

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Meccanica e Scienze Avanzate dell'Ingegneria

Ciclo XXXII

Settore Concorsuale: 09/B2

Settore Scientifico Disciplinare: ING-IND/17 – Impianti Industriali Meccanici

**Ingegneria dei flussi multifase: progettazione e
realizzazione di un impianto industriale**

Presentata da: Matteo Simoni

Coordinatore Dottorato

Chiar.mo Prof. Marco Carricato

Supervisore

Chiar.mo Prof. Cesare Saccani

Esame finale anno 2020

Indice

Introduzione	5
1. Introduzione al trasporto pneumatico	8
1.1 Campi di impiego	9
1.2 Classificazione.....	9
1.3 Basi di calcolo del trasporto pneumatico: equazioni generali del moto e della perdita di carico	11
1.4 Proprietà fisiche e parametri fondamentali del trasporto	15
1.5 Stati del trasporto pneumatico	19
2. Trasporto dell'atomizzato di barbottina.....	27
2.1 L'industria ceramica.....	27
2.2 Ciclo produttivo delle piastrelle ceramiche.....	28
2.3 Trasporto su nastri dell'atomizzato di barbottina.....	29
2.4 Silice libera cristallina (SCL) e silicosi.....	33
2.5 Analisi normativa	35
2.6 Trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbottina	36
3. Impianto sperimentale di trasporto pneumatico	38
3.1 Lay-out e P&I dell'impianto	38
3.2 Gruppo compressore.....	40
3.3 Gruppo di carico, valvola stellare e portata di trafilamento	41
3.4 Gruppo di scarico	44
4. TPSim Win	46
4.1 Descrizione del metodo di calcolo	46
4.2 Output forniti dal TPSim Win	52
5. Caratterizzazione dell'atomizzato di barbottina	55
6. Test sperimentali.....	58
6.1 Pesatura ed essiccamento	59
6.2 Determinazione delle condizioni di misura.....	60
6.3 Test di trasporto: curve granulometriche cumulative.....	62
6.4 Perdite di carico	64
6.5 Diagramma di stato	65

7. Progettazione di un impianto industriale.....	68
7.1 Lay-out e P&I dell'impianto.....	68
7.2 Dimensionamento delle tubazioni	69
7.3 Analisi di stabilità	70
7.4 Rapporto di miscela ottimale	72
8. Strumentazione ed automazione dell'impianto sperimentale	75
8.1 Strumentazione dell'impianto.....	75
8.2 Configurazione hardware del sistema di controllo	79
8.3 Software di supervisione.....	82
8.4 Regolazione della portata in massa di atomizzato di barbottina.....	90
Conclusioni.....	101
Bibliografia.....	103

Introduzione

Grazie all'eccellenza dei suoi prodotti, l'industria ceramica italiana è da molti anni leader mondiale nella produzione di piastrelle ceramiche.

Il ciclo produttivo delle piastrelle è costituito da diverse fasi di lavorazione. Le materie prime, ovvero argilla, sabbia e feldspati, vengono macinate e, in seguito all'aggiunta di acqua, miscelate, così da ottenere la barbotina. Questa miscela viene quindi inviata ad un atomizzatore, da cui ne esce atomizzato di barbotina. All'uscita dell'atomizzatore il materiale deve essere trasportato prima nei silos di stoccaggio e poi alle presse. Le lastre di atomizzato ottenute in seguito alle operazioni di pressatura vengono infine inviate nei forni, dove avviene la fase finale di cottura.

Nel presente lavoro si è focalizzata l'attenzione proprio sui sistemi di trasporto dell'atomizzato di barbotina. Attualmente infatti, la maggior parte delle industrie del settore ceramico utilizza dei nastri trasportatori. Sebbene questa tipologia di sistemi di trasporto sia in grado di movimentare elevate portate di materiale operando in maniera molto semplice ed affidabile, sono presenti diverse problematiche connesse al loro impiego. Quella più grave è sicuramente legata alla dispersione di polveri sottili nell'ambiente di lavoro, che compromettono la salubrità dell'aria ed espongono i lavoratori dell'industria ceramica al rischio di silicosi, una malattia invalidante dell'apparato respiratorio.

Per questa ragione è stata studiata una soluzione alternativa ai nastri trasportatori, che prevede l'utilizzo di un sistema pneumatico per la movimentazione dell'atomizzato di barbotina. Questo sistema di trasporto, completamente chiuso e confinato, risolve il problema dell'inquinamento da polveri sottili, ma ne presenta un altro. C'è infatti il rischio che l'atomizzato, per sua natura molto fragile, si rompa durante il suo moto all'interno delle tubazioni, così da non essere più idoneo per la realizzazione delle piastrelle.

L'elaborato, strutturato in otto capitoli, ha come obiettivo finale quello di progettare un impianto industriale per il trasporto pneumatico in fase densa dell'atomizzato di barbotina. Nei primi due capitoli sono stati analizzati nel dettaglio i due sistemi di trasporto, pneumatico ed a nastri, evidenziandone i punti di forza ed i difetti.

Nel terzo capitolo è stato descritto l'impianto sperimentale per il trasporto pneumatico su cui ho lavorato presso l'azienda Technosilos. Tale impianto, progettato e realizzato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna (DIN), è stato utilizzato per definire i parametri caratteristici dell'atomizzato di barbotina, quali diametro equivalente della particella sferica, coefficiente di attrito in rettilineo e coefficiente

di attrito in curva. Questi parametri sono necessari per la successiva fase di progettazione dell'impianto su scala industriale, eseguita con il simulatore TPSim Win. Nel quarto capitolo è stato presentato proprio questo software agli elementi finiti, che grazie alla sua capacità di prevedere il comportamento di flussi bifasi, è stato impiegato anche nella procedura di caratterizzazione del materiale solido, descritta nel quinto capitolo. Sull'impianto pilota sono stati eseguiti numerosi test di trasporto, con lo scopo di individuare se ed in quali condizioni operative fosse possibile trasportare una portata costante e sufficientemente elevata di materiale, assicurando l'integrità dell'atomizzato e limitando il consumo energetico. Le procedure sperimentali ed i risultati ottenuti dai test sono esposti nel sesto capitolo.

Una volta definite le condizioni di esercizio ottimali, ci si è dedicati alla progettazione dell'impianto industriale, le cui fasi sono state descritte nel settimo capitolo. Grazie al TPSim Win sono stati definiti il lay-out ed il diametro delle tubazioni, è stata eseguita l'analisi di stabilità ed è stato individuato il valore ottimale del rapporto di miscela. Infine nell'ottavo capitolo è stato svolto un approfondimento in merito alla strumentazione e all'automazione dell'impianto sperimentale, prestando particolare attenzione al sistema di regolazione della portata di atomizzato di barbotina.

1. Introduzione al trasporto pneumatico

Il trasporto di materiale in polvere, solidi granulari o materiali incoerenti può essere completamente automatizzato mediante un sistema a flusso pneumatico, in cui la tubazione rappresenta il sistema di trasporto ideale ed ecologicamente corretto.

Nel trasporto pneumatico infatti, il materiale da movimentare viene spinto all'interno della tubazione da un fluido portante, messo in pressione da un compressore o in depressione da una soffiante. Il fluido portante può essere di diversa natura, a seconda dello specifico campo di applicazione. Nella maggior parte dei casi si utilizza aria, oppure azoto o biossido di carbonio, se il materiale da trasportare può generare atmosfere potenzialmente esplosive. Nonostante che il principio del trasporto fosse noto all'uomo fin dai tempi antichi, si è assistito ad un suo impiego su scala industriale solo agli inizi del secolo scorso, con lo svilupparsi delle macchine necessarie. Inizialmente questa tecnica non ha avuto grande successo a causa dei suoi bassi gradi di rendimento, se paragonati a quelli dei sistemi di trasporto meccanici classici.

Oggi invece, a seguito di un forte sviluppo della chimica e della tecnica di processo, il singolo grado di rendimento è passato in secondo piano di fronte ai numerosi vantaggi che un sistema di trasporto pneumatico è in grado di offrire all'interno di un processo tecnologico nel suo complesso. Il maggiore vantaggio di questa tipologia di trasporto è data dalla semplicità del principio stesso del trasporto: è infatti difficile immaginare un percorso più semplice di un tubo, al cui interno il prodotto viene spinto o aspirato. Ne risulta quindi un sistema completamente chiuso e confinato, in grado di evitare ogni tipo di contatto e contaminazione tra materiale e ambiente e viceversa. I costi sono limitati, l'ingombro è minimo ed è necessaria una ridotta manutenzione. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla possibilità di far sviluppare, durante il trasporto pneumatico, ulteriori processi di natura fisica o chimica tra il materiale da trasportare ed il fluido portante. Si pensi, ad esempio, ai processi di essiccazione. Tra le principali problematiche a cui bisogna far fronte, è doveroso annoverare l'usura delle tubazioni e del materiale da trasportare, così come il rischio di intasamento delle condotte di trasporto.

1.1 Campi di impiego

A causa della comprimibilità del mezzo portante, i sistemi di trasporto pneumatici possono essere utilizzati soltanto su distanze relativamente brevi. Le perdite di carico infatti, direttamente proporzionali alla lunghezza del condotto e al quadrato della velocità, limitano superiormente la distanza percorribile dal materiale. L'aria espandendosi durante il trasporto aumenta la sua velocità, con conseguente incremento delle perdite di carico ed aumento del grado di usura, sia delle tubazioni che del materiale. In ambito industriale, difatti, i circuiti di trasporto pneumatico non superano quasi mai i 3 km di lunghezza.

Al giorno d'oggi sistemi di trasporto pneumatico sono impiegati nei più svariati settori industriali in cui vengono lavorate o prodotte materie solide in grani o in polvere. I principali campi d'impiego sono: l'industria chimica e di processo, l'industria alimentare, l'industria della lavorazione del legno, l'industria dei materiali da costruzione, le fonderie. Per quanto concerne i materiali da trasportare, risultano idonee al trasporto pneumatico le materie solide da polverulenti a granulari, occasionalmente anche truciolari e fibrose. È bene operare con solidi molto scorrevoli e non collanti. Al fine di mantenere bassa la velocità dell'aria, è inoltre importante che la granulometria sia la minima possibile, così da limitare sia il consumo di energia che l'usura. Ciò è tanto più rilevante quanto più è elevato il peso specifico del materiale da trasportare.

Per rendere possibile o per migliorare le condizioni del trasporto, spesso i materiali vengono sottoposti a trattamenti preventivi, come ad esempio la macinazione, l'essiccazione o la granulazione.

1.2 Classificazione

Gli impianti di trasporto pneumatico possono essere classificati secondo diversi criteri.

Una prima classificazione può essere effettuata in base alla disposizione degli elementi strutturali essenziali che costituiscono l'impianto. Questi sono: i silos o le tramogge, al cui interno è stoccato il materiale da movimentare; il compressore o la soffiante; i dispositivi di alimentazione, che introducono il prodotto solido nel mezzo portante; la tubazione; i dispositivi separatori, che dopo il trasporto separano nuovamente il solido dal mezzo portante. Dalla disposizione di questi elementi costruttivi risultano diverse tipologie di impianto, strutturalmente differenti:

- Impianti ad aspirazione
- Impianti a compressione

- Impianti ad aspirazione – compressione

Negli impianti ad aspirazione (Fig. 1) il prodotto viene prelevato dalla tramoggia di carico mediante valvole rotative, coclee o semplicemente da prese aspiranti, e tramite il condotto di trasporto viene convogliato all'interno di una tramoggia di scarico. Qui l'aria viene separata dal solido grazie al filtro a maniche, quindi scaricata all'esterno. Questa tipologia di impianti, molto semplici, sono indicati per la movimentazione di materiali sfusi scorrevoli. La depressione facilita la presa del materiale, ed evita il rischio di una sua fuoriuscita nell'ambiente, qualora dovesse venire meno la tenuta delle tubazioni. A discapito di questi sistemi, la portata e la lunghezza massima del circuito di trasporto sono limitate. Negli impianti a compressione (Fig. 2) si possono invece raggiungere portate maggiori, lavorando con pressioni di trasporto più elevate. A causa della sovrappressione presente nella tubazione, il sistema di alimentazione del prodotto è solitamente realizzato con un propulsore o una rotocella a tenuta: il solido viene immesso nel circuito di trasporto e poi trascinato dal mezzo portante fino a destinazione.

Gli impianti combinati ad aspirazione-compressione, seppur meno comuni e più articolati, uniscono i vantaggi della facilità di prelievo del materiale, caratteristica degli impianti ad aspirazione, con le maggiori potenze di trasporto dei sistemi a compressione.

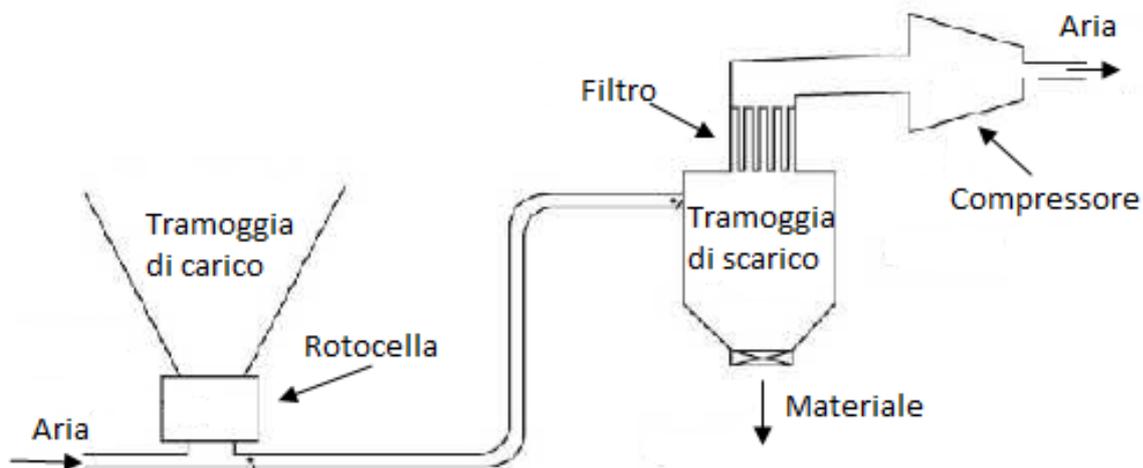


Fig. 1: Impianto ad aspirazione.

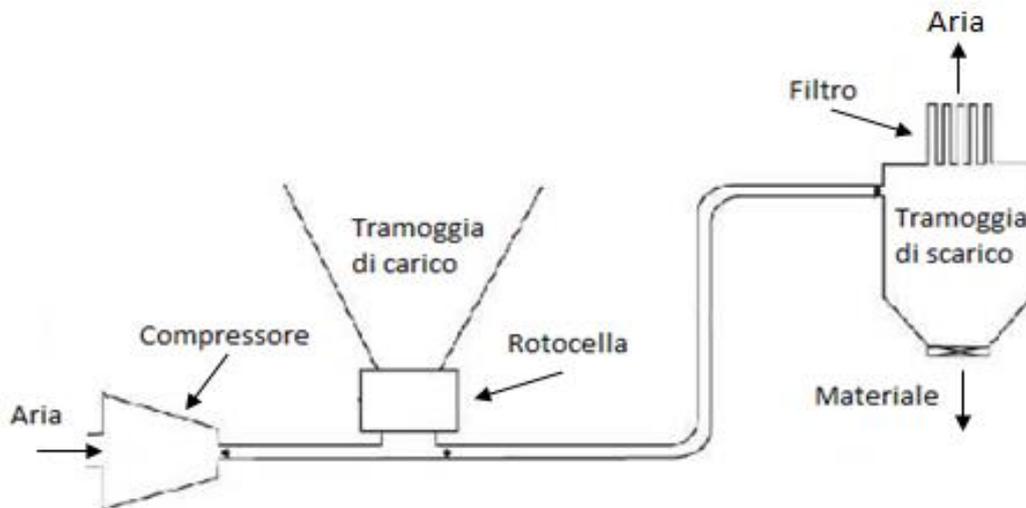


Fig. 2: Impianto a compressione.

Un'altra suddivisione può essere fatta in base al livello di pressione necessaria al trasporto: a seconda delle pressioni di lavoro dell'impianto si scelgono determinati tipi di compressori e si utilizzano opportuni dispositivi di alimentazione.

- Impianti a bassa pressione $p \leq 0,2$ bar
- Impianti a media pressione $0,2 \leq p \leq 0,5$ bar
- Impianti ad alta pressione $0,5 \leq p \leq 10$ bar

Un'ulteriore ed importante classificazione si basa sugli stati del trasporto, che possono essere di natura molto diversa tra loro e dipendono essenzialmente dalle proprietà fisiche del materiale da trasportare, del mezzo portante e della tubazione di trasporto, dalle portate in massa del solido e del gas e dalla geometria del circuito di trasporto stesso. Per una migliore trattazione dell'argomento, i vari stati del trasporto pneumatico saranno descritti ed analizzati più avanti, dopo aver introdotto e definito le grandezze fisiche fondamentali del trasporto.

1.3 Basi di calcolo del trasporto pneumatico: equazioni generali del moto e della perdita di carico

Affinché sia possibile trasportare pneumaticamente del prodotto solido, è necessario che le forze motrici del fluido portante che agiscono sulle particelle solide siano superiori alle forze che cercano di trattenere tali particelle, ovvero la forza peso, l'attrito e l'inerzia del materiale. Nel seguito saranno analizzate le varie forze coinvolte durante il processo di trasporto, fino a

ricavare le due equazioni generali del trasporto pneumatico, ovvero l'equazione del moto e l'equazione della perdita di carico.

Si consideri un volume infinitesimo $dV=A \cdot dl$, all'interno di un condotto circolare di diametro costante d , inclinato verso l'alto rispetto al piano orizzontale di un angolo δ .

Siano:

v = velocità media assiale del gas;

c = velocità media assiale del solido;

v'_y = componente radiale della velocità di caduta libera del solido;

M_f = massa del mezzo portante;

M_s = massa del materiale da trasportare;

ρ_f = densità del mezzo portante;

ρ_s = densità del materiale da trasportare;

p = pressione statica;

dp = differenza di pressione tra ingresso ed uscita dell'elemento di volume infinitesimo;

e = volume interstiziale di riferimento;

A = sezione dell'elemento di volume infinitesimo;

dl = lunghezza dell'elemento di volume infinitesimo;

W_s = velocità di caduta libera del solido;

g = accelerazione gravitazionale;

C_w = coefficiente di resistenza;

λ_s = coefficiente di perdita di carico del solido;

λ_f = coefficiente di perdita di carico del mezzo portante;

d_s = diametro delle particelle solide;

Sulla fase solida dell'elemento di volume infinitesimo considerato agiscono le seguenti forze:

- La forza peso: $G_S = (1 - e) \cdot \rho_s \cdot V \cdot g$
- La forza d'inerzia: $M_S \cdot \frac{dc}{dt}$
- La forza premente del fluido portante sulla sezione entrate del volume: $(1 - e) \cdot A \cdot p$
- La forza premente del fluido portante sulla sezione uscente del volume: $(1 - e) \cdot A \cdot (p + dp)$
- La forza di attrito sulle pareti: $F_{RS} = (1 - e) \cdot \lambda_s \cdot \frac{\rho_s c^2}{2d} \cdot V$
- La resistenza del flusso sulle particelle solide: $W = c_w \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot (v - c) \cdot |v - c| \cdot \frac{\pi d_s^2}{4} \frac{M_S}{\frac{\pi d_s^3}{6} \rho_s}$
- Le forze trasversali del mezzo portante per il trasporto in sospensione: F_q

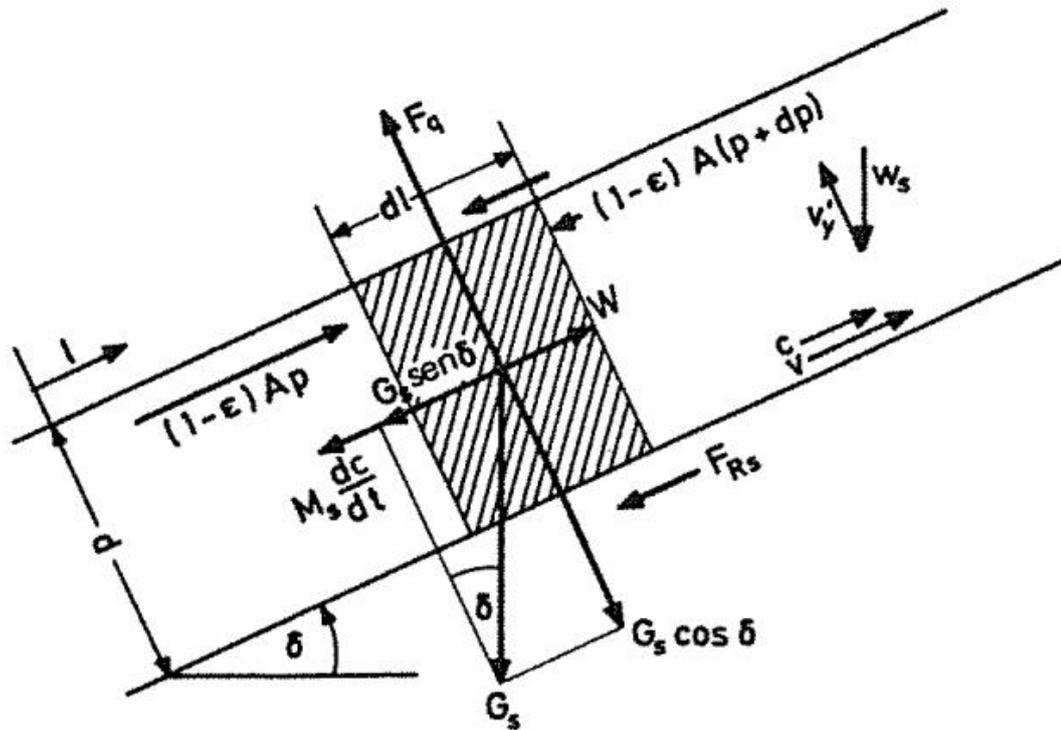


Fig. 3: Costellazione di forze agenti sulla fase solida di un elemento di volume infinitesimo.

Per lo stato di equilibrio in direzione assiale, la somma di tutte le componenti di forza assiali deve essere uguale a zero:

$$-(1 - e) \cdot A \cdot dp - G_s \cdot \sin \delta + W - M_s \cdot \frac{dc}{dt} - F_{RS} = 0$$

In maniera analoga, nello stesso elemento di volume infinitesimo, sul mezzo portante agiscono le seguenti forze:

- La forza peso: $G_f = e \cdot \rho_f \cdot V \cdot g$
- La forza d'inerzia: $M_f \cdot \frac{dv}{dt}$
- La forza di pressione sulla sezione entrante del volume: $e \cdot A \cdot p$
- La forza di pressione sulla sezione uscente del volume: $e \cdot A \cdot (p + dp)$
- La forza di attrito sulle pareti: $F_{Rf} = e \cdot \lambda_f \cdot \frac{\rho_f}{2} \frac{v^2}{d} \cdot V$
- La resistenza del solido sul fluido: $W = c_W \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot (v - c) \cdot |v - c| \cdot \frac{\pi d_S^2}{4} \frac{M_S}{\frac{\pi d_S^3}{6} \rho_S}$
- Le forze trasversali del mezzo portante per il trasporto in sospensione: F_q

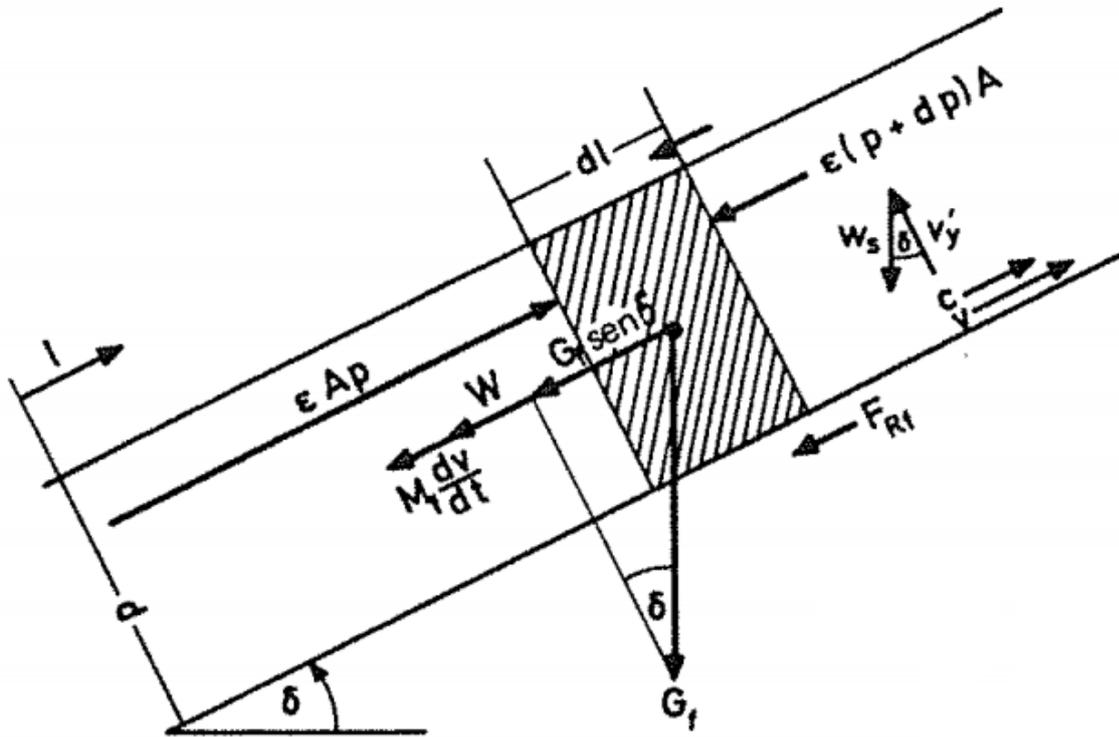


Fig. 4: Costellazione di forze agenti sul mezzo portante di un elemento di volume infinitesimo.

Per il mezzo portante si esegue un bilancio di lavoro, dato dalla somma dei prodotti delle componenti assiali delle forza sopra elencate e la velocità assiale v :

$$-e \cdot A \cdot dp \cdot v - G_f \cdot \sin \delta \cdot v - W \cdot v - M_f \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v - F_{Rf} \cdot v - F_q \cdot v'_y = 0$$

Dato che nella forza di resistenza W non risultano incluse le forze trasversali F_q , si è tenuto conto dell'energia ceduta trasversalmente mediante un ulteriore termine di lavoro, di grandezza $F_q \cdot v'_y = (G_S - \rho_f V_S g) \cos \delta w_S \cos \delta$, in cui v'_y è la velocità trasversale del fluido e V_S è il volume occupato dal solido.

Mediante il bilancio delle forze sulla fase solida ed il bilancio di lavoro per il mezzo portante si sono quindi trovate due relazioni, tra loro accoppiate dalla pressione e dalla resistenza. Uguagliando l'espressione della perdita di carico dp ricavabile dalle due relazioni si ottiene l'equazione generale del moto per il trasporto con inclinazione verso l'alto:

$$W = e \left[G_S \sin \delta + F_{RS} + M_S \cdot \frac{dc}{dt} - \frac{1-e}{e} \left(G_f \sin \delta + F_{Rf} + M_f \cdot \frac{dv}{dt} + (G_S - V_S \rho_f g) \cos^2 \delta \frac{w_S}{v} \right) \right]$$

In maniera analoga, uguagliando l'espressione della resistenza W si ottiene l'equazione generale della perdita di carico:

$$-dp \cdot A = G_f \sin \delta + F_{Rf} + M_f \cdot \frac{dv}{dt} + (G_S - V_S \rho_f g) \cos^2 \delta \frac{w_S}{v} + G_S \cdot \sin \delta + F_{RS} + M_S \cdot \frac{dc}{dt}$$

Sostituendo le espressioni delle singole forze, le due equazioni assumono la seguente forma:

$$\frac{dc}{dl} = \frac{3 c_w}{4 d_s} \frac{\rho_f}{\rho_s e} \frac{(v-c)^2}{c} - \frac{1}{c} \left(g \sin \delta + \lambda_s \frac{c^2}{2d} \right) + \frac{\rho_f}{c \rho_s} \left(g \sin \delta + \lambda_f \frac{v^2}{2d} + v \frac{dv}{dl} \right) + \frac{1-e}{e} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} g \frac{w_s}{c v} \cos^2 \delta$$

$$-\frac{dp}{dl} = e \left(\rho_f g \sin \delta + \lambda_f \frac{\rho_f v^2}{2d} + \rho_f v \frac{dv}{dl} \right) + (1-e) \left[(\rho_s - \rho_f) g \cos^2 \delta \frac{w_s}{v} + \rho_s g \sin \delta + \lambda_s \frac{\rho_s c^2}{2d} + \rho_s c \frac{dc}{dl} \right]$$

Per poter risolvere le equazioni generali del moto e della perdita di carico è quindi necessario conoscere alcuni parametri che non sono però noti a priori, come i coefficienti di perdita di carico del solido e del gas λ_s e λ_f , il volume interstiziale e , il diametro delle particelle solide d_s , la loro velocità di caduta libera w_s ed il loro coefficiente di resistenza C_w . La corretta determinazione di questi parametri può risultare anche molto complessa.

1.4 Proprietà fisiche e parametri fondamentali del trasporto

Nel seguito saranno descritte le proprietà fisiche, sia del gas che del solido, ed i parametri di maggiore influenza nel processo di trasporto pneumatico.

RAPPORTO DI MISCELA

Il rapporto di miscela μ , detto anche rapporto di carico, è definito come il rapporto tra la portata in massa di materiale solido \dot{m}_s e la portata in massa d'aria \dot{m}_a :

$$\mu = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a}$$

Il rapporto di miscela rimane costante lungo tutta la linea, ed è un parametro significativo per descrivere la tipologia di trasporto pneumatico. Per bassi valori del rapporto di miscela si parla di trasporto in fase diluita, viceversa quando μ è elevato si ottiene un trasporto in fase densa, caratterizzato da perdite di carico maggiori e minori velocità, sia dell'aria che del solido.

DENSITÀ DELL'ARIA

La densità dell'aria ρ_a è funzione della pressione e della temperatura, e può essere espressa dall'equazione di stato dei gas perfetti:

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

in cui P è la pressione dell'aria in Pascal, T la sua temperatura in gradi Kelvin ed R è la costante dei gas in $\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$. I gas reali infatti, a piccole pressioni si comportano come gas perfetti, e nel campo di lavoro del trasporto pneumatico l'equazione sopracitata può essere utilizzata senza commettere alcun errore di rilievo. Un altro parametro da tenere in considerazione quando si valuta la densità dell'aria è quindi l'altitudine a cui si trova l'impianto, che influenza direttamente la pressione atmosferica. All'aumentare dell'altitudine diminuisce la pressione atmosferica (vedi Fig. 5), con conseguente calo della densità dell'aria.

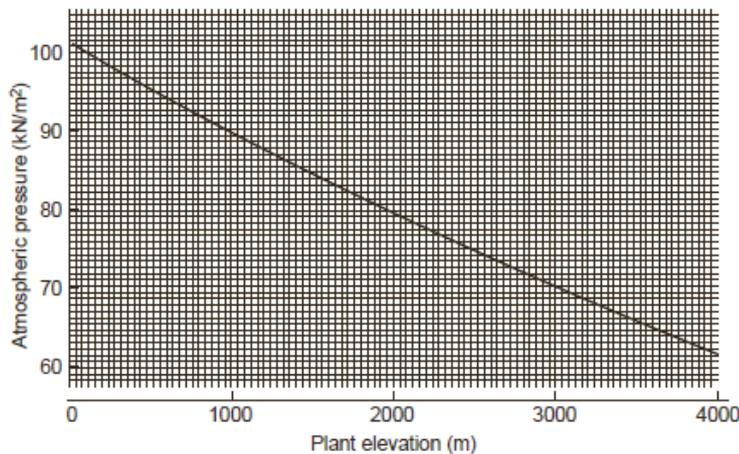


Fig. 5: Andamento della pressione atmosferica in funzione dell'altitudine. Fonte [1].

UMIDITÀ DELL'ARIA

L'umidità relativa φ è definita come il rapporto tra la quantità di vapore m_w contenuta in una massa d'aria di volume V e la quantità massima di vapore acqueo m_{sat} che quel volume d'aria può contenere nelle stesse condizioni di temperatura T e pressione P . Utilizzando l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$\varphi = \frac{m_w}{m_{sat}(T)} = \frac{P_w \cdot V / (R_w \cdot T)}{P_{sat}(T) \cdot V / (R_w \cdot T)} = \frac{P_w}{P_{sat}(T)}$$

Il grado igrometrico φ rappresenta quindi il rapporto tra la pressione parziale del vapore e la pressione in condizioni di saturazione.

In un impianto di trasporto pneumatico il livello di umidità dell'aria è un importante parametro da tenere sotto controllo, poiché determina l'umidificazione o l'essiccamento del materiale durante il trasporto, dovuto all'interazione tra il prodotto solido e la stessa aria di convogliamento. Questo fenomeno è tanto più rilevante quanto più basso è il rapporto di miscela.

PORTATA IN MASSA E VELOCITÀ DELL'ARIA

La velocità dell'aria v dipende dalla portata massica di aria \dot{m}_a elaborata dal compressore o dalla soffiante, dalla densità dell'aria stessa ρ_a e dalla sezione della tubazione di trasporto A . Infatti abbiamo:

$$\dot{m}_a = \rho_a A v$$

Affinché il prodotto solido venga trasportato con successo dal sistema pneumatico, è necessario che la velocità dell'aria sia maggiore della velocità di caduta libera del solido w_s in ogni punto del circuito di trasporto, così da evitare l'intasamento della linea.

COEFFICIENTE DI RESISTENZA

La forza di resistenza viene solitamente indicata con la seguente formula:

$$W = C_W A_s \frac{\rho_f}{2} (v - c) |v - c|$$

in cui A_s è l'area della sezione trasversale del corpo avvolto nel mezzo portante perpendicolarmente alla direzione del flusso. Il coefficiente di resistenza C_W è espresso in funzione del numero di Reynolds del solido $Re_s = \frac{d_s |v-c|}{\nu}$, dove d_s è il diametro della particella solida e ν è la viscosità cinematica del gas. A tal proposito un parametro significativo è la sfericità ψ , definita come il rapporto tra la superficie di una sfera dello stesso volume della particella e la superficie effettiva della particella stessa.

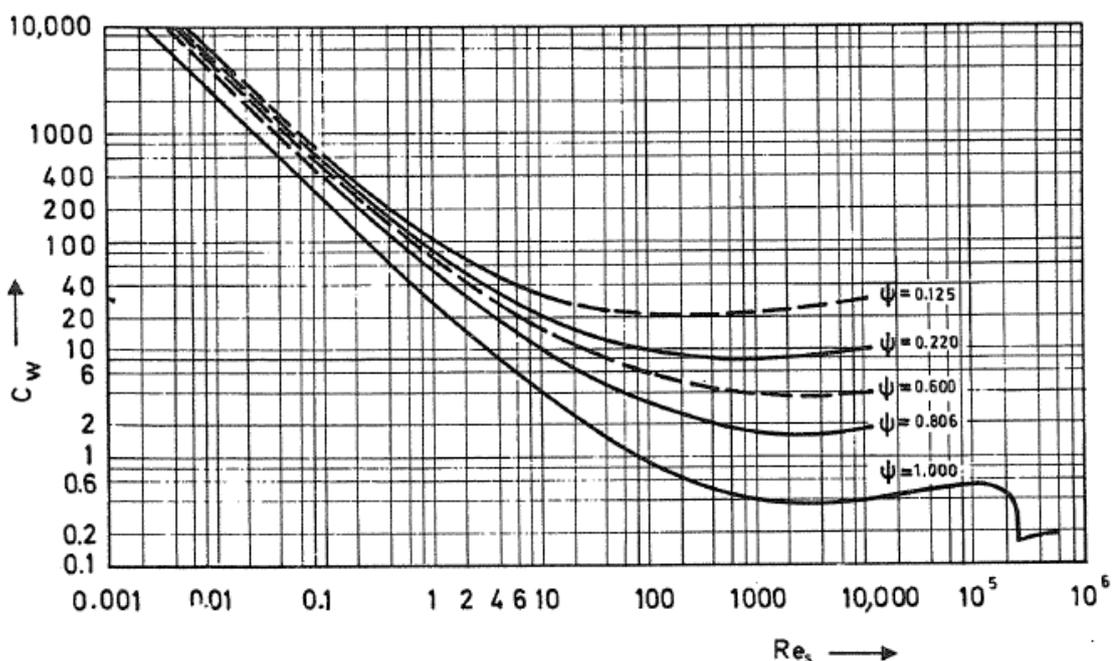


Fig. 6: Coefficiente di resistenza di una sfera in funzione dell'indice Re_s e della sfericità ψ .
Fonte [2].

Osservando la Fig. 6 si può notare come al diminuire della sfericità ψ il coefficiente di resistenza C_W aumenti. Un altro fattore che influenza il C_W è la forma degli spigoli dei corpi solidi: particelle di forma uguale possono infatti avere diversi coefficienti di resistenza se è diversa la forma dei loro spigoli. Più in particolare si è osservato che al diminuire dei raggi di curvatura degli spigoli, ovvero angoli più vivi, il coefficiente di resistenza aumenta.

VELOCITÀ DI CADUTA LIBERA DEL SOLIDO

La velocità di caduta libera W_S è la velocità che una particella solida raggiunge in caduta libera in un mezzo a riposo per forza d'inerzia senza influssi da parte di una parete vicina. Analiticamente può essere ricavata partendo dall'equazione generale del moto, eliminando i termini di attrito del solido e del mezzo portante sulla parete del tubo, così come i termini di accelerazione, in quanto l'operazione di caduta viene considerata dopo la fase di accelerazione, allo stato di inerzia. Si ottiene:

$$\frac{3 C_W}{4 d_s} \rho_f (v - c)^2 = \varepsilon (\rho_s g - \rho_f g)$$

In questa equazione sono quindi inclusi i due termini delle forze peso delle due fasi e la forza di resistenza. Essendo il mezzo a riposo la velocità del gas v è uguale a zero. Per cui la velocità di caduta libera del solido è pari a:

$$c = W_S = \sqrt{\frac{4 d_s \rho_s - \rho_f}{3 C_W \rho_f} g \varepsilon}$$

Si può osservare come all'aumentare della granulometria del solido aumenti anche la velocità di caduta libera. Anche il peso del solido agisce direttamente incrementando W_S , mentre il peso del gas esercita invece un influsso riducente. Il termine ε tiene conto della densità media della miscela, mentre la forza di resistenza, con tutte le sue numerose correlazioni, influisce nel risultato tramite il coefficiente di resistenza. Dato che il C_W dipende dal numero di Reynolds del solido Re_s , a sua volta funzione di W_S , ne risulta che l'equazione appena trovata per la velocità di caduta libera del solido W_S può essere risolta soltanto per via iterativa. Per quanto riguarda la velocità di caduta libera delle singole particelle sferiche W_{S0} ($\varepsilon=1$), nel campo di applicazione del trasporto pneumatico è stata calcolata con i valori del coefficiente C_W rappresentati in Fig. 6. I risultati sono riportati nei cosiddetti diagrammi di lavoro, in cui è rappresentato l'andamento della W_{S0} in funzione della granulometria per diversi valori della densità del solido. In Fig. 7 il diagramma di lavoro per particelle sferiche di diametro compreso tra 100 e 10000 μm .

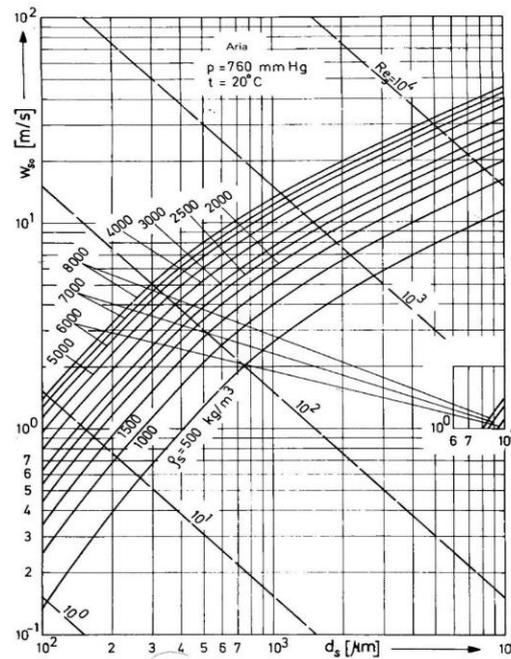


Fig. 7: Velocità di caduta di singole particelle sferiche in aria a riposo, per diametro dei grani $d_s = 100-10000 \mu\text{m}$. Fonte [2].

1.5 Stati del trasporto pneumatico

In base alle diverse costellazioni di forze che vengono a crearsi, lo stato del trasporto può assumere forme molto differenti. Nel seguito saranno analizzati a livello qualitativo gli stati più importanti del trasporto pneumatico, descrivendone l'aspetto con cui si presentano. Per fare ciò si farà riferimento a tre grandezze essenziali: la velocità di caduta delle particelle solide W_s , la velocità di trasporto del mezzo portante v , ed il rapporto di miscela μ . I valori numerici riportati fanno riferimento ad un materiale granulare con densità $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$, devono quindi essere intesi soltanto come dati orientativi.

In Fig. 8 sono rappresentati gli stati del trasporto pneumatico verticale, che saranno esaminati singolarmente nel seguito.

TRASPORTO A VOLO

Quando la velocità del mezzo portante è notevolmente superiore alla velocità di caduta delle singole particelle solide, e si sta operando con rapporti di miscela $\mu \leq 10$, viene a crearsi uno stato di trasporto chiamato a volo (Fig. 8a). In questo stato i singoli grani sono sufficientemente distanti tra di loro da non disturbarsi a vicenda, cosicché risulta possibile il volo libero di tali particelle solide. A causa dell'elevata velocità del gas, il moto del materiale solido avviene principalmente a causa della resistenza di flusso, proporzionale alla pressione dinamica, quindi al quadrato della velocità di flusso v . Inoltre con grandi velocità della corrente si generano

turbolenze in grado di distribuire uniformemente nella sezione trasversale sia le particelle più piccole che quelle più grandi: si parla in questo caso di distribuzione quasi-omogenea del solido ed il flusso può essere considerato quasi stazionario.

Con velocità del gas leggermente minori e con rapporti di miscela crescenti, le particelle solide vengono ancora trasportate regolarmente nella corrente centrale, ma in prossimità delle pareti del condotto occasionalmente si osserva una sospensione o anche una caduta di queste particelle, che non si conglomerano insieme, bensì rientrano rapidamente nella corrente centrale e vengono poi trasportate verso l'alto (Fig. 8b).

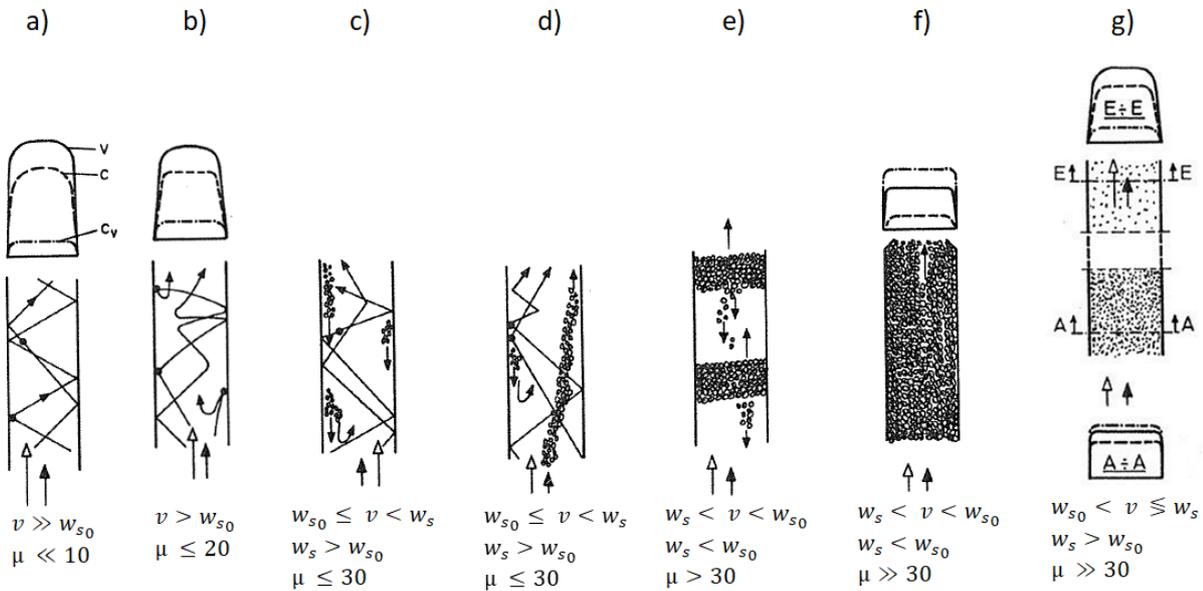


Fig. 8: Stati del trasporto pneumatico verticale. a) e b) Trasporto a volo, corrente rarefatta quasi stazionaria. c) Trasporto a palle, passaggio al trasporto in corrente densa. d) Trasporto a rivioli, corrente densa quasi stazionaria. e) Trasporto instazionario a tampone, corrente densa. f) Trasporto stazionario a spinta, corrente densa. g) Trasporto quasi stazionario a flusso, corrente densa. I valori μ indicati valgono per $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$. Fonte [2].

TRASPORTO A PALLE E A RIVOLI

Riducendo la velocità del gas a valori prossimi alla velocità di caduta del singolo grano W_{s0} , con rapporti di carico dell'ordine $\mu \approx 30$ si verifica il cosiddetto trasporto a palle (Fig. 8c). Le particelle solide, essendo W_{s0} minore di v , vengono singolarmente trasportate verso l'alto. Quando però si sovrappongono e vengono a crearsi degli agglomerati di particelle solide, dette appunto palle, queste precipitano, in quanto la loro velocità di caduta è già maggiore di quella del mezzo portante. Nel complesso però il materiale viene comunque trasportato, in quanto le palle si disgregano poco dopo la loro formazione e le singole particelle riprendono il loro moto di salita. A differenza di quanto visto per il trasporto a volo, in questo caso il trasporto è non

stazionario e la distribuzione del solido è eterogenea. Se le particelle solide sono particolarmente sottili, nelle stesse condizioni di trasporto tendono ad addensarsi formando dei rivoli (Fig. 8d). Il trasporto a volo, a palle e a rivoli possono verificarsi anche simultaneamente, specie se il prodotto solido presenta granulometrie differenti.

TRASPORTO A TAMPONE

Quando la velocità del gas è inferiore a W_{s0} , si può assistere ad agglomerazioni a tampone del materiale (Fig. 8e). In questo stato del trasporto la pressione statica fornisce gran parte della forza propulsiva, per cui il trasporto è possibile solo se la pressione è sufficientemente elevata. I tamponi vengono trasportati interi ed il rapporto di carico può raggiungere grandi valori. Il trasporto è non stazionario.

TRASPORTO A SPINTA

Nel caso di tubazioni completamente diritte e di lunghezza limitata, è possibile effettuare un trasporto pneumatico a piccole velocità in cui tutta la tubazione è riempita di materiale solido (Fig. 8f). Affinché si realizzi questo stato del trasporto, detto a spinta, è necessario che i grani del solido siano di dimensioni elevate. Il prodotto viene trasportato compatto, quindi con rapporti di miscela molto grandi, senza movimento interno delle particelle solide. Per evitare di passare nello stato del trasporto a tampone, è necessario che all'estremità della tubazione venga applicata una chiusa di scarico che offra resistenza.

TRASPORTO A FLUSSO

Se si ha a che fare con materiale fino fluidificabile, è possibile ottenere lo stato del trasporto a flusso (Fig. 8g). Il solido viene alimentato a pressione elevata nel flusso turbolento e il rapporto di miscela è inizialmente molto grande. La concentrazione del solido nel mezzo portante diminuisce poi in direzione del trasporto, per via dell'espansione del gas portante. È quindi possibile che si passi ad uno stato del trasporto a rivoli prima e a volo poi, nella parte finale del circuito.

Gli stati del trasporto pneumatico orizzontale, rappresentati in Fig. 9, sono simili a quelli del trasporto verticale e si differenziano da esso in quanto gli effetti della forza di gravità si manifestano in maniera più netta, causando un evidente effetto di dismiscela non appena la velocità del mezzo portante si abbassa. Il materiale solido può essere movimentato in corrente rarefatta quasi stazionaria con un trasporto a volo (Fig. 9a) o a salti (Fig. 9b); oppure in corrente densa con un trasporto a rivoli (Fig. 9c) o a dune (Fig. 9d). Per quanto riguarda il

trasporto a tampone (Fig. 9e), il trasporto a spinta (Fig. 9f) ed il trasporto a flusso (Fig. 9g) valgono le medesime considerazioni fatte in precedenza per il trasporto verticale.

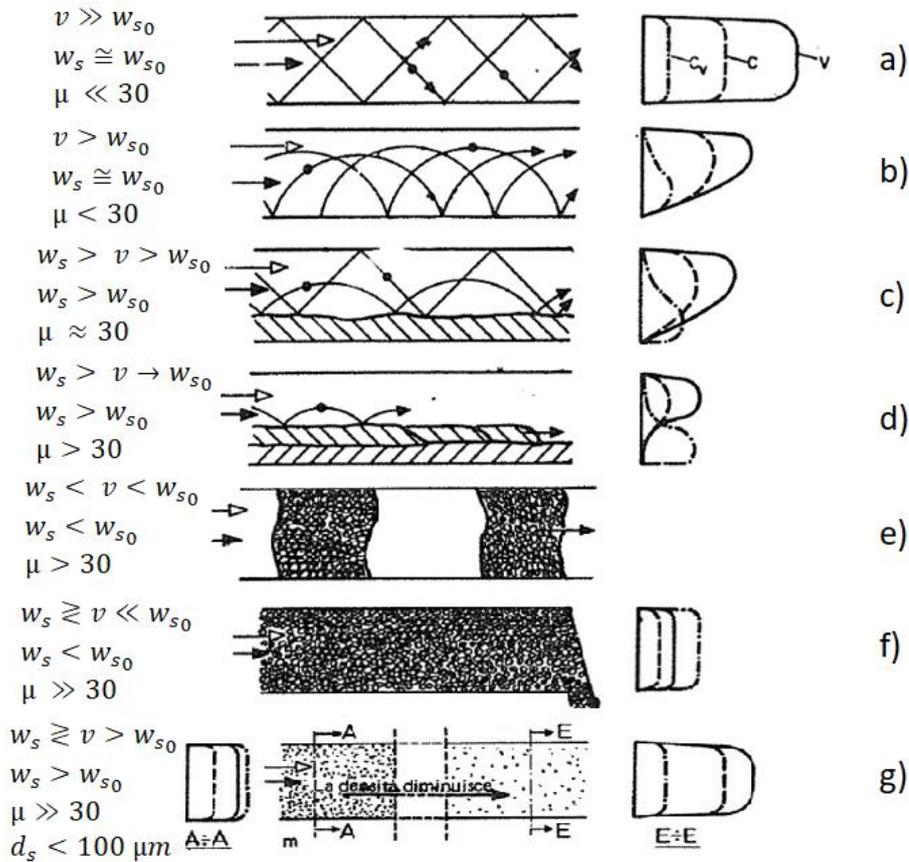


Fig. 9: Stati del trasporto pneumatico orizzontale. a) Trasporto a volo, corrente rarefatta quasi stazionaria. b) Trasporto a salto, corrente rarefatta quasi stazionaria. c) Trasporto a rivoli, corrente densa quasi stazionaria. d) Trasporto a dune, corrente densa instazionaria. e) Trasporto a tampone, corrente densa instazionaria. f) Trasporto a spinta, corrente densa stazionaria. g) Trasporto a spinta, corrente densa quasi stazionaria. I valori μ indicati valgono per $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$. Fonte [2].

Gli stati del trasporto appena descritti non fanno riferimento alla granulometria del solido, fatta eccezione per il trasporto a spinta e a flusso. Tuttavia, avendo analizzato i vari stati sulla base delle velocità v e W_s , e del rapporto di miscela μ , la dimensione delle particelle è inclusa indirettamente, in quanto W_s è funzione di d_s . È comunque doveroso sottolineare come la granulometria abbia un'influenza notevole sul comportamento al volo del prodotto solido. I grani fini, con diametro $d_s \leq 0,5 \text{ mm}$, quando la velocità del mezzo portante è sostenuta vengono trasportati più in sospensione che con urti, mentre quando il gas ha minore velocità tendono a depositarsi sul fondo della tubazione. Non riescono a penetrare attraverso gli strati in cui la corrente ha basse velocità, per poi reimmettersi nel flusso centrale e qui riassorbire energia sia in direzione assiale che radiale. Le particelle più grandi invece, grazie alla loro maggiore inerzia, penetrano più facilmente negli strati lenti, e dopo aver urtato con la parete

del condotto tornano nella corrente centrale dove riprendono energia. Inoltre i grani grossi, anche dopo essersi depositati sul fondo, sporgono dagli strati lenti e possono quindi essere afferrati, accelerati e trascinati via dalla corrente più veloce. È proprio per questa ragione che le particelle più grandi possono essere trasportate a salto, anche se la velocità del gas è prossima a W_s .

I vari stati del trasporto si differenziano molto tra loro anche per quanto riguarda l'energia necessaria a movimentare le particelle solide. Per valutare il consumo energetico in base alle condizioni di lavoro, in genere si utilizzano dei diagrammi in scala doppio logaritmica, detti diagrammi di stato, in cui si rappresenta a livello qualitativo la perdita di carico per unità di lunghezza della tubazione in funzione della velocità di trasporto. In Fig. 10 è mostrato il diagramma di stato per il trasporto pneumatico verticale per materiale solido a grana grossa.

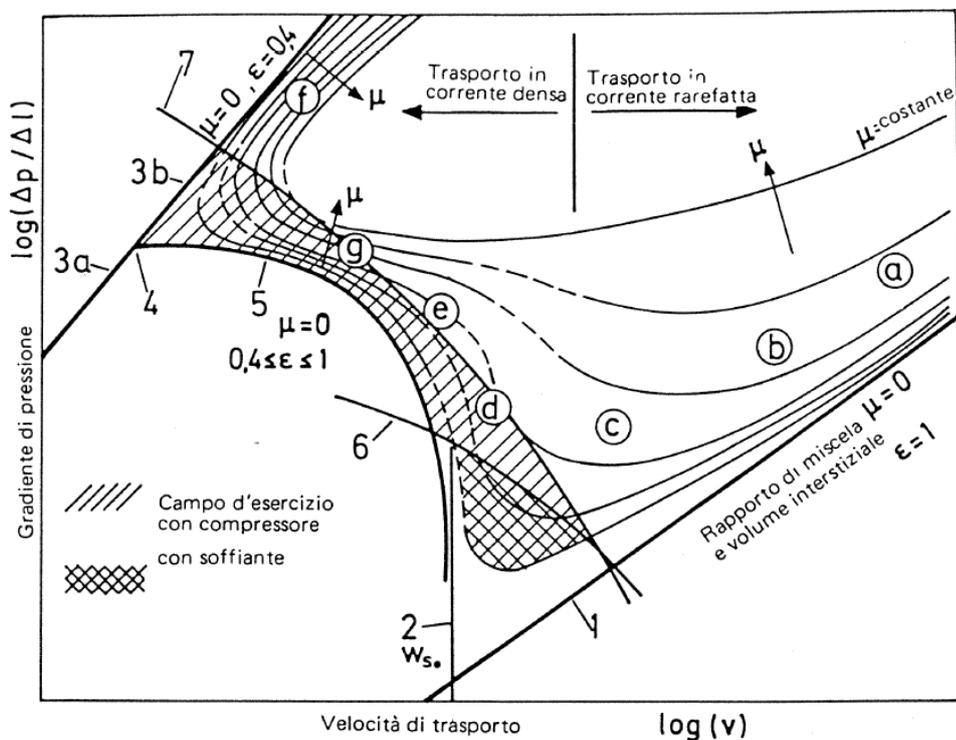


Fig. 10: Diagramma di stato per il trasporto pneumatico verticale per materiale a grana grossa.

1 tubo vuoto; 2 velocità di caduta del singolo grano w_{s0} ; 3a afflusso attraverso un mucchio liberamente mobile; 3b afflusso attraverso un mucchio bloccato; 4 punto di turbolenza; 5 strato di turbolenza esteso; 6 curva caratteristica della soffiante; 7 curva caratteristica del compressore.

Fonte [2].

Le rette 1 e 3 indicano il gradiente di pressione rispettivamente attraverso il tubo vuoto e attraverso un mucchio bloccato con il solo mezzo portante. Se un mucchio non stazionario viene attraversato dal gas a velocità crescente, il gradiente di pressione si sposta verso 3a fino al punto 4, detto di turbolenza, in cui il Δp è abbastanza grande da trasportare il mucchio. Se la velocità cresce ulteriormente, la perdita di carico totale nel mucchio in turbolenza non

cambia, in quanto il suo peso rimane costante. Ciò che cambia è la dilatazione dello strato di turbolenza, ed il gradiente di pressione diminuisce durante questa dilatazione seguendo la curva 5 fino a raggiungere la velocità di caduta del singolo grano W_{s0} in 2. Se invece il mucchio viene bloccato, ad esempio con dei vagli, il Δp passa nel punto di turbolenza 4, in linea retta secondo 3b. Sulla retta 3 il volume interstiziale di riferimento ε è pari a 0,4 mentre sulla retta dello strato fluidificato 5 abbiamo $\varepsilon = 1$. Il trasporto verso l'alto è possibile nel campo delimitato dalle rette 1, 2, 5 e 3b, rette in cui il rapporto di miscela μ è uguale a 0. Nel trasporto a volo e in sospensione (b) il gradiente di pressione è simile a quello della corrente pura (a). Quando la velocità del mezzo portante diminuisce la corrente si smiscela, raggiunge un minimo (c) e sale rapidamente in prossimità della velocità di caduta (d). Nel campo della velocità di caduta si passa al trasporto instazionario a tamponi (e). Se la soffiante è in grado di generare pressione a sufficienza, a velocità ancora più basse si può avere un trasporto a spinta (f) per particelle grandi, oppure a flusso (g) per solido a grani fini.

I diagrammi di stato sono molto utili anche per valutare il rischio di intasamento della linea. Introducendo le curve caratteristiche di una soffiante, simili alla curva 6, o di un compressore, più ripide come la 7, si individua il campo di esercizio del trasporto nell'intersezione con le curve a μ costante. Con una soffiante il campo ottimale è quello con corrente rarefatta, con i compressori invece il campo di esercizio è maggiore, fino ad ottenere anche un trasporto a spinta.

In Fig. 11 è riportato il diagramma di stato per il trasporto pneumatico verticale per materiale a grana fina. Nel caso di materiale a grana fina, nel diagramma di stato si può osservare come le curve a μ costante hanno andamento differente rispetto al caso di particelle grandi, soprattutto è diversa la curva dello strato fluidificato come limite inferiore. Infatti le polveri fini tendono a smiscelarsi con strati fluidificati estesi e si possono così raggiungere velocità massime ben maggiori della velocità di caduta del singolo grano W_{s0} . Si può inoltre notare che per ottimizzare il consumo di energia se si opera con bassi rapporti di miscela è bene trasportare il materiale in corrente rarefatta; viceversa con μ elevati è conveniente lavorare nel campo della corrente densa.

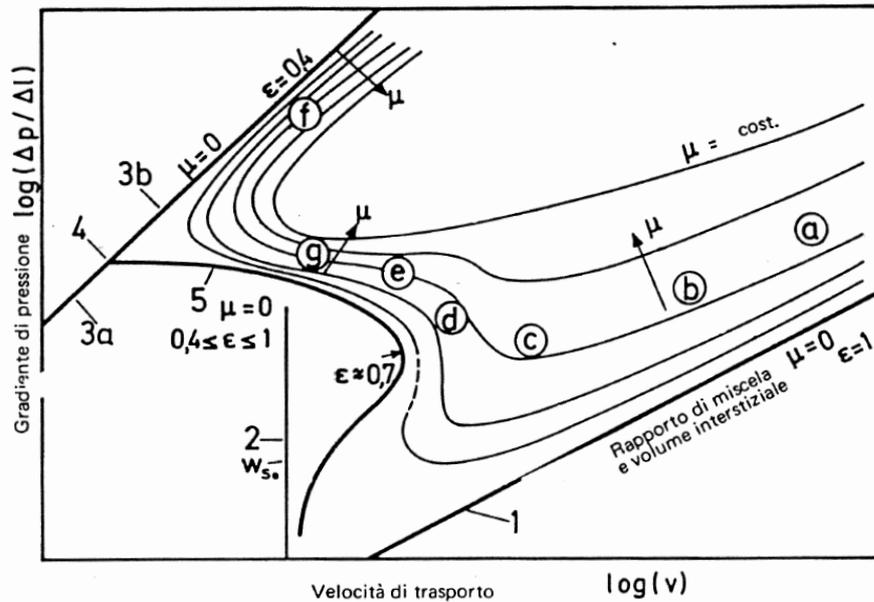


Fig. 11: Diagramma di stato per il trasporto pneumatico verticale per materiale a grana fina. 1 tubo vuoto; 2 velocità di caduta del singolo grano w_{s0} ; 3a afflusso attraverso un mucchio liberamente mobile; 3b afflusso attraverso un mucchio bloccato; 4 punto di turbolenza; 5 strato di turbolenza esteso; 6 curva caratteristica della soffiante; 7 curva caratteristica del compressore. Fonte [2].

Per quanto riguarda il trasporto orizzontale, il diagramma di stato è simile a quello del trasporto verticale. La maggiore differenza è nella curva dello strato fluidificato esteso. Nel trasporto verticale non si può andare sotto lo strato fluidificato poiché il prodotto solido viene movimentato dalle forze di flusso; nel trasporto orizzontale è invece possibile, dato che il materiale può appoggiarsi al fondo della tubazione e la corrente deve vincere solo l'attrito. Il trasporto può quindi avvenire anche quando $v < w_{s0}$. Il limite del trasporto corrispondente alla curva di strato fluidificato non parte in questo caso dal punto di turbolenza 4, bensì più in basso, nel punto di fluidificazione 4'. Per completezza in Fig. 12 è mostrato un esempio di diagramma di stato per il trasporto pneumatico orizzontale. Il diagramma fa riferimento al trasporto di sabbia, avente granulometria media pari a $350 \mu\text{m}$, all'interno di tubo di vetro di diametro di 10 mm.

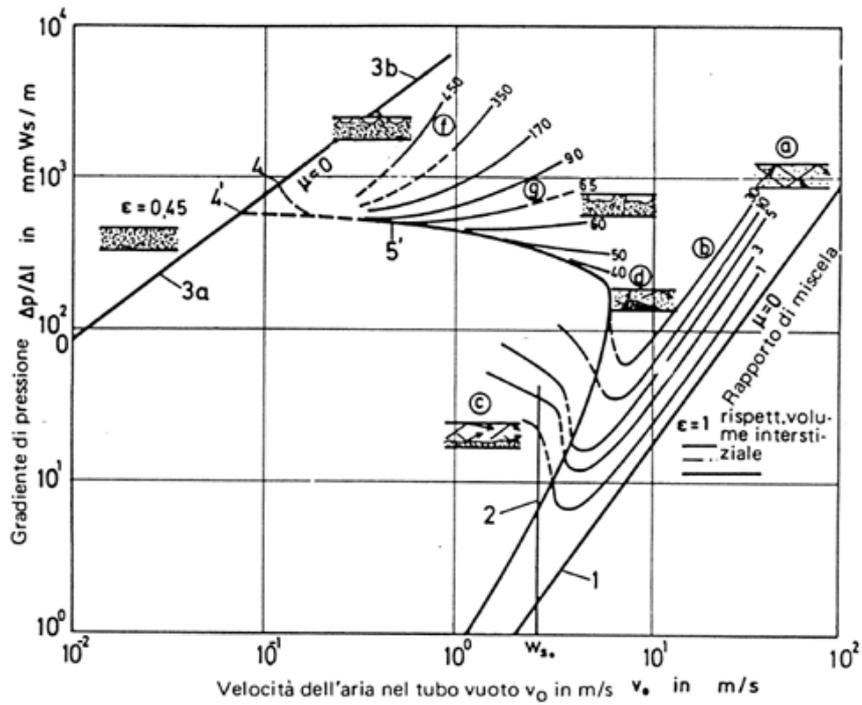


Fig.12: Diagramma di stato misurato per un trasporto pneumatico orizzontale della sabbia in un tubo di vetro. 1 tubo vuoto; 2 velocità di caduta del singolo grano w_s ; 3a afflusso attraverso un mucchio liberamente mobile; 3b afflusso attraverso un mucchio bloccato; 4 punto di turbolenza; 4' punto di fluidificazione; 5 strato di turbolenza esteso; 5' curva-limite simile allo strato fluidificato; 6 curva caratteristica della soffiante; 7 curva caratteristica del compressore. Fonte [2].

2. Trasporto dell'atomizzato di barbottina

2.1 L'industria ceramica

L'industria italiana delle piastrelle ceramiche rappresenta per il nostro paese un settore di grande importanza, essendo uno dei leader mondiali dell'industria Made in Italy. Facendo riferimento ad un'indagine statistica redatta da Confindustria Ceramica nel 2017, il comparto ceramico a fine 2016 contava 147 aziende produttrici di piastrelle, di cui 55 localizzate in provincia di Modena, 24 in quella di Reggio Emilia, 12 nel resto dell'Emilia Romagna e 56 nelle restanti regioni italiane.

Sempre nel 2016, la produzione italiana si è attestata a 415,9 milioni di metri quadrati di piastrelle ceramiche, con un fatturato complessivo di 5417 milioni di euro, generato per l'84,5% da esportazioni e per il 15,5% da vendite sul mercato nazionale. In Fig. 13 è rappresentato l'andamento della produzione italiana negli ultimi anni, suddivisa per tipologia di prodotto. Il grès porcellanato copre l'84,4 % dell'intero portafoglio prodotti venduti, seguito dalla monocottura con l'8%, dalla bicottura con il 5,6% ed il restante 2% da altri prodotti, quali il cotto rustico e corredi [3].

Il grès porcellanato rappresenta dunque il cuore del settore industriale ceramico del nostro paese, in cui ogni azienda ha sviluppato il proprio prodotto, immettendone sul mercato varie tipologie e modelli.

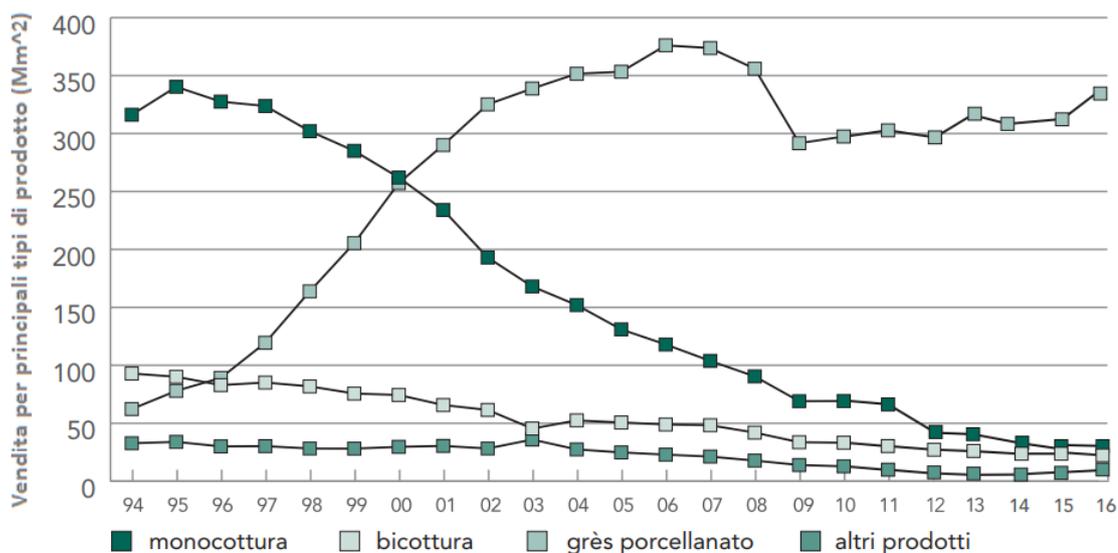


Fig. 13: Vendite annuali per principali tipi di prodotto espressi in milioni di metri quadri. Fonte [3].

2.2 Ciclo produttivo delle piastrelle ceramiche

Il ciclo di produzione delle piastrelle di grès porcellanato è schematizzato in Fig. 14 e descritto nel seguito.

Nella prima fase del processo, le materiale prime che andranno a formare l'impasto, ovvero un'opportuna miscela di argilla, sabbia e feldspati, vengono macinate mediante un mulino rotativo a ciclo continuo, così da ottenere la granulometria richiesta. Una volta raggiunte le condizioni obiettivo viene aggiunta anche l'acqua. La miscela ottenuta, detta barbotina, viene quindi depositata in dei tank, dove dei miscelatori provvedono a preservare l'omogeneità del prodotto e a mantenere il solido in sospensione, in attesa che la miscela venga inviata all'atomizzatore. Ciò avviene grazie all'impiego di pompe volumetriche a pistone. Nell'atomizzatore (spray-dryer) sono presenti un certo numero di ugelli, detti lance di atomizzazione, di diametro variabile in funzione delle caratteristiche granulometriche richieste. La barbotina viene spruzzata attraverso le lance in un flusso di aria calda ad elevata velocità, che causa l'evaporazione dell'acqua in esso contenuta e porta ad una rapida solidificazione. Si vengono così a formare degli agglomerati internamente cavi e quindi molto fragili, di forma toroidale e di dimensioni comprese tra i 100 ed i 600 μm , che prendono il nome di atomizzato di barbotina. Tali agglomerati contengono una piccola quantità di acqua che ne garantisce la stabilità strutturale. Nello specifico, l'umidità relativa dell'atomizzato di barbotina deve essere compresa tra il 4% ed il 7%: al di fuori da questo range è molto probabile che durante il processo di cottura del grès porcellanato la compattazione dell'atomizzato non avvenga in maniera corretta, compromettendo la qualità del prodotto finale.

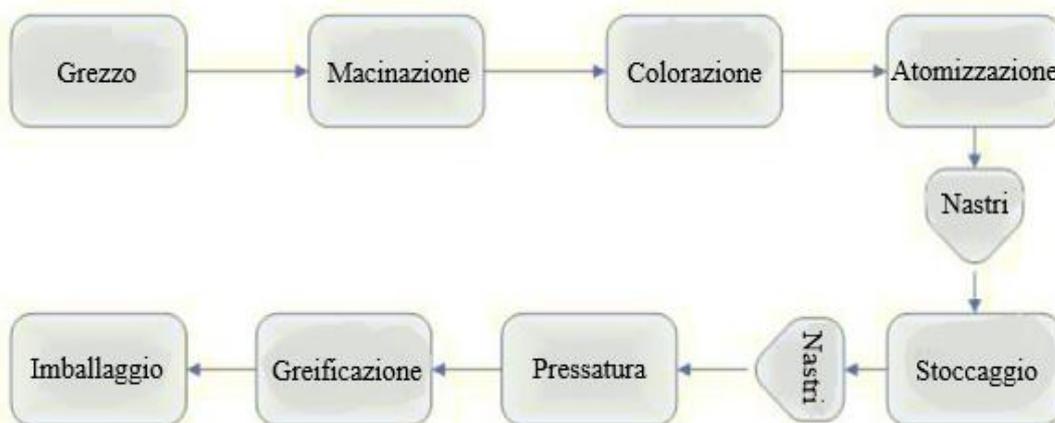


Fig. 14: Ciclo di produzione di grès porcellanato.

All'uscita dell'atomizzatore l'atomizzato di barbotina viene quindi movimentato con dei nastri trasportatori fino ai depositi di stoccaggio, e da questi sino alle presse. Dopo la pressatura l'atomizzato viene a formare delle lastre che dovranno essere cotte. La fase di cottura, la cui durata può variare dai 25 ai 35 minuti, è effettuata mediante forni a rulli di lunghezza elevata, in cui il materiale viene riscaldato mentre avanza grazie a dei bruciatori. La temperatura massima raggiunge circa i 1200 °C, così da rendere le piastrelle in grès porcellanato quasi completamente vetrificate e conferendo loro ottime proprietà meccaniche. Dopo la cottura segue un raffreddamento lento e graduale fino a temperatura ambiente. Ne risulta un prodotto finale particolarmente resistente anche alle abrasioni, che si presta molto bene per la realizzazione di pavimenti o rivestimenti.

2.3 Trasporto su nastri dell'atomizzato di barbotina

Oggi giorno, nel campo dell'industria ceramica, i nastri trasportatori sono i dispositivi più utilizzati per il trasporto dell'atomizzato di barbotina.

Un classico impianto di trasporto a nastri (vedi Fig. 15) è composto essenzialmente da:

- Tramoggia di carico e relativo sistema dosatore;
- Nastro di sostegno del carico;
- Doppia serie di rulli per il sostegno del nastro (andata e ritorno);
- Puleggia motrice con gruppo motoriduttore;
- Puleggia di rinvio;
- Telaio di sostegno;
- Tenditore del nastro;
- Componenti ausiliari (bordi e sponde laterali, dispositivi di pulizia del nastro, ecc.);
- Tramoggia di scarico.



Fig. 15: Schema di un nastro trasportatore.

La tramoggia di carico è un contenitore che riceve il materiale dalla stazione precedente e funge da serbatoio da accumulo. Il dispositivo dosatore ha lo scopo di far arrivare al nastro sottostante la quantità di materiale desiderata. Tale funzione può essere svolta da una coclea, oppure da una valvola stellare o anche da una semplice valvola a farfalla. La soluzione con la valvola stellare offre una maggiore capacità di regolazione: la quantità di prodotto scaricata sul nastro è proporzionale al volume dei settori della valvola stessa e alla velocità di rotazione del rotore. Collegando la rotovalvola ad un inverter siamo quindi in grado di ottenere una regolazione della portata molto semplice ed efficace, sebbene i costi siano ovviamente maggiori rispetto alla configurazione con valvola a farfalla.

Il nastro trasportatore è sorretto da due serie di rulli, una nella parte superiore di andata e l'altra in quella inferiore di ritorno, ed è chiuso ad anello attorno alle due pulegge. Il materiale viene dosato dalla tramoggia di carico nella parte superiore del nastro, arriva sino alla tramoggia di scarico e qui viene depositato. Il nastro gira attorno alla puleggia motrice, viene pulito da eventuali residui con delle spazzole e torna indietro. Il tenditore garantisce che il nastro sia ben teso durante tutte le operazioni di trasporto, evitando che questo si adagi sui rulli, con conseguente aumento della resistenza per attrito.

I nastri di trasporto possono essere piani o concavi (Fig. 16). A parità di lunghezza i nastri concavi sono in grado di trasportare un quantità maggiore di materiale, ed è per questo motivo che vengono preferiti a quelli piani per il trasporto dell'atomizzato di barbotina. Inoltre i nastri si differenziano in base al materiale con cui sono realizzati: acciaio, tela-gomma e rete metallica. Quelli in tela-gomma sono i più impiegati, specie quando sono presenti dislivelli lungo la linea di trasporto. Essi sono costituiti da un nucleo interno, frutto della sovrapposizione di più tele, rivestito esternamente da uno strato di gomma. Sono in grado di movimentare portate molto elevate, coprendo distanze che possono arrivare anche a diversi chilometri.

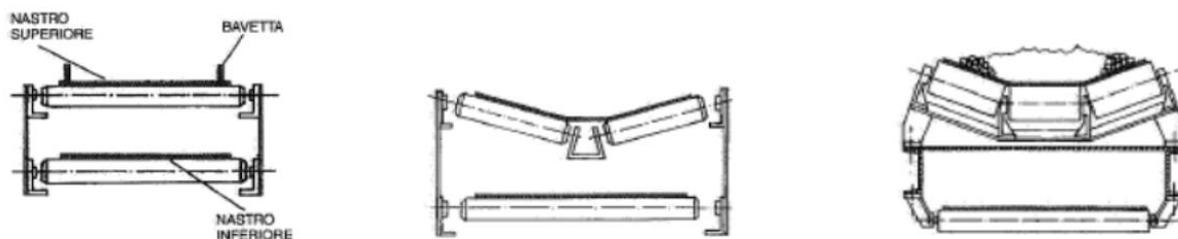


Fig. 16: Nastro piano (sinistra); nastro concavo a due rulli (centro); nastro concavo a tre rulli (destra).

Il successo degli impianti di trasporto a nastro è dunque dovuto ai suoi molteplici punti di forza: sono infatti sistemi molto semplici, affidabili e versatili, sono in grado di movimentare elevate portate di prodotto e di coprire lunghe distanze. Inoltre, l'atomizzato di barbotina non varia significativamente il suo contenuto di umidità durante il processo di trasporto ed il danneggiamento del prodotto è molto limitato. Questi ultimi due aspetti sono di fondamentale importanza a livello industriale: la frammentazione dell'atomizzato di barbotina, così come una sua eccessiva umidificazione o essiccazione, compromettono il processo produttivo, causando un insostenibile aumento del numero di piastrelle che devono essere scartate a fine ciclo.

Tuttavia, a fronte di questi consistenti vantaggi, sono presenti anche diverse problematiche significative legate all'utilizzo dei nastri trasportatori.

In primo luogo, questa tipologia di sistemi di trasporto è esposta all'ambiente esterno e ciò permette la dispersione di polveri sottili nell'ambiente di lavoro. I nastri prelevano il prodotto all'uscita dell'atomizzatore (vedi Fig. 17) e risalgono fino ai silos di stoccaggio, coprendo lunghe distanze. Ciò comporta un'esposizione prolungata dell'atomizzato di barbotina nell'ambiente lavorativo, e a causa della natura stessa del materiale, risulta molto difficile evitare la diffusione di polveri sottili nell'ambiente, che aumenta con la velocità dei nastri e col numero di passaggi tra un nastro e l'altro durante i cambi di direzione. Questo genera un serio problema per l'ambiente di lavoro e per la salute dei lavoratori, venendo compromessa la salubrità dell'aria. Tutti i materiali ceramici infatti contengono biossido di silicio (SiO_2), solido cristallino che, se inalato, può causare diverse malattie all'apparato respiratorio, prime tra tutte la silicosi [4,5].



Fig. 17: Uscita dell'atomizzatore e nastro trasportatore.

Le aziende ceramiche hanno dunque dovuto far fronte a questo problema, con l'obiettivo di sviluppare un processo industriale che assicuri la salute e la sicurezza di tutti i lavoratori. Questi aspetti sono di fondamentale importanza per tutte le imprese, specie negli ultimi anni, in cui l'Unione Europea ha messo in primo piano tali tematiche, divenute di grande rilevanza anche per l'opinione pubblica.

Una possibile soluzione è quella di chiudere i nastri trasportatori mediante appositi sistemi di confinamento, risolvendo a monte il problema. Ciò comporta però un significativo aumento dei costi di installazione e manutenzione, maggiori ingombri, nonché maggiori difficoltà nella manutenzione sia ordinaria che straordinaria. Difatti, la quasi totalità delle aziende ceramiche ha intrapreso un'altra via per fronteggiare il problema delle polveri sottili, installando degli impianti di aspirazione dell'aria, che captano ed espellono le particelle di atomizzato sospese nell'atmosfera. Anche in questo caso si va incontro ad un aumento dei costi sia di installazione che gestionali [6,7], mentre l'efficienza con cui operano questi sistemi varia a seconda della tipologia di impianto che si desidera adottare, senza però mai raggiungere rendimenti elevatissimi. Nel complesso però, questa soluzione si fa preferire rispetto alla configurazione in cui i nastri vengono confinati, in cui come già detto eseguire le operazioni di manutenzione diventa più complicato e l'ingombro complessivo del sistema di trasporto aumenta considerevolmente.

Oltre alla problematica legata alla dispersioni di polveri sottili nell'ambiente di lavoro ed ai rischi per la salute dei lavoratori, ci sono anche altri svantaggi correlati all'utilizzo dei nastri trasportatori. Se da un lato è il materiale che contamina l'ambiente esterno, è vero anche che la barbotina stessa può essere contaminata dall'ambiente di lavoro in cui si trova. Per di più le dimensioni dei nastri sono piuttosto elevate e vincolano fortemente la progettazione del layout, occupando una grande porzione della superficie disponibile nello stabilimento produttivo. Nel seguito verrà approfondita la tematica dell'inquinamento dell'ambiente di lavoro legato alle polveri rilasciate dall'atomizzato di barbotina, in particolar modo la silice libera cristallina. Saranno analizzati i rischi per la salute dei lavoratori, con uno sguardo anche alla normativa che regola tale problematica.

2.4 Silice libera cristallina (SCL) e silicosi

La silice è un composto del silicio la cui formula chimica è SiO_2 , ed è una sostanza molto comune in natura. Quando la struttura degli atomi di Silicio e Ossigeno è caratterizzata da un reticolo regolare questa prende il nome di silice libera cristallina (SCL), altrimenti possiamo avere silice amorfa anidrata o silice amorfa idrata.

A pressione atmosferica la silice cristallina può presentarsi in tre differenti forme stabili (Fig.18), a seconda della temperatura: quarzo al di sotto degli 870°C , tridimite tra 870 e 1470°C e cristobalite tra 1470 e 1710°C . Il quarzo è la forma più comune. Tutte e tre queste forme polimorfe della SCL possono presentarsi in due fasi, una a minore temperatura (α) ed una a maggiore temperatura (β) [8].

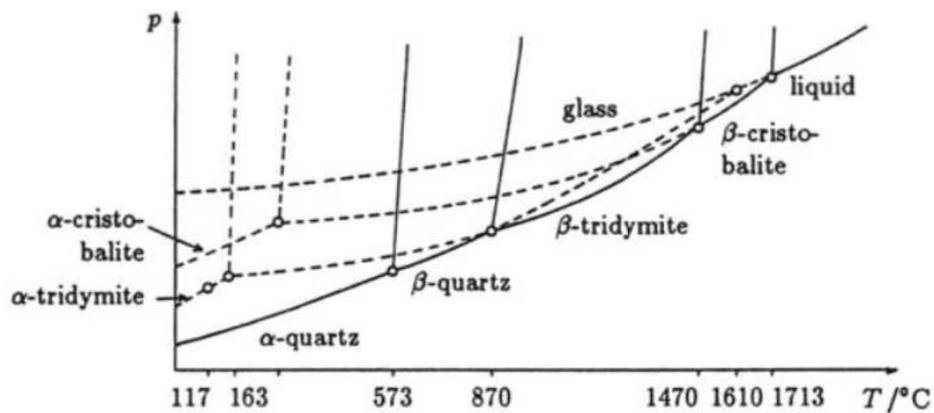


Fig. 18: Diagramma di fase (p - T) della silice libera cristallina nelle sue forme. Fonte [8].

La dispersione di particelle sottili contenenti silice libera cristallina nell'ambiente di lavoro rappresenta un grave pericolo per la salute dei lavoratori, in quanto la loro inalazione è causa di silicosi [4,5]. La silicosi è una pneumoconiosi che determina la trasformazione del parenchima polmonare in tessuto fibroso, con conseguente compromissione delle funzionalità respiratorie [9]. È una patologia a carattere invalidante, che come conseguenza peggiore può portare alla morte.

Recentemente diversi organismi internazionali come la OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) e la IARC (International Agency for Research on Cancer) hanno confermato la correlazione tra silicosi e cancro ai polmoni. Le loro stime affermano che un'esposizione cumulativa per 40 anni a livelli di $0,1 \text{ mg/m}^3$ comporta un rischio di tumore polmonare superiore al 30%. La silicosi deve quindi essere considerata come il primo stadio di una malattia che rischia di progredire in altre gravi patologie come tubercolosi, cancro ai polmoni o altre malattie autoimmuni.

I principali fattori che determinano l'insorgenza della silicosi sono la concentrazione di silice libera cristallina, le dimensioni, la morfologia e le caratteristiche superficiali delle particelle. Le particelle più pericolose sono ovviamente le più piccole, quelle caratterizzate da dimensioni inferiori a 10 µm. Sono queste infatti le particelle in grado di penetrare all'interno dei polmoni e danneggiarli.

A seconda del periodo di esposizione e del livello di concentrazione, la silicosi può manifestarsi in tre differenti tipologie:

- CRONICA: tempi di esposizione prolungati a basse concentrazioni di SLC. Il tempo di latenza varia tra i 30 ed i 40 anni.
- ACCELERATA: tempi di esposizione brevi a concentrazioni elevate di SLC. Il tempo di latenza varia tra i 5 ed i 10 anni.
- ACUTA: tempi di esposizione brevi a concentrazioni elevate di SLC. Il tempo di latenza è inferiore ai 5 anni.

Per quanto riguarda la valutazione del rischio di insorgenza di silicosi, questa avviene sulla base della concentrazione di SLC presente nell'ambiente di lavoro e del periodo di esposizione. Conoscendo questi parametri si può analizzare la probabilità di contrarre la silicosi per i soggetti esposti e di conseguenza valutare se e come avvalersi di sistemi di prevenzione e protezione.

Osservando i valori riportati nella Tab. 1, si può notare che se la concentrazione in atmosfera è al di sotto di 25 µg/m³, anche dopo 40 anni di esposizione (1000 µg/m³*anno) la probabilità di insorgenza di silicosi è pressoché nulla. Con una concentrazione di 50 µg/m³ dopo 40 anni di esposizione (2000 µg/m³*anno) le probabilità sono all'incirca dell'1% per i non fumatori e del 2% per i fumatori. Tali valori aumentano inesorabilmente al crescere della concentrazione della SLC [10].

		durata dell'esposizione (in anni)							
		10	15	20	25	30	35	40	
livelli di esposizione cumulata (µg/m ³ - year)	Exp giornaliera in µg/m ³	25	375	500	625	750	875	1000	
	50	500	1000	1250	1500	1750	2000		
	75	750	1125	1500	1875	2250	2625		
	100	1000	1500	2000	2500	3000	3500		
	150	1500	2250	3000	3750	4500	5250		
	200	2000	3000	4000	5000	6000	7000		
	300	3000	4500	6000	7500	9000	10500		

2000-3999 µg/m ³ - year	probabilità di silicosi (ILO >= 1/0, round opacities)	0,9 % (non fumatori) - 1,8 % (fumatori)
4000-5999 µg/m ³ - year	probabilità di silicosi (ILO >= 1/0, round opacities)	2,9 % (non fumatori) - 6,3 % (fumatori)
>=6000 µg/m ³ - year	probabilità di silicosi (ILO >= 1/0, round opacities)	9,3 % (non fumatori) - 16,3 % (fumatori)

Tab. 1: Probabilità di insorgenza della silicosi in funzione del livello di esposizione cumulata.

Fonte [10].

In Italia i pericoli legati a questa malattia sono noti da molto tempo, ed essendo comune a diverse tipologie di lavoro, la copertura assicurativa contro la silicosi è obbligatoria dal 1943. I principali settori in cui i lavoratori sono maggiormente esposti a SLC sono: industria estrattiva, industria siderurgica, industria ceramica, perforazione di gallerie, lavorazione e taglio di pietre silicee, produzione del vetro e produzione di abrasivi. Tuttavia ancora oggi in Italia non esiste un limite di esposizione professionale (VLEP) alla SLC riconosciuto dalla legge.

2.5 Analisi normativa

Nel nostro paese le norme di prevenzione, tutela e sicurezza sul lavoro sono raggruppate nel Decreto Legislativo 81/2008 (Testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro) nel capo I – Protezione da agenti chimici – del titolo IX “Sostanze pericolose”. Nella Tab. 2 sono mostrati i valori limite di esposizione professionale alla SLC attualmente adottati in alcuni paesi europei ed extraeuropei, sia per il quarzo che per la cristobalite. L'Italia non compare in questa lista: come già anticipato infatti, il grande problema in Italia è la mancanza di un TLV (Threshold Limit Value) definito per legge, che imponga che la concentrazione di SLC deve essere inferiore ad un determinato valore. La silice libera cristallina infatti non viene menzionata né tra gli elenchi dei valori limite di esposizione professionale per agenti chimici né tra quelli di sostanze, preparati e processi cancerogeni e mutageni del Testo Unico. In assenza di una specifica direttiva, attualmente si fa riferimento al limite consigliato dall'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygenists) pari a $0,025 \text{ mg/m}^3$ [11].

Nazione	QUARTZ CAS: 14808-60-7	Cristobalite CAS: 14464-46-1
Australia	0,1 (frazione respirabile)	0,1
Austria	0,15 (aerosol respirabile)	
Belgio	0,1	0,05
Canada Ontario	0,1 (frazione respirabile)	0,05 (frazione respirabile)
Canada Quebec	0,1	
Danimarca	0,3 (aerosol inalabile) 0,1 (frazione respirabile)	0,15
Francia	0,1 (aerosol respirabile)	0,05 (aerosol respirabile)
Germania		
Ungheria	0,15 (aerosol respirabile)	0,15 (aerosol respirabile)
Irlanda	0,1 (frazione respirabile)	0,1 (frazione respirabile)
Italia		
Nuova Zelanda	0,2 (frazione respirabile)	0,1 (frazione respirabile)
Cina Repubblica Popolare	1	
Singapore	0,1 (aerosol respirabile)	0,05 (aerosol respirabile)
Spagna	0,1	0,05 (frazione respirabile)
Corea del Sud	0,05	0,05 polvere respirabile
Svizzera	0,15 (aerosol respirabile)	0,15 (aerosol respirabile)
Svezia	0,1 (aerosol respirabile)	0,05 (frazione respirabile)
Paesi Bassi	0,075 (polvere respirabile)	0,075 (polvere respirabile)
USA NIOSH	0,05	0,05
Gran Bretagna	0,1	0,1

Tab. 2: Valori limite di esposizione professionale alla SLC in mg/m^3 attualmente adottati in alcuni stati. Fonte [11].

Poiché la SLC non rientra nell' "Elenco delle sostanze, preparati e procedimenti cancerogeni e mutageni", attualmente l'esposizione a questa sostanza viene trattata dagli articoli riguardanti la "Protezione da agenti chimici". I più rilevanti a tal proposito sono l'Art. 223, l'Art. 224 e l'Art.225 che fanno rispettivamente riferimento:

- Alla valutazione dei rischi derivanti dall'impiego di agenti chimici pericolosi.
- Alle misure e ai principi generali per la prevenzione dei rischi derivanti da agenti chimici pericolosi.
- Alle misure specifiche di prevenzione e protezione da adottare per eliminare o ridurre tali rischi.

Con la nuova direttiva Europea 2017/2398 la situazione è però destinata a cambiare e la silice libera cristallina non dovrà più essere considerata come agente chimico, bensì sarà normata dagli articoli del Titolo IX del Capo II – Sostanze cancerogene o mutagene –. Gli articoli più rilevanti in questo caso sono l'Art. 235, l'Art. 236 e l'Art. 237, che trattano la sostituzione e la riduzione, la valutazione del rischio, e le misure tecniche, organizzative e procedurali.

Questa direttiva Europea è entrata in vigore il 17/01/2018 con obbligo di recepimento da parte degli stati membri entro il 17/01/2020. L'esposizione occupazionale a SLC è stata dunque dichiarata cancerogena ed è stato stabilito un limite per l'esposizione a SLC pari a $0,1 \text{ mg/m}^3$, relativo alla frazione respirabile. Nella norma è prevista anche la possibilità che ogni singolo stato possa riesaminare il TLV, avendo così la possibilità di adottare un valore limite anche inferiore a $0,1 \text{ mg/m}^3$.

2.6 Trasporto pneumatico dell'atomizzato di barbottina

Le diverse problematiche legate al trasporto su nastri dell'atomizzato di barbottina, prime tra tutte la necessità di limitare l'esposizione a SLC dei lavoratori, rendono evidente la necessità di un cambiamento nelle industrie del settore ceramico.

L'idea principale è quella di sostituire i nastri trasportatori prima e dopo i depositi di stoccaggio con un trasporto pneumatico. Questa tipologia di sistema di trasporto, completamente chiusa e confinata all'interno di una tubazione, può risolvere completamente i problemi industriali legati al trasporto di materiali solidi in mucchio: evita la dispersioni di polveri sottili nell'ambiente di lavoro, riduce i costi e le inefficienze e allo stesso tempo libera da vincoli la progettazione del lay-out dell'impianto [12,13]. Come prima considerazione, è facile valutare come il trasporto in fase diluita non sia una soluzione percorribile per la movimentazione dell'atomizzato di barbottina. In primo luogo infatti, un processo di trasporto

con un grande volume di aria avrà maggiore impatto sull'umidità del prodotto, diventando così molto difficile evitare l'essiccamento o l'umidificazione delle particelle solide a causa dell'interazione con il mezzo portante. Questa problematica è meno rilevante, se non del tutto trascurabile, lavorando in fase densa, in cui la portata di aria compressa è molto ridotta rispetto a quella del solido e non è quindi in grado di influenzarne significativamente il suo contenuto di umidità.

Inoltre, durante il trasporto pneumatico in fase diluita, l'aria ed il solido raggiungono velocità maggiori rispetto a quanto accade in fase densa, e ciò genera problemi legati alla frammentazione della barbotina. Le particelle si rompono infatti a causa dell'attrito con le pareti interne della tubazione, a causa di urti contro le curve o di urti tra le particelle stesse. Tanto maggiore è la velocità che raggiungono le particelle solide, tanto più elevata sarà la loro energia, e con essa il danneggiamento causato nelle loro collisioni.

È quindi chiaro come la fase densa rappresenti l'unico metodo sostenibile per trasportare pneumaticamente l'atomizzato di barbotina. Come visto in precedenza, il trasporto in fase densa può avvenire in diverse modalità: per materiali con granulometrie molto fini o poco permeabili all'aria si verifica un trasporto a dune, se invece il materiale solido è caratterizzato da un'elevata permeabilità all'aria è possibile ottenere un trasporto a tappi o un trasporto a spinta [14,15]. Il trasporto a tappi è quello che si vuole impiegare per il trasporto dell'atomizzato di barbotina. Esso consiste nella formazione di veri e propri tappi di materiale separati da dei tratti di aria avente sufficiente pressione per riuscire a spingere il solido davanti a sé. Questa tipologia di trasporto è caratterizzata da basse velocità di movimentazione, che permettono di limitare l'usura sia del prodotto che delle tubazioni. Con il trasporto a spinta, in cui il rapporto di miscela assume valori estremamente elevati, le velocità sono ancora più basse, tanto da non poter pensare di utilizzarlo nell'industria ceramica a causa dei suoi limiti intrinseci sulla portata.

Nel successivo capitolo verrà descritto nel dettaglio un impianto sperimentale per il trasporto pneumatico in fase densa, su cui si sono stati effettuati numeri test, con lo scopo di individuare le condizioni ottimali per il trasporto a tappi dell'atomizzato di barbotina.

3. Impianto sperimentale di trasporto pneumatico

L'azienda Technosilos, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna, ha progettato e realizzato all'interno dei propri stabilimenti un impianto pilota per il trasporto pneumatico in fase densa.

L'impianto è stato cofinanziato dalla regione Emilia Romagna, in merito al Programma Regionale per la Ricerca Industriale, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico (PRRIITT).

Numerosi test sono stati effettuati su questo impianto, per studiare il trasporto a tappi dell'atomizzato di barbottina ed individuarne le condizioni ottimali di trasporto.

Grazie a questo impianto è inoltre possibile caratterizzare qualunque tipo di materiale granulare.

3.1 Lay-out e P&I dell'impianto

Il lay-out ed il P&I dell'impianto sono riportati rispettivamente in Fig. 19 e Fig. 20. Il circuito di trasporto è lungo complessivamente circa 72 m e presenta undici curve di cui cinque a 90°, un tratto verticale di 4 m ed un lungo tratto orizzontale di 22 m. Il diametro interno della tubazione è di 85 mm.

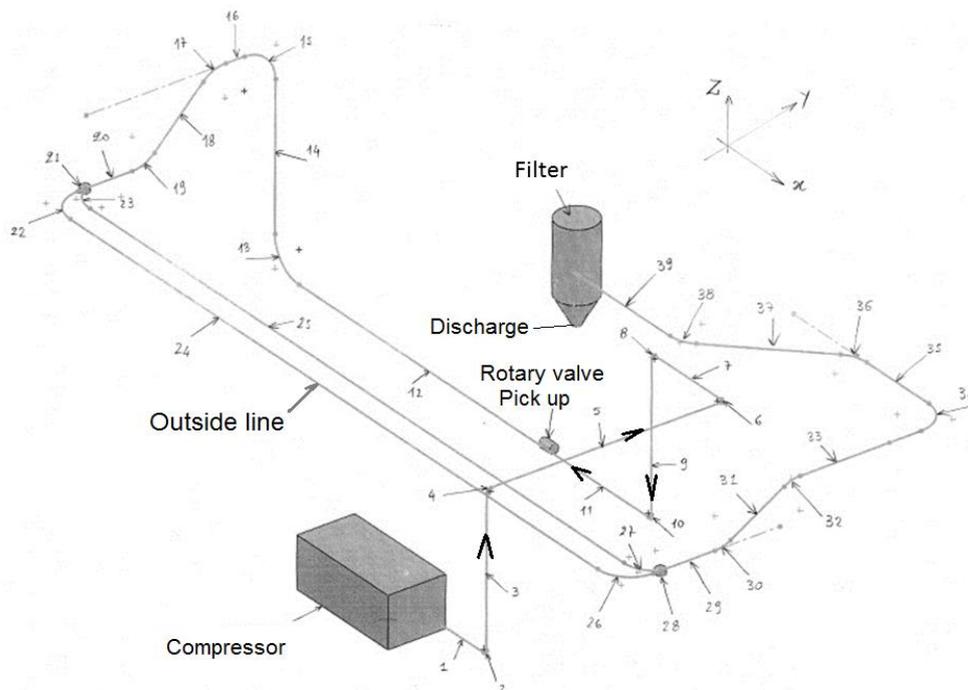


Fig. 19: Lay-out dell'impianto sperimentale.

L'atomizzato di barbotina è stoccato all'interno di una tramoggia, e da qui è prelevato ed inserito all'interno del condotto di trasporto mediante una valvola stellare (MSL). La portata in massa di prodotto è regolata tramite un inverter (INMSL) che controlla la frequenza di rotazione della stellare ed è misurata con delle celle di carico (JBB) poste sulla tramoggia di scarico.

La portata in massa d'aria è misurata da un pressostato differenziale (DPZ), insieme con la densità dell'aria, a sua volta ricavata grazie ad un trasduttore di pressione (PL) ed uno di temperatura (TZ). A causa dei trafileanti attraverso la valvola stellare, la portata in circolazione lungo le tubazioni sarà minore di quella effettivamente elaborata dal compressore. Alla fine del trasporto l'aria è filtrata mediante un filtro a maniche (B) ed espulsa esternamente, mentre l'atomizzato di barbotina può essere scaricato in un apposito raccogliitore o viceversa essere ricircolato.

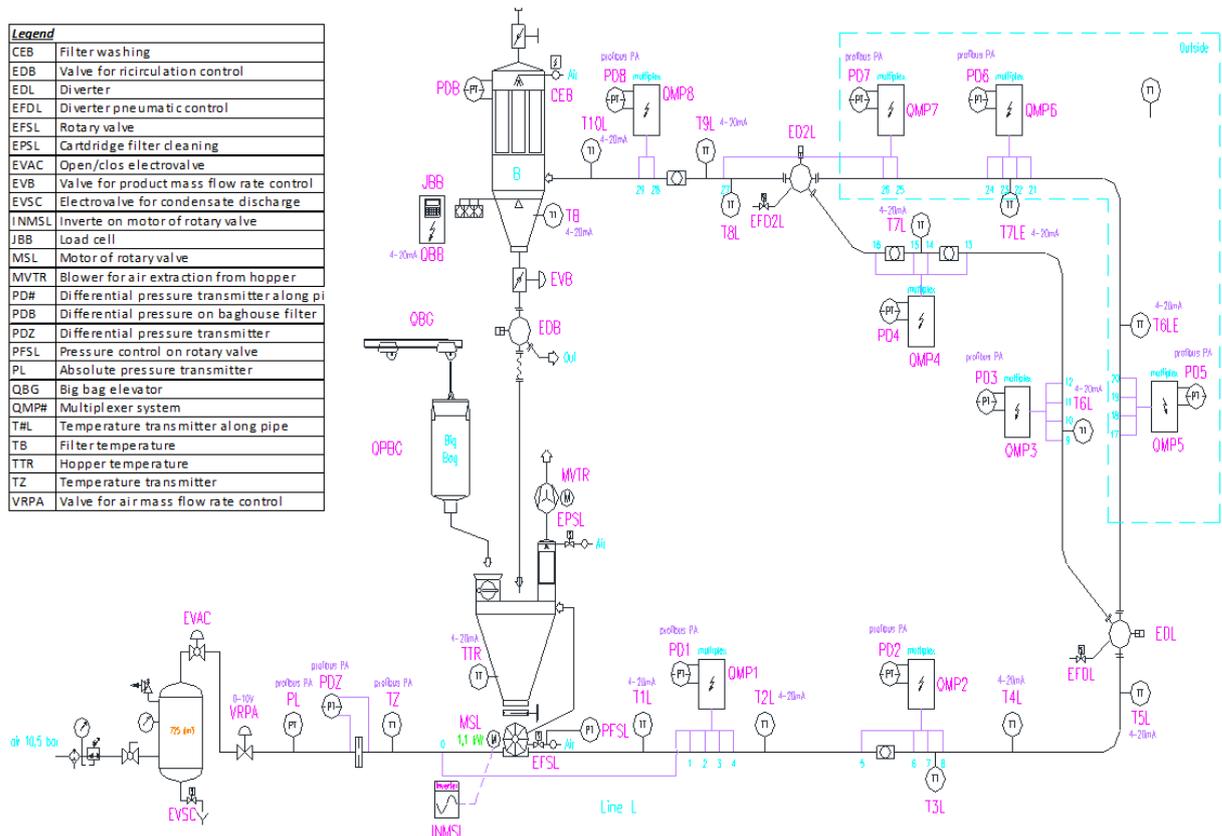


Fig. 20: P&I dell'impianto sperimentale.

Pressione e temperatura di trasporto sono monitorati lungo tutta la linea, per mezzo di 8 pressostati differenziali (PD#), 29 prese di pressione e 12 termocoppie (T#L). 8 sistemi multiplexer (QMP#) gestiscono l'acquisizione dei dati di pressione. Ogni multiplexer è composto da un pressostato differenziale e da un massimo di 4 prese di pressione, e per ognuna di queste è presente una coppia di elettrovalvole. Questo sistema è in grado di

commutare in sequenza temporale il segnale di pressione proveniente dallo stesso pressostato differenziale da una presa di pressione all'altra, aprendo in maniera alternata le varie coppie di elettrovalvole grazie ad appositi circuiti elettrici. In questo modo è possibile avere una completa mappatura dell'andamento delle perdite di carico lungo tutto il circuito di trasporto, limitando il numero di pressostati differenziali utilizzati [16].

Facendo riferimento al primo quadro multiplexer, il cui schema di funzionamento è riportato in Fig. 21, è possibile conoscere il Δp tra la presa 0 e la presa 1 semplicemente aprendo le valvole V1 e V2. Dopo aver chiuso V1 e V2 si aprono le valvole V3 e V4 ed il segnale viene commutato, così da poter leggere la caduta di pressione tra la presa 1 e la presa 2. L'impianto è inoltre dotato di un PC di supervisione ed un PLC, che acquisiscono, memorizzano ed elaborano i dati che arrivano dai vari strumenti in campo.

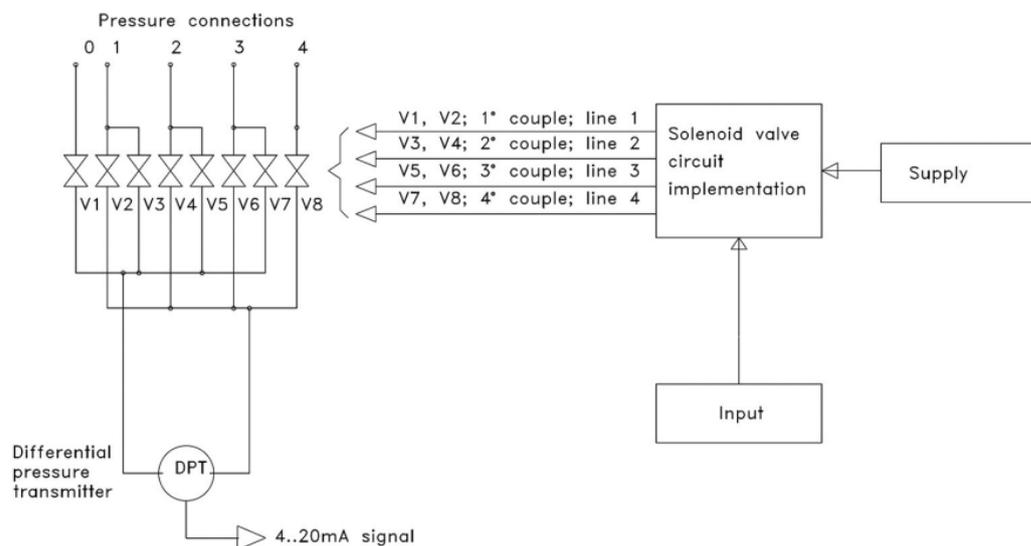


Fig. 21: Schema del multiplexer.

3.2 Gruppo compressore

L'impianto utilizza un motocompressore rotativo a palette DRS1085 prodotto dalla ditta Mattei. Le sue principali caratteristiche tecniche sono riportate nella Tab. 3. Come si può osservare, data la natura sperimentale dell'impianto, si è scelto un compressore ampiamente sovradimensionato, in grado di comprimere l'aria fino a 10 bar. Poiché le pressioni caratteristiche durante il trasporto a tappi molto difficilmente superano i 3 bar, subito dopo il compressore sono presenti una valvola riduttrice di pressione ed un serbatoio di accumulo.

Motocompressore Mattei DRS1085 rotativo a palette	
<i>Caratteristiche</i>	<i>Valore</i>
Pressione di esercizio [bar]	10
Resa d'aria libera effettiva [m ³ /min]	8,5
Capacità camera olio [l]	17
Motore tipo	Perkins 1004 – 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. 3: Caratteristiche tecniche del motocompressore.

3.3 Gruppo di carico, valvola stellare e portata di trafileamento

Il materiale da trasportare viene raccolto e stoccato all'interno di una tramoggia in acciaio inox di medie dimensioni. Al suo interno sono presenti due indicatori di livello, uno di massimo ed uno minimo. Nella sezione superiore della tramoggia è presente un portello per il caricamento manuale del prodotto. Un vibratore assicura il corretto deflusso del materiale durante la fase di svuotamento, evitando che il prodotto si agglomeri e si attacchi alle pareti interne. La valvola stellare è subito al di sotto della tramoggia, separata da essa da una valvola a ghigliottina. La stellare si occupa della regolazione della portata di materiale da trasportare, svolgendo dunque un compito molto delicato quanto importante. Questa è costituita da un corpo rotante dotato di palette opportunamente sagomate contenuta all'interno di un carter in ghisa. Le caratteristiche tecniche della valvola stellare installata nell'impianto sono riportate nella Tab. 4.

Valvola rotativa ZEPPELIN APS 320/21 DC	
<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

Tab. 4: Caratteristiche tecniche della valvola stellare.

La portata di materiale solido \dot{m}_s che la stellare riceve dalla tramoggia ed immette nel circuito di trasporto può essere espressa nella seguente maniera:

$$\dot{m}_s = V \eta n N \rho_s$$

in cui V è il volume di ogni singolo vano definito da una paletta e la successiva, η è il coefficiente di riempimento del singolo vano, n è il numero totale dei vani, N è la velocità di rotazione e ρ_s è la densità del solido.

La velocità di rotazione della stellare N è regolata da un inverter, così da poter controllare la portata di solido in ingresso nella tubazione.

La valvola stellare è un elemento dell'impianto che non garantisce una perfetta tenuta, comportando una perdita di aria. Ciò principalmente a causa del gioco presente tra rotore e carcassa, ma anche per via del reflusso di aria che si verifica tra i vani della stellare e la tramoggia. Per un corretto dimensionamento dell'impianto di trasporto è necessario conoscere l'effettiva portata di aria che circola nel circuito, data dalla portata elaborata dal compressore meno la portata persa nell'attraversamento della stellare, che aumenta al crescere della pressione di trasporto. Senza conoscere la portata di trafilamento nella valvola stellare non è possibile conoscere nemmeno il rapporto di miscela effettivo con cui l'impianto lavora. Poiché il costruttore della valvola non ha fornito dati relativi alla portata di trafilamento, è stato pertanto necessario effettuare delle prove sperimentali per la sua determinazione.

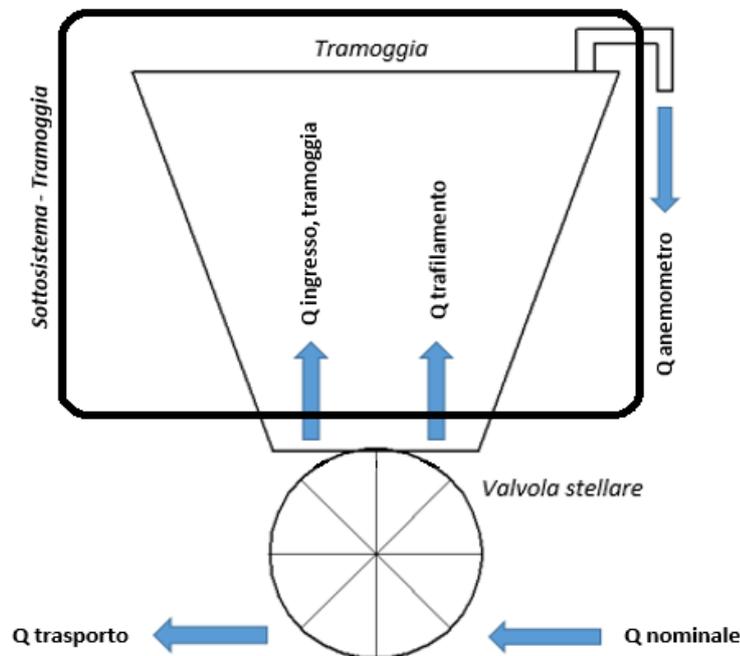


Fig. 22: Portate d'aria in ingresso e in uscita nel sistema valvola stellare - tramoggia.

Facendo riferimento alla Fig. 22, la portata massica che trafila tra il rotore e la carcassa della stellare Q_{traf} è data da:

$$Q_{traf} = Q_{anem} - Q_{in}$$

Q_{in} è la portata massica di aria che entra nella tramoggia a causa della rotazione della stellare. Si è ipotizzato che il volume di aria che entra nella tramoggia è uguale al volume di materiale solido che dalla tramoggia è scaricato nella stellare. Q_{in} è stata quindi determinata sulla base del materiale trasportato (vedi Fig. 23), ed è funzione della pressione di trasporto e della velocità di rotazione della stellare.

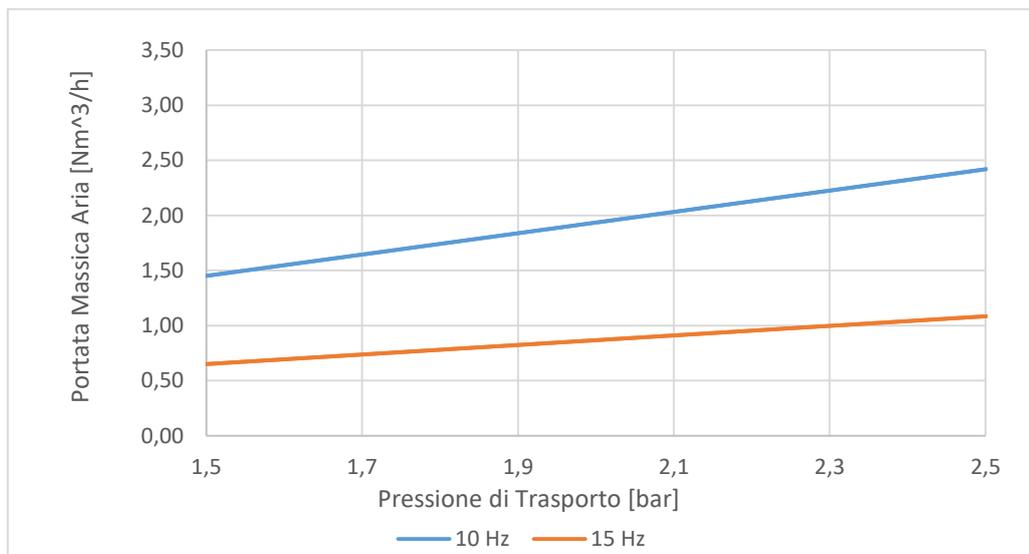


Fig. 23: Portata massica di aria che entra in tramoggia.

Q_{anem} è la portata massica di aria misurata da un anemometro a filo caldo collocato all'uscita di un tubo posizionato nella parte superiore della tramoggia. Sono state effettuate delle prove di trasporto, in cui per ogni minuto sono stati registrati i valori letti dall'anemometro a filo caldo, da cui è stata ricavata una portata volumetrica ottenuta da una media mobile su quello specifico periodo di 60 secondi. In maniera analoga, anche i valori della pressione sono stati mediati sul medesimo periodo di 60 secondi. E' stato così ricavato l'andamento di Q_{anem} , rappresentato in Fig. 24.

Una volta determinate Q_{in} e Q_{anem} è nota anche la portata di trafilamento Q_{traf} , rappresentata in Fig. 25. I valori trovati sono simili alle portate di trafilamento di altre valvole stellari commerciali.

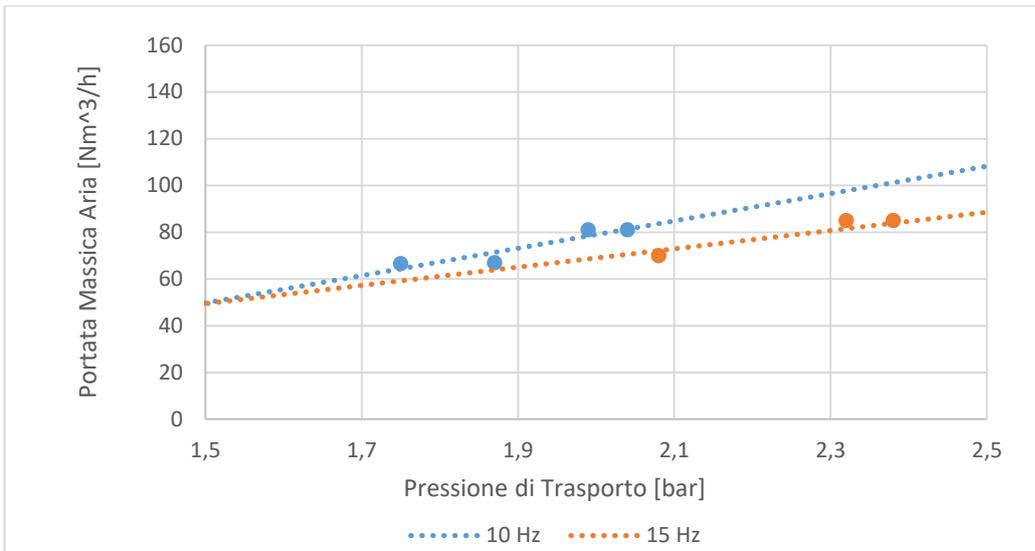


Fig. 24: Portata massica di aria letta sull'anemometro a filo caldo.

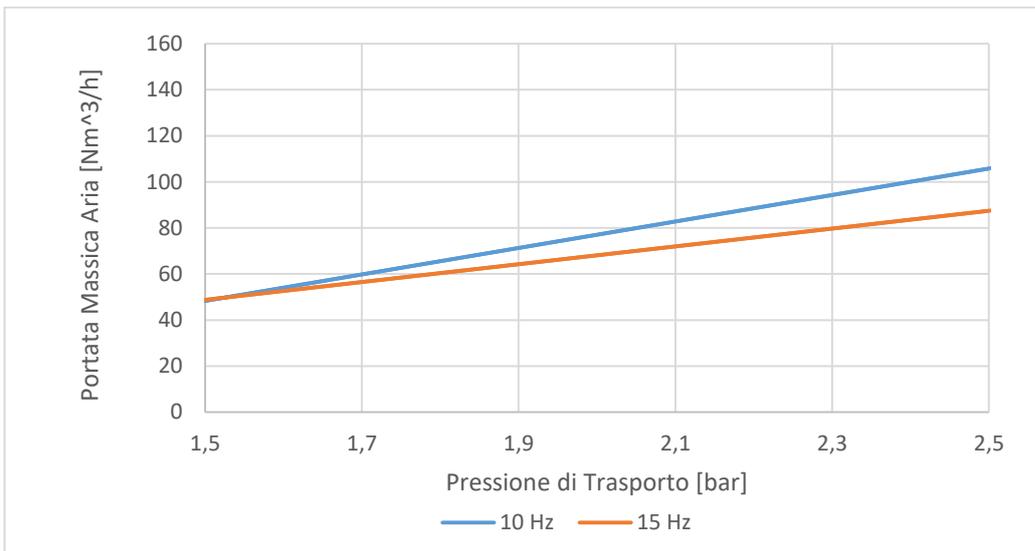


Fig. 25: Portata massica di aria di trafilamento della valvola stellare ZEPPELIN APS 320/21 DC.

3.4 Gruppo di scarico

Il gruppo di scarico dell'impianto è costituito da un sistema di filtraggio dell'aria e da una tramoggia che riceve il materiale alla fine del processo di trasporto.

Il sistema di filtraggio ha lo scopo di separare le particelle solide dal mezzo portante, e ciò viene effettuato mediante un filtro a maniche autopulente realizzato da Technosilos, il cui schema è rappresentato in Fig. 26. I filtri autopulenti Technosilos si avvalgono di un sistema temporizzato di pulizia ad aria compressa, che opera in controcorrente al flusso di aria da filtrare. L'aria compressa utilizzata a questo scopo viene immagazzinata in un piccolo serbatoio, e deve necessariamente essere stata prima deumidificata e disoleata. L'iniezione

d'aria all'interno del filtro avviene in maniera estremamente rapida ed è controllata dall'apertura e dalla chiusura di apposite valvole in modo ciclico.

La possibilità di estrarre singolarmente ogni manica rende molto agevoli le operazioni di manutenzione.



Fig. 26: Schema del filtro a maniche autopulente Technosilos.

4. TPSim Win

Nello studio del trasporto pneumatico in fase densa dell'atomizzato di barbotina, si è utilizzato un software in grado di simulare il comportamento di flussi bifase in cui particelle solide o liquide sono trasportate da una corrente gassosa. Questo software è il TPSim Win, ed è stato impiegato prima per la caratterizzazione dell'atomizzato di barbotina ed in seguito durante la progettazione di un impianto di trasporto pneumatico su scala industriale, per definire il diametro delle tubazioni, per eseguire l'analisi di stabilità e per identificare i valori ottimali del rapporto di miscela.

4.1 Descrizione del metodo di calcolo

I numerosi metodi utilizzati per il calcolo dei trasporti pneumatici possono essere suddivisi in due grandi gruppi: quelli che si basano su relazioni tra i parametri di carattere empirico o semi-empirico e quelli che traggono la loro origine dalle equazioni fondamentali della meccanica e della fluidodinamica. Questi ultimi, pur sottostando a qualche ipotesi semplificativa, sono in grado di sviluppare delle relazioni che descrivono il fenomeno del moto di una corrente solido-gas in maniera più completa e rigorosa. Il software TPSim Win fa parte di questa categoria, e procedendo al calcolo delle grandezze caratteristiche del trasporto step-by-step, è in grado di descrivere il fenomeno fisico con ottima approssimazione. La precisione dei suoi risultati dipende ovviamente dal valore assunto per il passo di calcolo ed, in buona parte, dalla corretta determinazione di alcuni parametri, come ad esempio il coefficiente di resistenza ed il coefficiente di attrito del materiale solido [17].

Le equazioni fondamentali su cui si basa l'algoritmo di calcolo del TPSim Win sono cinque e sono le seguenti:

- 1) *Equazione di continuità del gas:*
$$v = \frac{4G}{\pi D^2 e m \rho_f}$$
- 2) *Equazione di continuità del solido:*
$$c = \frac{4G}{\pi D^2 (1-e) \rho_s}$$
- 3) *Equazione di stato del gas:*
$$\frac{p}{\rho_f} = \text{costante}$$

4) *Equazione differenziale del moto:*

$$\frac{dc}{dl} = \frac{3}{4} \frac{c_w}{ds} \frac{\rho_f}{\rho_s e} \frac{(v-c)^2}{c} - \frac{1}{c} \left(g \operatorname{sen}\beta + \lambda_s \frac{c^2}{2D} \right) + \frac{\rho_f}{c \rho_s} \left(g \operatorname{sen}\beta + \lambda_f \frac{v^2}{2D} + v \frac{dv}{dl} \right) + \frac{1-e}{e} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} g \frac{w_s}{c v} \cos^2\beta$$

5) *Equazione differenziale della perdita di carico:*

$$-\frac{dp}{dl} = e \left(\rho_f g \operatorname{sen}\beta + \lambda_f \frac{\rho_f}{2} \frac{v^2}{D} + \rho_f v \frac{dv}{dl} \right) + (1-e) \left[(\rho_s - \rho_f) g \frac{w_s}{v} \cos^2\beta + \rho_s g \operatorname{sen}\beta + \lambda_s \frac{\rho_s}{2} \frac{c^2}{D} + \rho_s c \frac{dc}{dl} \right]$$

Dalla combinazione delle due equazioni di continuità con l'equazione differenziale del moto si ottiene la seguente equazione:

$$6) \quad R(6)e^6 + R(5)e^5 + R(4)e^4 + R(3)e^3 + R(2)e^2 + R(1)e + R(0) = 0$$

dove R(i), i = 0,6, indicano espressioni costanti rispetto ad e.

La simbologia utilizzata nelle precedenti equazioni è mostrata nella Tab. 5.

Simbologia	
c: velocità del solido	r: raggio
c _w : coefficiente di resistenza della particella	Res: numero di Reynolds riferito al solido
D: diametro della sezione del condotto	v: velocità del solido
d _s : diametro della particella	w _s : velocità di caduta della particella
e: volume interstiziale di riferimento	α: angolo
f: coefficiente di attrito solido-parete	β: angolo di inclinazione del condotto
g: accelerazione di gravità	δ: angolo
G: portata in massa del solido	λ _f : coefficiente di attrito del fluido
l: lunghezza	λ _s : coefficiente di attrito del solido
m: rapporto di miscela	λ _c : coefficiente di attrito del solido in curva
ν _f : viscosità cinematica del fluido	ρ _f : densità del fluido
p: pressione	ρ _s : densità del solido

Tab. 5: Simbologia.

L'algoritmo inizia con l'immissione di una serie di dati relativi alle caratteristiche dell'impianto e della miscela solido-gas. Il condotto di trasporto è assunto circolare, ed inoltre si ipotizza che le particelle solide abbiano una granulometria costante ed uniforme, distribuite omogeneamente all'interno della sezione della tubazione.

Per quanto riguarda l'impianto viene richiesto:

- Di specificare se lavora in aspirazione o in compressione. Se il trasporto è in aspirazione la pressione iniziale viene assunta pari alla pressione atmosferica, viene quindi richiesto di inserire un valore per il coefficiente di perdita di carico, riferito alla sola aria, relativo alla bocca di aspirazione. Se invece il trasporto è in compressione, bisogna specificare la

pressione iniziale del trasporto ed il coefficiente di perdita di carico del dispositivo di immissione del materiale, sempre riferito alla sola aria.

- Di introdurre un parametro relativo la scabrezza del tubo. Tale parametro andrà a moltiplicare il coefficiente di attrito tra il materiale del condotto ed il fluido di trasporto, calcolato per tubi lisci.
- Il numero degli elementi che costituiscono l'impianto: tratti rettilinei oppure tratti curvi, ognuno dei quali caratterizzato da una proprio passo di calcolo. Va inoltre specificata l'eventuale presenza di dispositivi che causano perdite di carico concentrate.
- Di indicare la lunghezza di un tratto rettilineo iniziale in cui il calcolo del trasporto abbia inizio.
- Il diametro interno del tratto iniziale.
- Il numero di intervalli nei quali dividere la lunghezza del tratto iniziale ai fini del calcolo. In questo tratto i gradienti di velocità del solido, dell'aria e della pressione sono generalmente molto elevati e di conseguenza il passo di calcolo deve essere sufficientemente piccolo.
- L'inclinazione del condotto.
- La definizione dei successivi elementi, ovvero tratti rettilinei, curve o dispositivi.

Per i tratti rettilinei è richiesto di specificare:

- La lunghezza.
- Il diametro interno del condotto.
- Il numero di intervalli in cui dividere l'elemento ai fini del calcolo.
- L'angolo di inclinazione rispetto ad un piano orizzontale.

Per i tratti curvi è richiesto di specificare:

- Il raggio di curvatura all'estradosso dell'interno del condotto.
- Il diametro interno del condotto.
- Lo sviluppo angolare della curva.
- L'angolo di giacitura δ del piano contenente la curva e la disposizione della curva stessa.
- Il numero degli intervalli in cui viene divisa la curva ai fini del calcolo.

Per i dispositivi, come ad esempio un brusco allargamento o restringimento di sezione, è richiesto di specificare:

- Il valore stimato del coefficiente di perdita di carico, riferito alla sola aria.

Per quanto riguarda invece il materiale solido ed il gas, occorre specificare:

- La portata di materiale solido da trasportare.
- Il rapporto di miscela.
- Il coefficiente d'attrito del prodotto nei tratti rettilinei.
- Il coefficiente d'attrito del prodotto nei tratti curvi.
- Il diametro medio delle particelle solide.
- Il peso specifico del materiale solido.
- La temperatura del gas.

Una volta inseriti tutti i dati richiesti l'algoritmo si avvia e procede nella seguente maniera:

- 1) Viene calcolata la velocità del fluido v , partendo dall'equazione di continuità del gas ed assumendo un valore di primo tentativo per e .
- 2) Viene calcolata la pressione p , tenendo conto delle perdite di carico introdotte dal dispositivo di immissione del solido.
- 3) Viene determinata ρ_f sulla base del valore specificato per la sua temperatura e della sua pressione, calcolata nel passo precedente. Si itera da 1) a 3) fino al raggiungimento della precisione richiesta. Un contatore limita il numero di iterazioni possibili, in caso di instabilità del loop.
- 4) Tramite una subroutine, vengono calcolati:
 - 4a) la velocità di caduta della particella w_s , funzione del coefficiente di resistenza in aria c_w , che è funzione del numero di Reynolds del solido. Essendo Re_s a sua volta funzione di w_s , ai fini del calcolo è necessario fissare due valori di primo tentativo per c_w e w_s , e procedere in modo iterativo fino a quando l'errore finale non è inferiore allo 0,1%.
 - 4b) il coefficiente di resistenza della particella c_w ed il relativo valore di Re_s per ogni sezione.
 - 4c) il valore del coefficiente di attrito del solido λ_s , definito mediante un'espressione funzione di c , v , m , w_s e D .
- 5) Viene calcolato il numero di Reynolds dell'aria, utilizzato per determinare il coefficiente di attrito fluido-condotto per tubi lisci. Questo coefficiente viene poi moltiplicato per il parametro relativo alla scabrezza della tubazione inserito in precedenza.
- 6) Dopo aver fissato due valori di primo tentativo per c ed e , viene calcolato il gradiente di velocità del solido $\frac{dc}{dt}$ secondo l'equazione differenziale del moto, in cui nella prima iterazione viene trascurato il termine $\frac{\rho_f}{c \rho_s} v \frac{dv}{dt}$ in quanto $\rho_f \ll \rho_s$.

- 7) Viene calcolato il gradiente di pressione $\frac{dp}{dl}$ verificando che il valore ottenuto non sia inferiore ad un valore minimo: questo segnala il tendere della perdita di carico all'infinito (negativo), con conseguente interruzione del calcolo. Dopo aver fissato un valore di primo tentativo per le perdite di carico dp lungo l'elemento in questione, di lunghezza h , si calcola il dp corrente come $\frac{dp}{dl h}$ e lo si confronta con il valore precedentemente calcolato fino al raggiungimento di una precisione minima dello 0,01%. Al fine di determinare il valore di $\frac{dp}{dl}$ la densità del gas nell'elemento viene calcolata come la media fra i valori che la densità stessa assume nei suoi estremi. Si calcola quindi il valore della pressione nel punto successivo ($p_i = p_{i+1} + dp$) e poi il valore della densità e della velocità del fluido, utilizzando per il volume interstiziale e il valore relativo al passo precedente a quello attuale. Una volta determinata v viene calcolato il gradiente di velocità $\frac{dv}{dl}$ come differenza tra i valori della velocità attuale e quella precedentemente calcolata, rapportati ad h .
- 8) Viene calcolato il valore del volume interstiziale e attraverso l'equazione 6). Prima si verifica l'esistenza di almeno una radice nell'intervallo (0,1), poi si procede al calcolo della radice stessa mediante il metodo della bisezione. Nell'intervallo indicato la radice è unica, ed il suo valore viene determinato con una precisione inferiore a 10^{-6} . È necessaria tale precisione dal momento che anche una variazione molto piccola di e incide notevolmente sul valore degli altri parametri. Per fare un esempio, in un trasporto già completamente avviato, a fronte di una variazione di e dell'1% la velocità del solido c varia all'incirca del 30%.
- Il valore di e determinato in questa maniera viene quindi confrontato con quello precedentemente calcolato (se siamo nella prima iterazione con quello di primo tentativo) fino al raggiungimento di una precisione inferiore o uguale allo 0,01%.
- 9) Viene determinata la velocità del solido c nella sezione successiva:
- $$c_i = c_{i-1} \frac{dc}{dl h}$$
- 10) Viene calcolato il valore di e , introducendo c nell'equazione di continuità del solido.
- 11) Viene calcolato il valore di v , introducendo e nell'equazione di continuità del gas.
- 12) Viene calcolato il numero di Reynolds del gas.
- 13) Viene nuovamente richiamata la procedura per il calcolo dei coefficienti, ripetendo i passi a partire dal 4) per ogni elemento del circuito di trasporto.

Per quanto riguarda gli elementi curvi, essi vengono ricondotti alla somma di un numero arbitrario di tratti rettilinei di cui viene calcolata l'inclinazione rispetto ad un piano ma, mentre per la determinazione di c_w valgono le considerazioni precedentemente svolte, per quanto riguarda il coefficiente di attrito esso viene modificato in base all'ipotesi di una progressiva dismiscele del solido che va a strisciare contro la parete interna del condotto all'estradosso. Facendo riferimento alla Fig. 27, nella sezione A-A il coefficiente di attrito è quello del condotto rettilineo, dalla sezione A-A alla sezione C-C il coefficiente di attrito è la media del coefficiente in rettilineo ed in curva fatta secondo l'ascissa x :

$$[\lambda_c x + \lambda_s (D - x)]/D \quad \text{con } x = r(1 - \cos\alpha)$$

A valle della sezione C-C il coefficiente di attrito è dato invece da λ_c per tutto lo sviluppo della curva.

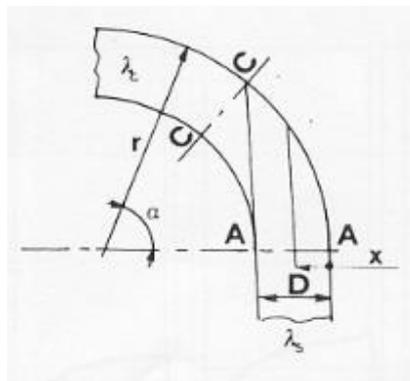


Fig. 27: Schema di riferimento per il calcolo del coefficiente di attrito in curva. Fonte [17]

Proprio in merito a λ_c è stata elaborata un'espressione valida per curve giacenti su di un piano di inclinazione generica δ rispetto ad un piano orizzontale:

$$\lambda_c = \lambda_s + 2f \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) \frac{D}{c^2} \left(\frac{c^2}{r + \frac{D}{2}} - g \operatorname{sen}\alpha \operatorname{sen}\delta \right)$$

Osservando quest'espressione si nota come il coefficiente λ_c è costituito da due termini: il primo è il valore del coefficiente di attrito nei tratti rettilinei λ_s ed il secondo, in cui compare il coefficiente f relativo all'attrito tra prodotto e parete, che rappresenta un termine aggiuntivo conseguente allo strisciamento fra solido ed estradosso interno della curva causato dalla forza centrifuga esercitata sul prodotto.

Per quanto riguarda dispositivi di forma comunque complessa, questi vengono descritti come somma di un numero sufficientemente elevato di tratti elementari curvi o rettilinei o di elementi sede di perdite di carico concentrate, cosicché il calcolo viene sempre ricondotto alle procedure precedentemente viste.

4.2 Output forniti dal TPSim Win

Una volta che tutti i dati di ingresso richiesti sono stati inseriti, l'algoritmo di calcolo si avvia ed il software TPSim Win ci fornisce sia un foglio di calcolo sia un grafico in cui la velocità dell'aria e la velocità del solido, le perdite di carico ed il volume interstiziale sono espressi in funzione della lunghezza del circuito di trasporto [18,19,20]. In Fig. 28 è mostrato un esempio di un grafico fornito dal TPSim Win, frutto di una simulazione di trasporto relativa l'impianto sperimentale descritto nel precedente capitolo.

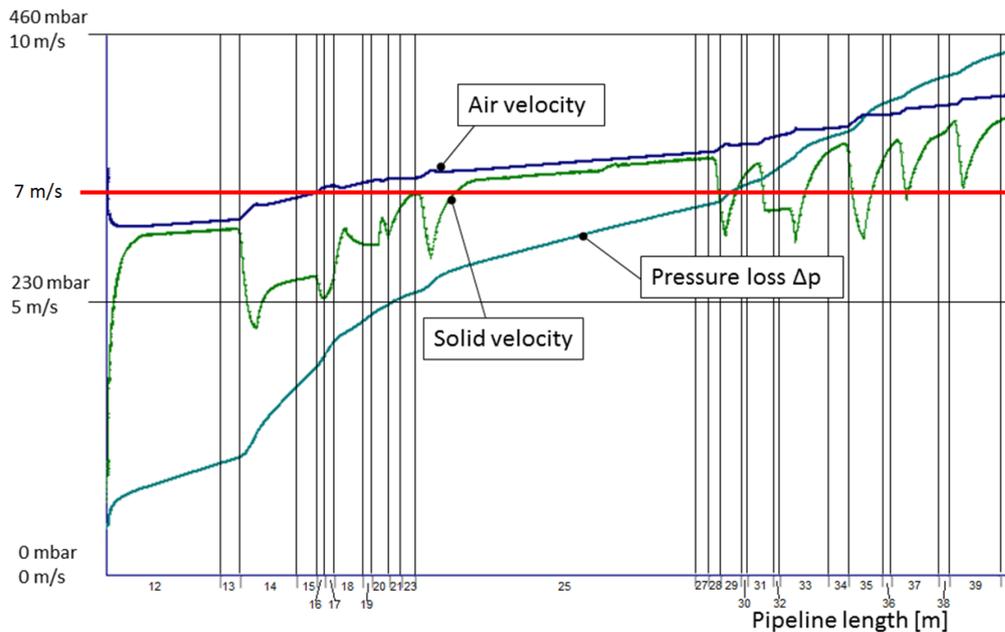


Fig. 28: Esempio di grafico fornito dal TPSim Win. Le perdite di carico (curva azzurra), la velocità del solido (curva verde) e la velocità dell'aria (curva blu) sono rappresentate in funzione della lunghezza dell'impianto.

Il TPSim Win è inoltre in grado di produrre un secondo tipo di diagramma, relativo la stabilità del trasporto pneumatico, in cui le perdite di carico complessive sono espresse in funzione della pressione iniziale di trasporto [21].

Per eseguire l'analisi di stabilità si devono tracciare due curve su di un grafico in cui nelle ascisse troviamo la pressione iniziale del trasporto p_i , e nelle ordinate le perdite di carico totali Δp . La prima curva è la curva $\Delta p = p_i$, la seconda è la curva caratteristica del trasporto in esame $\Delta p(p_i)$. Dall'intersezione di queste due curve si individua il punto di equilibrio, che potrà essere stabile oppure instabile.

In Fig. 29 è rappresentata la curva $\Delta p(p_i)$ relativa ad un trasporto pneumatico in condizioni di equilibrio stabile. Se infatti ipotizziamo un aumento della pressione iniziale questo comporta una diminuzione delle perdite di carico durante il processo di trasporto, per cui il punto di lavoro si sposta dal punto di equilibrio E verso destra, nel primo quadrante. In queste

condizioni la pressione iniziale è maggiore delle perdite di carico totali, e ciò causerà un'accelerazione con conseguente aumento del Δp , sicché le condizioni operative torneranno nel punto di equilibrio E. Se invece il punto di lavoro si sposta da E verso sinistra, muovendosi nel secondo quadrante, osserviamo una situazione speculare: la pressione iniziale è minore delle perdite di carico, che aumentano. Il trasporto rallenta, le cadute di pressione diminuiscono e il punto di lavoro ritorna al punto E.

In Fig. 30 è invece rappresentata una condizione di equilibrio instabile: quando dal punto di equilibrio E' ci si sposta nel primo quadrante, il Δp aumenta più della pressione iniziale, il che significa che il trasporto si bloccherà.

Studiare la stabilità del trasporto significa quindi analizzare come dei possibili eventi esterni possano influenzare le condizioni di lavoro dell'impianto. Tipici eventi che influenzano la pressione iniziale possono essere, ad esempio, discontinuità nell'alimentazione di materiale solido, lo stato di pulizia del filtro o la stessa formazione di un tappo.

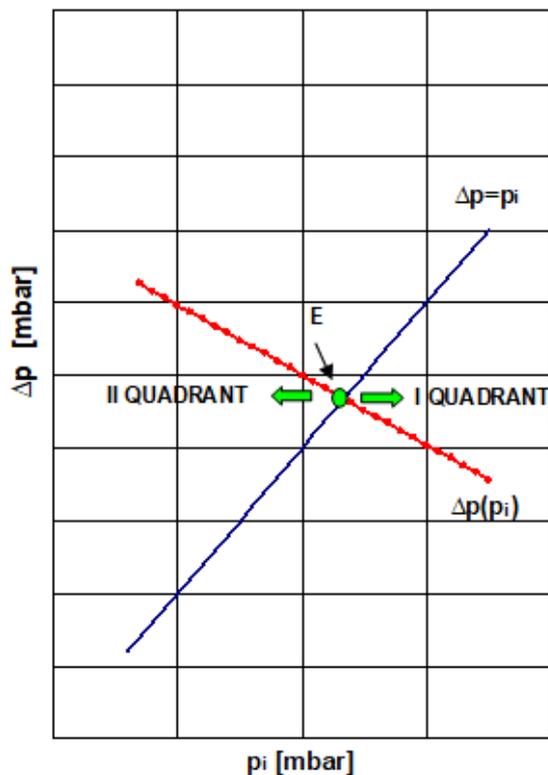


Fig. 29: Diagramma di stabilità caratteristico di un trasporto pneumatico in condizioni di lavoro di equilibrio stabile. Fonte [22].

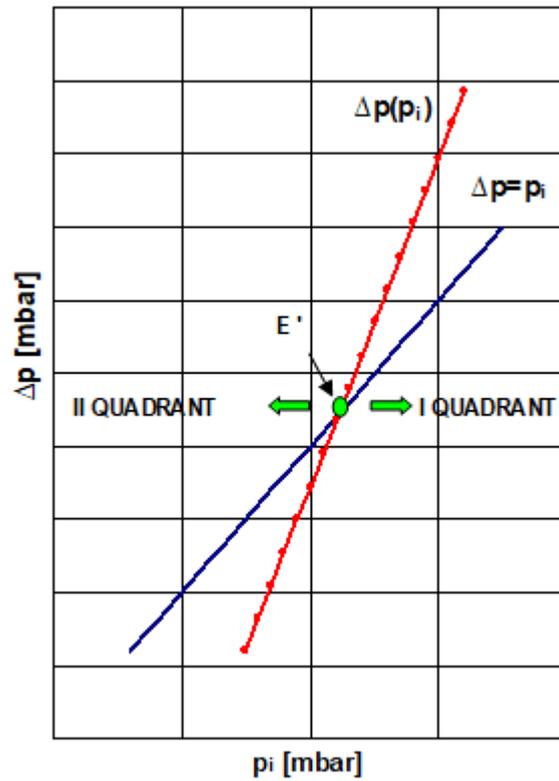


Fig. 30: Diagramma di stabilità caratteristico di un trasporto pneumatico in condizioni di lavoro di equilibrio instabile. Fonte [22].

5. Caratterizzazione dell'atomizzato di barbottina

La caratterizzazione dell'atomizzato di barbottina è un procedimento iterativo finalizzato a determinare tre parametri caratteristici del solido: il coefficiente di attrito in rettilineo, il coefficiente di attrito in curva ed il diametro aerodinamico equivalente.

I due coefficienti di attrito comprendono le interazioni solido-solido, solido-gas e solido-pareti rispettivamente nei tratti rettilinei ed in quelli curvi. Il diametro aerodinamico equivalente è definito come il diametro teorico di una sfera che, nelle medesime condizioni di trasporto, ha lo stesso comportamento fluidodinamico di una particella del solido.

Questi tre parametri sono necessari al TPSim Win per simulare il processo di trasporto pneumatico, per cui la loro conoscenza è necessaria per progettare un impianto su scala industriale utilizzando il software simulativo.

Il procedimento di caratterizzazione del materiale solido è schematizzato in Fig. 31.

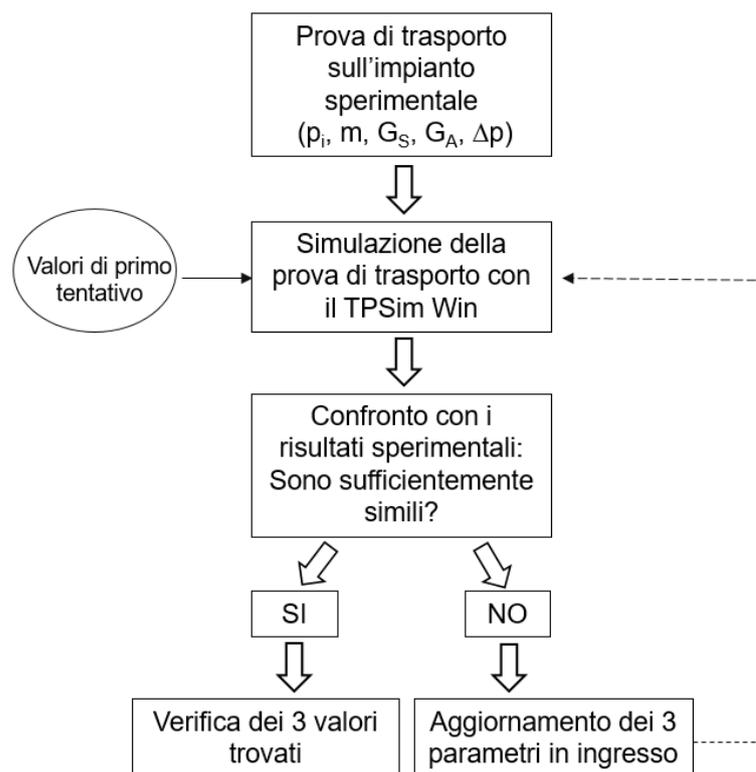


Fig. 31: Schema del procedimento di caratterizzazione del materiale solido.

Per prima cosa si esegue una prova di trasporto sull'impianto sperimentale. Si stabiliscono la portata in massa del solido ed il rapporto di miscela, sono note quindi anche la portata in massa di aria e la pressione iniziale del trasporto. Grazie alle numerose prese di pressione, gestite

mediante gli otto sistemi multiplexer, è possibile tracciare una curva che rappresenti l'andamento delle perdite di carico lungo tutto il circuito di trasporto.

Una volta eseguita la prova di trasporto sull'impianto sperimentale ed aver ricavato l'effettivo andamento delle perdite di carico lungo il circuito, si simula il test realmente effettuato con il TPSim Win. Tutti i dati di ingresso necessari al software sono noti, fatta eccezione per i tre parametri caratteristici del solido che si vogliono determinare. Nella prima simulazione si utilizzeranno quindi dei valori di primo tentativo, sulla base dell'esperienza pregressa, valutati in funzione di diversi parametri, tra i quali la densità, la forma e l'abrasività del prodotto, il materiale delle tubazioni.

La curva delle perdite di carico fornita dal software viene quindi confrontata con quella ottenuta sperimentalmente ed i valori dei tre parametri vengono aggiustati di conseguenza. Il diametro aerodinamico equivalente influenza le cadute di pressione lungo tutto l'impianto di trasporto, mentre i due coefficienti di attrito incidono nella pendenza della curva rispettivamente nei tratti rettilinei e in quelli curvi.

Dopo aver aggiornato i valori dei tre parametri si lancia una nuova simulazione. I risultati sperimentali e quelli computazionali sono nuovamente confrontati, e si procede in questa maniera fino a che le due curve non saranno sufficientemente simili. Questa condizione, rappresentata a titolo esemplificativo in Fig. 32, è stata raggiunta utilizzando i seguenti valori di ingresso:

- Diametro aerodinamico equivalente: 0,092 mm
- Coefficiente di attrito in rettilineo: 0,001
- Coefficiente di attrito in curva: 0,1

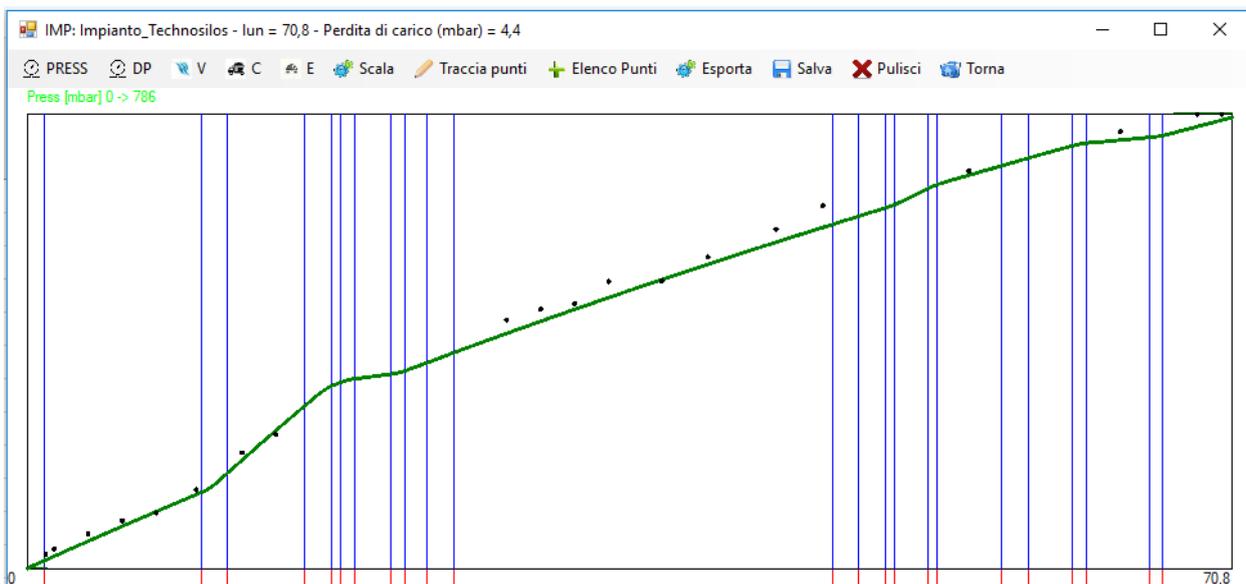


Fig. 32: Le perdite di carico calcolate dal TPSim Win (curva verde) ed i valori sperimentali (punti neri) sono rappresentati in funzione della lunghezza dell'impianto.

Con lo scopo di verificare la loro esattezza, questi tre parametri sono poi stati utilizzati in numerosi altri test. Sono state eseguite delle nuove prove di trasporto sull'impianto sperimentale, variando la portata in massa di solido, il rapporto di miscela e la pressione iniziale di trasporto. Per tutti i test, l'andamento delle perdite di carico previsto dal TPSim Win è stato confrontato con i valori ottenuti in campo. Nella grande maggioranza dei casi, i risultati forniti dal software si sono dimostrati molto vicini ad i risultati sperimentali. Grazie all'impianto pilota realizzato nello stabilimento dell'azienda Technosilos, utilizzando questa procedura è possibile caratterizzare qualunque tipo di materiale granulare in mucchio.

6. Test sperimentali

Oltre che per la caratterizzazione dell'atomizzato di barbotina, l'impianto sperimentale è stato utilizzato per eseguire numerose prove di trasporto pneumatico. L'obiettivo principale dei test è stato quello di individuare se ed in quali condizioni operative è possibile trasportare una portata costante di atomizzato di barbotina in fase densa a tappi, salvaguardando allo stesso tempo l'integrità del materiale e mantenendone la sua umidità nel range desiderato. Per valutare come il processo di trasporto influenzi la granulometria del materiale solido, alla fine di ogni test è stato prelevato un campione di prodotto e mediante un setacciatore è stata determinata la curva granulometrica cumulativa. A tal proposito, un parametro significativo per valutare il quantitativo di particelle fini è il D10, ovvero il diametro corrispondente al 10% in massa che attraversa le maglie dei setacci più fini. Tipici valori del D10 per il materiale vergine variano tra i 220 μm ed i 250 μm . Questi valori devono essere all'incirca gli stessi per il materiale trasportato, altrimenti l'atomizzato di barbotina non sarà utilizzabile per la successiva produzione di piastrelle ceramiche.

Per prima cosa quindi, è stato necessario ricavare la curva granulometrica cumulativa del materia vergine, ottenuta dopo aver essiccato l'atomizzato, così da rendere la curva indipendente dall'umidità relativa, che solitamente varia tra il 4% ed il 7%. Sono state inoltre eseguite delle prove di setacciatura, allo scopo di stabilire le condizioni di misura e valutare l'errore di ripetibilità del setacciatore.

Sono poi cominciati i test sull'impianto pilota: sono state effettuate un gran numero di prove, variando di volta in volta la portata di materiale trasportato, il rapporto di miscela e la pressione di trasporto. Oltre alle curve granulometriche cumulative, sono stati ricavati anche i diagrammi di stato. In Fig. 33 è mostrato un esempio di diagramma di stato per un generico processo di trasporto, in cui le perdite di carico totali sono espresse in funzione del rapporto di miscela, a parità di portata in massa di materiale solido, sia per la fase densa che per la fase diluita. Il punto in cui il Δp è minimo tipicamente corrisponde al punto di transizione tra una fase e l'altra. Durante un trasporto in fase densa è bene scegliere un valore del rapporto di miscela distante da questo punto. Infatti, se le condizioni operative coincidono proprio con tale punto, un aumento delle perdite di carico può essere indistintamente letto come un passaggio verso la fase densa oppure verso quella diluita. Di conseguenza la regolazione della portata d'aria ed il controllo del trasporto diventano molto difficili.

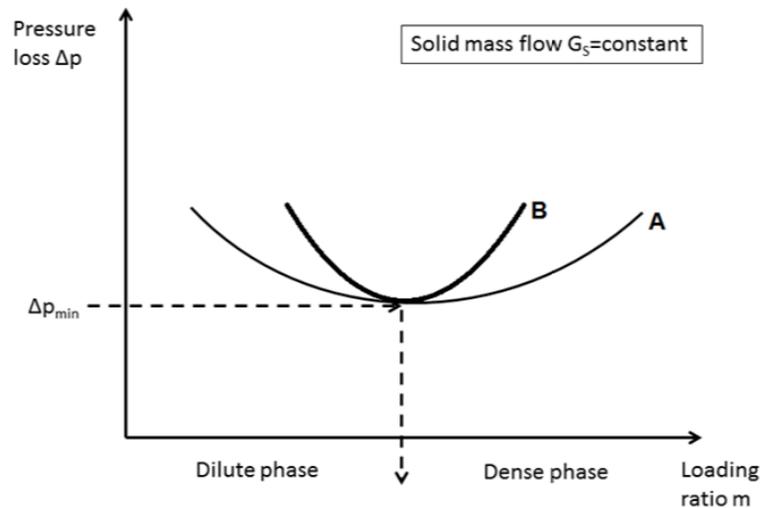


Fig. 33: Andamento qualitativo delle perdite di carico in funzione del rapporto di miscela m : trasporto pneumatico in fase diluita e fase densa per due ipotetici differenti materiali A e B. Fonte [13].

Per proteggere il know-how ottenuto dai test sperimentali, in questo capitolo tutte le grandezze caratteristiche del trasporto saranno espresse con valori adimensionali. Per quanto riguarda le portate in massa del solido e dell'aria, i loro valori adimensionali variano tra 1 e 0,5. Il rapporto di miscela adimensionale $m_{adim} = \frac{m}{m_{max}}$ è compreso tra 1 e 0,25 ed è stato calcolato facendo riferimento all'effettiva portata d'aria presente nel circuito di trasporto, tenendo in considerazione le perdite di trafilamento sulla valvola stellare. Il rapporto di miscela massimo m_{max} è quello oltre il quale non siamo più in grado di trasportare pneumaticamente il materiale solido, che andrà così ad intasare la linea.

Nel seguito saranno descritte nel dettaglio tutte le varie fasi dei test sperimentali.

6.1 Pesatura ed essiccamento

Dei campioni di 200 g di atomizzato di barbotina vergine sono stato prelevati da un big-bag contenente 1 ton di materiale. L'operazione di pesatura è stata effettuata con una bilancia elettronica di precisione ACCULAB VICON.

Il materiale è stato quindi completamente essiccato: questa operazione è necessaria per rendere ogni campione omogeneo ed ottenere poi una curva granulometrica che non dipende dal quantitativo di umidità presente nell'atomizzato, che come già detto è un parametro variabile tra il 4% ed il 7%.

I campioni sono stati messi in un forno BINDER FP 53 alla temperatura di 105°C per due ore. Ad intervalli regolari di 20 minuti è stata calcolata l'umidità residua, sia analiticamente che per mezzo di una termobilancia SARTORIUS MA 150. Le due curve di essiccamento così ottenute sono riportate in Fig. 34. Come si può osservare, un tempo di 80 minuti è sufficiente per asportare la quasi totalità dell'acqua presente nel materiale vergine. Tuttavia, in tutte le successive operazioni di essiccamento si è deciso di mantenere i campioni all'interno del forno per 120 minuti, come di consuetudine nelle aziende ceramiche.

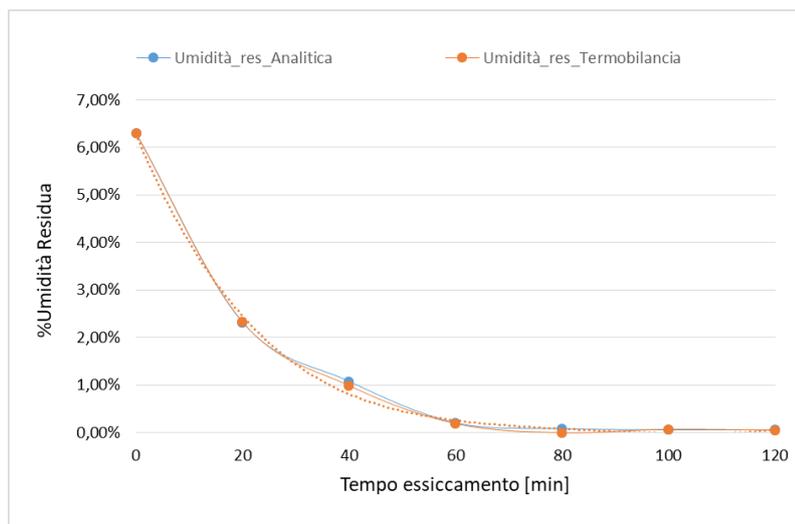


Fig. 34: Umidità residua nel materiale vergine in funzione del tempo di essiccamento.

6.2 Determinazione delle condizioni di misura

Il setacciatore impiegato per le analisi granulometriche è l'OCTAGON DIGITAL della ENDECOTTS. Questo modello è costituito da sette setacci, con maglie delle seguenti dimensioni: 1000, 600, 450, 300, 250, 180 e 125 μm .

È possibile impostare diversi valori per l'ampiezza di vibrazione e per la durata complessiva del tempo di vagliatura. Con lo scopo di individuare il settaggio che garantisca il minor quantitativo di materiale fine, sono stati eseguiti diversi test granulometrici al setacciatore, con i campioni di atomizzato di barbotina di 200 g precedentemente essiccati.

In Fig. 35 e 36 sono rappresentate le curve granulometriche ottenute rispettivamente con tre differenti valori dell'ampiezza di vibrazione e del tempo di vagliatura. I relativi valori del D10, del D50 e del D90 sono riportati nella Tab. 6.

La configurazione in cui si hanno i valori più alti del D10, ovvero quella con ampiezza di vibrazione pari a 2,04 mm e tempo di vagliatura di 10 minuti, è quella che sarà utilizzata in tutte le successive analisi granulometriche.

Infine, per valutare l'errore di ripetibilità, sono stati analizzati quattro campioni di materiale vergine, sotto le stesse condizioni di misura. In Tab. 7 sono riportati i valori del D10, del D50 e del D90 per i diversi campioni; sono inoltre stati calcolati il loro valore medio e la deviazione standard. Il valore medio del D10 è di 241 μm , con una deviazione standard di 14,2 μm . Gli errori nelle operazioni di misura sono principalmente dovuti ad errori di ripetibilità dello strumento.

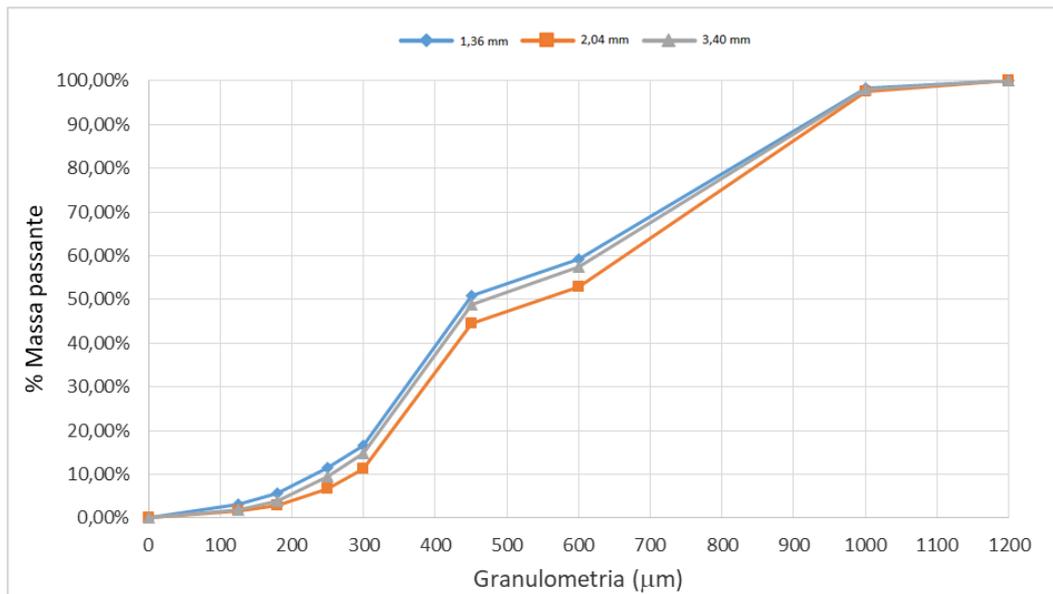


Fig. 35: Curve granulometriche cumulative dell'atomizzato di barbottina essiccato ottenute con tre differenti valori dell'ampiezza di oscillazione del setacciatore.

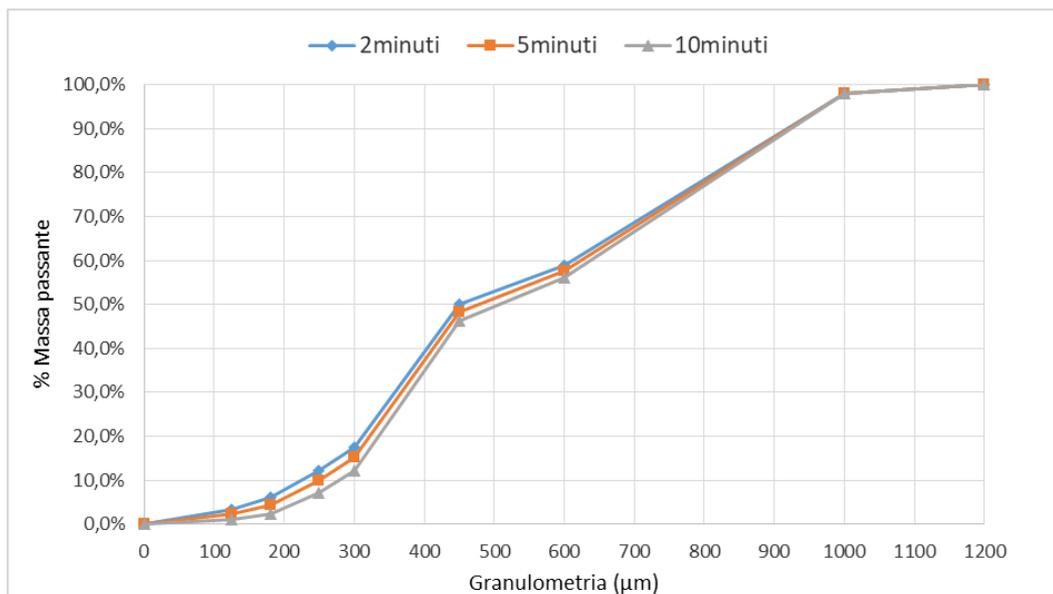


Fig. 36: Curve granulometriche cumulative dell'atomizzato di barbottina essiccato ottenute con tre differenti valori del tempo di vagliatura.

	D10 [μm]	D50 [μm]	D90 [μm]
Ampiezza di vibrazione [mm]			
1,36	232,8	446,5	914,6
2,04	285,5	547,5	931,6
3,40	254,2	472,0	920,7
Tempo di vagliatura [minuti]			
2	225,2	449,4	917,5
5	250,5	476,8	920,0
10	278,1	508,0	924,0

Tab. 6: Valori del D10, del D50 e del D90 ottenuti variando l'ampiezza di vibrazione ed il tempo di vagliatura.

	Vergine1	Vergine2	Vergine3	Vergine4	μ [μm]	S [μm]
D10 [μm]	237,3	222,5	253,8	250,5	241,0	14,2
D50 [μm]	449,7	446,1	465,5	457,4	454,7	8,6
D90 [μm]	916,7	915,1	921,1	920,0	918,2	2,8

Tab. 7: Valori del D10, del D50 e del D90 per quattro differenti campioni di materiale vergine. Loro valore medio e deviazione standard.

6.3 Test di trasporto: curve granulometriche cumulative

Con lo scopo di individuare le condizioni di esercizio ottimali, sono state effettuate numerose prove di trasporto. Alla fine di ogni test è stato prelevato un campione di atomizzato di barbotina, da analizzare al setacciatore per costruire la relativa curva granulometrica. Per la prima prova di trasporto è stata fissata la portata di materiale solido ed il rapporto di miscela. Nei test successivi si è tenuta costante la portata in massa di atomizzato di barbotina, ed è stato di volta in volta aumentato il rapporto di miscela, riducendo la portata d'aria ed aumentando conseguentemente la pressione di trasporto. Si è così arrivati a determinare il massimo valore del rapporto di miscela m_{max} oltre il quale il trasporto pneumatico si blocca e la linea si intasa.

A questo punto è stata aumentata la portata di atomizzato, incrementando la velocità di rotazione della stellare, e si è proceduto in maniera analoga a quanto fatto in precedenza, lavorando inizialmente con rapporti di miscela più bassi per poi ridurre progressivamente la portata d'aria nei successivi test.

Confrontando la curva granulometrica del materiale dopo il trasporto con quella del materiale vergine è stato possibile valutare come le condizioni operative influenzino le dimensioni delle particelle di barbotina. I risultati ottenuti mostrano come la velocità del solido e dell'aria, tra

loro strettamente correlate, sono i parametri più rilevanti in termini di integrità del prodotto. In Fig. 37 sono mostrati gli effetti di un processo di trasporto pneumatico effettuato sia con un rapporto di miscela basso ($m_{adim} = 0,3$) che con un rapporto di miscela elevato ($m_{adim} = 0,8$). Nella prima condizione il trasporto pneumatico tende a produrre una considerevole quantità di particelle fini, per cui il valore del D10 è molto più piccolo a seguito della sua movimentazione. La frammentazione dell'atomizzato avviene perlopiù nell'attraversamento dei tratti curvi, a causa del rapido cambio di direzione e della forte decelerazione cui è sottoposto il materiale. La decelerazione è forte quando la velocità del solido e dell'aria sono elevate, ovvero quando è elevata la portata in massa di aria, in quanto il diametro del condotto e la porta di barbotina sono costanti. Un aumento della portata d'aria comporta quindi maggiore attrito con le pareti interne delle tubazioni e collisioni più forti tra le particelle, che sono proprio la causa del danneggiamento del materiale. Invece lavorando con un rapporto di miscela piuttosto elevato, la degradazione dell'atomizzato è decisamente limitata. Infatti, a parità di portata del solido, un rapporto di miscela più grande significa meno aria all'interno del circuito di trasporto, che risulta in un processo di trasporto in grado di preservare l'integrità del prodotto [23]. La Fig. 38 è uno zoom della figura precedente, focalizzata sulle particelle più fini: il D10 è all'incirca $235 \mu\text{m}$ per il materiale vergine, si osserva una piccola riduzione quando $m_{adim} = 0,8$ ($D10 \approx 225 \mu\text{m}$) mentre diminuisce fino ad un valore di circa $190 \mu\text{m}$ nel trasporto con $m_{adim} = 0,3$.

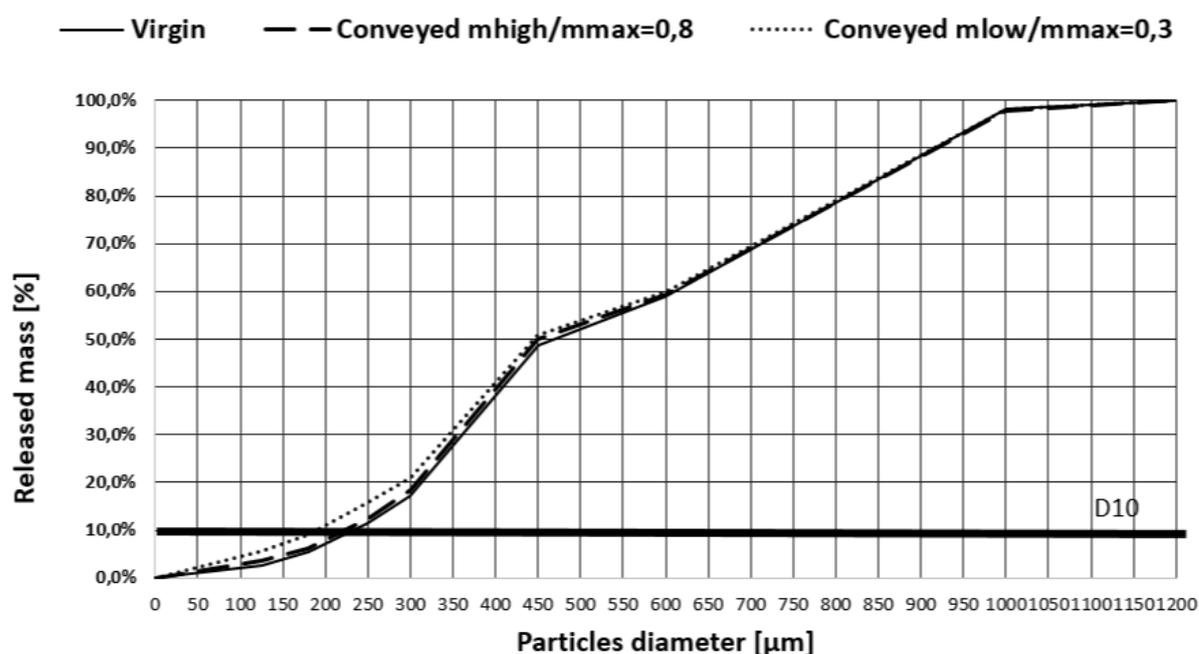


Fig. 37: Curve granulometriche cumulative per l'atomizzato di barbotina vergine e trasportato. Le prove di trasporto state effettuate con rapporti di miscela adimensionali $m_{adim} = 0,3$ e $m_{adim} = 0,8$.

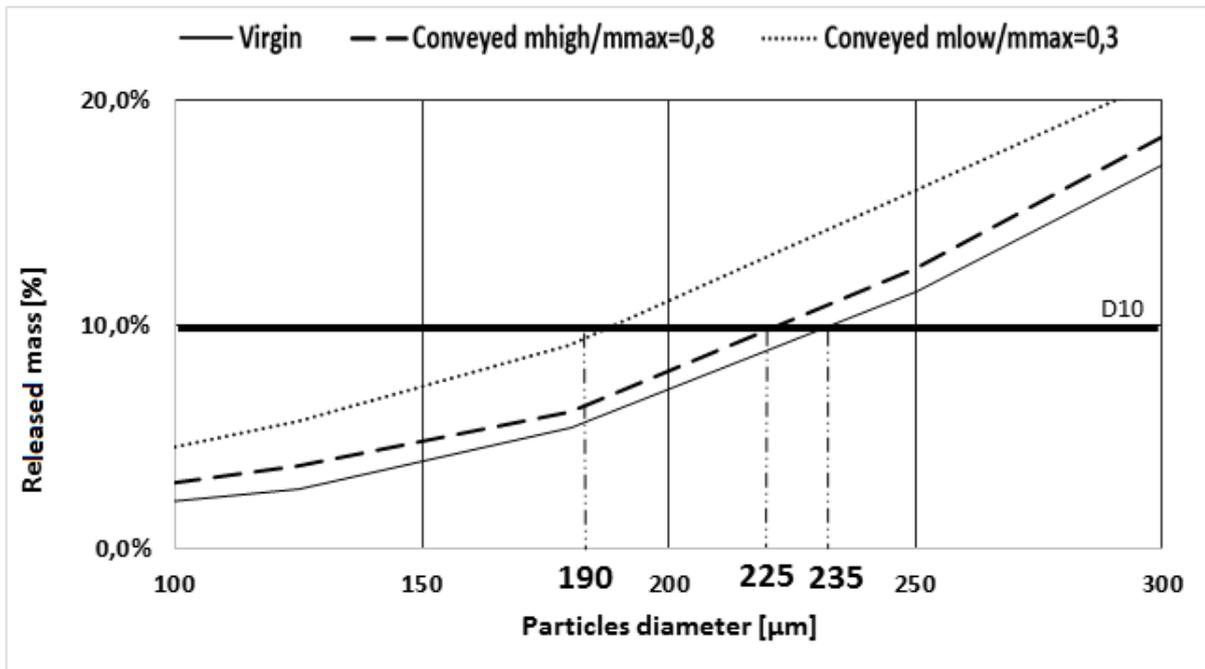


Fig. 38: Curve granulometriche cumulative per l'atomizzato di barbottina vergine e trasportato. Le prove di trasporto state effettuate con rapporti di miscela adimensionali $m_{adim} = 0,3$ e $m_{adim} = 0,8$.

6.4 Perdite di carico

In un processo di trasporto pneumatico le perdite di carico dipendono sia dalle caratteristiche geometriche del circuito (lunghezza, tratti verticali, tratti orizzontali, curve) che dalle caratteristiche fisiche delle tubazioni (scabrezza superficiale).

Grazie agli otto sistemi multiplexer che gestiscono l'acquisizione dei dati di pressione provenienti dalle numerose prese installate lungo tutto l'impianto, è possibile conoscere non solo la caduta di pressione totale, ma anche la perdita di carico in ogni singolo tratto del circuito di trasporto. Siamo quindi in grado di ottenere una mappatura completa del consumo energetico dell'aria e di individuare le parti dell'impianto che necessitano di maggiore energia. In Fig. 39 è riportato l'andamento delle perdite di carico (adimensionalizzate) in un trasporto effettuato con un rapporto di miscela $m_{adim} = 1$. Osservando questo grafico si possono analizzare i tratti del circuito che assorbono maggiore energia. Nel punto di alimentazione del materiale la sua velocità è nulla e parte dell'energia dell'aria è utilizzata per accelerare le particelle solide (P0-P2). Questo punto non è l'unico in cui il materiale necessita di essere accelerato: durante l'attraversamento delle curve (ad esempio il tratto P6-P7), il rapido cambio di direzione e l'attrito con le pareti del condotto comportano una notevole riduzione della velocità. Una buona parte dell'energia dell'aria è quindi spesa per riaccelerare le particelle

solide all'uscita delle curve. Nei tratti verticali (P6-P9 e P16-P27) inoltre, il solido deve vincere la forza di gravità ed il consumo energetico in questo caso è ovviamente maggiore. È bene notare che il tratto P9-P16 è un lungo tratto rettilineo, e a meno dell'aumento di velocità dell'aria dovuto alla sua espansione, l'andamento delle perdite di carico in questa parte del circuito dovrebbe essere lineare. Tuttavia i valori del Δp tra il P11 ed il P13 non sono allineati. Questa anomalia è causata dalla presenza del multiplexer, per cui il valore di pressione tra l'ultima presa di pressione di un quadro e la prima del quadro successivo può risultare leggermente alterato.

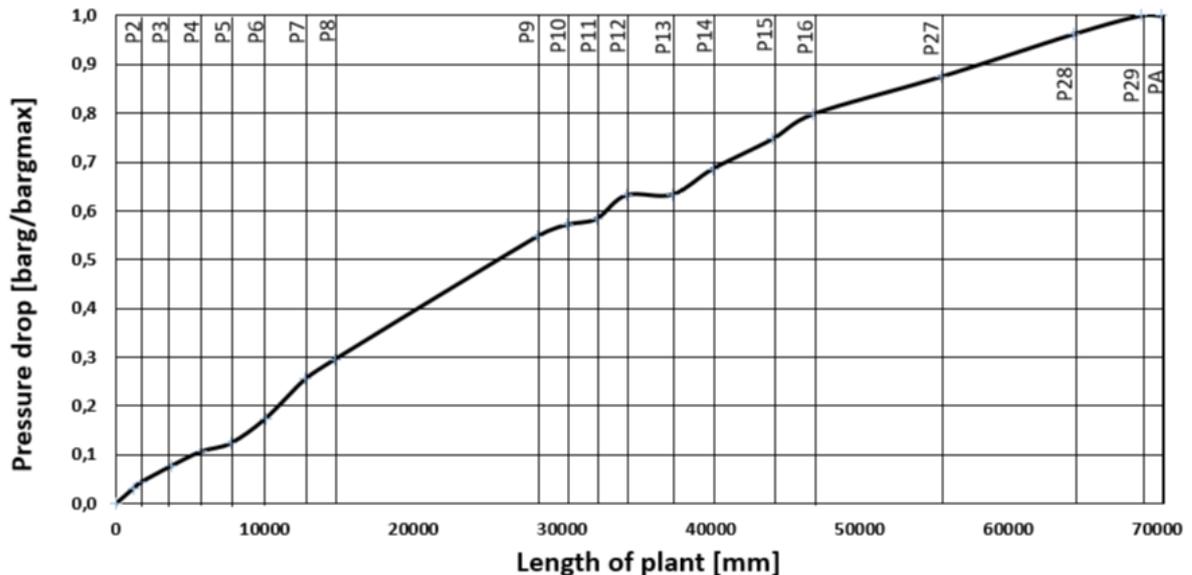


Fig. 39: Andamento delle perdite di carico in funzione della lunghezza dell'impianto. La prova di trasporto è stata eseguita con un rapporto di miscela adimensionale $m_{adim} = 1$.

6.5 Diagramma di stato

In Fig. 40 è rappresentato l'andamento della pressione di trasporto, della portata in massa di solido e di aria in funzione del tempo, durante un test di trasporto effettuato con un rapporto di miscela adimensionale $m_{adim} = 0,93$. Questo valore è stato calcolato tenendo in conto una perdita di aria per trafilamento nella valvola stellare pari a 30 kg/h. La pressione di trasporto è rilevata con un misuratore di pressione installato a monte della stellare. Quando la pressione raggiunge un primo valore di soglia, il dispositivo di alimentazione del prodotto viene fermato, in attesa che il tappo di materiale riesca a partire. Quando ciò avviene la pressione cala in maniera repentina ed il sistema di controllo rimette in moto la stellare.

Se invece il tappo di materiale non dovesse partire, la pressione continuerebbe a salire nel tentativo di spingere via il solido, ed al raggiungimento di un secondo valore di soglia viene fermato anche il compressore.

Per quanto riguarda la curva della portata di atomizzato di barbotina, questa presenta un andamento a gradini, tipico di un trasporto a tappi. Il tempo che intercorre tra un tappo ed il successivo è rappresentato dai segmenti orizzontali, mentre il peso di ciascuno tappo è dato dai tratti verticali. La portata d'aria è calcolata prima della valvola stellare e come si può osservare rimane pressoché costante durante il trasporto.

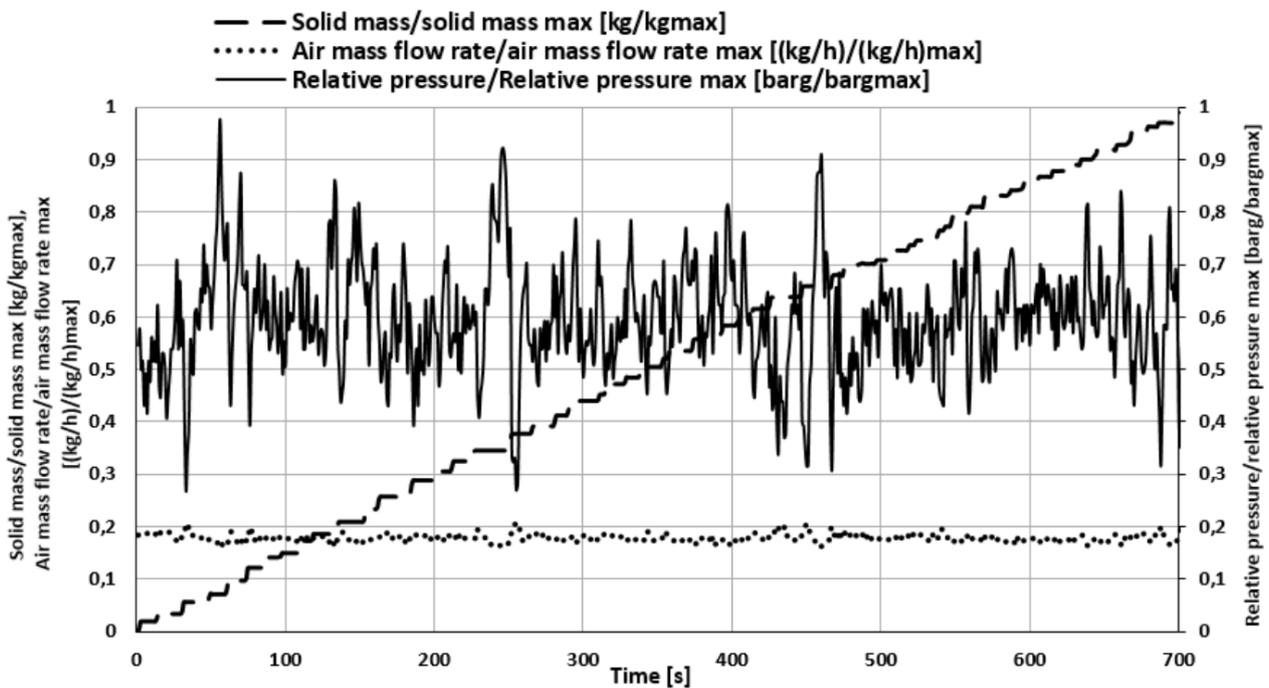


Fig. 40: Andamento della pressione, della portata e massa di solido e di aria in funzione del tempo. La prova di trasporto è stata eseguita con un rapporto di miscela adimensionale $m_{adim} = 0,93$.

Una volta eseguiti tutti i test di trasporto, è stato costruito il diagramma di stato sperimentale per l'impianto di trasporto pneumatico in fase densa della Technosilos.

La curva a puntini mostrata in Fig. 41 è stata ottenuta interpolando i dati relativi alla pressione media di trasporto di ogni singolo test (punti quadrati) al variare del rapporto di miscela, con una funzione polinomiale di secondo grado. Nella stessa figura è rappresentato anche l'andamento del D10 al variare del rapporto di miscela adimensionale, con la curva tratteggiata che interpola i punti circolari ricavati al setacciatore dopo ogni singolo test.

Queste due curve sono uno strumento molto utile per valutare le condizioni operative ottimali e lavorare con un rapporto di miscela per cui il sistema di trasporto è in grado di assicurare la massima integrità del prodotto ed allo stesso tempo limitare il consumo energetico. L'aria

bianca in figura rappresenta tali condizioni di lavoro ottimali, che per l'impianto in questione sono definite da valori del rapporto di miscela adimensionale m_{adim} compresi tra 0,45 e 0,75.

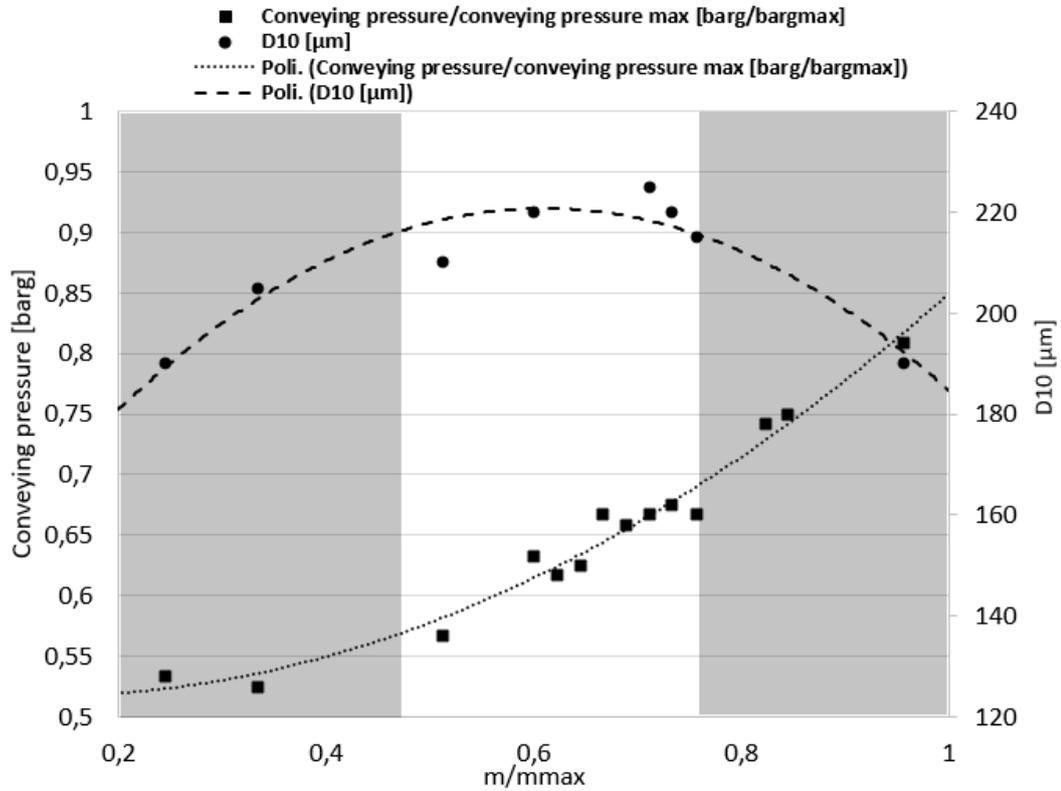


Fig. 41: Pressione di trasporto (punti quadrati interpolati dalla curva a puntini) e D10 (punti circolari interpolati dalla curva tratteggiata) sono rappresentati in funzione del rapporto di miscela adimensionale. L'area centrale bianca è quella in cui si verifica la minore degradazione del prodotto. Fonte.

7. Progettazione di un impianto industriale

7.1 Lay-out e P&I dell'impianto

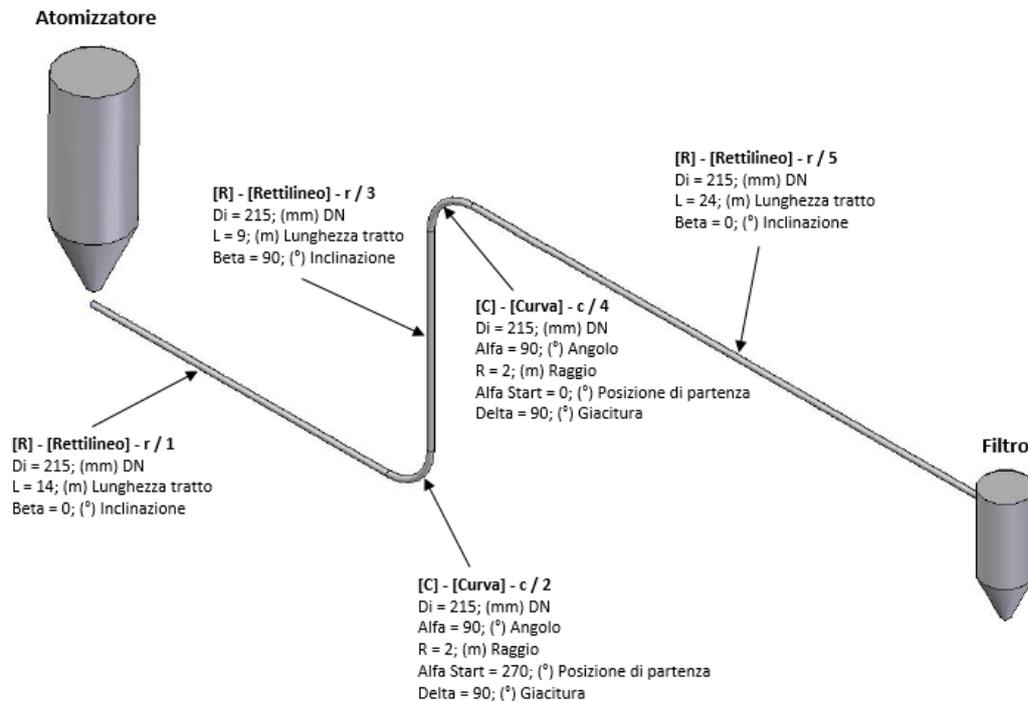


Fig. 42: Lay-out dell'impianto industriale.

Il lay-out ed il P&I dell'impianto industriale che si vuole realizzare sono mostrati rispettivamente in Fig. 42 e Fig. 43. L'impianto deve essere in grado di trasportare in fase densa a tappi una portata di materiale compressa tra le 28 e le 32 t/h. Sono questi infatti i quantitativi di atomizzato di barbotina prodotti dall'atomizzatore e scaricati all'interno della tramoggia di carico. Dalla tramoggia il prodotto viene immesso nel circuito di trasporto mediante una valvola stellare, la cui velocità di rotazione è regolata da un apposito inverter. Anche il compressore è controllato con un suo specifico inverter, e la pressione di trasporto è monitorata grazie ad un misuratore di pressione installato a monte della stellare.

Il circuito di trasporto è lungo complessivamente 54,3 m ed è composto da un primo tratto orizzontale di 14 m, seguito da un tratto verticale di 9 m e poi un ultimo tratto orizzontale di 24 m, separati da due curve a 90°. Alla fine del trasporto l'aria è filtrata mediante dei filtri a maniche ed espulsa esternamente, mentre l'atomizzato di barbotina viene scaricato all'interno di un silos di stoccaggio.

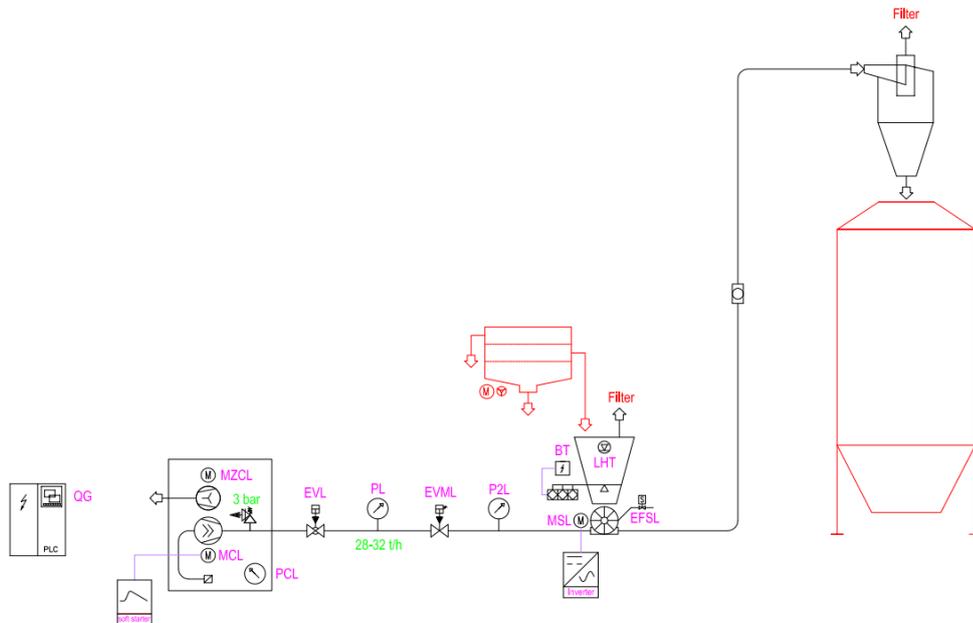


Fig. 43: P&I dell'impianto industriale.

7.2 Dimensionamento delle tubazioni

La prima fase nella progettazione dell'impianto è quella di definire il diametro delle tubazioni di trasporto. A questo scopo sono state effettuate delle simulazioni con il software TPSim Win, in cui è stato studiato l'andamento delle perdite di carico in funzione del rapporto di miscela e del diametro del condotto. La portata di atomizzato di barbotina è stata fissata pari a 30 t/h, ed è stata ipotizzata una perdita di carico concentrata di 50 mbar dovuta alla presenza della rotocella ed una perdita di 20 mbar allo scarico per via dei filtri a maniche. In Fig. 44 sono mostrati i risultati ottenuti per tre diverse configurazioni, caratterizzate da tre differenti valori del diametro: 190 mm, 215 mm e 240 mm.

La figura mostra chiaramente come la configurazione con diametro di 190 mm sia tra le tre quella che genera le più alte perdite di carico. Con rapporti di miscela compresi tra 20 e 38, la soluzione più conveniente dal punto di vista energetico è quella con un diametro di 240 mm. Tuttavia la curva arancione ottenuta con $d=215$ mm è più piatta della curva grigia ($d=240$ mm), e per questa ragione è preferibile tale configurazione, per via della sua maggiore flessibilità: l'impianto è in grado di operare con valori differenti del rapporto di miscela in un range di pressione più ristretto [27].

Va inoltre osservato che durante le simulazioni sono state analizzate anche altre configurazioni, e per diametri maggiori a 250 mm non si è riusciti a trovare una condizione di funzionamento.

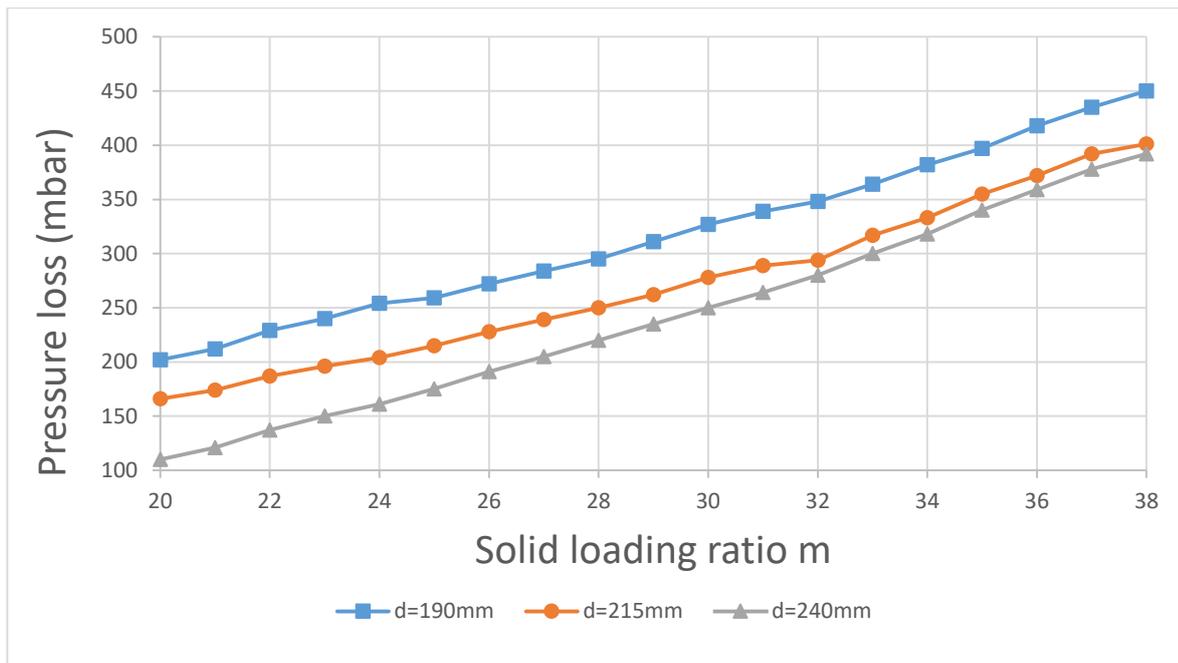


Fig. 44: Perdite di carico totali espresse in funzione del rapporto di miscela, per tre differenti valori del diametro delle tubazioni.

Una volta stabilito il diametro delle tubazioni, il TPSim Win è uno strumento molto utile anche per eseguire l'analisi di stabilità e per prevedere l'andamento della velocità del solido e dell'aria, così da poter individuare i valori ottimali del rapporto di miscela con cui far lavorare l'impianto.

7.3 Analisi di stabilità

Sempre facendo riferimento ad una portata di atomizzato di barbotina di 30 t/h, con il TPSim Win sono state ricavate le curve di stabilità per diversi valori del rapporto di miscela (Fig. 45), in cui le perdite di carico complessive Δp sono espresse in funzione della pressione iniziale di trasporto p_i . I punti di equilibrio sono individuati dalle intersezioni tra la curva $\Delta p(p_i)$ e la curva $\Delta p = p_i$. Affinché l'impianto possa garantire un corretto funzionamento, dovrà operare in punto di equilibrio che deve necessariamente essere stabile. La curva $\Delta p(p_i)$ deve quindi avere una pendenza minore della retta $\Delta p = p_i$ quando si interseca con essa. Verranno ora analizzati i vari punti di equilibrio trovati, per ciascun valore del rapporto di miscela esaminato.

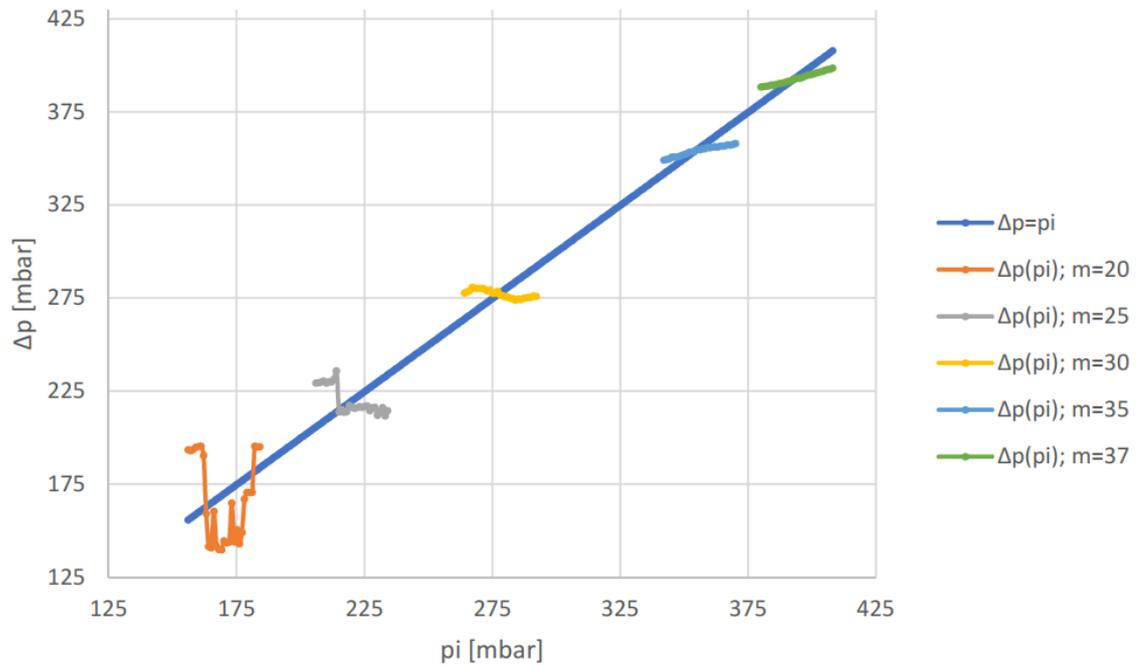


Fig. 45: Curve di stabilità per diversi valori del rapporto di miscela, con una portata di atomizzato di barbottina pari a 30 t/h.

Con $m=20$ (Fig. 46 a sinistra) sono stati individuati due punti di equilibrio. Il primo, a circa 163 mbar, è stabile, mentre il secondo tra 181 e 182 mbar è instabile. Anche con $m=25$ (Fig. 46 a destra) sono stati individuati due punti di equilibrio, il primo stabile ed il secondo instabile. Essendo tra loro molto vicini (sono compresi tra 214 e 217 mbar), sicuramente non è opportuno trasportare una portata di 30 t/h con questo rapporto di miscela.

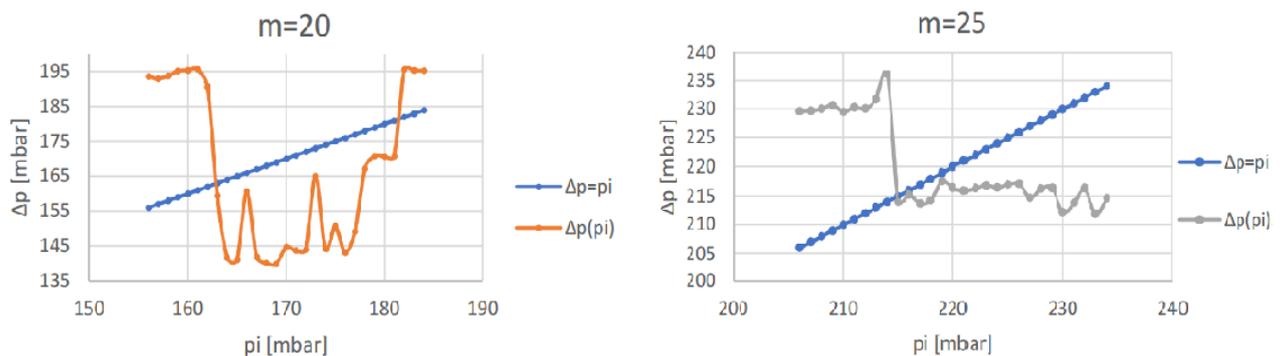


Fig. 46: Curva di stabilità con un rapporto di miscela $m=20$ (sinistra) ed $m=25$ (destra). La portata di atomizzato di barbottina è pari a 30 t/h.

Con $m=30$ (Fig. 47 a sinistra) è stato individuato un solo punto di equilibrio, stabile, a circa 278 mbar. Anche con $m=35$ (Fig. 47 a destra) abbiamo un unico punto di equilibrio, stabile, a 354 mbar. Lavorando con questi due valori del rapporto di miscela non si dovrebbero quindi avere problemi dal punto di vista della stabilità del trasporto pneumatico.

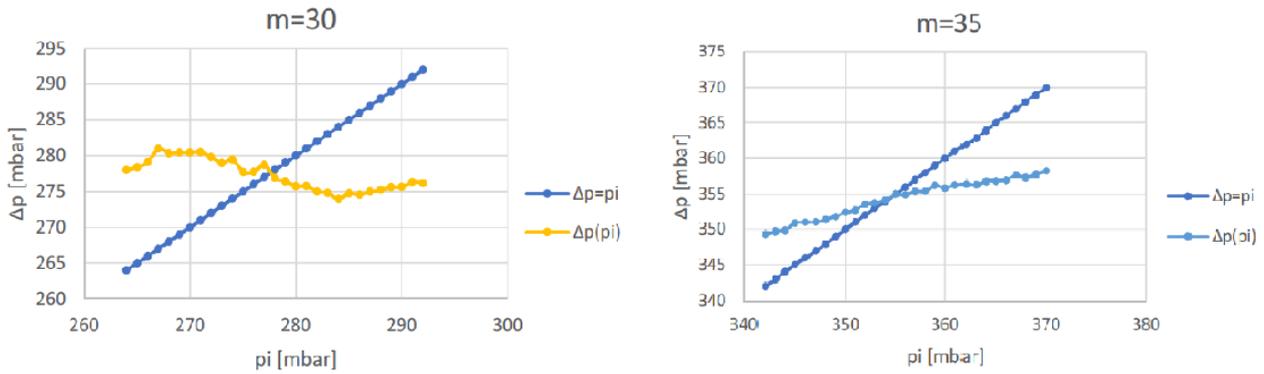


Fig. 47: Curva di stabilità con un rapporto di miscela $m=30$ (sinistra) ed $m=35$ (destra). La portata di atomizzato di barbottina è pari a 30 t/h.

Con $m=37$ (Fig. 48) è stato individuato un unico punto di equilibrio, stabile, a circa 392 mbar. Tuttavia le successive simulazioni hanno mostrato che non è possibile trasportare 30 t/h di atomizzato di barbottina con una rapporto di miscela superiore a 38. Dovendo quindi mantenere un sufficiente margine di sicurezza ed evitare di bloccare l'impianto, si è ritenuto opportuno non lavorare con rapporti di miscela maggiori di 35.

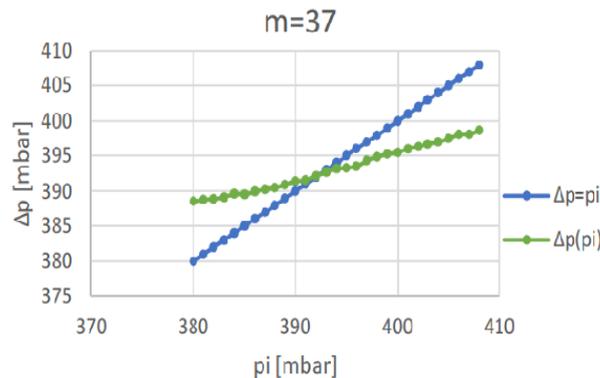


Fig. 48: Curva di stabilità con un rapporto di miscela $m=37$ e una portata di atomizzato di barbottina pari a 30 t/h.

7.4 Rapporto di miscela ottimale

Dopo aver analizzato il trasporto pneumatico dal punto di vista della stabilità, sono state effettuate delle simulazioni con il TPsim Win per valutare l'andamento della velocità del solido e del gas al variare del rapporto di miscela impiegato. Come già sottolineato più volte, è necessario che la velocità dell'atomizzato di barbottina durante il trasporto rimanga al di sotto dei 7 m/s, così da limitare il danneggiamento del prodotto a valori accettabili. Per lo stesso motivo si deve anche evitare che il materiale subisca eccessive decelerazioni; in questo caso il valore limite è stato stabilito pari a 8 s^{-1} .

In Fig. 49 sono rappresentati gli andamenti delle perdite di carico (curva verde scuro), della velocità del solido (curva verde chiaro) e della velocità dell'aria (curva blu) in funzione della lunghezza dell'impianto, ottenute con un rapporto di miscela $m = 25$. Il Δp complessivo è di 214 mbar. Osservando il grafico fornito dal software è possibile notare due differenti problemi. Nel primo tratto rettilineo la velocità del solido è prossima a quella dell'aria, ed in queste condizioni si rischia che il trasporto si blocchi, con conseguente intasamento della linea. Nel secondo tratto rettilineo, nell'ultima parte del circuito, la velocità del solido raggiunge e supera il valore limite di 7 m/s, rappresentato in figura dalla linea orizzontale rossa. Con questo valore del rapporto di miscela, che in ogni caso era già stato precedentemente escluso in seguito all'analisi di stabilità, non è quindi possibile preservare l'integrità dell'atomizzato di barbotina durante il processo di trasporto.

Questo risultato è in accordo con quanto emerso dall'analisi granulometrica effettuata nel capitolo precedente, i cui risultati avevano evidenziato che per evitare che il materiale si danneggiasse fosse necessario operare con rapporti di miscela elevati.

In Fig. 51 sono mostrati i risultati forniti dal TPSim Win impostando un rapporto di miscela $m=35$. Le perdite di carico aumentano fino a 354 mbar, mentre la massima velocità del solido diminuisce a circa 5 m/s, ben al di sotto dei valori in cui il materiale si rompe. Inoltre, come si può facilmente notare dal grafico, la curva blu della velocità dell'aria è sempre ben al di sopra della curva verde della velocità del solido, per cui non si corre il rischio che il trasporto si blocchi.

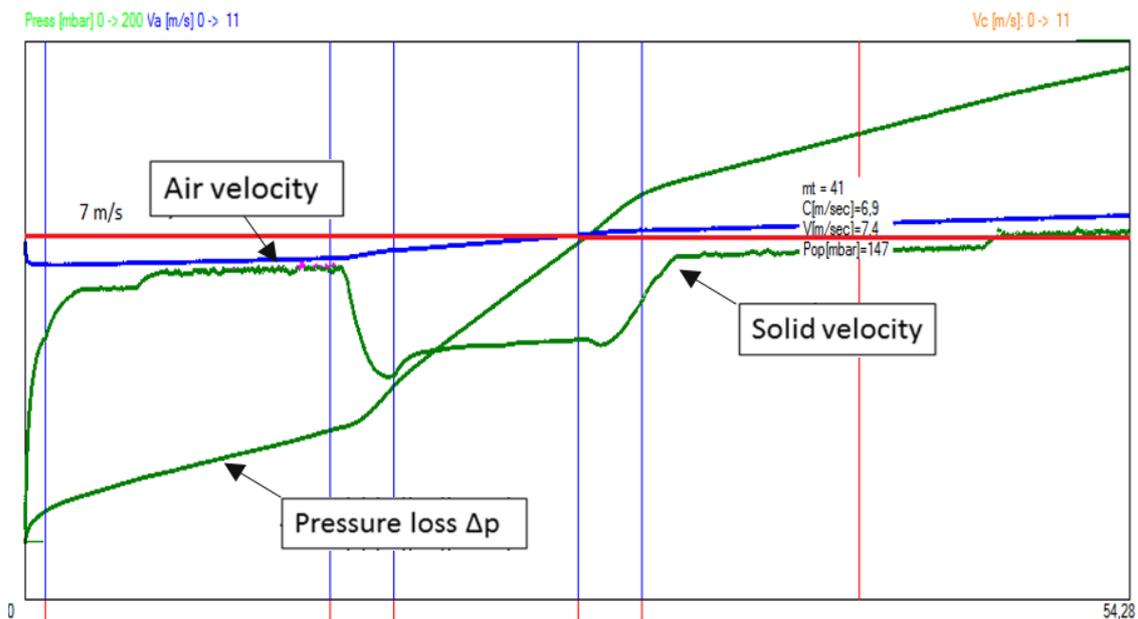


Fig. 49: Risultati della simulazione del TPSim Win. Perdite di carico (curva verde scuro), velocità del solido (curva verde chiaro) e velocità dell'aria (curva blu) sono rappresentate in funzione della lunghezza dell'impianto, con un rapporto di miscela $m=25$. La linea rossa indica la velocità limite di 7m/s

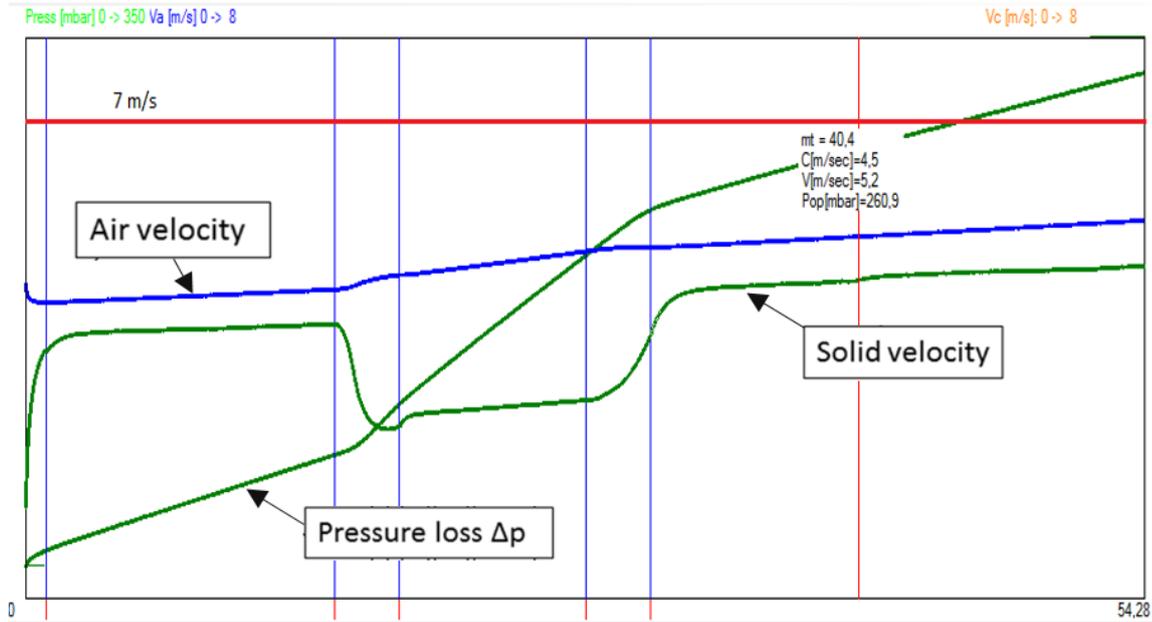


Fig. 50: Risultati della simulazione del TPSim Win. Perdite di carico (curva verde scuro), velocità del solido (curva verde chiaro) e velocità dell'aria (curva blu) sono rappresentate in funzione della lunghezza dell'impianto, con un rapporto di miscela $m=35$. La linea rossa indica la velocità limite di 7m/s.

8. Strumentazione ed automazione dell'impianto sperimentale

In questo capitolo si vuole fare un approfondimento sulla strumentazione e sull'automazione dell'impianto sperimentale descritto nel terzo capitolo. Verranno prima descritte le caratteristiche e le funzioni dei principali strumenti installati nell'impianto, poi saranno analizzati il sistema di acquisizione dati e la configurazione hardware del sistema di controllo, quindi sarà descritto il software di supervisione. Infine l'attenzione sarà focalizzata sul sistema di regolazione della portata di atomizzato di barbotina, mostrando delle parti del codice del software che si occupano di questa delicata funzione.

8.1 Strumentazione dell'impianto

Facendo riferimento al P&I di Fig. 20, è possibile osservare tutti gli strumenti di misura presenti lungo l'impianto, che garantiscono un monitoraggio costante e completo delle grandezze fisiche di maggior interesse durante il trasporto pneumatico.

Affinché il processo di trasporto avvenga con successo è infatti necessario determinare con precisione lo stato fisico ed igrometrico sia dell'aria che del materiale ed assicurare una corretta regolazione delle loro portata in massa. A questo scopo nella sezione di impianto tra il compressore e la valvola stellare troviamo: una valvola pneumatica per il controllo della portata massica dell'aria (VRPA), un pressostato differenziale (PDZ), un trasduttore di temperatura (TZ) ed uno di pressione (PL), che ci permettono di calcolare la densità dell'aria istante per istante.

A valle delle stellare sono poi installati altri otto pressostati differenziali (PD#), uno per ogni quadro multiplexer (QMP#), e undici trasduttori di temperatura (T#L).

Nel seguito saranno descritti i vari strumenti utilizzati.

VALVOLA DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA DI ARIA (VRPA)
Subito dopo la valvola di sicurezza (EVAC) è stata installata la valvola pneumatica on/off a due vie IM-P373-18 della Spirax Sarco (VRPA), finalizzata alla regolazione della portata di aria.

La valvola, rappresentata in Fig. 51, è comandata con un segnale in tensione 0-10 V ed è ad azione inversa, per cui in assenza di tensione è normalmente chiusa. Questa si apre e si chiude in seguito al movimento di un otturatore lineare che strozza il condotto di passaggio dell'aria,

così da ottenere la portata desiderata. Otturatori di questo tipo garantiscono una proporzionalità diretta tra il loro movimento e la variazione di portata, e sono solitamente impiegate in processi in cui le variazioni della portata sono limitate.



Fig. 51: Schema valvola pneumatica on/off a due vie per la regolazione della portata di aria.
Fonte [24].

PRESSOSTATO DIFFERENZIALE (PDZ)

Il pressostato differenziale (PDZ) installato è un Deltabar PMD 235 della Endress+Hauser. Il Deltabar è utilizzato per effettuare una misura indiretta della portata volumetrica di aria, necessaria per poi determinare anche la portata in massa. Per questo motivo è stato montato in prossimità di un orifizio tarato (vedi Fig. 52), dove avviene una perdita di carico concentrata Δp causata da un brusco restringimento della sezione del condotto.

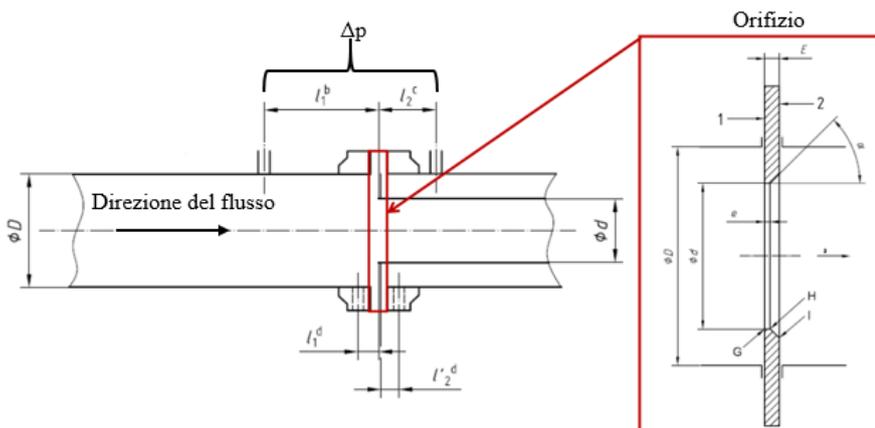


Fig. 52: Schema orifizio tarato.

Sulla base delle norme UNI EN ISO 5167-1 e 5167-2, la portata volumetrica di aria q_m si determina tramite la seguente equazione:

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

C è il coefficiente di efflusso, ε è il fattore di espansione, ρ la densità del fluido e β il fattore geometrico, pari al rapporto dei due diametri D/d .

Il Deltabar esegue la sua misura con una cella metallica, in cui è presente un sensore al polisilicio a film sottile resistente alla pressione. La differenza di pressione agisce quindi sulla membrana di separazione e viene trasmessa all'elemento di misura attraverso dell'olio. La membrana si deforma e genera una variazione di resistenza che viene rilevata ed elaborata dall'elettronica del trasmettitore, che fornisce un segnale d'uscita proporzionale al Δp . Lo strumento, schematizzato in Fig. 53, garantisce la misura in un vasto campo di temperatura, una stabilità a lungo termine, un'elevata riproducibilità ed una bassa isteresi.

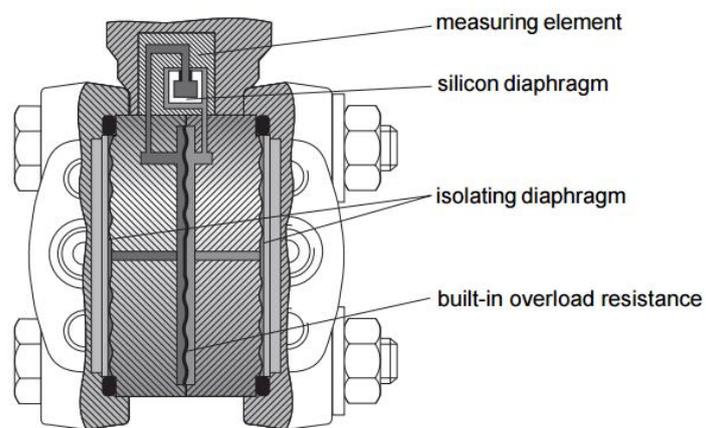


Fig. 53: Schema Deltabar PMD 235.

TRASDUTTORE DI TEMPERATURA (TZ)

Una volta nota la portata volumetrica di aria, per poter conoscere anche la portata in massa dobbiamo determinare la densità dell'aria, ricavabile una volta che sono note anche la temperatura e la pressione. Per questa ragione, subito dopo l'orifizio tarato, è stato installato un termometro TST11 della Endress+Hauser. Questo strumento, di cui si riportano disegno e foto in Fig. 54, è costituito da una termoresistenza Pt100 con isolamento in ossido di minerale, dalla testa di collegamento e dal tubo di protezione in acciaio inox dotato di attacco filettato. L'elemento sensibile è in questo caso costituito da un filo di platino, che grazie alla sua elevata resistività minimizza le dimensioni del bulbo e del filo stesso.

Le termoresistenze Pt100 sono inoltre caratterizzate da un'elevata precisione ed un'ottima stabilità a lungo termine.

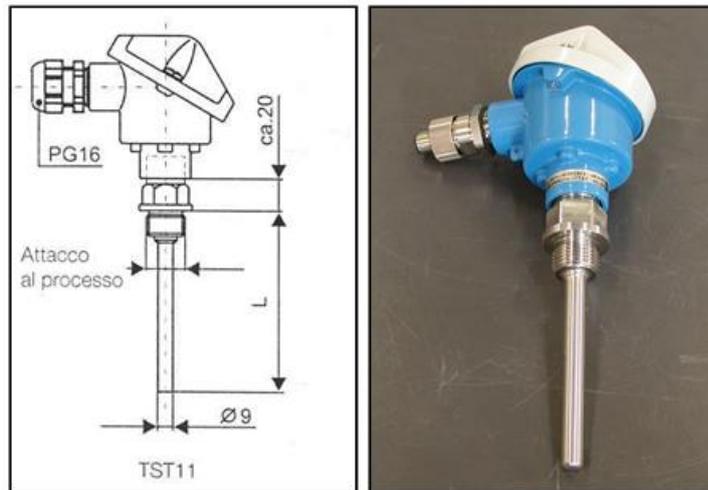


Fig. 54: Disegno e foto del termometro TST11. Fonte [25].

TRASDUTTORE DI PRESSIONE (PL)

La misura della pressione è effettuata mediante un trasmettitore Cerabar PMP 731 della Endress+Hauser (vedi Fig. 55). Il Cerabar impiega una cella polisiliconica in cui un sensore misura la deformazione di una membrana metallica, legata alla variazione di resistenza dei rami di un ponte piezoresistivo. La pressione di processo deforma il diaframma di separazione mediante un liquido di riempimento, trasmettendo la forza di pressione a delle resistenze variabili. Il lato di contatto del ponte di resistenza è fortemente disaccoppiato, così da garantire la stabilità della misura. Lo strumento misura quindi la tensione di uscita delle resistenze variabili, il cui valore risulterà proporzionale alla pressione di processo. Il Cerabar metallico gode di un'eccellente stabilità ed un'elevata precisione.



Fig. 55: Foto Cerabar PMP731.

STRUMENTAZIONE LUNGO LA LINEA DI TRASPORTO (PD# e T#L)

Come già descritto in precedenza, lungo la linea di trasporto sono installati otto trasduttori di pressione (PD#), uno per ogni quadro multiplexer (QMP#), che acquisiscono il segnale da ventinove prese di pressione. Anche in questo caso i pressostati differenziali che si è deciso di utilizzare sono dei Deltabar PMD 235 della Endress+Hauser, stesso modello già trattato per il PDZ.

A valle della stellare sono stati installati anche undici trasduttori di temperatura: dieci lungo il circuito di trasporto (T#L) e uno sulla tramoggia di scarico (TB). A questo scopo sono state utilizzate sempre delle Pt100 della Endress+Hauser, stesso modello scelto per il TZ.

Per poter determinare la portata di atomizzato di barbottina effettivamente trasportata, sulla tramoggia di scarico sono presenti anche tre celle di carico a flessione FTK 1000 della Laumas. Le celle di carico comunicano il segnale elettrico ad una bilancia elettronica W6000 sempre della Laumas, passando attraverso un'apposita cassetta di giunzione (JBB). La bilancia, rappresentata in Fig. 56, è dotata di un display per la visualizzazione del peso e fornisce in uscita un segnale analogico in 4-20 mA.



Fig. 56: Bilancia elettronica W6000 della Laumas.

8.2 Configurazione hardware del sistema di controllo

La configurazione hardware del sistema di controllo è schematizzata in Fig. 57. Come si può osservare dallo schema, il sistema di acquisizione dati ed il controllo dell'impianto sono governati da un PC di supervisione della Axiomtec, tramite un software sviluppato in ambiente di programmazione Visual Basic 6.0.

La comunicazione tra il PC ed i vari trasduttori di pressione installati nell'impianto avviene mediante rete Profibus, che mette in comunicazione il PC anche con un PLC Wago 750-323. Il PLC è dotato di venti schede IO, dieci dedicate agli ingressi digitali e altre dieci alle uscite digitali, per un totale di 40 DI e 40 DO, descritti rispettivamente nella Tab. 8 e nella Tab. 9.

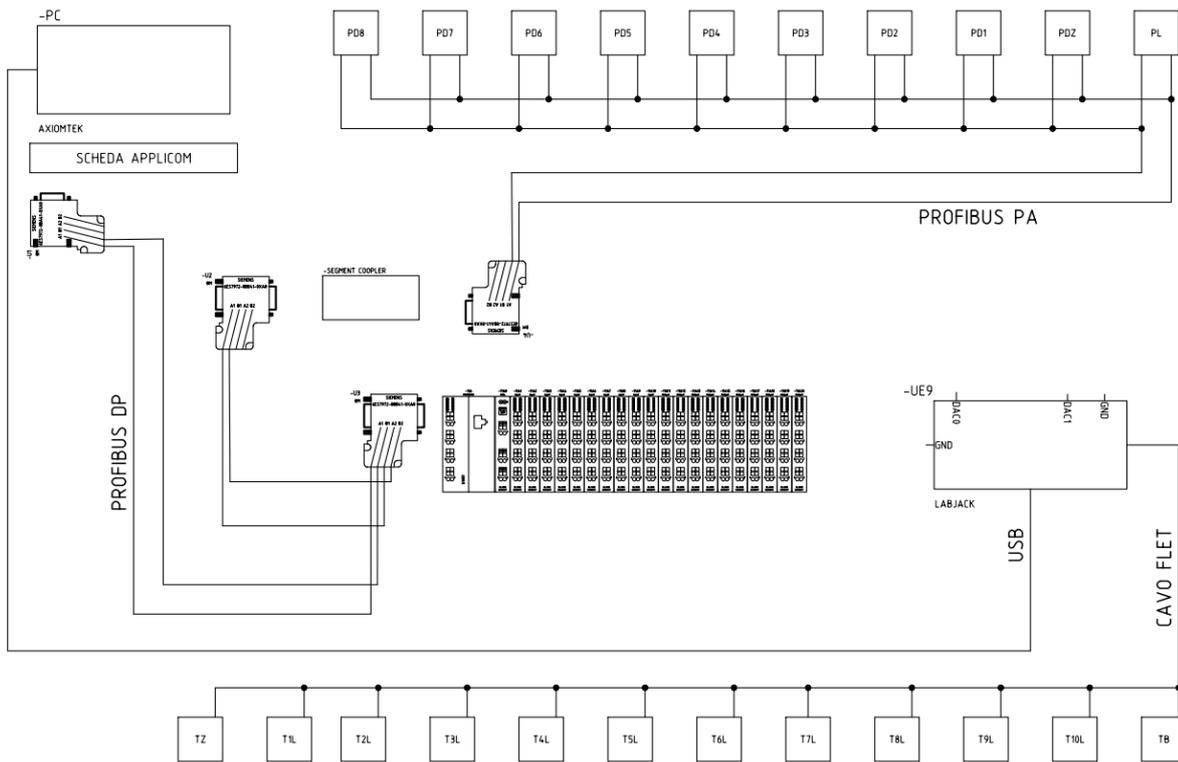


Fig. 57: Schema della configurazione hardware del sistema di controllo.

Il bus di campo permette uno scambio ciclico di messaggi tra i dispositivi di campo, detti Slaves (nel nostro caso abbiamo per esempio nove Deltabar ed un Cerabar), e l'unità centrale di controllo, detta Master (il PC).

La comunicazione in Profibus avviene con un cavo schermato di colore viola a due conduttori, uno rosso e uno verde, e permette di collegare fino a 127 dispositivi con unico cavo, garantendo elevate velocità di trasmissione dati.

Tutti i trasduttori di temperatura, così come la bilancia W60000, si interfacciano con il PC grazie ad unità di acquisizione dati LabJack UE9 (vedi Fig. 58), che riceve i segnali analogici in 4-20 mA da ciascuno strumento, li elabora e li comunica al PC via USB.



Fig. 58: Unità di acquisizione dati LabJack UE9.

Digital Input			
DI 1	Micro EV 1 QMP 1-4	DI 21	Operativo compressore
DI 2	Micro EV 1 QMP 5-8	DI 22	Segnale lavaggio filtro in corso
DI 3	Micro EV 2 QMP 1-4	DI 23	Operativo valvola stellare
DI 4	Micro EV 2 QMP 5-8	DI 24	Fault Inverter valvola stellare
DI 5	Micro EV 3 QMP 1-4	DI 25	Segnale dispositivo di emergenza OK
DI 6	Micro EV 3 QMP 5-8	DI 26	<i>libero</i>
DI 7	Micro EV 4 QMP 1-4	DI 27	Presenza 24 V DC
DI 8	Micro EV 4 QMP 5-8	DI 28	Scattato termico compressore
DI 9	Micro EV 5 QMP 1-4	DI 29	Micro ED2L in linea
DI 10	Micro EV 5 QMP 5-8	DI 30	Micro ED2L in deviata
DI 11	Micro EV 6 QMP 1-4	DI 31	Micro EDB in linea
DI 12	Micro EV 6 QMP 5-8	DI 32	Micro EDB in deviata
DI 13	Micro EV 7 QMP 1-4	DI 33	Micro EDL in linea
DI 14	Micro EV 7 QMP 5-8	DI 34	Micro EDL in deviata
DI 15	Micro EV 8 QMP 1-4	DI 35	Micro EFSL
DI 16	Micro EV 8 QMP 5-8	DI 36	Micro EPSL
DI 17	Micro EV E QMP 1-4	DI 37	Micro EVAC
DI 18	Micro EV E QMP 5-8	DI 38	<i>libero</i>
DI 19	Micro EV C QMP 1-4	DI 39	Micro EVB
DI 20	Micro EV C QMP 5-8	DI 40	<i>libero</i>

Tab. 8: Lista degli ingressi digitali.

Digital Output			
DO 1	Comando EV 1 QMP 1-4	DO 21	Comando compressore
DO 2	Comando EV 1 QMP 5-8	DO 22	Comando lavaggio filtro
DO 3	Comando EV 2 QMP 1-4	DO 23	Start Inverter valvola stellare
DO 4	Comando EV 2 QMP 5-8	DO 24	Lampada impianto in allarme
DO 5	Comando EV 3 QMP 1-4	DO 25	<i>libero</i>
DO 6	Comando EV 3 QMP 5-8	DO 26	<i>libero</i>
DO 7	Comando EV 4 QMP 1-4	DO 27	<i>libero</i>
DO 8	Comando EV 4 QMP 5-8	DO 28	<i>libero</i>
DO 9	Comando EV 5 QMP 1-4	DO 29	Comando ED2L in linea
DO 10	Comando EV 5 QMP 5-8	DO 30	Comando ED2L in deviata
DO 11	Comando EV 6 QMP 1-4	DO 31	Comando EDB in linea
DO 12	Comando EV 6 QMP 5-8	DO 32	Comando EDB in deviata
DO 13	Comando EV 7 QMP 1-4	DO 33	Comando EDL in linea
DO 14	Comando EV 7 QMP 5-8	DO 34	Comando EDL in deviata
DO 15	Comando EV 8 QMP 1-4	DO 35	Comando EFSL
DO 16	Comando EV 8 QMP 5-8	DO 36	Comando EPSL
DO 17	Comando EV E QMP 1-4	DO 37	Comando EVAC
DO 18	Comando EV E QMP 5-8	DO 38	Comando EVB
DO 19	Comando EV C QMP 1-4	DO 39	<i>libero</i>
DO 20	Comando EV C QMP 5-8	DO 40	<i>libero</i>

Tab. 9: Lista delle uscite digitali.

8.3 Software di supervisione

All'avviamento del software di supervisione si apre la finestra di interfaccia principale, mostrata in Fig. 59. Questa finestra è permanente, e consente l'accesso a tutte le funzioni di cui l'applicazione dispone, permettendo di intervenire su:

- Settaggi di riferimento
- Controllo
- Monitoraggio
- Funzioni ausiliarie

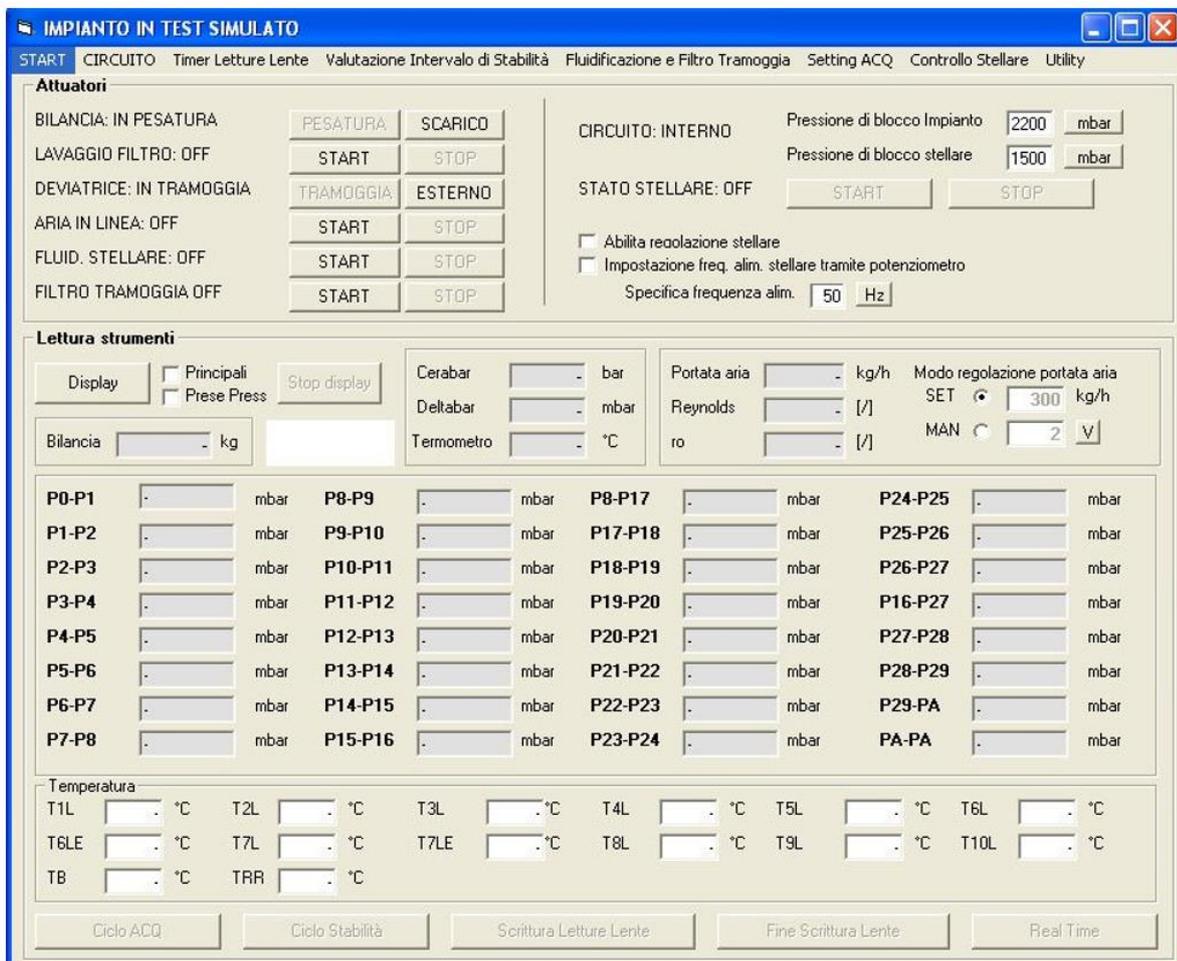


Fig. 59: Interfaccia principale del software di supervisione.

Come si può osservare dall'immagine, l'interfaccia principale è divisa in due sezioni principali, quella relativa agli *Attuatori* e quella dedicata alla *Lettura strumenti*. Nella parte superiore è inoltre presente una barra dei Menu, mentre nella parte inferiore troviamo la barra delle funzioni ausiliarie, composta da cinque differenti bottoni.

Nella sezione *Attuatori* è possibile:

- Comandare manualmente i principali dispositivi di attuazione
- Settare i valori delle pressioni di blocco
- Impostare la tipologia di controllo della valvola stellare

Nella sezione *Lettura strumenti* è possibile:

- Visualizzare i valori di pressione e temperatura, campionati ad intervalli regolari dai sensori installati lungo l'impianto
- Visualizzare il valore del peso letto dalla bilancia
- Selezionare la modalità di regolazione della portata in massa di aria

Nella barra dei Menu sono presenti otto voci, ognuna delle quali permette di aprire una finestra con delle specifiche funzioni, descritte nel seguito.

- **START**



Fig. 60: Barra dei Menu - START.

- Configurazione iniziale: riporta tutti i pulsanti dell'interfaccia principale nella condizione di default.
- AUTO ZERO STRUMENTAZIONE: esegue la taratura dei manometri differenziali.
- Exit: chiude il software.

- **CIRCUITO**



Fig. 61: Barra dei Menu - CIRCUITO.

- INTERNO: seleziona la diramazione interna all'edificio.
- ESTERNO: seleziona la diramazione esterna all'edificio.
- Config Prese: apre l'interfaccia ausiliaria di selezione dei sensori dai quali si vuole ottenere la misura (Fig. 62).

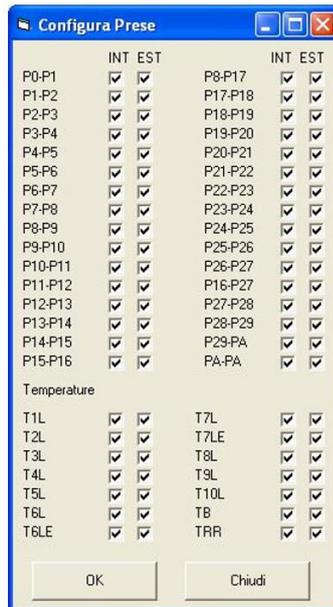


Fig. 62: Interfaccia ausiliaria di configurazione prese.

- Timer Letture Lente



Fig. 63: Barra dei Menu - Timer Letture Lente.

Permette di impostare il tempo di refresh a schermo dei valori di temperatura e del peso letto dalla bilancia.

- Valutazione Intervallo di Stabilità



Fig. 64: Barra dei Menu - Intervallo di stabilità.

Permette di impostare il tempo dedicato al timer del ciclo di stabilità.

- Fluidificazione e Filtro Tramoggia



Fig. 65: Barra dei Menu - Fluidificazione e Filtro Tramoggia.

- Timer Fluidificazione stellare: apre la relativa interfaccia ausiliaria (Fig. 66), in cui è possibile impostare i tempi di pausa e lavoro della valvola di fluidificazione EFSL.
- Timer Filtro Tramoggia: apre la relativa interfaccia ausiliaria (Fig. 67), in cui è possibile impostare i tempi di pausa e lavoro della valvola di pulizia del filtro della tramoggia EPSL.



Fig. 66: Interfaccia ausiliaria dedicata alla valvola di fluidificazione della stellare.



Fig. 67: Interfaccia ausiliaria dedicata alla valvola di pulizia del filtro della tramoggia.

- Setting ACQ



Fig. 68: Barra dei Menu - Setting ACQ.

- Set Portata: apre l'interfaccia ausiliaria dedicata all'impostazione della portata in massa d'aria e relativo controllo PID (Fig. 69).
- Variabili ACQ: apre l'interfaccia ausiliaria dedicata al ciclo di acquisizione dati (Fig. 70).
- Diaframma: apre l'interfaccia ausiliaria dedicata al settaggio dei valori del diaframma tarato installato a monte della stellate (Fig.71)
- Polmone: consente di scegliere tra una misura differenziale di pressione tra due prese di pressione consecutive nel circuito di trasporto o tra una presa in linea e l'ambiente esterno.



Fig. 69: Interfaccia ausiliaria dedicata alla regolazione della portata in massa di aria.

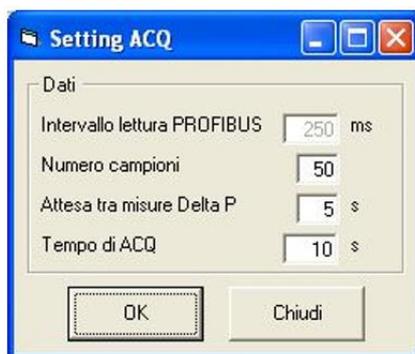


Fig. 70: Interfaccia ausiliaria dedicata al ciclo di acquisizione dati.



Fig. 71: Interfaccia ausiliaria dedicata al diaframma tarato.

- Utility



Fig. 72: Barra dei Menu - Utility.

- Calcolo stellare: apre l'interfaccia ausiliaria dedicata al calcolo della portata in massa di materiale solido (Fig. 73)
- Ripristino trasporto: sblocca la linea nel momento in cui si dovesse intasare. Questa funzione è stata prevista, ma la relativa parte software non è stata ancora implementata.

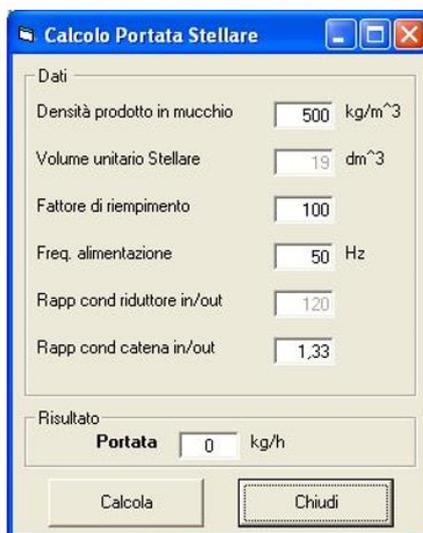


Fig. 73: Interfaccia ausiliaria dedicata al calcolo della portata in massa di materiale solido.

Ogni funzione ausiliaria è associata ad un bottone dedicato (Fig. 74), è sarà descritta nel dettaglio.



Fig. 74: Barra delle funzioni ausiliarie.

- Ciclo ACQ

Questa funzione avvia il ciclo di acquisizione dei valori della pressione di trasporto PL letta dal Cerabar, dei valori dei Δp letti da tutti i Deltabar e del valore del peso letto dalla bilancia. I parametri di acquisizione sono definibili nell'apposita interfaccia ausiliaria vista in precedenza; il sistema genera un file di testo salvato all'interno di un cartella di destinazione predefinita. All'interno di questo file vengono riportati quattro blocchi di acquisizione,

ciascuno dei quali è temporalmente shiftato in avanti rispetto a quello precedente di in un tempo pari al tempo di ciclo più 5 secondi. Questo in quanto ogni quadro multiplexer (abbiamo 8 quadri e 32 misure di pressione differenziale) rimane su una coppia di prese di pressione per tutto il tempo di ciclo, poi passa alla coppia successiva lasciando intercorrere un tempo di riposo, necessario a smorzare le eventuali oscillazioni di pressione sul sensore durante lo switch. È quindi necessario porsi una condizione di funzionamento stabile dell'impianto: in questo modo il fatto che misure provenienti da prese di pressione poste consecutivamente nella condotta siano ottenute in momenti diversi non rappresenta un problema sulla coerenza dei dati acquisiti.

In Fig. 75 è mostrato un esempio del file di acquisizione dati.

```

-----
Raccolta dati Acquisizione.
-----
Progetto:      txtprogetto
CIRCUITO INTERNO
-----
Note Particolari sulla acquisizione
Acquisizione eseguita il 22/03/2017 12.35.28. # Campioni eseguiti 50 su 5 sec. # Pausa tra quadri 5 sec.
-----

Primo Blocco
#      B1      P_T      P1      P5      P9      P13      P18      P21      P25      P29      Data
1      87,02    ,75      15,9    16,2    17,2    18,6    19,4    20,5    21,9    22,5    22/03/2017 12.
2      72,68    ,76      16,0    16,3    17,5    18,9    19,9    20,5    21,9    22,6    22/03/2017 12.
3      56,46    ,72      15,9    16,2    17,8    18,7    19,9    20,8    21,8    22,8    22/03/2017 12.
4      86,16    ,64      15,2    16,3    17,5    18,9    19,9    20,4    22,0    22,5    22/03/2017 12.
5      26,23    ,84      15,8    16,8    17,9    18,1    19,8    20,2    21,3    22,1    22/03/2017 12.
6      97,42    ,50      15,5    16,3    17,2    18,2    19,1    20,6    21,6    22,9    22/03/2017 12.
7      5,90     ,77      15,4    16,8    17,8    18,6    19,4    20,6    21,7    22,6    22/03/2017 12.
8      21,02    ,77      15,2    16,3    17,4    18,4    19,9    20,1    21,9    22,2    22/03/2017 12.
9      49,36    ,80      15,2    16,5    17,6    18,6    19,1    20,9    21,4    22,3    22/03/2017 12.
10     68,84    ,60      15,4    16,9    17,3    18,6    19,0    20,8    21,5    22,5    22/03/2017 12.
11     66,55    ,35      15,4    16,6    17,2    18,9    19,4    20,8    21,2    22,5    22/03/2017 12.
12     96,07    ,44      16,0    16,1    17,8    18,0    20,0    21,0    21,7    22,7    22/03/2017 12.
13     10,40    ,45      15,7    16,9    17,1    18,2    19,3    20,0    21,3    22,9    22/03/2017 12.
14     9,34     ,51      15,6    16,1    17,6    18,5    19,9    20,2    21,3    22,6    22/03/2017 12.
15     82,26    ,75      15,0    17,0    17,7    18,4    19,5    20,5    21,9    22,4    22/03/2017 12.
16     76,85    ,61      15,3    16,4    18,0    18,7    19,5    20,8    21,3    22,2    22/03/2017 12.
17     82,41    ,62      15,6    16,3    18,0    18,4    19,3    20,2    21,8    22,9    22/03/2017 12.
18     95,42    ,68      15,2    16,8    17,4    18,5    19,1    20,1    21,8    23,0    22/03/2017 12.
19     85,86    ,78      15,1    16,4    17,5    18,9    19,2    20,8    21,7    22,2    22/03/2017 12.
20     19,82    ,47      15,4    16,6    17,2    18,9    19,3    20,0    21,3    22,6    22/03/2017 12.
21     57,09    ,43      16,0    16,2    17,7    18,9    19,3    20,3    21,8    22,8    22/03/2017 12.
22     91,25    ,48      15,1    16,3    17,9    18,7    19,5    20,6    21,2    22,0    22/03/2017 12.
23     79,24    ,60      15,1    16,6    17,5    18,9    19,4    20,8    21,8    22,1    22/03/2017 12.
24     9,75     ,55      15,4    17,0    17,1    18,7    19,7    20,7    21,5    23,0    22/03/2017 12.
25     21,10    ,82      15,6    16,1    17,7    18,3    19,1    20,6    21,5    22,6    22/03/2017 12.
26     47,47    ,61      15,1    16,7    17,8    18,3    19,8    20,8    21,4    22,6    22/03/2017 12.

```

Fig. 75: Esempio di file di acquisizione dati di pressione.

- Ciclo Stabilità

Questa funzione fornisce un file di testo analogo a quello appena visto, necessario a valutare se la condizione di funzionamento dell'impianto è stabile o meno. A questo scopo è solitamente necessario riportare su di un diagramma pressione-tempo i dati ottenuti.

- Scrittura Letture Lente / Fine Scritture Lente

Premendo il pulsante “Scrittura Lettura Lente” si avvia un timer che a intervalli regolari acquisisce i valori misurati dai trasduttori di temperatura lungo il circuito. Quando si preme il pulsante “Fine Scritture Lente” viene generato un file di testo (Fig. 76)

Raccolta dati Letture Lente.

Progetto : txtprogetto
CIRCUITO INTERNO

Letture lente eseguite il 22/03/2017 14.21.20.

#	SI	Pres	M/A	HZ	T1L	T2L	T3L	T4L	T5L	T6L	T6LE	T7L	T7LE	T8L	T9L	T10L	TB	TRR	Data
1	46,15	,57	593,	0	20,2	21,91	22,94	23,55	24,08	25,07	26,32	27,11	28,53	29,61	30,28	31,68	32,71	33,57	22/03/2017 14.21
2	96,16	,57	593,	0	20,32	21,23	22,24	23,98	24,64	25,42	26,44	27,25	28,42	29,52	30,08	31,77	32,78	33,98	22/03/2017 14.21
3	66,80	,57	593,	0	20,1	21,03	23,	23,48	24,82	25,63	26,16	27,33	28,5	29,14	30,2	31,76	32,83	33,57	22/03/2017 14.21
4	26,05	,57	593,	0	20,91	21,38	22,91	23,98	24,48	25,76	26,75	27,67	28,97	29,86	30,96	31,82	32,45	33,84	22/03/2017 14.21
5	43,51	,57	593,	0	20,73	21,22	22,59	23,16	24,82	25,4	26,99	27,9	28,88	29,57	30,98	31,53	32,15	33,58	22/03/2017 14.21
6	61,05	,57	593,	0	20,22	21,26	22,23	24,	24,87	25,14	26,35	27,59	28,45	29,57	30,77	31,43	32,91	33,53	22/03/2017 14.21
7	34,52	,57	593,	0	20,46	21,01	22,12	23,2	24,65	25,47	26,95	27,35	28,55	29,87	30,62	31,98	32,01	33,81	22/03/2017 14.21
8	36,50	,57	593,	0	20,52	21,53	22,24	23,3	24,24	25,02	26,07	27,23	28,51	29,32	30,13	31,41	32,09	33,41	22/03/2017 14.21
9	43,28	,57	593,	0	20,67	21,34	22,1	23,67	24,89	25,15	26,56	27,9	28,6	29,05	30,01	31,42	32,72	33,87	22/03/2017 14.21
10	44,10	,57	593,	0	20,03	21,18	22,65	23,36	24,08	25,84	26,47	27,77	28,51	29,78	30,23	31,04	32,3	33,85	22/03/2017 14.21
11	83,03	,57	593,	0	20,56	21,29	22,76	23,06	24,	25,8	26,01	27,29	28,66	29,07	30,66	31,12	32,01	33,78	22/03/2017 14.21
12	79,13	,57	593,	0	20,54	21,83	22,53	23,14	24,87	25,95	26,09	27,98	28,05	29,53	30,25	31,06	32,44	33,79	22/03/2017 14.21
13	87,07	,57	593,	0	20,71	21,39	22,69	23,01	24,84	25,62	26,38	27,98	28,01	29,13	30,07	31,53	32,9	33,74	22/03/2017 14.21
14	93,06	,57	593,	0	20,49	21,26	22,74	23,84	24,14	25,94	26,14	27,65	28,97	29,9	30,14	31,28	32,45	33,59	22/03/2017 14.21
15	9,13	,57	593,	0	20,56	21,23	22,46	23,72	24,02	25,04	26,63	27,59	28,5	29,54	30,55	31,85	32,89	33,13	22/03/2017 14.21
16	62,33	,57	593,	0	20,83	21,85	22,05	23,11	24,67	25,71	26,57	27,5	28,93	29,89	30,45	31,89	32,89	33,83	22/03/2017 14.21
17	41,21	,57	593,	0	20,76	21,47	22,02	23,56	24,78	25,24	26,42	27,41	28,32	29,7	30,17	31,09	32,75	33,21	22/03/2017 14.21
18	69,64	,57	593,	0	20,69	21,94	22,2	23,27	24,67	25,08	26,73	27,08	28,33	29,11	30,86	31,27	32,28	33,99	22/03/2017 14.21

Fig. 76: Esempio di file di acquisizione dati di temperatura.

- Real Time

Questa funzione permette di rappresentare graficamente in tempo reale la pressione di trasporto PL, la portata in massa di aria, il peso letto dalla bilancia e la tensione applicata alla valvola regolatrice di pressione (VRPA). Un esempio è mostrato in Fig. 77.

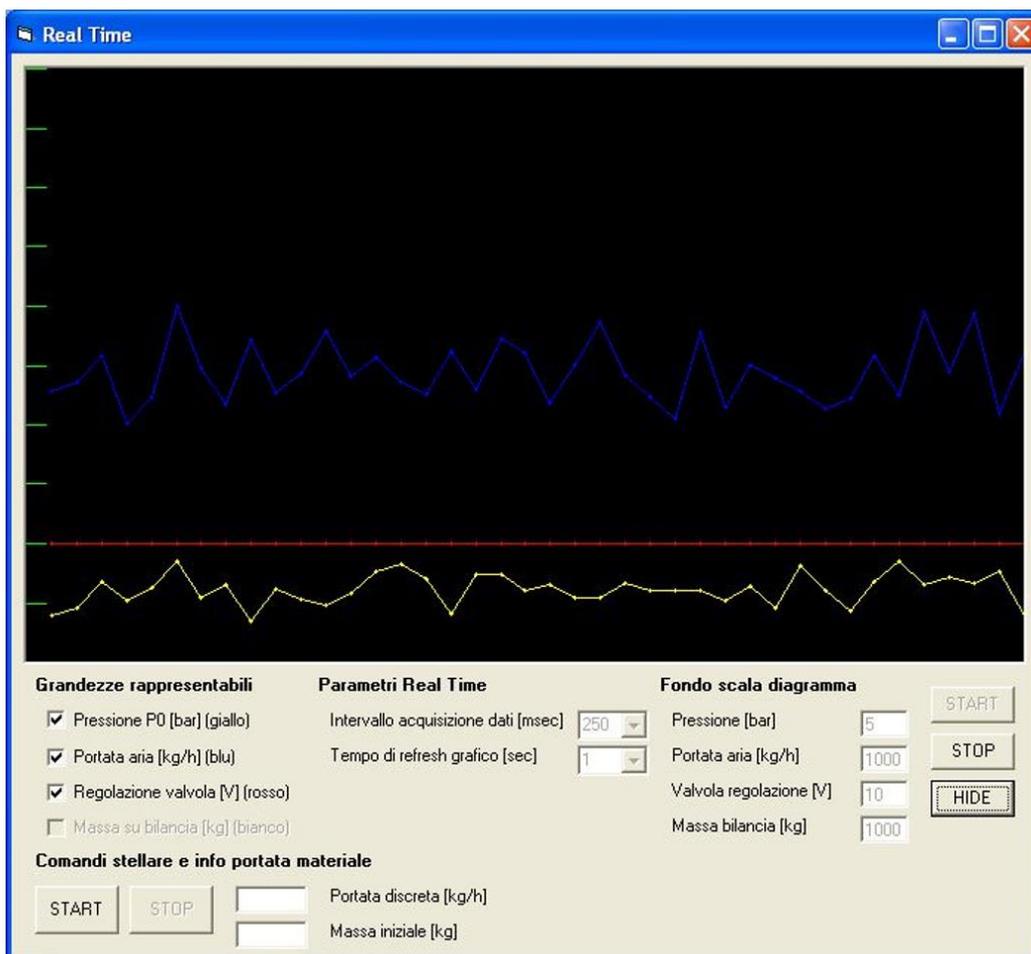


Fig. 77: Rappresentazione in tempo reale della pressione di trasporto, della portata in massa d'aria e della tensione di alimentazione della valvola VRPA.

8.4 Regolazione della portata in massa di atomizzato di barbottina

Affinché il trasporto pneumatico avvenga con successo è necessario che l'impianto lavori con un determinato valore del rapporto di miscela, che permetta di evitare problemi legati alla stabilità del trasporto, all'integrità dell'atomizzato di barbottina e all'intasamento della linea. Le regolazioni della portata in massa di aria e di materiale assumono quindi un ruolo fondamentale nel controllo del processo.

In Fig. 78 è rappresentata la sequenza di formazione e la partenza di un tappo di atomizzato di barbottina.

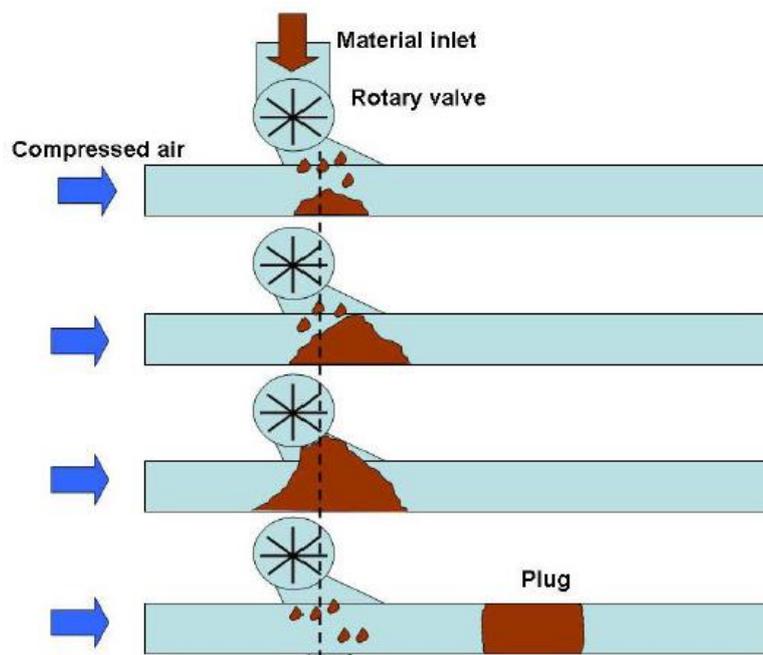


Fig. 78: Sequenza di formazione e partenza di un tappo di atomizzato di barbottina. Fonte [26].

Il materiale viene introdotto all'interno della tubazione di trasporto in seguito alla rotazione della valvola stellare, si addensa al di sotto di essa ed ostacola sempre più il passaggio dell'aria. Contestualmente la pressione a monte della stellare inizierà a salire, fino a quando non sarà sufficientemente elevata da riuscire a muovere il tappo compatto di materiale solido che nel frattempo si è creato. Una volta che il tappo è partito la pressione diminuirà in maniera repentina.

Nel software di supervisione è presente un'interfaccia ausiliaria dedicata alla regolazione della velocità di rotazione della valvola stellare, gestita mediante un apposito inverter. L'interfaccia, rappresentata in Fig. 79, si apre cliccando sul pulsante "Controllo Stellare" nella barra dei Menu in alto sulla destra.

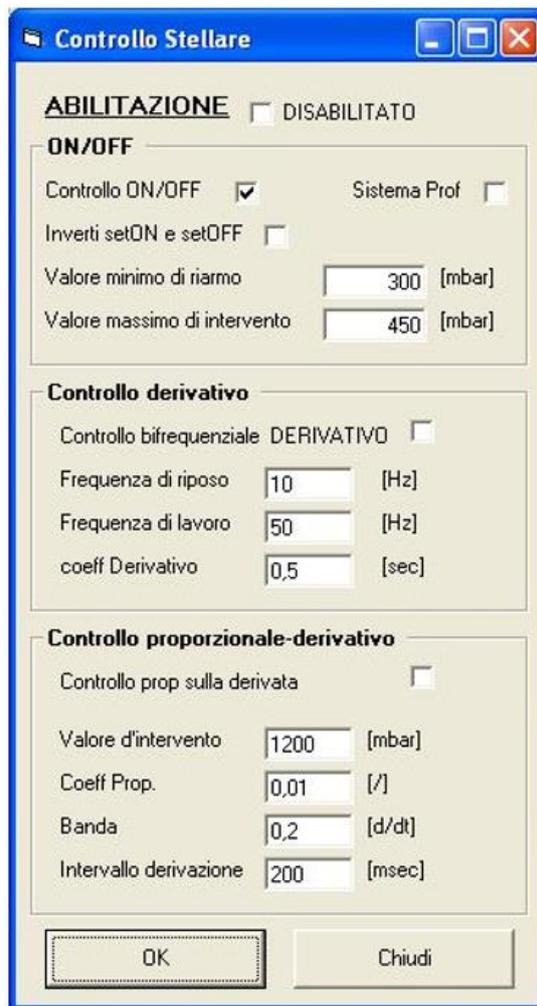


Fig. 79: Interfaccia ausiliaria dedicata al controllo della valvola stellare.

Come si può osservare dalla figura, è possibile scegliere una delle seguenti modalità di regolazione:

- Controllo ON/OFF
- Controllo derivativo
- Controllo proporzionale-derivativo

Tutte e tre le modalità di regolazione si basano sul segnale di pressione PL letto dal Cerabar installato a monte della valvola stellare. Prima di andarle a descriverle singolarmente, è bene notare che, indipendentemente dalla modalità di regolazione selezionata, il sistema di controllo ferma la valvola stellare se la pressione PL supera il valore massimo impostato nell'interfaccia principale alla voce "Pressione di blocco stellare". In maniera analoga, se la pressione dovesse continuare a salire e superare anche il valore di soglia "Pressione di blocco impianto", viene chiusa anche la valvola di sicurezza EVAC, interrompendo l'accesso di aria compressa nel circuito di trasporto.



Fig. 80: Interfaccia principale – valori della pressione di fermo impianto e blocco stellare.

In Tab. 10 sono riportate le principali variabili utilizzate nel software durante la regolazione, mostrando la relativa parte di interfaccia grafica e descrivendone brevemente il significato.

Variabile software	Interfaccia grafica	Descrizione
vp(12)	Cerabar <input type="text" value="0.64"/> bar	Valore di pressione PL letta dal Cerabar installato a monte della valvola stellare
derivata		Valore della derivata della Pressione PL ($\Delta PL/\Delta t$)
PressioneLIMITE	Pressione di blocco Impianto <input type="text" value="2200"/> mbar	Valore di pressione oltre il quale il sistema di controllo blocca l'intero impianto.
stopStar	Pressione di blocco stellare <input type="text" value="1500"/> mbar	Valore di pressione oltre il quale il sistema di controllo arresta la valvola stellare
MAXPressStar	Valore massimo di intervento <input type="text" value="450"/> [mbar]	In modalità On/Off, valore di pressione superato il quale si arresta la valvola stellare
MINPressStar	Valore minimo di riarmo <input type="text" value="300"/> [mbar]	In modalità On/Off, valore di pressione al di sotto del quale si riaccende la valvola stellare
freqdown	Frequenza di lavoro <input type="text" value="50"/> [Hz]	In modalità di regolazione derivativa, frequenza di lavoro dell'Inverter della valvola stellare
frequp	Frequenza di riposo <input type="text" value="10"/> [Hz]	In modalità di regolazione derivativa, frequenza di riposo dell'Inverter della valvola stellare
intprop	Valore d'intervento <input type="text" value="1200"/> [mbar]	Valore di soglia della pressione oltre il quale inizia la regolazione di tipo proporzionale-derivato, quando selezionata.
bandaprop	Banda <input type="text" value="0.2"/> [d/dt]	Valore di soglia per la derivata della pressione, oltre il quale inizia la regolazione proporzionale-derivativa, quando selezionata.
kprop	Coeff Prop. <input type="text" value="0.01"/> [1/]	Coefficiente di proporzionalità con cui viene eseguita la regolazione

		proporzionale-derivativa, quando selezionata.
regOnOff	Controllo ON/OFF <input checked="" type="checkbox"/>	Bit che indica se è stata selezionata la modalità di regolazione On/Off
controllo_invertito	Inverti setON e setOFF <input type="checkbox"/>	Bit che indica se è stata selezionata la modalità di regolazione On/Off con i due valori di soglia invertiti.
controllo_prof	Sistema Prof <input type="checkbox"/>	Bit che indica se è stata selezionata la modalità di regolazione On/Off di tipo "Sistema Prof".
STELLAREDER	Controllo bifrequenziale DERIVATIVO <input type="checkbox"/>	Bit che indica se è stata selezionata la modalità di regolazione di tipo derivativo
Prop_der	Controllo prop sulla derivata <input type="checkbox"/>	Bit che indica se è stata selezionata la modalità di regolazione proporzionale-derivativa

Tab. 10: Principali variabili impiegate nella regolazione della valvola stellare.

Viene ora mostrata e commentata la parte di codice, scritta nell'ambiente di sviluppo Visual Basic 6.0, relativa la regolazione della valvola stellare. Anche nel seguito, il codice sarà sempre riportato nella parte sinistra del testo, di colore blu, mentre il commento sulla destra, in nero.

<pre> If vp(12) > (PressioneLIMITE / 1000) Then cmdStartStellare.Enabled = False cmdStopStellare.Enabled = False Form15.StartStellareTR.Enabled = False Form15.StopStellareTR.Enabled = False cmdStartTot.Enabled = True attuatore(3) = 0 Label4.Caption = "STATO STELLARE: OFF" ARIAON = False cmdStopTot.Enabled = False cmdStartTot.Enabled = True attuatore(13) = 0 Label72.Caption = "ARIA IN LINEA: OFF" Call ScriviWago ChkREG.Enabled = False ChkREG.Value = 0 REGSTAR = False STELLAREDER = False </pre>	<p>Se la pressione PL è maggiore della Pressione di blocco Impianto</p> <p>Disabilito i pulsanti di comando della valvola stellare</p> <p>Fermo la valvola stellare</p> <p>Disabilito il pulsante di fermo impianto</p> <p>Abilito il pulsante di avviamento impianto</p> <p>Chiudo la valvola dell'aria EVAC</p> <p>Aggiorno lo stato degli attuatori</p> <p>Disabilito tutte le modalità di regolazione della valvola stellare</p>
--	--

End If

If vp(12) > (stopStar / 1000) Then	Se la pressione PL è maggiore della Pressione di blocco stellare
cmdStartStellare.Enabled = True	Abilito il pulsante di comando stellare
cmdStopStellare.Enabled = False	Disabilito il pulsante di arresto stellare
Form15.StartStellareTR.Enabled = True	
Form15.StopStellareTR.Enabled = False	
attuatore(3) = 0	Fermo la valvola stellare
Label4.Caption = "STATO STELLARE: OFF"	
End If	

Come mostrato nello script riportato di seguito, per ogni modalità di regolazione è stata creata un apposita funzione, che esegue ciclicamente i propri controlli nel momento in cui viene attivata, dall'interfaccia ausiliaria della valvola stellare.

If STELLAREON = True Then	Se la valvola stellare è attiva
If REGSTAR = True Then	Se è stata selezionata una delle modalità di regolazione
If regOnOff = True Then	Se è stata selezionata la regolazione On/Off
If controllo_prof = True Then	in modalità "Sistema Prof"
Call correzione_prof	Lancio la funzione "correzione_prof"
Else	
Call ON_OFF	Altrimenti lancio la funzione "ON_OFF"
End If	
End If	
If STELLAREDER = True Then	Se invece è stata selezionata la regolazione derivativa
Call bifreq	Lancio la funzione "bifreq"
If Prop_der = True	Se invece è stata selezionata la regolazione proporzionale-derivativa
Then Call propder	Lancio la funzione "propder"
End If	
End If	

CONTROLLO ON/OFF

La regolazione On/Off è una regolazione a due posizioni, effettuata sulla base di due valori di soglia, il "Valore minimo di riarmo" ed il "Valore massimo di intervento", impostabili nell'interfaccia ausiliaria dedicata alla valvola stellare. Durante il dosaggio, l'atomizzato di barbotina scende dalla stellare e cade all'interno del condotto di trasporto, andando ad ostruirlo. La pressione dell'aria comincia quindi a salire, a causa della diminuzione della sezione di passaggio.

Con la modalità di regolazione On/Off, quando la pressione PL raggiunge il "Valore massimo di intervento" si interviene andando a fermare la valvola stellare. Una variazione di questo

valore comporta un cambiamento nel quantitativo di materiale introdotto nella tubazione, per cui anche le dimensioni del tappo che andrà a formarsi dipenderanno da questo parametro. Negli istanti successivi allo stop della rotocella la pressione continua a salire, finché non sarà sufficientemente elevata da spingere via il tappo appena creatosi.

Una volta partito il tappo, la pressione diminuisce rapidamente e quando scende al di sotto del “Valore minimo di riarmo” il sistema di controllo riaccende la valvola stellare, così da introdurre nuovamente il materiale per il tappo successivo.

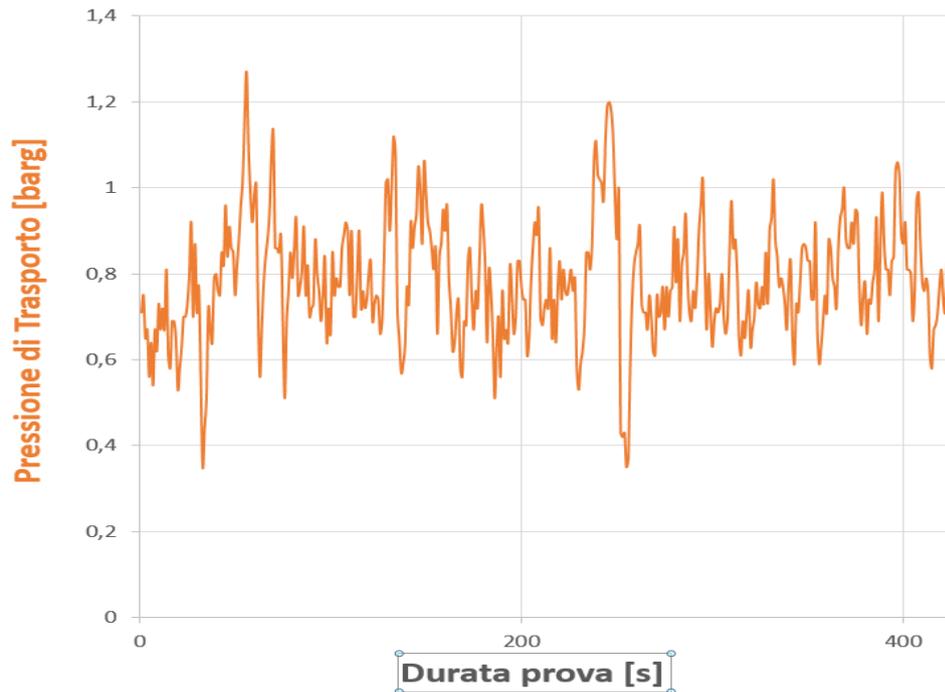


Fig. 63: Andamento della pressione PL a monte della valvola stellare in funzione del tempo.

Facendo riferimento al grafico in Fig. 63, il valore di picco della pressione ci mostra quindi indicativamente il momento in cui il tappo è partito. Sperimentalmente si è osservato che questo valore di picco, seppur le condizioni operative siano costanti, varia di volta in volta, restando comunque compreso in un determinato range. Si è inoltre notato che in alcuni casi, dopo l’arresto della stellare, il tappo di atomizzato non riesce a partire. In questi casi, anche spingendosi a valori di pressione piuttosto elevati, il materiale solido rimane bloccato all’interno della tubazione in prossimità della rotocella. Per questa ragione è preferibile impostare un valore di “Pressione di blocco impianto” non troppo elevato. Se infatti il tappo non è partito quando ci si aspettava dovesse partire, difficilmente lo farà in seguito grazie ad aumento di pressione, ed è perciò consigliabile chiudere la valvola di sicurezza dell’aria EVAC evitando delle sollecitazioni meccaniche eccessive alle tubazioni del circuito. Una volta interrotto l’afflusso di aria compressa in linea, la pressione diminuirà lentamente, per via

dei trafilamenti legati alla stellare. Un'altra peculiarità emersa dai test sperimentali è che il tappo che non era riuscito a partire in precedenza, in alcuni casi si sblocca proprio durante questa fase successiva alla chiusura dell'aria. È plausibile che durante la fase di dosaggio il materiale solido si sia compattato molto e sotto la spinta dell'aria si sia come aggrappato alle pareti della tubazione, riduce fortemente la sua permeabilità all'aria ed opponendo grande resistenza. Al diminuire della pressione le particelle allentano la loro coesione e tendono a staccarsi dalle pareti, rendendo così possibile il trasporto pneumatico. Nel seguito è riportato lo script della funzione che esegue la regolazione On/Off.

Private Function ON_OFF()

If regOnOff = True Then	Se è stata selezionata la regolazione On/Off
If controllo_invertito = False Then	Se non è stato selezionato in controllo invertito
If vp(12) > (MAXPressStar) / 1000) Then	Se la pressione PL è maggiore del Valore massimo di intervento
cmdStartStellare.Enabled = True	Abilito il pulsante di comando stellare
cmdStopStellare.Enabled = False	Disabilito il pulsante di arresto stellare
attuatore(3) = 0	Fermo la valvola stellare
Form1.Label4.FontBold = False	
Label4.Caption = "STATO STELLARE: OFF"	
sopralimite = True	Alzo il bit di pressione oltre al limite
Call ScriviWago	Aggiorno lo stato degli attuatori
ElseIf vp(12) < (MINPressStar) / 1000) Then	Se la pressione PL è minore del Valore minimo di riarmo
cmdStartStellare.Enabled = False	Disabilito il pulsante di comando stellare
cmdStopStellare.Enabled = True	Abilito il pulsante di arresto stellare
attuatore(3) = 64	Accendo la valvola stellare
Form1.Label4.FontBold = True	
Label4.Caption = "STATO STELLARE: ON"	
sopralimite = False	Abbasso il bit di pressione oltre al limite
Call ScriviWago	Aggiorno lo stato degli attuatori
End If	
End Function	

La regolazione On/Off in cui si è stata selezionata anche la voce "Inverti setOn e setOff" si comporta in maniera analoga alla regolazione On/Off appena esaminata, soltanto che nella logica di regolazione inverte i due valori di soglia.

CONTROLLO DERIVATIVO

Nella regolazione di tipo derivativo la frequenza di alimentazione della valvola stellare può assumere due differenti valori, impostabili dall'interfaccia ausiliaria, relativi alle fasi di riposo e di lavoro. In questo caso quindi, a differenza di quanto avviene nella regolazione On/Off, invece di interrompere l'alimentazione della stellare si riduce la sua velocità di rotazione. L'arresto della rotocella avviene soltanto se la pressione supera il valore della "Pressione di blocco stellare". La regolazione in frequenza di riposo e frequenza di lavoro avviene sulla base della pendenza della curva di pressione, confrontando istante per istante il valore della derivata della pressione con un valore di riferimento impostato dall'utente.

Di seguito si riporta lo script della funzione che esegue la regolazione derivativa.

Private Function bifreq()

If vp(12) > (stopStar / 1000) Then

cmdStartStellare.Enabled = True
cmdStopStellare.Enabled = False
Form1.Label4.FontBold = False
Label4.Caption = "STELLARE OFF"
attuatore(3) = 0

Call ScriviWago

Else

If derivata < 0 Then

If derivata < -parametro Then

Hz = freqdown

Call ScriviWago

Else

Hz = frequp

Call ScriviWago

End If

Form1.txtHz.text = Hz

End If

End If

End Function

Se la pressione PL è maggiore della Pressione di blocco stellare

Abilito il pulsante di comando stellare

Disabilito il pulsante di arresto stellare

Fermo la valvola stellare

Aggiorno lo stato degli attuatori

Se la derivata della pressione PL è negativa

ed è minore di un determinato coefficiente angolare

Abbasso la frequenza dell'Inverter al valore di

Frequenza di riposo

Aggiorno lo stato degli attuatori

Altrimenti

Imposto la frequenza dell'Inverter al valore di

Frequenza di lavoro

Aggiorno lo stato degli attuatori

CONTROLLO PROPORZIONALE-DERIVATIVO

La regolazione di tipo proporzionale-derivativo interviene quando la pressione PL è maggiore del “Valore d’intervento” e si verificano variazioni superiori alla “Banda”. Il sistema di controllo aggiorna quindi il valore della frequenza di alimentazione della valvola stellare tramite la seguente relazione:

$$Hz = Hz' + K \Delta P / \Delta t$$

K è il coefficiente di proporzionalità, ΔP è la variazione discreta di pressione valutata nell’intervallo di tempo discreto Δt .

Nell’interfaccia ausiliaria è pertanto richiesto di specificare:

- Valore di soglia d’intervento
- Coefficiente proporzionale
- Banda (ampiezza massima tollerabile di $\Delta P / \Delta t$)
- Intervallo di derivazione Δt

Anche in questo caso si riporta lo script della funzione che esegue la regolazione proporzionale-derivativa.

Private Function propder()

```
If vp(12) >= (intprop / 1000) Then      Se la pressione PL è maggiore del Valore
                                        d’intervento
If derivata1 > Abs(bandaprop) Then      Se il valore assoluto della derivata della pressione è
                                        maggiore del coefficiente angolare Banda
Hz = Hz + kprop * derivata1            Imposto la frequenza dell’Inverter sulla base della
                                        relazione proporzionale-derivativa
Call ScriviWago                        Aggiorno lo stato degli attuatori
End If
Form1.txtHz.text = Hz
End If
End Function
```

Oltre alle regolazione On/Off, derivativa e proporzionale-derivativa, è stata implementata un’altra tipologia di controllo, denominata “Sistema Prof”. Questo sistema può essere classificato come una regolazione di tipo On/Off, in cui si arresta la valvola stellare nel momento in cui la pressione PL supera un valore di soglia e la si riaccende quando la pressione torna a calare ed è in modulo inferiore ad un valore di riferimento.

Con questo sistema si vuole evitare di andare ad alimentare la rotocella a causa di piccole oscillazioni della pressione dopo che questa ha superato il valore di soglia, così da assicurarsi

che il tappo di atomizzato sia effettivamente partito prima di alimentare nuovamente prodotto in linea.

Private Function correzione_prof()

```
If cresco = True Then
If vp(12) > intprop / 1000 Then
cmdStartStellare.Enabled = True
cmdStopStellare.Enabled = False
Form1.Label4.FontBold = False
Label4.Caption = "STATO STELLARE: OFF"
attuatore(3) = 0
Call ScriviWago
End If
Else
If derivata1 > Abs(bandaprop) Then

cmdStartStellare.Enabled = False
cmdStopStellare.Enabled = True
attuatore(3) = 64
Form1.Label4.FontBold = True
Label4.Caption = "STATO STELLARE: ON"
Call ScriviWago
End If
End If
End Function
```

Se la pressione PL sta aumentando ed è maggiore del Valore d'intervento Abilito il pulsante di comando stellare Disabilito il pulsante di arresto stellare

Fermo la valvola stellare
Aggiorno lo stato degli attuatori

Se il valore assoluto della derivata della pressione è maggiore del coefficiente angolare Banda Disabilito il pulsante di comando stellare Abilito il pulsante di arresto stellare Accendo la valvola stellare

Aggiorno lo stato degli attuatori

Conclusioni

Con il presente lavoro di tesi si è voluto dimostrare come il trasporto pneumatico in fase densa dell'atomizzato di barbottina rappresenti una valida alternativa ai sistemi di trasporto a nastri, attualmente utilizzati nel campo dell'industria ceramica.

Grazie a questa soluzione ad alta innovazione tecnologica, è infatti possibile risolvere i problemi connessi all'impiego dei nastri trasportatori, primo tra tutti quello della dispersione nell'ambiente di lavoro di polveri sottili contenenti silice libera cristallina, che compromettono la salubrità dell'aria e mettono a serio rischio la salute dei lavoratori esposti. Per una loro applicazione su scala industriale, i sistemi di trasporto pneumatici devono necessariamente essere in grado di movimentare una portata di atomizzato di barbottina paragonabile a quella dei nastri trasportatori, garantendo l'integrità del prodotto ed evitando una sua eccessiva essiccazione o umidificazione.

Con lo scopo di individuare le condizioni operative ottimali, è stato progettato e realizzato un impianto sperimentale per il trasporto pneumatico in fase densa.

Numerosi test sono stati eseguiti su questo impianto, e per la prima volta si è riusciti a trasportare pneumaticamente l'atomizzato di barbottina senza danneggiarlo.

I risultati ottenuti hanno mostrato che per trasportare con successo questo tipo di materiale è necessario lavorare con rapporti di miscela sufficientemente elevati. In questa maniera è infatti possibile limitare la velocità dell'aria e quella del solido, tra loro strettamente correlate, che sono la causa del danneggiamento del materiale. Operando con una portata d'aria molto inferiore a quella del solido, è inoltre possibile minimizzare la variazione di umidità del prodotto dovuta all'interazione con il mezzo portante.

L'impianto sperimentale è stato impiegato anche per determinare i parametri caratteristici dell'atomizzato di barbottina, quali diametro equivalente della particella sferica, coefficiente di attrito in rettilineo e coefficiente di attrito in curva. La conoscenza di questi parametri è stata necessaria per poter progettare un impianto su scala industriale con il software simulativo TPSim Win, che si è dimostrato un'eccellente strumento nella definizione del lay-out, nella scelta del diametro delle tubazioni e del rapporto di miscela ottimali.

Grazie al TPSim Win è stato quindi possibile individuare una configurazione impiantistica in grado di assicurare la stabilità del trasporto pneumatico, garantendo l'integrità del prodotto ed allo stesso tempo limitando il consumo energetico.

Bibliografia

- [1] D. Mills – Pneumatic Conveying Design Guide - Elsevier Butterworth-Heinemann (2004).
- [2] M. Weber – La Tecnica del Trasporto pneumatico ed idraulico – Edizioni Tecniche (1974).
- [3] Indagini Statistiche sull'Industria Italiana – Confindustria ceramica (2016).
- [4] J.M. Hughes, H. Weill, R.J. Rando, R. Shi, A.D. McDonald, J.C. McDonald, Cohort mortality study of North American industrial sand workers. II. case-referent analysis of lung cancer and silicosis deaths, *Ann. Occup. Hyg.* 45 (3) (Apr, 2001) pp. 201-207.
- [5] N. Başaran, M. Shubair, U. Ündeğer, H. Canpınar, A. Kars, Alterations in immune parameters in foundry and pottery workers, *Toxicology* 178 (2) (2 Sep, 2002) 81–88.
- [6] A. Bianchini, M. Pellegrini, D. Peta, C. Saccani, Economic evaluation of investments for workplace safety, *Chem. Eng. Trans.* 36 (2014) 49-54.
- [7] A. Bianchini, F. Donini, M. Pellegrini, C. Saccani, M. Fanelli, Effective implementation measurability in a health and safety management system, *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems - Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL, 2015*, pp. 3191-3199 (ISBN: 978-113802879-1).
- [8] <http://www.chimdocet.it/solido/file3c.htm>.
- [9] Malattie dell'apparato respiratorio. Servizio di Medicina Preventiva dei Lavoratori e di Fisiopatologia Respiratoria. <http://pacs.unica.it/biblio/fisiopatologia/fisiopatologia8.pdf>
- [10] M. Finkelstein, Silica, Silicosis, and Lung Cancer: a Risk Assessment, *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 38, 2000, pp. 8-18.
- [11] Quarry&construction. Esposizione dei lavoratori a silice libera cristallina respirabile.
<http://www.quarryandconstructionweb.it/rubriche/collaborazioni/esposizione-dei-lavoratori-a%20silice-libera-cristallina-respirabile.htm>
- [12] C. Saccani, A. Bianchini, M. Pellegrini, Environmental impact reduction in the ceramics industry: conveying parameters control for atomized slip pneumatic transport, *International Conference on storing, handling and transporting bulk – Bulk Europe 2008, Prague, 11-12 September 2008, Czech Republic, 2008*.
- [13] A. Bianchini, M. Pellegrini, C. Saccani, Advanced technology in spray-dried ceramic slip conveying: design, process simulation and test facility, *Powder Technology*, vol. 283, 2015, pp. 113-119.

- [14] N.J. Mainwaring, A.R. Reed, Permeability and Air Retention Characteristics of Bulk Solid Materials in Relation to Modes of Dense-Phase Pneumatic Conveyor Performance, *Bulk Solids Handling*, Vol. 7 (1987) 415-425.
- [15] M.G. Jones, D. Mills, Product Classification for Pneumatic Conveying, *Powder Handling and Processing*, 1990 117-122.
- [16] C. Saccani, C. Panciroli, C. Ligabue, Advanced pneumatic conveying test plant for solid characterisation, *Powder Handling and Processing*, vol. 13, 2001, pp. 295-299.
- [17] C. Saccani, Determinazione delle grandezze caratteristiche dei trasporti pneumatici mediante un nuovo metodo di calcolo step-by-step, *Impiantistica Italiana*, 1990.
- [18] C. Saccani, Experimental determination of solid speed in pneumatic conveying, *Bulk Solids Handling*, vol. 12, n° 1, Trans Tech Publication, Germany, Feb, 1992, N°1.
- [19] C. Saccani, A new simulation program for designing pneumatic conveying plants, *Bulk Solids Handling*, vol. 13, Trans Tech Publication, Germany, Feb, 1993, N°1.
- [20] C. Saccani, Solid Speed and Pressure Loss in Pneumatic Conveying Plants: Simulation and Experimental Measurements, *Bulk Solids Handling*, vol. 16, Trans Tech Publication, Germany, Jul-Sep, 1996, N°3.
- [21] C. Saccani, An advanced simulation algorithm for gas-solid and gas-liquid conveying plant analysis, *Bulk Solid Handling*, vol. 25, Trans Tech Publication, Germany, Jul-Aug, 2005, N°4.
- [22] C. Saccani, TPSimWin: an advanced simulation algorithm for gas - solid and gas - liquid conveying plants analysis, 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa Sep, 2004, pp. 22-24, Italy.
- [23] A. Bianchini, C. Saccani, M. Simoni, Dense phase pneumatic conveying for atomized slip in the ceramics industry: Pilot plant design and experimental tests, *Powder Technology*, vol. 355, 2019, pp. 495-503.
- [24] Spiraxsarco. Valvole di controllo.
<https://beta.spiraxsarco.com/global/it-IT/products/control-systems/control-valves>
- [25] Endress+Hauser. Misuratori di temperatura.
<https://www.it.endress.com/it/panoramica-strumentazione-da-campo/Misura-temperatura>
- [26] C. Saccani, M. Pellegrini, Plant design for atomized slip pneumatic conveying: environmental impact reduction in the ceramics industry avoiding product wear and fragmentation, International Conference on storing, handling and transporting bulk – Bulk Europe 2008, Glasgow, Sep, 2010, Scotland, 2010.
- [27] C. Saccani, A. Bianchini, M. Pellegrini, M. Simoni, Designing of atomized slip pneumatic conveying plant in ceramic industry by a simulator and experimental tests, Brescia, XXIV Summer School Francesco Turco, 2019. (articolo in stampa).

