

**SUPSI**

# Sviluppo di un alimentatore polveri per DED a doppio materiale

---

Studente  
**Luca Balerio**

Relatore  
**Ivan Brugnetti**

---

Correlatore  
**Federico Mazzucato**

---

Committente  
**Kugler Bimetal SA**

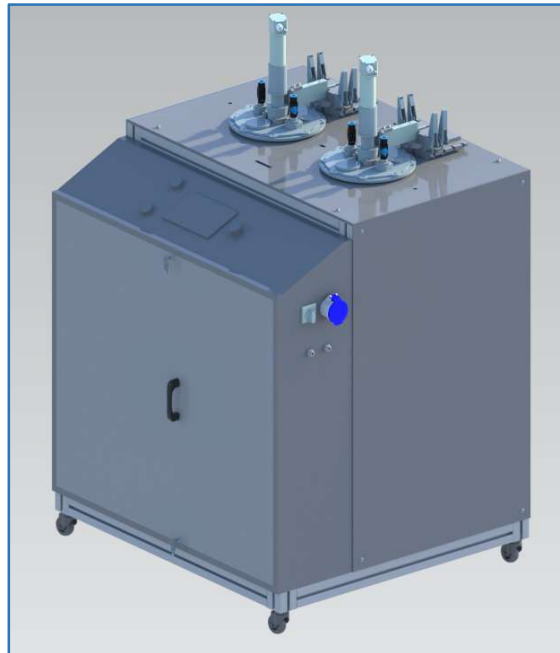
---

Corso di laurea  
**Ingegneria Meccanica**

Codice progetto  
**C10392**

---

Anno  
**2021**





## Indice generale

<b>1.1 Stato dell'arte</b>	<b>14</b>
1.1.1 Processo DED (Direct Energy Deposition)	14
1.1.2 Tipologie di polveri	15
1.1.3 Powder feeder	15
<b>2.1 Quaderno dei compiti</b>	<b>17</b>
2.1.1 Scopo della macchina	17
<b>2.2 Specifiche</b>	<b>17</b>
2.2.1 Funzioni	17
2.2.2 Prestazioni	18
2.2.3 Limiti	20
2.2.4 Interfacciamento	21
2.2.5 Informazioni aggiuntive del cliente	21
<b>3.1 Analisi e valutazione Varianti</b>	<b>22</b>
3.1.1 Metodo di valutazione	22
<b>3.2 Supporto/fissaggio alimentatori (funzione 1)</b>	<b>22</b>
3.2.1 Varianti	23
3.2.2 Valutazione varianti	23
<b>3.3 Supporto/fissaggio componenti di comando e circuiti (funzione 2)</b>	<b>24</b>
<b>3.4 Ergonomia del posizionamento degli alimentatori (funzione 3)</b>	<b>24</b>
3.4.1 Varianti	25
3.4.2 Valutazione varianti	26
<b>3.5 Movimentazione delle polveri all'interno delle tramogge (funzione 4)</b>	<b>26</b>
<b>3.6 Apporto del Gas (funzione 5)</b>	<b>26</b>
<b>3.7 Trasporto delle polveri (funzione 6)</b>	<b>28</b>
<b>3.8 Ricarica delle polveri (funzione 7)</b>	<b>28</b>
<b>3.9 Regolazione della portata di polvere (funzione 8)</b>	<b>29</b>
<b>3.10 Miscelazione delle due polveri (funzione 9)</b>	<b>29</b>
3.10.1 Varianti	30
3.10.2 Valutazione varianti	31
<b>3.11 Comando e Controllo (funzione 10)</b>	<b>32</b>
<b>3.12 Scarico (funzione 11)</b>	<b>33</b>

<b>3.13 Cassa morfologica</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Disegno di concetto</b>	<b>36</b>
<b>5.1 Progettazione</b>	<b>38</b>
5.1.1 Progettazione Funzione 1	38
5.1.2 Progettazione Funzione 2, 5 e 10	40
5.1.3 Progettazione Funzione 9	49
5.1.4 Geometria raccordo e zona di miscelazione definitiva	54
5.1.5 Simulazione Fluidodinamica (CFD)	59
5.1.6 Progettazione Funzione 3	75
<b>6.1 Soluzione sviluppata</b>	<b>76</b>
6.1.1 Principio di funzionamento	78
<b>7.1 Next Steps</b>	<b>79</b>
7.1.1 Sensore infrarosso	79
7.1.2 Simulazioni	79
7.1.3 Chiusura posteriore e cabina controllo	79
7.1.4 Realizzazione Prototipo	80
7.1.5 Disegni costruttivi	80
<b>8.1 Conclusioni</b>	<b>81</b>

## Indice delle figure

Figura 1.1: Schema di processo DED.....	14
Figura 1.2: Tramoggia powder feeder di partenza .....	16
Figura 2.3: Volume di ingombro massimo.....	20
Figura 3.4: Particolare modulo ergonomia AG2019 .....	25
Figura 3.5: Circuito pneumatico sistema a singolo feeder. Cerchiate in rosso le zone in cui è necessario inserire un raccordo per dividere il flusso .....	27
Figura 3.6: Vista particolare sistema di ricarica delle polveri già sviluppato	28
Figura 3.7: Esempio generale di sensore a cella di carico.....	32
Figura 3.8: Assieme struttura con cella di carico già sviluppato .....	32
Figura 3.9: Esempio di sensore ad infrarosse implementabile nella soluzione finale.....	33
Figura 3.10: Rappresentazione posizionamento sulla tramoggia della valvola di spurgo.....	34
Figura 4.11: Disegno di concetto: viste d'assieme macchina.....	36
Figura 4.12: Disegno di concetto: vista particolare funzione 2 .....	36
Figura 4.13: Disegno di concetto: vista particolare zona di miscelazione (funzione 9) .....	37
Figura 5.14: Rappresentazione 3D profilato scelto.....	38
Figura 5.15: Dimensioni sezione profilato scelto.....	38
Figura 5.16: Staffe per il collegamento dei profilati della struttura .....	38
Figura 5.17: Soluzione definitiva per la struttura di supporto della macchina .....	39
Figura 5.18: Dadi di pre-montaggio con forma apposita per essere alloggiati nelle cave dei profilati.....	39
Figura 5.19: Rotelle inserite al di sotto della struttura .....	40
Figura 5.20: Circuito pneumatico aggiornato per l'introduzione della seconda tramoggia.....	42
Figura 5.21: Vista frontale della macchina con cabina di controllo aperta ....	42
Figura 5.22: Elettrovalvola .....	43
Figura 5.23: Riduttore elettropneumatico.....	43
Figura 5.24: Flussimetri.....	43
Figura 5.25: Valvola Manuale .....	44
Figura 5.26: Valvola di non ritorno .....	44
Figura 5.27: Coperchio superiore cabina di controllo .....	45
Figura 5.28: Pannello posteriore con asole per passaggio cablaggi.....	45
Figura 5.29: Indicato con freccia perno di connessione piano inferiore-sportello.....	45
Figura 5.30: Cella di carico utilizzata per monitoraggio portata massica materiale .....	46
Figura 5.31: Struttura per integrazione cella di carico sulla tramoggia .....	47

Figura 5.32: Quotatura 2D cella di carico, riquadrate in rosso le lunghezze di appoggio e di applicazione del carico .....	48
Figura 5.33: Geometria iniziale per raccordo ad Y più zona di miscelazione	49
Figura 5.34: Rappresentazione condotti di alimentazione con relativa inclinazione, lunghezza e diametri.....	51
Figura 5.35: Fattore di perdita KL per angolo di 45° tratto dal formulario di fluidodinamica.....	51
Figura 5.36: Rappresentazione zona di raccordo dei condotti di alimentazione con le grandezze caratteristiche.....	52
Figura 5.37: Rappresentazione schematica per zona di miscelazione con diametro 30mm .....	53
Figura 5.38: Valore del fattore di perdita per allargamento e restringimento di diametro, immagine tratta dal corso di fluidodinamica. ....	53
Figura 5.39: Raccordo ad Y, vista tridimensionale in trasparenza per rendere visibili i condotti interni.....	54
Figura 5.40: Condotto zona di miscelazione, vista tridimensionale in sezione lungo l'asse .....	55
Figura 5.41: Dimensioni standard O-ring tra raccordo ad Y e condotto zona di miscelazione.....	55
Figura 5.42: Miscelatore statico o griglia di miscelazione .....	55
Figura 5.43: Particolare supporto miscelatore statico .....	56
Figura 5.44: Terminale zona di miscelazione .....	56
Figura 5.45: Dimensioni standard O-ring tra Condotto miscelazione e raccordo di uscita .....	56
Figura 5.46: Modalità di fissaggio del raccordo ad Y con zona di miscelazione al piano intermedio.....	57
Figura 5.47: Vista in esploso soluzione finale raccordo ad Y più zona di miscelazione .....	57
Figura 5.48: vista in sezione dell'assieme finale .....	58
Figura 5.49: Raccordi ad innesto rapido con diametro interno 6mm.....	59
Figura 5.50: Particolare angolazione condotti di alimentazione per prima simulazione.....	60
Figura 5.51: Esempio di possibile dominio computazionale in 2D .....	61
Figura 5.52: Intervalli di qualità della mesh sulla base del parametro di Skewness tratti dal corso di CFD.....	61
Figura 5.53: Profilo di velocità flusso turbolento.....	62
Figura 5.54: Profilo di velocità flusso laminare .....	62
Figura 5.55: Interfaccia del calcolatore reperito online .....	67
Figura 5.56: Rappresentazione sezioni migliori per il posizionamento dell'outlet rispetto ad ostacoli .....	67
Figura 5.57: Rappresentazione generica di un flusso a parete .....	68

Figura 5.58: Vista in sezione di assieme raccordo ad Y più zona di miscelazione .....	68
Figura 5.59: Profilo di velocità sul piano di simmetria dei condotti.....	69
Figura 5.60: Linee di flusso delle due sostanze, visibile zona di turbolenza e rimescolamento in corrispondenza del miscelatore statico.....	69
Figura 5.61: Percorso delle particelle del flusso di aria proveniente dall'inlet-2 .....	70
Figura 5.62: Percorso delle particelle del flusso di argon proveniente dall'inlet-1 .....	70
Figura 5.63: Profilo di velocità in corrispondenza del piano di simmetria per la geometria del raccordo con inclinazione di 55° rispetto alla verticale.....	71
Figura 5.64: Setup macchina per monitorare portata della macchina in fase sperimentale.....	72
Figura 5.65: Particolare distanza tappo di ricarica-fondo della macchina (1193 mm).....	75
Figura 5.66: Particolare distanza interfaccia-fondo della macchina (1093 mm) .....	75
Figura 5.67: Macchina completa finale .....	76
Figura 5.68: Vista particolare lato sinistro macchina: visibile vite bombata ed innesto pneumatico a parete .....	76
Figura 5.69: Specifica elementi aggiunti per il corretto funzionamento della macchina .....	77
Figura 5.70: Rappresentazione cavi elettrici in nero e condotti pneumatici in blu, con fori di passaggio sul piano superiore .....	77

## Indice delle tabelle

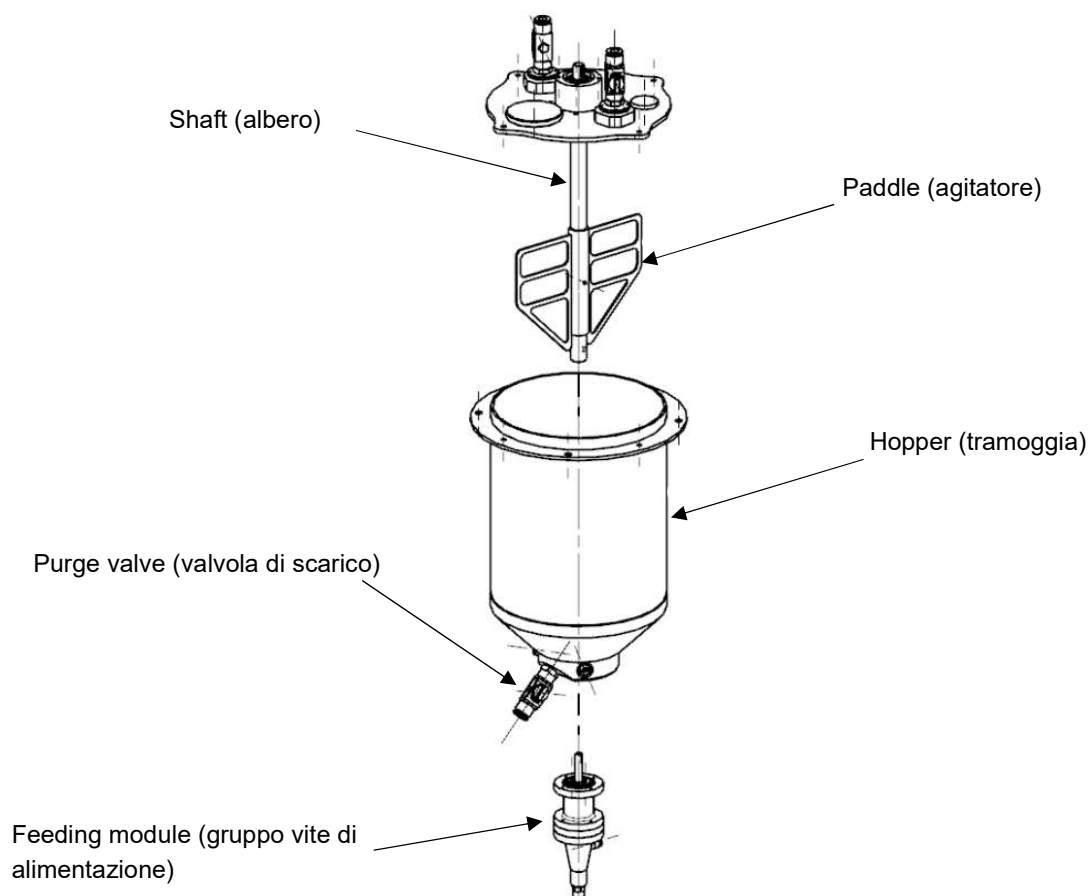
Tabella 2.1: Funzione 1.....	17
Tabella 2.2: Funzione 2.....	17
Tabella 2.3: Funzione 3.....	17
Tabella 2.4: Funzione 4.....	17
Tabella 2.5: Funzione 5.....	17
Tabella 2.6: Funzione 6.....	17
Tabella 2.7: Funzione 7.....	18
Tabella 2.8: Funzione 8.....	18
Tabella 2.9: Funzione 9.....	18
Tabella 2.10: Funzione 10.....	18
Tabella 2.11: Funzione 11.....	18
Tabella 2.12: Quantificazione funzione 5.....	18
Tabella 2.13: Quantificazione funzione 8.....	18
Tabella 2.14: Prestazione 1.....	18
Tabella 2.15: Prestazione 2.....	18
Tabella 2.16: Prestazione 3.....	19
Tabella 2.17: Prestazione 4.....	19
Tabella 2.18: Prestazione 5.....	19
Tabella 2.19: Prestazione 6.....	19
Tabella 2.20: Quantificazione prestazione 1.....	19
Tabella 2.21: Quantificazione prestazione 2.....	19
Tabella 2.22: Quantificazione prestazione 3.....	19
Tabella 2.23: Quantificazione prestazione 4.....	19
Tabella 2.24: Quantificazione prestazione 6.....	19
Tabella 2.25: Limite 1.....	20
Tabella 2.26: Limite 2.....	20
Tabella 2.27: Limite 3.....	20
Tabella 2.28: Quantificazione limite 1.....	20
Tabella 2.29: Quantificazione limite 2.....	20
Tabella 2.30: Quantificazione limite 3.....	20
Tabella 3.31: Varianti funzione 1.....	23
Tabella 3.32: Valutazione delle varianti funzione di supporto/fissaggio alimentatori.....	23
Tabella 3.33: Varianti funzione 3.....	25
Tabella 3.34: Valutazione varianti funzione di ergonomia del posizionamento degli alimentatori.....	26
Tabella 3.35: Varianti funzione 9.....	30
Tabella 3.36: Valutazione varianti funzione di miscelazione delle due polveri .....	31



Tabella 3.37: Caisse Morphologique, in verde le caselle con le varianti scelte .....	35
Tabella 5.38: Quantità e lunghezze dei profilati da acquistare .....	39
Tabella 5.39: Componenti del circuito pneumatico necessarie per l'apporto del gas ed il relativo trasporto delle polveri attraverso la macchina .....	40
Tabella 5.40: Condizioni al contorno di inlet per tre diverse simulazioni.....	66
Tabella 8.41: Risultati e obiettivi raggiunti della soluzione sviluppata .....	81
Tabella 42: Bibliografia e sitografia .....	83

# Glossario

## Assieme generale: Powder feeder



## Abstract

L'obiettivo di questo progetto è la realizzazione di un dispositivo che permetta di ottenere la miscelazione omogenea di polveri metalliche trasportate da un flusso di Argon per il processo di Direct Energy Deposition. La concentrazione di queste polveri deve poter essere modulabile ma al contempo è necessario mantenere una portata costante indipendentemente dal settaggio di concentrazione. Le portate consentite vanno da un minimo di 0 cm<sup>3</sup>/min ad un massimo di 30 cm<sup>3</sup>/min per le polveri e da un minimo di 1.2 l/min ad un massimo di 60 l/min per il flusso di gas. Per la progettazione si sfruttano alcune componenti già presenti sulla macchina: il powder feeder, gli elementi di controllo e comando per una singola tramoggia, la struttura portante ed il sistema di monitoraggio della portata massica in uscita dal feeder. La soluzione si compone di due tramogge identiche per l'inserimento delle due diverse polveri con il relativo sistema di adduzione. Uscite dalle tramogge le due polveri differenti, attraverso condotti pneumatici dal diametro interno di 6mm, giungono in un raccordo dove si uniscono in un condotto di diametro 30mm. Trasportate dal flusso di gas esse raggiungono una griglia di miscelazione la quale, creando notevoli turbolenze e deviazioni dei flussi, permette una miscelazione ottimale delle due polveri. Successivamente al passaggio attraverso il miscelatore statico la sezione del condotto si riduce nuovamente per riportare le polveri in una tubatura di 6 mm di diametro che le condurrà alla testa di deposizione della macchina DED. La struttura progettata funziona correttamente e ciò viene dimostrato da simulazioni CFD, le quali hanno inoltre aiutato ad ottimizzare il dispositivo. La soluzione sviluppata è stata correttamente dimensionata e adempie perfettamente ai compiti assegnatigli; infatti, essa riesce a miscelare omogeneamente le polveri, fornire una portata costante e reagire in modo rapido al cambiamento di concentrazione delle polveri.

# Progetto assegnato

**Sviluppo di un alimentatore polveri per DED a doppio materiale.**

## Persone coinvolte

---

Proponente	Kugler Bimetal SA
Relatore	Ivan Brugnetti
Correlatore	
Studente	Luca Balerio

## Dati generali

---

Codice	C10392
Anno accademico	2020/2021
Semestre	Semestre primaverile
Corso di laurea	Ingegneria meccanica
Tipologia del progetto	Diploma
Stato	Proposta
Confidenziale	SI
Pubblicabile	NO

## Descrizione

---

Il laboratorio ARM della SUPSI ha sviluppato un alimentatore polveri in grado di fornire alle macchine di deposizioni la quantità di polveri metalliche secondo le specifiche necessità richieste dal processo di deposizione 3D - DED.

In un progetto attualmente in corso con la ditta Kugler Bimetal SA è necessario creare dei manufatti utilizzando polveri composte da 2 diversi metalli miscelati secondo specifiche necessità.

Il progetto in questione si ripropone di creare un alimentatore polveri, che sia composto da 2 alimentatori singoli combinati, che possono venire controllati per gestire la miscela dei diversi materiali e fornire alla macchina di deposizione la miscela di polveri corretta, rispettando le specifiche di processo.

## Compiti

---

- Pianificazione del progetto;
- Raccolta dei requisiti (End User Requirements), analisi e stesura del quaderno dei compiti;
- Comprensione del funzionamento del singolo alimentatore;
- Ricerca, analisi, confronto e valutazione delle soluzioni possibili con selezione della variante ottimale;
- Dimensionamenti necessari;
- Sviluppo della soluzione con la definizione di tutti i disegni per le parti da costruire e la selezione dei diversi componenti a commercio;
- Analisi obiettiva della soluzione proposta;
- Stesura di un rapporto completo.

**Obiettivi**

- Analizzare e comprendere le scelte alla base del concetto di alimentatore attuale;
- Comprendere la meccanica e l'attorica necessarie;
- Progettare completamente la meccanica con tutti i componenti ottimizzati e dimensionati;
- Progettare la parte di azionamento e controllo;
- Selezionare i componenti necessari all'attuazione

**Tecnologie**

- Tecniche di progettazione meccanica;
- Elementi di macchine;
- Risorse tecnologiche online/offline;
- CAD e FEM;

**Piano di lavoro**

Descrizione del progetto	✓ Progettazione di un sistema per l'alimentazione di un processo DED con due polveri metalliche differenti.
Partner	✓ Kugler Bimetal SA
Contatti	✓ Ing. Ivan Brugnetti ✓ Ing. Federico Mazzucato
Termini temporali	✓ Inizio progetto: 1/06/2021 ✓ Fine progetto: 3/09/2021 ✓ Presentazione progetto: 15/09/2021
Strumenti utilizzati	✓ Siemens NX 12 ✓ Pacchetto Ansys for student ✓ Excel ✓ Word ✓ Power point

# Capitolo 1

## 1.1 Stato dell'arte

### 1.1.1 Processo DED (Direct Energy Deposition)

I processi a deposizione diretta creano strutture fondendo il materiale metallico, polvere o filo, tramite una fonte di calore concentrata (laser, fascio di elettroni o arco), mentre viene depositato in un punto preciso; a ciascun passaggio della testa di deposizione, tramite un ugello montato su un braccio a più assi, si crea una traccia di materiale rapidamente solidificata; linee adiacenti di materiale compongono gli strati; ulteriore materiale è aggiunto strato per strato. La tecnologia può essere utilizzata come processo di fabbricazione additiva per creare parti 3D con elevata flessibilità progettuale, dove i singoli strati sono depositati uno sopra l'altro, per creare un nuovo prodotto a forma libera. Una geometria complessa tridimensionale richiede o un materiale di supporto o una testa di deposizione multi-asse. Gli elementi che costituiscono una tipica stazione di lavorazione laser per processi di deposizione diretta sono:

- Testa di deposizione;
- Sistema di focalizzazione del fascio laser;
- Sorgente laser;
- Gas schermante per atmosfera inerte nel punto di processo;
- Powder feeder che permette di fornire e trasportare le polveri.

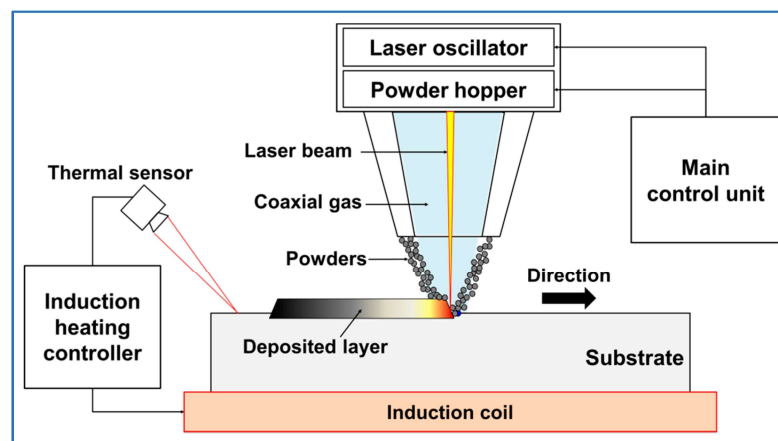


Figura 1.1: Schema di processo DED

I parametri principali del processo che influenzano la qualità del prodotto sono:

- Potenza del laser;
- Velocità di deposizione;
- Dimensione del laser spot;
- Quantità di polveri in uscita dagli ugelli.

Tra i principali costruttori di macchine DED si possono trovare:

- Beam Modulo (200; 400; 800);
- Optomec Lens (450; 850-R, MR-7; Hybrid 20);
- DMG Mori Lasertec (30; 65; 65 hybrid; 4300 hybrid).

### 1.1.2 Tipologie di polveri

Un fattore importante per il processo in questione è la polvere che viene utilizzata per essere processata. Le polveri utilizzate per i processi di additive manufacturing sono principalmente costituite di seguenti materiali: metallo, polimero o ceramica. Per il processo DED sono utilizzate principalmente quelle metalliche ma non qualsiasi tipo di polvere metallica è adatta. Alcuni elementi o leghe presentano infatti alta conducibilità termica e sono difficili da processare; in generale sono adatte tutte quelle polveri composte da materiale che non ossidano in tempi brevi.

Fattori principali da tenere in considerazione:

- Forma delle polveri (forma ottimale sferica);
- Grandezza delle polveri;
- Umidità delle polveri;
- Materiale della polvere;
- Coefficiente d'attrito.

Le polveri usate nel DED vengono normalmente atomizzate tramite gas poiché richiedono bassi livelli di ossigeno. La taglia delle particelle è un fattore molto importante e solitamente varia dai 50 ai 150  $\mu\text{m}$  in modo da ottenere un flusso consistente e costante quando queste vengono trasportate tramite gas. Possono essere utilizzate anche polveri con taglia 20  $\mu\text{m}$  o inferiore ma, queste, comportano elevati rischi di flusso inconsistente e di otturazione dell'ugello.

Analizzando infatti diversi fornitori di polveri metalliche per questo processo si nota che tutti forniscono un range di dimensioni delle particelle più o meno grande, e non una dimensione fissa e specifica. Tra i principali produttori di polveri si trovano:

- Aubert e Duval;
- Sandvik.

Non tutta la polvere eiettata viene processata dal laser, di conseguenza viene utilizzata polvere in eccesso. Nel caso si desiderasse riciclare la polvere in eccesso, risulta necessario catturare quest'ultima quando è ancora in uno stato "pulito".

### 1.1.3 Powder feeder

Il compito dell'adduttore di polveri è quello di permettere il trasporto delle polveri di metallo all'interno della macchina tramite un gas inerte. Per effettuare il trasporto della polvere tramite gas, il feeder fluidifica la polvere metallica all'interno del contenitore apposito in diversi modi:

- Facendo gorgogliare il gas attraverso la polvere;
- Applicando delle vibrazioni ultrasoniche al contenitore;
- Utilizzando degli agitatori dotati di motori.

Il powder feeder in questione sfrutta la terza modalità per l'adduzione delle polveri.

I sistemi di adduzione polveri per DED devono essere pressurizzati utilizzando un gas inerte (argon, azoto, CO<sub>2</sub>, ...) in modo da garantire un'atmosfera priva di ossigeno che altrimenti potrebbe ossidare le polveri.

Il processo DED permette inoltre di "stampare" parti costituite da leghe metalliche, ciò può essere fatto in due modi diversi:

- Preparando una miscela pesata di polveri metalliche da inserire direttamente all'interno della tramoggia del feeder ed eiettando direttamente la miscela dalla testa di deposizione.
- Utilizzando due tramogge contenenti le diverse polveri ed eiettando ogni singola polvere. Facendo unire i diversi flussi contenenti le diverse polveri, si crea la miscela da eiettare dalla testa di deposizione attraverso gli ugelli.

In generale si preferisce realizzare una polvere di lega creando prima una “barretta” costituita dalla lega metallica desiderata, per poi polverizzarla. Questo metodo consente di evitare fenomeni di sedimentazione delle polveri, legati alla differenza del peso specifico delle singole componenti, che si avrebbero nel caso in cui quest’ultime venissero miscelate direttamente sotto forma di polvere.

Sul mercato non si trovano particolari sistemi di adduzione delle polveri che utilizzano due tramogge contenenti due diverse polveri che vengono miscelate una volta uscite dalle tramogge. L’unica applicazione incontrata è il Twin-150 Powder Feeder della Oerlikon Metco, della quale però non sono specificati particolari dati.

Il powder feeder di partenza per lo sviluppo di questo progetto è stato sviluppato dall’ IStePS (Institute of Systems and Technologies for Sustainable Production) e fornisce la quantità di polvere richiesta tramite una vite di alimentazione, posta all’estremità inferiore, sulla base della sua velocità di rotazione. Il dispositivo di alimentazione è progettato per affrontare un’ampia gamma di polveri da trattare, infatti è disponibile con tre moduli di vite di alimentazione per garantire la portata necessaria in base alle diverse esigenze applicative.

I parametri di deposizione della polvere che possono essere impostati sono i seguenti;

- Flusso gravimetrico della polvere;
- Portata volumetrica del gas di protezione nel punto di stampaggio;
- Portata volumetrica del gas per la protezione globale;
- Portata massica delle polveri.

La possibilità di modificare ciascun parametro indipendentemente dagli altri permette di modificare la stechiometria della miscela gas-polvere, la velocità della polvere in uscita e la concentrazione di polvere in uscita, in modo tale da avere i migliori parametri per ogni applicazione.



Figura 1.2: Tramoggia powder feeder di partenza



# Capitolo 2

## 2.1 Quaderno dei compiti

Questo documento presente in formato integrale in allegato si pone lo scopo di definire funzioni, limiti e prestazioni in maniera chiara, permettendo a tutti gli attori di riferirsi in maniera omogenea ed inequivocabile alle specifiche del progetto.

### 2.1.1 Scopo della macchina

Il progetto in questione si ripropone di creare un alimentatore polveri, che sia composto da 2 alimentatori singoli combinati, che possono venire controllati per gestire la miscela dei diversi materiali e fornire alla macchina di deposizione la miscela di polveri corretta, rispettando le specifiche di processo.

## 2.2 Specifiche

### 2.2.1 Funzioni

Tabella 2.1: Funzione 1

FUNZIONE 1	<b>SUPPORTO/FISSAGGIO ALIMENTATORI</b>
DESCRIZIONE	Struttura necessaria per sostenere i due alimentatori di polvere nella posizione ottimale.

Tabella 2.2: Funzione 2

FUNZIONE 2	<b>SUPPORTO/FISSAGGIO COMPONENTI DI COMANDO E CIRCUITI</b>
DESCRIZIONE	Strutture necessarie all'alloggio delle componenti di comando e dei circuiti elettrici/pneumatici, nonché dei cablaggi all'interno dei quali scorrono le polveri.

Tabella 2.3: Funzione 3

FUNZIONE 3	<b>ERGONOMIA DEL POSIZIONAMENTO DEGLI ALIMENTATORI</b>
DESCRIZIONE	Le tramogge necessitano una disposizione nello spazio che sia ergonomica e faciliti l'inserimento della polvere e l'eventuale manutenzione

Tabella 2.4: Funzione 4

FUNZIONE 4	<b>MOVIMENTAZIONE DELLE POLVERI ALL'INTERNO DELLE TRAMOGGE</b>
DESCRIZIONE	Azionamento (motore elettrico) e struttura necessaria a mantenere in movimento la polvere all'interno delle tramogge

Tabella 2.5: Funzione 5

FUNZIONE 5	<b>APPORTO DEL GAS</b>
DESCRIZIONE	Sistema pneumatico che permette l'apporto del gas attraverso la macchina per: carrier gas, shielding gas, ring flow e fluidization gas

Tabella 2.6: Funzione 6

FUNZIONE 6	<b>TRASPORTO DELLE POLVERI</b>
DESCRIZIONE	Modalità di trasporto delle polveri all'uscita della macchina (es: diametro tubi minimo, tipologia di vite...)

Tabella 2.7: Funzione 7

<b>FUNZIONE 7</b>	<b>RICARICA DELLE POLVERI</b>
DESCRIZIONE	Sistema che permetta la ricarica delle polveri all'interno delle tramogge

Tabella 2.8: Funzione 8

<b>FUNZIONE 8</b>	<b>REGOLAZIONE DELLA PORTATA DI POLVERE</b>
DESCRIZIONE	Sistema/valvole per la modulazione della portata delle polveri in uscita dai due diversi alimentatori. Deve essere possibile regolare la quantità delle due polveri.

Tabella 2.9: Funzione 9

<b>FUNZIONE 9</b>	<b>MISCELAZIONE DELLE DUE POLVERI</b>
DESCRIZIONE	Sistema necessario per la miscelazione delle due diverse polveri provenienti da due tramogge separate. Prima di giungere alla testa di deposizione della macchina le polveri devono essere miscelate omogeneamente.

Tabella 2.10: Funzione 10

<b>FUNZIONE 10</b>	<b>COMANDO E CONTROLLO</b>
DESCRIZIONE	Componenti necessarie per il corretto funzionamento e controllo dell'intera macchina tra cui i sensori.

Tabella 2.11: Funzione 11

<b>FUNZIONE 11</b>	<b>SCARICO</b>
DESCRIZIONE	Sistema che garantisca la scarica completa delle tramogge (valvola e gas per eliminazione polvere)

### Quantificazione Funzioni

Tabella 2.12: Quantificazione funzione 5

<b>FUNZIONE 5</b>	<b>APPORTO DEL GAS</b>		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	1.2 l/min	-	60 l/min

Tabella 2.13: Quantificazione funzione 8

<b>FUNZIONE 8</b>	<b>REGOLAZIONE DELLA PORTATA DI POLVERE</b>		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	0 cm <sup>3</sup> /min	-	30 cm <sup>3</sup> /min

## 2.2.2 Prestazioni

Tabella 2.14: Prestazione 1

<b>Prestazione 1</b>	<b>DIMENSIONI POLVERI</b>
DESCRIZIONE	Range di dimensioni delle polveri che possono essere trattate dalla macchina.

Tabella 2.15: Prestazione 2

<b>Prestazione 2</b>	<b>PORTATA GAS DI TRASPORTO</b>
DESCRIZIONE	Range di portate possibili per il gas che trasporta la polvere

Tabella 2.16: Prestazione 3

Prestazione 3	<b>PORTATA DI SHIELDING GAS</b>
DESCRIZIONE	Range di portate possibil per il gas di protezione locale nel punto di stampaggio

Tabella 2.17: Prestazione 4

Prestazione 4	<b>PORTATA DI POLVERE PER SINGOLO MATERIALE</b>
DESCRIZIONE	Portata fornita dalla singola tramoggia, cioè la portata massica di un singolo materiale. Può essere necessario cambiare la tipologia di vite di trasporto e la sua velocità di rotazione. Le velocità di rotazione delle tre tipologie di viti possono andare da 0 rpm a 26.5 rpm

Tabella 2.18: Prestazione 5

Prestazione 5	<b>PRECISIONE</b>
DESCRIZIONE	Rappresenta la precisione della portata di polvere che deve essere mantenuta costante in un determinato intervallo di tempo. Deve essere garantita sia per la portata di polvere che per quella di gas di trasporto. Indica la deviazione dell'avanzamento medio rispetto all'avanzamento impostato o desiderato per l'apporto di polvere

Tabella 2.19: Prestazione 6

Prestazione 6	<b>CAPACITA' TRAMOGGIA</b>
DESCRIZIONE	Ogni singola tramoggia deve garantire una determinata capacità

### Quantificazione Prestazioni

Tabella 2.20: Quantificazione prestazione 1

Prestazione 1	<b>DIMENSIONI POLVERI</b>		
QUANTIFICAZIONE (Diametro)	Minima	Ottimale	Massima
	5 µm	-	200 µm

Tabella 2.21: Quantificazione prestazione 2

Prestazione 2	<b>PORTATA GAS DI TRASPORTO</b>		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	1.2 l/min	-	20 l/min

Tabella 2.22: Quantificazione prestazione 3

Prestazione 3	<b>PORTATA DI SHIELDING GAS</b>		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	1.2 l/min	-	40 l/min

Tabella 2.23: Quantificazione prestazione 4

Prestazione 4	<b>PORTATA DI POLVERE PER SINGOLO MATERIALE</b>		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	0 cm <sup>3</sup> /min	-	30 cm <sup>3</sup> /min

Tabella 2.24: Quantificazione prestazione 6

Prestazione 6	<b>CAPACITA' TRAMOGGIA</b>		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	-	10'000 cm <sup>3</sup>	-

## 2.2.3 Limiti

Tabella 2.25: Limite 1

LIMITE 1	PRESSIONE DI LAVORO
DESCRIZIONE	Pressione dei circuiti pneumatici di lavoro. I componenti devono essere comunque garantiti fino a 6 bar.

Tabella 2.26: Limite 2

LIMITE 2	ALIMENTAZIONE ELETTRICA
DESCRIZIONE	Tensione di alimentazione della rete esterna

Tabella 2.27: Limite 3

LIMITE 3	INGOMBRI
DESCRIZIONE	Volume totale di ingombro della macchina

### Quantificazione limiti

Tabella 2.28: Quantificazione limite 1

LIMITE 1	PRESSIONE DI LAVORO		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	0 bar	-	1 bar

Tabella 2.29: Quantificazione limite 2

LIMITE 2	ALIMENTAZIONE ELETTRICA		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	-	230 V AC/50 Hz	400 V AC/50 Hz

Tabella 2.30: Quantificazione limite 3

LIMITE 3	INGOMBRI		
QUANTIFICAZIONE	Minima	Ottimale	Massima
	-	-	1.44 m <sup>3</sup>

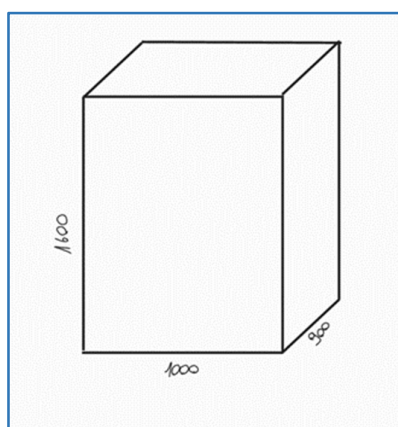


Figura 2.3: Volume di ingombro massimo

## 2.2.4 Interfacciamento

La macchina deve essere controllata manualmente dall'operatore tramite un'interfaccia uomo-macchina (HMI). Allo stesso tempo deve poter essere controllata direttamente dalla macchina di deposizione con segnali analogici compresi tra 0 e 10 V. Questo è necessario per controllare:

- Portata massica di polvere dei due materiali distinti;
- Portata di gas di trasporto;
- Portata di shielding gas.

## 2.2.5 Informazioni aggiuntive del cliente

- Le tipologie di polveri che verranno processate all'interno di questa macchina sono:
  - Ti6Al4A;
  - Inox (in particolare 1.4404 [classificazione AISI: 316L]);
  - Acciai legati (in particolare 1.2344 [classificazione AISI: H13]);
  - Inconel 718.

# Capitolo 3

## 3.1 Analisi e valutazione Varianti

### 3.1.1 Metodo di valutazione

Tramite un metodo quantitativo si effettua un'analisi approfondita di tutte le varianti, ottenendo così in maniera univoca la migliore per ogni funzione. Tuttavia, non tutte le 11 funzioni necessitano un'analisi quantitativa delle possibili varianti ma una semplice analisi e descrizione del loro scopo, dal momento che possono essere mantenute le soluzioni già esistenti, introducendo esclusivamente delle semplici modifiche. La metodologia utilizzata per la valutazione di alcune funzioni può essere definita dai seguenti punti:



- Per ogni funzione da valutare sono stati definiti dei criteri di valutazione;
- Ad ogni criterio viene assegnato un peso (0-5) in base all'importanza, tale valutazione è stata conferita dopo un'attenta analisi. Successivamente, per ogni variante, vengono valutati tutti i criteri assegnando una nota da 0 (importanza minima) a 4 (importanza massima):
  - p=4 -> eccellente;
  - p=3 -> buono;
  - p=2 -> soddisfacente;
  - p=1 -> sufficiente;
  - p=0 -> insufficiente.
- I punti di ogni criterio vengono stabiliti con il prodotto della nota e del relativo peso:  
 $punti = peso * nota$ ;
- Ogni variante ha ricevuto una nota per tutti i criteri di valutazione. La nota è data dalla seguente relazione:  $fattore\ di\ valutazione = \frac{\sum punti}{4 \cdot \sum pesi}$ ;
- Viene effettuata la somma dei prodotti delle note con il rispettivo peso per ogni variante;
- La variante con il valore della somma più elevata è la migliore.

## 3.2 Supporto/fissaggio alimentatori (funzione 1)

Questa funzione si compone della struttura che ha lo scopo di sorreggere nella posizione ideale i due feeder e la componente necessaria alla miscelazione delle due polveri, nonché la cabina contenente i circuiti elettrici e pneumatici con i relativi trasformatori e valvole. La struttura portante già esistente si compone di profilati assemblati e piani orizzontali in alluminio per il posizionamento del singolo feeder; vi sono inoltre rotelle alla base per facilitare lo spostamento della macchina. La nuova struttura dovrà fornire lo spazio necessario al posizionamento delle componenti aggiuntive rispettando i limiti di ingombro stabiliti.

### 3.2.1 Varianti

Tabella 3.31: Varianti funzione 1

	Variante 1 (Profilati)	Variante 2 (Supporto a banco)
<b>FUNZIONE 1</b> SUPPORTO/FISSAGGIO ALIMENTATORI		

#### Variante 1

Questa variante rispecchia quella già esistente e si compone di profilati standard in alluminio assemblati tramite fissaggio a vite. Successivamente si fissano a questi profilati i piani necessari al supporto dei due feeder e dell'organo di miscelazione delle polveri. Sul fondo vengono posizionate 4 rotelle per garantire una facile movimentazione della struttura. Questa soluzione risulta essere principalmente più economica e versatile sulla base delle necessità di spazio. I profilati infatti possono essere acquistati delle dimensioni che si necessitano, e presentano delle apposite guide per il fissaggio di altre componenti.

#### Variante 2

I supporti a banco vengono realizzati su misura in base alle dimensioni desiderate. Le alzatine a colonna sono realizzate in alluminio con supporto asolato e regolabile ed offrono un'ottima stabilità. È un elemento acquistabile secondo le dimensioni ed il numero di piani necessari, al quale però dovranno essere apportate delle modifiche per l'inserimento di tutte le componenti. Soluzione che risulta dunque più costosa e limitante.

### 3.2.2 Valutazione varianti

Tabella 3.32: Valutazione delle varianti funzione di supporto/fissaggio alimentatori

Funzione 1		Variante 1		Variante 2	
Supporto/fissaggio alimentatori	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	gi	pi	gi * pi	pi	gi * pi
Costo	4	3	12	2	8
Versatilità	5	4	20	2	10
Facilità di spostamento	3	4	12	1	3
Stabilità	3	1	3	4	12
Semplicità di fabbricazione	3	3	9	3	9
Somma dei punti	18		56		42
Valutazione tecnica			0,78		0,58

### *Variante scelta: Variante 1*

In seguito ad una valutazione secondo i criteri indicati in tabella sovrastante la soluzione migliore per l'applicazione risulta essere la prima. Questa, infatti, presenta un costo dei componenti inferiore, una facilità di spostamento ideale ed un'ottima versatilità in quanto i profilati si possono assemblare come si desidera al fine di ottenere una solida struttura portante.

## **3.3 Supporto/fissaggio componenti di comando e circuiti (funzione 2)**




Questa funzione risulta essere essenzialmente la cabina di controllo già presente nella macchina. All'interno di questa sono posizionati tutti i componenti che garantiscono il controllo ed il funzionamento del feeder ed il loro supporto è garantito tramite un semplice fissaggio a vite ad un pannello metallico. Gli elementi presenti sono: le valvole del circuito pneumatico per la regolazione di tutti i flussi di gas presenti, il gruppo PLC per il controllo ed il gruppo contenete l'alimentazione, i contatti elettrici e gli interruttori. Per quanto riguarda questa funzione non è necessaria una valutazione di varianti ma solo un'analisi degli elementi necessari per il corretto funzionamento dei due alimentatori di polvere e dell'eventuale miscelatore delle polveri. Le valvole e gli interruttori risulteranno essere le medesime e verranno specificate nella parte di progettazione successivamente alla scelta di tutte le altre funzioni. Il fissaggio di tutte le componenti verrà garantito tramite un fissaggio a vite su apposito supporto metallico.

## **3.4 Ergonomia del posizionamento degli alimentatori (funzione 3)**

Anche per quanto riguarda questa funzioni non vi sono specifiche valutazioni da eseguire ma dipende esclusivamente dagli ingombri che avrà la zona in cui avviene l'unione delle due polveri che si troverà al di sotto delle due tramogge. Infatti, per garantire un'ergonomia adeguata della macchina per la ricarica delle polveri e per una semplice accessibilità in caso di manutenzione, il tappo di apertura superiore delle polveri deve essere garantito ad un'altezza massima di circa 1200 mm. Secondo il 'Modulo ergonomia AG2019' [1], affinché sia garantita una media precisione dell'operatore ed una media visibilità, l'altezza massima di lavoro deve essere di 1195 mm, come indicato in figura 3.4 (immagine alla pagina successiva). In questo caso l'altezza massima di lavoro corrisponde all'altezza del tappo per l'inserimento delle polveri nelle tramogge.

Nel caso in cui questo non sia possibile a causa degli ingombri delle altre componenti e le tramogge vadano poste ad un'altezza superiore di quella indicata precedentemente, sarà possibile valutare l'acquisto di una scaletta mobile a tre gradini da affiancare alla macchina (variante 1), oppure l'aggiunta di una pedana regolabile (variante 2).





POSTURA	MISURA	VALORE (mm)
 <p>ALTA PRECISIONE O ALTA RICHIESTA VISIVA</p>	<p>ALTEZZA PIANO A Regolabile</p> <p>non regolabile</p>	<p>da 1584 a 1053</p> <p>compreso tra 1315 e 1554</p>
 <p>MEDIA PRECISIONE O MEDIA RICHIESTA VISIVA</p>	<p>ALTEZZA PIANO B Regolabile</p> <p>non regolabile</p>	<p>da 1225 a 960</p> <p>1195</p>
 <p>MOVIMENTAZIONE OGGETTI PESANTI E BASSA RICHIESTA VISIVA</p>	<p>ALTEZZA PIANO C Regolabile</p> <p>non regolabile</p>	<p>da 1105 a 867</p> <p>1075</p>
	ALTEZZA SPAZIO PIEDI D	226+ F
	PROFONDITA SPAZIO PIEDI E	210
	PIATTAFORMA REGOLABILE IN ALTEZZA QUANDO IL PIANO OPERATIVO NON SIA REGOLABILE F	265 0

Modulo ergonomia AG2019

Figura 3.4: Particolare modulo ergonomia AG2019

### 3.4.1 Varianti

Tabella 3.33: Varianti funzione 3

	Variante 1 (Scaletta)	Variante 2 (Pedana regolabile)
<p><b>FUNZIONE 3</b> ERGONOMIA DEL POSIZIONAMENTO DEGLI ALIMENTATORI</p>		

#### Variante 1

Una scaletta a tre gradini risulta essere una soluzione semplice, economica e versatile da affiancare alla macchina, dal momento che può essere sfruttata per altri compiti e non solo per la ricarica delle polveri. Di contro però, comporta un notevole aumento degli ingombri totali quando deve essere utilizzata. Tuttavia, una volta usata, può essere richiusa e riposta dove non rischi di intralciare le operazioni di laboratorio.

#### Variante 2

Una pedana regolabile invece si presenta con ingombri più contenuti e maggiore stabilità, ma comporta una versatilità limitata e maggiori difficoltà nella sua movimentazione.

*Nota:* si effettua comunque una valutazione quantitativa di queste due varianti anche se la loro introduzione sarà definita successivamente.

### 3.4.2 Valutazione varianti

Tabella 3.34: Valutazione varianti funzione di ergonomia del posizionamento degli alimentatori

Funzione 3	Peso	Variante 1		Variante 2	
		Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	gi	pi	gi * pi	pi	gi * pi
Costo	3	3	9	3	9
Facilità di movimentazione	4	4	16	2	8
Versatilità	3	3	9	1	3
Stabilità	4	2	8	4	16
Ingombri	5	2	10	3	15
Somma dei punti	19		52		51
Valutazione tecnica			0,68		0,67

#### Variante scelta: Variante 1

Si osserva come dalla valutazione secondo i criteri indicati si ottengono dei risultati quasi coincidenti, questo significa che entrambe le soluzioni potrebbero essere implementate per soddisfare questa funzione dal momento che si compensano l'una con l'altra. Infine, però, la scaletta a tre gradini si rivela la scelta ideale, soprattutto per la molteplicità di compiti che può svolgere.

### 3.5 Movimentazione delle polveri all'interno delle tramogge (funzione 4)

Questa funzione definisce il compito della macchina di mantenere in movimento le polveri una volta che sono state poste all'interno degli Hopper, ed azionare la vite che trasporta le polveri all'uscita delle tramogge sulla base della portata desiderata. Questa funzione era già soddisfatta nel sistema a singola tramoggia e quindi non deve essere nuovamente sviluppata. È possibile mantenere l'azionamento e la struttura già presenti e semplicemente sdoppiarli per applicarli alla seconda tramoggia che ospiterà la seconda tipologia di polvere. Per mantenere in movimento le polveri è presente un motore elettrico collegato tramite un giunto ad un albero, sul quale viene innestato un agitatore. Alla seconda estremità dell'albero è collegata la vite che permette alla polvere di uscire dal fondo della tramoggia con una portata regolabile secondo la sua velocità di rotazione. La struttura è facilmente comprensibile all'interno del capitolo introduttivo 'glossario'.

### 3.6 Apporto del Gas (funzione 5)

Tramite un circuito pneumatico la macchina deve essere in grado di apportare il gas inerte necessario per svolgere le seguenti funzioni:

- **Carrier gas:** rappresenta il gas che ha il compito di trasportare le polveri una volta che escono dalla vite sul fondo della tramoggia; in questo caso i condotti per questo gas devono essere 2, uno per ogni tramoggia. A questo scopo sarà necessario un raccordo a 'T' per duplicare il flusso. Nel caso in cui però la polvere in uscita dalle tramogge non necessiti di gas di trasporto in quanto sfrutti semplicemente la gravità per cadere in un miscelatore, questo flusso di gas verrà mantenuto singolo e cambierà esclusivamente il punto di ingresso. Il nuovo punto di applicazione sarà situato in uscita dal miscelatore per trasportare le due polveri già miscelate in un flusso unico in uscita dalla macchina.

- **Shielding gas:** flusso di gas che dalla macchina in analisi arriva direttamente alla testa di deposizione della macchina DED, ha il compito di proteggere localmente il processo di deposizione delle polveri. Con l'aggiunta del secondo hopper questo circuito non è soggetto a modifiche in quanto non è relativo alle tramogge o alla zona di miscelazione.
- **Ring flow:** flusso di gas che dalla macchina giunge direttamente alla testa di deposizione, ha il compito di creare un ambiente privo di ossigeno nell'intorno del pezzo in produzione. Come per il caso precedente, anche questo flusso non è interessato dalle modifiche dovute all'inserimento della seconda tramoggia.
- **Fluidization gas:** rappresenta il flusso di gas che giunge all'interno delle tramogge, prima della vite che trasporta la polvere in uscita. Ha lo scopo di fluidizzare la polvere e mantenerla in un ambiente privo di ossigeno per evitare l'ossidazione delle particelle metalliche. Questo flusso necessita uno sdoppiamento rispetto al circuito precedente dal momento che le tramogge sono raddoppiate. Anche in questo caso è sufficiente un raccordo a 'T' che consenta l'arrivo del gas ad entrambi gli hopper.
- **Pressure balancing:** flusso di gas atto al bilanciamento delle pressioni all'interno delle tramogge, necessita uno sdoppiamento del suo corso con l'introduzione di un raccordo a 'T' in quanto si hanno due tramogge e non più una.

In ogni caso l'apporto di gas deve soddisfare una portata massima di 60 l/min.

L'immagine 3.5 sottostante illustra il circuito pneumatico già esistente e dedicato ad una singola tramoggia. Con l'introduzione della seconda tramoggia si hanno le aree cerchiato in rosso che stanno ad indicare il punto in cui si deve inserire un novo raccordo. Di conseguenza, dati i nuovi condotti, si dovranno inserire le relative valvole di non ritorno prima dei punti di applicazione dei condotti. Il circuito pneumatico con le nuove disposizioni è presentato nel paragrafo 5.1.2.

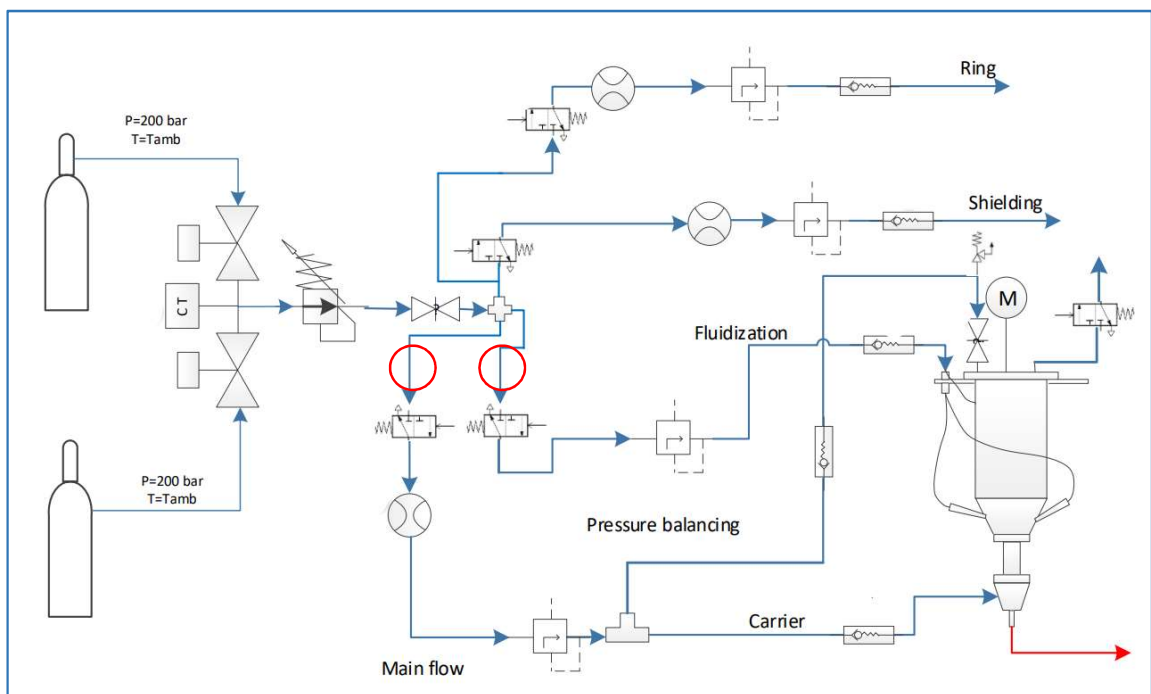


Figura 3.5: Circuito pneumatico sistema a singolo feeder. Cerchiate in rosso le zone in cui è necessario inserire un raccordo per dividere il flusso

### 3.7 Trasporto delle polveri (funzione 6)

Nell'assieme generale deve essere garantito il trasporto delle polveri fino all'uscita dalla macchina. Devono essere trasportate a partire dalle due tramogge, per giungere alla zona di miscelazione e successivamente all'uscita della macchina. In uscita si deve avere una miscela omogenea di due polveri differenti, con le proporzioni desiderate e con flusso costante. Per esempio, il trasporto delle polveri può essere eseguito tramite:

- Carrier gas: in relazione alla funzione 5, il gas può giungere in uscita dalle tramogge o in uscita dalla zona di miscelazione.
- Caduta per gravità: può essere sfruttato il peso proprio delle polveri per farle scivolare verso il basso all'interno di un condotto. Per esempio, dalle tramogge all'organo di miscelazione posto in posizione inferiore.
- Trascinate da un elemento meccanico: nel caso della miscelazione, per esempio, l'avanzamento delle polveri può essere garantito da una vite elicoidale.

La modalità di trasporto che sfrutta un gas inerte come trascinatore si rivela essere la più efficace ed efficiente.

Dal momento che la quantità della miscela di polveri che deve giungere alla testa di deposizione della macchina è la medesima di quando si lavora con una singola polvere, il mezzo di trasporto può essere mantenuto uguale, così come il diametro dei condotti e la quantità di gas necessario. Il diametro dei condotti dovrà subire delle modifiche in prossimità ed in corrispondenza della zona di miscelazione (dipendente da funzione 9).

### 3.8 Ricarica delle polveri (funzione 7)

Questa funzione è svolta dal sistema tappo+Oring situati all'estremità superiore della tramoggia. Rimuovendo il tappo è possibile ricaricare la tramoggia quando la polvere si esaurisce. Questo sistema deve garantire un isolamento in quanto la tramoggia è mantenuta in pressione dal gas per la fluidizzazione delle polveri. Il sistema di ricarica è già sviluppato e già in uso, non necessita alcuna modifica. Nel limite del possibile verrà variata l'altezza rispetto al pavimento del tappo per ottenere una macchina ergonomica al meglio. In relazione alla posizione attuale sarà quindi necessario posizionare l'apertura ad un'altezza inferiore, come analizzato nel paragrafo 3.4.

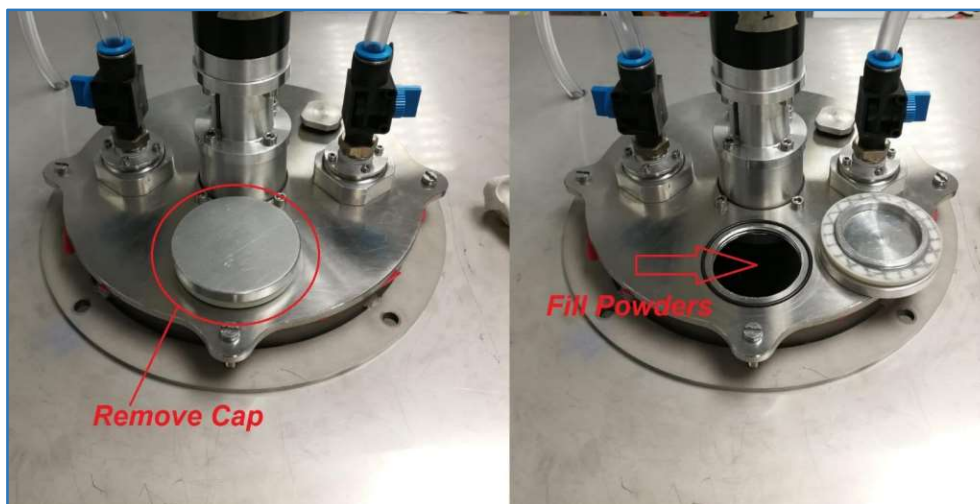


Figura 3.6: Vista particolare sistema di ricarica delle polveri già sviluppato

### 3.9 Regolazione della portata di polvere (funzione 8)

Questa funzione è riferita in particolare alla regolazione della portata delle due polveri miscelate; quindi, si deve sviluppare un sistema in grado di regolare il flusso di polvere proveniente dalla zona di miscelazione. Questo dipende dalla soluzione che si adotterà per la funzione 9. La portata massima richiesta è di 30 cm<sup>3</sup>/min.

Al contrario, il flusso di polvere proveniente dalle due tramogge è gestibile tramite la regolazione della velocità di rotazione della vite che consente alla polvere di uscire. Questa portata dipende quindi dal tipo di polvere, dalle sue dimensioni e dal modulo di vite che si andrà a montare. Sono stati sviluppati tre moduli di vite che possono fornire diversi range di portate:

- HTH module (high throughput module): in grado di distribuire una portata che va da un minimo di 7.3 cm<sup>3</sup>/min fino ad un massimo di 31.7 cm<sup>3</sup>/min (portata massima).
- LTH module (low throughput module): in grado di distribuire una portata che va da un minimo di 2 cm<sup>3</sup>/min fino ad un massimo di 7.3 cm<sup>3</sup>/min.
- ULTH module (ultra-low throughput module): in grado di distribuire una portata che va da un minimo di 0 cm<sup>3</sup>/min fino ad un massimo di 2 cm<sup>3</sup>/min.

Regolando in modo indipendente la portata massica di polvere di ogni singola tramoggia è possibile modulare la composizione finale della polvere secondo le caratteristiche richieste.

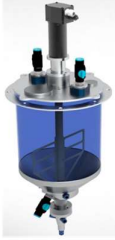
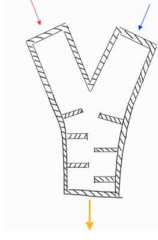
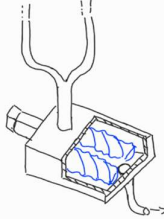
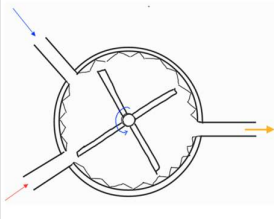
### 3.10 Miscelazione delle due polveri (funzione 9)

A questo punto si deve sviluppare un sistema in grado di miscelare in modo omogeneo le due polveri provenienti dalle due tramogge differenti e trasportarle in uscita dalla macchina. Per determinare una soluzione a questa funzione, si esegue una valutazione di diverse varianti proposte. La miscelazione deve essere omogenea e rapida, dal momento che la combinazione delle polveri e le loro proporzioni possono essere variate anche durante il processo di stampaggio quando la macchina è in funzione. I criteri di valutazione presi in considerazione per la valutazione di queste varianti sono:

- *Rapidità di reazione*: si intende quanto rapidamente, dopo la variazione delle proporzioni delle polveri in uscita dalle tramogge mentre la macchina è in funzione, il miscelatore riesce a fornire una polvere finale con i nuovi rapporti.
- *Miscelazione*: il sistema in esame deve garantire una miscelazione il più omogenea possibile.
- *Costo*: criterio da tenere sempre in considerazione per la valutazione di una variante, importanti variazioni di costo vanno considerate.
- *Influenza sulla portata delle polveri*: affinché il processo di DED avvenga nel migliore dei modi è fondamentale avere una portata della polvere miscelata in uscita dalla macchina modulabile e costante.
- *Semplicità di fabbricazione*: al fine di ridurre i prezzi e i tempi di assemblaggio è necessaria una soluzione semplice.
- *Ingombri*: fattore da valutare in relazione alla funzione 3. Per garantire un'ergonomia corretta evitando l'aggiunta di elementi esterni (scaletta/pedana), il sistema per la miscelazione deve essere sufficientemente compatto soprattutto nella dimensione verticale.
- *Semplicità di manutenzione e pulizia*: il componente deve disporre di una facile manutenzione e pulizia, evitando dunque particolari che possano intrappolare particelle di materiale e risultare difficoltose per la pulizia.

### 3.10.1 Varianti

Tabella 3.35: Varianti funzione 9

	Variante 1 (Tramoggia)	Variante 2 (Raccordo a 'Y' con zona di miscelazione)
<p><b>FUNZIONE 9</b> MISCELAZIONE DELLE DUE POLVERI</p>		
	Variante 3 (Vite elicoidale)	Variante 4 (Miscelatore rotante)
		

#### Variante 1

Come prima variante si propone l'aggiunta di una terza tramoggia come le due già presenti. Con questo sistema le due polveri provenienti dalle tramogge iniziali cadono all'interno di una terza tramoggia posizionata al di sotto delle precedenti e, attraverso un agitatore (paddle), vengono miscelate al meglio per poi proseguire il loro percorso attraverso la vite di alimentazione ed il carrier gas. La mescolatura risulterebbe ottimale, così come la regolarità della portata in uscita. Di contro, la principale problematica si incontra nel tempo di risposta poiché, se venissero variate le proporzioni delle due polveri durante il processo, sarebbe necessario un tempo troppo lungo affinché la polvere in uscita finale abbia la configurazione variata.

#### Variante 2

Questa variante si compone di un raccordo ad 'Y' con sporgenze interne per aumentare le turbolenze e favorire la miscelazione dei due materiali. Le due polveri, in uscita dalle tramogge e trasportate dal gas, vengono fatte convergere all'interno di un unico condotto. Successivamente proseguono per un tratto rettilineo di lunghezza adeguata dove, delle palette dimensionate a dovere, facilitano la miscelazione delle due polveri fino ad ottenere un composto omogeneo che continuerà il suo percorso trasportato dal carrier gas. La modulazione della portata dipende direttamente dalla regolazione che si effettua a livello delle tramogge. Questa variante risulta ottima dal punto di vista della velocità di reazione, degli ingombri, della costanza nella portata e della semplicità, ma presenterebbe difficoltà al momento della pulizia interna. Inoltre, la miscelazione non può essere garantita a priori. Teoricamente può funzionare al meglio ma per ottenere una valutazione oggettiva ed una verifica attendibile sarà necessario effettuare simulazioni CFD al fine di convalidare la miscelazione e lo sviluppo corretto del flusso.

*Nota:* l'immagine presente all'interno della Caisse Morphologique ha esclusivamente uno scopo rappresentativo, le sporgenze interne devono essere modellate con una geometria adeguata.

#### Variante 3

La miscelazione in questo caso è garantita da una doppia vite elicoidale (in blu in Caisse Morphologique tabella 3.35). I due flussi di polveri giungono, cadendo per gravità, all'interno di una di una tramoggia in cui sono presenti due viti elicoidali disposte orizzontalmente che provvedono alla miscelazione ed al

trascinamento del materiale verso l'out. A questo punto interviene il gas di trasporto che conduce i materiali combinati all'uscita della macchina. Le viti elicoidali necessitano di un azionamento elettrico esterno e la loro specifica geometria verrà valutata successivamente. Con questa configurazione viene garantita un'omogenea miscelazione, una portata costante ed una discreta velocità di reazione in quanto non vi è un accumulo di materiale all'interno di questa tramoggia ma esclusivamente un flusso continuo dato dalle rotazioni delle viti. Effettuando lo smontaggio delle viti elicoidali è possibile eseguire una pulizia ottimale. In aggiunta, la portata massica in uscita da questo elemento può essere regolata secondo le necessità agendo sulla velocità di rotazione delle due viti. Anche questa soluzione risulta applicabile dal punto di vista teorico, ma per una convalidazione oggettiva è necessaria una simulazione CFD (oppure un modello sperimentale).

#### Variante 4

In questa possibile variante i due flussi di polvere giungono all'interno di un miscelatore rotante composto da 4 palette che rimescolano le particelle trasportate dal gas e, per favorire la generazione di una turbolenza che incrementi la miscelazione, sono presenti diverse sporgenze sul bordo interno. Inizialmente le particelle seguono la loro traiettoria d'ingresso fino a scontrarsi contro l'agitatore e, successivamente, iniziano a seguire il gas in cui sono immerse verso l'apertura di scarico che le condurrà in uscita dalla macchina. Questo sistema necessita ovviamente di un azionamento elettrico e possiede una buona velocità di reazione al cambiamento delle percentuali di polveri. Fornisce a regime una portata quanto più possibile costante ma si potrebbero incontrare delle problematiche per quanto riguarda una miscelazione ottimale. Anche in questo caso, se si dovesse scegliere questa variante, sarebbe fondamentale una simulazione CFD per verificarne il corretto funzionamento.

Un'ulteriore sotto variante per migliorare la miscelazione potrebbe essere quella di avere un unico ingresso per entrambe le polveri anticipato da un raccordo ad 'Y' che unisca i due flussi. Seguirà un'analisi più approfondita nel caso in cui venga determinata questa variante come la migliore.

### 3.10.2 Valutazione varianti

Tabella 3.36: Valutazione varianti funzione di miscelazione delle due polveri

Funzione 9		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
Miscelazione delle due polveri	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	gi	pi	gi * pi	pi	gi * pi	pi	gi * pi	pi	gi * pi
Rapidità di reazione	5	0	0	4	20	3	15	3	15
Miscelazione	5	4	20	3	15	3	15	3	15
Costo	3	2	6	3	9	2	6	2	6
Influenza sulla portata delle polveri	4	4	16	3	12	3	12	3	12
Semplicità di fabbricazione	3	1	3	3	9	3	9	2	6
Ingombri	3	2	6	4	12	3	9	4	12
Semplicità di manutenzione e pulizia	4	3	12	2	8	4	16	4	16
Somma dei punti	27		63		85		82		85
Valutazione tecnica			0,58		0,79		0,76		0,76

### Variante scelta: Variante 2

Dopo aver eseguito una valutazione secondo i criteri elencati si evince che la variante migliore per l'applicazione è il raccordo ad 'Y' con zona di miscelazione. Questo componente risulta essere semplice e poco ingombrante, ma soprattutto possiede una velocità di reazione al cambiamento delle quantità di polveri ottima. Questo in quanto non presenta alcuna zona dove si potrebbe generare un accumulo di materiale ma è un normale raccordo dove il flusso scorre costantemente trasportato dal gas. L'unico punto debole di questa variante potrebbe essere legato alla manutenzione e pulizia: infatti risulta complicato accedere all'interno del raccordo. Nonostante ciò, se le palette interne per la generazione di turbolenza vengono dimensionate nel modo corretto, non si dovrebbero incontrare difficoltà per la procedura di pulizia e scarico; sarà sufficiente far scorrere il gas inerte all'interno dei condotti fino alla spurga di tutti i residui nel punto di deposizione.

## 3.11 Comando e Controllo (funzione 10)

In questo capitolo vengono analizzati essenzialmente i sensori e le valvole necessarie al corretto funzionamento e monitoraggio della macchina. Oltre a quelli già presenti in corrispondenza degli Hopper, si devono valutare i sensori da inserire in corrispondenza della zona di miscelazione delle polveri.

### Sensori relativi alle tramogge:

- **Cella di carico:** per monitorare la portata massica in uscita dalle tramogge: entrambi gli hopper sono sostenuti da un supporto collegato ad una cella di carico che monitora la quantità di materiale presente all'interno e, di conseguenza, la portata massica in uscita durante il funzionamento. Monitorando la portata massica delle due tramogge è possibile gestire le quantità delle singole polveri al fine di ottenere la miscela finale con le corrette proporzioni desiderate. Per modulare la portata massica si agisce tramite l'interfaccia uomo-macchina regolando la velocità di rotazione della vite di distribuzione.

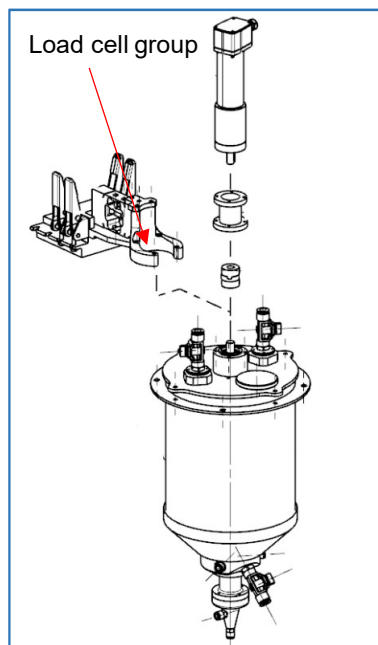


Figura 3.8: Assieme struttura con cella di carico già sviluppato



Figura 3.7: Esempio generale di sensore a cella di carico



- **Sensori per il monitoraggio dei flussi di gas:** posizionati all'interno della cabina di controllo si possono trovare le valvole principali ed i flussimetri con la relativa possibilità di monitoraggio e regolazione dei flussi quali: ring flow, shielding gas, Fluidization gas, carrier gas. Fanno parte del circuito pneumatico e sono indicati nel circuito dalla sigla 'F'.
- **Gruppo PLC:** sempre all'interno della cabina di controllo è posizionato il gruppo PLC connesso con l'HMI per il controllo di tutte le operazioni della macchina. Nel caso della scelta di una variante che necessita un azionamento per la funzione 9, anch'esso sarà collegato e controllato dalla medesima interfaccia.

#### *Sensori relativi alla zona di miscelazione:*

- **Monitoraggio della portata di polvere miscelata:** al fine di controllare il corretto funzionamento della macchina e verificare che fornisca una portata quanto più possibile omogenea e costante, si valuta l'introduzione di un sensore ad infrarosso all'uscita della zona di miscelazione. L'utilizzo di questo sensore permette di rilevare la portata massica delle polveri miscelate in base alla quantità di infrarosso che arriva al ricevitore. Questo tipo di sensore ha un costo contenuto ed offre un'ottima sensibilità e precisione. Si potrebbero riscontrare però problematiche dovute a fattori di disturbo, infatti, se si dovesse sporcare l'emettitore o il ricevitore, le misure risulterebbero completamente falsate.

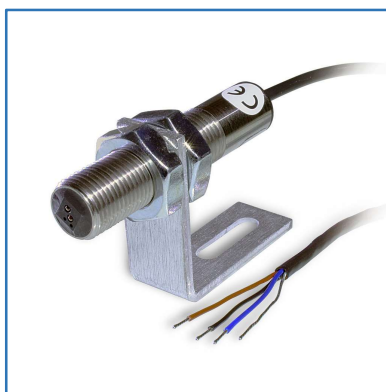


Figura 3.9: Esempio di sensore ad infrarosse implementabile nella soluzione finale

Posteriormente ad una discussione con il cliente si è scoperto che questa tipologia di sensore non consente di monitorare al meglio la portata massica del flusso di polveri in quanto è già stato testato per applicazioni simili di monitoraggio e non portava risultati attendibili. Tuttavia, al momento della progettazione e su base teorica, la proposta di inserimento di un sensore ad infrarosso risulta essere la scelta e la soluzione migliore.

### **3.12 Scarico (funzione 11)**

Scaricare completamente le tramogge dalla polvere residua si presenta come una funzione fondamentale della macchina al fine di garantire:

- Una corretta e ricorrente pulizia evitando ossidazioni e residui che potrebbero presentarsi difficoltosi da rimuovere;
- Una semplice manutenzione nel caso di cambio del modulo della vite di distribuzione o per qualsiasi altro tipo di manutenzione non ordinaria;
- Una corretta sostituzione delle polveri senza contaminazioni delle polveri utilizzate per un processo precedente.

Il metodo con cui scaricare le tramogge è già stato sviluppato e consiste nel mettere in pressione le tramogge con il gas, aprire il flusso del carrier gas a 0.3 bar contemporaneamente con la valvola di

spurgo (vedi glossario). In questo modo è possibile raccogliere la polvere di scarto al di sotto della valvola. Per una pulizia ottimale è consigliato anche lo smontaggio del modulo della vite. Successivamente allo spurgo totale delle polveri residue è possibile anche rimuovere il coperchio superiore delle tramogge per ultimare la pulizia interna: è fondamentale evitare l'utilizzo di prodotti a base di acqua.

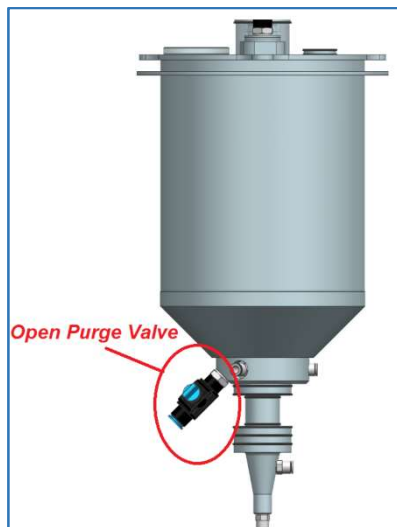






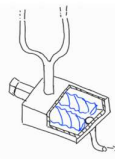
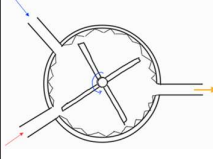


Figura 3.10: Rappresentazione posizionamento sulla tramoggia della valvola di spurgo

In aggiunta allo scarico delle tramogge si deve valutare una modalità di scarico per la sezione di macchina che svolgerà il compito di miscelazione delle due polveri. Anch'essa necessita di essere liberata per eseguire operazioni di pulizia, manutenzione, controllo e cambio della polvere assicurandosi l'assenza di residui di materiale utilizzato in processi differenti. Questo sistema verrà sviluppato durante la fase di progettazione sulla base delle scelte per la funzione 9. Nel caso di una terza tramoggia il sistema resterà il medesimo; nel caso di raccordo ad 'Y' non sarà necessario un sistema di scarico dedicato ma si potrà far scorrere il gas ad una discreta pressione attraverso tutti i condotti fino alla testa di deposizione della macchina DED. In questo modo si procederà allo scarico e pulizia del raccordo, dei canali e degli ugelli terminali. Mentre nel caso della terza e quarta variante, quindi la tramoggia con doppia vite elicoidale o il miscelatore rotante, si dovrà inserire una valvola di spurgo comparabile a quella per le tramogge. Così, tramite il gas di trasporto, sarà possibile raccogliere le polveri in eccesso.

### 3.13 Cassa morfologica

Tabella 3.37: Caisse Morphologique, in verde le celle con le varianti scelte

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
<b>FUNZIONE 1</b> SUPPORTO/FISSAGGIO ALIMENTATORI	<p>PROFILATI</p> 	<p>SUPPORTO A BANCO</p> 		
<b>FUNZIONE 3</b> ERGONOMIA DEL POSIZIONAMENTO DEGLI ALIMENTATORI	<p>SCALETTA</p> 	<p>PEDANA REGOLABILE</p> 		
<b>FUNZIONE 9</b> MISCELAZIONE DELLE DUE POLVERI	<p>TRAMOGGIA</p> 	<p>RACCORDO AD 'Y' CON ZONA MISCELAZIONE</p> 	<p>VITE ELICOIDALE</p> 	<p>MISCELATORE ROTANTE</p> 

# Capitolo 4

## 4.1 Disegno di concetto

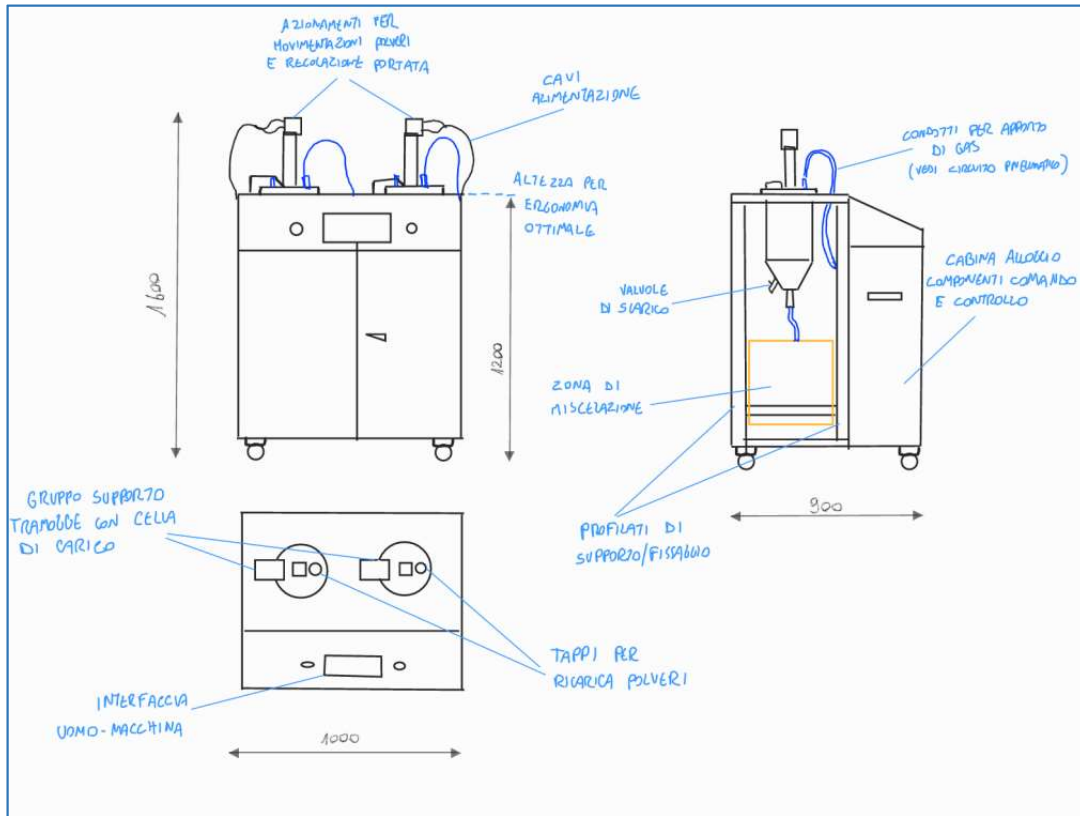


Figura 4.11: Disegno di concetto: viste d'insieme macchina

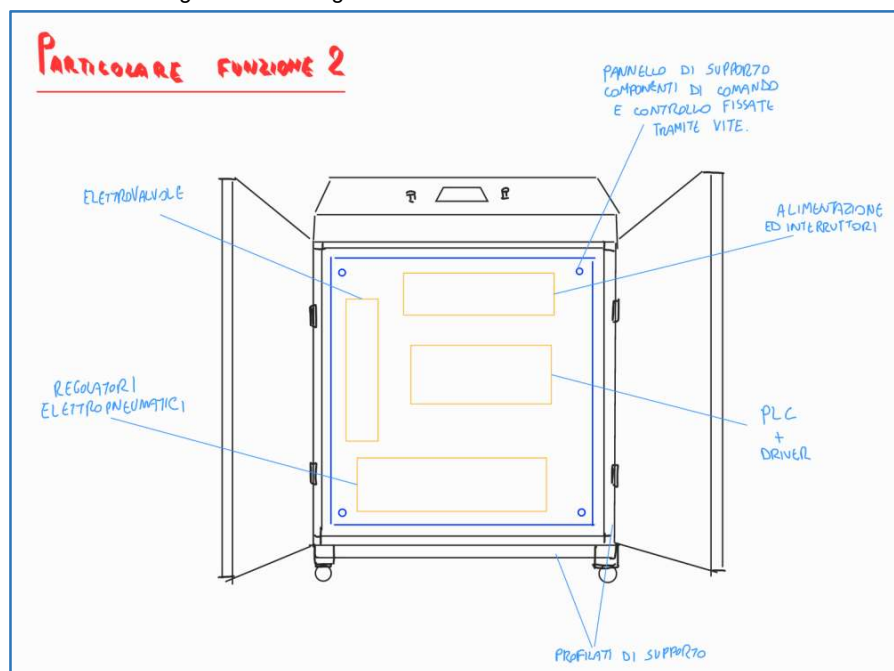


Figura 4.12: Disegno di concetto: vista particolare funzione 2

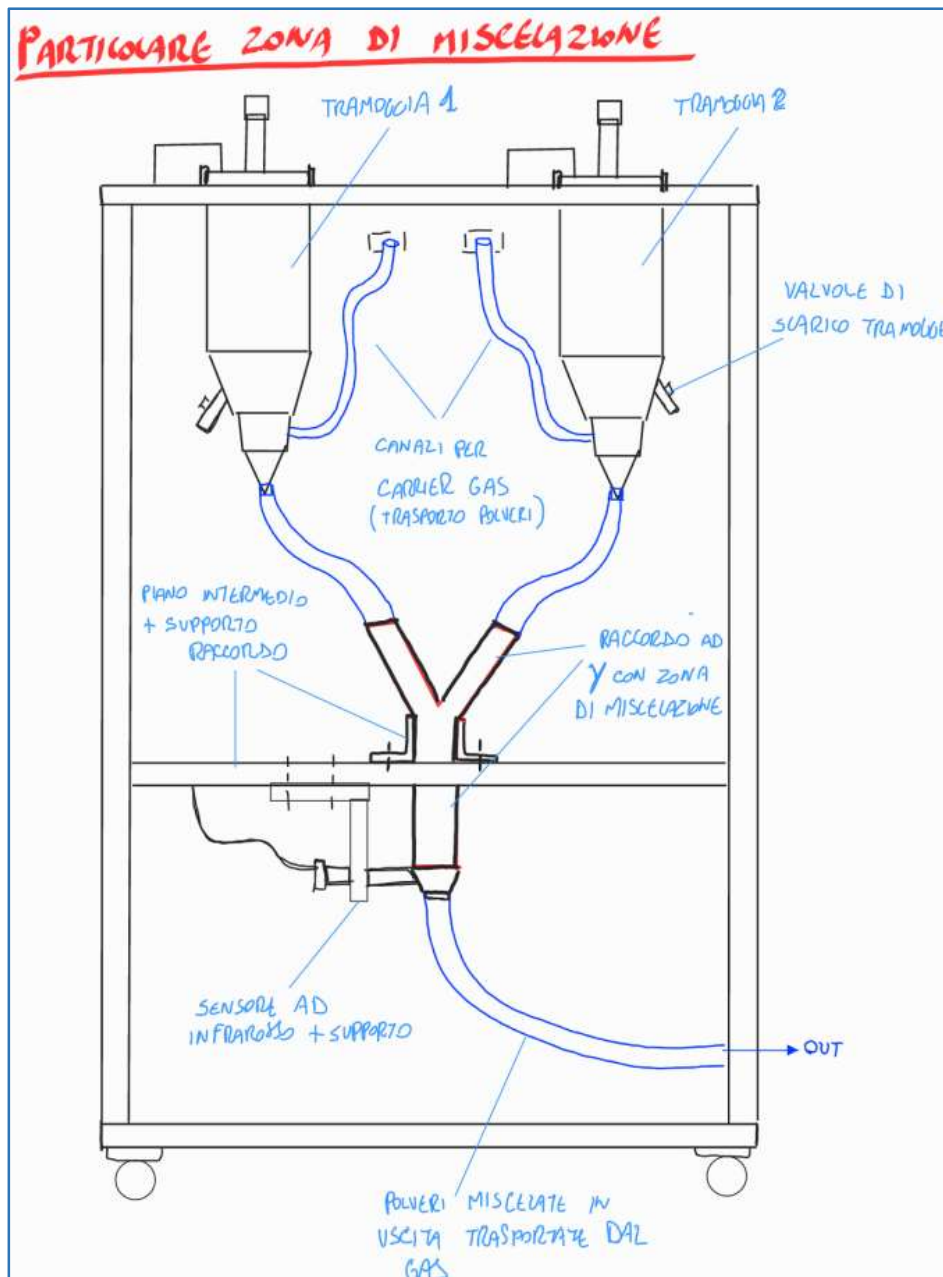


Figura 4.13: Disegno di concetto: vista particolare zona di miscelazione (funzione 9)

All'interno delle tre immagini che compongono il disegno di concetto è possibile osservare tutte e 11 le funzioni analizzate all'interno del capitolo 2.2.1, con le relative soluzioni per quelle da sviluppare. In allegato sono presenti i medesimi disegni per poter essere visionati più nel dettaglio.

# Capitolo 5

## 5.1 Progettazione

Dopo aver definito le varianti, si procede con la progettazione e lo sviluppo di ogni funzione identificata e valutata nei capitoli precedenti, nonché all'identificazione degli elementi standard da acquistare. Durante questa fase si tengono conto tutti i limiti e le prestazioni presentate e, come già anticipato, alcune funzioni sono già state implementate per la macchina a singola tramoggia e non saranno dunque trattate in questi capitoli.

### 5.1.1 Progettazione Funzione 1

Questa funzione ha lo scopo di sostenere il Double Powder Feeder con robustezza ed in una determinata posizione. Si compone dunque della struttura portante alla quale vengono fissati anche tutti gli elementi di contorno alle tramogge quali: cabina di controllo, circuiti pneumatici e zona di miscelazione. Per risolvere questo problema si sceglie di utilizzare i profilati in alluminio GFS ad alta rigidità assemblabili tra loro tramite viti M8. Questi elementi sono presenti sul mercato come elementi standard e vi è la possibilità di acquistarli secondo le lunghezze necessarie.

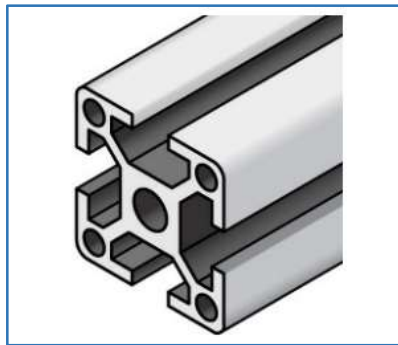


Figura 5.14: Rappresentazione 3D profilato scelto

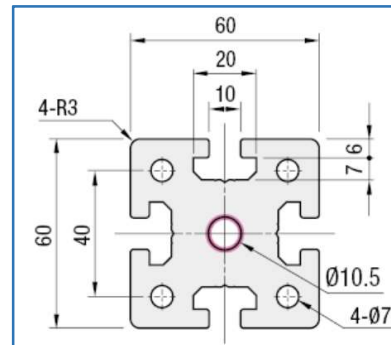


Figura 5.15: Dimensioni sezione profilato scelto

- Fornitore: Misumi [8]
- Codice prodotto: KGFS8-6060-X

Nota: nel codice la lettera 'X' sta ad indicare la lunghezza del profilato, che varierà in base alla necessità. Per esempio, in allegato è possibile visionare la scheda tecnica del profilato di lunghezza 4000 mm (X=4000).

Questi elementi sono assemblati tra loro con l'ausilio di apposite staffe acquistabili insieme con i profilati e, inoltre, dove vi sarà la necessità di inserire delle viti direttamente sul profilato per assicurare altre componenti, si inseriscono nelle apposite guide dei dadi di pre-montaggio con la filettatura interna che si necessita (figura 5.18). Per entrambi questi elementi aggiuntivi è presente in allegato il datasheet dedicato.

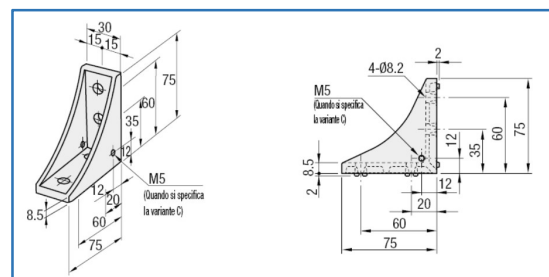


Figura 5.16: Staffe per il collegamento dei profilati della struttura

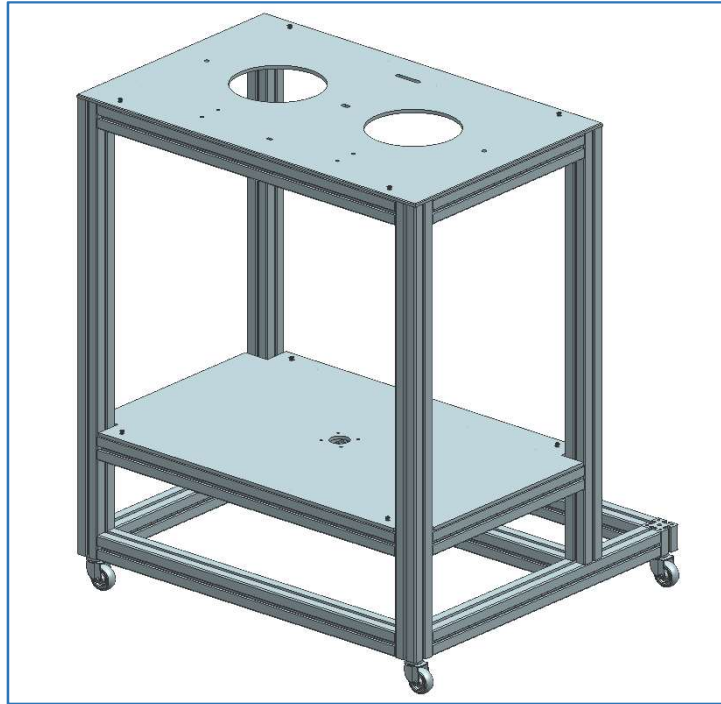


Figura 5.17: Soluzione definitiva per la struttura di supporto della macchina

In seguito alla soluzione definitiva si determina che saranno necessarie il seguente numero di profilati con le seguenti dimensioni:

Tabella 5.38: Quantità e lunghezze dei profilati da acquistare

Quantità	Lunghezza [mm]
2	1100
2	780
2	60
2	1040
4	520
8	880

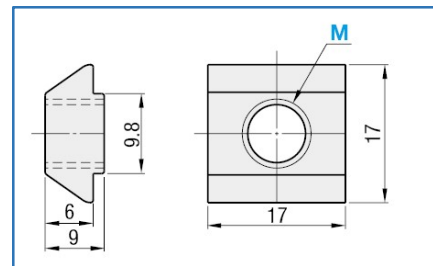


Figura 5.18: Dadi di pre-montaggio con forma apposita per essere alloggiati nelle cave dei profilati

Come visibile in figura 5.17 sono presenti poi due piani di sostegno per assicurare il fissaggio dei componenti della macchina. Quello superiore fornisce appoggio alle due tramogge e al relativo sistema di monitoraggio della portata massica con cella di carico. Il piano sottostante invece serve come sostegno per il raccordo ad 'Y' con relativa zona di miscelazione. Questi elementi sono piastre in alluminio dallo spessore di 8mm assicurate alla struttura per mezzo di viti M6; sono acquistabili secondo le caratteristiche richieste presso la ditta Gelli S.r.l. [18] che fornisce lamiere metalliche secondo materiale, dimensioni e lavorazioni richieste dal cliente. In allegato sono infatti presenti i disegni costruttivi per questi piani di supporto da inviare al fornitore.

Infine, sul fondo della struttura, vengono inserite 4 rotelle generiche in gomma con raccordo in acciaio per permettere uno spostamento agevole della macchina all'interno del laboratorio. Questo è possibile anche perché non è richiesta una particolare stabilità o precisione al momento del servizio per la macchina.



Figura 5.19: Rotelle inserite al di sotto della struttura

- Fornitore: Misumi [8]
- Codice prodotto: LA-75NRB

La loro scheda tecnica è consultabile tra i documenti in allegato.

### 5.1.2 Progettazione Funzione 2, 5 e 10

Di seguito si descrive la soluzione alle funzioni che hanno lo scopo di gestire il comando ed il controllo del sistema (funzione 10) ed il loro relativo alloggiamento e supporto (funzione 2). Nonché la funzione che permette l'apporto del gas in tutti i condotti dei cablaggi della macchina (funzione 5). Queste tre funzioni vengono analizzate all'interno del medesimo capitolo dal momento che sono strettamente correlate tra loro.

#### *Valvole e componenti del circuito pneumatico (funzione 5/10)*

Nella seguente tabella 5.39 vengono specificati tutti i componenti del circuito pneumatico [2] necessari per il controllo ed il monitoraggio della macchina conseguentemente all'introduzione della seconda tramoggia. Gli elementi indicati con la sigla in grassetto fanno riferimento alla nuova tramoggia e sono quindi nuovi componenti da introdurre. Risultano utili per l'isolamento o il monitoraggio di una singola tramoggia. Nel paragrafo successivo viene presentato il nuovo circuito pneumatico con l'aggiunta della seconda tramoggia e le relative valvole.

Tabella 5.39: Componenti del circuito pneumatico necessarie per l'apporto del gas ed il relativo trasporto delle polveri attraverso la macchina

<b>Sigla</b>	<b>Componente</b>	<b>Note</b>
A1	Bombola 1	Bombola contenente gas inerte (Argon)
A2	Bombola 2	Bombola contenente gas inerte (Argon)
B1	Rampa per bombole	Rampa con 2 input e 1 output più valvola intercettazione
C1	Riduttore di pressione	Riduttore di pressione con valvola a membrana manuale (Pmax=15 bar)
D1	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di gas 'ring flow'
D2	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di shielding gas
D3	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di fluidizzazione tramoggia 1
D4	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di carrier gas tramoggia 1
D5	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di spurgo tramoggia 1
<b>D6</b>	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di fluidizzazione tramoggia 2



<b>D7</b>	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di carrier gas tramoggia 2
<b>D8</b>	Elettrovalvola	Valvola elettrica di intercettazione per flusso di spurgo tramoggia 2
<b>E1</b>	Riduttore elettropneumatico	Controllo elettropneumatico della valvola di pressione per flusso di gas 'ring flow'
<b>E2</b>	Riduttore elettropneumatico	Controllo elettropneumatico della valvola di pressione per flusso di shielding gas
<b>E3</b>	Riduttore elettropneumatico	Controllo elettropneumatico della valvola di pressione per flusso di fluidizzazione tramoggia 1
<b>E5</b>	Riduttore elettropneumatico	Controllo elettropneumatico della valvola di pressione per flusso di carrier gas tramoggia 1
<b>E6</b>	Riduttore elettropneumatico	Controllo elettropneumatico della valvola di pressione per flusso di fluidizzazione tramoggia 2
<b>E7</b>	Riduttore elettropneumatico	Controllo elettropneumatico della valvola di pressione per flusso di carrier gas tramoggia 2
<b>F1</b>	Flussimetro	Flussimetro di controllo per il flusso di gas 'ring flow'
<b>F2</b>	Flussimetro	Flussimetro di controllo per il flusso di shielding gas
<b>F3</b>	Flussimetro	Flussimetro di controllo per il flusso principale carrier gas tramoggia 1
<b>F4</b>	Flussimetro	Flussimetro di controllo per il flusso principale carrier gas tramoggia 2
<b>G1</b>	Valvola manuale	Valvola manuale principale in prossimità delle bombole di gas
<b>G2</b>	Valvola manuale	Valvola manuale per il sistema di bilanciamento di pressione tramoggia 1
<b>G3</b>	Valvola manuale	Valvola manuale per il sistema di bilanciamento di pressione tramoggia 2
<b>H1</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di 'ring flow'
<b>H2</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di shielding gas
<b>H3</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di fluidizzazione tramog. 1
<b>H4</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di bilanciamento tramog. 1
<b>H5</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di carrier gas tramoggia 1
<b>H6</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di fluidizzazione tramog. 2
<b>H7</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di bilanciamento tramog. 2
<b>H8</b>	Valvola di non-ritorno	Valvola che impedisce ritorno di gas per flusso di carrier gas tramoggia 2

### Circuito pneumatico con seconda tramoggia

Con l'inserimento delle componenti pneumatiche indicate in grassetto nella tabella 5.39, il circuito pneumatico della macchina si modifica come segue:

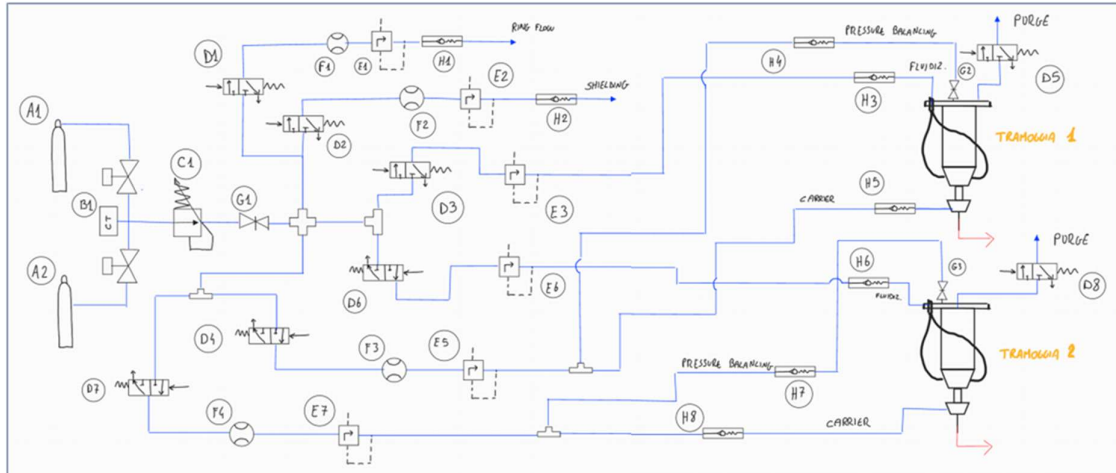


Figura 5.20: Circuito pneumatico aggiornato per l'introduzione della seconda tramoggia

Nota: la rappresentazione di questo circuito viene anche riportata in allegato con dimensioni maggiori in modo tale da essere più facilmente comprensibile.

### Analisi e descrizione nuove componenti comando e controllo

Tutti gli elementi quali valvole e sensori di flusso vengono rappresentati all'interno della cabina di controllo tramite un volume schematico che sta a rappresentarli. Le valvole non presenti nella rappresentazione CAD sono quelle posizionate direttamente sui condotti del circuito pneumatico: tra queste abbiamo le valvole di non ritorno (sigla H in tabella 5.39) e le elettrovalvole dedicate alla sezione per lo spurgo delle tramogge (D5-D8). Mentre, per quanto riguarda le valvole manuali (G2-G3), esse sono posizionate nella parte superiore delle due tramogge. Di seguito vengono analizzate nel dettaglio le nuove componenti da aggiungere alla macchina, per facilitare la comprensione ed i riferimenti si utilizzano le stesse sigle con relativa numerazione presenti in tabella 5.39 sovrastante.

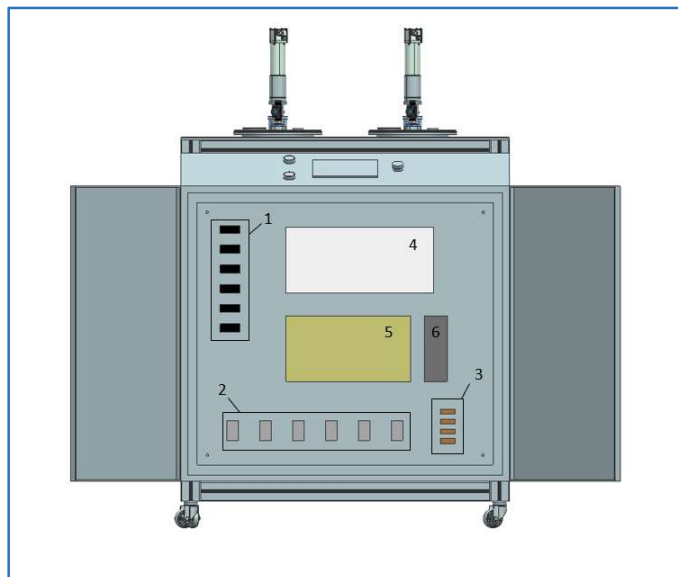


Figura 5.21: Vista frontale della macchina con cabina di controllo aperta

### 1 Elettrovalvole (sigla D)

Rappresentate in nero nell'immagine 5.21 ed indicate con il numero '1', si presentano le elettrovalvole per i circuiti delle due tramogge. Nel circuito pneumatico ed in tabella ne abbiamo 8, ma nella cabina di controllo se ne vedono posizionate solo 6 per i motivi già anticipati nel paragrafo precedente. Queste sono valvole di intercettazione comandate elettricamente dal gruppo PLC e permettono di gestire tutti i diversi flussi di gas quali: carrier gas, shielding gas, ring flow, fluidization gas e flusso per lo scarico degli Hoppers. Attivando le valvole in questione è possibile bloccare o aprire il flusso interessato. Con l'introduzione della seconda tramoggia è stata valutata l'aggiunta di tre valvole di questo tipo (D6, D7, D8) affinché si possa gestire il flusso di trasporto, di fluidizzazione e quello per lo spurgo della nuova tramoggia. Questi elementi vengono forniti dall'azienda SMC ed in allegato è possibile visionare la scheda tecnica.

- Fornitore: SMC [10]
- Codice prodotto: VT307V-5DZ1-01F-Q



Figura 5.22: Elettrovalvola

### 2 Riduttori elettropneumatici (sigla E)

Rappresentati in grigio nell'immagine 5.21 ed indicati con il numero '2' si hanno i riduttori elettropneumatici che consentono la regolazione della pressione dei diversi flussi di gas che scorrono nel nostro circuito. In seguito all'introduzione della seconda tramoggia è stato necessario introdurre altri due riduttori dello stesso tipo (E6, E7) con lo scopo di gestire e regolare la pressione dei flussi che interessano la fluidizzazione ed il carrier gas della seconda tramoggia. Questi componenti sono acquistabili dal fornitore FESTO ed in allegato si trova la relativa scheda tecnica.

- Fornitore: FESTO [7]
- Codice prodotto: VPPE-3-1-1/8-6-010-E1T



Figura 5.23: Riduttore elettropneumatico

### 3 Flussimetro (sigla F)

Etichettati dal numero '3' in basso a destra all'interno della cabina di controllo nell'immagine 5.21 si trovano i sensori per monitorare la quantità di gas che scorre all'interno dei cablaggi. Sono essenzialmente dei sensori per la misurazione della portata di flusso. Quelli presenti nella macchina con singolo powder feeder del tipo PFM7 del fornitore SMC sono fuori produzione e sono stati sostituiti da quelli di nuova generazione: PF2M7. I nuovi sensori mantengono le stesse caratteristiche di funzionamento ma viene variata la loro geometria ed il loro design. Questi flussimetri vengono posizionati sul percorso dei gas principali per controllare il flusso di shielding gas, ring flow e carrier gas. Con lo sviluppo della nuova macchina si è valutata quindi l'aggiunta di un solo sensore in più: quello necessario per il monitoraggio del carrier gas relativo alla seconda tramoggia. Anche per questi componenti si trova il catalogo con le caratteristiche in allegato.



Figura 5.24: Flussimetri

- Fornitore: SMC [10]
- Codice prodotto: PF2M750-F1-EW-MRA

### Valvola manuale (sigla G)

Queste valvole ad azionamento manuale non sono visibili all'interno della cabina di controllo in figura 5.21 in quanto sono localizzate in prossimità delle bombole di gas Argon ed all'estremità superiore delle tramogge in prossimità dell'apertura. La prima di queste (G1) ha lo scopo di aprire o chiudere il flusso proveniente dalle bombole bloccando eventualmente tutti i flussi. La seconda valvola (G2) viene azionata per il bilanciamento di pressione all'interno della prima tramoggia, quindi, con l'introduzione della seconda tramoggia, si è dovuta aggiungere una terza valvola (G3) con la stessa funzione della G2. L'azienda che fornisce queste valvole è la FESTO ed in allegato si trova la scheda tecnica del prodotto.



Figura 5.25: Valvola Manuale

- Fornitore: FESTO [7]
- Codice prodotto: HE-2-QS-12

### Valvole di non-ritorno (sigla H)

Anche questi elementi non sono presenti all'interno della cabina di controllo poiché sono applicati direttamente sui condotti pneumatici prima del loro punto di applicazione. Queste, infatti, sono valvole unidirezionali che hanno lo scopo di impedire al flusso di gas di invertire la sua direzione di scorrimento in caso di bloccaggi o altri problemi sul percorso. Dal momento dell'introduzione della nuova tramoggia è stato necessario implementare altre tre valvole di questo genere (H6, H7, H8) al fine di impedire il ritorno di gas Argon per i flussi del nuovo powder feeder (carrier gas, fluidization gas e bilanciamento di pressione tramoggia 2). Sono elementi acquistabili dall'azienda FESTO e la loro scheda tecnica viene fornita in allegato.



Figura 5.26: Valvola di non ritorno

- Fornitore: FESTO [7]
- Codice prodotto: HE-QS-8

## 5 Power supply and switches

Etichettato con il numero 4 in figura 5.21 si trova il gruppo di elementi che comprende l'alimentazione e gli interruttori elettrici. Questa parte di elettronica è già stata sviluppata per la macchina esistente e non rientra nelle analisi di questo progetto. Allo stesso modo anche gli elementi indicati con i numeri 5 e 6 stanno a rappresentare componenti che non vengono approfondite a questo punto della progettazione ma verranno studiate in futuro se vi sarà disponibilità di tempo. In ogni caso, l'elemento 5 costituisce il gruppo PLC che ha il compito di controllare, tramite impulsi elettrici, tutti i componenti elettropneumatici del sistema. L'elemento 6 invece rappresenta il driver, ovvero l'elemento che permette di mettere in comunicazione le periferiche (hardware) ed il sistema operativo (software).

### Alloggio e supporto delle componenti (funzione 2)

Tutte le componenti precedentemente descritte ed analizzate vengono alloggiate all'interno della cabina anteriore della macchina fissata sulla struttura principale in profilati e chiusa da due sportelli. Aprendo gli sportelli si incontrano dapprima la valvole, i regolatori di flusso, i sensori, le connessioni elettriche ed il gruppo PLC tutti assicurati tramite fissaggio a vite ad un primo pannello metallico. Rimuovendo le viti di questo primo pannello è possibile raggiungere i cablaggi e la sezione pneumatica dove è possibile manipolare i condotti all'interno dei quali scorrono i flussi di gas.

La cabina di controllo si compone dunque di pannelli in alluminio dello spessore scelto di 4mm. Sarà presente un primo coperchio superiore visibile in figura 5.27 opportunamente piegato e saldato secondo le dimensioni necessarie, con la presenza di fori per l'alloggio dell'interfaccia grafica, del tasto di emergenza e di eventuali altri pulsanti per il controllo o luci per la segnalazione. Posteriormente si connette ai profilati un pannello avente due asole per consentire il passaggio dei condotti pneumatici e dei cavi elettrici provenienti o diretti alle tramogge. Vi saranno poi due semplici lamiere laterali: una delle due dovrà presentare il numero adatto di fori per consentire l'inserimento delle componenti che completano la macchina (interruttore, connettori pneumatici, presa elettrica). Infine, c'è bisogno di un piano inferiore d'appoggio e chiusura completa della cabina; deve permettere inoltre l'inserimento dei perni che guideranno gli sportelli. Le ante, infatti, si muovono grazie a dei cardini a perno che si inseriscono nel piano inferiore e nel coperchio superiore della cabina.

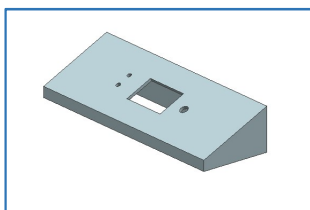


Figura 5.27: Coperchio superiore cabina di controllo

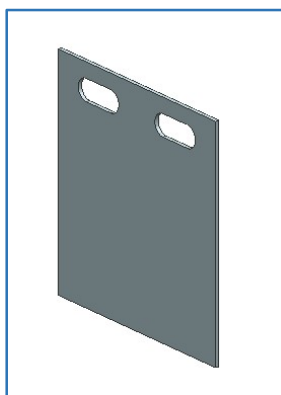


Figura 5.28: Pannello posteriore con asole per passaggio cablaggi

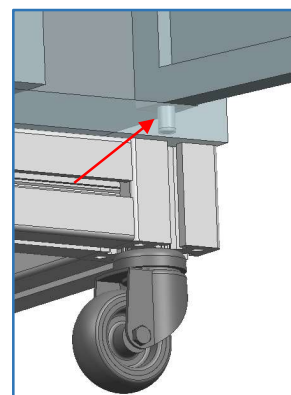


Figura 5.29: Indicato con freccia perno di connessione piano inferiore-sportello

Il tutto è assicurato tramite l'inserimento di viti della dimensione M6 che connettono i diversi pannelli tra loro, sfruttando tramite bordi appositamente piegati e li assicurano alla struttura portante della macchina.

Tutte le componenti appena elencate possono essere acquistate secondo le caratteristiche necessarie dal fornitore Gelli S.r.l. [18]. Questa compagnia fornisce articoli in lamiera di qualsiasi genere e materiale, nonché effettua su questi elementi lavorazioni come piegatura, tranciatura, saldatura e fresatura.

Nota: la cabina di controllo presente nelle immagini visibili nel rapporto ha solo scopo rappresentativo ma non rispecchia il modello finale che si vuole realizzare.

### Gruppo cella di carico (funzione 10)

Sempre per quanto riguarda il comando e controllo della macchina, dopo aver analizzato gli elementi necessari per il corretto funzionamento del circuito pneumatico che garantisce l'apporto del gas e delle polveri attraverso la macchina, si devono analizzare gli elementi per il controllo relativi alle tramogge. In particolare, è importante poter tenere sotto controllo la portata massica in uscita dalle tramogge con lo scopo di poter regolare le quantità di materiali uscenti da ciascun feeder: per far ciò si devono sviluppare due sistemi congruenti (uno per ogni tramoggia) che determinino le quantità di polveri contenute negli hopper tramite dei sensori.

Sulla base del sistema già presente per un singolo feeder si sceglie di sfruttare la medesima modalità: ovvero quella di inserire un sensore a cella di carico che agisca direttamente sulla tramoggia supportandola e 'pesando' la quantità di materiale presente al suo interno. Conseguentemente è possibile determinare la portata massica uscente sulla base della variazione di peso.

#### Cella di carico: funzionamento

L'elemento centrale di questo sistema è indubbiamente la cella di carico: questo sensore viene sfruttato generalmente per misurare una forza applicata, si compone di un trasduttore che fornisce un segnale elettrico che varia secondo la deformazione che tale forza produce sul componente. Quindi, più il trasduttore si deforma, maggiore sarà il segnale elettrico in uscita e maggiore sarà la forza misurata. Per l'applicazione in questione si misura una forza peso: di conseguenza, la cella deve essere vincolata rigidamente ad un punto della struttura principale della macchina e l'altra estremità deve essere collegata alla tramoggia tramite una parte meccanica dimensionata appositamente. La tramoggia sarà dunque sorretta esclusivamente dalla cella di carico e dalla relativa struttura.

Per consentire una corretta misurazione della quantità di materiale presente si deve dapprima tarare il sensore misurando il peso delle tramogge svuotate. Successivamente è possibile inserire un quantitativo desiderato di polvere metallica e, attivando la vite di alimentazione che permette alla polvere di uscire dal fondo della tramoggia, è possibile monitorare quanti grammi di polvere fuoriescono nell'unità di tempo (s) osservando il valore del peso che fornisce la cella di carico.

La portata massica di una sostanza si misura infatti in chilogrammi al secondo: applicando una semplice conversione di unità di misura, si monitora la portata in uscita dalle due tramogge. Il tutto è gestito elettronicamente tramite il software di comando e l'interfaccia grafica (HMI). La cella di carico fornisce come output direttamente la massa di ciò che pesa e non la sua forza peso; quindi, è sufficiente dividere il valore fornito per l'unità di tempo per risalire alla portata massica.

Simbolo di riferimento della portata massica:

$$\dot{m} \rightarrow \text{unità di misura SI: } \left[ \frac{kg}{s} \right].$$

Viene scelto di inserire una cella di carico di tipo 'off-center' a punto singolo in modo tale che si integri nel migliore dei modi all'interno del nostro sistema di monitoraggio. Questo sensore è acquistabile dalla ditta Scaime, è in acciaio inossidabile ed è un prodotto ottimizzato appositamente per applicazioni di pesatura dinamiche, adatto perfettamente al nostro utilizzo.

- Fornitore: Scaime [9]
- Codice prodotto: AK 6-30

In allegato è possibile consultare la sua scheda tecnica con tutte le caratteristiche.

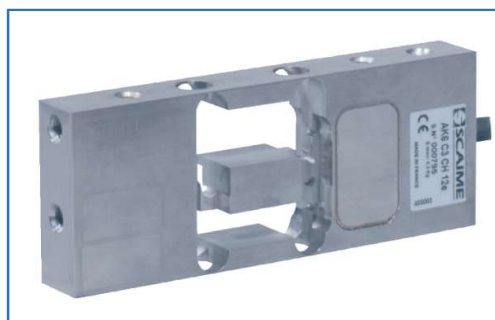


Figura 5.30: Cella di carico utilizzata per monitoraggio portata massica materiale

### Struttura di supporto

Determinata la cella di carico da inserire, risulta necessario progettare una struttura che le permetta di funzionare: il sensore, infatti, deve avere a disposizione una superficie di appoggio sulla struttura portante della macchina ed una superficie di appoggio sulle tramogge. Facendo anche riferimento alle strutture già presenti per il powder feeder a singola tramoggia, vengono apportate delle modifiche alle geometrie dei componenti al fine di inglobare la nuova cella di carico. La struttura permette quindi il posizionamento adeguato alla cella di carico e si connette ad una tramoggia nel seguente modo visibile in figura 5.31.

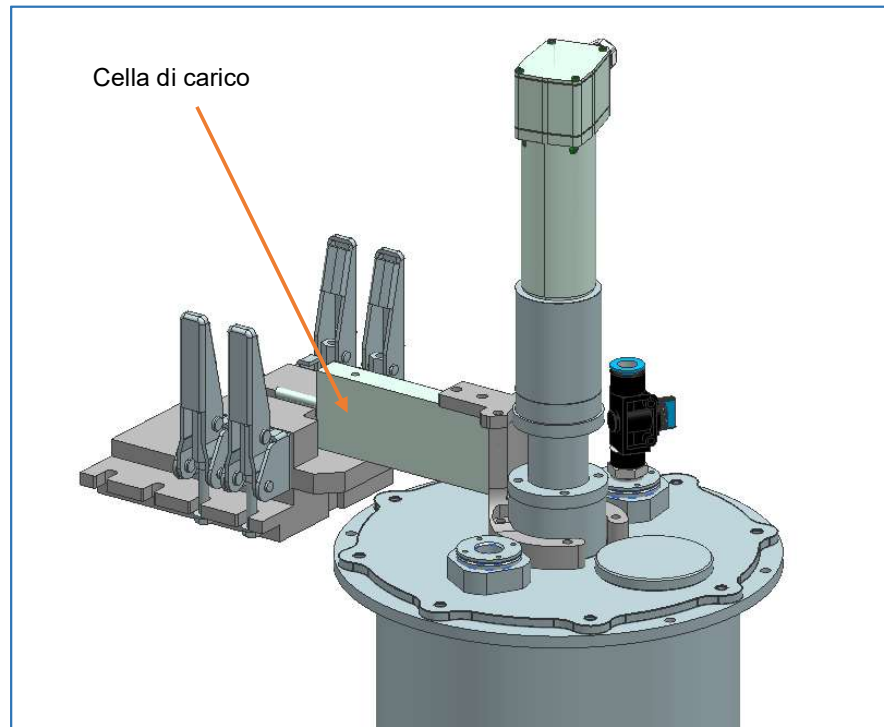


Figura 5.31: Struttura per integrazione cella di carico sulla tramoggia

Vi è dunque la presenza di una prima piastra di fissaggio che si assicura direttamente alla struttura portante della macchina tramite l'inserimento di due viti M8 con dado. Al di sotto di tale piastra e al di sotto del piano superiore viene posto un profilato aggiuntivo per evitare che il peso della tramoggia e delle polveri contenute al suo interno possano flettere eccessivamente il piano di appoggio, andando a deformare la struttura e di conseguenza portare ad un funzionamento errato della macchina. Una delle due viti M8 di fissaggio farà presa su questo profilato aggiunto.

Questa prima piastra presenta delle asole laterali che permettono l'attacco di 4 pinze di bloccaggio connesse a sua volta ad un secondo blocchetto di supporto. Viene utilizzato questo metodo di fissaggio tramite morsetti push-pull per garantire un montaggio agevole della cella di carico che è un componente delicato, un'intercambiabilità rapida sulla posizione della cella di carico, e per consentire una separazione veloce senza dover smontare l'intera struttura quando la macchina non è in funzione in quanto non si vuole lasciare la cella di carico sottoposta a stress quando non è necessario. Per garantire poi un posizionamento preciso tramite le pinze vi è la presenza di due spine cilindriche di centraggio tra la piastra base e la seconda piastra di supporto con diametro 6mm e lunghezza di 30mm.

- Fornitore spine: Bossard [17]
- Codice prodotto: 1256173

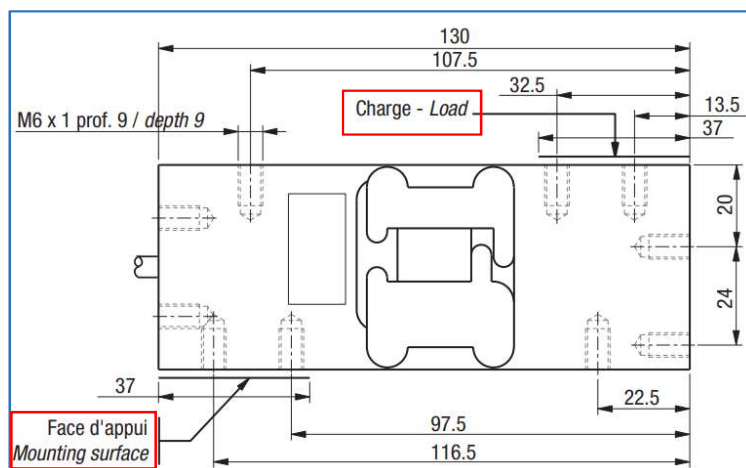


Figura 5.32: Quotatura 2D cella di carico, riquadrate in rosso le lunghezze di appoggio e di applicazione del carico

In seguito agli elementi descritti trova posto il sensore principale che si connette nella sua estremo superiore alla tramoggia sfruttando altre due parti appositamente modellate per integrarsi sul powder feeder senza creare eccessivi ingombri od ostacolarne il corretto funzionamento, visibili in figura 5.31. La cella di carico avrà una lunghezza di appoggio di 37mm sulla seconda piastra di supporto, ed una superficie di appoggio del carico da misurare sempre di 37 mm nella parte superiore, come visibile in figura 5.32 nelle zone riquadrate in rosso.



### 5.1.3 Progettazione Funzione 9

In seguito alla valutazione delle varianti proposte per miscelare le due polveri provenienti dai due Hopper separati si è scelto di implementare un raccordo ad 'Y' con successiva zona di miscelazione (vedi Cassa Morfologica: Tabella 3.37). Viene modellata la geometria dei condotti e la geometria che permetta la miscelazione, ma successivamente è necessario eseguire una simulazione CFD per verificare teoricamente che la parte svolga correttamente il suo compito. Una volta convalidato il funzionamento teorico tramite simulazione risulta fondamentale fornire dei metodi di convalidazione pratici che confermino il corretto funzionamento di questo elemento in seguito alla sua realizzazione.

#### Struttura della parte

Per prima cosa si procede alla creazione della geometria del raccordo e del relativo miscelatore statico: in un primo momento si è ipotizzata una geometria come quella osservabile in figura 5.33. Questa geometria si compone di tre parti: per prima cosa si incontra il raccordo ad 'Y' con condotti interni di 6mm dove le polveri si incontrano e si ottiene una prima miscelazione parziale. Successivamente al raccordo si prosegue con un condotto di 9mm di diametro. A questo punto si presenta la seconda parte che si collega alla prima tramite filetto. Abbiamo inizialmente un diametro di 9mm che si allarga poi gradualmente fino a 40mm dove trova posto il miscelatore statico. Questo terzo elemento è costituito da palette disposte a griglia che consentono alle particelle di scontrarsi tra loro ed unirsi fino a formare una miscela omogenea. La lunghezza di questa porzione di raccordo è da valutare successivamente ad una prima simulazione che confermi che le polveri si mescolino sufficientemente.

Quando però si sono analizzati i metodi di produzione per questa parte si è constatato che il prezzo fosse eccessivamente elevato. Una seconda problematica riscontrata era che il collegamento a filetto tra le due parti non potesse garantire la precisione richiesta per l'assemblaggio. È stato dunque necessario analizzare quali fossero le caratteristiche geometriche di fondamentale importanza per il raccordo e la relativa zona di miscelazione che non possono essere trascurate.

Le caratteristiche fondamentali sono:

- **Diametro interni dei condotti separati:** i due condotti separati devono mantenere un diametro corrispondente a quello dei canali del circuito pneumatico all'interno dei quali scorre gas e polvere metallica: 6mm. Una volta che i due condotti separati convergono in uno singolo, al fine di mantenere una velocità costante del flusso e limitare così le perdite di carico e di pressione, si dimensiona appositamente il diametro per questo tratto.
- **Inclinazione dei condotti di alimentazione:** i condotti che giungono poi nel raccordo ad Y devono presentare un'inclinazione sufficiente affinché vi sia una prima miscelazione parziale e affinché non si generino perdite inutili. L'inclinazione ottimale si valuta in seguito ad un numero sufficiente di simulazioni CFD.
- **Diametro del condotto per la zona di miscelazione:** Per la zona di miscelazione si ricerca un diametro del condotto maggiore per favorire turbolenza e miscelazione delle polveri. Questo diametro lo si determina di 30 mm. (dimensionamento presente al capitolo successivo).
- **Lunghezza dei condotti di alimentazione:** per quanto riguarda la lunghezza dei condotti è importante tenere in considerazione le perdite distribuite, più brevi saranno i condotti, minori saranno le perdite. Una minima lunghezza è comunque necessaria per indirizzare il flusso nel modo corretto dal momento che questa zona è preceduta da tubi in gomma con diverse curvature.



Figura 5.33: Geometria iniziale per raccordo ad Y più zona di miscelazione

- **Zona di raccordo tra raccordo ad Y e zona di miscelazione:** anche questa porzione del pezzo deve essere dimensionata a dovere, non devono presentarsi brusche variazioni di diametro.
- **Rugosità interna dei condotti:** non deve essere eccessiva per limitare le perdite di carico distribuite, ma le superfici devono presentare comunque una rugosità per evitare che le particelle di polvere creino un'interazione elettrostatica con la parete e si formino degli accumuli. La turbolenza a parete è quindi ricercata per evitare questo fenomeno.
- **Uniformità dei condotti interni:** si cerca di evitare la presenza di ostacoli o discontinuità nella geometria dei condotti interni che inducono ulteriori perdite non ricercate. Questo fattore può essere eliminato ottenendo il pezzo da un corpo unico.

La prima osservazione deducibile da ciò che si è appena elencato è che la geometria esterna della componente in analisi non è rilevante per il compito che deve svolgere. Da ciò ne deriva che i condotti di nostro interesse possono essere ricavati direttamente da un parallelepipedo di materiale grezzo che viene forato e lavorato al suo interno, trattandosi di semplici condotti con variazioni di diametro. Essendo però che le lavorazioni da effettuare presentano una profondità eccessiva e sarebbe quindi necessaria una punta per la foratura non standard, si opta per la divisione del componente in diverse parti. Si dimensionano dunque diversi elementi connessi tra loro tramite vite e centrati con precisione grazie ad uno spallamento.

Questo conduce ad una notevole riduzione di prezzi, in quanto non è più necessario creare uno stampo per la realizzazione del raccordo ad Y, si eliminano i collegamenti a filetto, la presenza dell'o-ring e tutte le relative lavorazioni necessarie sull'esterno della parte. Nel capitolo successivo vengono dimensionate tutte le geometrie interne caratteristiche della parte secondo le regole imposte dalla fluidodinamica.

Le tecniche di produzione ipotizzate inizialmente per la realizzazione della parte, che non possono competere con la produzione dal pieno con tecniche ad asportazione di truciolo, erano le seguenti:

- *Additive Manufacturing:* tecnica innovativa di stampa 3D con materiale metallico che consente la produzione della parte in un pezzo unico con tutte le geometrie e cavità necessarie. Richiederebbe però delle tempistiche eccessive ed un costo altrettanto elevato, nonché delle lavorazioni post-produzione per la rifinitura delle superfici più importanti che aumenterebbero ulteriormente il costo. Da non trascurare poi le dimensioni della parte che non possono essere eccessive.
- *Fusione in stampo e successive lavorazioni per asportazione di truciolo:* anche questa tecnica presenta un costo troppo elevato dal momento che la fusione in stampo viene utilizzata per la produzione in serie di un elevato numero di parti uguali tra loro. Nel caso in questione siamo però davanti ad un pezzo singolo e unico, per il quale bisognerebbe produrre uno stampo apposito che comporterebbe un costo non sostenibile. Da non tralasciare poi le lavorazioni per asportazione di truciolo successive alla stampa come filettature e rifiniture delle superfici interne dei condotti.

### Dimensionamento condotti.

#### Diametro condotti separati di alimentazione:

per quanto riguarda il diametro dei due condotti separati di alimentazione non vi è da svolgere un particolare dimensionamento ma la loro misura è dettata dal diametro dei canali del circuito precedente che collegano le tramogge alla sezione di miscelazione in analisi: 6mm. Questa dimensione viene mantenuta uniforme in modo che il flusso mantenga una velocità costante e non si introducano perdite di alcun genere.

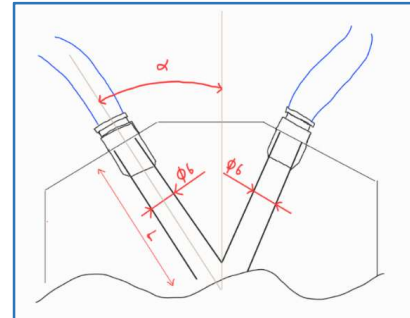


Figura 5.34: Rappresentazione condotti di alimentazione con relativa inclinazione, lunghezza e diametri

#### Inclinazione condotti separati:

Un'altra caratteristica importante per la parte in questione è l'inclinazione dei due condotti di alimentazione: si tratta quindi di definire la variabile  $\alpha$  visibile in figura 5.34. Una prima considerazione che si può fare è che questo angolo non deve essere eccessivamente grande, per esempio  $90^\circ$ , in quanto si andrebbe a formare un raccordo a T. Questa geometria non sarebbe accettabile dal momento che si formerebbe un accumulo di materiale. Inoltre, se venisse richiesta la portata di un singolo materiale, questo potrebbe risalire lungo il secondo condotto dal quale non proviene alcun flusso.

Al fine di determinare l'angolazione ottimale sono necessarie molteplici simulazioni CFD per trovare il parametro che consenta una parziale miscelazione dei flussi e che contenga quanto più possibile le perdite di carico.

Per impostare un'inclinazione iniziale si può fare riferimento all'insorgere di perdite di carico localizzate che dipendono direttamente del fattore  $K_L$ [11]:

$$h_{L,loc} = K_L \cdot \frac{U_m^2}{2 \cdot g} [m]$$

Dove:

- Fattore di perdita:  $K_L$
- Velocità media del flusso:  $U_m \left[ \frac{m}{s} \right]$
- Accelerazione gravitazionale:  $g \left[ \frac{m}{s^2} \right]$

Sulla base di quanto elencato è buona norma mantenere l'inclinazione di questi condotti inferiore al valore di  $45^\circ$  in modo che si riduca il valore di  $K_L$ : si sceglie un'inclinazione di  $\alpha = 35^\circ$ .

Nota: Non essendoci il tempo necessario per l'impostazione di molteplici simulazioni con diverse angolazioni, in questo progetto ci si limita ad analizzare solo due inclinazioni.

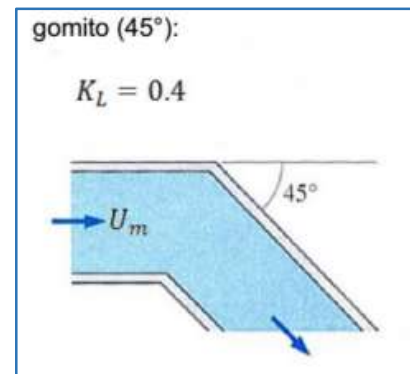


Figura 5.35: Fattore di perdita  $K_L$  per angolo di  $45^\circ$  tratto dal formulario di fluidodinamica

**Diametro raccordo tra condotti:**

Una volta che i due condotti separati convergono in un singolo, al fine di mantenere una velocità costante del flusso e limitare così le perdite di carico e di pressione, si deve calcolare la sezione che consenta di mantenere queste caratteristiche. Per far ciò si introduce la formula che descrive la portata volumetrica:

$$\dot{V} = U_m \cdot A \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (1)$$

È nota l'area di passaggio:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.006^2}{4} = 2.827 \cdot 10^{-5} [m^2]$$

Esplicitando da (1) la sezione:

$$A = \frac{\dot{V}}{U_m} [m^2] \quad (2)$$

Considerando che la portata volumetrica nel raccordo sarà il doppio dal momento che giungono due flussi, e che la velocità media si mantiene costante, si ottiene la sezione ricercata ( $A_1$ ):

$$A_1 = \frac{2 \cdot \dot{V}}{U_m} [m^2] \quad (3)$$

A questo punto si esplicita la velocità media del flusso che è costante:

$$U_m = \frac{\dot{V}}{A} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

Sostituendo poi (4) in (3) si trova la relazione che lega la sezione di ingresso (6mm) con la sezione del raccordo:

$$A_1 = \frac{2 \cdot \dot{V}}{\frac{\dot{V}}{A}} = 2 \cdot A = 2 \cdot 2.827 \cdot 10^{-5} = 5.654 \cdot 10^{-5} [m^2] \quad (5)$$

Dalla formula 5 è ora possibile ricavare il diametro del raccordo ( $D_1$ ):

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5.654 \cdot 10^{-5}}{\pi}} = 8.49 \text{ mm} \approx \mathbf{8.5 \text{ mm}} \quad (6)$$

Dove:

- Portata volumetrica:  $\dot{V} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$
- Diametro condotti di alimentazione:  $D = 6 [mm]$
- Diametro condotto di raccordo:  $D_1 [mm]$
- Sezione dei condotti di alimentazione:  $A [m^2]$
- Sezione del condotto di raccordo:  $A_1 [m^2]$
- Velocità media del flusso:  $U_m \left[ \frac{m}{s} \right]$

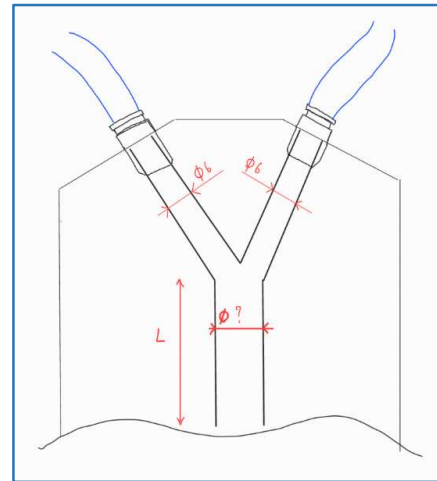


Figura 5.36: Rappresentazione zona di raccordo dei condotti di alimentazione con le grandezze caratteristiche

Realizzando così un condotto con diametro di raccordo di 8.5 mm, i due flussi di materiale differente possono miscelarsi parzialmente quando si incrociano ma hanno anche la possibilità di fluire liberamente senza rallentamenti eccessivi che si avranno invece nelle sezioni successive. Da non trascurare però che si avrà comunque una perdita di carico poiché i condotti di alimentazione variano la loro inclinazione.

### Diametro zona miscelazione

All'interno di questa porzione di condotto verrà alloggiata la griglia di miscelazione. È necessaria, dunque, una sezione maggiore per favorire una miscelazione tra i due flussi e permettergli di attraversare tutti gli stati del miscelatore statico. Si deve dimensionare a dovere la variazione di diametro tra le due parti.

Per un dimensionamento corretto si cerca sempre di limitare le perdite che insorgono con l'aumento di diametro, facendo riferimento alle formule note dalla fluidodinamica.

Si scegliere di avere un valore di  $K_L = 0.275$ , dal momento che influenza direttamente le perdite localizzate, come già anticipato per l'inclinazione dei condotti.

Così facendo si può determinare un valore del diametro maggiore  $D_2$ :

$$\frac{D_1}{D_2} = 0.3 \rightarrow \frac{8.5}{D_2} = 0.3 \rightarrow D_2 = \frac{8.5}{0.3} = 28.3 \text{ mm} \rightarrow \text{si sceglie } D_2 = 30 \text{ mm}$$

Dove:

- Fattore di perdita:  $K_L$
- Diametro condotto precedente all'allargamento graduale:  $D_1 = 8.5 \text{ [mm]}$
- Diametro condotto finale:  $D_2 = 30 \text{ mm}$
- Inclinazione dell'allargamento graduale per mantenere le perdite contenute:  $\vartheta = 20^\circ$

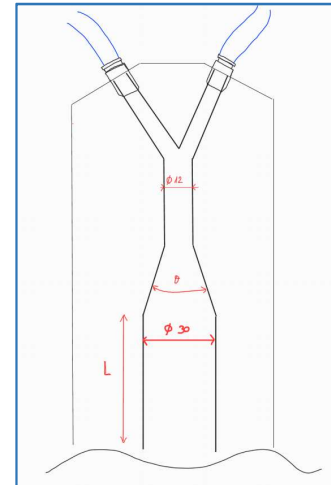


Figura 5.37: Rappresentazione schematica per zona di miscelazione con diametro 30mm

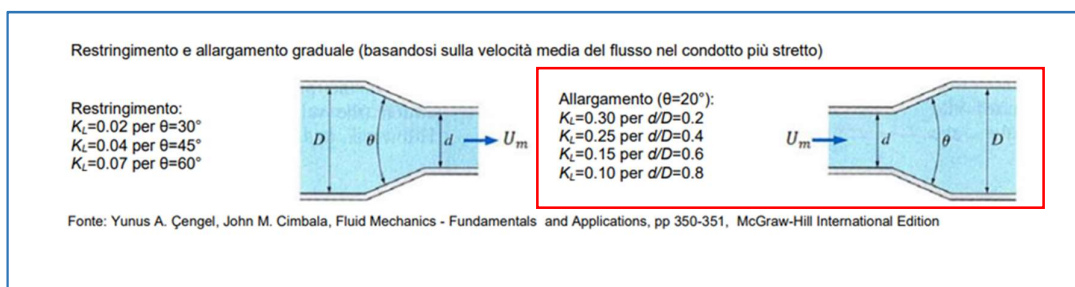


Figura 5.38: Valore del fattore di perdita per allargamento e restringimento di diametro, immagine tratta dal corso di fluidodinamica.

Seguendo questo procedimento si determina un diametro maggiore di 30mm che soddisfa anche la richiesta di avere lo spazio sufficiente per l'inserimento del miscelatore statico e che garantisce un volume sufficiente per la miscelazione. Anche questa sezione può essere ottimizzata con un numero sufficiente di simulazioni CFD che non verranno trattate all'interno di questo progetto.

### *Dimensionamento lunghezza dei condotti:*

Siamo alla ricerca di turbolenza quindi la regione idrodinamica d'ingresso che permette al flusso di svilupparsi completamente può essere trascurata: maggiore turbolenza conduce ad un migliore rimescolamento tra le particelle. Un fattore da tenere in considerazione per quanto riguarda la lunghezza dei condotti sono le perdite di carico distribuite che dipendono direttamente dalla loro lunghezza. Dipendono anche da altri parametri quali densità del fluido, diametro del condotto e velocità media del flusso, che sono però caratteristiche vincolanti e poco manipolabili. Da questo deriva che la loro lunghezza deve essere mantenuta il più ridotta possibile ma deve comunque essere sufficiente ad indirizzare il flusso nella direzione ottimale. Si ipotizzano quindi delle lunghezze che verranno verificate e analizzate successivamente ad una prima simulazione.

## **5.1.4 Geometria raccordo e zona di miscelazione definitiva**

In seguito a tutte le analisi appena presentate si è arrivati a determinare la geometria complessiva che soddisfi la funzione 9.

L'elemento si compone dunque di tre parti connesse tra loro tramite 4 viti di dimensione M4, centrate grazie a spallamenti e la tenuta ermetica viene garantita da 2 O-ring. Queste tre parti sono ottenibili tramite semplici lavorazioni di fresatura e tornitura, mantenendo quindi un prezzo contenuto per la sua produzione. Di seguito la descrizione di ogni componente.

### *Raccordo ad Y*

La prima componente che si incontra nell'assieme per la miscelazione è il raccordo ad 'Y'. Questa parte si ottiene tramite fresatura e foratura di un parallelepipedo di materiale grezzo. Sono presenti due canali inclinati con diametro di 6mm e filettati all'estremità esterna per consentire l'inserimento dell'innesto che permette la connessione dei tubi in gomma con la parte in questione. Successivamente i due condotti di alimentazione convergono in uno unico di diametro 8.5 mm (secondo il dimensionamento nel capitolo precedente) fino al punto in cui è presente un allargamento del diametro dove andrà ad inserirsi la parte successiva. È prevista inoltre la presenza di 4 fori filettati M4 per garantire la tenuta tra le parti. In allegato è possibile visionare il disegno costruttivo 2D.

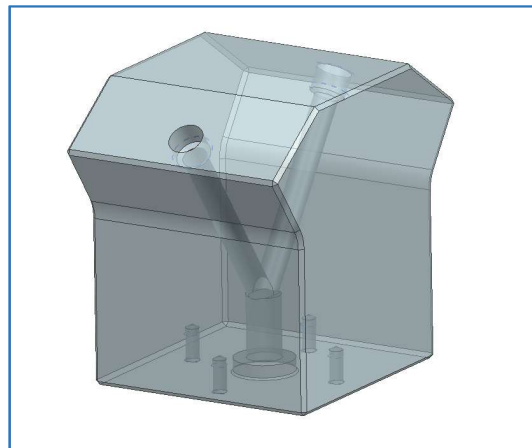


Figura 5.39: Raccordo ad Y, vista tridimensionale in trasparenza per rendere visibili i condotti interni

### Condotto zona di miscelazione

La seconda parte connessa alla precedente è il condotto di miscelazione che ospiterà al suo interno una porzione del miscelatore statico. Questo elemento presenta nella parte superiore uno spallamento per garantire il centraggio con il raccordo precedente ed una scanalatura inferiore per garantire il centraggio con la parte seguente. I diametri interni rispettano le dimensioni stabilite e in testa è presente anche una sede apposita per il posizionamento di una guarnizione toroidale che assicuri la tenuta ermetica di tutta la struttura.

Si sceglie di posizionare un o-ring di dimensioni standard e per uso generale che prede la seguente denominazione: O-Ring ISO 3601-1-116B-18.72x2.62-N-NBR 70 (da VSM[5]). Questo sta ad indicare che l'elemento rispetta tutte le norme standard e possiede una dimensione di 2.62 mm di diametro. Allo stesso modo, anche la cava per il suo posizionamento viene dimensionata secondo le norme indicate da VSM in modo tale che, una volta che avviene l'accoppiamento tra le parti, la guarnizione andrà a deformarsi occupando lo spazio a sua disposizione e garantendo una tenuta stagna.

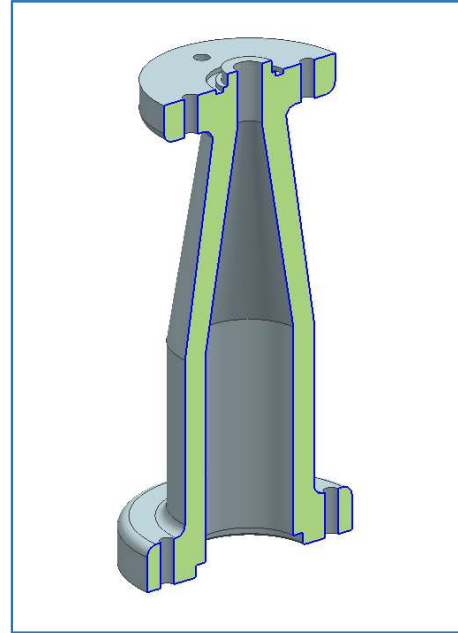


Figura 5.40: Condotto zona di miscelazione, vista tridimensionale in sezione lungo l'asse

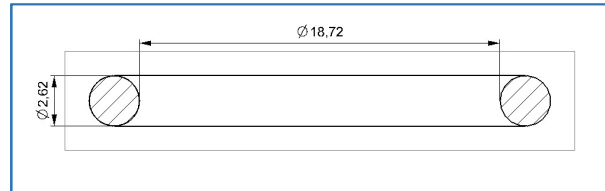


Figura 5.41: Dimensioni standard O-ring tra raccordo ad Y e condotto zona di miscelazione

### Miscelatore statico

A questo punto si incontra poi l'elemento che svolge la funzione principale: miscelare le due differenti polveri metalliche. Questo si compone di una griglia di miscelazione, o anche detto miscelatore statico, che devia il flusso di ogni particella creando una turbolenza che consente un mescolamento tra i flussi provenienti dai due differenti canali di alimentazione. Questo elemento si compone di diversi pezzi ottenuti per tranciatura da lamiere di spessore di 2mm e saldati tra loro come visibile in figura 5.42. Il suo diametro esterno massimo è di 30mm in modo tale che si inserisca con precisione all'interno dei condotti che presentano un'apposita tolleranza per garantire una minima interferenza. Tuttavia, è utile separare i condotti ed il miscelatore statico in modo tale da garantire una semplice manutenzione, pulizia e montaggio. Infatti, il miscelatore non viene saldato all'interno del condotto ma è mantenuto in posizione tramite una vite M4 che si inserisce

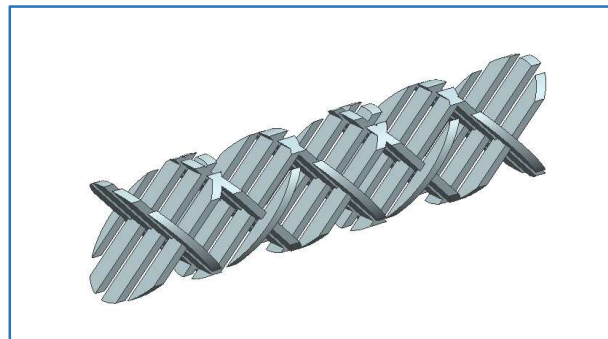


Figura 5.42: Miscelatore statico o griglia di miscelazione

trasversalmente nel condotto, la cui tenuta ermetica è garantita da una guarnizione posta sotto la testa della vite (elemento standard acquistabile, in allegato la scheda tecnica).

In ogni caso la dimensione in lunghezza di questo pezzo è da valutare successivamente ad un numero sufficiente di simulazioni CFD. La parte è inoltre reperibile presso la ditta Sulzer [16] (Sulzer Chemtech Ltd, 8404 Winterthur, Switzerland) con dimensioni e geometria personalizzabili.

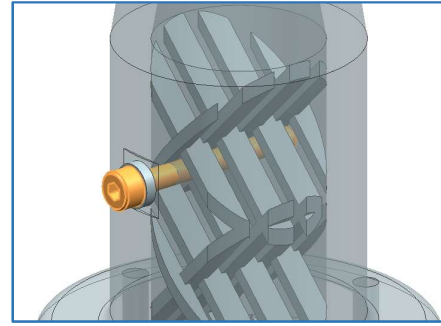


Figura 5.43: Particolare supporto miscelatore statico

#### *Raccordo di uscita zona miscelazione*

Come ultima parte che completa la zona di miscelazione abbiamo un terzo condotto che consente di ritornare ad un diametro di 6mm partendo da quello di 30mm che ospita il miscelatore statico. Questo elemento presenta uno spallamento per consentire il centraggio con il condotto precedente, 4 fori filettati M4 per il collegamento, un'apposita sede per un O-ring ed una filettatura all'estremità inferiore per consentire l'inserimento dell'innesto per il tubo in gomma che porterà la miscela di polvere alla testa di deposizione della macchina DED.

I fori di diametro maggiore presenti all'estremità della parte superiore serviranno per assicurare tutto l'assieme alla struttura principale della macchina.

Anche qui nell'apposita sede si inserisce una guarnizione toroidale di dimensioni standard prese dall'estratto di norme VSM [5] che prende la denominazione seguente: O-Ring ISO 3601-1-131B-42.52x2.62-N-NBR 70.

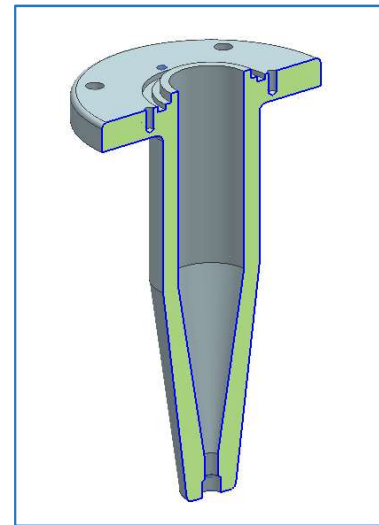


Figura 5.44: Terminale zona di miscelazione

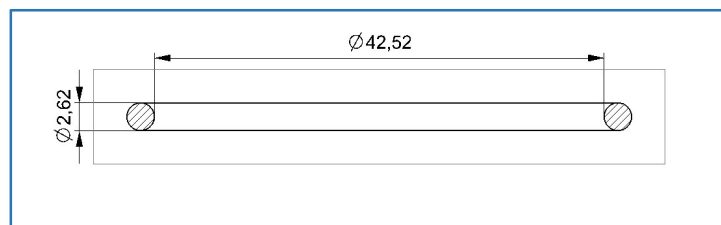


Figura 5.45: Dimensioni standard O-ring tra Condotto miscelazione e raccordo di uscita

Entrambi gli o-ring appena presentati presentano dimensioni normalizzate standard e possono essere acquistati presso il fornitore SKF.



### Supporto assieme di miscelazione

Una volta assemblate tutte le parti si può procedere con la realizzazione del supporto che ne garantisca un fissaggio alla struttura principale della macchina. Per far questo si sfruttano i fori più esterni del raccordo di uscita dalla zona di miscelazione: come anticipato nel paragrafo precedente, all'interno degli appositi fori verranno inserite 4 viti M6 assicurate dalla parte opposta del piano intermedio della struttura tramite 4 dadi.

Al momento del posizionamento di tutto l'assieme si è valutata la possibilità di posizionarlo inclinato rispetto al piano, per consentire ai condotti di gomma in uscita dalla macchina di non presentare curve brusche. Questa variante non è stata però realizzata in quanto, posizionandolo per esempio ad un angolo di  $45^\circ$ , si sarebbero generate importanti curvature nei condotti che collegano le tramogge al raccordo e la forza di gravità che agisce sulle particelle di polvere avrebbe modificato la fluidodinamica del sistema. Posizionarla invece con un'angolazione inferiore non avrebbe portato a miglioramenti particolari per i condotti in uscita ma avrebbe esclusivamente reso più complessa la struttura di supporto.

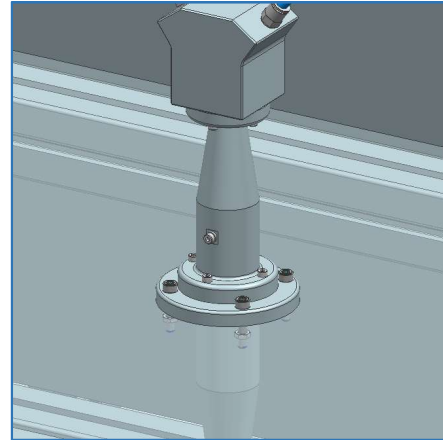


Figura 5.46: Modalità di fissaggio del raccordo ad Y con zona di miscelazione al piano intermedio

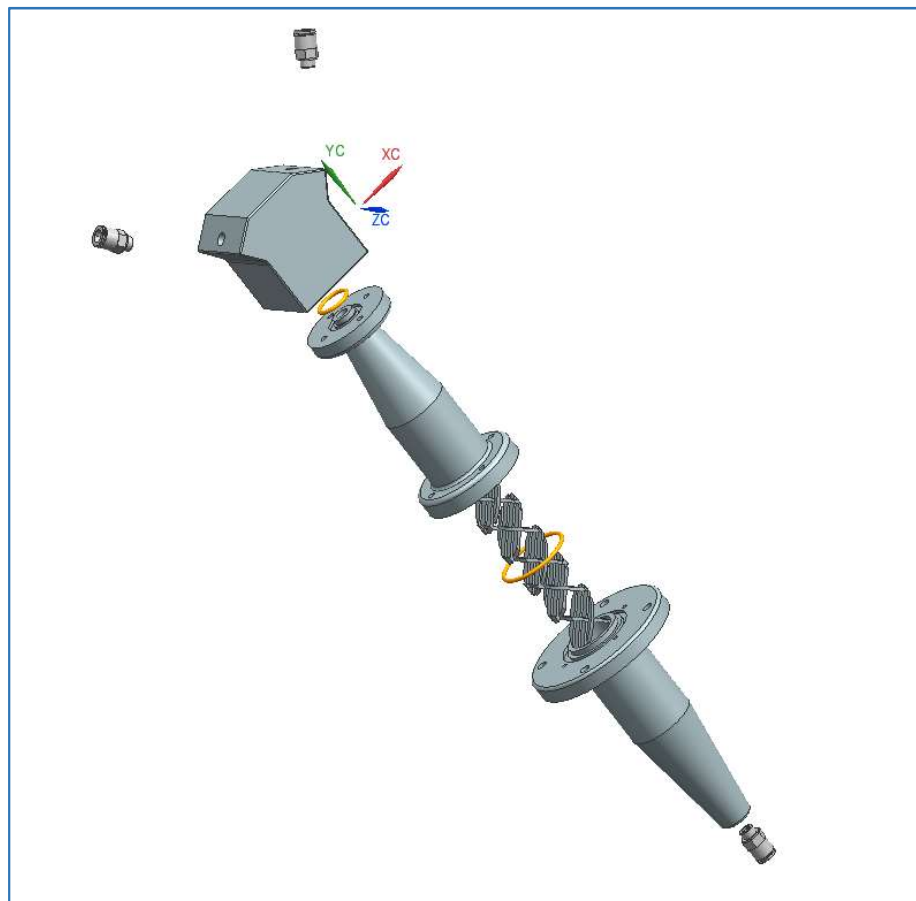


Figura 5.47: Vista in esploso soluzione finale raccordo ad Y più zona di miscelazione

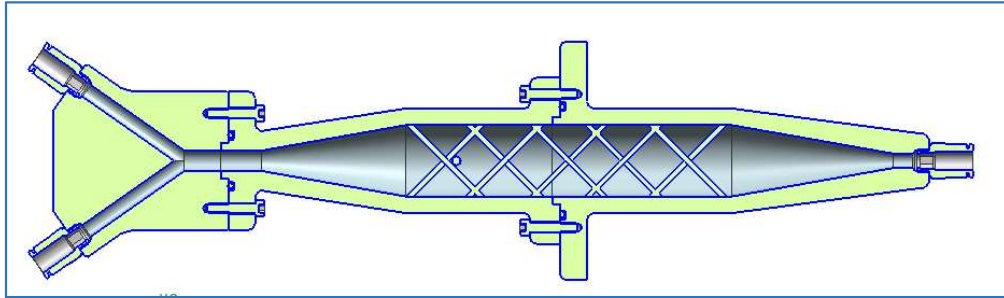


Figura 5.48: vista in sezione dell'assieme finale

### *Materiali del raccordo ad 'Y' con zona di miscelazione*

Definite le geometrie delle parti, si devono analizzare i materiali da utilizzare per la loro produzione. Si sceglie di utilizzare lo stesso per tutte le componenti dal momento che sono accoppiate le une con le altre. Questo ne garantisce la tenuta e ne limita l'usura o il danneggiamento al momento dell'assemblaggio.

La scelta ricade tra due tipologie di materiali già utilizzate per applicazioni di questo genere, anche sulla macchina precedente a singolo feeder:

1. **Acciaio inox:** acciaio inossidabile ottimale per l'applicazione e molto resistente, ma difficile da lavorare;
2. **Alluminio Al-6061:** si tratta di alluminio aeronautico, indubbiamente più leggero e semplice da lavorare ma molto soggetto all'usura.

Si sceglie quindi di utilizzare un acciaio inossidabile poiché non rischia di ossidarsi ed è meno soggetto ad usura rispetto che all'alluminio. Il limite principale dell'alluminio sarebbe appunto quello che, nella sezione di miscelazione dove è presente il miscelatore statico, le particelle che si scontrano ripetutamente contro le pareti potrebbero portare ad un'usura rapida nel tempo. Sarebbe comunque necessaria un'analisi più approfondita per quanto riguarda le interazioni che le polveri metalliche possono instaurare con i materiali dei condotti, ma il tempo a disposizione per il progetto non è sufficiente.

### *Condotti fra tramogge e raccordo*

Indubbiamente importanti da considerare sono i condotti che collegano le tramogge al raccordo, questi devono essere il più ridotti possibili e non devono presentare curvature brusche in modo tale da evitare zone di accumulo o la generazione di turbolenze non desiderate. Di seguito si analizza la loro fattibilità con differenti materiali:

- **Metallici:** vi è il problema del funzionamento della cella di carico, risolvibile magari con un giunto flessibile ma in ogni caso si perderebbe precisione nella misurazione della portata massica.
- **Tubi in materiale polimerico:** come quelli già esistenti, il loro funzionamento è già stato testato ma devono essere il più diretti possibili senza particolari curvature; essendo che la distanza tra l'uscita dalle tramogge l'ingresso nel raccordo è costante, è possibile dimensionare i condotti in modo preciso ed il più lineari possibili. Risulta comunque essere la soluzione migliore da adottare.

Questi condotti devono essere poi collegati al nuovo raccordo, e questo è possibile farlo tramite dei raccordi ad innesto rapido che presentano una filettatura ad un estremo ed un innesto per i tubi polimerici del circuito pneumatico. Essi sono elementi standard acquistabili, con diametro interno lineare delle dimensioni desiderate: in questo caso si necessita un diametro interno di 6mm. Le componenti della zona di miscelazione presentano infatti le filettature necessarie per il loro inserimento, come già anticipato. In allegato è possibile consultare la scheda tecnica.



Figura 5.49: Raccordi ad innesto rapido con diametro interno 6mm

- Fornitore: Festo [7]
- Codice prodotto: 186109

### 5.1.5 Simulazione Fluidodinamica (CFD)

A questo punto, dopo aver creato la geometria, si pone l'obiettivo di verificare teoricamente tramite una simulazione fluidodinamica [6] che il raccordo con la relativa zona di miscelazione funzioni correttamente e che fornisca una miscela omogenea di due polveri differenti, insieme con il gas di trasporto. Per fare ciò si utilizza il software Fluent di Ansys.

Si dovrà simulare il flusso di due polveri trasportate da un gas (Argon) che si uniscono tramite il raccordo e che attraversano la zona di miscelazione con i relativi ostacoli. In uscita dal raccordo ci si aspetta che le due diverse tipologie di particelle siano distribuite in modo regolare nel condotto e che il flusso continui indisturbato il suo percorso. I vantaggi principali offerti dalla Fluidodinamica Computazionale (CFD) sono che consente una visualizzazione dettagliata della situazione in esame, permette di risparmiare tempo rispetto alla creazione di un modello sperimentale, è sicura nell'utilizzo e fornisce delle informazioni e dei risultati completi e dettagliati.

**Nota:** viste le difficoltà già note per l'impostazione di una simulazione multifase, e dopo una prima prova che non ha mai raggiunto la convergenza fisica e numerica, si è deciso con il relatore che le simulazioni tratteranno esclusivamente il flusso di due gas differenti. Dal momento che non viene più replicato ciò che avviene nella realtà, vi è la necessità di determinare quali siano le principali differenze tra simulazione di flussi gassosi e simulazione reale, per poter stimare una percentuale di errore tra le due. Le principali diversità individuate sono che:

- Non si presentano scontri tra particelle solide che possono migliorare o peggiorare la miscelazione;
- Le densità dei flussi sono differenti;
- Seguendo i limiti di prestazione, le portate di solo gas sono troppo ridotte ed i condotti sono eccessivamente grandi: si ottengono quindi numeri di Reynolds e tipologie di flusso molto differenti da quelle effettive. Per avvicinarsi ai regimi di flussi reali si devono impostare delle portate di gas non coerenti con quelle che si avranno con la macchina in funzione, viene quindi variata la fluidodinamica del sistema;
- Con la presenza delle particelle di polvere e mantenendo le stesse portate, le velocità medie dei flussi sono maggiori e anche la loro natura sarebbe totalmente turbolenta;
- Nella realtà le particelle metalliche sono spinte verso il basso anche dalla forza di gravità; quindi, presentano un trasporto agevolato nella zona analizzata;
- I risultati ottenuti non sono attendibili dal punto di vista numerico, sono utili per osservare lo sviluppo dei flussi attraverso gli ostacoli del miscelatore.

Sulla base esclusivamente di queste osservazioni non è possibile determinare la percentuale di errore che si introduce con questa semplificazione. Per farlo è possibile realizzare un modello sperimentale in materiale plastico, che risulta abbastanza veloce da produrre in stampa. Dopo averne verificato il funzionamento sarà possibile stimare la percentuale di errore sulla base di dati numerici forniti dalle simulazioni e dal modello sperimentale.

Proseguendo dunque nelle analisi di flusso monofase, le prime simulazioni sono limitate alla verifica delle variazioni delle caratteristiche geometriche della parte ed alla verifica che avvenga una miscelazione tra i flussi; manterranno sempre come riferimento le portate massime. Le successive, invece, dovranno verificare la corretta miscelazione delle polveri anche con variazioni di portate dei due flussi. Tuttavia, attraverso le simulazioni fluidodinamiche si vuole quindi convalidare:

- L'effettiva miscelazione tra i due flussi, quindi il corretto funzionamento della struttura del miscelatore.
- L'omogeneità della miscela in uscita dal sistema in analisi.
- Le caratteristiche geometriche migliori per la parte quali: inclinazione condotti, lunghezza condotti, diametro zona di miscelazione, lunghezza miscelatore statico.
- Il comportamento in seguito a variazioni di portate delle polveri.

Per fare questo è necessario impostare diverse simulazione nelle quali vengono variati contemporaneamente i diversi parametri del modello per determinare quale sia la configurazione migliore. Ma, dal momento che sarebbe necessario più tempo di quello a disposizione, ci si limita a svolgere le seguenti simulazioni con le seguenti caratteristiche:

- **1<sup>a</sup> simulazione:** per convalidare l'inclinazione dei condotti di alimentazione vengono impostate due analisi con due angolazioni differenti, la prima con un angolo di  $\alpha = 35^\circ$ , come indicato nel dimensionamento del capitolo precedente.
- **2<sup>a</sup> simulazione:** si varia l'angolazione dei condotti di alimentazione ad  $\alpha = 50^\circ$ .
- **3<sup>a</sup> simulazione:** per verificare la miscelazione dei flussi vengono impostate due simulazioni con due lunghezze differenti del miscelatore statico, una il doppio dell'altra.  $L_1 = 135 \text{ mm}$ .
- **4<sup>a</sup> simulazione:** si svolge con la variazione di lunghezza del miscelatore:  $L_2 = 67.5 \text{ mm}$ .

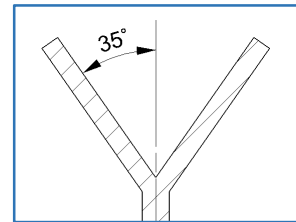


Figura 5.50: Particolare angolazione condotti di alimentazione per prima simulazione

### Impostazione simulazioni: Pre-processing

Per prima cosa è importante definire il dominio computazionale, ovvero la regione dello spazio interessata dal flusso, all'interno della quale verranno risolte le equazioni del modello: in questo caso risulta il volume interno dell'intero raccordo, visibile in sezione in figura 5.48. La parte in analisi risulta essere sufficientemente semplice nel suo volume interno e non sono necessarie semplificazioni sulla sua geometria. Sono necessarie però semplificazioni ed assunzioni per quanto riguarda il dominio computazionale in modo tale da ridurre la complessità del calcolo in quanto, effettuare una simulazione sull'intero pezzo in tre dimensioni, richiederebbe una potenza di calcolo che non si ha a disposizione.

#### Griglia computazionale: la mesh

Si deve discretizzare la sezione in cui scorrono i nostri flussi, quindi il volume interno dei condotti. Le pareti esterne restano semplicemente di contorno e la zona di miscelazione verrà rappresentata da semplici pareti indeformabili le cui caratteristiche non sono influenti per la simulazione.

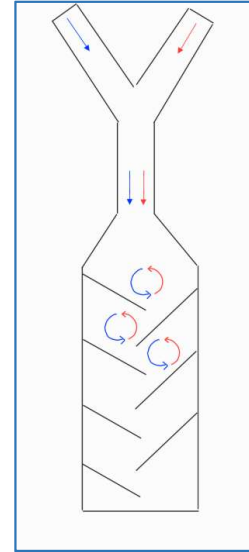


Figura 5.51: Esempio di possibile dominio computazionale in 2D

- Tipologia di griglia: si sfrutta un metodo di meshatura automatico imponendo una dimensione degli elementi. Si ottiene una griglia di tipo tetraedrico. Essendo un condotto all'interno del quale scorre un fluido, per la condizione di non scorrimento si genera uno strato limite a parete che si vuole replicare in modo corretto all'interno della simulazione. Quindi è fondamentale inserire un infittimento (Inflation) a livello delle pareti dei nostri condotti.
- Qualità della griglia: una volta creata la griglia computazionale del volume in analisi si deve effettuare un controllo della sua qualità facendo riferimento principalmente a 2 parametri:
  - *Skewness*: questo parametro indica la deformazione delle celle rispetto ad una cella di riferimento equilatera. Il suo valore è compreso tra 0 e 1. Dove 0 indica un ottimo valore (nessuna deformazione) ed 1 rappresenta un pessimo risultato.

0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00
Excellent	very good	good	acceptable	bad	Unacceptable

Figura 5.52: Intervalli di qualità della mesh sulla base del parametro di Skewness tratti dal corso di CFD

- *Aspect ratio*: questo fattore invece rappresenta il rapporto tra il lato di lunghezza massima di un elemento ed il lato di lunghezza minima, sta quindi ad indicare l'allungamento delle celle. Si è in presenza di un valore accettabile quando ci si trova al di sotto del valore di 100.

Questi passaggi per la creazione e controllo della mesh devono essere svolti per tutti i modelli che si desidera analizzare. Per quanto riguarda la Skewness e l'Aspect ratio, in ogni modello si ricade in un intervallo di valori accettabili.

#### Fluent: modelli impostati

Una volta discretizzato in tanti piccoli elementi il nostro dominio computazionale si può passare al software che consentirà di simulare il problema in analisi: Fluent. Come prima cosa dopo l'avvio si devono definire i modelli di interesse, ovvero le equazioni che il programma andrà a considerare al momento della simulazione. Nel nostro caso siamo interessati principalmente ad osservare come si

evolve il flusso all'interno dei condotti e non sono quindi necessari particolari modelli se non quello riguardante l'energia, le diverse specie presenti e la turbolenza. Si deve descrivere infatti in modo corretto la turbolenza dal momento che siamo interessati ad analizzare che questo fenomeno crei rimescolamento tra le particelle. Per flussi turbolenti in ingresso bisogna specificare l'energia cinetica turbolenta ( $k$ ) e la velocità di dissipazione turbolenta ( $\epsilon$ ). Questo è possibile farlo con diverse modalità, nel nostro caso si sfrutta il metodo per il quale serve specificare:

- L'intensità della turbolenza: 5% (per un flusso completamente sviluppato in un condotto).
- Il diametro idraulico: 6mm (diametro dei condotti in ingresso).

Il modello riferito alle specie serve invece per l'impostazione di due flussi di materiale differente, nel nostro caso siamo in presenza di due flussi gassosi.

### Natura del flusso

Per l'analisi si imposta comunque il modello per risolvere la turbolenza che ci si aspetta nella porzione del miscelatore statico ma si deve determinare la natura del flusso. Si deve stabilire se a livello degli Inlet ci troviamo in presenza di un regime Laminare o Turbolento: questo lo si determina calcolando il numero di Reynolds. In base al valore calcolato di questa grandezza adimensionale si determina la tipologia di flusso paragonandolo con i seguenti intervalli:

$$Re \begin{cases} \leq 2300 & \text{flusso laminare} \\ \leq 4000 & \text{flusso di transizione} \\ \geq 4000 & \text{flusso turbolento} \end{cases}$$

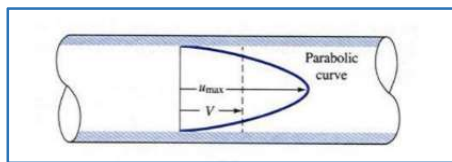


Figura 5.54: Profilo di velocità flusso laminare

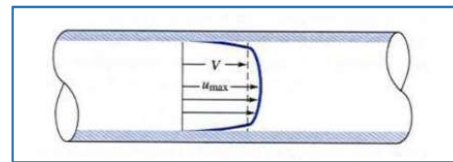


Figura 5.53: Profilo di velocità flusso turbolento

Per il calcolo di questo valore si utilizza la seguente formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_m \cdot D}{\mu} \quad [\ ]$$

Con:

- $\rho$ : densità del fluido  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- $U_m$ : velocità media del flusso  $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $D$ : diametro del condotto  $[m]$
- $\mu$ : viscosità dinamica  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

Per questa analisi siamo in presenza di due flussi differenti che giungono rispettivamente dall'Inlet 1 e dall'Inlet 2. Bisogna verificare per entrambi in che regime ci troviamo. Tuttavia, per lo scopo di questa componente è ricercato un regime di flusso turbolento che consenta una miscelazione tra le diverse particelle. Il numero di Reynolds lo si calcola facendo riferimenti al gas di trasporto: gas *Argon*. Per via della semplificazione introdotta di simulare esclusivamente il flusso di due gas senza la presenza della seconda fase solida delle polveri, si sceglie una seconda sostanza gassosa: *aria*.

Nota: i valori specifici per le sostanze sono tratti dal database dei materiali di Fluent.

- **Calcolo numero Re inlet 1: Argon**

Di questo flusso è nota la portata volumica che può essere impostata dall'operatore e dalla quale è possibile ricavare la velocità media di scorrimento. Le altre caratteristiche sono tutte note. Secondo la portata massima possibile specificata nel quaderno dei compiti di 20 l/min in uscita, avremo quindi 10 l/min per ogni Inlet, da qui il calcolo delle velocità medie.

Data quindi la portata volumica:

$$\dot{V} = 10 \left[ \frac{l}{min} \right] = 10 \cdot \frac{10^{-3}}{60} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 1.67 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (1)$$

E noto che:

$$\dot{V} = U_m \cdot A \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (2)$$

Si determina l'area del condotto di ingresso:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.006^2}{4} = 2.827 \cdot 10^{-5} [m^2] \quad (3)$$

Infine, è possibile calcolare la velocità media del flusso nel condotto iniziale:

$$U_m = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1.67 \cdot 10^{-4}}{2.827 \cdot 10^{-5}} = 5.89 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

Dove:

- Diametro condotti:  $D = 6 [mm]$
- Portata volumica:  $\dot{V} = 1.67 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$
- Sezione dei condotti:  $A = 2.827 \cdot 10^{-5} [m^2]$
- Velocità media del flusso:  $U_m \left[ \frac{m}{s} \right]$

Conoscendo il valore della densità è ora possibile calcolare il numero di Reynold per il flusso di Argon:

$$\rho_{Ar} = 1.6228 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\mu_{Ar} = 2.125 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

$$U_{m,Ar} = 5.89 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$D = 0.006 [m]$$

$$Re_{e,Ar} = \frac{\rho_{Ar} \cdot U_{m,Ar} \cdot D}{\mu_{Ar}} = \frac{1.6228 \cdot 5.89 \cdot 0.006}{2.125 \cdot 10^{-5}} = 2698.81 \Rightarrow \text{flusso di transizione}$$

- **Calcolo numero Re inlet 2: Aria**

Anche per questo flusso sono note tutte le caratteristiche necessarie:

$$\rho_{air} = 1.225 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\mu_{air} = 1.7894 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

$$U_{m\_air} = U_{m\_Ar} = 5.98 \left[ \frac{m}{s} \right] \text{ (stessa velocità poichè stessa portata per le prime simulazioni)}$$

$$D = 0.006 [m]$$

$$Re_{air} = \frac{\rho_{air} \cdot U_{m\_air} \cdot D}{\mu_{air}} = \frac{1.225 \cdot 5.98 \cdot 0.006}{1.7894 \cdot 10^{-5}} = 2456.3 \Rightarrow \text{flusso di transizione}$$

Si osserva che facendo riferimento alle portate massime di gas richieste dalla macchina la natura dei flussi ricade nell'intervallo di transizione, ma comunque più tendente alla tipologia laminare. Questo però non è ciò che si vuole dalla simulazione e non è ciò che si presenta nella realtà con la presenza delle polveri. Per avvicinarsi quanto più possibile al modello fisico corretto sarà necessario aumentare le portate di gas al di sopra dei valori limiti dettati dalle prestazioni della macchina. Ciò nonostante, anche nel reale funzionamento della macchina può essere richiesto un apporto di polvere miscelata molto ridotto che potrebbe far rientrare il flusso in un regime laminare. Tramite le simulazioni si vuole verificare che anche in questo caso il miscelatore statico svolga al meglio la sua funzione senza permettere ai flussi laminari di seguire esclusivamente il loro corso. Nel prossimo capitolo, con le condizioni al contorno per gli ingressi, verranno specificate le diverse portate con cui si vorrà simulare la parte al computer.

### Condizioni al contorno (Boundary Condition)

Di fondamentale importanza risultano essere le condizioni al contorno da inserire nell'impostazione della simulazione, sulla base dei dati in nostro possesso e sulla base di ciò che ci si aspetta di osservare. Si devono definire queste condizioni per diversi casi in modo tale da verificare con diverse situazioni che la miscelazione delle polveri avvenga correttamente.

Le condizioni al contorno sono richieste per le risoluzioni delle equazioni del modello matematico, vengono applicate alle facce del modello e definiscono le direzioni del moto fluido, i flussi di massa, i flussi di quantità di moto e quelli di energia in ingresso nel dominio computazionale.

- Per prima cosa si deve determinare se siamo in presenza di un **flusso Interno o Esterno**: in questo caso ci troviamo con un flusso interno, ovvero confinato all'interno di pareti solide (external-wall).
- Questo flusso interno presenta poi due zone di ingresso: gli **Inlet**. Per quanto riguarda gli ingressi è necessario specificare la condizione presente su questa faccia; quindi, per il nostro caso di flussi incomprimibili ( $\rho$ =costante), si imposta una condizione di tipo 'velocity inlet'. Sarà dunque necessario specificare la velocità dei due flussi in ingresso al raccordo, il software determinerà indirettamente le portate.  
Per fare questo è necessario analizzare con cura le portate di gas e polveri richieste dalla macchina DED. In uscita finale dalla macchina è richiesta infatti una portata di materiale e di gas fissa e costante: da questo dipende l'impostazione delle portate dei singoli condotti di alimentazione.



Come si è già anticipato, per le prime simulazioni si farà riferimento esclusivamente alle quantità massime:

- La portata volumica massima del gas vettore è di 20 l/min in uscita dalla macchina;
- La portata volumica massima di polvere miscelata in uscita deve essere di 60 cm<sup>3</sup>/min.

Da ciò ne deriva che, per la legge della conservazione della massa in un flusso stazionario, da ogni condotto di alimentazione del raccordo potranno passare al massimo:

- 10 l/min di gas di trasporto (argon);
- 30 cm<sup>3</sup>/min di polvere metallica.

Bisogna prestare attenzione a queste portate in quanto sono strettamente collegate tra loro e variarne una delle due comporta una variazione dell'altra. Questo perché, se diminuisco la richiesta di portata di materiale, deve diminuire la portata del gas di trasporto per mantenere il bilancio delle portate in uscita costante. Infatti, nell'arco di tempo in cui la macchina è in funzione possono essere variate le percentuali di polvere che si vogliono depositare. Di conseguenza si deve regolare anche il flusso carrier gas, altrimenti non si ottiene in uscita la portata richiesta, che comporterebbe dei problemi nella lavorazione. Per l'applicazione non è importante la quantità di gas di trasporto che giunge alla testa di deposizione ma è fondamentale la quantità di polvere metallica che giunge in uscita.

Se per esempio in out si ricercano 60 cm<sup>3</sup>/min di materiale da processare, con una composizione di 50% di un materiale e 50% dell'altro non si avrà nei rispettivi inlet la stessa quantità di polvere. Questo in quanto i materiali presentano un peso specifico differente e quindi ognuno ha bisogno di una determinata quantità di gas per essere trasportato alla stessa velocità del secondo materiale.

In seguito a delle prime simulazioni in cui si facevano scorrere le stesse quantità di gas, si è potuto osservare con chiarezza che in uscita dal miscelatore non vi era la presenza di entrambi i fluidi nelle stesse quantità. Si osserva però la presenza di una maggiore quantità del fluido che presenta la densità maggiore. È stata impostata poi una simulazione con due gas aventi simili densità (aria e ossigeno) e si è potuto confermare quanto indicato: in uscita si sono trovate due concentrazioni quasi congruenti tra loro.

Da questo si può dedurre che la polvere metallica con la densità inferiore avrà bisogno di una portata maggiore per arrivare all'output in una miscela bilanciata. Negli sviluppi futuri sarà importante verificare questo comportamento regolando opportunamente le portate per trovare il risultato che soddisfi le nostre richieste.

Sulla base delle impostazioni con le portate al valore estremo, nelle simulazioni successive si potranno mantenere tutte le Boundary Condition uguali, ma si ricalcoleranno le velocità sulla base delle nuove portate impostate. Facendo sempre riferimento a due flussi esclusivamente gassosi che si rimescolano, si deve verificare la corretta miscelazione con le seguenti caratteristiche indicate in tabella 5.40 per tre simulazioni. Però, come già anticipato nel calcolo del numero di Reynold, le portate di solo gas non sono realistiche ed il regime del loro flusso è praticamente laminare. Partendo da questa osservazione si decide di impostare una portata volumica che risulta essere 2.5 volte di quella massima indicata nel quaderno dei compiti. Così facendo si è certi di avere un regime turbolento con le prime due simulazioni. In seguito, con la riduzione di portata richiesta in uscita e la riduzione della portata di uno dei due materiali come nella terza simulazione indicata in tabella 5.40, si potrà verificare il comportamento del miscelatore quando uno dei due flussi, oppure entrambi, entrano in regime laminare.

Le impostazioni indicate nella seguente tabella sono da inserire nelle simulazioni successive alle prime 4 già presentate per la verifica delle caratteristiche geometriche della parte.

Tabella 5.40: Condizioni al contorno di inlet per tre diverse simulazioni

Simulazione	Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Composizione	Portata [m <sup>3</sup> /s]	Velocità [m/s]	Temperatura [°C]
1	Gas inlet 1: Argon	1,6228	50%	4,175*10 <sup>-4</sup>	14,77	25
	Gas inlet 2: Aria	1,225	50%	4,175*10 <sup>-4</sup>	14,77	25
2	Gas inlet 1: Argon	1,6228	70%	5,845*10 <sup>-4</sup>	20,676	25
	Gas inlet 2: Aria	1,225	30%	2,505*10 <sup>-4</sup>	8,861	25
3	Gas inlet 1: Argon	1,6228	90%	7,515*10 <sup>-4</sup>	26,583	25
	Gas inlet 2: Aria	1,225	10%	8,35*10 <sup>-5</sup>	2,954	25

Nota: le percentuali di composizione indicata fanno direttamente riferimento alla portata massima richiesta in uscita:  $8.35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Quando si indica per esempio il 70% di un materiale, è sempre scalato in riferimento alla portata massima, in quanto la somma in uscita deve sempre essere la stessa richiesta dalla macchina. Da notare anche che per il calcolo delle velocità si sono sfruttati gli stessi calcoli usati precedentemente nel calcolo del numero di Reynold.

Con la simulazione 1 si vuole osservare se in outlet del condotto si ritrova una miscela con una distribuzione omogenea delle concentrazioni dei due fluidi.

Con la simulazione 2 si ricerca in output una miscela con una maggiore concentrazione di un fluido rispetto all'altro.

Con la terza simulazione, invece, si vuole osservare se avviene una miscelazione anche con una grossa differenza di concentrazioni dei due materiali. In questo caso sarà possibile verificare anche il comportamento del miscelatore quando uno dei due flussi è in regime laminare; infatti, il flusso di aria con le proprietà indicate in tabella presenta una bassa velocità ed una tipologia di flusso laminare.

Per quanto riguarda la temperatura non si sono introdotte particolari considerazioni poiché non si hanno tutti i dati a disposizione e non si è interessati a valutare gli scambi di calore o energia a questo punto della progettazione. Si mantiene quindi la condizione ambientale a livello standard, con una temperatura di 25° C ed una pressione di 100KPa.

Dal momento che le portate impostate sono le stesse ed anche le dimensioni dei condotti, entrambi gli inlet avranno la stessa velocità media del flusso per una prima simulazione.

È buona norma, al momento della simulazione, posizionare gli ingressi ad una debita distanza da ostacoli per evitare il rischio di soluzioni fisicamente non accettabili: in generale per flussi turbolenti serve una distanza dal primo ostacolo di circa dieci volte il diametro del canale.

È utile anche verificare che siamo in presenza di un flusso incomprimibile, per far ciò deve valere che il numero di mach sia inferiore a 0.3. Riferendosi quindi alla velocità massima dei tre casi:

$$\text{Mach} < 0.3 \rightarrow \text{Mach} = \frac{U_m}{c} = \frac{26.583}{343} = 0.077 [/]$$

Dove:

- Velocità media del flusso:  $U_m \left[ \frac{m}{s} \right]$
- Velocità del suono nel fluido:  $c = 343 \left[ \frac{m}{s} \right]$

- Proseguendo nella definizione delle condizioni al contorno, Il dominio computazionale presenta poi una singola zona di uscita: **Outlet**. Per questa condizione al contorno non sono noti valori di velocità o portata del flusso; quindi, si può definire come 'Pressure outlet'. Questa tipologia di outlet richiede l'inserimento della pressione relativa in uscita che dipenderà dalla lunghezza dei condotti presenti dopo la zona di miscelazione. Monitorando poi la pressione nella sezione d'ingresso del miscelatore saremo in grado di conoscere direttamente quella che sarà la caduta di pressione del flusso attraverso il componente.

Per determinare la pressione relativa a livello dell'outlet ( $p_{gauge}$ ) è stato deciso con il cliente di considerare la presenza di 10m di tubo con diametro interno di 6mm. In corrispondenza di questo punto non siamo però a conoscenza dei valori necessari per il calcolo analitico della caduta di pressione poiché siamo in presenza di una miscela di due fluidi non prevedibile nella sua composizione. Mancano i valori specifici per la densità, la velocità e la viscosità dinamica del fluido. Per risolvere questo problema si è utilizzato un calcolatore reperibile online che determina la caduta di pressione in un condotto sulla base di: portata, lunghezza del condotto, pressione di esercizio e diametro interno della tubazione. Il calcolatore è apposito per compressori, quindi il fluido interessato è aria, la cui densità rappresenta un'ottima approssimazione rispetto ai fluidi di nostro interesse nel miscelatore.

Figura 5.55: Interfaccia del calcolatore reperito online

Inserendo i dati richiesti:

- Portata:  $\dot{V} = 20 \left[ \frac{l}{min} \right] = 20 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{m^3}{min} \right] = 0.02 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$
- Lunghezza nominale:  $L = 10 [m]$
- Pressione di esercizio assoluta:  $p = 1 [bar]$
- Diametro interno della tubazione:  $D = 6 [mm]$

Si ottiene che la perdita di pressione sarà:  $p_{gauge} = 0.08 [bar]$

Il calcolatore si trova al seguente link: <https://it.kaeser.com/servizi/esperienza-e-know-how/calcolatore/calco-di-pressione/>.

Importante per la convergenza della simulazione è la posizione del nostro Outlet: esso, infatti, deve essere posizionato a debita distanza dall'ultimo ostacolo presente all'interno del condotto affinché la turbolenza che ci si aspetta in questa zona non causi un flusso contrario. Il fenomeno che si vuole evitare è il così detto 'Backflow' ed è possibile limitarlo concedendo al flusso lo spazio necessario affinché si sviluppi completamente e scorra in un'unica direzione.

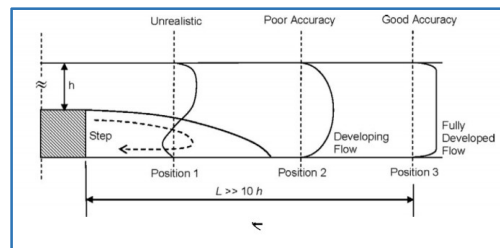


Figura 5.56: Rappresentazione sezioni migliori per il posizionamento dell'outlet rispetto ad ostacoli

Questo è un aspetto importante da considerare per la simulazione al momento della definizione delle condizioni al contorno e sarà poi importante considerare le porzioni di condotti che seguono il miscelatore statico anche nel modello reale.

Di norma si deve impostare la lunghezza del condotto dopo l'ultimo ostacolo di almeno 10 volte più grande dell'ultima sezione di passaggio, come rappresentato in figura 5.56.

- **Condizioni alla parete:** per la simulazione siamo interessati a risolvere lo strato limite trattandosi di un flusso all'interno di un condotto; quindi, il software inserisce automaticamente le condizioni di non scorrimento (no slip) alla parete sulla base del numero di Reynolds. Questo significa che la velocità tangenziale del fluido è uguale a quella della parete e la velocità normale alla parete è nulla.

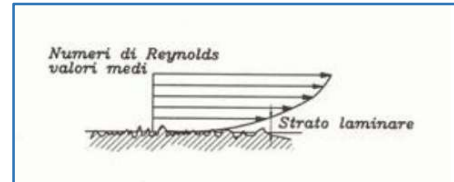


Figura 5.57: Rappresentazione generica di un flusso a parete

- **Condizione di simmetria:** con la geometria realizzata ci troviamo in presenza di una simmetria sia geometrica che fisica; quindi, è possibile specificare al software quale sia la faccia dove posizionare le condizioni per la simmetria. A livello visivo sarà come una semplice parete, ma a livello di calcolo il programma riconosce la zona come se fosse nel mezzo del flusso e le dedica i valori di conseguenza. Con questa condizione è possibile dimezzare il dominio computazionale e ridurre così il peso computazionale della simulazione. Come visibile in figura 5.58 la geometria è simmetrica rispetto al piano XY.
- Oltre alle pareti solide esterne sono presenti altre **pareti solide all'interno (internal-wall)** del volume in cui scorre il flusso: sono gli ostacoli dovuti al miscelatore statico. A questi elementi non si devono assegnare particolari parametri ma devono essere definite come pareti solide indeformabili all'interno del percorso.

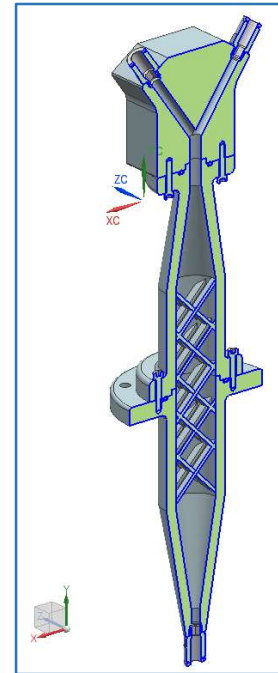


Figura 5.58: Vista in sezione di assieme raccordo ad Y più zona di miscelazione

### Prima simulazione: analisi risultati simulazione

Con la prima simulazione, come già indicato, si voleva studiare l'inclinazione dei condotti di alimentazione ( $35^\circ$ ) e allo stesso tempo è stato possibile visualizzare come il miscelatore di lunghezza massima svolgesse la sua funzione.

- Per prima cosa si verifica che la simulazione abbia senso fisico; quindi, si controlla il bilancio di massa in ogni parte del dominio: si osserva un valore molto basso rispetto ai flussi che caratterizzano la nostra analisi, il che conferma la conservazione. Per la conservazione di energia si verifica il 'total heat transfer rate' che anch'esso risulta molto basso nell'ordine di  $10^{-5}$  e si rivela quindi corretto. Questo controllo è necessario per ogni simulazione.
- Osservando il flusso nei condotti lineari prima del miscelatore si deduce che la velocità si mantiene costante come desiderato, ed il flusso scorre linearmente senza ricircoli particolari. Si potrebbe dunque provare a ridurre la loro lunghezza in una simulazione successiva.

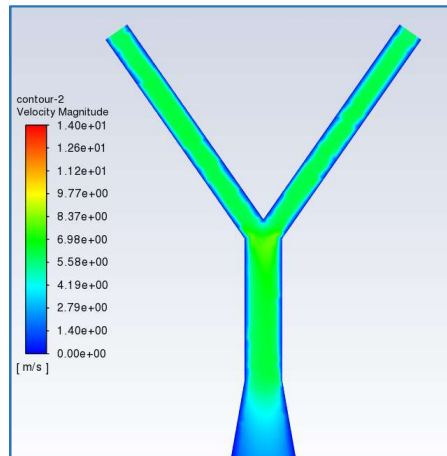


Figura 5.59: Profilo di velocità sul piano di simmetria dei condotti

- Osservando poi le linee di flusso è possibile confermare che avviene una miscelazione tra i fluidi: infatti nella zona di incontro della griglia di miscelazione si osserva un chiaro rimescolamento e una chiara turbolenza. Isolando poi le linee di flusso delle due sostanze è possibile confermare ancora che il loro percorso venga deviato e che si mescoli con quello proveniente dal secondo inlet (figura 5.61 e 5.62).

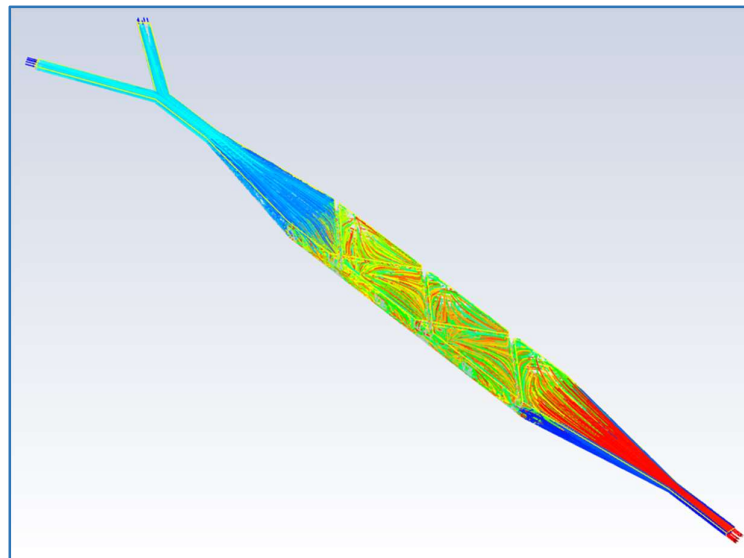


Figura 5.60: Linee di flusso delle due sostanze, visibile zona di turbolenza e rimescolamento in corrispondenza del miscelatore statico

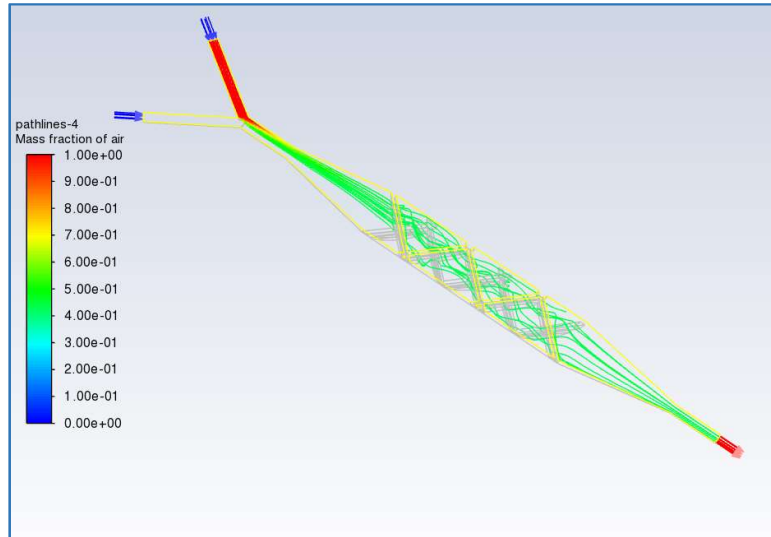


Figura 5.61: Percorso delle particelle del flusso di aria proveniente dall'inlet-2

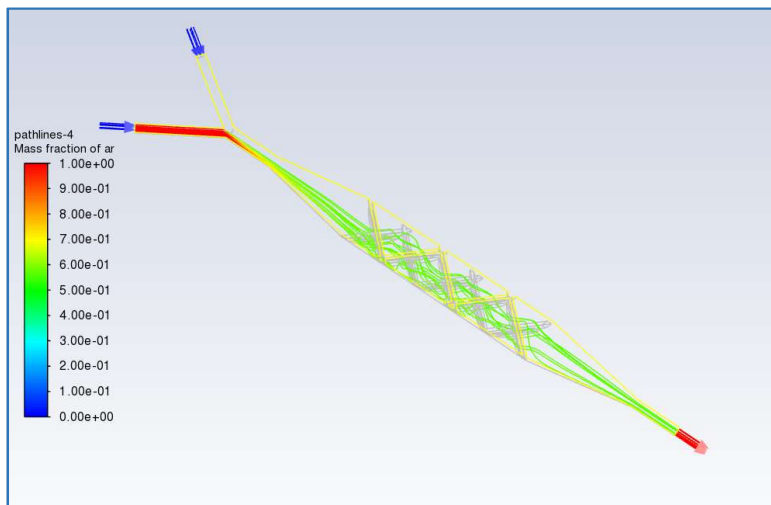


Figura 5.62: Percorso delle particelle del flusso di argon proveniente dall'inlet-1

- Nella zona centrale dove è presente il miscelatore ci sono delle importanti perdite di carico che rallentano il flusso, come ci si aspettava. Il flusso procede comunque nel suo percorso fino a quando il diametro si riduce a 6mm dove subisce un'importante accelerazione. Per limitare parte delle perdite si potrebbe provare a ridurre la sezione del miscelatore statico insieme con quella dei condotti in questa zona. In questo modo ci sarebbe una minore diminuzione della velocità del flusso, ma non è garantita a priori una buona miscelazione.
- Il problema principale è però nelle differenze tra la simulazione di due flussi gassosi e la simulazione di due polveri trasportate da gas. Con queste simulazioni ci si limita ad osservare se il miscelatore statico svolge correttamente la sua funzione di creare una turbolenza e rimescolare i flussi.
- Si può osservare però che in uscita si trova una maggiore quantità di argon rispetto al secondo gas, l'aria. Infatti, considerando il risultato della quantità di superficie occupata da ciascun gas in uscita si ottiene:
  - Superficie occupata da aria:  $5.981626 \cdot 10^{-6} [m^2]$
  - Superficie occupata da argon:  $7.924051 \cdot 10^{-6} [m^2]$

Da questo si può constatare che la quantità di una specie presente in uscita dipende anche dalla densità delle sostanze. Per avere quindi una portata costante in uscita ed una distribuzione delle polveri ricercata, è importante fare riferimento alla densità delle polveri per avere una miscela omogenea in uscita.

- In uscita è richiesta alla testa di deposizione una portata fissa di 20l/min: analizzando il risultato corrispondente della portata volumica a livello della superficie di uscita del dominio computazionale è possibile confermare quanto richiesto.

### Seconda simulazione: analisi risultati simulazione

Come seconda analisi si è variata l'inclinazione dei condotti di alimentazione portandola da un angolo di 35° ad uno di 50° con lo scopo di verificare se sia meglio aumentare o ridurre questa angolazione.

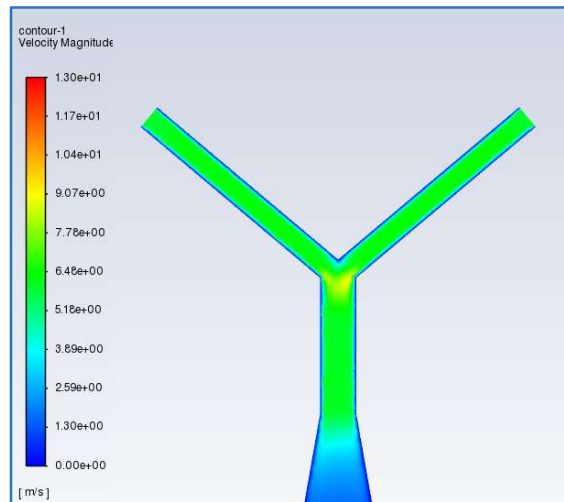


Figura 5.63: Profilo di velocità in corrispondenza del piano di simmetria per la geometria del raccordo con inclinazione di 55° rispetto alla verticale

In seguito all'analisi dei risultati e osservando in particolare il profilo di velocità nella zona centrale del dominio computazionale, si può osservare una piccola zona di accelerazione in corrispondenza dell'incontro tra i due flussi. Questo fenomeno non è ricercato e non si verificava con l'angolazione precedente di 35°. Si può affermare dunque che è meglio tenere un'inclinazione minore e provare in simulazioni successive a ridurla ulteriormente per ricercare quella ottimale.

### Terza simulazione: analisi risultati simulazione

Con la terza simulazione si voleva verificare la miscelazione con un miscelatore statico di dimensioni ridotte. Tutte le impostazioni sono rimaste le stesse per quanto riguarda portate e condizioni al contorno. L'unica variazione effettuata è stata appunto a livello della geometria e quindi della mesh. La griglia di miscelazione è stata dimezzata ma i condotti sono comunque stati mantenuti delle stesse dimensioni. Al momento della soluzione si sono riscontrati però alcuni problemi ed il processo non ha mai raggiunto la convergenza numerica e fisica.

### Convalidazione variante

Posteriormente alla determinazione della variante migliore per questa funzione e alla verifica teorica tramite simulazione del suo funzionamento, è fondamentale determinare un metodo oggettivo e universale per la convalidazione di tale scelta. Si deve infatti presentare una modalità attraverso la quale è possibile affermare con certezza, una volta realizzata praticamente la parte, che la variante ottenuta funzioni. I punti principali da verificare che garantiscano che la scelta di questo metodo di miscelazione funzioni al meglio sono tre:

- *Portata costante*: in uscita dal raccordo si deve avere una portata costante, niente deve rallentare od ostruire il flusso;
- *Miscelazione omogenea*: in uscita dalla macchina si deve avere una miscela di polveri il quanto più possibile omogenea;
- *Velocità di risposta*: quando si cambiano le percentuali delle polveri durante il processo, il raccordo deve fornire una miscela in uscita con le proporzioni variante il più velocemente possibile.

### Portata costante

Al fine di verificare che il sistema eroghi una portata di polvere miscelata costante è possibile effettuare dei test di prova azionando la macchina e raccogliendo la polvere in uscita prima della testa di deposizione scollegando i canali di alimentazione. Essendo già stato testato ed utilizzato, è possibile sfruttare il metodo di verifica che si utilizza per monitorare la portata della macchina con un singolo feeder: la procedura può essere mantenuta la medesima, anche se la raccolta delle polveri avviene successivamente al passaggio attraverso il raccordo. (Vedi capitolo 5 del documento 'Powder feeder' in allegato: Appendix: Powder test report).

Il metodo di prova adottato consiste nell'acquisizione dello scarico di massa dal sistema in un recipiente chiuso posizionato su una bilancia ad alta precisione (risoluzione 0,01 g). Nel dettaglio, inizia l'acquisizione dei dati contemporaneamente all'avvio degli alimentatori di polvere con l'obiettivo di catturare il tempo di transizione necessario per una condizione di funzionamento stazionaria. Una volta raggiunti i 20 minuti di test, l'alimentatore viene fermato mentre l'acquisizione dei dati continua a funzionare finché non viene espulsa tutta la polvere. La figura 5.64 seguente mostra una rappresentazione schematica per il layout di prova sperimentale da implementare per caratterizzare la polvere. I dati devono essere acquisiti con una frequenza di campionamento di 30 secondi.

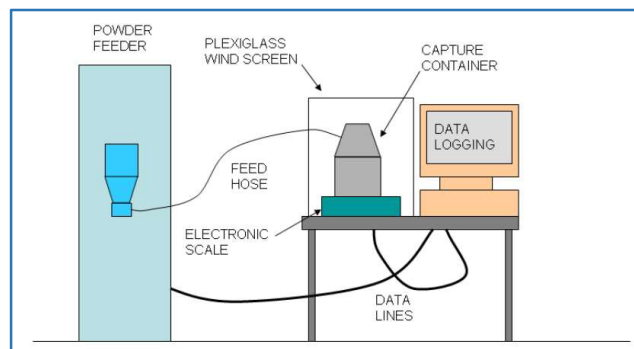


Figura 5.64: Setup macchina per monitorare portata della macchina in fase sperimentale

Nota: l'immagine 5.64 sovrastante ha solo uno scopo rappresentativo in quanto rappresenta il setup di monitoraggio della portata per una singola tramoggia. Nel caso in questione la raccolta delle polveri espulse avviene in uscita dal raccordo ad Y con zona di miscelazione.

Si analizzano i risultati con i tre differenti moduli di vite di alimentazione e per ognuno si imposta la portata volumica maggiore:

- Per il modulo ULHT abbiamo una portata massima di: 2 cm<sup>3</sup>/min;
- Per il modulo LTH abbiamo una portata massima di: 7.3 cm<sup>3</sup>/min;
- Per il modulo HTH abbiamo una portata massima di: 31.7 cm<sup>3</sup>/min;



Si valuta il comportamento di scarica di ciascun modulo di vite di alimentazione e gli indicatori di prestazione che vengono analizzati sono:

- Stabilità 1 minuto: si osserva la deviazione dal valore atteso in questo intervallo di tempo. Il valore atteso è la portata di materiale impostata.
- Stabilità 20 minuti: si osserva la deviazione dal valore atteso in un intervallo continuo di 20 minuti.
- Precisione: indica la deviazione media della portata rispetto al valore desiderato.
- Tempo di avvio: misura il tempo necessario per raggiungere o superare un determinato feed rate impostato.
- Tempo di arresto: indica il tempo necessario al sistema per arrestare il flusso di polvere.
- Tempo di configurazione hardware.

Sulla base delle portate massiche indicate per ogni modulo di vite di alimentazione si verifica, in relazione a quella massima, di quanto la portata si scosta dal valore dichiarato sull'intervallo di tempo indicato. Dal momento che al punto di stampaggio della macchina DED è richiesta un'alta precisione ed una costanza di portata affinché il manufatto esca con successo, viene accettata una oscillazione di  $\pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

La precisione, misurata come la percentuale della deviazione tra la portata media misurata su 20 minuti di funzionamento e la portata desiderata, deve essere il più alta possibile.

Ci si attende dunque una variazione rispetto al valore di portata massica impostato il più basso possibile, dal momento che, una volta che a regime i canali ed il raccordo sono riempiti dal materiale, si avrà un flusso continuo senza particolari zone di accumulo o elementi che blocchino il fluire delle polveri. Indubbiamente quando il flusso incontra il miscelatore statico (griglia di miscelazione) dopo essere passato per il raccordo ad Y, presenterà un forte rallentamento, che verrà compensato dalla spinta della polvere e del gas che segue.

### *Miscelazione omogenea*

Per quanto riguarda la verifica dell'omogeneità di miscelazione si propongono due modalità. In ogni caso vi è il bisogno di osservare concretamente che la polvere finale ottenuta contenga entrambe le polveri disposte in modo uniforme in una qualsiasi regione di flusso.

La prima modalità di verifica consiste nel raccogliere le polveri in uscita dal raccordo ad Y durante il funzionamento a regime della macchina all'interno di diversi recipienti in modo tale da avere differenti campioni da analizzare. La quantità di polvere che si vuole raccogliere è tutta quella che si ottiene con una scarica completa delle tramogge dopo aver inserito un quantitativo di  $5000 \text{ cm}^3$ , che rappresenta la metà della capacità massima. Questi campioni dovrebbero essere poi inviati ad un laboratorio di metallografia dove, con l'aiuto di un microscopio ottico, vengono analizzate alcune porzioni di materiale contenute nei diversi recipienti. In questo modo è possibile osservare se le particelle delle due polveri sono distribuite in maniera omogenea in una regione di spazio definita. Si sfrutta quindi un controllo visivo con l'ausilio di un microscopio ottico, ma saranno necessarie un numero elevate di prove al fine di ottenere un risultato attendibile. La procedura indicata presenta però alcuni limiti: in primo luogo il trasporto dei campioni di polvere in un laboratorio apposito risulterebbe problematica in quanto le polveri rischierebbero di sedimentarsi e con le vibrazioni, inevitabili durante un trasporto, si cambierebbe la loro distribuzione. Per ovviare a questa problematica sarebbe necessario disporre di un microscopio ottico nella medesima officina in cui è presente la macchina di deposizione. In secondo luogo, invece, si deve effettuare la prova sperimentale inserendo nelle tramogge due polveri metalliche che al microscopio risultino ben distinguibili tra loro, in questo modo sarebbe ben visibile le distribuzioni delle differenti particelle. Per essere certi della differenza visiva le polveri devono essere testate singolarmente prima di essere inserite nel feeder. Un ulteriore inconveniente che potrebbe verificarsi dopo la raccolta delle polveri è la loro ossidazione che può avvenire in tempi brevi e portare ad anomalie una volta che si osservano al microscopio. Anche in questo caso è importante avere a disposizione l'attrezzatura per la verifica nei pressi della macchina DED.

La seconda possibilità di verifica consiste sempre nel prelevare all'interno di appositi recipienti delle quantità di polveri in uscita dal raccordo ed analizzarle successivamente in laboratorio utilizzando un controllo radiografico. Questa procedura sfrutta raggi elettromagnetici ionizzati che interagiscono con gli atomi delle polveri in analisi ed in seguito colpiscono una lastra fotografica dove lasceranno delle impronte. Le due tipologie di polvere devono necessariamente presentare densità differenti quindi, sulla

lastra fotografica, saranno visibili variazioni di tonalità di grigio a seconda della particella di polvere che colpiranno: in questo modo sarà possibile verificare se la distribuzione delle zone chiare e scure sia uniforme e quindi se la miscelazione delle due tipologie di particelle di polvere sia omogenea. Anche questa seconda modalità comporta le medesime problematiche della precedente per quanto riguarda il trasporto dei campioni in laboratorio e anche per quanto riguarda la possibilità di osservare due tipologie di polvere metalliche che presentano delle densità ben diverse. Sarà quindi indispensabile predisporre l'attrezzatura per effettuare una radiografia in loco ed accertarsi che le particelle delle due polveri lascino impronte differenti sulla lastra fotografica.

In entrambi i casi il risultato che ci si attende è quello di poter osservare degli strati di materiale in cui differenti particelle di polvere metallica si distribuiscono omogeneamente su tutta la superficie osservata.

### *Velocità di risposta*

Per quanto riguarda la convalidazione di questo fattore si deve dapprima stabilire come deve essere la velocità di risposta della nostra macchina: infatti, per la produzione di un pezzo in stampa tramite processo DED non è richiesto il cambiamento di percentuali delle due polveri tra un layer ed il successivo, ma questo cambiamento di composizione della polvere finale avverrà gradualmente dall'inizio della stampa fino alla sua conclusione. Per questa ragione la velocità di risposta è lenta, ma dovrà coprire comunque un largo intervallo di variazione in quanto si potrebbe passare da una composizione 10%-90% ad una composizione 90%-10% delle due polveri, o addirittura si potrebbe arrivare ad avere una composizione 100% di una sola tipologia di polvere. In ogni caso questo grande cambiamento non avviene in un tempo ristretto, ma sarà distribuito durante tutto il processo di stampaggio.

In seguito a questa considerazione, come per il caso precedente, posso sfruttare le stesse tecniche presentate: si analizzano porzioni di polvere raccolte all'interno di un recipiente in due zone differenti, in particolare all'inizio ed alla fine della raccolta e si verifica che vi sia una concentrazione differente come impostato. Sarà infatti possibile osservare la maggiore presenza di un tipo di particelle, tenendo sempre in considerazione le strategie per evitare le possibili problematiche indicate nei paragrafi precedenti.

In questo modo è anche possibile verificare quanto materiale sia necessario affinché si passi da una miscela ad un'altra con diverse proporzioni.

### 5.1.6 Progettazione Funzione 3

Questa funzione tratta l'ergonomia della macchina. Dopo aver posizionato la zona di miscelazione all'interno della macchina è possibile verificare che siano rispettate le norme relative all'ergonomia sia per quanto riguarda l'altezza di posizionamento del punto di ricarica delle tramogge, sia per quanto riguarda l'altezza del posizionamento dell'interfaccia uomo-macchina (HMI). Infatti, come si può visionare in figura 5.65, l'altezza di posizionamento dei tappi delle tramogge con la configurazione finale della macchina rispetta l'altezza stabilita nel capitolo relativo all'analisi e valutazione delle varianti (capitolo 3.4, figura 3.4). Come era stato anticipato, affinché sia garantita una media precisione dell'operatore ed una media visibilità, l'altezza massima di lavoro deve essere di 1195 mm (secondo il 'Modulo ergonomia AG2019'[1]). In questo modo l'operatore di statura e caratteristiche fisiche medie che si occuperà dell'inserimento delle polveri all'interno dei due hopper, potrà lavorare con il miglior comfort possibile senza incontrare difficoltà, potendo visionare correttamente le azioni che effettuerà.

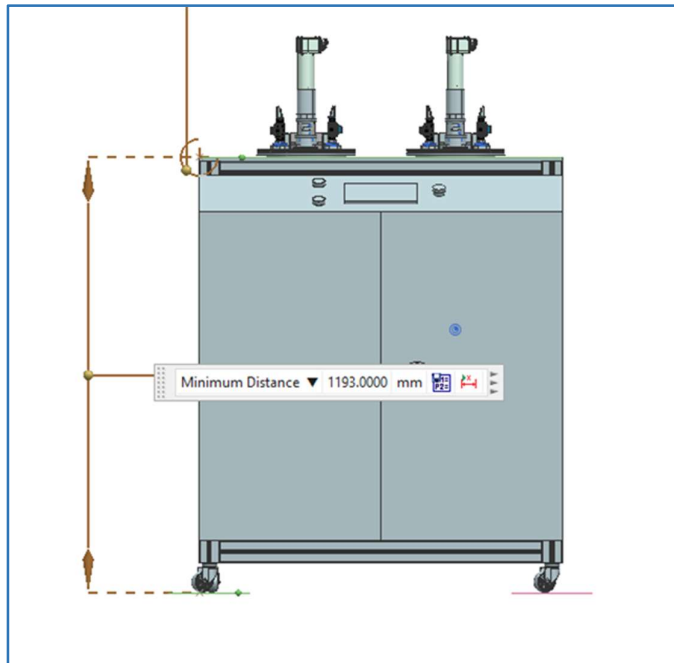


Figura 5.65: Particolare distanza tappo di ricarica-fondo della macchina (1193 mm)

Da non trascurare poi è il posizionamento dello schermo che integra l'interfaccia di comando della macchina. Infatti, anche questo elemento deve presentare un'altezza adeguata al corretto utilizzo e consentire al personale interessato di comandare la macchina stando in piedi: più precisamente si fa riferimento alla "regola del gomito" secondo la quale un operatore medio deve poter lavorare mantenendo un angolo di 90° per il gomito. Seguendo ancora una volta il 'Modulo ergonomia AG2019', anche questa altezza generica deve essere di massimo 1195 mm per un piano non regolabile e affinché si possa operare con una visibilità ed una precisione media: effettivamente per controllare un'interfaccia non è richiesta una particolare precisione, quindi l'altezza indicata in figura 5.66 risulta essere accettabile per l'applicazione.

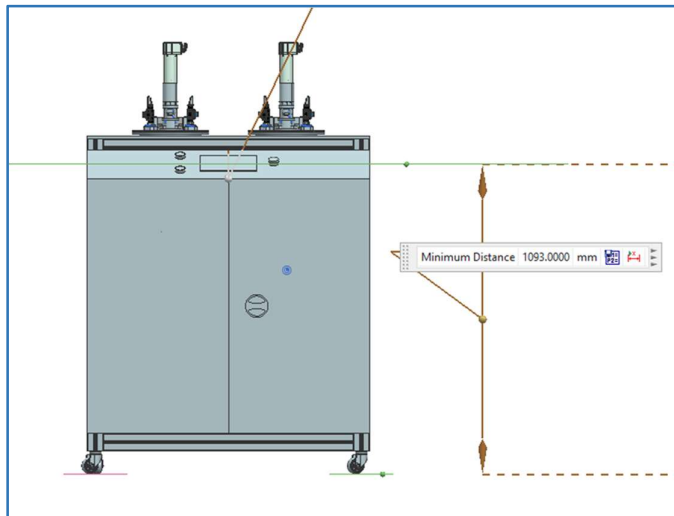


Figura 5.66: Particolare distanza interfaccia-fondo della macchina (1093 mm)

# Capitolo 6

## 6.1 Soluzione sviluppata

Alla fine di tutte le analisi e le considerazioni presentate si è giunti alla realizzazione della seguente soluzione che soddisfa tutte le richieste del cliente:

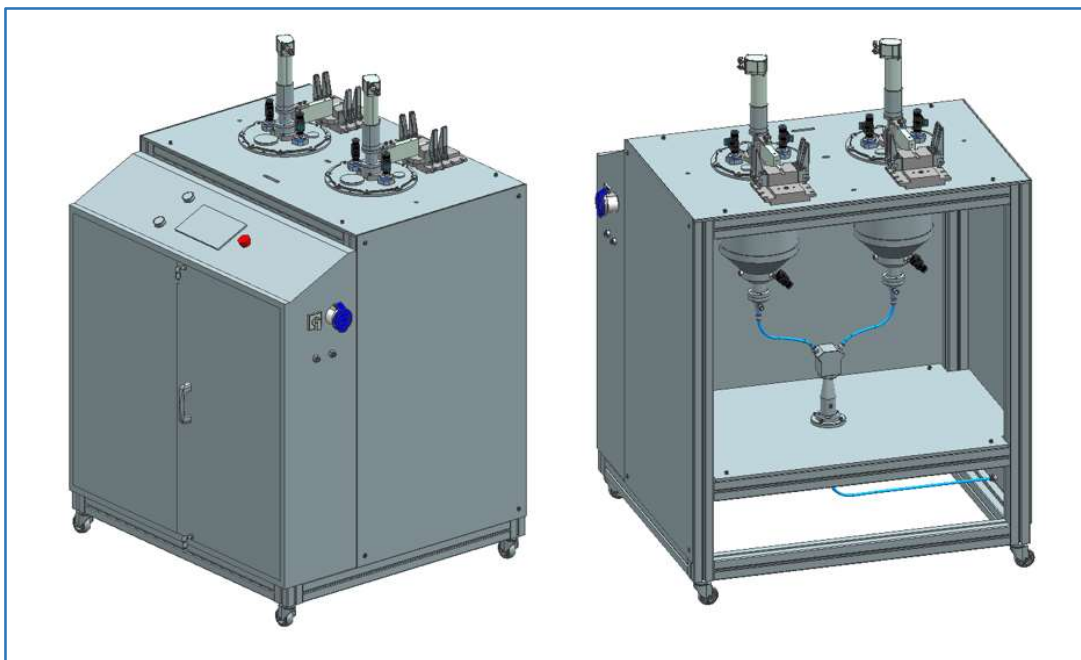


Figura 5.67: Macchina completa finale

Oltre alle funzioni sviluppate sono stati introdotti diversi elementi per consentire il corretto funzionamento della macchina e per completarla. Tra questi possiamo trovare due sportelli frontali con doppia serratura (indicata col numero 5 in figura 5.69) e maniglia per facilitarne la movimentazione. Lateralmente alla macchina sono poi presenti due pannelli metallici che chiudono la zona posteriore, fissati alla struttura per mezzo di viti bombate M6 e diversi innesti sia elettrici che pneumatici:

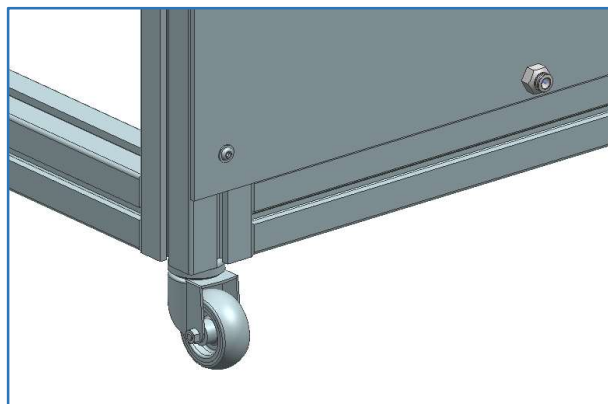


Figura 5.68: Vista particolare lato sinistro macchina: visibile vite bombata ed innesto pneumatico a parete

- Due innesti pneumatici laterali posizionati in alto sulla cabina di controllo (numero 1 in figura 5.69 sottostante) per consentire il collegamento dei tubi proveniente dalle bombole del gas che andranno ad alimentare l'intero circuito pneumatico posto dietro il quadro di comando all'interno della cabina di controllo. Queste componenti sono reperibili insieme a tutte le altre componenti pneumatiche già presentate dal fornitore Festo.

- Un innesto pneumatico laterale posizionato in basso alla macchina per consentire il collegamento del condotto che trasporterà la polvere miscelata alla testa di deposizione della macchina DED, visibile in figura 5.68.
- Un innesto elettrico per consentire di portare l'alimentazione elettrica a tutta la macchina (numero 2 in figura 5.69). Questa componente è acquistabile tramite il fornitore Walther Werke ed in allegato è presente il datasheet dedicato.
- Un interruttore di alimentazione che consente di fornire o meno una tensione quando la macchina è collegata alla rete elettrica (numero 3 in figura 5.69). Anche questo è un elemento standard acquistabile presso Misumi.

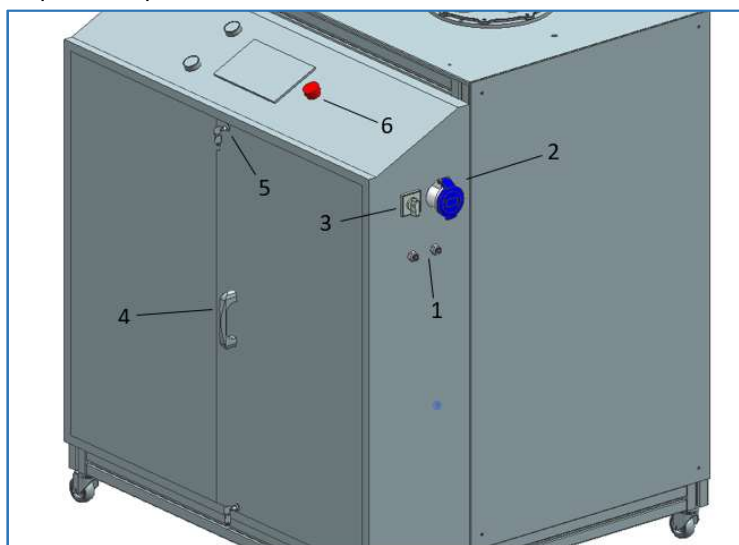


Figura 5.69: Specifica elementi aggiunti per il corretto funzionamento della macchina

Sul piano superiore sono presenti tutti i fori necessari per il passaggio dei diversi cablaggi elettrici e pneumatici: osservando la figura 5.70 possiamo trovare in corrispondenza del numero indicato:

1. Asola per il passaggio dei cavi elettrici che alimentano i motori per la movimentazione delle polveri all'interno delle tramogge e per la vite di alimentazione.
2. Fori per il passaggio dei condotti pneumatici che portano gas per lo spurgo e gas per il bilanciamento alle due tramogge, in corrispondenza delle 4 valvole manuali.
3. Foro per il passaggio dei due cavi che consentono la rilevazione di dati dalle due celle di carico.

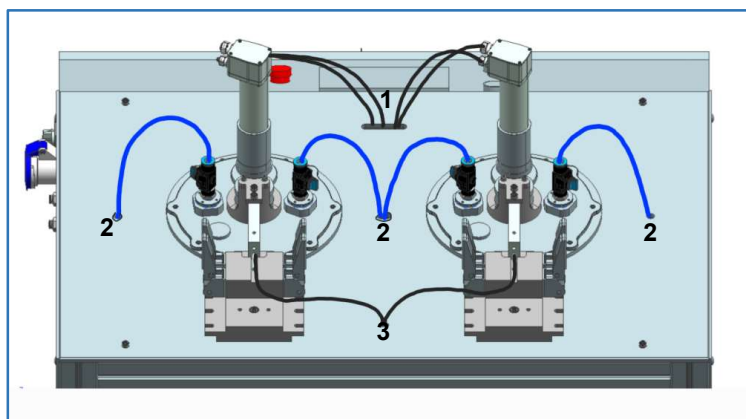


Figura 5.70: Rappresentazione cavi elettrici in nero e condotti pneumatici in blu, con fori di passaggio sul piano superiore

Infine, è presente un pulsante di emergenza che permette l'interruzione di qualsiasi operazione che avviene all'interno della macchina in caso di guasti o problemi tecnici; visibile in rosso di fianco all'interfaccia HMI, contrassegnato dal numero 6 in figura 5.69.

(In allegato sono presenti le schede tecniche con i relativi produttori di ogni componente appena indicata).

### **6.1.1 Principio di funzionamento**

La macchina ha lo scopo di fornire in uscita una miscela omogenea di polveri metalliche che vengono trasportate tramite un flusso di gas ad una testa di deposizione di una macchina DED. Le due tipologie di polvere da miscelare vengono inserite all'interno delle due tramogge, queste vengono dosate in base alla richiesta di concentrazione tramite la vite di alimentazione e fluiscono attraverso due brevi condotti all'interno di un raccordo ad Y appositamente progettato. Successivamente i due flussi convergono in uno singolo fino ad incontrare un miscelatore statico che devia i flussi, genera turbolenze e consente un'ottima miscelazione delle diverse particelle di polvere metallica. Una volta mescolate, le polveri continuano il loro percorso superando la zona di miscelazione e seguendo un condotto che esce dalla macchina tramite il raccordo posto in basso a sinistra.

# Capitolo 7

## 7.1 Next Steps

### 7.1.1 Sensore infrarosso

Durante l'analisi e valutazione delle varianti per quanto riguarda la parte di monitoraggio e controllo si era proposto l'inserimento di un sensore ad infrarosso per il monitoraggio della portata massica in uscita dal miscelatore. Il cliente aveva suggerito però che questo tipo di sensore non era ottimale per questo utilizzo, dal momento che era già stato testato per un'applicazione simile. A causa del limitato tempo a disposizione non si è approfondito questo aspetto e non si sono fatte ricerche per questa applicazione. Oltre alla parte di sensori, anche tutta la parte riguardante il controllo e la parte elettrica della macchina sono stati tralasciati.

### 7.1.2 Simulazioni

Il numero di simulazioni effettuate è senza dubbio limitato e non fornisce il numero sufficiente di dati per lo studio e l'ottimizzazione del raccordo a Y con zona di miscelazione. Sono necessarie un maggior numero di simulazioni al fine di verificare:

- La mesh utilizzata per discretizzare il modello: si è cercato di ottenere fin da subito una mesh il più fine possibile nelle parti di interesse. In generale si deve partire con una mesh grossolana in tutto il dominio ed affinarla successivamente se i risultati non sono accettabili. Con questo processo si può ridurre il tempo di calcolo.
- La geometria della parte e le sue dimensioni: è necessario impostare simulazioni parametriche dove si variano diversi parametri contemporaneamente e si valutano i risultati. Le caratteristiche da studiare con più cura sono la lunghezza dei condotti, la loro inclinazione e la loro sezione. Inoltre, si devono verificare le dimensioni del miscelatore statico come la sua lunghezza ed il diametro esterno.
- Il comportamento del miscelatore quando vengono variate le portate di polvere e gas a livello degli inlet. Questo progetto è limitato ad analizzare il funzionamento della parte in riferimento alle portate massime. In futuro si devono verificare tutte le portate possibili, come indicate anche nell'apposita tabella per le boundary condition. Sarà necessario verificare anche il comportamento del miscelatore con portate molto basse quando il regime del flusso non sarà più turbolento.

Il passo successivo è poi quello di implementare la simulazione multifase che rispecchi al meglio il caso reale.

### 7.1.3 Chiusura posteriore e cabina controllo

A causa delle stringenti tempistiche non è stata realizzata una chiusura della macchina nella zona posteriore come si desiderava. Ci si è limitati alla chiusura laterale tramite pannelli metallici. Per ultimare la macchina si potrebbe completare la chiusura della struttura con un sistema facilmente accessibile nella zona posteriore; questo sistema deve consentire di operare con facilità nella zona di miscelazione in caso di bisogno.

Anche la cabina di controllo contenente le componenti elettriche e pneumatiche non è stata sviluppata in tutte le sue parti. È indicato come la si vuole realizzare ma non sono presenti i disegni costruttivi di ogni suo pannello e della struttura interna che garantisca l'alloggio per tutti i componenti. Ricercando tra i diversi fornitori si potrebbe anche valutare l'acquisto di una cabina già pronta di dimensioni standard, che potrebbe comportare però importanti modifiche sulla disposizione di tutte le parti della macchina.

### **7.1.4 Realizzazione Prototipo**

Inseguito alla conferma teorica del funzionamento della parte tramite le simulazioni CFD è buona norma procedere con la realizzazione di un prototipo con il quale effettuare delle prove sperimentali e verificare che il pezzo svolga al meglio il suo compito. Si devono verificare fisicamente i tre punti indicati nel capitolo della convalidazione della variante.

### **7.1.5 Disegni costruttivi**

Non tutte le messe in tavola riguardanti gli assiemi presentano le liste pezzi complete in quanto alcuni elementi scaricati dal Web non compaiono nei disegni 2D. Per risolvere momentaneamente questo problema è presente in allegato una lista pezzi completa per ogni sottoassieme della macchina con relativo numero identificativo e quantità delle parti. Non sono presenti disegni costruttivi e lista pezzi dei powder feeder dal momento che ci sono stati forniti già completi.



# Capitolo 8

## 8.1 Conclusioni

L'obiettivo principale del progetto è stato raggiunto entro i tempi previsti, la soluzione consente infatti di ottenere una miscela omogenea di polveri metalliche in uscita dalla macchina.

Il modello progettato necessita ancora di rifiniture ed ulteriori approfondimenti prima di poter essere "pronto" per essere realizzato, ma allo stato attuale riesce a garantire la maggior parte delle specifiche richieste. Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva delle caratteristiche attuali del feeder progettato:

Tabella 8.41: Risultati e obiettivi raggiunti della soluzione sviluppata

Funzioni e specifiche richieste	Risultati
Supporto e fissaggio delle componenti	La struttura che permette il supporto ed il fissaggio in posizione di tutte le componenti della macchina è stata realizzata in tutte le sue parti ed è pronta per essere realizzata. Si compone di profilati e lamiere in alluminio.
Supporto e fissaggio componenti di comando e circuiti	Per le componenti di comando ed i circuiti è stato sviluppato l'apposito sistema di supporto e fissaggio: la cabina di controllo. Dati i tempi stringenti mancano però i disegni costruttivi per la realizzazione di tale cabina
Ergonomia del posizionamento degli alimentatori: altezza max=1195 mm	1193 mm è l'altezza dal suolo del tappo di ricarica delle tramogge che rispetta le regole dell'ergonomia.
Movimentazione delle polveri all'interno delle tramogge	Questa funzione richiesta era già in atto per una singola tramoggia. È quindi già ottimizzata e non ha subito modifiche.
Apporto del gas	Con l'introduzione della seconda tramoggia è stato modificato il circuito pneumatico in modo da consentire l'apporto del gas anche nel nuovo feeder aggiunto. Con il nuovo circuito pneumatico e le relative valvole inserite si consente l'apporto di gas da un minimo di 1.2 l/min ad un massimo di 60 l/min.
Trasporto delle polveri	Il trasporto delle polveri è garantito dal carrier gas attraverso tutti i condotti della macchina ed anche attraverso il condotto di miscelazione inserito.
Ricarica delle polveri	Il sistema di tappo+Oring già in funzione è stato mantenuto tale in quanto risulta essere la soluzione migliore.
Regolazione della portata di polvere: portata max=30 cm <sup>3</sup> /min	La portata di polvere può essere regolata tramite il sistema di vite di alimentazione già presente all'interno delle tramogge. Si deve prestare attenzione a regolare correttamente le portate di

	ogni feeder per ottenere in uscita al massimo 30 cm <sup>3</sup> /min. Il nuovo sistema di miscelazione introdotto al di sotto delle tramogge non presenta una problematica per la regolazione della portata
Miscelazione delle due polveri	Punto centrale del progetto in questione. Per ottenere in uscita una miscela omogenea delle due polveri provenienti dai due Hopper, si è introdotto un raccordo a Y per i condotti ed il successivo passaggio attraverso un miscelatore statico. La soluzione sviluppata funziona ma necessita ulteriori approfondimenti.
Scarico	Sistema di scarico per le tramogge già in uso e funzionante, per la nuova parte di miscelazione introdotta non è necessario sviluppare alcun sistema, è sufficiente fare scorrere del gas senza polveri.
Ingombro massimo: 1000x900x1600	L'ingombro massimo della struttura è stato rispettato. Con l'introduzione delle ultime componenti per il completamento della macchina si supera lateralmente e nella parte anteriore di circa 50mm. Effettuando uno studio per l'ottimizzazione degli spazi è facilmente possibile far rientrare tutte le componenti nei limiti imposti.

# Bibliografia

Tabella 42: Bibliografia e sitografia

DATA	OGGETTO	FONTE
	Corso Macchine e sistemi di automazione industriale [1]	<a href="#">Dashboard (icorsi.ch)</a>
	Corso Pneumatica [2]	<a href="#">Dashboard (icorsi.ch)</a>
	Corso Tecniche di progettazione e fabbricazione [3]	<a href="#">Dashboard (icorsi.ch)</a>
	Corso Elementi di macchine 2 [4]	<a href="#">Dashboard (icorsi.ch)</a>
	Estratto di norme 2018 -VSM [5]	<a href="#">Dashboard (icorsi.ch)</a>
	Corso CFD: simulazioni termo-fluidodinamiche [6]	<a href="#">Dashboard (icorsi.ch)</a>
<b>3.08.2021</b>	Fornitore component pneumatici [7]	<a href="#">Home   Festo Italia</a>
<b>5.08.2021</b>	Fornitore componenti meccanici [8]	<a href="#">MISUMI – Componenti meccanici configurabili online (misumi-ec.com)</a>
	Fornitore cella di carico [9]	<a href="#">Scaime - load cells, testing, measurement &amp; industrial control</a>
<b>3.08.2021</b>	Fornitore component pneumatici [10]	<a href="#">SMC</a>
<b>14.08.2021</b>	Coefficienti e parametri per calcoli fluidodinamici [11]	Yunus A. Çengel, John M. Cimbala, Fluid Mechanics - Fundamentals and Applications, pp 350-351, McGraw-Hill International Edition
<b>20.07.2021</b>	Fornitore caratteristiche polveri metalliche [12]	<a href="#">Metal powders for additive manufacturing   Aubert &amp; Duval (aubertduval.com)</a>
<b>20.07.2021</b>	Fornitore caratteristiche polveri metalliche [13]	<a href="#">Metal powder   Sandvik — World-leading producer of gas atomized metal powders</a>
	Pierangelo Andreini, Manuale dell'Ingegnere Meccanico, Hoepli, 2019, 2ª edizione [14]	
<b>10.08.2021</b>	Modelli CAD [15]	<a href="#">Free 3D models, CAD files and 2D drawings - TraceParts</a>
	Fornitore miscelatore statico [16]	<a href="#">Static mixers   Sulzer</a>
<b>27.08.2021</b>	Viteria e spine [17]	<a href="#">Bossard Italia - viteria, tecnica di collegamento, Smart Factory Logistics, engineering, gestione degli articoli C</a>
<b>28.08.2021</b>	Fornitore e lavorazioni lamiere e pannelli per struttura [18]	<a href="http://www.gellisrl.it/">http://www.gellisrl.it/</a>
<b>31.08.2021</b>	Fornitore presa di corrente 230 V [19]	<a href="#">WALTHER-WERKE: Homepage</a>

## Allegati

- Disegno di concetto: Disegno\_concetto\_V2
- Pianificazione: Diagramma\_Gantt\_PF
- Disegni 2D componenti da fabbricare e d'assieme totale
- Documentazione sistema a singola tramoggia: Powder Feeder
- Scheda tecnica rotelle: Rotella\_20210805172818\_LA-75NRB
- Scheda tecnica valvola non-ritorno: Antbackflow\_153464datasheet
- Scheda tecnica cella di carico: Cella\_carico\_ft-ak60-fe-0519
- Scheda tecnica elettrovalvola: Elettrovalvola\_VT\_A\_EU
- Scheda tecnica flussimetro: Flussimetro\_PF2M7-L-B\_EU
- Scheda tecnica innesto rapido: Innesto\_rapido\_186109datasheet
- Scheda tecnica pinze push-pull: Pinza\_Bloccaggio\_20210809210028\_TLA120F
- Scheda tecnica riduttore di pressione: Riduttore\_567539datasheet
- Scheda tecnica profilato: Scheda tecnica profilati\_20210812143244\_KGFS8-6060-4000
- Scheda tecnica valvola manuale: Valvola\_manuale\_153470datasheet
- Scheda tecnica spine cilindriche: Spine\_cilindriche\_BN\_684
- Documento quaderno dei compiti: Quaderno\_compiti\_PF\_V2
- Verbali incontri con relatore
- Modello CAD
- Simulazioni CFD
- Circuito pneumatico: circuito\_pneum
- Serratura cabina di controllo: Serratura\_20210829160223\_LOCNL1
- Scheda tecnica raccordo esterno macchina:  
Raccordo\_innesto\_passaparete\_130642datasheet
- Scheda tecnica maniglia per pannelli: Maniglia\_20210829193330\_HHDS104
- Interruttore di alimentazione: interruttore\_generale\_20210829200325\_KG80 T20301 E
- Datasheet dadi per collegamento profilati: Dadi\_per\_profilati\_P2\_0669-0670\_F40\_IT\_001
- Datasheet staffe di giunzione tra profilati: Staffe\_giunzione\_profilati\_P2\_0645-0646\_F40\_IT
- Scheda tecnica connettore elettrico: presa230V\_da\_muro\_PD\_410306\_EN
- Scheda tecnica guarnizione gomma: Guarnizione\_gomma\_20210901131554\_MYR-5
- Lista pezzi completa

Nome Cognome (1. Firma)

Luca Balerio

Funzione: Miscelazione polveri metalliche per processo DED

Settore/prodotto: Additive Manufacturing