

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**  
*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*  
*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA MAGISTRALE*

**TESI DI LAUREA**  
In  
**IMPIANTI MECCANICI M**

**Progettazione ed esercizio di un impianto  
sperimentale per il trasporto pneumatico in fase  
densa dell'atomizzato di barbottina**

CANDIDATO:  
**STEFANO LAURENZI**

RELATORE:  
**Chiar.mo Prof. CESARE SACCANI**

CORRELATORI:  
**Prof. AUGUSTO BIANCHINI**  
**Prof. MARCO GENTILINI**  
**Dott. MARCO PELLEGRINI**

---

Anno Accademico 2015/2016

Sessione I



# Indice

Introduzione.....	1
1. L'industria ceramica e la Barbottina.....	3
1.1 L'industria ceramica.....	3
1.2 Produzione di piastrelle di ceramica .....	4
1.3 Trasporto Atomizzato di Barbottina.....	6
1.4 Azienda Technosilos S.N.C.....	8
2. Sistemi di trasporto meccanici.....	9
2.1 Sistema a coclea .....	9
2.1.1 Componenti .....	9
2.1.2 Vantaggi e svantaggi.....	10
2.2 Sistema con nastri trasportatori .....	11
2.2.1 Componenti .....	12
2.2.2 Vantaggi e svantaggi.....	13
3. Sistema di trasporto pneumatico.....	15
3.1 Introduzione al trasporto pneumatico.....	15
3.2 Campi di applicazione .....	15
3.3 Classificazione generale .....	16
3.3.1 Impianto ad aspirazione .....	17
3.3.1 Impianto in compressione .....	18
3.4 Parametri fondamentali .....	19
3.4.1 Portata massica di aria.....	19
3.4.3 Umidità dell'aria .....	20
3.4.2 Velocità dell'aria.....	21
3.4.5 Densità materiale.....	23
3.4.4 Velocità di caduta libera del materiale.....	25
3.4.6 Rapporto di miscela .....	26
3.5 Fasi del trasporto .....	27
3.5.1 Fase diluita .....	27
3.5.2 Fase densa .....	28
4. Impianto Sperimentale di trasporto pneumatico.....	31

4.1 Layout impianto .....	31
4.1.1 Gruppo di carico e dosatore .....	32
4.1.1.1 Portata di trafilamento valvola rotativa.....	34
4.1.2 Gruppo compressore .....	38
4.1.3 Rete di distribuzione .....	40
4.1.4 Gruppo di scarico .....	41
4.2 Strumentazione impianto.....	44
4.2.1 Strumenti di controllo .....	45
4.2.1.1 Valvola di regolazione della portata di aria .....	46
4.2.1.2 Pressostato differenziale e piastra forata.....	46
4.2.1.3 Trasduttore di pressione e di temperatura .....	49
4.2.2 Strumentazione lungo linea.....	51
5. Analisi sperimentale .....	53
5.1 Analisi granulometrica atomizzato di barbotina .....	53
5.1.1 Curva di essiccamento .....	54
5.1.2 Procedura di test.....	55
5.1.3 Determinazione valore medio e deviazione standard di confronto .....	57
5.1.4 Confronto materiale vergine e trasportato.....	58
5.2 Prove di trasporto .....	63
5.3 Diagramma di stato .....	65
5.3.1 Determinazione sperimentale della curva .....	68
5.4 Determinazione delle migliori condizioni di trasporto.....	69
6. Caratterizzazione del trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbotina .....	71
6.1 Andamento della perdita di carico sperimentale .....	71
6.2 Simulazione numerica del processo di trasporto pneumatico .....	76
Conclusioni.....	79
Appendice.....	81
Bibliografia.....	82

# Introduzione

L'industria ceramica italiana, leader mondiale nella produzione di piastrelle, è da anni impegnata nello sviluppo di politiche sostenibili, progetti e investimenti indispensabili per limitare l'impatto ambientale delle proprie attività produttive e aumentare il proprio livello di competitività.

La posizione di leadership mondiale dell'industria ceramica italiana è legata non solo all'eccellenza del prodotto, ma anche all'attenzione rivolta, dalle aziende del settore, allo sviluppo di nuove tecnologie che consentano il risparmio e il riciclo delle materie prime e la riduzione dell'emissione nell'ambiente di sostanze inquinanti derivate dalla produzione.

In questo contesto si inserisce l'elaborato che segue, frutto di un periodo di tirocinio trascorso presso Technosilos. L'azienda romagnola, impegnata nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie, ha progettato e realizzato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna, un impianto sperimentale per il trasporto pneumatico in fase densa dell'atomizzato di barbotina, elemento base per la produzione di piastrelle ceramiche.

L'elaborato, strutturato in sei capitoli, ha come obiettivo principale quello di descrivere l'impianto pilota sopra menzionato e di riportare i risultati delle analisi sperimentali, condotte per la caratterizzazione del trasporto dell'atomizzato di barbotina, necessarie per la futura progettazione di un impianto in scala industriale.

Nel primo capitolo verrà, brevemente, presentata l'industria ceramica italiana e le fasi per la produzione delle piastrelle di ceramica, con particolare attenzione al tema del trasporto di materiale tra i vari reparti produttivi. Nel capitolo due, poi, si analizzeranno in via preliminare le problematiche collegate ai tradizionali sistemi di movimentazione di materiale sfuso, facendo un confronto tra quelli più comunemente usati e quello pneumatico. Quest'ultimo, infatti, può rappresentare, per il materiale oggetto di studio, un'alternativa ai sistemi di movimentazioni classici, quali nastri trasportatori e coclee meccaniche che, pur

assicurando elevati volumi di movimentazione, non salvaguardano l'integrità del materiale trasportato, a causa degli urti tra le particelle di atomizzato e le parti meccaniche degli stessi. Lo sgretolamento dell'atomizzato di barbotina, oltre a rendere quest'ultimo inutilizzabile per la produzione delle piastrelle, è responsabile dell'emissione nell'ambiente di lavoro di polveri fini contenenti silice cristallina libera che compromettono la salubrità dell'aria e la salute dei lavoratori. Al contrario, il sistema di trasporto pneumatico, del quale si riporta una descrizione funzionale nel capitolo tre e quattro, garantisce il minimo rischio di formazione di polveri fini contenenti silice, grazie al totale confinamento del materiale all'interno di una conduttura.

Affinché l'industria ceramica possa beneficiare di tale soluzione innovativa, in grado di ridurre emissioni inquinanti, costi ed inefficienze, è necessario definire le condizioni di esercizio attraverso le quali deve lavorare un impianto di trasporto pneumatico per garantire portate di materiale paragonabili a quelle dei sistemi di movimentazione classici, conservando, allo stesso tempo, la granulometria del materiale originario.

A tal proposito, nel capitolo cinque verranno esposti i risultati delle analisi sperimentali effettuate sull'impianto. In particolare verranno illustrate le prove di trasporto condotte e, a valle di ognuna di queste, l'attenzione si focalizzerà sulla granulometria del materiale processato, paragonando la stessa a quella del materiale vergine di riferimento. Successivamente, in base alla corrispondenza delle curve granulometriche dei due materiali, verrà calcolato il rapporto di miscela e la pressione media dell'aria di convogliamento con cui è stata effettuata la prova di trasporto. La determinazione di questi due valori è fondamentale per costruire sperimentalmente il diagramma di stato per la sola fase densa del trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbotina.

Infine, nel sesto ed ultimo capitolo, si riporteranno i risultati delle simulazioni effettuate sul software TPSimWin, basato su calcolo agli elementi finiti e algoritmi per la caratterizzazione del comportamento di un flusso bifase. Tali simulazioni sono necessarie per determinare le principali caratteristiche del materiale da trasportare, quali diametro equivalente della particella sferica, coefficiente di attrito in rettilineo e coefficiente di attrito in curva.

# 1. L'industria ceramica e la Barbottina

## 1.1 L'industria ceramica

L'industria italiana delle piastrelle di ceramica rappresenta per il nostro paese un settore di particolare importanza. Il comparto ceramico, che al 31 dicembre 2013 contava circa 236 aziende, secondo le indagini statistiche sull'industria italiana, redatta da Confindustria Ceramica nel 2014, si conferma uno dei leader mondiali dell'industria Made in Italy, alla luce del fatturato export che supera la soglia dell'80% sul totale fatturato dalle industrie ceramiche italiane. Sempre nel 2013, la produzione italiana di piastrelle ceramiche si è attestata a 363,3 milioni di metri quadrati di piastrelle ceramiche.

In Italia l'area in cui vi è la più alta concentrazione di aziende è la provincia modenese che, insieme a quella di Reggio Emilia, ha prodotto nel 2013 l'81,43% del totale nazionale, mentre il resto dell'Emilia Romagna si attesta sul 10,50% e tutte le altre regioni computano complessivamente un 8,07%.

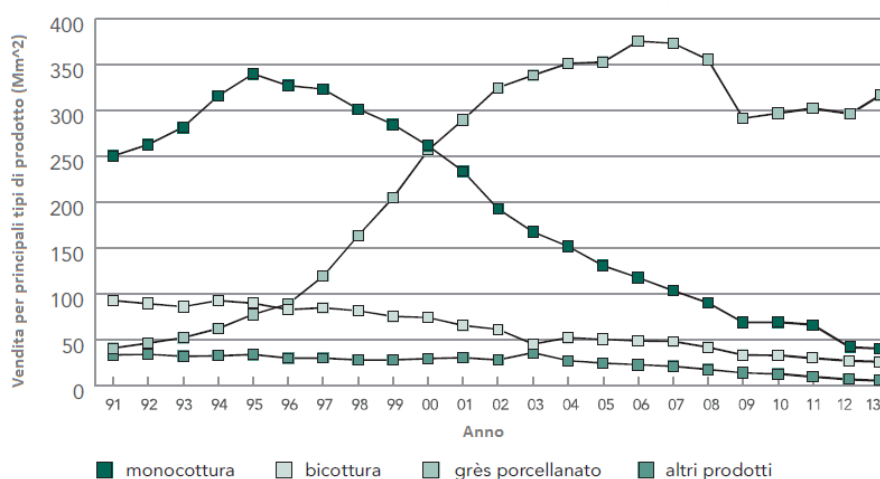


Fig1.1 – Vendite per principali tipi di prodotto espressi in milioni di metri quadri (Fonte: Indagine statistica sull'industria italiana, Confindustria ceramica)

La produzione italiana del 2013, suddivisa per tipo di prodotto, come si può vedere in Fig1.1 risulta costituita da: 11,77% monocottura, 6,46% bicottura, 79,59 % grès porcellanato, ed il 3,4% da altri prodotti quali il cotto rustico e corredi (battiscopa e pezzi speciali).<sup>1</sup>

## 1.2 Produzione di piastrelle di ceramica

L'elemento base che viene impiegato nel processo produttivo di piastrelle di ceramica, nello specifico del Grès Porcellanato, è l'atomizzato di barbotina derivato, appunto, dall'atomizzazione della stessa, legante liquido, molto viscoso e di consistenza cremosa, ottenuto dall'impasto di acqua e argilla in sospensione, in quantità variabili a seconda dell'uso.

Il processo produttivo dell'atomizzato di barbotina è costituito da vari step che possono essere riassunti molto sinteticamente in due fasi:

- Fase preliminare di macinazione del materiale: una volta arrivati nello stabilimento di produzione, le materie prime che andranno a formare questo impasto, costituito da un'apposita miscela di argille, sabbie e feldspati, vengono incanalate in un mulino rotativo a ciclo continuo dove avviene la macinazione eseguita per rotolamento e continuo urto dei corpi macinanti con le particelle dell'impasto al quale viene aggiunta acqua. La qualità del prodotto e la costanza delle sue caratteristiche sono assicurate da un sistema automatico di pesatura e dosaggio in continuo, in grado di garantire il mantenimento nel tempo delle esatte percentuali delle componenti secondo la formula prefissata.
  
- Fase successiva di atomizzazione: la miscela grezza, grazie all'impiego di pompe volumetriche a pistoncini tuffanti, è inviata in pressione al nebulizzatore che è dotato di un certo numero di uscite, dette lance di atomizzazione, di diametro variabile a seconda delle caratteristiche granulometriche richieste. L'atomizzato, all'uscita degli ugelli, incontra

---

<sup>1</sup> Confindustria ceramica, Indagini Statistiche sull'industria ceramica, 2013



un getto d'aria calda generato da una caldaia e immesso grazie a soffiatori o cicloni che espellono l'acqua contenuta sotto forma di vapore acqueo, permettendone una rapida solidificazione. Tali agglomerati, cavi all'interno a causa dell'elevata velocità di solidificazione e di dimensioni comprese tra i 100 e i 600 micrometri, mantengono una certa percentuale di acqua che ne garantisce la stabilità strutturale. Nello specifico l'atomizzato di barbotina, deve avere un valore di umidità relativa compreso tra 4÷7% per conferirne determinate caratteristiche al prodotto finale; al di sotto di questo valore la stabilità durante il processo di cottura del gres porcellanato viene compromessa, non permettendo una corretta compattazione del prodotto con conseguente violazione degli standard minimi di qualità.

Tra i vantaggi dell'atomizzazione della barbotina c'è, sicuramente, oltre alla riduzione degli sprechi durante la posa nello stampo per pressatura rispetto al caso in forma liquida, il miglioramento delle condizioni di trasportabilità del prodotto. Il materiale atomizzato, infatti, possiede un'ottima distribuzione granulometrica in termini di scorrevolezza, che ne garantisce una movimentazione più efficiente, verso le successive fasi di produzione, rispetto alla forma liquida. Alla fase di atomizzazione, come si può vedere da Fig1.2, segue quella di pressatura e cottura del materiale. Il materiale compattato nella fase di pressatura, si trasforma in un composto greificato, non poroso e quindi non assorbente. Esistono varie modalità di cottura ma, nel caso dell'industria ceramica, quella maggiormente utilizzata è eseguita mediante l'utilizzo di forni a rulli, di lunghezza elevata, in cui il materiale viene fatto avanzare e man mano riscaldato, mediante bruciatori. L'alto rapporto di pressatura e le elevate temperature di cottura rendono le piastrelle in Gres porcellanato quasi completamente vetrificate, conferendo loro elevate caratteristiche meccaniche di resistenza al gelo, all'abrasione e agli agenti chimici. Alla fase di cottura segue un raffreddamento lento e graduale sino a temperatura ambiente, che permette alle lastre di Gres di smorzare la tensione residuale delle fasi precedenti. Il ciclo di cottura delle lastre ha una durata che può variare dai 25' ai 35' e la temperatura massima raggiunge i 1250 °C circa.

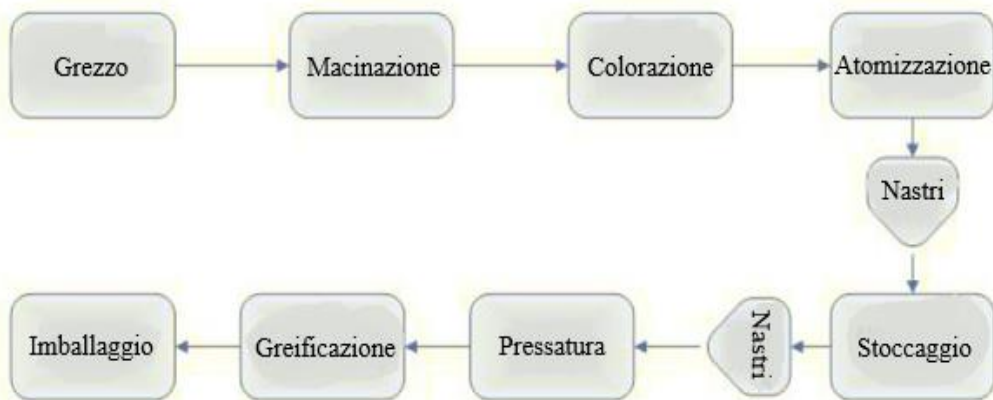


Fig1.2 – Ciclo di produzione di Grès Porcellanato (Fonte: Saccani C., *Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport*).

### 1.3 Trasporto Atomizzato di Barbottina

Nel precedente paragrafo sono stati tralasciati tutti quei passaggi intermedi previsti per la produzione di una piastrella di ceramica, poiché l'elaborato si concentra principalmente su tematiche legate al trasporto dell'atomizzato di barbottina.

Il problema principale derivante dal trasporto è che gli agglomerati sono estremamente fragili a causa della bassa quantità di acqua contenuta; da ciò derivano numerosi problemi, che condizionano lo studio e lo sviluppo del miglior sistema di trasporto.

In particolar modo l'atomizzato, se sottoposto a usura derivante per esempio da attrito con parti meccaniche durante la movimentazione o più semplicemente a causa del semplice urto tra le particelle stesse, si spacca diventando polvere fine. Lo sgretolamento del materiale, oltre a rendere quest'ultimo inutilizzabile per la produzione futura delle piastrelle ceramiche, è responsabile dell'emissione nell'ambiente di lavoro di polveri fini che compromettono la salubrità dell'aria. Tutti i materiali ceramici e i loro derivati, infatti, contengono biossido di silicio (SiO<sub>2</sub>), solido cristallino che, se inalato, si deposita negli interstizi polmonari causando fibrosi polmonare che comporta la formazione di noduli tondeggianti i quali crescono in proporzione al tempo di esposizione all'ambiente contaminato e alla quantità di polveri inalate. Ciò determina una diminuzione

della capacità polmonare dovuta alla calcificazione delle pareti interne del polmone, causando così, quale estrema conseguenza, la morte per insufficienza polmonare. Lo sviluppo di processi industriali che assicurano un ambiente di lavoro più salubre e sicuro è un fattore chiave per tutte le imprese tenute a salvaguardare sia la salute sia dei propri dipendenti, sia di coloro che possono venire a contatto più o meno direttamente con l'ambiente produttivo. Attualmente, l'atomizzato di barbotina, è movimentato mediante nastri trasportatori che prelevano il materiale dal basso all'uscita dell'atomizzatore coprendo lunghe distanze, ed attraversano l'ambiente di lavoro fino ai silos di stoccaggio.



*Fig1.3 – Uscita atomizzatore e nastro trasportatore (Fonte: Saccani C., Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport).*

I nastri trasportatori, insieme ai trasportatori a coclea, sono tra i dispositivi più utilizzati nel campo della movimentazione di materiali sfusi, e pur assicurando elevati volumi di movimentazione, non tengono conto della possibile deteriorabilità del materiale trasportato, dovuta all'urto delle particelle di atomizzato tra loro o con le parti meccaniche durante i processi precedenti. Ciò costringe l'azienda a dover installare nei propri stabilimenti energivori impianti di smaltimento delle polveri sottili, con conseguente incremento dei costi di produzione. Nei capitoli che seguono si analizzeranno in via preliminare le

problematiche collegate ai diversi tipi di trasporto facendo un confronto tra quelli più comunemente usati e quello pneumatico, tema centrale su cui si focalizza l'elaborato.

## 1.4 Azienda Technosilos S.N.C.

L'azienda Tecnosilos con sede a Bertinoro (FC) opera, da oltre quarant'anni, nel campo dello stoccaggio e movimentazione di materie prime. L'attività iniziale, imperniata sulla realizzazione di grandi sacchi flessibili, è stata successivamente ampliata con la produzione di una vasta gamma di silos di stoccaggio evolvendosi nel tempo fino a raggiungere alti livelli tecnologici anche nella realizzazione di sistemi completi di trasporto e dosaggio automatizzato.

L'azienda, da sempre impegnata nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie, ospita nei propri stabilimenti un impianto sperimentale di trasporto pneumatico. Tale impianto, sul quale ho effettuato le mie sperimentazioni, rappresenta l'evoluzione del trasporto pneumatico "classico" volto a misurare e controllare le grandezze in gioco solitamente trascurate. Grazie a sensori di pressione e temperatura, infatti, è possibile tener sotto controllo lo stato igrometrico del materiale, evitando indesiderate variazioni di umidità nel prodotto durante il trasporto.



*Fig1.4 – Impianto di trasporto pneumatico sperimentale sito in Technosilos*

## 2. Sistemi di trasporto meccanici

Nel seguente capitolo verranno brevemente descritti i due principali sistemi di trasporto meccanico: sistemi a coclea e a nastro trasportatore. Questi due metodi di trasporto di materiale sfuso pur essendo abbastanza economici non salvaguardano l'integrità del materiale, la qualità dell'aria nell'ambiente produttivo e condizionano, inoltre, pesantemente il layout dell'impianto produttivo nei quali sono inseriti

### 2.1 Sistema a coclea

I trasportatori a coclea sono sistemi per la movimentazione di liquidi e materiali inerti completamente chiusi, i quali consentono di realizzare un trasporto efficace senza il rilascio di polvere e al riparo dalle intemperie. Il funzionamento della coclea si basa sulla cosiddetta vite di Archimede, ovvero una spirale che, grazie alla sua forma elicoidale, riesce a trasportare materiale da un punto posto a livello inferiore a un sito posto a livello superiore facendolo avanzare per spinta diretta e non per attrito. Altre configurazioni prevedono l'installazione in piano e verticale (coclea elevatrice).

#### 2.1.1 Componenti

Gli impianti a coclea sono solitamente costituiti da:

- Gruppo motoriduttore con trasmissione a cinghia o a catena;
- Albero e organi di sostegno;
- Bocche di carico e scarico;
- Portelli di Pulizia;
- Spirale, in acciaio al carbonio o Inox.

Particolare attenzione va posta sul materiale e sulla costruzione della spirale in quanto rappresenta l'elemento cardine che esegue la movimentazione del materiale. L'impiego di acciaio inossidabile, resistente alla corrosione, nella realizzazione della spirale, è legato alla sua ottima interazione con i prodotti che devono mantenere inalterate specifiche caratteristiche ma anche per la facile pulizia del sistema. Durante il normale funzionamento, la spirale dovrà resistere a usura dovuta all'urto o allo strisciamento del materiale, evitando di deteriorarsi e di rilasciare frammenti che potrebbero mescolarsi con il prodotto causando malfunzionamenti nelle macchine poste a valle. Il rischio dovuto all'usura della vite è anche quello di contaminare un prodotto che deve rispettare determinate qualità; a questo proposito bisogna introdurre a monte o a valle appositi dispositivi per la separazione delle impurità prodotte.

Gli impianti di movimentazione a coclea hanno, di solito, contenute lunghezze, per evitare l'insorgere di problemi strutturali, quali l'inflessione dell'albero. Il peso di quest'ultimo, insieme a quello della spirale, determina l'inflessione della struttura causando problemi di strisciamento con possibile arresto della coclea, sovraccarico dei motori, nonché una discontinuità nel trasporto del materiale. A tal proposito è possibile equipaggiare il sistema con sostegni atti a limitare la freccia dell'albero, i quali però, determinano un aumento dei costi di installazione e di quelli relativi agli interventi manutentivi.

## 2.1.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi di un trasporto mediante coclea sono:

- Contenuti costi di installazione;
- Portata regolabile e variabile;
- Nessuna movimentazione di aria;
- Dosaggio preciso;
- Facilità nell'ispezione e pulizia;
- Possibilità di funzionamento inverso;
- Lunga durata nel tempo;
- Contenuta manutenzione.

Gli svantaggi sono:

- Lunghezza limitata;
- Tendenza a macinare il materiale da trasportare;

## 2.2 Sistema con nastri trasportatori

I nastri trasportatori sono tra i dispositivi più utilizzati nel campo della movimentazione di materiali inerti, oggetti o materiali destinati all'elaborazione in scala industriale, come la produzione in una catena di montaggio o in un processo continuo. Il movimento è garantito dalla presenza dell'attrito statico del materiale sul nastro stesso.



*Fig2.2 – Esempio di nastro trasportatore installato in un'industria ceramica (Fonte: C.Saccani, A. Bianchini, M.Pellegrini - Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport)*

## 2.2.1 Componenti

Generalmente i nastri trasportatori sono costituiti, oltre che dal nastro vero e proprio, il quale esegue fisicamente il lavoro di trasporto, da tutti i componenti ausiliari che garantiscono il corretto funzionamento:

- Rulli superiori ed inferiori per il sostegno del nastro;
- Puleggia motrice con gruppo motoriduttore;
- Puleggia di rinvio e gruppo tenditore del nastro;
- Telaio;
- Tramoggia di carico e di scarico;
- Eventuali componenti ausiliari, quali dispositivi di pulizia del nastro, dispositivi di frenatura, bordi e sponde laterali, ecc.

La progettazione di un nastro trasportatore viene eseguita a partire da:

- Specifiche richieste dal cliente;
- Capacità produttiva;
- Condizioni fisico-chimiche del materiale prima, durante e dopo il trasporto;
- Ubicazione e layout dell'impianto;
- Specifiche su ambiente e sicurezza;

Le variabili da considerare sono ovviamente innumerevoli. Il trasporto con nastro è economico nella misura in cui il volume di materiale da movimentare è sufficientemente elevato da permetterne un utilizzo continuo e le distanze che si riescono ad ottenere, possono variare da pochi metri a chilometri a seconda delle necessità. Nella quasi totalità dei casi il nastro risulta esposto all'ambiente esterno, in quanto una sua copertura comporterebbe un aumento di costi di installazione e manutenzione e l'annessa difficoltà di eseguire opere di manutenzione sia ordinaria che straordinaria, quindi un aumento dei costi generali e una perdita di competitività e capacità produttiva, rendendone inefficace l'utilizzo. In tutte quelle applicazioni dove non sono presenti particolari richieste a livello di deteriorabilità, la progettazione del sistema di



movimentazione si limita a un dimensionamento dettato dalle caratteristiche tecniche e costruttive della struttura, dalle esigenze di produttività in accordo con le specifiche imposte dal cliente, e dal layout dell'impianto. Nell'industria ceramica, al contrario, l'integrità del materiale è di fondamentale importanza, sia per garantire il minor spreco di materiale possibile sia per non compromettere la salubrità dell'ambiente di lavoro.

## 2.2.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi sono:

- Elevate portate di movimentazione;
- Grande versatilità e sicurezza di funzionamento;
- Possibilità di coprire lunghe distanze;
- Basso costo di sorveglianza.

Per contro gli svantaggi sono:

- Costi di costruzione e di manutenzione elevati, direttamente proporzionali alla lunghezza dell'impianto;
- Difficoltà di effettuare curve e limitata pendenza;
- Sensibile consumo di energia;
- Urto frequente tra materiale e nastro;
- Deteriorabilità del materiale durante il trasporto;
- Layout d'impianto condizionato dalla posizione del nastro.



## 3. Sistema di trasporto pneumatico

### 3.1 Introduzione al trasporto pneumatico

I sistemi di trasporto pneumatico sono fundamentalmente semplici e particolarmente adatti per il trasporto di materiale in polvere, solidi granulari o materiali incoerenti. Il sistema è completamente chiuso, confinato in una condotta, senza alcun tipo di contatto e contaminazione tra materiale e parti che vengono a contatto con esso. Il trasporto pneumatico, sostanzialmente, prevede che il materiale da movimentare venga spinto nella tubazione da un fluido portante, messo in pressione o in depressione da un compressore.

Il fluido portante è aria secca, nell'ipotesi in cui si trasportino materiali igroscopici come nel nostro caso, o azoto, se il materiale da movimentare può generare atmosfere potenzialmente esplosive. Questi impianti occupano poco spazio e il condotto può essere facilmente ubicato sui muri, attraverso i tetti o anche sottoterra per evitare di occupare spazio necessario ad apparecchiature o strutture esistenti. Per garantire questa flessibilità il circuito di trasporto è dotato di gomiti o curve che garantiscono il cambio di direzione necessario, ma offrono anche una resistenza al moto del materiale e dell'aria, aumentando le perdite di carico ed aggiungendo, quindi, resistenza complessiva della condotta. Le perdite di carico, essendo direttamente proporzionali alla lunghezza della conduttura, limitano superiormente la distanza percorribile dal materiale fino ad un massimo di tre chilometri. Tuttavia, nell'ambito di esercizi industriali, e nello specifico nell'industria ceramica, tale limite è ben rispettato.

### 3.2 Campi di applicazione

Il sistema di trasporto pneumatico è utilizzato nei più diversi settori industriali, in cui si lavorano o si producono materie solide in grani o in polvere. I più importanti campi d'impiego sono: l'industria chimica e di processo, l'industria

dei materiali da costruzione, l'industria alimentare, l'industria della lavorazione del legno, le fonderie. Gli impianti pneumatici di trasporto sono, inoltre utilizzati in agricoltura per movimentare raccolti di grano, riso, ecc., e nell'industria dei mangimi.

Nel settore della ceramica, nel caso specifico degli impianti dove si produce l'atomizzato di barbotina, il trasporto pneumatico punta a risolvere il problema dell'inquinamento causato dal trasporto dell'atomizzato mediante nastri, poiché le polveri sprigionate da questo elemento durante l'uscita dall'atomizzatore e durante il suo trasporto, sono ingenti. Ciò comporta una prolungata esposizione alle polveri contenenti silice nell'ambiente di lavoro. Secondo l'American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH), il valore limite per la concentrazione di derivati della silice nell'ambiente lavorativo, calcolato come media ponderata nel tempo (10 ore lavorative al giorno; 40 ore a settimana), è definito dal TLV-TWA (Threshold Limit Value – Time Weighted Average). In Italia, negli ultimi venti anni, questo parametro è diminuito dallo 0,1 mg/m<sup>3</sup> del 1995, a 0,05 mg/m<sup>3</sup>, per arrivare a un valore attuale di 0,025 mg/m<sup>3</sup>.<sup>2</sup>

È dunque ovvio che un impianto pneumatico, confinando il materiale all'interno di una condotta, risolve quasi totalmente il problema.

### 3.3 Classificazione generale

Gli impianti di trasporto pneumatico sono costituiti dal silo, dalla tubazione vera e propria, e da un compressore. Sono indispensabili, poi, apparecchiature che introducono il materiale da trasportare nel mezzo portante, i cosiddetti alimentatori, e apparecchiature che dopo il trasporto separano nuovamente il solido dal mezzo portante, detti dispositivi separatori. In base alla disposizione degli elementi costruttivi distinguiamo, principalmente, tre tipi di impianti pneumatici: ad aspirazione, in compressione e ad aspirazione-compressione, quest'ultimi uniscono i vantaggi di entrambe le configurazioni.

---

<sup>2</sup> A. Bianchini, M. Pellegrini, C. Saccani, Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility, 2015

### 3.3.1 Impianto ad aspirazione

In un impianto in aspirazione il materiale è prelevato tramite valvole rotative, coclee o più semplicemente prese aspiranti, e convogliato, mediante una tubazione di trasporto, all'interno di una tramoggia di scarico, dove avviene la separazione tra il prodotto e l'aria di trasporto, che a sua volta viene depurata da un filtro ed evacuata. Tali tipi di impianti sono indicati per lo scarico o il trasbordo di materiali sfusi scorrevoli. Nel sistema ad aspirazione il vantaggio risiede nel fatto che la mancanza di tenuta della tubazione di trasporto non provoca comunque fuoriuscite di materiale nell'ambiente. Svantaggiosa è però la limitata portata del trasporto, condizionata dal principio dell'aspirazione, sia per quanto riguarda il volume dello stesso, sia per la lunghezza del tragitto. Per comprendere al meglio il problema si può fare riferimento alla legge dei gas ideali. Il comportamento dell'aria, infatti, alle basse pressioni, può essere ben rappresentato dalla seguente legge:

$$p \dot{V} = \dot{m} R T$$

Dove  $p$  è la pressione assoluta del gas espressa in  $(kN/m^2)$ ,  $\dot{V}$  è la portata volumetrica di aria  $(m^3/s)$ ,  $\dot{m}$  è la portata massica dell'aria  $(kg/s)$ ,  $R$  la costante universale dei gas  $(kJ/kg \cdot K)$  e  $T$  è la temperatura assoluta del gas  $(K)$ .

Ciò significa che a parità di temperatura e portata massica di aria, ad una diminuzione della pressione corrisponde un aumento della portata volumetrica di aria, con conseguente incremento di velocità. Infatti:

$$\dot{V} = C \cdot A$$

Dove  $C$  rappresenta la velocità dell'aria  $(m/s)$  e  $A$  la sezione di passaggio  $(m^2)$ . Più è alta la velocità, più sono alte le perdite di carico, proporzionali a loro volta alla lunghezza del condotto. Proprio per questo motivo la lunghezza del condotto e la portata massica di aria di un impianto di trasporto pneumatico in aspirazione, sono limitate superiormente.

In fig3.1 viene presentato il diagramma di un impianto pneumatico in aspirazione.

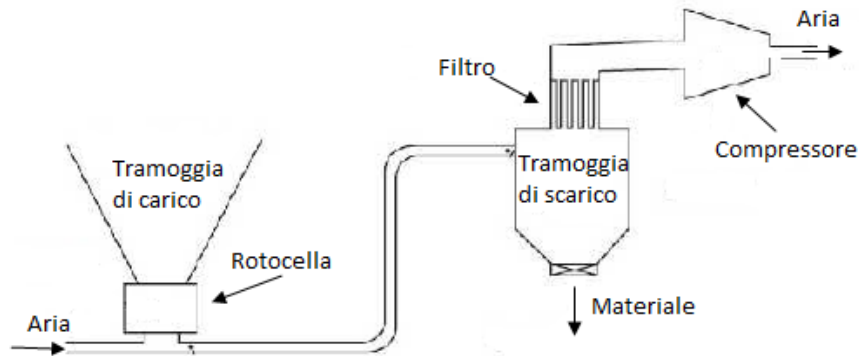


Fig3.1- sistema ad aspirazione

### 3.3.1 Impianto in compressione

L'impianto di trasporto pneumatico in pressione, rappresentato in Fig3.2 è probabilmente più diffuso rispetto a quello ad aspirazione. Tramite il sistema di iniezione che si innesta sulla tubazione, generalmente realizzato attraverso un propulsore o una valvola rotativa a tenuta, il materiale viene immesso nella tubazione, trasportato e convogliato a destinazione, dopo esser stato separato dall'aria di trasporto. Con gli impianti in pressione si possono raggiungere portate maggiori in funzione della pressione esistente.

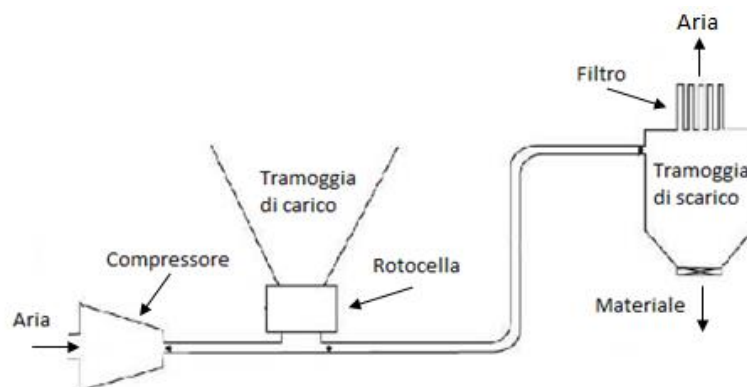


Fig3.1- sistema in compressione

## 3.4 Parametri fondamentali

Prima di definire i diversi tipi di trasporto è bene richiamare i principali parametri da tener sotto controllo durante un processo di trasporto pneumatico. Qui di seguito saranno descritti alcuni dei più influenti.

### 3.4.1 Portata massica di aria

La portata massica di aria del ventilatore, soffiante o compressore dipende sostanzialmente dalla combinazione del diametro del condotto da utilizzare, dalla velocità necessaria per convogliare il materiale e dalla densità dell'aria.

$$\dot{m} = C A \rho_f$$

Dove  $C$  è la velocità dell'aria in m/s,  $A = \frac{\pi d^2}{4}$  è la sezione del condotto espressa in m<sup>2</sup> e  $\rho_f$  è la densità dell'aria. Quest'ultima, e qualsiasi altro gas che viene utilizzato per il trasporto di materiali, è un fluido comprimibile e quindi la sua densità è influenzata sia dalla pressione che dalla temperatura. La relazione che lega la densità dell'aria a pressione e temperatura, può essere espressa nel modo più semplice mediante l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$\frac{P}{\rho_f} = R T$$

Con  $R$  costante dei gas in Nm/(kg·K) e  $T$  temperatura in K. Deduciamo quindi che la densità dell'aria aumenta all'aumentare della pressione e al diminuire della temperatura e viceversa.

Nella determinazione della densità dell'aria convogliata nella condotta di trasporto è necessario, inoltre, tenere conto dell'altitudine dell'impianto. Con l'aumentare dell'altitudine, la pressione atmosferica diminuisce, facendo diminuire contestualmente la densità dell'aria e di conseguenza la portata massica che circola nell'impianto. Nello schema di Fig3.2 è riportata la

variazione della pressione atmosferica in funzione dell'altitudine di un impianto sul livello del mare.

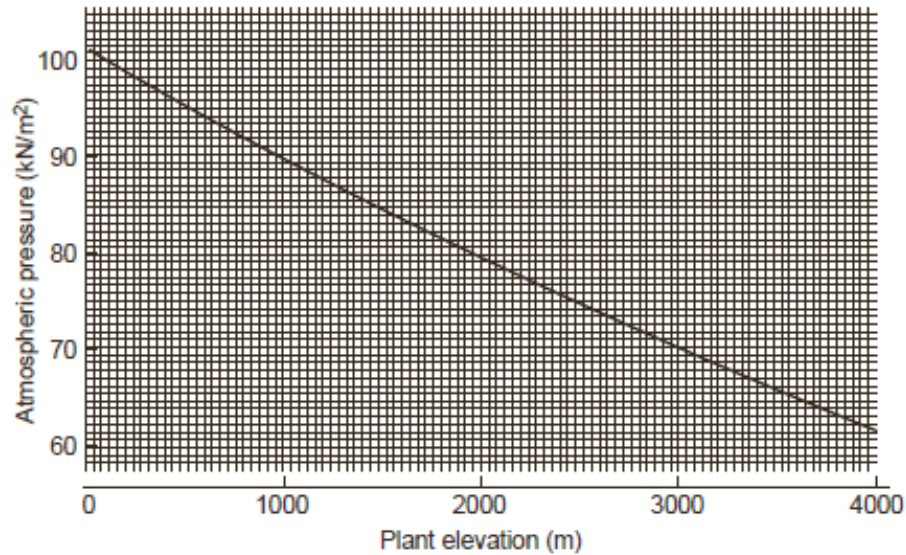


Fig.3.2 – Andamento della pressione atmosferica in funzione dell'altitudine (Fonte: D.Mills – Pneumatic Conveying Design Guide)

Nella valutazione della portata massica, ed in particolare della densità dell'aria convogliata nelle condutture dell'impianto oggetto di studio, si può trascurare il contributo dovuto all'altitudine in quanto l'impianto si trova a +50 metri s.l.m.

### 3.4.3 Umidità dell'aria

L'umidità relativa  $\varphi$ , anche detta grado igrometrico, di una miscela aria-acqua può essere definita come il rapporto tra la massa di vapore acqueo contenuta in un volume  $V$  di aria umida, ed il massimo valore in massa di vapore acqueo contenibile nello stesso volume, in condizioni di saturazione, alla stesse temperatura  $T$  e pressione  $P$ . Utilizzando la legge di stato dei gas perfetti si ha:

$$\varphi = \frac{m_w}{m_s(T)} = \frac{P_w \cdot V / (R_w \cdot T)}{P_s(T) \cdot V / (R_w \cdot T)}$$



Nelle ipotesi di miscela ideale, l'umidità relativa è anche definita come il rapporto tra la pressione parziale di vapore acqueo nella miscela  $P_w$  e la pressione di vapore saturo di acqua alla temperatura effettiva  $P_s(T)$ .

$$\varphi = \frac{P_w}{P_s(T)}$$

Alla temperatura di rugiada l'umidità relativa è per definizione del 100%.

Il controllo dell'umidità relativa dell'aria in un impianto di trasporto pneumatico per l'industria ceramica, è necessario per evitare un indesiderato essiccamento o umidificazione del materiale, entrambi dovuti all'interazione tra materiale e aria di convogliamento dello stesso. I valori tipici dell'umidità relativa del materiale sono compresi tra il 4,5-7,0%<sup>3</sup>. È facile intuire che i problemi principali dovuti alla variazione dell'umidità del solido da trasportare si verificano quando il trasporto viene condotto con alte quantità di aria di convogliamento, quindi a parità di solido, con bassi rapporti di miscela.

### 3.4.2 Velocità dell'aria

Un parametro molto importante da tenere in considerazione nella progettazione di un impianto per il trasporto pneumatico è sicuramente la velocità dell'aria. Affinché sia possibile il trasporto del solido è necessario che la velocità di convogliamento dell'aria  $v$ , dipendente dalla portata volumetrica elaborata dal compressore e dal diametro della tubazione, sia sempre maggiore della velocità di caduta libera del materiale  $W_{s0}$ , sia per le tubazioni dritte orizzontali sia per quelle verticali. (Fig3.3, Fig3.4).<sup>4</sup> Se la velocità scende al di sotto del valore minimo, nel caso di fase diluita, il materiale invece di essere in sospensione con l'aria e avanzare, cadrà nella parte inferiore del tubo formando cumuli che progressivamente andranno ad ostacolare il passaggio di ulteriore materiale

---

<sup>3</sup> A. Bianchini, M. Pellegrini, C. Saccani, Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility, 2015

<sup>4</sup> M.Weber, La Tecnica del Trasporto Pneumatico e Idraulico, 1973

incurrendo in problemi di occlusione del condotto. È quindi importante che la portata volumetrica d'aria, sia sufficiente a mantenere il valore di velocità minima richiesta in tutto il condotto di trasporto. La gamma di velocità

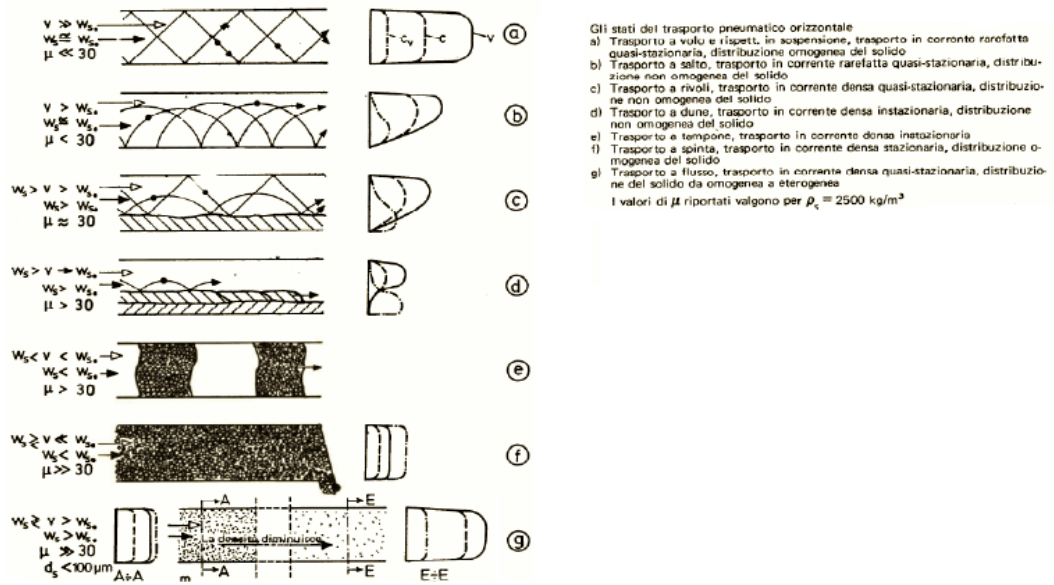


Fig.3.3 – Trasporto in tubi dritti orizzontali (Fonte: M.Weber – La Tecnica del Trasporto pneumatico e idraulico)

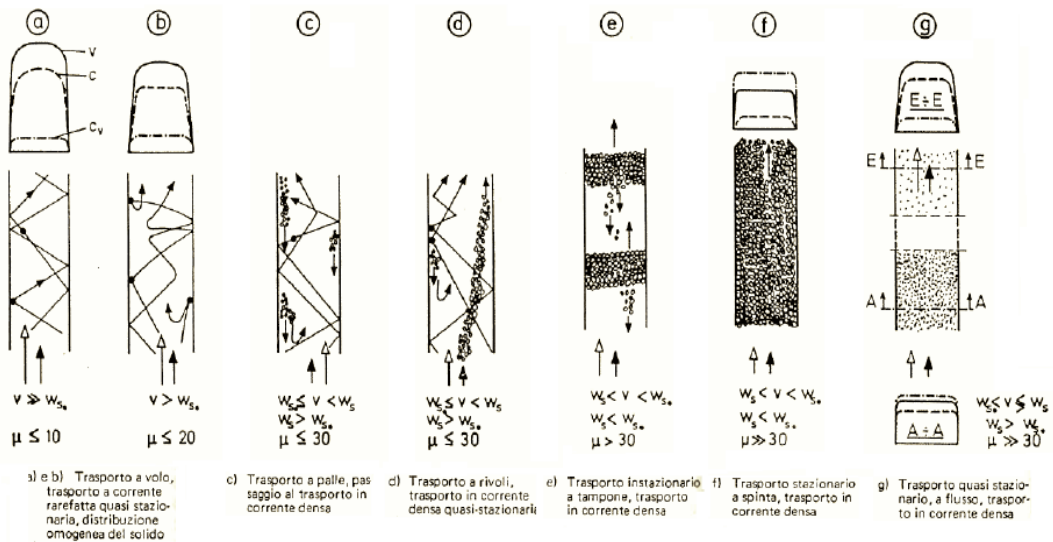


Fig.3.4 – Trasporto in tubi dritti verticali (Fonte: M.Weber – La Tecnica del Trasporto pneumatico e idraulico)

Se la velocità scende al di sotto del valore minimo, nel caso di fase diluita, il materiale invece di essere in sospensione con l'aria e avanzare, cadrà nella parte inferiore del tubo formando cumuli che progressivamente andranno ad ostacolare il passaggio di ulteriore materiale incorrendo in problemi di occlusione del condotto. È quindi importante che la portata volumetrica d'aria, sia sufficiente a mantenere il valore di velocità minima richiesta in tutto il condotto di trasporto. La gamma di velocità è relativamente stretta e, in particolare nei sistemi in fase diluita, varia da un minimo di circa 15 m/s ad un massimo di circa 30 m/s. Per i sistemi in fase densa, invece, la velocità dell'aria in ingresso nella linea di trasporto, dipendente dal rapporto di carico con cui il materiale viene convogliato e dalla natura del materiale stesso, può partire da 3 m/s. In entrambi i casi è quindi importante che la portata volumetrica d'aria, sia sufficiente a mantenere la velocità minima richiesta in tutto il condotto di trasporto, allo scopo di evitare l'intasamento della linea. Poiché l'aria è comprimibile, la portata volumetrica, e quindi la velocità dell'aria, aumenterà gradualmente dal punto di alimentazione del materiale, all'inizio della condotta, al punto di scarico del materiale e alla fine di essa.

### 3.4.5 Densità materiale

Quando si ha a che fare con materiali granulari è bene distinguere la densità particellare da quella in mucchio. Quest'ultima è definita come il rapporto tra la massa e il volume da lei occupato. Tale volume include lo spazio tra le particelle, oltre a quello da loro occupato. Essa non deve, quindi, essere confusa con la densità particellare, ossia la densità intrinseca, vera della particella, per la quale il volume è determinato escludendo sia i pori chiusi che quelli aperti.

La densità in mucchio di un solido granulare si può determinare, con l'utilizzo di una bilancia di precisione, pesando un campione di materiale non compattato che occupa un litro (uguale ad un decimetro cubo). Sulla base dei risultati conseguiti sperimentalmente, per l'atomizzato di barbotina, si è ottenuta una densità di 1109 kg/m<sup>3</sup>. Al contrario, la densità particellare dell'atomizzato di

barbottina, costituita per la maggior parte da sabbia silicea, si può valutare analiticamente come segue:

$$\rho_{\text{atomizzato di barbottina}} = \rho_{\text{silice}}(1 - \varepsilon) + \rho_{\text{aria}} \varepsilon^5$$

Dove  $\varepsilon = \frac{\text{Volume vuoto}}{\text{Volume sfera}}$

Come si può vedere in Fig3.5, l'atomizzato di barbottina presenta un canale all'interno, generato dal veloce raffreddamento dello stesso in uscita dagli ugelli dell'atomizzatore.

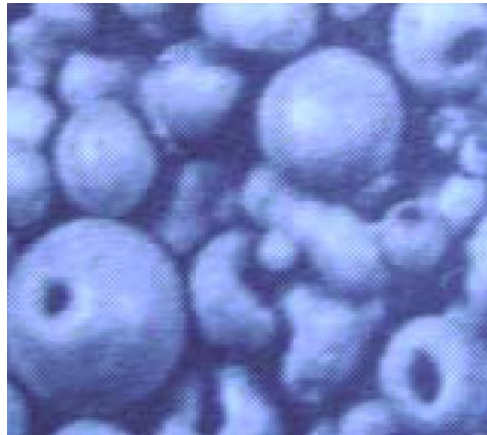



Fig3.5– Ingrandimento 300:1 atomizzato di barbottina (Fonte:C.Saccani, A. Bianchini, M.Pellegrini - Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport)

Il volume effettivo della particella è stato calcolato, con l'ausilio di un sistema CAD, a partire da una particella di granulometria media (Tab3.1).

	Diametro sfera	450 $\mu\text{m}$
	Diametro canale interno	100 - 180 $\mu\text{m}$
	Volume sfera	0,048 $\text{mm}^3$
	Volume vuoto	0,008- 0,010 $\text{mm}^3$

Tab3.1- Particella di atomizzato di barbottina

<sup>5</sup> M.Weber, La Tecnica del Trasporto Pneumatico e Idraulico, 1973

Considerando la densità della silice e dell'aria in condizioni standard rispettivamente uguale a  $2500 \text{ kg/m}^3$  e  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , si ottiene una  $\rho_{\text{atomizzato}}$  compresa tra  $1621,4$  e  $1833,55 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.4.4 Velocità di caduta libera del materiale

Prima di poter eseguire il calcolo e il dimensionamento degli impianti di trasporto pneumatico, deve essere noto il comportamento del materiale da trasportare nel mezzo portante. A tal proposito si rende necessario determinare la velocità di caduta libera dell'atomizzato di barbotina poiché, come già detto in precedenza, per garantire un corretto trasporto è essenziale che la velocità del mezzo portante sia sempre maggiore della velocità di caduta libera del solido da trasportare.

La velocità di caduta libera è stata determinata sperimentalmente, all'interno del laboratorio dell'azienda Technosilos, riprendendo, con una telecamera a sessanta fotogrammi per secondo, il moto di caduta libera di diversi campioni di atomizzato di barbotina, ciascuno di venti grammi, lasciati cadere all'interno di un tubo in polipropilene, sul quale sono indicati i vari livelli di altezza. La velocità che si ottiene dividendo lo spazio percorso per il tempo impiegato varia tra i  $2,8$  e i  $3 \text{ m/s}$ . Tale valore è stato successivamente confermato utilizzando il diagramma di lavoro, di Fig3.5, per la determinazione della velocità di caduta libera di un solido in funzione della granulometria per diverse densità del solido. Entrando nel grafico in ascissa con un diametro della particella sferica corrispondente a  $420 \mu\text{m}$  ed intersecando la curva relativa alla densità calcolata nel paragrafo precedente,  $1621,4 \text{ kg/m}^3$ , si ottiene una velocità di caduta libera uguale a  $2,8 \text{ m/s}$ . Il diametro è stato calcolato analiticamente, con le formule inverse della geometria euclidea, a partire da una sfera con un volume corrispondente a quello di una particella di granulometria media di atomizzato di barbotina uguale a  $0,038 \text{ mm}^3$ .

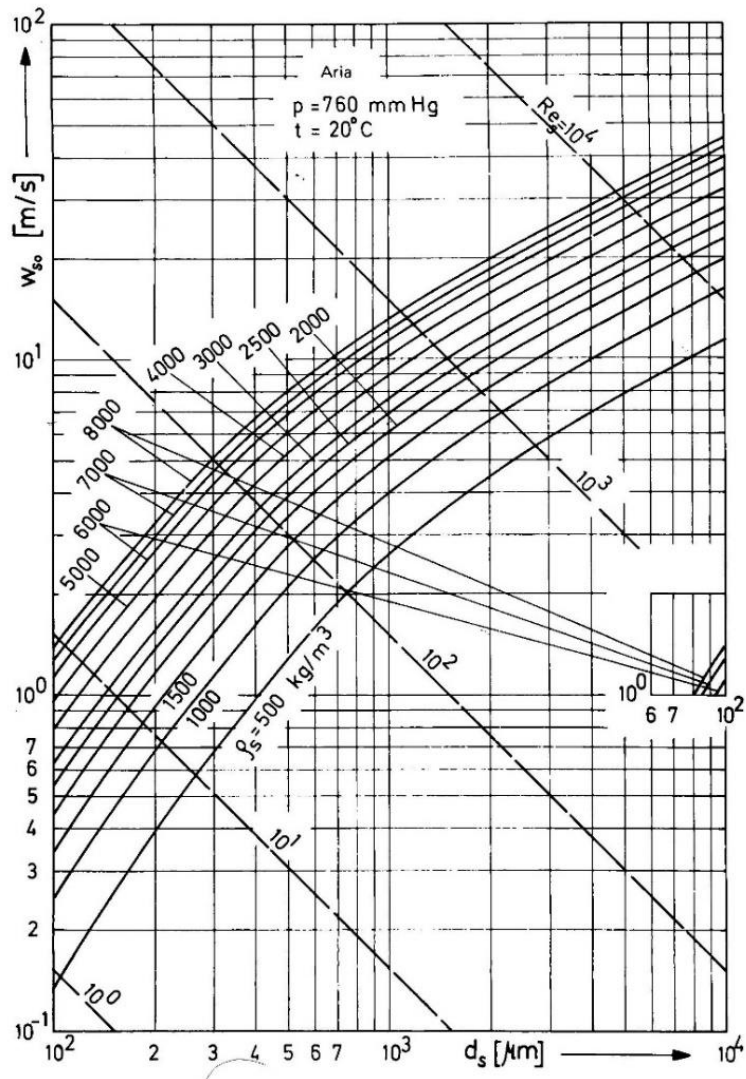


Fig3.5 – Velocità di caduta di singole particelle sferiche in aria in riposo (Fonte: M. Weber – La Tecnica del Trasporto pneumatico e idraulico)

### 3.4.6 Rapporto di miscela

Si definisce rapporto di miscela, rapporto di carico o densità di fase, il rapporto tra la portata in massa del materiale trasportato e la portata in massa dell'aria utilizzata per convogliare il materiale stesso:

$$m = \frac{\dot{m}_s}{3,6 \dot{m}_a}$$

Dove  $\dot{m}_s$  è la portata in massa di solido in ton/h,  $\dot{m}_a$  è la portata in massa di aria in kg/h e il termine scalare “3,6” rappresenta il coefficiente di trasformazione per rendere adimensionale  $m$ .

Il rapporto di miscela è un parametro importante per caratterizzare il tipo di trasporto, in quanto il suo valore, a differenza di ciò che accade per la velocità o la portata volumetrica di aria, rimane costante durante tutto il trasporto.

Alti valori del rapporto di carico si registrano quando la distanza di convogliamento è contenuta, quando la caduta di pressione attraverso la condotta è elevata, o quando la velocità di convogliamento dell'aria è contenuta.

## 3.5 Fasi del trasporto

A questo punto è possibile caratterizzare gli stati più importanti del trasporto al variare della quantità di materiale trasportata, a parità di corrente in massa del mezzo portante, o più precisamente al variare del rapporto di carico. Distinguiamo il trasporto in fase diluita e in fase densa.

### 3.5.1 Fase diluita

Il trasporto in fase diluita, anche conosciuto come trasporto a volo, è caratterizzato da un'alta velocità di convogliamento dell'aria, di gran lunga maggiore della velocità di caduta libera del singolo grano, e da un rapporto di carico minore uguale a dieci. In questo campo d'esercizio, le particelle solide sono sufficientemente distanziate tra loro per non disturbarsi a vicenda, per cui risulta possibile un volo libero delle stesse.

Il principio di funzionamento è dato dalla fluidizzazione del materiale trasportato mediante un flusso d'aria convogliato ad alta velocità, necessario per garantire la sospensione del materiale nel mezzo portante. La fluidizzazione dipende da:

- Forma, dimensioni e densità dei granuli;
- Densità e velocità del fluido trascinatore

L'elevata velocità dell'aria, quindi la notevole portata volumetrica di aria elaborata dal compressore, determina un incremento di costo per la produzione di aria compressa, rispetto al caso in fase densa con minore quantità di aria convogliata, ma garantisce, allo stesso tempo, un'elevata flessibilità sulla gamma di materiali che possono essere trasportati.

È in queste condizioni che si assiste al fenomeno di usura delle componenti strutturali dei condotti: le particelle di solido, che possiedono una notevole quantità di energia cinetica, strisciano contro le pareti interne, in particolare nei cambi di direzione, determinando un'erosione rilevante della condotta.

### 3.5.2 Fase densa

Riducendo la velocità dell'aria introdotta nell'impianto e aumentando il rapporto di carico è possibile passare ad un trasporto in fase densa. In questo stato del trasporto distinguiamo due modalità di flusso:

- Trasporto a rivoli o a dune. In questa configurazione il materiale da trasportare si muove a rivoli o a dune su un letto depositato sul fondo della tubazione, costituito perlopiù dalle particelle di granulometria più fine.
- Trasporto a tamponi o a tappi. Qui il materiale viene trasportato sotto forma di tappi, separati l'un l'altro da un tratto vuoto di aria in pressione che spinge il tappo in avanti.

La prima è possibile solo se il materiale da trasportare presenta buone caratteristiche di tenuta dell'aria ed è per questo che è generalmente limitata a materiali in polvere, come le farine dalla granulometria molto fine.

La seconda modalità è invece praticabile se il materiale ha buona permeabilità, ed è per questo che è generalmente limitato a materiali quali pellet o semi, poiché questi permettono all'aria di passare facilmente attraverso gli interstizi tra le particelle. Nella fase densa a tappi, il materiale viene spinto nel condotto a valori di velocità dell'aria inferiori rispetto a quelli della fase diluita o della fase densa.



con letto di materiale pulsante, motivo per cui l'erosione della condotta è contenuta.

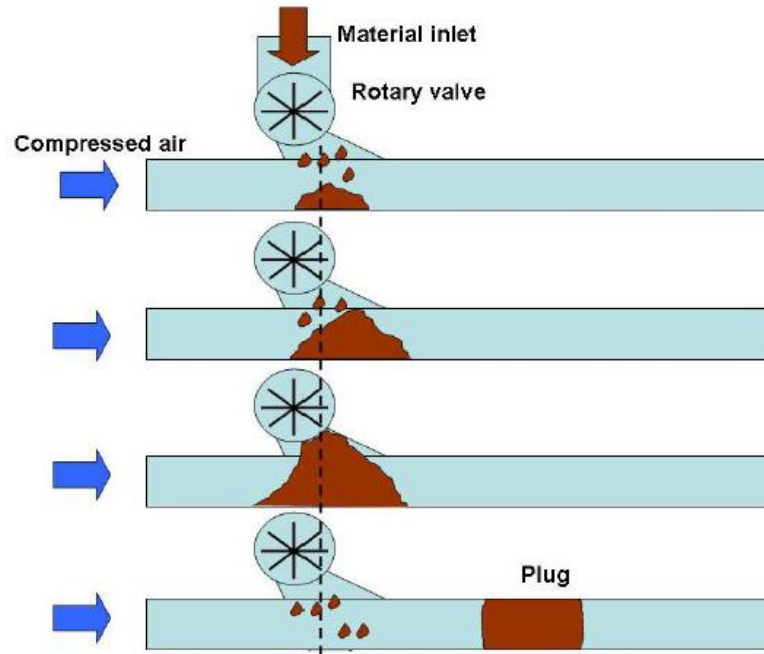


Fig3.6 – Sequenza formazione di un tappo (Fonte: C.Saccani,M.Pellegrini: *Plant design for atomized slip pneumatic conveying: environmental impact reduction in the ceramics industry avoiding product wear and fragmentation*).

Un problema che si riscontra nella fase di trasporto densa, è il pericolo che i tappi si fermino all'interno della conduttura, causando un arresto del trasporto e una discontinuità indesiderata nella portata di materiale. Ciò può accadere, ad esempio, quando si registrano pressioni di trasporto eccessive o quando le condizioni fisiche e igrometriche del materiale non consentono una buona permeabilità all'aria di trasporto. In Fig3.6 viene riportata la sequenza di formazione di un tappo.



## 4. Impianto Sperimentale di trasporto pneumatico

L'azienda Technosilos, in collaborazione con l'università di Bologna, ha progettato e realizzato, all'interno dei propri stabilimenti un impianto pilota per il trasporto pneumatico in pressione, fondamentale per testare e definire le modalità di trasporto di diversi prodotti granulari. L'impianto, cofinanziato dalla Regione Emilia Romagna all'interno del Programma regionale per la ricerca industriale, l'innovazione e il trasferimento Tecnologico (PRRIIT), si rivolge a tutte quelle aziende interessate al trasporto pneumatico che vogliono testare i propri prodotti e mettere a punto le migliori condizioni di trasporto in accordo con le specifiche esigenze produttive.

### 4.1 Layout impianto

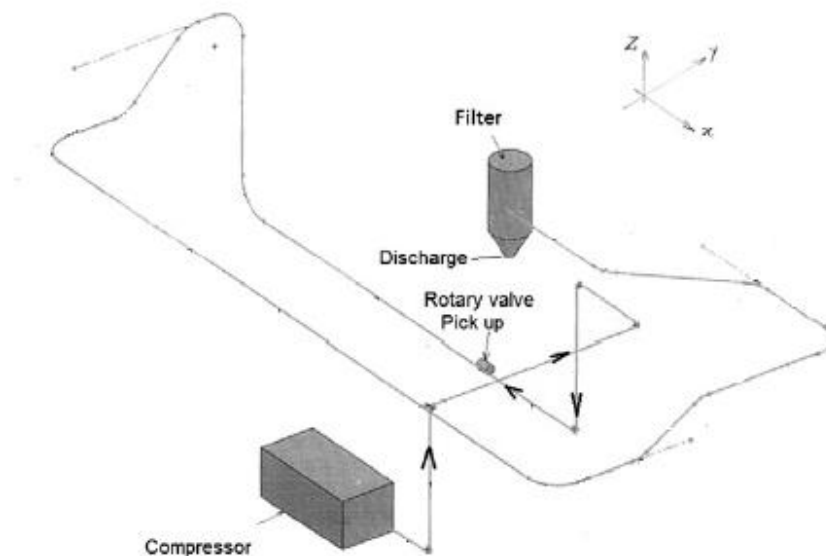


Fig4.1 – Layout impianto sperimentale (Fonte: A.Bianchini, C.Saccani - *Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility*)

L'impianto, del quale si riporta il layout in fig4.1, è sostanzialmente costituito da:

- Gruppo di carico e dosatore
- Gruppo compressore
- Rete di distribuzione
- Gruppo di scarico

#### 4.1.1 Gruppo di carico e dosatore

Il gruppo di carico è costituito da una tramoggia di media dimensione, realizzata in acciaio inox, per lo stoccaggio temporaneo o la raccolta del materiale da trasportare. La tramoggia, dotata nella sezione superiore di un portello per il caricamento manuale del prodotto, è costituita nella parte sovrastante da un parallelepipedo a sezione rettangolare, ed inferiormente da un tronco di piramide, con inclinazione idonea a facilitare il deflusso di materiale attraverso una luce di uscita. Per evitare che il materiale possa agglomerarsi eccessivamente senza riuscire a scorrere, è stato predisposto un vibratore che viene messo in funzione durante lo svuotamento della tramoggia. Il gruppo di carico è poi equipaggiato di un filtro di sfiato e da indicatori di massimo e minimo livello.

La tramoggia, come si vede in Fig4.2, è accoppiata a meno di una valvola a ghigliottina con il gruppo dosatore, costituito essenzialmente da una valvola rotativa. Questa, detta anche rotocella o valvola stellare, prevede un corpo stellare rotante all'interno di un carter in ghisa realizzato per fusione.



Fig4.2 – Valvola rotativa

La valvola stellare è il cuore dell'apparato regolatore della portata di materiale, e consiste in un una rotocella dotata di palette opportunamente sagomate che mette in comunicazione la bocca di ingresso dalla tramoggia di carico con quella di ingresso alla condotta di trasporto. In Tab4.1 si riportano le principali caratteristiche della valvola rotativa installata nell'impianto pilota.

<b>Valvola rotativa ZEPPELIN APS 320/21 DC</b>	
<i>Caratteristiche</i>	<i>Valore</i>
Volume rotore [l]	19
Diametro rotore [mm]	320
Velocità di rotazione [rpm]	18
Grado di riempimento	75%
Massima temperatura di esercizio [°C]	80
Pressione differenziale massima [bar]	4
Potenza nominale motoriduttore [kW]	1,1
Peso [kg]	445
Dimensioni principali [mm]	867 x 500 x 1104

Tab4.1 – Caratteristiche tecniche Valvola rotativa

La portata nominale di solido è pari al volume del singolo vano per il numero di vani, moltiplicato per il numero di giri al minuto. Grazie ad un inverter, apparato elettronico capace di variare la tensione e la frequenza della corrente alternata in uscita rispetto a quella in entrata, siamo in grado di modificare a piacere la velocità di rotazione della valvola. In questo modo si può controllare la quantità di materiale che viene immessa nella condotta. Il calcolo approssimativo di quest'ultima si sintetizza come segue:

$$\dot{m}_p = V n N \rho_p \eta \times \frac{60}{1000}$$

Dove  $\dot{m}_p$  è la portata in massa di materiale (tonn/h),  $V$  il volume del singolo vano ( $m^3$ ),  $n$  il numero di vani,  $N$  la velocità di rotazione (giri/min),  $\rho_p$  la densità del materiale ( $kg/m^3$ ) e  $\eta$  il coefficiente di riempimento del singolo vano.

#### 4.1.1.1 Portata di trafilamento valvola rotativa

L'utilizzo di una valvola rotativa in un trasporto in pressione comporta inevitabilmente delle cadute di pressione e quindi delle perdite di aria. La determinazione della quantità di aria persa nell'attraversamento della valvola stellare è fondamentale per un corretto dimensionamento dell'impianto di trasporto pneumatico, in quanto le perdite di aria, dipendenti dalla pressione di trasporto, devono essere sottratte alla quantità di aria che circola nelle condotte. Il rapporto di miscela, allora, viene calcolato come rapporto tra la quantità di materiale trasportata e la portata di aria che circola effettivamente nell'impianto, ottenuta come differenza tra la portata nominale elaborata dal compressore e la portata persa nell'attraversamento della valvola stellare. Le perdite di aria sono dovute principalmente al gioco tra rotore e carcassa, ma anche al reflusso di aria tra vani della stellare e tramoggia.

Poiché per la valvola installata nell'impianto pilota non si disponeva di dati sul trafilamento di aria da parte del costruttore, è stato necessario effettuare delle

prove sperimentali per la loro determinazione. Consideriamo il sottosistema tramoggia di Fig4.2:

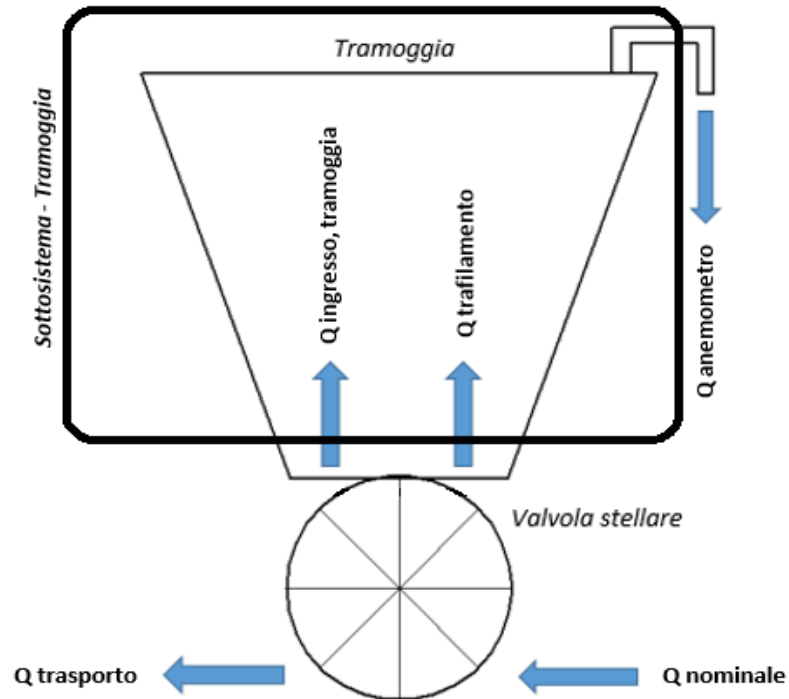


Fig4.2 – Portate in ingresso e in uscita nel sistema valvola stellare – tramoggia

Si ha che la portata di trafilamento è data da:

$$Q_{\text{trafilamento}} = Q_{\text{anemometro}} - Q_{\text{in, tramoggia}}$$

Dove:

- $Q_{\text{anemometro}}$  è la portata massica, letta nell'anemometro a filo caldo, posizionato all'uscita di uno dei due tubi posti nella parte superiore della tramoggia ( $Nm^3/h$ ).
- $Q_{\text{trafilamento}}$  è la portata massica di aria che trafile in tramoggia tra il rotore e la carcassa della valvola stellare ( $Nm^3/h$ ).
- $Q_{\text{in, tramoggia}}$  è la portata massica di aria che entra in tramoggia, per opera della rotazione della valvola stellare ( $Nm^3/h$ ).

Per il calcolo di  $Q_{in, tramoggia}$  si ipotizza che la quantità di aria che entra nel sottosistema per opera della rotazione della valvola stellare, sia uguale a quella che occupa il volume di prodotto che dalla tramoggia viene scaricato sulla valvola stellare. La portata massica oraria che entra in tramoggia si calcola, quindi, a partire dalla quantità di materiale trasportato. Quest'ultima divisa per il valore della densità del materiale ci fornisce la portata volumetrica in ingresso in tramoggia. È così possibile ricavare la portata massica dell'aria espressa in  $Nm^3/h$ , ottenuta, in prima approssimazione, moltiplicando il valore della portata volumetrica per il valore di pressione espressa in bar.

Tale valore, come si può vedere in Fig4.3, è funzione della pressione di trasporto e della frequenza di rotazione della valvola stellare.

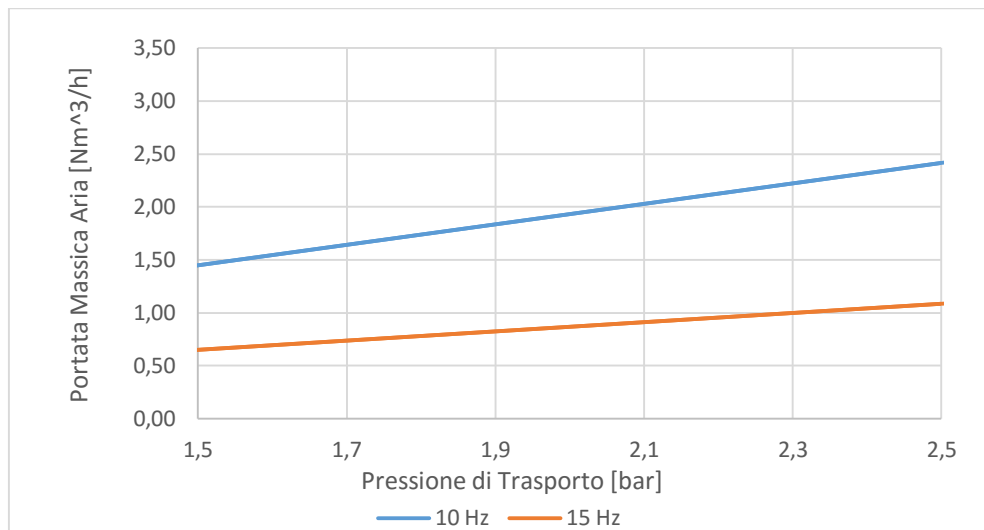
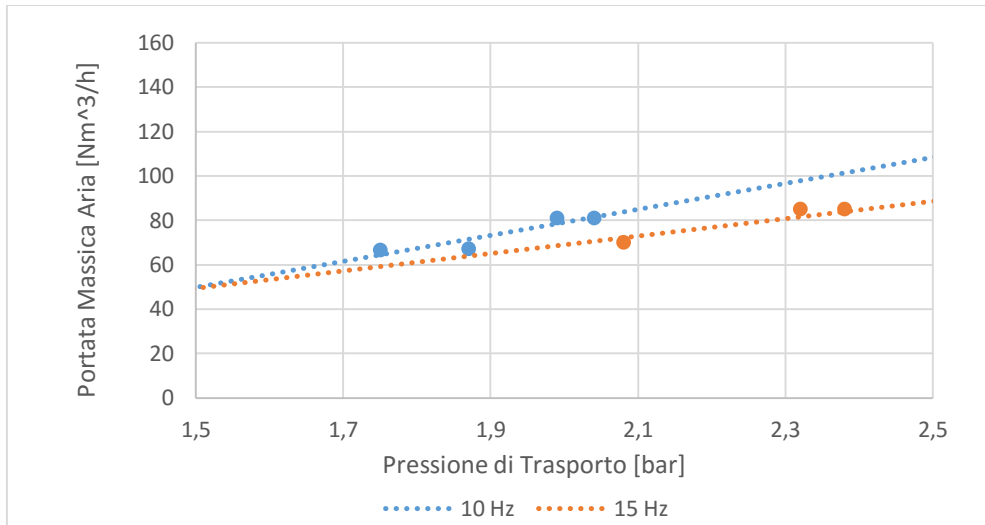


Fig4.3 – Portate massica di aria che entra in tramoggia

Successivamente si è passati alla determinazione di  $Q_{anemometro}$ . Per ogni minuto di prova, sono stati registrati i valori letti sull'anemometro a filo caldo, impostato per avere come output una portata volumetrica calcolata effettuando una media mobile su un periodo di 60 secondi.

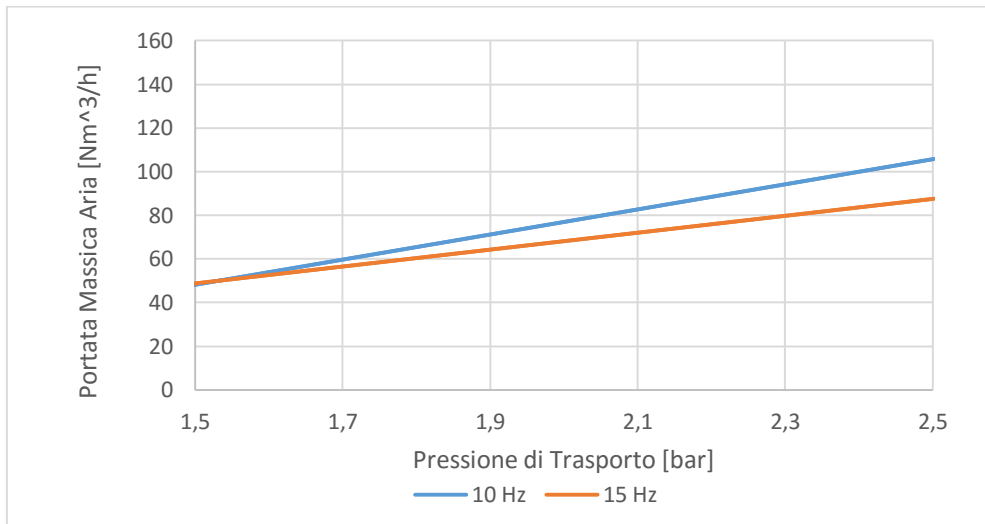
Per ogni minuto di prova è stata calcolata la pressione media di trasporto, alla quale corrisponde il valore della portata letta sull'anemometro, a meno della pressione atmosferica. In Fig4.4 è riportato l'andamento della portata letta sull'anemometro a filo caldo, dipendente anch'essa dalla pressione di trasporto e dalla frequenza di rotazione della valvola stellare.





*Fig4.3 – Portate massica letta sull'anemometro a filo caldo*

Infine secondo la formula (4.2) è stata calcolata la portata di trafilamento della valvola ZEPPELIN APS 320/21 DC. Tale valore appare in accordo con le portate di trafilamento di altre valvole rotative commerciali (Appendice: FigA.1).



*Fig4.3 – Portate massica letta di trafilamento della valvola ZEPPELIN APS 320/21 DC*

## 4.1.2 Gruppo compressore

In tutti quei sistemi dove sono necessarie grandi portate e pressioni relativamente basse, si fa uso di un compressore rotativo a palette.

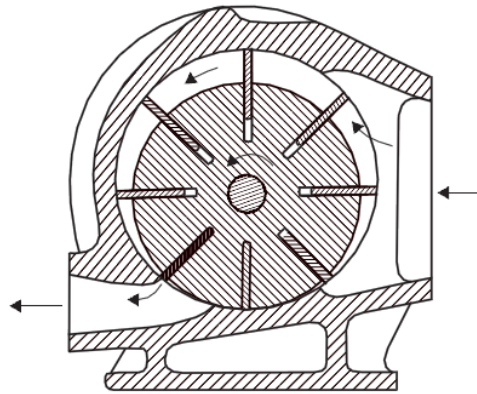
L'impianto pilota di trasporto pneumatico utilizza un motocompressore DRS1085 rotativo a palette prodotto dalla Ditta Mattei. In Tab4.2 sono riportate le principali caratteristiche tecniche.

<b>Motocompressore Mattei DRS1085 rotativo a palette</b>	
<i>Caratteristiche</i>	<i>Valore</i>
Pressione di esercizio [bar]	10
Resa d'aria libera effettiva [m <sup>3</sup> /min]	8,5
Capacità camera olio [l]	17
Motore tipo	4T
Numero di cilindri	4 Turbo
Raffreddamento motore	Liquido
Raffreddamento olio	Aria
Potenza massima erogata a regime dal motore Diesel Perkins [kW]	74
Regime max [rpm]	2200
Capacità coppa olio [l]	15
Capacità serbatoio carburante [l]	120
Limite del livello sonoro (stabilito dalla normativa CEE 84/533)	<100
Range di temperatura ammissibile per l'aria in ingresso [°C]	-5 ÷ +40
Umidità relativa ammissibile dell'aria in ingresso	≤90%

Tab 4.2 – Caratteristiche tecniche Motocompressore

Il compressore a palette appartiene alla famiglia dei compressori volumetrici rotativi ed è costituito essenzialmente da un rotore, posizionato eccentricamente in una parte fissa denominata statore, sul quale delle palette, montate in senso radiale e sempre a contatto con lo statore per via della forza centrifuga, intrappolano dell'aria; quest'aria, a causa del cambiamento di volume della camera di compressione le cui pareti sono costituite da due palette consecutive, dal rotore e dallo statore, viene compressa e quindi espulsa (Fig4.4).

Poiché durante la compressione si genera calore, al fine di raffreddare l'aria e di evitare fughe d'aria compressa, si inietta dell'olio che ha essenzialmente la funzione di raffreddare, di migliorare la tenuta fra palette e statore ed, infine, evitare il contatto fra paletta e statore, diminuendo in tal modo le perdite per attrito e garantendo lunga vita alle palette. L'iniezione d'olio avviene senza l'ausilio di pompe, dato che la camera d'olio è in pressione ed è pertanto la stessa pressione differenziale, fra camera dell'olio e la camera di compressione, a spingere l'olio attraverso gli iniettori.



*Fig4.4 – Schema di un compressore rotativo a palette (Fonte: D.Mills – Pneumatic Conveying Design Guide)*

L'aria compressa esce dal compressore attraverso una valvola di minima pressione e non ritorno. detta valvola ha la funzione di garantire all'interno della camera d'olio una pressione minima, atta ad assicurare una buona lubrificazione ed una buona tenuta. Essa, inoltre, impedisce che l'aria compressa, presente nel sistema possa ritornare nella macchina, provocando la sua rotazione in senso contrario.

L'olio caldo, dopo aver sottratto calore all'aria compressa, viene raffreddato circolando in un radiatore investito dal flusso d'aria fresca prodotto da un ventilatore.

### 4.1.3 Rete di distribuzione

La rete di trasporto dell'impianto oggetto di studio è rappresentata da una condotta, in acciaio inox, dal diametro di 86 millimetri lunga all'incirca 70 metri e composta essenzialmente da:

- Tratti rettilinei orizzontali;
- Tratti rettilinei verticali ascendenti e discendenti;
- Curve a gomito, a 45°, a 30°.

Partendo dal layout d'impianto e utilizzando il software di simulazione numerica agli elementi finiti TPSimWin, è stato dimostrato che il diametro di 86 millimetri è quello che garantisce una maggiore flessibilità in termini di test sull'impianto a diversi ratei di carico (m) con un piccolo range di cadute di pressione<sup>6</sup>.

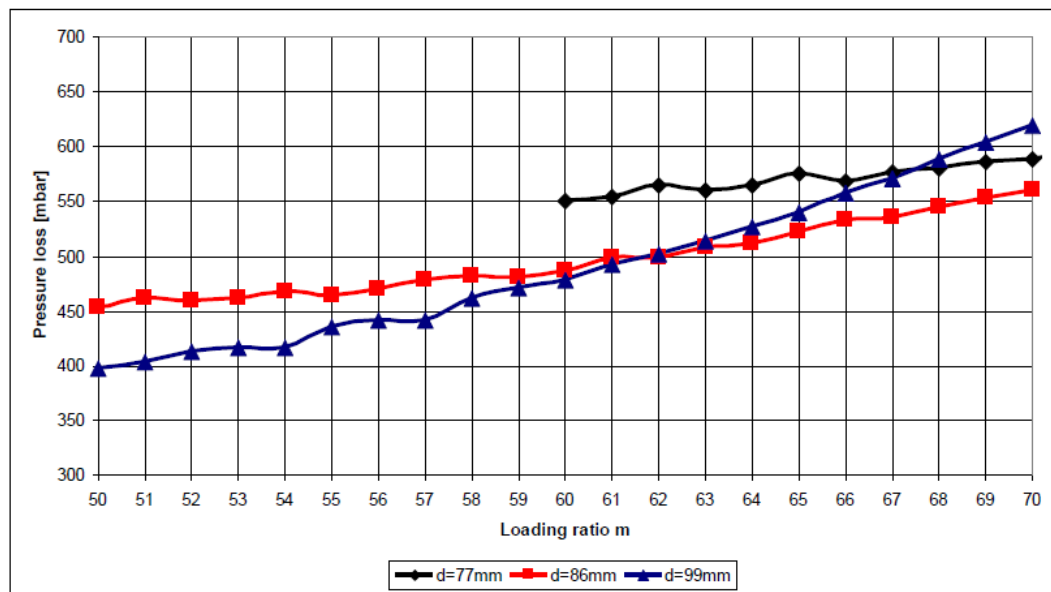


Fig4.4 – Risultati TPSimWin (Fonte: C.Saccani,M.Pellegrini: Plant design for atomized slip pneumatic conveying: environmental impact reduction in the ceramics industry avoiding product wear and fragmentation).

La Fig4.4 mostra chiaramente che il diametro di 77 millimetri genera le più alte perdite di carico se comparato con le altre due soluzioni. La scelta del diametro

<sup>6</sup> C.Saccani,M.Pellegrini: Plant design for atomized slip pneumatic conveying: environmental impact reduction in the ceramics industry avoiding product wear and fragmentation, 2010

di 99 millimetri invece garantisce le più basse perdite di carico con rapporti di miscela inferiori a 62.

Data la natura sperimentale dell'impianto è stato preferito il diametro di 86 millimetri in quanto, come si può vedere in fig4.5, presenta una curva di caduta di pressione piatta e quindi più stabile al variare dei diversi rapporti di carico.

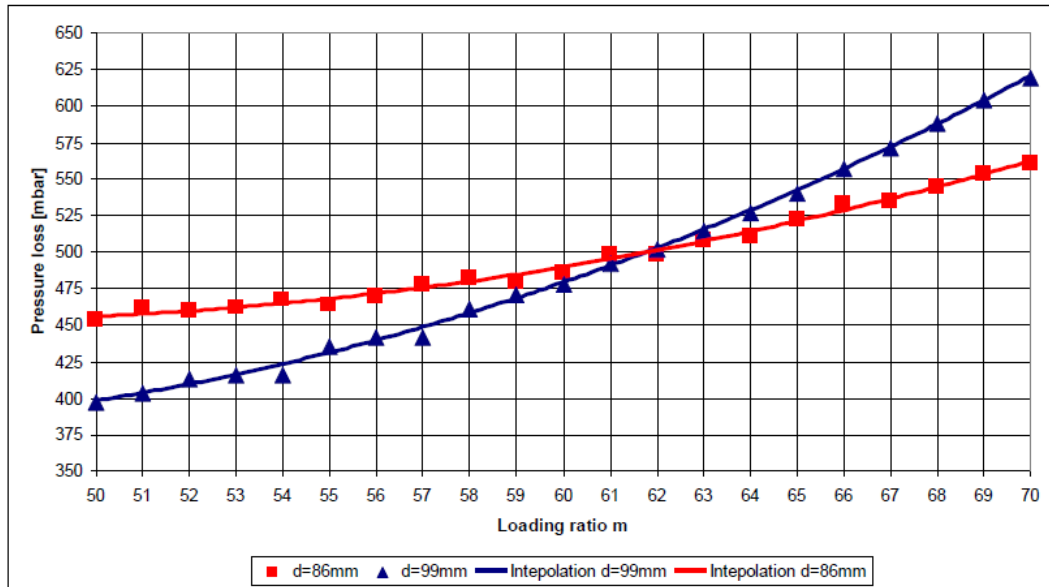


Fig4.5 –interpolazione risultati TPSimWin (Fonte: C.Saccani, M.Pellegrini: *Plant design for atomized slip pneumatic conveying: environmental impact reduction in the ceramics industry avoiding product wear and fragmentation*).

#### 4.1.4 Gruppo di scarico

Il gruppo di scarico dell'impianto pilota per il trasporto pneumatico è costituito essenzialmente da:

- Silo per la ricezione del materiale;
- Sistema di filtraggio aria a maniche.

Quest'ultimo permette la separazione del solido dal fluido portante, necessaria sia per evitare di disperdere le polveri residue nell'ambiente lavorativo, sia per recuperare la parte fina del materiale da destinare al riciclo.

Il filtro a maniche, impiegato qualora risultino necessari elevati gradi di separazione (>99%) con particelle fini, minori di 10  $\mu\text{m}$  di diametro, è

generalmente costituito da un tessuto filtrante (cotone, lana, nylon, fibra di vetro), incastrato in forma di cilindri disposti verticalmente, a tenuta di polvere, tra due fondi.

Il gas polveroso entra dal basso nelle maniche e ne esce lateralmente depurato, il materiale grossolano si deposita in basso mentre la polvere resta sulla superficie esterna delle maniche (Fig4.6). Con il depositarsi delle prime polveri il filtro migliora le proprie prestazioni, perché presenta più accidentalità e vani più piccoli, ma alla lunga le perdite di carico aumentano e subentra il rischio che le particelle già captate possano rimettersi in circolazione. A tal proposito è necessario predisporre il filtro di un sistema di pulizia che, ad intervalli regolari, libera le maniche dalle particelle depositate. La pulizia può avvenire mediante un'iniezione di aria compressa in controcorrente o con un sistema di scuotimento meccanico.

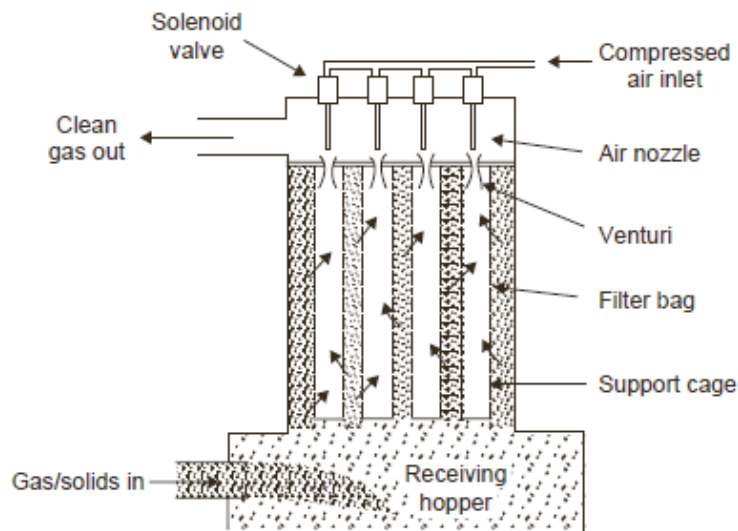


Fig4.6 – Schema di un filtro a maniche con Sistema di pulizia con aria in controcorrente (Fonte: D.Mills – Pneumatic Conveying Design Guide)

Nel nostro caso è stato utilizzato un filtro autopulente a maniche realizzato da Technosilos, che si compone delle seguenti parti:



*Fig4.7 – Schema di un filtro a maniche autopulente (Fonte: Technosilos)*

I filtri autopulenti Technosilos utilizzano un sistema temporizzato di pulizia ad aria compressa controcorrente rispetto al flusso d'aria da filtrare. L'aria compressa, che deve assolutamente essere pulita, deumidificata e disoleata, viene immessa nel serbatoio che funge da polmone per poi essere distribuita in modo estremamente rapido attraverso la razza di distribuzione aria. L'iniezione di aria nel sistema, quindi la pulizia degli elementi filtranti, viene controllata dall'apertura delle elettrovalvole in modo ciclico. Il sistema di filtraggio autopulente a maniche Technosilos permette, inoltre, un'agevole manutenzione poiché le maniche possono essere estratte individualmente. La massima temperatura cui possono essere sottoposti i diversi elementi filtranti è di 70 °C.

## 4.2 Strumentazione impianto

Nel seguente paragrafo verranno descritte le caratteristiche e le funzioni dei principali strumenti di misura installati nell'impianto sperimentale.

Lungo tutto la rete di trasporto che parte dal compressore per arrivare alla tramoggia di scarico, sono installati una serie di strumenti di misura che garantiscono un monitoraggio costante e completo delle grandezze che entrano in gioco nella determinazione dello stato fisico e igrometrico del materiale e dell'aria che viene immessa nel circuito, la cui regolazione generale garantisce le specifiche da rispettare per un trasporto corretto nonché una stima della potenza necessaria per movimentare l'aria. In Fig4.8 e in Tab4.3 viene riportato il P&I (Piping and Instruments) e la relativa legenda dell'impianto sperimentale di trasporto pneumatico.

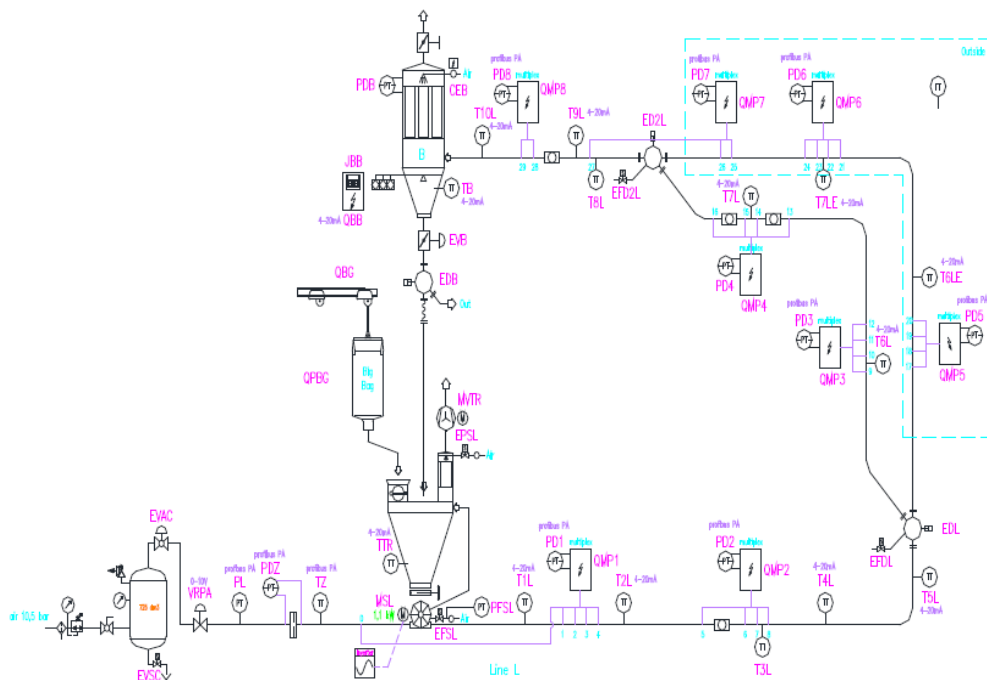


Fig4.8 – P&I Impianto sperimentale (Fonte: A.Bianchini, C.Saccani - Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility)



<b>CEB</b>	Lavaggio del filtro	<b>PD#</b>	Trasmettitore di pressione differenziale lungo linea
<b>EDB</b>	Valvola per il controllo del ricircolo	<b>MVTR</b>	Ventilatore per l'estrazione di aria dalla tramoggia
<b>EDL</b>	Deviatore	<b>PDZ</b>	Pressione differenziale diaframma
<b>EFDL</b>	Deviatore a controllo pneumatico	<b>PFSL</b>	Sensore di pressione sulla valvola rotativa
<b>EFSL</b>	Valvola rotativa	<b>PL</b>	Trasmettitore di pressione assoluta
<b>EPSL</b>	Pulizia filtro a cartuccia	<b>QBG</b>	Elevatore Big bag
<b>EVAC</b>	Elettrovalvola Open/Close	<b>QMP#</b>	Sistema Multiplexer
<b>EVB</b>	Valvola a serranda per lo scarico del prodotto	<b>T#L</b>	Trasduttore di temperatura lungo linea
<b>EVSC</b>	Elettrovalvola per lo scarico della condensa	<b>TB</b>	Sensore di temperatura sul filtro
<b>INMSL</b>	Inverter del motore della valvola rotativa	<b>TTR</b>	Sensore di temperatura sul serbatoio
<b>JBB</b>	Cella di carico	<b>TZ</b>	Trasduttore di temperatura
<b>MSL</b>	Motore della valvola rotativa	<b>VRPA</b>	Valvola per il controllo della portata massica d'aria
<b>PDB</b>	Trasmettitore di Pressione differenziale sul filtro a maniche		

*Tab4.3 – legenda degli strumenti dell'impianto sperimentale (Fonte: A.Bianchini, C.Saccani - Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility)*

#### 4.2.1 Strumenti di controllo

Nella sezione di impianto a valle del compressore e a monte della valvola rotativa per il caricamento di materiale, sono inseriti una serie di strumenti per il controllo e la regolazione dell'aria necessaria per il trasporto. Più precisamente sono presenti: una valvola per il controllo della portata massica d'aria (VRPA),

la cui misura viene effettuata mediante un pressostato differenziale (PDZ), installato su un orifizio ISO 5167-2, e trasduttori di temperatura e pressione (rispettivamente TZ e PZ), che ci permettono di calcolare la densità dell'aria istante per istante.

#### 4.2.1.1 Valvola di regolazione della portata di aria

A valle della valvola di sicurezza, è installata la valvola pneumatica on/off a due vie IM-P373-18, della Spirax Sarco, necessaria per la regolazione della portata di aria. Questa, comandata in tensione (0-10 Volt), si apre e chiude grazie al movimento di un otturatore lineare che strozza il condotto di passaggio dell'aria, consentendo in tal modo di ottenere la portata desiderata nella linea.

Un otturatore lineare, utilizzato principalmente nei processi con limitate variazioni di portate, garantisce una diretta proporzionalità tra corsa dell'otturatore e variazione della portata. La valvola installata, rappresentata in Fig4.9, è ad azione inversa: normalmente chiusa in assenza di tensione.



*Fig4.9 – Schema valvola pneumatica on/off 2 vie (Fonte: Spirax Sarco)*

#### 4.2.1.2 Pressostato differenziale e piastra forata

Il pressostato differenziale, necessario per effettuare una misura indiretta della portata volumetrica di aria che viene immessa nel condotto, è installato su una

piastra forata, interposta tra due flange, con diametro noto le cui dimensioni, l'installazione e le condizioni in cui si opera sono regolate secondo le norme vigenti (UNI EN ISO 5167-1 e 5167-2). L'orifizio tarato o diaframma, visibile in Fig4.10, determina una perdita di carico concentrata  $\Delta p$  generata da un brusco restringimento di sezione nel condotto, dato dal passaggio dal diametro  $D$  della tubazione a monte del diaframma al diametro  $d$  dell'orifizio.

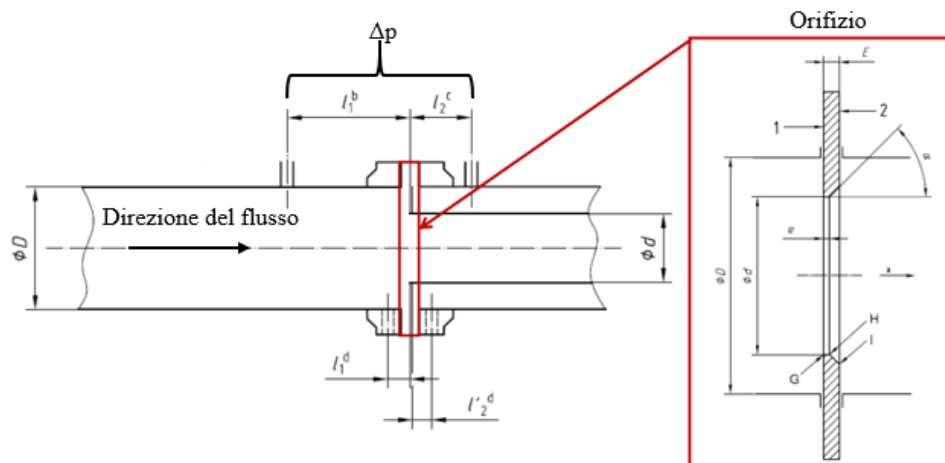


Fig4.10 – Schema orifizio tarato (Fonte: C.saccani, Dispense del corso di Strumentazione e Automazione industriale)

Secondo le norme UNI EN ISO 5167-1 e 5167-2 la portata in massa  $q_m$  viene determinata tramite l'equazione:

$$q_m = \frac{C \varepsilon d^2 \frac{\pi}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho}}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Dove  $C$  è il coefficiente di efflusso dipendente dalla portata,  $\varepsilon$  è il fattore di espansione,  $\beta$  è il fattore geometrico, pari al rapporto  $D$  su  $d$ ,  $\Delta p$  la perdita di carico che il fluido incontra nell'attraversamento del diaframma e  $\rho$  la densità del fluido.

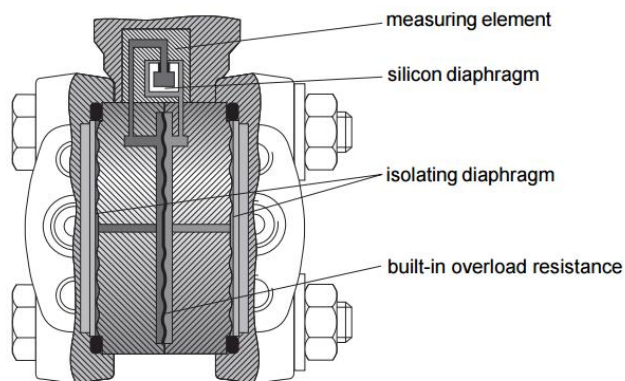
Il pressostato differenziale montato per la rilevazione della perdita di carico che l'aria incontra nell'attraversamento dell'orifizio è un Deltabar PMD 235 della Endress+Hauser (Fig4.11).



*Fig4.11 - Foto Deltabar PMP731*

Il Deltabar impiega per la misura una cella metallica; l'elemento di misura comprende un sensore al polisilicio a film sottile resistente alla pressione. La pressione differenziale agendo sulla membrana di separazione viene trasmessa all'elemento di misura attraverso l'olio al silicone o olio inerte. La membrana in polisilicio, così, flette causando una variazione di resistenza che viene misurata ed elaborata dall'elettronica del trasmettitore.

La pressione differenziale, rilevata attraverso il diaframma separatore, provoca una variazione nell'elemento di misura posto in equilibrio. Il sensore viene compensato alle variazioni di temperatura, garantendo la misura entro un vasto campo di temperatura ed una stabilità a lungo termine. Le sue caratteristiche di elasticità assicurano un'elevata riproducibilità ed una bassa isteresi. Il fondo scala è 500 mbar e il segnale d'uscita è in corrente continua, ed è proporzionale alla differenza di pressione.



*Fig4.12 - Schema Deltabar PMP731*

### 4.2.1.3 Trasduttore di pressione e di temperatura

Per il calcolo della portata massica di aria che entra nell'impianto, è essenziale oltre che la misura della portata volumetrica, anche quella della densità. Quest'ultima, per un fluido comprimibile come l'aria, si determina a partire dalla conoscenza della pressione e della temperatura istantanea. Per tale motivo sono stati installati nell'impianto e nella condotta compresa tra il diaframma e il gruppo compressore, un trasduttore di pressione e uno di temperatura.

- Per la misura della temperatura di linea viene impiegato un termometro TST11 prodotto dalla Endress+Hauser. Il complesso termometrico, di cui si riportano disegno e foto in Fig4.13, è costituito da un inserto sostituibile a termoresistenza Pt100, con isolamento in ossido minerale, dal tubo di protezione in acciaio inox con attacco filettato e dalla testa di collegamento.

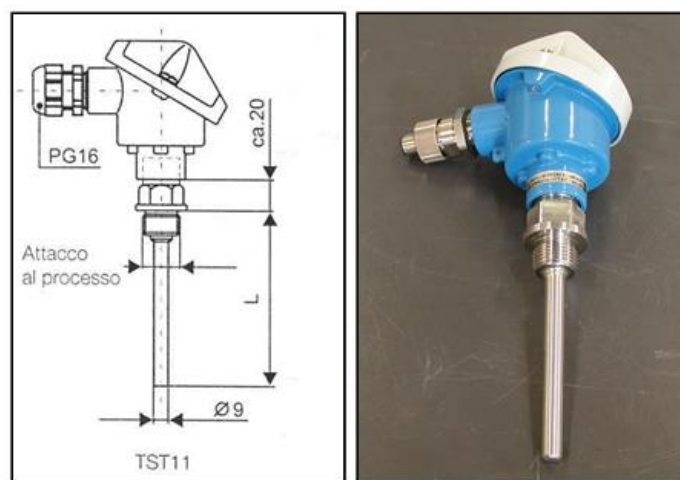


Fig4.13 – Disegno e foto TST11 (Fonte: Endress+Hauser)

Le termoresistenze si basano sul principio secondo il quale la resistività dei conduttori varia con la temperatura. L'elemento sensibile è costituito da un filo, avvolto su un elemento in vetro o in porcellana, poi ricoperto per protezione. La resistività del materiale deve essere alta in modo da non dover ricorrere a termometri con fili lunghissimi e bulbi ingombranti. Il materiale più adatto a rispondere a queste esigenze è il platino.

Le termoresistenze Pt100 sono caratterizzate da un'elevata precisione, da un'eccellente stabilità a lungo termine e dalla possibilità di trasmissione della misura a lunghe distanze senza bisogno di apparecchiature ausiliarie.

- La misura di pressione, indispensabile anche per conoscere la pressione di trasporto è effettuata mediante il trasmettitore Cerabar PMP 731 della Endress+Hauser (Fig4.14).

Il Cerabar impiega per la misura della pressione una cella polisiliconica. Essa è costituita da un sensore, il quale misura la deformazione di una membrana metallica corrispondente alla variazione di resistenza dei rami di un ponte piezoresistivo. Per garantire una misura estremamente stabile, il lato di contatto del ponte di resistenza è fortemente disaccoppiato. La pressione di processo flette il diaframma di separazione mediante un liquido di riempimento che trasmette la pressione a resistenze variabili. Viene quindi misurata ed elaborata la tensione di uscita delle resistenze variabili, che è proporzionale alla pressione. Il cerabar metallico possiede un'eccellente stabilità a lungo termine e garantisce la resistenza per un sovraccarico fino a 4 volte la pressione nominale.



*Fig4.14 – Foto Cerabar PMP731*

## 4.2.2 Strumentazione lungo linea

Lungo la linea di trasporto, che va dalla valvola stellare alla tramoggia di scarico, sono installati otto trasduttori di pressione, i quali acquisiscono il segnale da ventinove prese di pressione gestite da sistemi multiplexer.

I sistemi multiplexer non sono altro che circuiti elettrici in grado di commutare il segnale di pressione differenziale, proveniente dallo stesso deltabar, da una connessione a un'altra, in una successione temporale che nel nostro caso è tarata al decimo di secondo. Ogni multiplexer, grazie alla commutazione delle elettrovalvole di cui è costituito, permette la misura di quattro differenze di pressione lungo la linea usando lo stesso manometro differenziale. È così possibile avere una mappatura completa della caduta di pressione lungo la condotta, senza dover ricorrere all'installazione di un numero elevato di trasduttori.

La strumentazione permette la rilevazione della differenza di pressione tra una presa e l'altra, oltre che tra una presa e l'ambiente esterno.

Facendo riferimento al primo quadro Multiplexer, di cui è riportato lo schema di funzionamento in Fig.4.15, è possibile leggere la caduta di pressione tra la connessione 0 e connessione 1, semplicemente aprendo le valvole V1 e V2. Una volta chiuse V1 e V2 è possibile commutare il segnale per aprire le V3 e V4 e misurare, quindi, la caduta di pressione tra la connessione 1 e 2.

Nella rete di trasporto, inoltre, sono posizionati otto trasduttori di temperatura necessari per monitorare l'andamento della temperatura lungo il circuito.

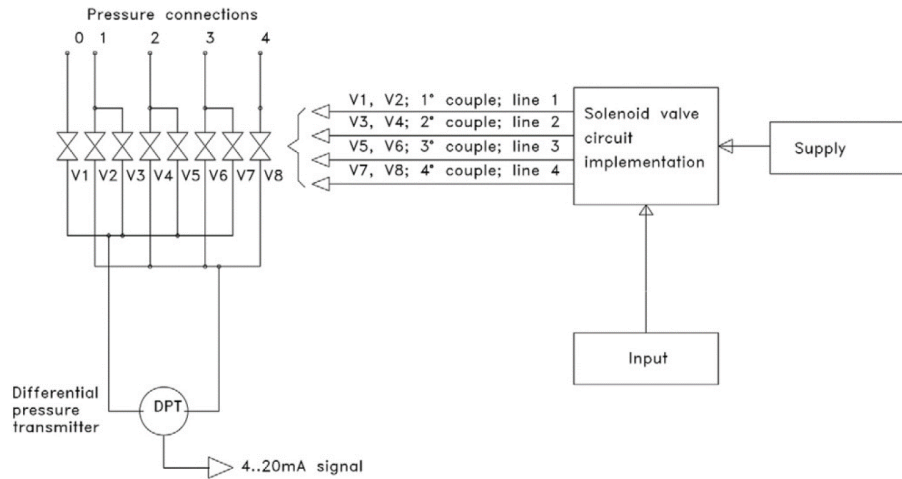


Fig4.14 – Schema di funzionamento di un quadro Multiplexer (Fonte: A.Bianchini, C.Saccani - *Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility*)

In Tab4.4 vengono riportate le posizioni delle prese di pressione lungo l'impianto sperimentale. La posizione iniziale è quella della presa di pressione P0.



## 5. Analisi sperimentale

Il seguente capitolo ha come scopo la definizione delle condizioni di esercizio attraverso le quali deve lavorare l'impianto per garantire buoni livelli di portata, salvaguardando, allo stesso tempo, l'integrità del materiale. Per l'analisi della stessa viene confrontata la curva granulometrica cumulata del materiale trasportato, con quella del materiale vergine di riferimento, entrambe realizzate a valle di una setacciatura. Sulla base dell'esperienza si può dire che un campione di materiale trasportato è integro se presenta un  $D_{10}$ , ossia un diametro corrispondente al 10% di massa trattenuta dai setacci, all'incirca uguale a quello del materiale vergine di riferimento.

### 5.1 Analisi granulometrica atomizzato di barbotina

Per una corretta valutazione della granulometria del materiale, è indispensabile andare a definire le condizioni di misura dei campioni da analizzare. Poiché si vuol testare il materiale completamente essiccato è necessario, in primis, stabilire il tempo minimo di essiccamento dell'atomizzato di barbotina. Una volta individuato tale tempo, si procede con l'analisi granulometrica di un campione di materiale vergine, valutando l'impatto sul  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  al variare dell'ampiezza e tempo di vibrazione, scegliendo così, le condizioni di misura che garantiscono il valore più elevato del  $D_{10}$ , cioè il minor quantitativo di materiale fine. Dopo aver definito questi parametri, è necessario stabilire il valore medio e la deviazione standard del diametro delle particelle corrispondenti al 10%, 50% e 90% di massa trattenuta dai setacci, per poterlo confrontare con la granulometrica del materiale trasportato. Tale confronto ci permette di valutare l'impatto del trasporto pneumatico, nell'impianto sperimentale, sulla granulometria dell'atomizzato di barbotina

### 5.1.1 Curva di essiccamento

Le fasi della Procedura utilizzata per determinare il tempo minimo necessario al completo essiccamento del materiale sono:

1. Prelievo di 500g di materiale dal big bag;
2. Determinazione umidità relativa del materiale umido campionato che con l'utilizzo della termobilancia
3. Essiccamento in forno:  $T=105^{\circ}\text{C}$ ,  $t=2\text{h}$ ;
4. Determinazione umidità relativa, calcolata sia per via analitica che con l'utilizzo della termobilancia ad intervalli regolari di 20minuti.

Dopo aver verificato, ad ogni relativo intervallo di essiccamento, che l'umidità relativa calcolata per via analitica sia approssimativamente uguale all'umidità relativa determinata con l'utilizzo della termobilancia, sono state costruite due curve di essiccamento date per punti.

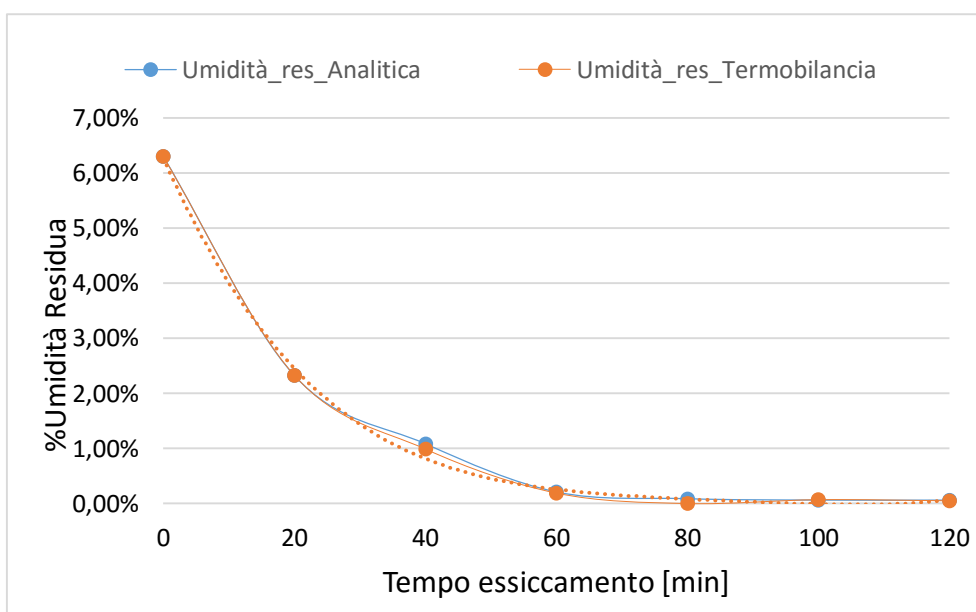


Fig 5.1 – Umidità relativa materiale vergine

Dal grafico è facile intuire come sia sufficiente un essiccamento di 80 minuti per asportare la quasi totalità di acqua presente nel materiale vergine. Da 80 a 120 minuti, infatti, il materiale perde solo lo 0.02% di UR.

## 5.1.2 Procedura di test

Il setacciatore utilizzato per le analisi granulometriche è l'OCTAGON DIGITAL di Endecotts.

<b>Setacciatore OCTAGON DIGITAL</b>	
<i>Caratteristiche</i>	<i>Valore</i>
Voltage [V]	230
Frequenza [Hz]	50
Fase	1
Potenza [W]	300
Ampiezza [mm]	0-3,4 (digital setting in 10 steps:0-9)

Tab 5.1 – Caratteristiche tecniche Setacciatore

Al fine di valutare l'incidenza dalla variazione dell'ampiezza di vibrazione sulla granulometria dell'atomizzato di barbotina, sono stati eseguiti diversi test modificando l'ampiezza di vibrazione.

	#	[mm]
<b>A</b>	3	1,36
	5	2,04
	9	3,40

Tab5.2 – Ampiezze di vibrazione setacciatore OCTAGON DIGITAL

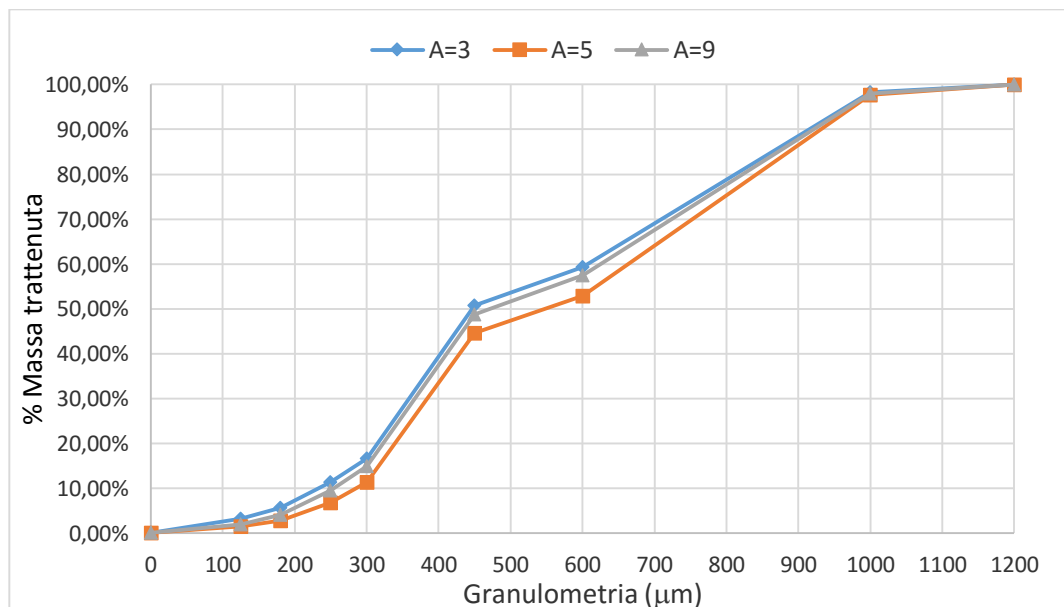


Fig5.2 – Confronto Distribuzione granulometrica cumulata materiale vergine alle diverse ampiezze

Per maggior chiarezza in Tab1.3 vengono riportati i diametri delle particelle di atomizzato di barbottina corrispondenti al 10, 50 e 90% di massa trattenuta.

	Massa Trattenuta	A=3	A=5	A=9
<b>D10 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	10%	232,8	285,5	254,2
<b>D50 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	50%	446,5	547,5	472,0
<b>D90 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	90%	914,6	931,6	920,7

Tab5.3 – granulometria del 10, 50 e 90% di massa trattenuta dei campioni setacciati alle diverse ampiezze

Di seguito, invece, vengono riportati i risultati dei test granulometrici effettuati al variare del tempo di vibrazione. Tali test sono stati eseguiti con un'ampiezza uguale a 5 e con una vibrazione di tipo continuo.

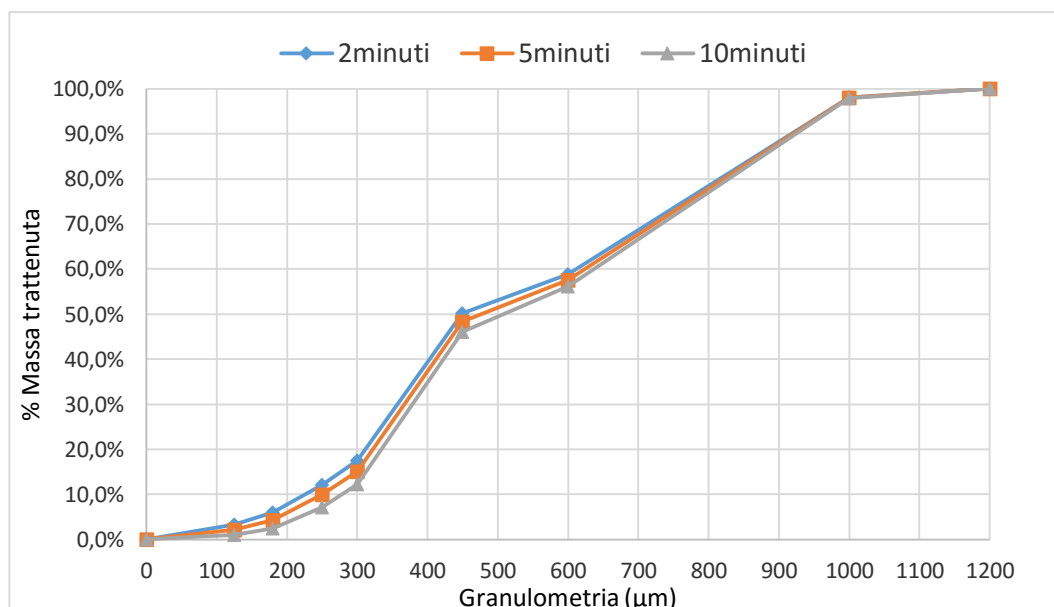


Fig.5.3 – Confronto Distribuzione granulometrica cumulata materiale vergine con diversi tempi di vagliatura

	Massa Trattenuta	2min	5min	10min
<b>D10 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	10%	225,2	250,5	278,1
<b>D50 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	50%	449,4	476,8	508,0
<b>D90 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	90%	917,5	920,0	924,0

Tab5.4 – granulometria del 10, 50 e 90% di massa trattenuta dei campioni setacciati con un diverso tempo di vibrazione

Si nota che il tempo di vibrazione e l'ampiezza che garantiscono il minor quantitativo di materiale fine, sono rispettivamente  $t=10\text{min}$  e  $A=5$ .

### 5.1.3 Determinazione valore medio e deviazione standard di confronto

Al fine di individuare il valore medio e la deviazione standard del  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  del materiale vergine, sono stati analizzati quattro campioni lasciando immutate le condizioni di misura. Tali condizioni, individuate nei precedenti test, garantiscono il minor quantitativo di materiale fine su campioni di materiale essiccato.

Caratteristiche	Valore
Ampiezza di vibrazione	5 (2,04 mm)
Modalità di vibrazione	Continua
Tempo di vibrazione	10 minuti
Tempo di essiccamento	2 ore

Tab 5.5 – Condizioni di misura

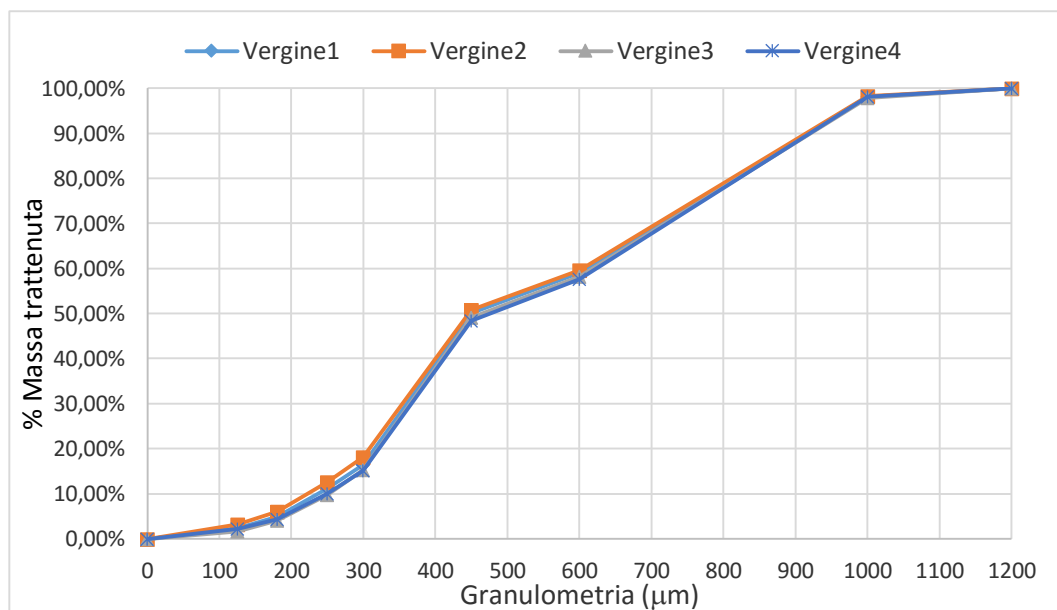


Fig.5.4 – Confronto Distribuzione granulometrica cumulativa di 4 campioni essiccati di materiale vergine

	Massa Trattenuta	Vergine1	Vergine2	Vergine3	Vergine4
<b>D10 [µm]</b>	10%	237,3	222,5	253,8	250,5
<b>D50 [µm]</b>	50%	449,7	446,1	465,5	457,4
<b>D90 [µm]</b>	90%	916,7	915,1	921,1	920,0

Tab5.6 – granulometria del 10, 50 e 90% di massa trattenuta dei 4 campioni setacciati per la determinazione del valor medio

È interessante definire la ripetibilità della misurazione. Si definisce ripetibilità di una misurazione il grado di concordanza tra i risultati di misure successive dello stesso misurando, effettuate nelle medesime condizioni di misura, eseguite in un breve intervallo temporale.

Data la natura casuale dell'errore ci si aspetta una distribuzione gaussiana dei valori letti; pertanto il contributo d'incertezza dell'errore di ripetibilità può essere considerato pari alla deviazione standard dei valori:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}}$$

Che nel nostro caso valgono:

	$\mu$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>D10</b>	241,0	14,2
<b>D50</b>	454,7	8,6
<b>D90</b>	918,2	2,8

*Tab5.7– granulometria media e deviazione standard del 10, 50 e 90% di massa trattenuta dei campioni analizzati e di materiale vergine*

#### 5.1.4 Confronto materiale vergine e trasportato

La successiva fase consiste nel valutare l'impatto del trasporto pneumatico sulla granulometria. Come si può vedere in Fig5.5 e Tab5.7, l'impianto di trasporto pneumatico tende a frantumare il materiale.

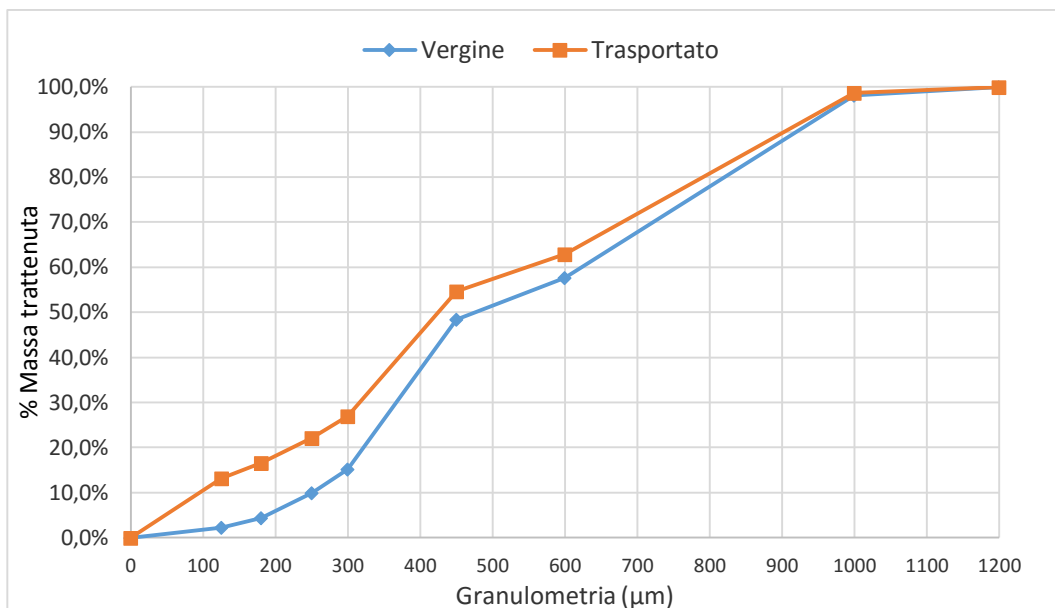


Fig.5.5 – Confronto Distribuzione granulometrica cumulativa Essiccato materiale vergine e trasportato.

	Massa Trattenuta	Vergine	Trasportato
<b>D10 [μm]</b>	10%	250,5	94,7
<b>D50 [μm]</b>	50%	476,8	425,0
<b>D90 [μm]</b>	90%	920,0	903,1

Tab.5.7 – granulometria del 10, 50 e 90% di massa trattenuta dei campioni di materiale vergine e trasportato.

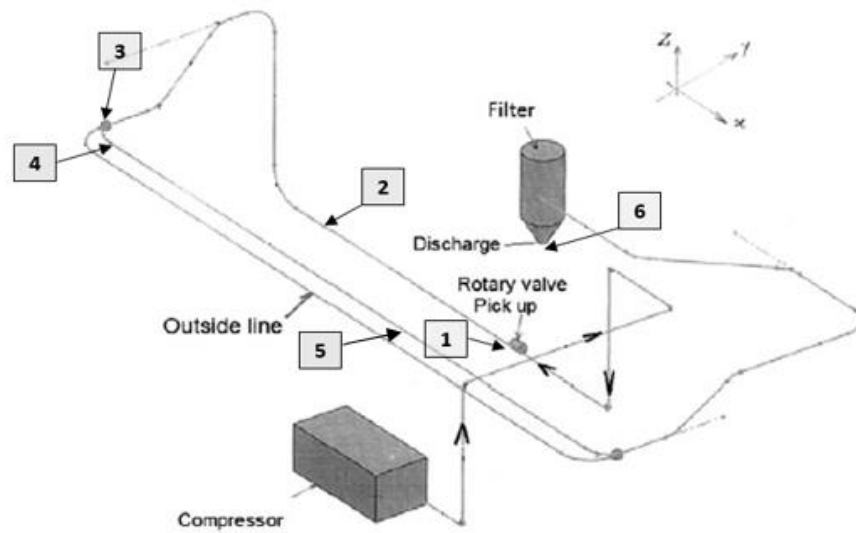
In Tab.2.1 si nota un valore del *D10* del campione di materiale trasportato estremamente piccolo. Tale valore, inferiore al mesh del setaccio più piccolo di 125 μm, indica che il 10% di massa trattenuta dai setacci si trova tutta nel piattello.

La differenza sostanziale tra il *D10* del campione di materiale vergine e quello trasportato, è indice di una frantumazione indesiderata avvenuta durante l'attraversamento dell'impianto. Per questa ragione sono stati prelevati 6 campioni di materiale trasportato per poter individuare il punto di impianto in cui avviene la frantumazione. Più precisamente i campioni di materiale sono stati prelevati:

- A valle della valvola rotativa;
- Nella prima tratto orizzontale;
- All'interno della prima valvola deviatrice;

- A valle della prima valvola deviatrice;
- A monte della seconda valvola deviatrice;
- Allo scarico del filtro.

Per una maggiore comprensione si riporta il layout d'impianto con l'indicazione dei punti di prelievo del materiale.



*Fig5.8– layout d'impianto*

Di seguito, invece, vengono riportate le distribuzioni granulometriche cumulate dei 6 campioni analizzati, di un campione di materiale vergine, e i rispettivi valori del  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ .



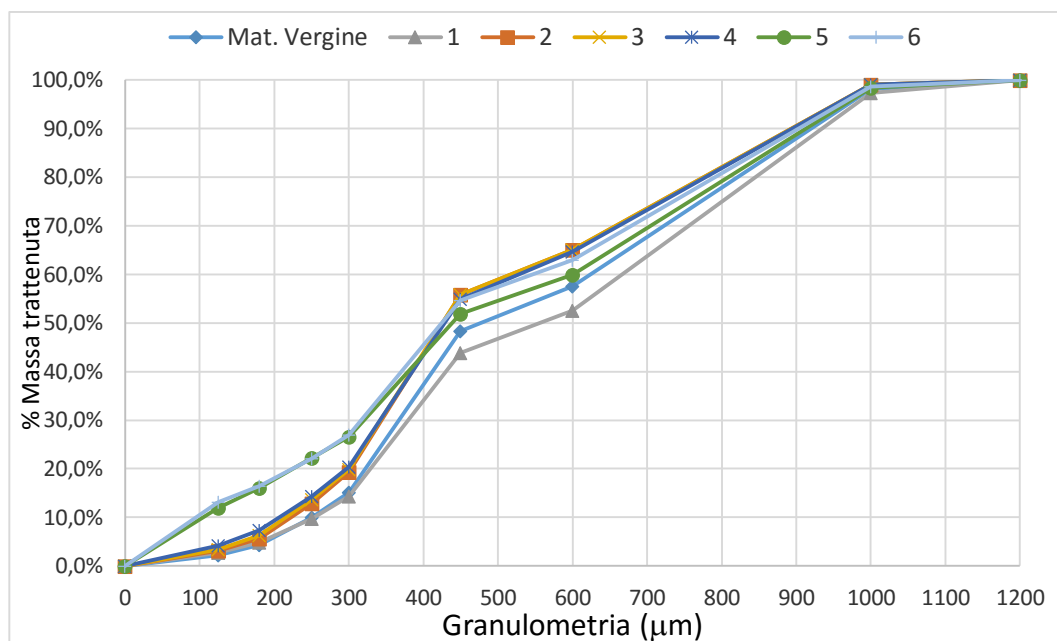


Fig5.9 – Distribuzione granulometrica cumulata dei 6 campioni analizzati e di un campione di materiale Vergine

	Massa Trattenuta	V	1	2	3	4	5	6
<b>D10 [µm]</b>	10%	250,5	253,2	222,3	215,1	206,7	104,0	94,7
<b>D50 [µm]</b>	50%	476,8	556,6	426,0	425,7	428,6	438,6	425,0
<b>D90 [µm]</b>	90%	920,0	935,2	893,7	893,7	895,4	913,6	903,1

Tab5.8 – granulometria del D10, D50 e D90 dei 6 campioni analizzati e di un campione di mat. Vergine

Dopo aver scelto un limite inferiore di accettabilità del *D10* del materiale pari a 220 µm, sulla base dei risultati sopra riportati, si è deciso di sostituire le valvole deviatrici presenti nell'impianto con delle curve a gomito, dello stesso diametro della restante tubazione. Le valvole deviatrici, sopra menzionate, avevano lo scopo di deviare il percorso del materiale nel circuito esterno allo stabilimento che ospita l'impianto. Poiché nelle nostre prove, necessarie per stabilire le migliori condizioni di trasporto, non è stata utilizzata tale parte d'impianto, si è deciso di escludere il circuito esterno, togliendo le valvole sopra menzionate, per sostituirle con delle curve raccordate.

A valle di tale sostituzione sono state eseguite nuove prove di trasporto modificando la frequenza di rotazione della valvola stellare e la portata d'aria massica che entra nell'impianto, regolabile grazie alla valvola regolatrice di portata (VRAP).

Qui di seguito si riportano i risultati dell'analisi granulometrica di uno dei tanti campioni di atomizzato di barbotina prelevato allo scarico del silo di ricezione del materiale, dopo che se n'è eseguita una prova di trasporto.

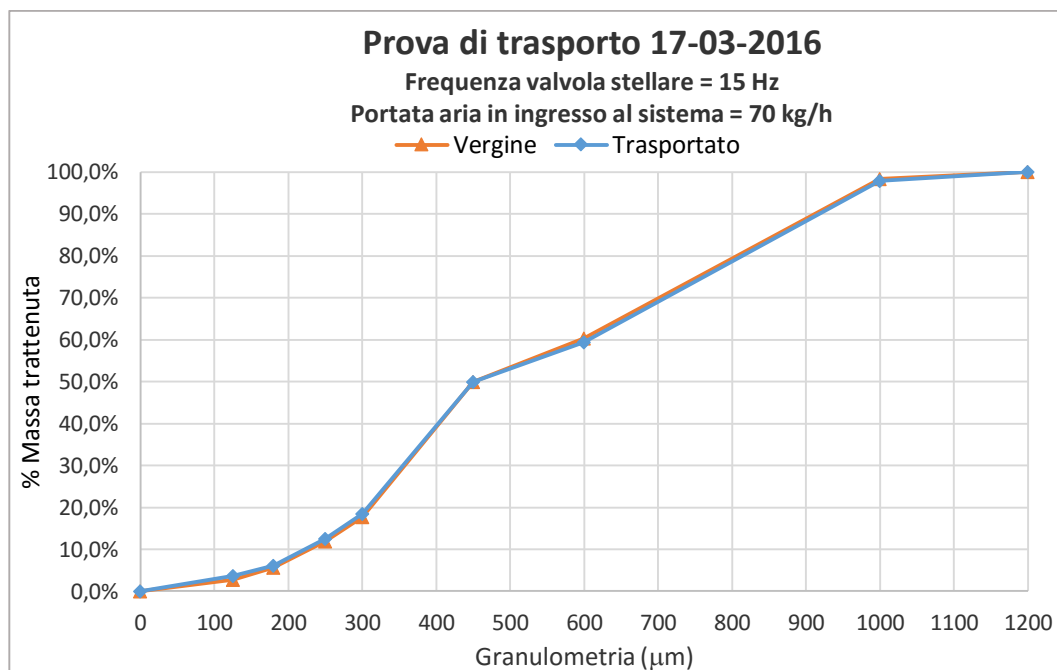


Fig5.10 – Distribuzione granulometrica cumulata materiale vergine e trasportato, prova 09-02-2016

	Massa Trattenuta	Trasportato	Vergine
<b>D10 [µm]</b>	10%	222,4	229,1
<b>D50 [µm]</b>	50%	450,8	450,7
<b>D90 [µm]</b>	90%	917,9	911,7

Tab5.9 – granulometria del 10, 50 e 90% di massa trattenuta dei campioni di materiale vergine e trasportato, prova 17-03-2016.

Come è visibile da Fig5.10 e da Tab5.9, la differenza riscontrabile nei valori del *D10*, *D50* e *D90* tra materiale trasportato e materiale vergine di riferimento è piuttosto piccola, e per tale motivo può essere considerata trascurabile. Inoltre, il valore *D10* del materiale trasportato, nella nuova configurazione impiantistica adottata, rispetta il limite inferiore di accettabilità prima esposto.

Questi ultimi risultati ci confermano che l' indesiderata frantumazione di materiale avviene, per la maggior parte, durante l'attraversamento delle valvole deviatrici. È bene sottolineare, però, che queste non sono solo le uniche responsabili di tale fenomeno: un trasporto pneumatico con bassi rapporti di

miscela, quindi con alte portate di aria in ingresso, a parità di portata di materiale trasportato, genera uno sgretolamento indesiderato dell'atomizzato di barbotina nell'attraversamento delle curve, a causa della forte decelerazione e dall'improvviso cambio di direzione subito dal prodotto. A prova di ciò, si riportano le analisi granulometriche di un campione di materiale trasportato con un rapporto di miscela uguale a 12. (Fig5.11, Tab5.10).

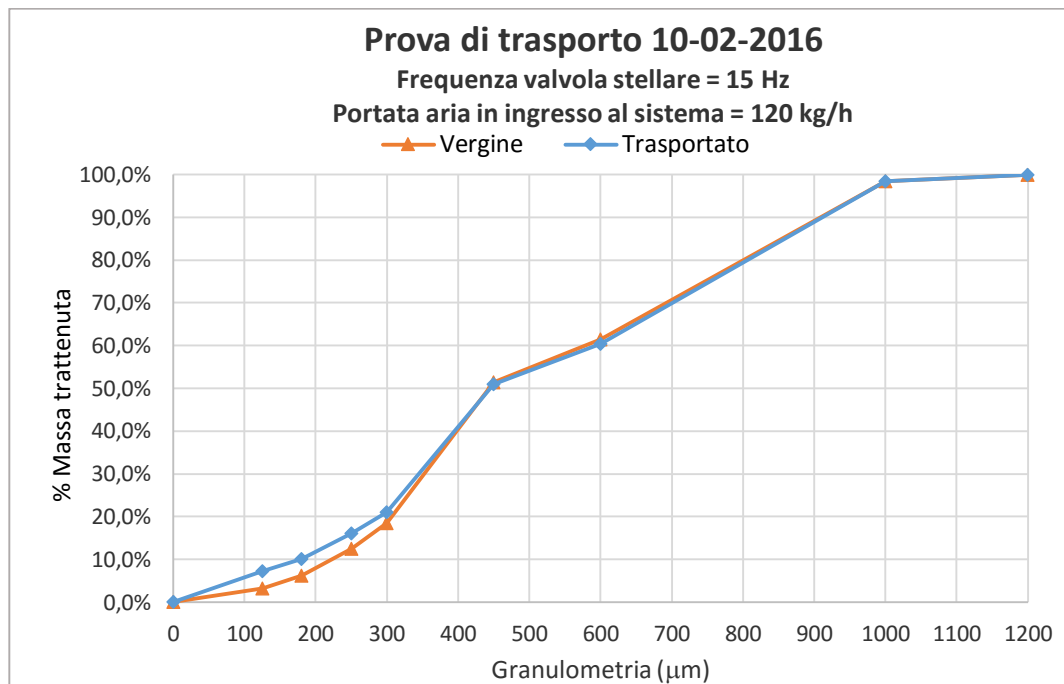


Fig5.11 – Distribuzione granulometrica cumulata materiale vergine e trasportato, prova 10-02-2016.

	Massa Trattenuta	Trasportato	Vergine
<b>D10 [µm]</b>	10%	177,2	222,4
<b>D50 [µm]</b>	50%	434,9	428,1
<b>D90 [µm]</b>	90%	911,6	909,2

Tab5.10 – granulometria del 10, 50 e 90% di massa trattenuta del campioni di materiale vergine e trasportato, prova 10-02-2016.

## 5.2 Prove di trasporto

Per poter definire le condizioni di esercizio con le quali deve lavorare l'impianto è necessario condurre numerose prove di trasporto variando i parametri a nostra disposizione e analizzando, per ognuna di queste la granulometria del materiale

trasportato, campionato al termine della prova, e i dati rilevati dal software di gestione dell'impianto. Sulla base dell'esperienza si può definire valido un processo di trasporto che rispetta le seguenti condizioni:

- Integrità del materiale trasportato;
- Continuità di portata;
- Portata di materiale superiore a 2 tonn/h;
- Trasporto sotto forma di tappi con cadenza costante;
- Portata di aria limitata.

A tal proposito si riportano, in Fig5.13, i risultati di una delle numerose prova di trasporto che rispetta le condizioni sopra citate. Nel grafico è rappresentato l'andamento, in funzione del tempo di acquisizione dei dati, della:

- Pressione di trasporto (barg), in arancione, rilevata dal trasduttore di pressione posto a monte della valvola rotativa. Il valore della pressione non supera mai 1,2 barg, poiché in corrispondenza di tale valore la valvola rotativa si arresta automaticamente e la pressione dell'aria, non essendoci altro materiale da accelerare, cala fino a quando la suddetta valvola non riprende il suo normale funzionamento.
- Portata massica d'aria (kg/h), in grigio, il cui valore viene calcolato a partire dalla differenza di pressione che si incontra nell'attraversamento della piastra forata e dai valori di pressione e temperatura rilevati a monte della valvola rotativa. Tale curva, a meno di inevitabili fluttuazioni, si mantiene costante nel tempo e presenta il suo valore massimo in corrispondenza dei valori minimi di pressione acquisiti durante la prova.
- Quantità di materiale movimentato (kg), in blu. Grazie a delle celle di carico installate sulla tramoggia di scarico dell'impianto è possibile conoscere, istante per istante, la quantità di materiale trasportato. Come si può vedere in Fig5.13 la curva della quantità di materiale movimentato non è continua ma presenta un andamento a gradini, tipico di un trasporto a tappi. Il tempo che intercorre tra un tappo e l'altro è rappresentato dal tratto orizzontale di ogni singolo gradino, mentre la massa di materiale trasportata dal tappo dal tratto verticale.

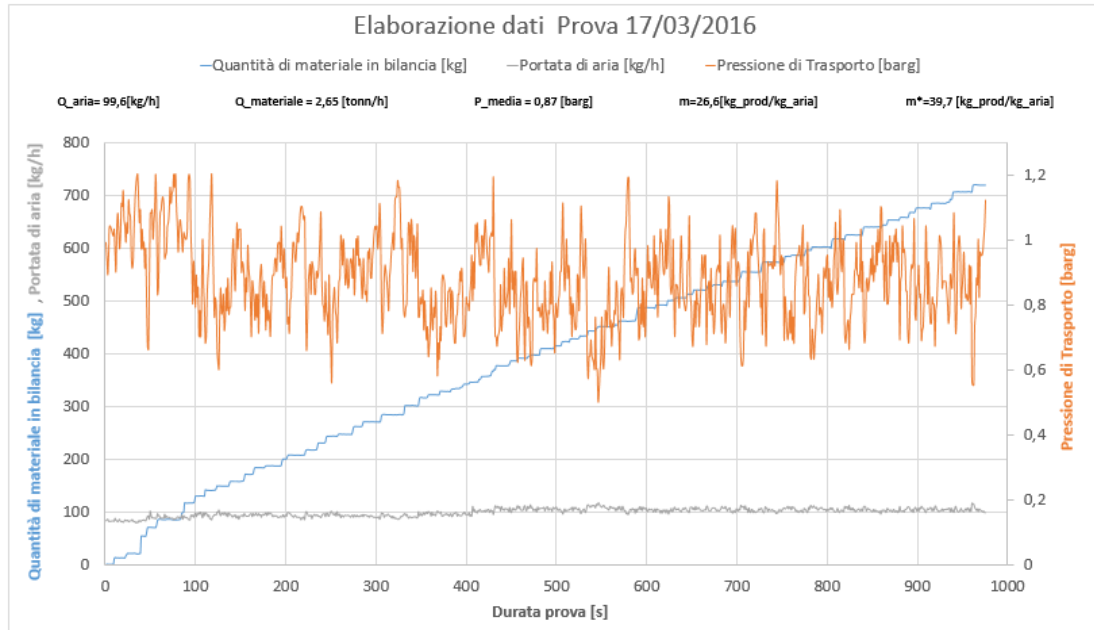


Fig5.13 – Elaborazione dati prova di trasporto 17/03/2016

Nel grafico, inoltre, sono riportati due valori del rapporto di carico:  $m$ , calcolato dividendo la portata di materiale trasportata per la portata di aria media convogliata nell'impianto;  $m^*$ , invece, ottenuto dividendo la portata di materiale per l'effettiva portata utilizzata nel trasporto, ossia quella elaborata dal compressore a meno delle perdite per trafilamento della valvola rotativa. Nei successivi paragrafi si terrà conto esclusivamente di  $m^*$ .

### 5.3 Diagramma di stato

Il diagramma di stato di un processo di trasporto pneumatico raffigura la caduta di pressione che si ottiene nel processo trasporto in funzione del rapporto di miscela. In Fig5.14 viene mostrato l'andamento qualitativo delle cadute di pressione in funzione del rapporto di miscela  $m$  per la fase densa e per quella diluita. Al minimo valore di caduta di pressione, solitamente, corrisponde il punto di transizione tra una fase e l'altra. È bene sottolineare che per certi materiali il valore minimo della caduta di pressione non è ben definito o non è definibile, per motivi legati al materiale stesso o perché il trasporto che viene eseguito è sottoposto a condizioni per le quali risulta instabile.

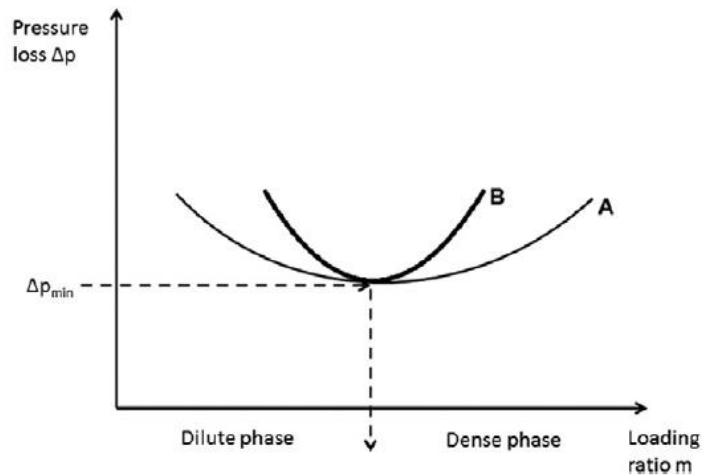


Fig5.14 – Diagramma di stato del trasporto pneumatico (Fonte: A.Bianchini, C.Saccani - *Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility*)

Se si vuole condurre un trasporto in fase densa è opportuno scegliere un rapporto di miscela abbastanza lontano dal punto che corrisponde al valore di  $\Delta p_{min}$ <sup>7</sup>, poiché si incorre nel rischio di passare in fase diluita con un conseguente aumento della caduta di pressione e quindi di energia da fornire al materiale per essere movimentato.

Se in fase densa un aumento della portata d'aria determina una diminuzione della perdita di pressione, in fase diluita ad un aumento di aria corrisponde un incremento di  $\Delta p$ , in quanto, quest'ultima è proporzionale - secondo una funzione di secondo grado - alla velocità dell'aria di convogliamento, proporzionale a sua volta, a meno del diametro della tubazione, alla portata di aria. In fase diluita, infatti, data la grande quantità di aria immessa nell'impianto, vi è la predominanza delle perdite di carico dell'aria rispetto a quelle del solido dovute, ad esempio, agli urti tra le particelle.

Le perdite di carico distribuite per un fluido che scorre in una condotta dritta possono essere calcolate secondo l'equazione di Darcy<sup>8</sup>:

$$\Delta P_d = P_1 - P_2 = \frac{4f}{d} \times \frac{\rho C^2}{2}$$

<sup>7</sup> A.Bianchini, C.Saccani - *Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility*, 2015

<sup>8</sup> D.Mills, *Pneumatic Conveying Design Guide*, 2004

Dove  $\Delta p_d$  sono le perdite di carico distribuite ( $\text{N/m}^2$ ),  $f$  il coefficiente di attrito adimensionale,  $L$  la lunghezza della condotta (m),  $\rho$  la densità ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C$  la velocità (m/s),  $d$  il diametro della condotta (m) e i pedici 1 e 2 si riferiscono alla sezione di ingresso e quella di uscita. Per un fluido comprimibile come l'aria, la velocità e la densità sono dipendenti in maniera considerevole dalla pressione e dalla temperatura:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$C = \frac{4 \dot{m}_a RT}{\pi d^2 p}$$

Dunque, sostituendo nell'equazione di Darcy, otteniamo in forma differenziale:

$$p dp = \frac{32 f L \dot{m}_a^2 R T}{\pi^2 d^5} dL$$

E integrando:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{64 f L \dot{m}_a^2 R T}{\pi^2 d^5}$$

Considerando che nel caso di impianti in pressione, come il nostro, la sezione di uscita è spesso a pressione atmosferica, l'equazione precedente diventa:

$$P_1 = \left( P_2^2 + \frac{64 f L \dot{m}_a^2 R T}{\pi^2 d^5} \right)^{1/2}$$

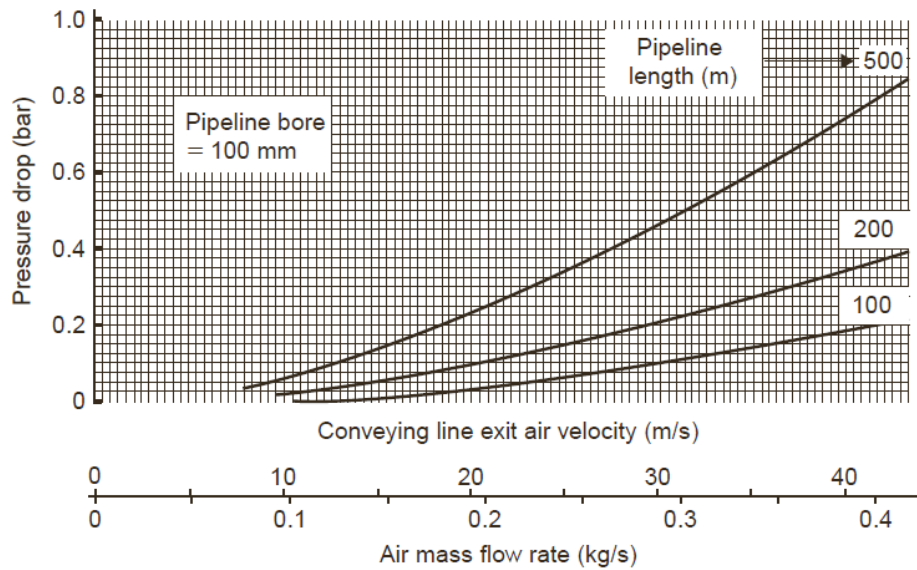


Fig5.15 – Perdite di carico solo aria (Fonte: D.Mills, *Pneumatic conveying Design Guide*)

L'equazione sopra riportata dimostra che la caduta di pressione è proporzionale al quadrato della velocità, e quindi la portata di aria ha un effetto significativo sulla caduta di pressione lungo la linea. (fig5.15). A causa di questo differente comportamento, tra fase densa e fase diluita, la regolazione del flusso d'aria corretto risulta piuttosto difficile. In figura 5.14 si notano due diversi comportamenti corrispondenti a due differenti condizioni del trasporto: il comportamento in A è più piatto se confrontato con B. È evidente, quindi, che in A è più difficile identificare e star lontano dal valore minimo di caduta di pressione. In questa situazione si verificano problemi di instabilità durante la formazione del tappo e la successiva partenza di quest'ultimo.

### 5.3.1 Determinazione sperimentale della curva

Dopo aver eseguito numerose prove di trasporto, è stato costruito un diagramma di stato sperimentale, per la sola fase densa, dell'impianto pilota di trasporto pneumatico sito in Technosilos.

La curva, riportata in Fig5.15, è stata disegnata interpolando, con una funzione polinomiale di secondo grado, i punti del diagramma che si ottengono dall'intersezione della pressione media del processo con cui viene condotta una



singola prova di trasporto e il relativo rapporto di miscela. Nel diagramma sono rappresentati solo i punti caratteristici delle prove che rispettano le condizioni riportate nel paragrafo 5.2.

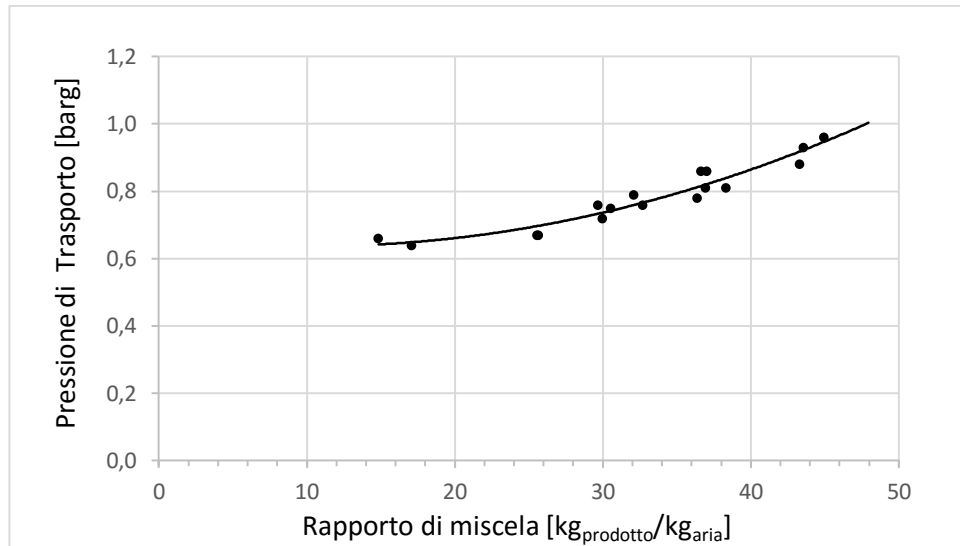


Fig5.14- Diagramma di stato impianto pilota di trasporto pneumatico

## 5.4 Determinazione delle migliori condizioni di trasporto

Come già detto in precedenza, lo scopo dell'analisi sperimentale è la determinazione delle condizioni di esercizio attraverso le quali deve lavorare l'impianto per garantire la movimentazione continua di materiale integro.

Dopo aver analizzato, per ciascuna prova di trasporto condotta nel rispetto delle condizioni indicate nel paragrafo 5.2, la granulometria dei campioni di materiale processato, è stata realizzata una curva, ottenuta dall'interpolazione, attraverso una funzione polinomiale di secondo grado, dei punti del diagramma dati dall'intersezione del *D10* caratteristico di una singola prova e del relativo rapporto di miscela. (Fig5.15).

Suddetta curva, che rappresenta l'andamento del *D10* in funzione di *m*, se sovrapposta al diagramma di stato sperimentale riportato nel paragrafo precedente, può essere considerata un utile strumento per individuare l'intervallo

dei rapporti di miscela con cui si deve eseguire un processo di trasporto per garantire l'integrità del materiale e il minimo consumo di energia, direttamente collegato alla perdita di pressione che si riscontra durante un processo.

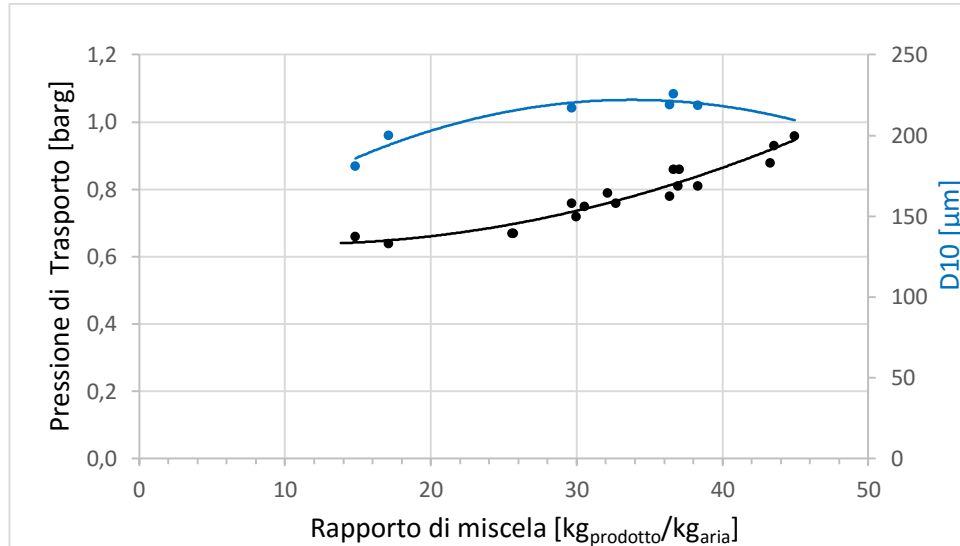


Fig.5.15- Diagramma di stato impianto pilota di trasporto pneumatico e andamento del D10 in funzione di  $m$

In conclusione, si può dire che il processo di trasporto nell'impianto pilota sito in Technosilos deve essere effettuato con un rapporto di miscela compreso tra 25 e 45 kg<sub>prodotto</sub>/kg<sub>aria</sub>. In questo range di rapporti di carico sono garantite portate di materiale che variano tra le 2 e le 3 tonn/h.

## 6. Caratterizzazione del trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbottina

Dopo aver individuato sperimentalmente le condizioni di esercizio che garantiscono buone portate di materiale movimentato e integrità dello stesso, è necessario valutare la perdita di carico che si ha durante il processo di trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbottina ed effettuare una simulazione del trasporto, al fine di confrontare la perdita di carico sperimentale con quella che risulta dalla simulazione numerica. Tale confronto è necessario per validare i risultati ottenuti sperimentalmente e determinare univocamente le caratteristiche del materiale trasportato. La caratterizzazione del materiale diventa indispensabile per la futura progettazione di un impianto di trasporto pneumatico in scala industriale. Nel capitolo che segue, dopo aver riportato i risultati sulla perdita di carico ricavata sperimentalmente, verranno mostrati i risultati delle simulazioni numeriche effettuate mediante l'utilizzo del software TPSimWin per la caratterizzazione del trasporto dell'atomizzato di barbottina.

### 6.1 Andamento della perdita di carico sperimentale

La determinazione della perdita di carico che si ottiene durante un processo di trasporto, è necessaria per determinare l'effettiva quantità di energia richiesta al compressore per la buona riuscita di un processo di trasporto.

Gran parte dell'energia fornita all'aria di convogliamento viene persa lungo la tubazione che costituisce la linea di trasporto. Le perdite di carico sono attribuibili sia alle caratteristiche geometriche del condotto di trasporto (scabrezza, rugosità, finitura superficiale) sia al particolare layout di impianto (lunghezza, tratti orizzontali o verticali, curve). Poiché la velocità del solido nel punto di alimentazione del materiale nella linea di trasporto è nulla, risulta evidente che una buona parte dell'energia posseduta dall'aria in arrivo dal

compressore è utilizzata per accelerare le particelle di materiale. Il punto di alimentazione non è il solo punto in cui le particelle devono essere accelerate: durante l'attraversamento delle curve, infatti, il cambio di direzione e l'attrito del materiale contro le pareti, causano una perdita di carico non indifferente (Fig6.1). Tuttavia la maggior parte di queste perdite sono imputabili alla velocità del solido all'uscita che, essendo inferiore rispetto a quella in entrata, necessita di una rilevante quantità di energia per riaccelerare il materiale.

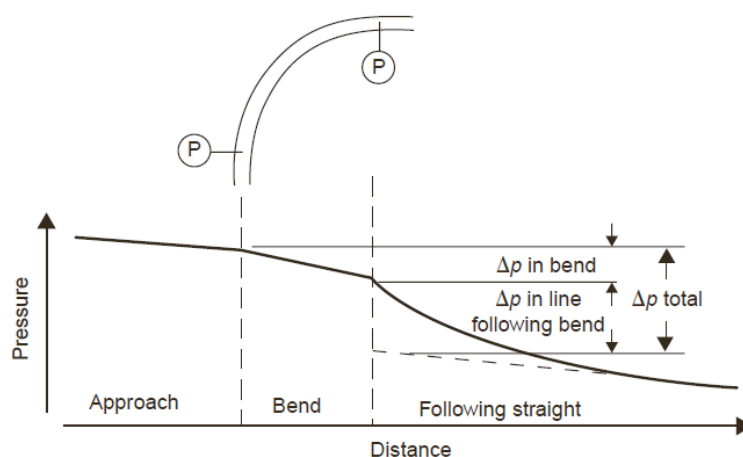


Fig6.1 – Caduta di pressione in curva (Fonte: D.Mills – Pneumatic Conveying Design Guide)

Un'altra buona fetta dell'energia dell'aria fornita dal compressore è spesa, infine, nell'attraversamento dei tratti verticali ascendenti. Qui, a differenza di ciò che accade nei tratti orizzontali, il mezzo portante deve vincere, oltre alle forze di attrito del materiale, anche la forza peso dello stesso, e per questo motivo è richiesta una quantità di energia più elevata rispetto al caso del trasporto orizzontale.

Grazie ai numerosi sensori di pressione installati lungo la linea di trasporto dell'impianto sperimentale, è stato possibile valutare non solo la caduta di pressione totale che si ottiene durante un processo di trasporto, ma anche determinare l'andamento delle perdite di carico lungo tutta la linea di trasporto. In Fig6.2 si riporta il layout d'impianto con l'indicazione delle principali prese di pressione e in Tab6.1 la lista dei sensori utilizzati per l'acquisizione dei dati e la rispettiva posizione nell'impianto.

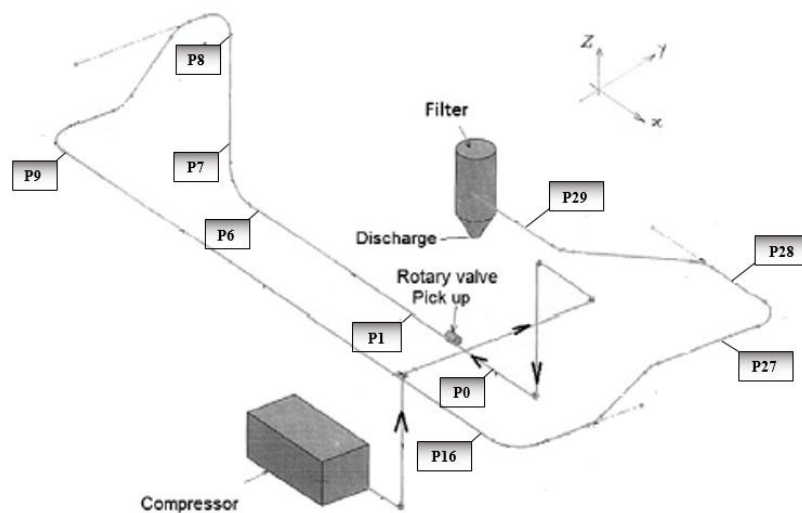


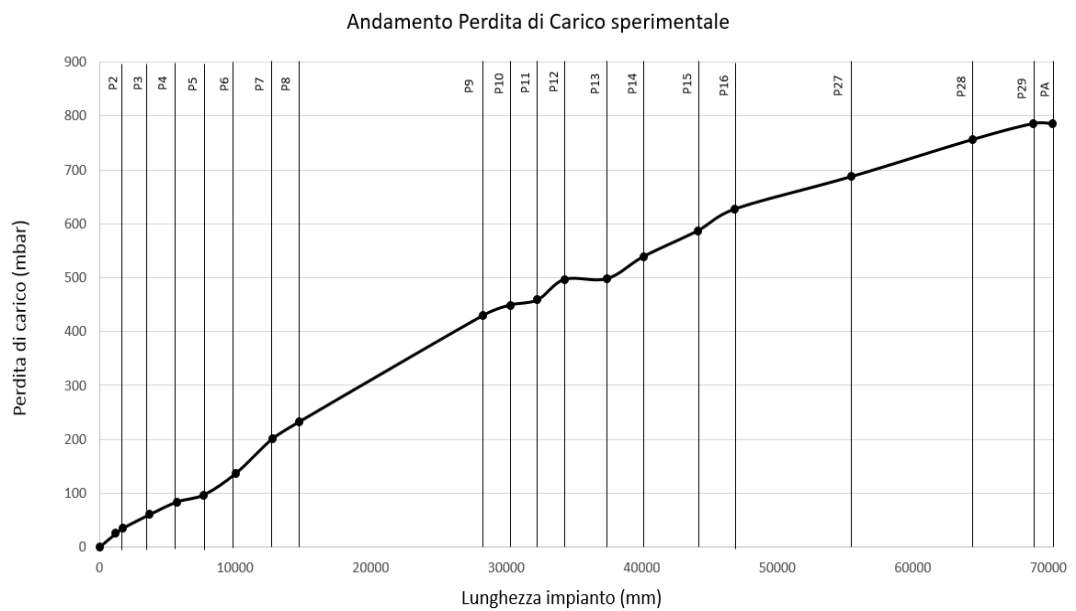
Fig6.2– layout dell'impianto sperimentale con l'indicazione delle principali prese di pressione

Numero Trasduttore	Distanza (mm)	#	Lunghezza cumulativa (mm)
P0 - P1	1210	P1	1210
P1 - P2	500	P2	1710
P2 - P3	2000	P3	3710
P3 - P4	2000	P4	5710
P4 - P5	2000	P5	7710
P5 - P6	2350	P6	10060
P6 - P7	2685	P7	12745
P7 - P8	2000	P8	14745
P8 - P9	13567	P9	28312
P9 - P10	2000	P10	30312
P10 - P11	2000	P11	32312
P11 - P12	2000	P12	34312
P12 - P13	3128	P13	37440
P13 - P14	2700	P14	40140
P14 - P15	4000	P15	44140
P15 - P16	2760	P16	46900
P16 - P27	8590	P27	55490
P27 - P28	8906	P28	64396
P28 - P29	4507	P29	68903
P29 - PA	1420	PA	70323

Tab6.1 – Posizione delle prese di pressione lungo l'impianto

L'andamento delle cadute di pressione lungo l'impianto, rappresentato in Fig6.3, è stato determinato sperimentalmente consultando ed elaborando i dati registrati dal software a bordo impianto.

Tali cadute di pressione si riferiscono ad una prova di trasporto eseguita con una pressione media di trasporto di 770 mbar, con un rapporto di miscela di 42  $\text{kg}_{\text{prodotto}}/\text{kg}_{\text{aria}}$  e una portata di aria in ingresso al sistema di 72 kg/h.



ig6.3– Andamento della perdita di carico sperimentale lungo l'impianto,  $m=42 \text{ kg}_{\text{prodotto}}/\text{kg}_{\text{aria}}$ ,  $P_t=0,78\text{bar}$

Conoscendo la posizione dei sensori di pressione, necessari per l'acquisizione dei dati, e il layout d'impianto è possibile valutare in quali punti della linea di trasporto si ha il maggior consumo di energia.

Come si può vedere nel grafico, la perdita di carico più rilevante è attribuibile all'accelerazione del materiale nel punto di alimentazione dello stesso (P1-P0) e al passaggio del materiale nei due tratti verticali ascendenti, rispettivamente nella parte di impianto che va da P6 a P9 e quella tra P16 e P27. Per una più facile comprensione del fenomeno si riporta, in Tab6.2, oltre alla caduta di pressione rilevata tra uno strumento e quello precedente, anche la perdita di carico riferita ad un metro lineare della tubazione. Quest'ultima, in base a quanto

detto, è più elevata nel primo tratto di accelerazione del materiale, nelle curve e nei tratti verticali ascendenti.

La caduta di pressione totale, calcolata nel punto di scarico del materiale è circa 15 mbar più elevata rispetto al valore della pressione di trasporto. Tale discordanza è attribuibile alla precisione dello strumento di rilevazione della pressione, che risulta essere migliore dello 0,1% sul valore del fondo scala dello strumento, compreso tra -1000 e +1000 mbar. Considerando che la perdita di carico sperimentale è stata determinata con l'utilizzo di 20 strumenti, si ha un errore sull'ultimo valore della caduta di pressione di 20 mbar.

	<b>Caduta di pressione</b> (mbar)	<b>Caduta di pressione cumulata</b> (mbar)	<b>Caduta di pressione per metro lineare</b> (mbar/m)
<b>P0 - P1</b>	25,2	25,2	20,9
<b>P1 - P2</b>	9,5	34,7	19,0
<b>P2 - P3</b>	25,7	60,5	12,9
<b>P3 - P4</b>	23,3	83,7	11,6
<b>P4 - P5</b>	13,4	97,1	6,7
<b>P5 - P6</b>	39,9	137,0	17,0
<b>P6 - P7</b>	63,9	201,0	23,8
<b>P7 - P8</b>	31,7	232,7	15,9
<b>P8 - P9</b>	87,4	430,2	14,6
<b>P9 - P10</b>	19,1	449,3	9,6
<b>P10 - P11</b>	9,5	458,8	4,7
<b>P11 - P12</b>	38,1	496,9	19,1
<b>P12 - P13</b>	1,13	498,0	0,4
<b>P13 - P14</b>	41,3	539,3	15,3
<b>P14 - P15</b>	47,8	587,1	12,0
<b>P15 - P16</b>	40,5	627,6	14,7
<b>P16 - P27</b>	130,1	687,7	7,0
<b>P27 - P28</b>	68,5	756,2	7,7
<b>P28 - P29</b>	29,7	785,9	6,6
<b>P29 - PA</b>	0	785,9	0

*Tab6.2 – Caduta di pressione lungo l'impianto*

## 6.2 Simulazione numerica del processo di trasporto pneumatico

Le simulazioni numeriche del trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbottina sono state effettuate con il software TPSimWin, basato sul calcolo agli elementi finiti e algoritmi per la caratterizzazione di un flusso bifase. I parametri di input di cui necessita il programma sono: il layout d'impianto, il diametro interno della tubazione, il rapporto di miscela, la portata in massa di solido e i parametri caratteristici identificativi del prodotto da trasportare; la successiva elaborazione informatica consente di ottenere come output: cadute di pressione e velocità dell'aria e del solido.

Per parametri caratteristi identificativi del prodotto si intendono il diametro equivalente della particella sferica, la densità del materiale e il coefficiente di attrito in rettilineo e in curva dello stesso. La conoscenza di questi valori è indispensabile per la futura progettazione di un impianto in scala industriale.

In Fig6.4 viene riportata in verde, la caduta di pressione lungo l'impianto ottenuta con l'utilizzo del software, e in nero, per punti, la perdita di pressione sperimentale.

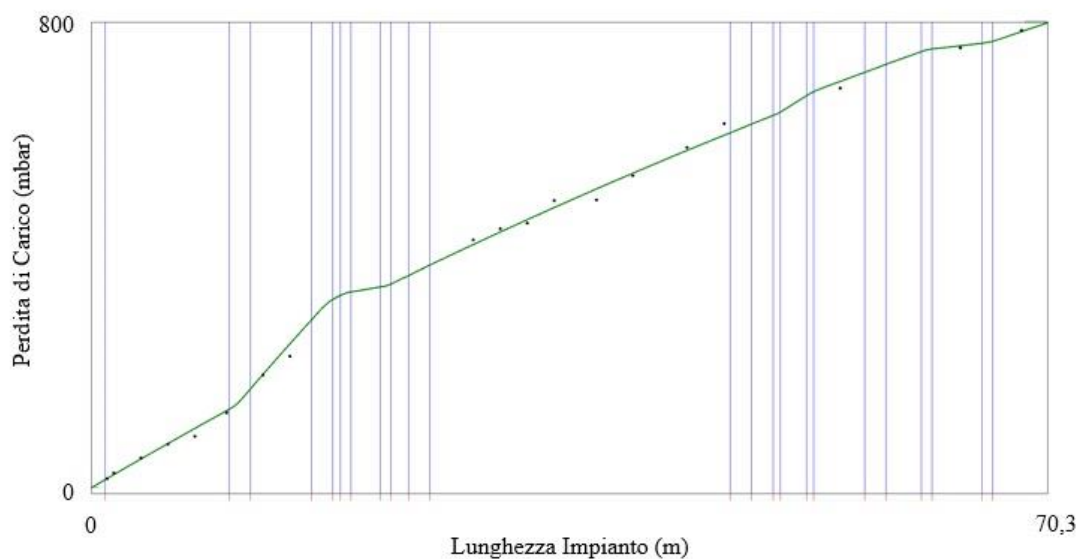


Fig6.4– Risultati TPSimWin, andamento della perdita di carico,  $m=42 \text{ kg}_{\text{prodotto}}/\text{kg}_{\text{aria}}$ ,  $P_t=0,8 \text{ bar}$ ,



La simulazione è stata condotta inserendo come input i valori ricavati sperimentalmente: 3000 kg/h di materiale rapporto di miscela di 42  $\text{kg}_{\text{prodotto}}/\text{kg}_{\text{aria}}$  e pressione di trasporto di primo tentativo di 800 mbar. La perdita di carico che si ottiene è il risultato di diverse iterazioni effettuate per far coincidere la stessa con i punti sperimentali ricavati nel paragrafo precedente. Le iterazioni sono state svolte modificando, di volta in volta i parametri identificativi dell'atomizzato di barbottina.

<i>Denominazione</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Valore</i>
Diametro equivalente della particella sferica	$d_s$	0,093 mm
Coefficiente di attrito in curva	$\lambda_c$	0,4
Coefficiente di attrito in rettilineo	$\lambda_r$	0,0004

*Tab6.2– Parametri identificativi dell'atomizzato di barbottina (Fonte: C.Saccani, A. Bianchini, - Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport)*

I valori del diametro equivalente della particella sferica e i coefficienti di attrito in rettilineo e in curva di primo tentativo sono quelli riportati in Tab6.2, mentre per la densità del materiale si è scelto il valore di  $1680 \text{ kg/m}^3$ , compreso nell'intervallo di densità determinato nel paragrafo 3.4.5.

Sulla base dei risultati ottenuti iterazione dopo iterazione, si può dire che nel primo tratto, quello necessario per l'accelerazione del materiale, la perdita di carico è direttamente proporzionale al diametro equivalente della particella sferica, mentre nella restante tubazione ciò che determina la pendenza della curva della perdita di carico sono i coefficienti di attrito in rettilineo e in curva. I valori identificativi determinati nell'ultima iterazione sono:

- $d_s = 0,0865 \text{ mm}$
- $\lambda_c = 0,1$
- $\lambda_r = 0,0001$

Per poter concludere il processo iterativo, è stato inoltre necessario verificare che il valore di velocità di caduta libera che il software restituisce come output

fosse all'incirca uguale a quello determinato sperimentalmente nel paragrafo 3.4.4 e che i valori di velocità e del gradiente di velocità del solido non superassero, rispettivamente, i limiti di accettabilità di 7 m/s e  $8 \text{ s}^{-1}$ .<sup>9</sup>

A tal proposito si riporta, in Fig6.4, l'andamento della velocità del solido e dell'aria.

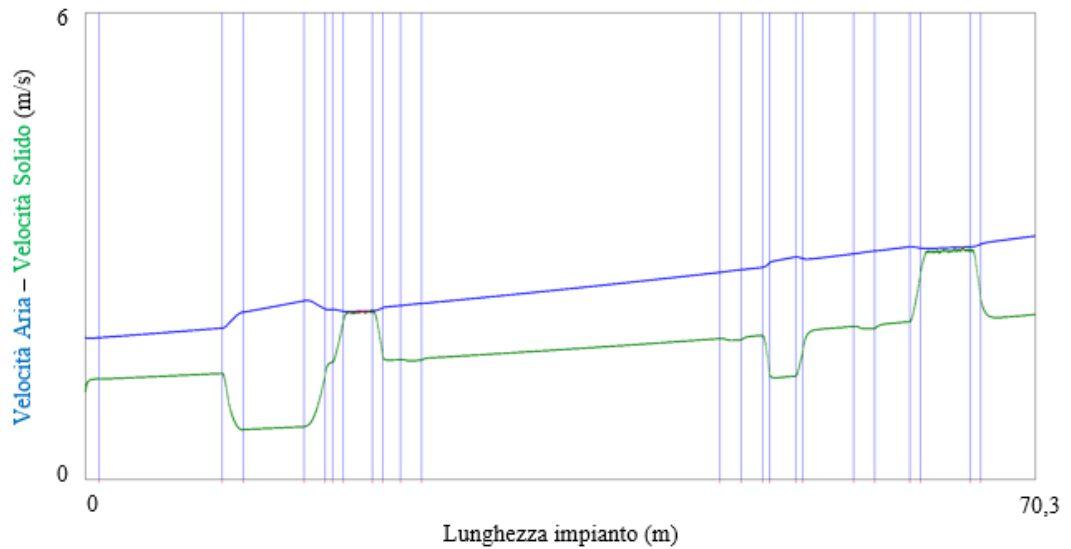


Fig6.4– Risultati TPSimWin, andamento della velocità dell'aria e del solido,  $m=42 \text{ kg}_{\text{prodotto}}/\text{kg}_{\text{aria}}$ ,  $P_t = 0,8 \text{ bar}$ ,

<sup>9</sup> A. Bianchini, M. Pellegrini, C. Saccani, Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility, 2015

# Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha cercato di dimostrare che il trasporto pneumatico in fase densa dell'atomizzato di barbotina rappresenta una valida alternativa, affidabile e ad alta innovazione tecnologica, ai tradizionali sistemi di movimentazione meccanica, quali nastri trasportatori e coclee meccaniche.

Dai risultati ottenuti, appare che il trasporto pneumatico del materiale oggetto di studio può essere condotto senza interferire sulla granulometria dello stesso. In questo modo, ogni azienda operante nel settore della ceramica che adotterà un sistema di trasporto pneumatico per il proprio materiale primario, potrà beneficiare sia di una sensibile riduzione degli scarti di produzione, sia di un minor consumo di energia elettrica, utilizzata per l'alimentazione degli energivori impianti di aspirazione installati negli stabilimenti produttivi, al di sopra dei nastri trasportatori, per purificare l'ambiente lavorativo.

Inoltre, grazie all'utilizzo del software di simulazione TPSimWin, qui adoperato per determinare le principali caratteristiche tecniche dell'atomizzato di barbotina, sarà possibile valutare la fattibilità di un impianto industriale per il trasporto pneumatico dello stesso, analizzando, in via preliminare, il layout che meglio si adatta alle caratteristiche dello stabilimento produttivo e al materiale in questione, e determinando, successivamente, il consumo di aria necessario per garantire una specifica portata di materiale da trasportare, con un dato rapporto di miscela.



# Appendice

VALVOLA ROTATIVA  
ROTARY VALVE  
ÉCLUSE ALVÉOLAIRE  
SCHLEUSE

## VPS/VPR/RS/SF/UPR

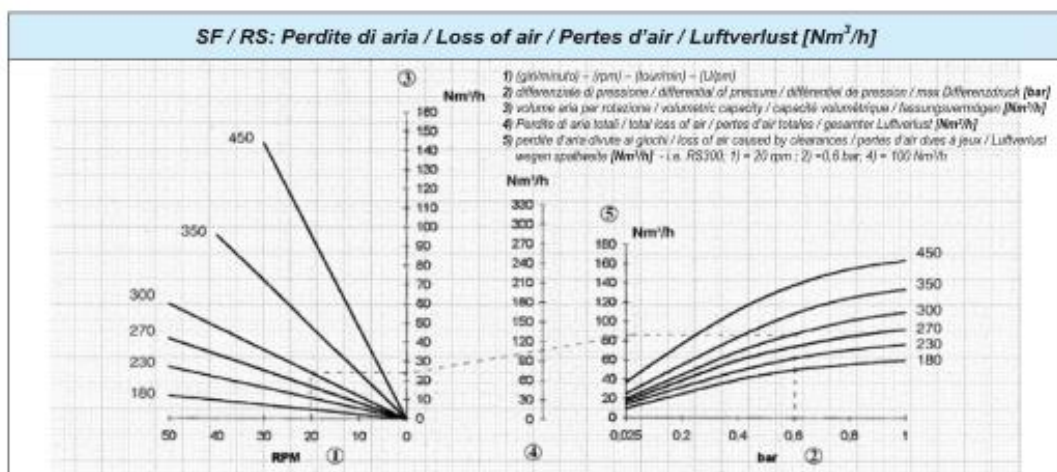
Dati tecnici  
Technical Data  
Données techniques  
Technische Angaben



capacità volumetrica / volumetric capacity / capacité volumétrique / fassungsvermögen [litres / revolution]												
taglia / size / taille / tipo / type / type / typ	100	150	180	200	230	250	270	300	350	400	450	600
VPS	--	--	2	--	4,5	--	8	12	25	40	--	--
VPR	0,5	--	3	--	6	--	11	17	30	45	--	--
RS / SF	--	2	4	--	8	--	12	20	40	--	80	120
UPR	--	--	--	8	--	18	--	--	--	--	--	--

n°pale rotore / rotor blades nr. / numéro de pales / Flügelanzahl												
taglia / size / taille / tipo / type / type / typ	100	150	180	200	230	250	270	300	350	400	450	600
VPS	--	--	6	--	8	--	8	8	8	8	--	--
VPR	6	--	8	--	8	--	8	8	8	10	--	--
RS / SF	--	8	8	--	8	--	8	8	10	--	10	12
UPR	--	--	--	10	--	10	--	--	--	--	--	--

tipo / type / type / typ	Max differenziale pressione Max differential of pressure Différentiel max de pression Max Differenzdruck	Temperatura d'esercizio / Working temperature Température d'exercice / Betriebstemperatur	
		Standard	Supporti esterni / External supports Supports extérieurs / Abgesetzte Lager (SE)*
VPS	2500 mmH <sub>2</sub> O	-15 ÷ 60 °C	-15 ÷ 220 °C (PTFE treccia / braid / tresse / Geflecht)
VPR	1 bar		-15 ÷ 400 °C (Treccia in grafite / Graphite braid / tresse de Graphite / Geflecht Graphit)
RS / SF	1 bar		
UPR	1 bar	--	--



Ci riserviamo di modificare le misure senza preavviso. We reserve the right to change any dimension without notice. Nous reservons de modifier les mesures sans préavis. Wir behalten uns das Recht vor die im Katalog angegebenen Abmessungen ohne Voranmeldung zu ändern.

FigA.1 – Scheda tecnica valvola rotativa commerciale (Fonte: Olocco)

# Bibliografia

- Indagini Statistiche sull'Industria Italiana – Confindustria ceramica (2013)
- M. Weber – La Tecnica del Trasporto pneumatico ed idraulico – Edizioni Tecniche (1974)
- D. Mills – Pneumatic Conveying Design Guide - Elsevier Butterworth-Heinemann (2004)
- A. Pareschi - Impianti Meccanici per l'Industria - Progetto Leonardo
- C.Saccani, A.Bianchini, M.Pellegrini – Materiale didattico del corso di Impianti Meccanici M (2015)
- C.Saccani, A.Bianchini, M. Pellegrini – Materiale didattico del corso di Strumentazione e Automazione Industriale (2015)
- C. Saccani - Experimental determination of solid speed in pneumatic conveying, Bulk Solids Handling - Trans Tech Publication (1992)
- C. Saccani, M. Pellegrini - Plant design for atomized slip pneumatic conveying : environmental impact reduction in the ceramics industry avoiding product wear and fragmentation - Bulk Europe (2010)
- Saccani C., Bianchini A., Pellegrini M.- Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport – Bulk Europe (2008)
- A. Bianchini, M. Pellegrini, C. Saccani - Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: Design, process simulation and test facility – Elsevier (2015)