavia per alte concentrazioni volumetriche tutti e tre i materiali sembrano convergere ad un valore pressoché costante.

I risultati ottenuti per la sabbia di olivina sono stati correlati con risultati ottenuti in lavori precedenti. Si tratta di uno studio sul materiale asportato da una curva di un trasportatore pneumatico svolto da Mills [13] e da uno studio sull’usura di un elemento in acciaio all’interno di un misuratore di usura centrifugo svolto da Burnett [16].

$$\mathbf{MILLS} \quad E = 70.772 e^{-0.0926 x} \quad (11)$$

$$\mathbf{BURNETT} \quad E = 71.715 e^{-0.0186 x} \quad (12)$$

dove:

- E : usura specifica [g/Tonne];
- x : densità della miscela solido-aria [kg_s/m^3_a].

In entrambi i casi, i risultati sono stati normalizzati utilizzando il valore di usura specifica per concentrazioni volumetriche tendenti a zero, com’era stato fatto con i risultati ottenuti in questo lavoro.

Il confronto è mostrato in Fig. 14, dove con “Experiment” sono indicati i valori trovati in questo studio. Tutti i risultati sono stati normalizzati a condizioni di prova analoghe, come nel caso della velocità d’impatto delle particelle normalizzata a 34 m/s (con una legge di dipendenza della velocità esponenziale con esponente 2,7). I materiali delle superfici usurate erano simili, vale a dire acciai relativamente morbidi. Solo la granulometria della sabbia era leggermente differente, Burnett e Mills hanno utilizzato materiali con 280 μm di diametro medio rispetto ai 190 μm delle particelle in questo studio.

I risultati in Figura 14 mostrano un ottimo accordo tra i dati sperimentali e i dati ricavati da Mills. L’andamento molto diverso dei risultati di Burnett afferma chiaramente che per concentrazioni maggiori l’effetto schermo nelle curve dei trasportatori pneumatici è molto maggiore che nel tester di erosione rotante.

La ragione principale di questa differenza è quasi certamente che nei misuratori di usura il fascio di particelle incidenti abbandona velocemente la zona di collisione con la superficie sottoposta ad usura, riducendo al minimo il rischio di collisioni tra particelle, mentre nel trasporto pneumatico si crea una zona densa di particelle a ridosso della curva dove quindi è facile che avvengano scontri tra masse.

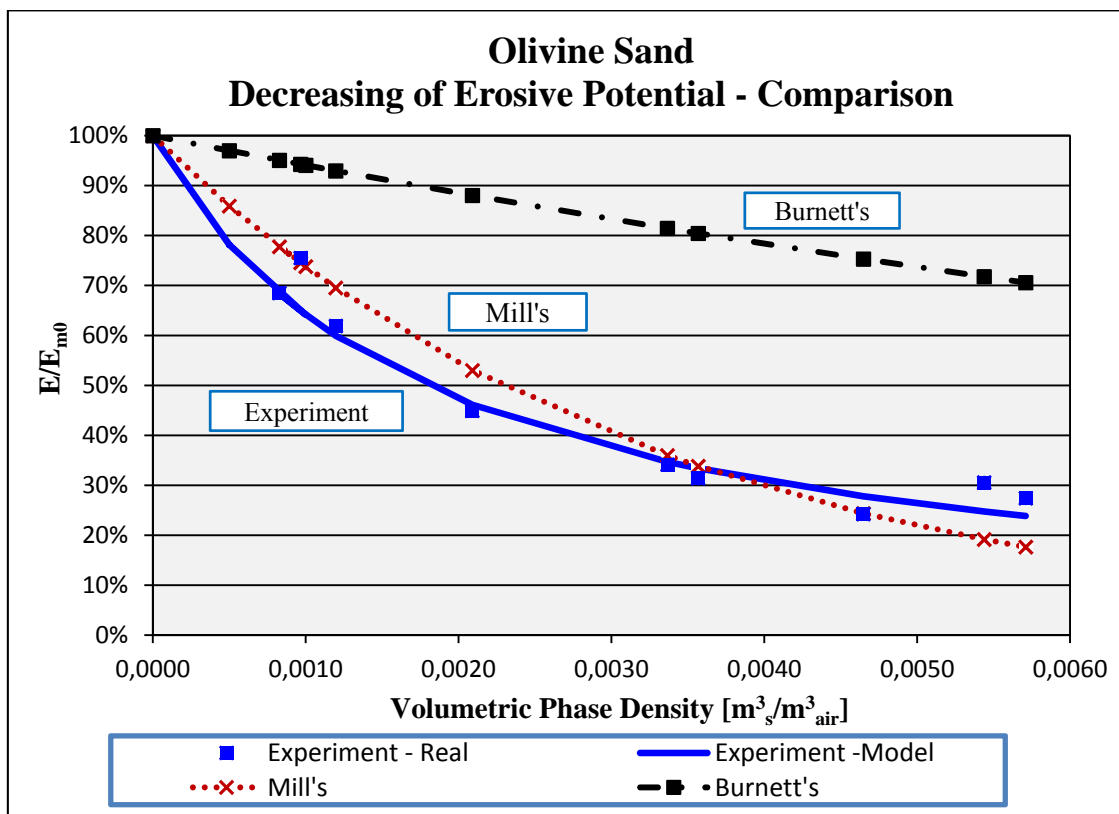


Figura 14: Confronto dei risultati sull'effetto schermo ottenuti su curve di trasportatori pneumatici e misuratori di usura centrifughi

Un ulteriore aspetto è il profilo superficiale del bersaglio, cioè la doppia curvatura della superficie interna della curva porta ad una maggiore possibilità di collisioni di particelle rispetto ad una superficie piana come quella presente nei tester centrifughi. Anche la gamma molto più varia di angoli d'impatto presenti in una curva, rispetto alla stretta gamma di angoli d'impatto del tester, favorisce inevitabilmente la probabilità di collisioni tra particelle.

Effetto delle dimensioni delle particelle

Per l'effetto di schermatura, le collisioni inter-particelle svolgono un ruolo importante e hanno un'influenza molto significativa sull'usura erosiva delle curve. Ovviamente con particelle di piccole dimensioni, il numero di particelle aumenta drasticamente, il che aumenterà la probabilità di collisioni. Tuttavia

l'effetto delle dimensioni delle particelle non è mai stato preso in considerazione in studi precedenti sull'effetto di schermatura.

In generale, la dimensione delle particelle può avere un valore critico, sotto il quale il tasso di usura scende bruscamente. Per trasportatori pneumatici, i dati disponibili suggeriscono che la dimensione critica delle particelle è di circa 60 micron [6]. Questo fenomeno sembra essere confermato da questo studio. Negli esperimenti la dimensione media della sabbia di olivina era 190 μm e la dimensione di farina di silice era 17 micron. Per questi due materiali, la densità delle particelle solide sono molto simili, 3.14 g/cm^3 per la sabbia di olivina e 2,69 g/cm^3 per la farina di silice, e la durezza è simile. I risultati in Figura 8 mostrano che la velocità di erosione specifica della sabbia di olivina è circa 20 volte maggiore della farina di silice.

In Figura 13 si può vedere che, nonostante il rapporto 20:1 di differenza nei tassi di erosione e il rapporto 11:1 nella dimensione delle particelle, la tendenza alla schermatura di materiali fini e grossolani con analoghe densità è molto simile. Originariamente, le attese erano che l'effetto schermante sarebbe stato più pronunciato per particelle più fini. Questo a causa dell'elevato numero di particelle in un'unità di volume che corrispondono ad una maggiore probabilità di collisioni, ma i risultati ottenuti non confermano questa teoria.

Effetto della densità delle particelle

È noto che la densità del materiale di cui sono composte le particelle solide ha condiziona l'usura erosiva, ma l'influenza della densità sull'effetto schermo non è stata ancora studiata, anche se è stata occasionalmente commentata [17].

Quando la granulometria è simile, è del tutto evidente che le particelle pesanti forniscono più energia cinetica al processo erosivo rispetto alle particelle più leggere. A parità di concentrazione volumetrica e granulometria, la probabilità di collisioni tra particelle deve essere la stessa, ma le perdite di energia causate da ogni collisione saranno diverse se le particelle hanno massa differente. Inoltre, l'interazione con il flusso d'aria può essere diversa, poiché le particelle più leggere tenderanno a seguire maggiormente il flusso di aria essendo meno soggette alle forze di inerzia.

Pertanto in questo studio sperimentale, sono stati essi a confronto i risultati ottenuti con polvere di legno e farina di silice, i quali avevano simile granulometria e diversa densità.

Come mostrato in Figura 8, la farina di silice, la quale ha una densità pari a $2,69 \text{ g/cm}^3$, ha prodotto un'usura specifica maggiore di circa 20 volte più grande della polvere di legno ($0,443 \text{ g/cm}^3$), ma questo è quasi certamente principalmente grazie alla durezza molto maggiore della farina di silice.

Quando i risultati vengono convertiti al potenziale erosivo, l'influenza della densità delle particelle sull'effetto schermo si vede chiaramente. In Figura 13 si può trovare che l'effetto di schermatura per la farina di silice è maggiore che per le polveri di legno. La tendenza evidente è che le particelle più pesanti sono maggiormente influenzate dall'effetto schermo. Per una concentrazione volumetrica pari a $0.0025 \text{ m}^3/\text{m}^3_a$, il rapporto E/Em0 per polvere di legno era circa 65%, mentre per la farina di silice era circa 45% e lo stesso per la sabbia di olivina. Questo risultato dimostra chiaramente che la densità delle particelle ha un effetto più significativo della dimensione particellare.

In un primo momento, questo sembra difficile da razionalizzare. Si poteva pensare che nel caso di farina di silice e polvere di legno accadessero gli stessi effetti di schermatura in quanto, a parità di dimensioni delle particelle, si sarebbero dovute avere lo stesso numero di collisioni inter-particella. Tuttavia siccome particelle più pesanti trasportano più energia cinetica, quando queste non colpiscono il bersaglio, provocano un rapido decadimento del potenziale erosivo dell'intero flusso. Sembra ragionevole ipotizzare che quando il numero di collisioni di particelle è simile, una perdita di energia cinetica diversa può causare una differenza nel comportamento dei materiali in funzione della concentrazione volumetrica e dell'effetto schermo.

Una spiegazione alternativa, con queste particelle così piccole, potrebbe trovarsi in considerazioni di tipo aerodinamico, perché le particelle di polvere di legno essendo più leggere rispetto alla farina di silice, possono seguire maggiormente il flusso d'aria evitando di scontrarsi con il bersaglio.

Tuttavia i risultati dei test per questi tre materiali hanno dimostrato che l'effetto sulla densità delle particelle schermatura è molto più importante degli effetti della dimensione delle particelle.

Conclusioni

L'influenza delle dimensioni, della densità e della concentrazione delle particelle sull'usura erosiva di una curva nel trasporto pneumatico è stata studiata sperimentalmente.

Per quanto riguarda l'influenza delle dimensioni delle particelle, i risultati indicano un'apparente indipendenza nei confronti degli effetti di schermatura, anche tra particelle con una differenza di dimensioni 10:1 e 20:1, ma una forte differenza nei tassi di erosione specifici.

Per quanto riguarda la densità delle particelle solide, questa dimostra un effetto molto più significativo sugli effetti di schermatura. Le particelle più dense presentano fino al 50% in più di effetto schermante rispetto a quelle più leggere. Tuttavia la differenza tra gli effetti di schermatura è ancora relativamente bassa se confrontata con la differenza nei tassi di erosione specifici.

In questo studio, l'usura specifica $[g/t]$ è stata utilizzata per calcolare un nuovo parametro, chiamato "resistenza all'usura", definito come il reciproco della stessa. Graficando la resistenza all'usura in funzione della concentrazione della fase solida si è notata una tendenza pressappoco lineare e grazie a questa si è costruito un modello per l'usura specifica.

I dati raccolti sperimentalmente sono stati corretti con fattori correttivi che tenessero conto della degradazione del materiale dovuta ai multipli passaggi all'interno del trasportatore pneumatico.

Infine per poter valutare l'effetto di schermatura ed eseguire dei confronti tra i risultati ottenuti per i diversi materiali, è stato introdotto un parametro inteso come il rapporto tra l'usura specifica misurata e l'usura specifica per concentrazioni tendenti a zero.

Confrontando questi risultati con altri dati di dominio pubblico, è evidente che l'effetto di schermatura in una curva di un trasportatore pneumatico è molto maggiore di quello nei tester rotanti di erosione (acceleratori centrifughi), probabilmente a causa della probabilità molto inferiore di collisioni interparticellari nei tester.

In un contesto industriale c'è una serie di risultati importanti:

- L'effetto di schermatura nelle curve è molto maggiore rispetto ai tester di erosione. Quindi per formulare previsioni accurate è necessario utilizzare i

risultati del test di erosione per ottenere valori dell'usura specifica solo per concentrazioni di solido molto basse per poi utilizzare modelli appositi costruiti per trasportatori pneumatici. Per esempio, ad una concentrazione volumetrica di 0.002, che per la farina di silice corrisponde ad un rapporto di carico pari a 5 (valore nella media per trasporti in fase diluita) la schermatura riduce l'erosione specifica di un fattore due. Ignorando questo fenomeno si introdurrebbe un errore 2:1 nella previsione della vita della curva.

- L'effetto schermante sembra essere insensibile alla dimensione delle particelle per particelle di densità simile, ma dipende dalla densità delle particelle.
- Tuttavia, le differenze misurate dell'effetto schermante rimangono relativamente moderate rispetto all'importanza assoluta del fenomeno (per esempio si passa da un 50% ad un 70%). Questo nonostante l'utilizzo di materiali con una differenza nelle dimensioni delle particelle pari a 10:1 e pari 500:1 di usura specifica.
- Nel complesso, per un progettista, è molto importante avviare un test specifico di usura con il materiale che deve essere trasportato dal sistema in esame, per non incappare facilmente in grossi errori nella previsione della vita media di una curva. Se l'effetto di schermatura viene ignorato, la previsione di vita della curva sarà sottostimata, il che porterà a costi di costruzione più elevati, a causa della scelta di condotti più spessi o più sofisticati.

Sviluppi futuri

Riuscire a raccogliere ulteriori dati utilizzando materiali con una più ampia gamma di dimensioni delle particelle, densità e durezza sarebbe molto utile per approfondire il fenomeno dell'effetto schermo.

Inoltre, l'effetto del diametro della condotta non è stato esaminato in questo studio ma sarebbe interessante a fini pratici perché condotti industriali sono costruiti con una vasta gamma di diametri.

Anche il degrado delle particelle nei trasportatori pneumatici deve essere studiato più in dettaglio in modo da applicare ad ogni prova fattori di

degradazione più precisi, perché questo influisce seriamente sull'usura dei materiali strutturali.

Infine si suggerisce uno studio della resistenza all'erosione a concentrazioni di solido più elevate per tutti i tipi di materiali di prova. È possibile che altri materiali possano mostrare un valore "soglia" di concentrazione di particelle al sopra del quale l'usura è molto più lenta rispetto alle basse concentrazioni di particelle, come è stato trovato per la farina di silice.

References

- S. Fokeer, S. Kingman^a, I. Lowndes^a, A. Reynolds^b, “*Characterisation of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying - a review*”, [Chemical Engineering and Processing: Process Intensification](#), Vol. 43, Issue 6, pp. 677, 2004.
- G.P. Tilly, “*Erosion caused by impact of solid particles*”, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 13, pp 287–319, 1979.
- G.P. Tilly, W. Sage, “*The interaction of particle and material behaviour in erosion processes*”, Wear, Vol. 16, pp 447-465, 1970.
- D. Mills, J.S. Mason, “*Conveying velocity effects in bend erosion*”. Journal of Pipelines, Vol. 1, pp 69-81, 1981.
- G.P. Tilly, “*Erosion caused by airborne particles*”, Wear, Vol. 14, pp 64-69, 1969.
- D. Mills, J.S. Mason, “*The effect of particle size on erosion of pipe bends in pneumatic conveying systems*”, Proc Powtech '79, NEC Birmingham. March 1979.
- J.E. Goodwin, W. Sage, G.P. Tilly, “*Study of erosion by solid particles*”, Proc IMechE, Vol. 183, No 15, pp 279-292, 1969-70.
- D. Mills, J.S. Mason, “*Particle concentration effects in bend erosion*”, Powder Technology, Vol. 17, Issue 1, pp 37-53, 1977.
- T. Deng, A.R. Chaudhry, M. Patel, I. Hutchings, M.S.A. Bradley, “*Effect of Particle concentrations on erosion rate of mild steel bends in a pneumatic conveyor*”, Wear 258, pp. 480-487, 2005.

- H.H. Uuemois, I.R. Kleis, “*A critical analysis of erosion problems which have been little studied*”, *Wear* 31, pp. 359–371, 1975.
- D.R. Andrews, N. Horsfield, “*Particle collisions in the vicinity of an eroding surface*”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 16, pp. 525–538, 1983.
- K. Anand, S.K. Hovis, H. Conrad, R.O. Scattergood, “*Flux effects in solid particle erosion*”, *Wear* 118, pp. 243–257, 1987.
- D. Mills, “*Erosive Wear Problems in Industry with Particular Reference to Process Plant, Power Station and Bulk Solids Handling Systems*”, SOLIDDEX’86 Conference/Exhibition, Harrogate, 1986.
- R. Hanson, D. Allsopp, T. Deng, D. Smith, M.S.A. Bradley, I.M. Hutchings, M.K. Patel, “*A model to predict the life of pneumatic conveyor bends*”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 216 no. 3, pp. 143-149, 2002.
- A.J. Burnett, S.R. De Silva, A.R. Reed, “*Comparisons between “sand blast” and “centripetal effect accelerator” type erosion testers*”, *Wear*, Vol. 186–187, Part 1, pp. 168-178, 1995.
- A.J. Burnett, “*The Use of Laboratory Erosion Tests for the Prediction of Wear in Conveyor Bends*”, PhD Thesis, The Wolfson Centre for Bulk Solids Handling Technology, University of Greenwich, London, UK, 1996.
- Finnie, “*Some observations on the erosion of ductile metals*”, *Wear* 19, pp. 81-90, 1972.
- S.R. Woodhead, A.N. Pittman, S.J. Ashenden, “*Laser Doppler Velocimetry Measurements of Particle Velocity Profiles in Gas-Solid Two-Phase Flows*”, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1995. IEEE IMTC/95. Proceedings. 'Integrating Intelligent Instrumentation and Control'*.