



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, ARCHITETTURA,
AMBIENTE E DEI MATERIALI-DICAM

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA CHIMICA E DI PROCESSO

ANALISI E SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DI SEPARATORI PER IMPIANTI DI MICRONIZZAZIONE A SECCO

Tesi di laurea magistrale in Ingegneria chimica di processo

Relatore

Prof. Matteo Minelli

Correlatori

Ing. Fabrizio Marani

Ing. Paolo Piccinini

Presentata da

Alex Ferrarini

Sessione febbraio 2025

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

Abstract	3
1. Introduzione	3
1.1 Descrizione impianto Microton.....	3
1.2 Obiettivo della tesi.....	6
1.3 Applicazioni dell'analisi CFD	7
2. Metodi sperimentali	9
2.1 Descrizione impianto pilota e prove sperimentali	9
2.2 Teoria alla base di Microton	16
2.3 Descrizione separatore statico	19
2.3.1 Casistiche analizzate per separatore statico	21
2.4 Descrizione separatore dinamico.....	21
2.4.1 Casistiche analizzate per separatore dinamico	24
3. Modellazione virtuale dei separatori.....	24
3.1 Teoria alla base della modellazione CFD	24
3.2 Separatore statico	28
3.2.1 Definizione del dominio del separatore statico	28
3.2.2 Preparazione della matrice del separatore statico	31
3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico	36
3.3 Separatore dinamico	40
3.3.1 Definizione del dominio del separatore dinamico	40
3.3.2 Preparazione della matrice del separatore dinamico	44
3.3.3 Configurazione della simulazione del separatore dinamico	47
4. Analisi dei risultati	54
4.1 Risultati sperimentali.....	54
4.1.1 Separatore statico	54
4.1.2 Separatore dinamico.....	56
4.2 Risultati della modellazione virtuale	64
4.2.1 Separatore statico	64
4.2.2 Separatore dinamico.....	76
5. Conclusioni	92
6. Appendice	94
6.1 Lista dei risultati inerenti al separatore statico	94
6.2 Lista dei risultati inerenti al separatore dinamico	105
Bibliografia	117

Abstract

Il progetto di tesi è il prodotto di un'esperienza di tirocinio svolta presso l'azienda LB Technology situata a Fiorano Modenese. L'azienda ha basato per anni la progettazione di separatori, inseriti all'interno di processi a circuito chiuso di micronizzazione e la gestione di questi impianti su prove sperimentali e metodi Trial and Error. L'obiettivo di questo progetto è costruire un modello di simulazione virtuale basato sull'analisi Computational Fluid Dynamic (CFD) attraverso il simulatore Ansys Fluent, in grado di facilitare la gestione e progettazione di separatori impiegati nei processi di macinazione e micronizzazione LB.

L'impianto preso in esame è denominato Microton, in particolare le prove sperimentali sono state svolte sull'impianto pilota di dimensioni ridotte presente nel reparto Ricerca e Sviluppo (R&D) di LB. I valori dei parametri di processo rilevati sperimentalmente sono stati impiegati per definire le condizioni al contorno del simulatore. Una volta terminata l'elaborazione di Fluent sono stati confrontati i risultati virtuali con i valori reali per verificare l'accuratezza del modello, le criticità delle apparecchiature analizzate e come queste influissero sul processo.

1. Introduzione

1.1 Descrizione impianto Microton

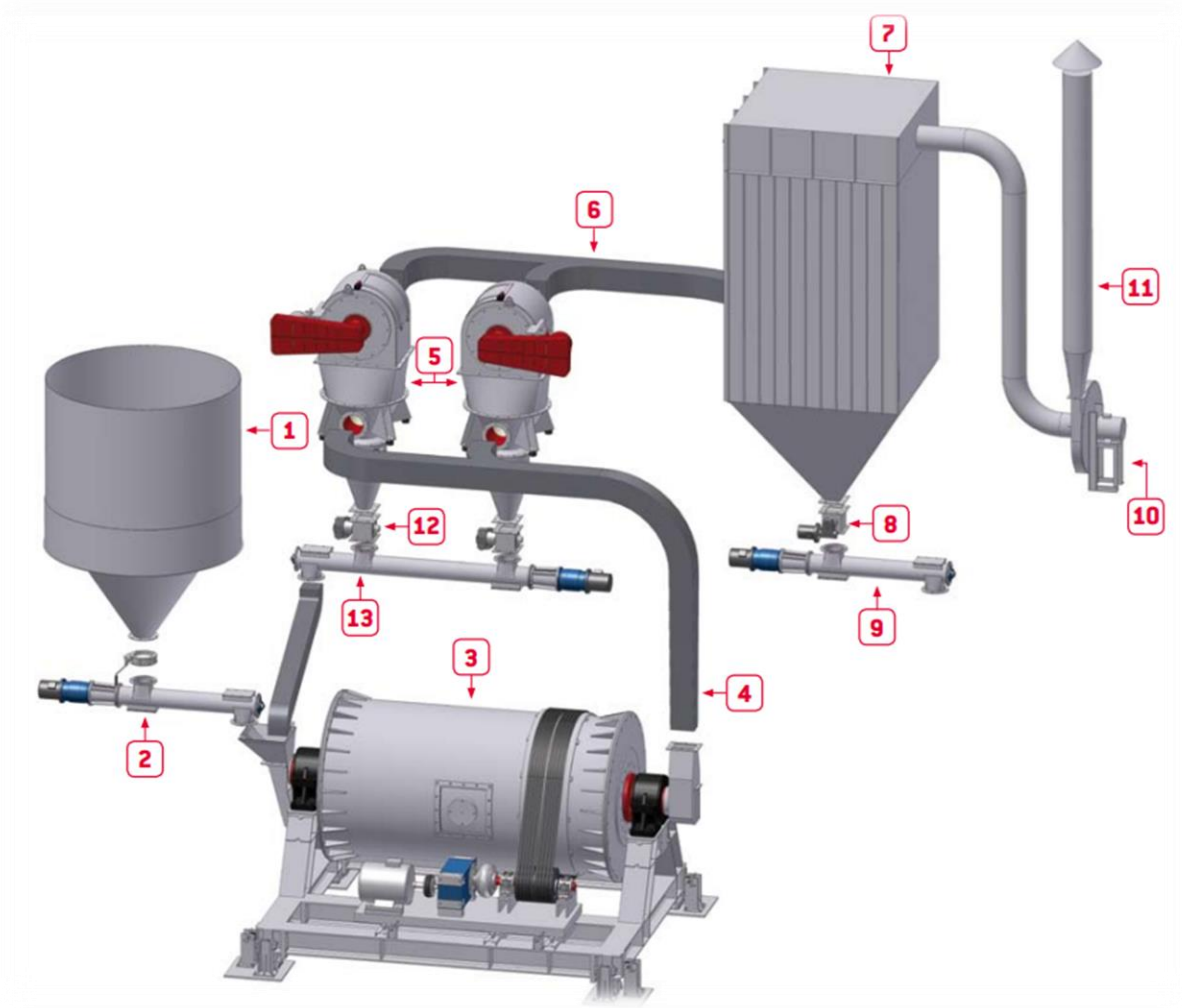
All'interno di diversi settori dell'industria dei materiali e di processo, in particolare in quelli legati all'edilizia, minerario, agrochimica e ceramica si ha l'esigenza di lavorare con materiali di origine minerale o con materiali ceramici, materie prime definite dure. In diversi segmenti di impianti di questo tipo si ha la macinazione e frantumazione di questi materiali, la purificazione di determinate correnti di processo attraverso sistemi di abbattimento e filtraggio, oppure impianti di essiccazione per particolari composti che devono essere separati dall'umidità dell'ambiente in cui si trovano. Esistono pertanto diverse realtà aziendali che si occupano sia della progettazione di singole apparecchiature, realizzate su commessa per essere inserite in un impianto già posseduto dal cliente, oppure interi impianti che seguono dalla fase di progettazione, a quella di verifica fino all'effettivo avviamento sia all'estero che sul territorio nazionale.

Tra gli altri, un impianto di applicazione dei processi automatizzati di macinazione e micronizzazione è il Microton, progettato dall'azienda Sitec Castellarano S.p.A, la quale ha recentemente accordato una fusione con l'azienda LB Technology presso cui ho avuto la possibilità di svolgere il tirocinio. Questo impianto permette la macinazione a secco di materiali duri per realizzare delle polveri con granulometria inferiore a dieci micrometri, queste polveri devono avere dimensioni micrometriche poiché verranno impiegate nella preparazione di miscele solide per cui è richiesto un aspetto e proprietà omogenee.

L'utilizzo di polveri troppo grossolane è deleterio per la qualità della miscela solida e provoca una distribuzione irregolare delle proprietà dei diversi componenti, tra queste miscele rientrano fertilizzanti, mangimi per animali e impasti ceramici.

L'impianto Microton tratta diversi componenti necessari alla realizzazione delle miscele citate in precedenza, l'azienda LB Technology riceve dai clienti i materiali da macinare in formato grossolano e restituisce le polveri della dimensione desiderata. Microton è automatizzato grazie al sistema di controllo che permette anche di lavorare in continuo, per citare alcune delle sue applicazioni pratiche viene utilizzato nella macinazione del feldspato, quarzo, carbonato di calcio, silice, zirconio e fritte ceramiche.

Figura 1 impianto Microton (catalogo Sitec R1.6, 2023)



Numero	Apparecchiatura	Numero	Apparecchiatura
1	Serbatoio	8	Rotocella
2	Trasportatore	9	Sistema di raccolta
3	Mulino MCS	10	Ventilatore
4	Condotto al separatore	11	Camino
5	Separatore	12	Rotocella
6	Condotto al filtro	13	Sistema di ricircolo
7	Filtro a maniche		

Come illustrato in Figura 1 il processo si evolve su più apparecchiature numerate in sequenza logica: la materia prima viene raccolta in un silo poi prelevata da un alimentatore che la convoglia all'interno del mulino di macinazione. La macinazione avviene grazie a delle biglie di allumina sinterizzata di dimensioni variabili, la struttura del mulino è cilindrica e ruota intorno al suo asse orizzontale per favorire gli urti tra la materia prima e i corpi di allumina. Per mantenere il sistema in equilibrio il sistema di controllo mantiene costante il flusso di materia interno al mulino agendo sull'alimentazione. In seguito alla macinazione si forma della polvere all'interno del mulino che viene aspirata per procedere lungo il ciclo produttivo, l'aspirazione avviene grazie al ventilatore (10) che crea forza motrice, ovvero una depressione, sufficiente a far muovere la corrente bifase di aria e polvere attraverso l'intero processo. Superato il mulino la corrente bifase entra nel separatore in cui si creano due flussi: uno composto da solido grossolano che torna al mulino grazie al circuito (12 e 13) e una corrente bifase di aria e solido fine che procede verso il filtro a maniche. La parte terminale del processo permette di separare il solido macinato finemente, resta intrappolato nella maglia delle maniche del filtro per poi precipitare nel sistema di raccolta (9).

L'esperienza aziendale del team di progettisti di LB Technology ha permesso di determinare come la qualità del prodotto finale sia fortemente influenzata dalla macinazione, se il mulino avesse un funzionamento ideale allora il solido granulare lascerebbe istantaneamente l'apparecchiatura dopo aver raggiunto le dimensioni desiderate. In questo modo non ci sarebbe energia consumata con particelle sufficientemente fini; nella realtà non è possibile ottenere queste condizioni di lavoro senza dispendio eccessivo di energia che provoca una sovra macinazione della materia prima.

Per controllare le dimensioni del prodotto finale viene quindi introdotto un separatore che lavora in continuo insieme al mulino così da permettere la fuoriuscita del prodotto fine e il ricircolo del solido con dimensioni grossolane; la presenza del ricircolo permette di classificare il processo come circuito chiuso.

Il prodotto di macinazione deve essere sufficientemente fine per soddisfare la commessa per cui è stato realizzato ma è inevitabile che al suo interno siano presenti una varietà di particelle di diverse dimensioni; per stabilirne la qualità LB Technology, così come molte aziende che lavorano nel settore della macinazione, ricerca i valori D10, D50 e D97.

Questi parametri indicano il diametro massimo corrispondente alla frazione desiderata, ovvero:

- D10 è la dimensione al di sotto della quale rientra il 10% della frazione volumetrica totale del campione considerato
- D50 è la dimensione al di sotto della quale rientra il 50% della frazione volumetrica totale del campione considerato
- D97 è la dimensione al di sotto della quale rientra il 97% della frazione volumetrica totale del campione considerato

Una volta stabilite queste dimensioni è possibile osservare una descrizione più accurata della distribuzione dei diametri all'interno del campione, in particolare bisogna verificare che il D97 sia in linea con la dimensione massima del prodotto ordinato su commessa. Non ci sono parametri superiori al D97 perché è irrealistico pensare di poter determinare la massima dimensione del campione senza incertezze, inoltre deve esserci la consapevolezza della presenza di minime percentuali di impurezze.

1.2 Obiettivo della tesi

Le apparecchiature atte alla separazione di polveri devono essere adeguatamente progettate per evitare la formazione di zone morte, quindi zone con forza motrice insufficiente per trascinare la frazione solida della corrente bifase interna al separatore, con conseguente formazione di accumuli che possono compromettere la qualità del prodotto finale o il funzionamento dell'apparecchiatura. Per evitare questi fenomeni i disegnatori e progettisti di LB Technology verificano che la morfologia interna del separatore, e quindi il percorso che la corrente bifase deve attraversare per uscire, sia in regime di moto turbolento e si assicurano di eliminare tutte le zone che portano a un drastico calo di velocità della corrente, fatta eccezione per dispositivi di sicurezza o elementi fondamentali alla stabilità strutturale.

Questa soluzione, oltre a portare a costi più elevati data la complessa morfologia di alcuni separatori, comporta anche la necessità di inserire all'interno dell'apparecchiatura un rivestimento, che protegga dall'usura causata dal passaggio turbolento di una corrente con frazione solida, e dispositivi di sicurezza che proteggano gli elementi più fragili o sollecitati del separatore dall'impatto diretto con la corrente bifase ad elevata velocità. Per rispettare gli standard sulla sicurezza, dettati dalle apposite normative, è indispensabile l'inserimento di questi dispositivi di sicurezza aggiuntivi. Per ridurre i tempi necessari alla loro manutenzione, e quindi i momenti di fermo dell'apparecchiatura, si provvede ad ottimizzare le condizioni operative. Queste condizioni devono permettere l'ottenimento di un prodotto che sia in linea con la commessa effettuata dal cliente ma allo stesso tempo non devono portare a sollecitazioni eccessive l'apparecchiatura data la presenza di elementi abrasivi e in moto turbolento al suo interno.

È in questo frangente che si profila la necessità delle prove sperimentali con il classico metodo Trial and Error: l'utilizzo di una frazione della materia prima per condurre degli esperimenti da cui estrapolare protocolli e indicazioni empiriche su cui condurre i processi è un approccio largamente utilizzato in molti ambiti aziendali e ha dato ottimi frutti nel corso degli anni. Questo metodo risulta tanto più conveniente quanto più è economica la materia da trattare ma allo stesso tempo comporta inevitabilmente uno spreco di risorse. I materiali, la potenza elettrica, il personale e le ore impiegate per lo svolgimento di queste prove comportano necessariamente un aumento dei costi operativi e un impegno dell'impianto che non è finalizzato alla produzione di utili, che siano intermedi di processo oppure prodotti da inserire sul mercato. Pertanto l'azienda LB Technology ha accettato di collaborare nel progetto di tirocinio per rispondere alla seguente domanda tecnica:

È possibile impiegare le simulazioni virtuali e l'analisi Computational Fluid Dynamic (da qui in poi definita come CFD) per la progettazione dei separatori e la determinazione dei parametri di lavoro dell'apparecchiatura necessari all'ottenimento di un determinato prodotto senza necessariamente utilizzare il metodo Trial and Error?

Prima di poter procedere alla modellazione virtuale del problema proposto da LB sono state necessarie prove sperimentali che fornissero i dati di riferimento su cui basare le analisi, inizialmente sono stati studiati i diversi modelli di separatori e il funzionamento dell'impianto pilota Microton. Il prodotto di questo impianto è un solido macinato finemente, denominato prodotto di macinazione, e la sua qualità viene determinata sulla base della sua granulometria grazie a criteri descritti più nel dettaglio nel capitolo precedente 1.1 Descrizione impianto Microton.

I parametri su cui si basa il funzionamento del separatore comprendono le rivoluzioni al minuto degli elementi meccanici interni all'apparecchiatura e necessari alla separazione del solido, la forza spingente del processo che permette il trascinamento del solido e la formazione della corrente bifase approfonditi nel successivo capitolo 2.1 Descrizione impianto pilota e prove sperimentali.

Il progetto di Tirocinio presso l'azienda LB Technolgy è stato incentrato sullo studio del funzionamento dei separatori a secco, e quindi sul comportamento di particelle solide trasportate da una corrente d'aria grazie al software di simulazione CFD Ansys Fluent. Le misurazioni svolte sull'impianto pilota hanno permesso di determinare i parametri di lavoro del separatore in diverse condizioni operative e le relative granulometrie dei prodotti ottenuti, questi dati sono stati utilizzati per definire le condizioni al contorno della simulazione virtuale svolta attraverso il software Ansys Fluent. Il simulatore permette di replicare virtualmente il funzionamento del separatore e condurre un'analisi CFD per monitorare in modo accurato e dettagliato l'apparecchiatura, in particolare le condizioni fluidodinamiche e le diverse grandezze che ne derivano in ogni punto del dominio considerato, tra cui velocità, pressione e in particolare la distribuzione granulometrica che verrà utilizzata per comparare i risultati virtuali con i valori sperimentali e determinare l'accuratezza del modello. Se il modello ottenuto si rivelerà accurato, quindi in grado di restituire la stessa granulometria del prodotto ottenuto dalle misurazioni effettuate sull'impianto pilota a parità di condizioni operative (che si traducono in condizioni al contorno per il simulatore), allora sarà possibile impiegarlo nella progettazione di separatori e nella scelta delle condizioni di processo in funzione di una desiderata granulometria grazie alle simulazioni virtuali svolte attraverso Ansys Fluent.

1.3 Applicazioni dell'analisi CFD

Nonostante i processi ceramici non facciano largo utilizzo di simulatori l'applicazione del CFD è stata supportata da numerosi studi in diverse discipline in cui l'analisi del comportamento di correnti bifasiche solido-gas tramite il CFD ha portato notevoli contributi.

Tra le trattazioni più rilevanti rientra Prediction of black powder distribution¹ che sfrutta il modello a fase discreta, conosciuto anche come DPM. Questo studio si concentra sul comportamento di correnti turbolente bifasiche, composte da gas e particelle, all'interno di tubazioni in diverse condizioni di flusso o con solidi di varie dimensioni con lo scopo di identificare:

- Modelli per la suddivisione delle particelle in corrispondenza delle giunzioni;
- Il ruolo dell'orientamento del ramo di tubazione analizzato;
- Le conseguenze della forma e distribuzione delle particelle.

Le simulazioni, effettuate seguendo gli esperimenti di Guangbin e Janssen et al, hanno restituito risultati in accordo con i dati presenti in letteratura per la polvere nera inquinante presente nella rete di tubature per il trasporto del gas. Questo studio supporta quindi la precedente ricerca condotta da Duan Guangbin et al² pubblicata nel 2010, gli esperimenti di Guangbin sono stati incentrati sulle applicazioni e le prevenzioni da effettuare nei circuiti idraulici pneumatici utilizzati nell'ingegneria del trasporto con forma ramificata. Gli studi sono stati condotti sperimentalmente con correnti bifasiche in cui le particelle rappresentavano elementi inquinanti.

¹ Prediction of black powder distribution in pipe junctions using the discrete phase model, Nabil Kharoua et al, 2015

² Experimental investigation of gas–solid two-phase flow in Y-shaped pipeline, Duan Guangbin et al, 2010

Nel 2012 è stata pubblicata la ricerca condotta da Xiaole Chen et al³ in cui viene utilizzato un modello CFD per approfondire il comportamento delle particelle all'interno del sistema respiratorio ed in particolare nella regione alveolare dei polmoni. Anche in questo caso viene utilizzato il modello a fase discreta per descrivere il comportamento della corrente bifasica composta dall'aria inalata e le particelle, prevalentemente rappresentative di materiale fibroso o polveri, che vengono considerate dannose per la loro capacità di depositarsi indesiderata.

Il modello geometrico e i suoi relativi parametri derivano da precedenti ricerche svolte da Kim e Fisher nel 1999 che può essere ricollegato ai precedenti studi di inquinanti dato che le vie polmonari vengono schematizzate come un sistema diramato di condotti. È stata dimostrata una notevole dipendenza delle traiettorie delle particelle dalla loro posizione iniziale e dagli elementi esterni che provocano variazioni del moto (tra cui collisioni e rotazioni a seguito di urti con altre particelle o pareti). Il modello a elementi discreti ha restituito risultati in accordo con i dati sperimentali raccolti ed ha ispirato Comer et al ad approfondire le simulazioni per ottenere un modello accurato che descriva il flusso bifase e il relativo trasporto di particelle nel sistema respiratorio umano.

Lo studio del comportamento di inquinanti, che siano all'interno di una rete di tubazioni o nel sistema respiratorio, tratta di composti di forma e dimensioni irregolari e quindi necessita di modelli di particolato non sferico (NSPS). Questo approccio viene approfondito da Wenqui Zhong et al⁴ che nel 2016 pubblicano una trattazione che evidenzia:

- La rappresentazione delle particelle nel modello NSPS e le tracce dei diversi urti e contatti che subiscono e influenzano il moto;
- La revisione delle forze e del moto sulle particelle irregolari;
- La metodologia nel modello CFD e elementi discreti;
- Applicazioni del modello CFD-DEM;
- Possibili approfondimenti per ricerche future.

La trattazione di Wenqui Zhong riporta l'importanza del ruolo delle particelle irregolari nella determinazione del comportamento di solidi stoccati e dispersi e riconosce l'efficienza del modello a elementi discreti nel descrivere i sistemi fluidi contenenti particolato, come ad esempio il gassificatore a letto fluido. Tra le considerazioni finali di questa ricerca si evidenzia la necessità di ulteriori studi per approfondire la flessibilità delle particelle non sferiche e il campo di applicabilità del modello poiché ancora fortemente legato alla complessa geometria dei sistemi studiati; la ricerca ha inoltre evidenziato i limiti posti dalle capacità computazionali dei calcolatori utilizzati.

Lo sviluppo teorico del modello ne conferma la razionalità ma la sua applicabilità resta limitata alla potenza di calcolo a disposizione a causa di un setup molto complesso le simulazioni richiedono elevati tempi computazionali. Gli articoli riportati rappresentano la rilevanza delle simulazioni e delle analisi CFD per la determinazione del comportamento di particelle in diversi ambiti con i relativi approcci alle diverse problematiche collegate.

Diverse trattazioni sono accumulate dall'utilizzo del modello a fase discreta che verrà implementato nello studio delle correnti bifasiche all'interno dei separatori analizzati durante il progetto di tirocinio.

³ CFD-DEM simulation of particle transport and deposition in pulmonary airway, Xiaole Chen et al³ in collaborazione con il ministro dell'istruzione e del controllo dell'energia cinese e l'università di medicina di Nanjing, 2012

⁴ DEM/CFD-DEM Modelling of Non-spherical Particulate Systems: Theoretical Developments and Applications, Wenqui Zhong et al, 2016

2. Metodi sperimentali

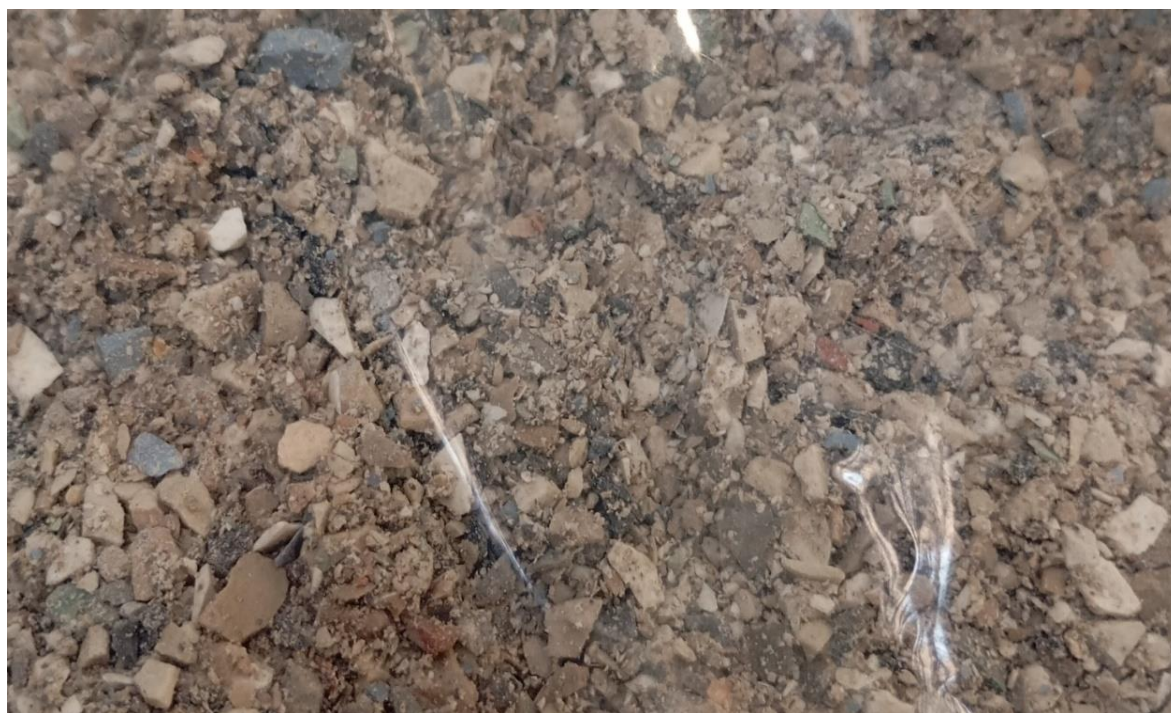
2.1 Descrizione impianto pilota e prove sperimentali

Le misurazioni sperimentali sono state svolte sull'impianto pilota presente nel laboratorio di LB Technology atto a ricreare una versione contenuta dell'impianto Microton, queste prove hanno lo scopo di misurare i diversi parametri di processo necessari per il setup del simulatore Ansys Fluent dato che normalmente non sono riportate nei report stilati all'interno dell'azienda LB.

La materia prima utilizzata è la Chamotte, ovvero una miscela composta prevalentemente da allumina e frazioni di ossidi di ferro, calcio, silice. Viene spesso introdotta in fritte ceramiche per conferire resistenza all'impasto e assicurare un'essiccazione omogenea. Per poter essere aggiunta agli impasti la Chamotte viene preparata dalla cottura e macinazione di argille refrattarie, solo successivamente viene setacciata in funzione della dimensione delle particelle desiderate.

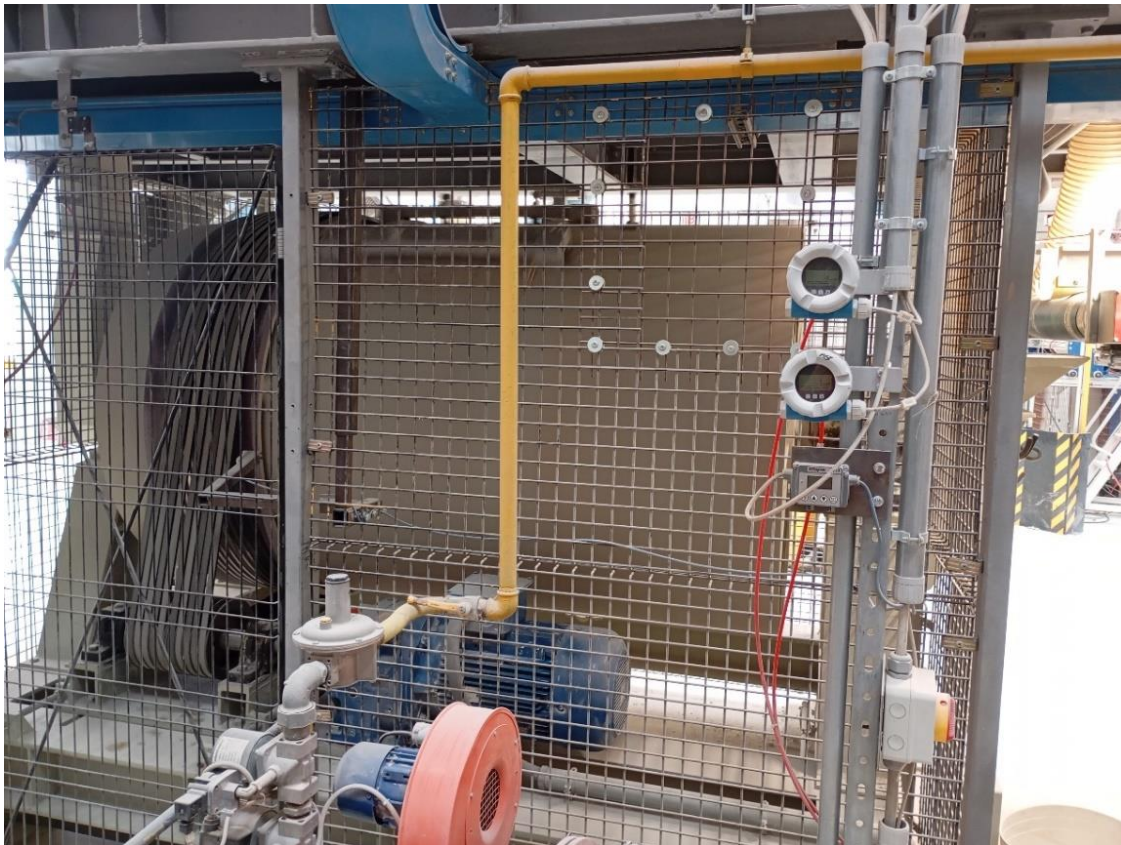
Ai fini di queste misurazioni è stata acquistata una tonnellata di Chamotte grezza che si presenta in forma granulare come in Figura 2.

Figura 2 Chamotte grezza (campione per prove sperimentali laboratorio LB technology)



L'impianto pilota è strutturato come riportato in Figura 1, in particolare tra gli elementi di interesse comprende un mulino MCS (raffigurato in Figura 3) collegato a una tramoggia per l'immissione di materia prima e un'apposita apertura per l'immissione delle biglie di allumina sinterizzata con diverse dimensioni. L'utilizzo di queste biglie appositamente trattate assicura un'efficiente macinazione grazie all'elevata durezza per ridurre e prevenire l'usura durante molteplici cicli di lavoro.

Figura 3 mulino MCS impianto pilota Microton, laboratorio LB technology



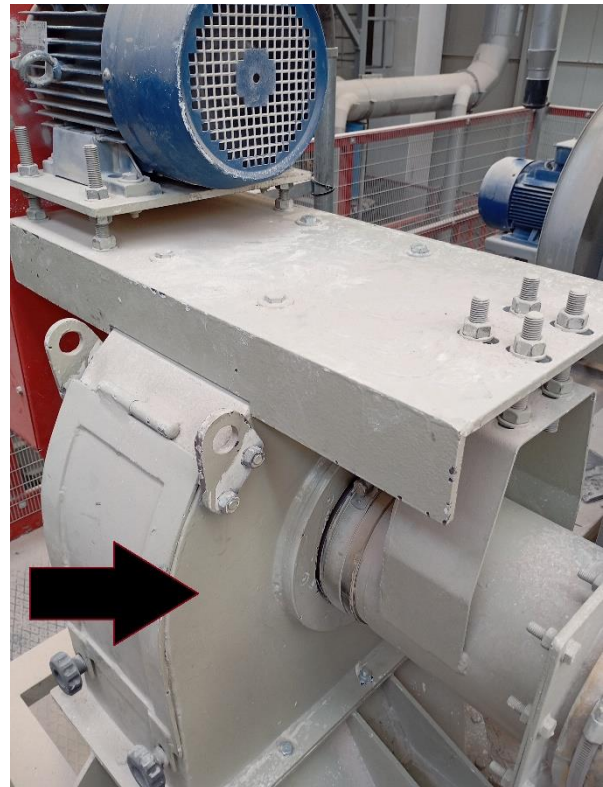
Secondo le procedure utilizzate in LB Technology il mulino deve essere riempito al 43% del suo volume disponibile con le biglie di allumina (raffigurate in Figura 4), secondo l'esperienza aziendale questo valore permette una macinatura efficiente con un'usura contenuta dei corpi di allumina; ulteriori esperimenti condotti nel laboratorio LB Technology hanno evidenziato un aumento dell'usura dei corpi e un inquinamento da frammenti di allumina del campione finale in caso di inserimento di una quantità eccessiva di biglie.

Figura 4 biglie di allumina utilizzate nel mulino MCS



La materia prima è stata suddivisa in due carichi da 500 kg, considerando che la Chamotte ha una densità di 1,271 kg/L (misurata dal campione di materia prima nel laboratorio LB) e che la capacità del mulino ammonta a 2000 L, questo comporta che il solido da macinare occupi circa il 20% del volume disponibile all'interno del mulino MCS. Considerando anche la frazione occupata dalle biglie di allumina rimane una buona frazione di vuoto disponibile all'interno dell'apparecchiatura che permette una corretta miscelazione tra la materia prima e i corpi di macinazione e aumenta anche la quantità di urti dovuti al movimento rotatorio del mulino. La sezione laterale del mulino è collegata al tubo principale che trasporta la corrente bifasica, polvere e aria trascinate grazie al sistema di aspirazione presente a valle dell'impianto, verso il separatore dinamico. Una volta che la corrente aspirata dal mulino giunge al separatore si suddivide in due correnti: il prodotto fine uscente dalla sommità e il ricircolo uscente dalla parte inferiore dell'apparecchiatura.

Figura 5 camera inferiore e superiore del separatore dinamico, impianto pilota Microton laboratorio LB Technology



Il separatore può essere distinto in due camere collegate ma che possono essere separate per interventi di manutenzione, riparazione o ispezioni. La camera superiore comprende la girante, ovvero l'elemento meccanico in movimento che permette di discriminare le particelle in base alle loro dimensioni e alla velocità di rotazione impressa dal rotore collegato a un motore esterno posizionato sopra al separatore.

La camera inferiore (rappresentata a sinistra in Figura 5) comprende l'entrata della corrente aspirata dal mulino, un cappello cinese come elemento di protezione della girante interna, la fuoriuscita del ricircolo e una presa d'aria. Entrambe le camere del separatore hanno un volume contenuto e nella camera inferiore c'è un'elevata turbolenza dovuta al funzionamento del separatore che verrà descritto in seguito nel capitolo 2.4 Descrizione separatore dinamico.

Queste caratteristiche comportano un trascinamento verso il ricircolo anche di particelle fini e pertanto è possibile aprire manualmente la presa d'aria per provocare l'entrata di un'altra corrente d'aria, grazie al sistema di aspirazione a valle, che permette di recuperare una frazione di particelle fini e condurle verso la camera superiore.

Durante le normali operazioni di impianto vengono effettuati prelievi ogni 10 minuti dal prodotto fine in uscita per verificarne la granulometria e di conseguenza si decide se agire o meno sulla presa d'aria; infatti in caso il prodotto contenga un'elevata frazione di materiale grossolano la valvola viene chiusa per favorire la precipitazione delle particelle pesanti. In caso la produttività sia troppo bassa, quindi dalla camera superiore fuoriesce una portata inferiore al valore desiderato, è possibile aprire la presa d'aria e provocare l'entrata di una seconda corrente d'aria ascendente, grazie all'aspirazione a valle, che trascina un maggior numero di particelle.

L'effetto di trascinamento delle due correnti d'aria, quella proveniente dal mulino e quella entrante dalla presa d'aria, possono avere un impatto negativo sulla granulometria del prodotto fine poiché una portata d'aria molto elevata favorisce il trascinamento di particelle grossolane; per mantenere un'adeguata finezza del prodotto finale è possibile aprire parzialmente la presa d'aria. Prove sperimentali condotte su diversi materiali indicano il range ottimale del grado di apertura della valvola per mantenere una buona produttività senza favorire eccessivamente fenomeni di trascinamento indesiderati. L'ultimo step di separazione avviene all'interno del filtro a maniche (rappresentato in Figura 6) che si trova a valle del separatore: questa apparecchiatura permette di catturare le particelle trascinate dalla corrente d'aria in apposite strutture chiamate maniche. Le maniche del filtro sono strutture cilindriche che sorreggono delle maglie filtranti in grado di far passare la corrente d'aria ma abbastanza fini per trattenere le particelle; l'efficienza di questi filtri aumenta nel tempo poiché lo strato di particelle depositate sul filtro costituisce un ulteriore ostacolo. Rimane necessaria una periodica pulizia, solitamente effettuata per scuotimento automatizzato delle maniche, per permettere sia di raccogliere le polveri fini d'interesse sia di assicurare il passaggio della portata d'aria di processo che diminuisce con l'accumularsi del solido sulle maniche.

Figura 6 filtro a maniche impianto pilota, laboratorio LB technology



Le polveri raccolte grazie alla pulizia del filtro costituiscono il prodotto fine di interesse nel processo di macinazione pertanto vengono raccolte in appositi recipienti (mostrati in Figura 7) che possono essere stoccati separatamente o convogliati in un serbatoio.

Il ricircolo che fuoriesce dalla camera inferiore (Figura 5) viene convogliato al mulino, tuttavia il condotto può essere manualmente deviato per raccogliere dei campioni in un recipiente; questi campioni sono necessari per analizzare la granulometria del ricircolo e verificare che non contenga una frazione fine troppo elevata. Questi controlli permettono di monitorare l'efficienza del separatore per assicurare la formazione di polveri delle dimensioni desiderate.

Figura 7 recipiente di raccolta del prodotto fine, impianto pilota laboratorio LB technology



Le prove sperimentali effettuate sull'impianto pilota hanno lo scopo di determinare la qualità del prodotto fine uscente dal filtro a maniche variando i seguenti parametri di processo:

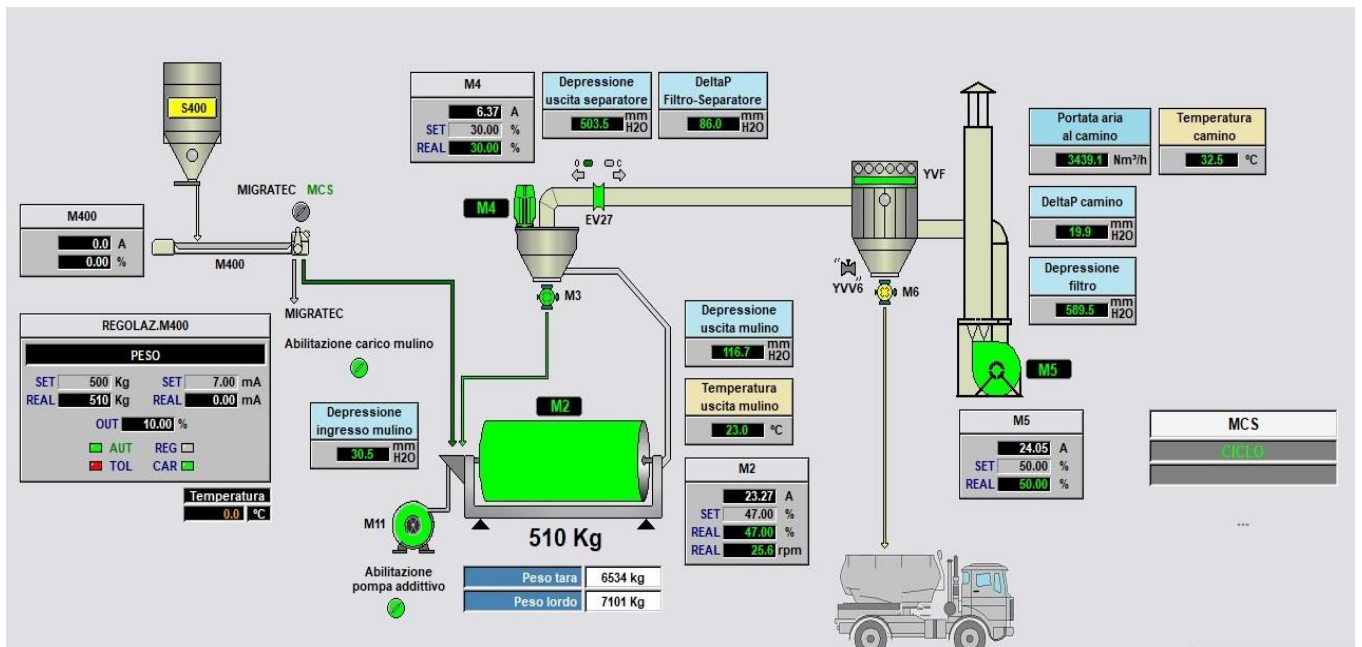
- La forza motrice, ovvero la depressione generata dal ventilatore a valle, che influenza la forza di trascinamento applicata sulle particelle.
- La velocità di rotazione della girante determina il diametro massimo delle particelle che riescono ad attraversarla e che vanno a comporre il prodotto fine che verrà separato nel filtro a maniche.

Per studiare gli effetti della velocità della girante sulla granulometria del prodotto sono state effettuate tre diverse prove con una frequenza crescente del motore che alimenta gli elementi mobili interni al separatore, aumentandone la frequenza di conseguenza aumentano anche le rivoluzioni per minuto della girante. Nella valutazione degli effetti della depressione generata a valle del separatore sono state svolte due ulteriori prove sperimentali durante le quali la frequenza del motore che alimenta la girante è stata mantenuta costante per poter variare solamente la frequenza del ventilatore, quindi la depressione. Con una maggiore frequenza in aspirazione e una depressione più elevata, a parità di rivoluzioni al minuto della girante, ci si aspetta una dimensione massima delle particelle nel prodotto più elevata rispetto al caso con frequenza di aspirazione minore. Grazie a una depressione a valle maggiore è plausibile che la curva granulometrica si sposti riportando maggiori frazioni di particelle a dimensioni maggiori; in caso contrario una forza motrice inferiore causerà il passaggio di meno particelle e in particolare quelle di dimensioni maggiori che non vengono trascinate.

Le prove sperimentali si sono svolte secondo il seguente schema operativo:

- Avviamento dell'impianto pilota e immissione nel mulino di materia prima misurata attraverso una bilancia incorporata al MCS (passaggio necessario solo inizialmente o in caso di livelli troppo bassi di Chamotte indicati dalla bilancia)
- Verifica del raggiungimento dei corretti valori operativi dei parametri di processo attraverso il sinottico che controlla l'impianto, un software apposito che permette di monitorare le diverse apparecchiature che compongono l'impianto e variarne i parametri essendo direttamente collegato al sistema di controllo (è riportato un esempio dell'interfaccia in Figura 8). I parametri fondamentali da verificare sono la massa interna al MCS, la depressione a valle dell'impianto pilota e frequenza del motore che alimenta la girante.
- Misurazione della depressione e valle e della granulometria una volta che l'impianto ha raggiunto le condizioni stazionarie, ovvero una volta che i parametri riportati sul sinottico mantengono valori costanti entro le tolleranze del software stesso.

Figura 8 interfaccia sinottico laboratorio LB Technology



Grazie alle dimensioni contenute delle apparecchiature presenti nell'impianto pilota, l'avviamento complessivo richiede un tempo limitato, è sufficiente un'ora, dopo di che per permettere al sistema di stabilizzarsi in seguito a variazioni dei parametri bisogna attendere un quarto d'ora. Le misurazioni sono state effettuate grazie a un manometro (riportato in Figura 9) con una sensibilità di 0,1 mmH₂O e con fondo scala di centinaia di mmH₂O. Queste misure sono state successivamente convertite in unità del sistema internazionale sapendo che 1 mmH₂O corrisponde a 10 Pa. Sia le misurazioni della pressione relativa che i prelievi di campioni per l'analisi granulometrica sono stati effettuati a distanza di quindici minuti dalla variazione di parametri dell'impianto, in questo modo i dati raccolti hanno maggiore affidabilità poiché rappresentano condizioni di lavoro stazionarie e non riguardano la fase transitoria iniziale instabile dovuta proprio all'avvio dell'impianto con nuovi parametri.

Figura 9 misurazione della pressione relativa in entrata e uscita dal separatore, impianto pilota laboratorio LB technology



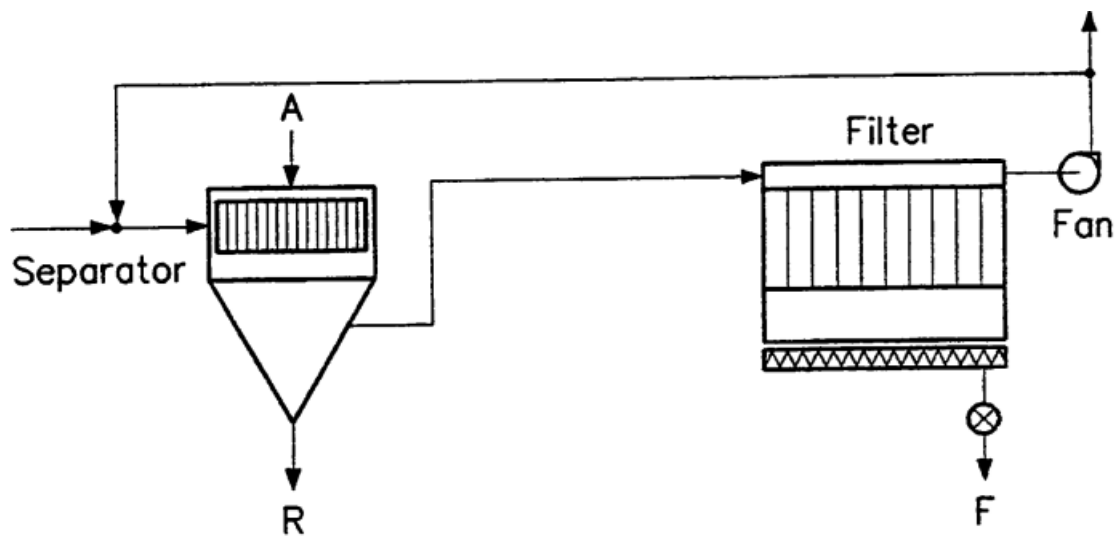
Una volta terminate le misurazioni e le analisi sui campioni prelevati sono stati riportati i risultati delle prove sperimentali, per ogni set di condizioni operative è stato evidenziato:

- La forza motrice, ovvero la depressione, a monte e a valle del separatore.
- Le rivoluzioni al minuto della girante interna al separatore.
- La portata di aria che attraversa l'impianto grazie all'aspirazione a valle.
- La granulometria del prodotto fine e della corrente di ricircolo con i relativi D10, D50 e D97.

2.2 Teoria alla base di Microton

I parametri per la valutazione della qualità del prodotto di macinazione, compresi i prodotti dell'ambito ceramico trattati nel processo Microton, sono basati su diversi studi: in particolare le aziende LB Technology e Sitec Castellarano S.p.a. si sono concentrate sullo schema di processo approfondito nella pubblicazione di Holderbank⁷.

Figura 10 schema del separatore (Holderbank cement seminar, 2000)



In Figura 10 è riportato uno schema delle apparecchiature atte alla separazione, per comprenderne il funzionamento si definiscono le diverse correnti:

- A, alimentazione al separatore
- R, ricircolo destinato al mulino
- F, frazione fine del macinato fine una volta separato dalla corrente d'aria che lo trascina.

Per stabilire la qualità di un prodotto di macinazione uscente dal filtro, ovvero la corrente F, si determina una dimensione delle particelle di riferimento, solitamente sulla base delle richieste del cliente o dagli standard stabiliti dall'esperienza e le prove sperimentali, e si confronta con le dimensioni delle particelle che compongono la corrente F. Le particelle con dimensioni inferiori al valore stabilito come riferimento costituiscono la frazione di interesse delle correnti che prendono parte al processo, indicate nello schema da A, R ed F.

Queste frazioni vengono indicate con la lettera minuscola corrispondente alla corrente a cui si riferiscono (ovvero come a, r ed f) per poi applicare il bilancio di materia al separatore e, ipotizzando che non avvenga frammentazione del materiale all'interno del separatore, è possibile scrivere un bilancio di materia anche sulla quantità di materiale con dimensioni inferiori alla dimensione scelta come riferimento, calcolata proprio come il prodotto tra la corrente di materiale e la frazione delle sue particelle con dimensioni inferiori al valore di riferimento:

Equazione 1

$$A = F + R$$

Equazione 2

$$A * a = F * f + R * r$$

Le diverse frazioni a,f,r sono misurate attraverso analisi granulometriche, in particolare l'azienda LB Technology sceglie di avvalersi dell'analisi per diffrazione laser che permette misurazioni su un range che va dai millimetri ai nanometri. Il sito ufficiale Alfatest⁵ riporta il funzionamento e il principio alla base della diffrazione, ovvero la capacità delle particelle di diffondere la luce se sottoposte a un fascio laser, con un angolo che dipende principalmente dalle loro dimensioni.

La trattazione di Alfatest⁵ spiega che la diffusione della luce attraverso le particelle viene definita come scattering e ha un'intensità variabile che contribuisce alla determinazione delle dimensioni del solido in esame, nel caso in cui le particelle sottoposte al laser siano di piccole dimensioni genereranno un fascio di luce di bassa intensità mentre in caso contrario lo scattering avrà elevata intensità. Pertanto, grazie alle nozioni citate in precedenza, è possibile associare a particelle di piccole dimensioni un fascio di luce ad elevata intensità e un ridotto angolo di diffrazione mentre per particelle di elevate dimensioni lo scattering è di bassa intensità con un elevato angolo di diffrazione. Per misurare i fasci di luce emessi dal solido in esame serve un sistema che supporti il campione, per assicurarne la stabilità e il corretto posizionamento, e una serie di rilevatori adeguatamente posizionati. Nell'ambito della macinazione industriale, e nello specifico per la preparazione di impasti e fritte ceramiche fini nell'impianto Microton, si utilizzano materiali opachi ma composti da particelle di dimensioni che variano dalle centinaia di micron fino a valori inferiori ai 10 micrometri pertanto diventa rilevante la teoria di Mie, di cui può essere trovata una trattazione più dettagliata sul sito Microtrac⁶.

Le particelle che riescono a superare la girante ed uscire come corrente bifase dall'apertura superiore del separatore, ovvero l'uscita della corrente definita come Prodotto, hanno dimensioni inferiori rispetto alle particelle che vengono scartate e sono costrette ad uscire dal basso attraverso la corrente definita Ricircolo come dimostrato dai parametri D10, D50 e D97. Se questi parametri, misurati rispettivamente per il prodotto e il ricircolo, sono molto diversi si ha indicazione di una buona separazione, poiché indica che le due correnti sono molto diversificate e che solamente una piccola frazione delle particelle fini caratteristiche del prodotto è contenuta all'interno del ricircolo, questa frazione comporta ulteriori cicli di funzionamento del sistema mulino/separatore per essere adeguatamente separata. Secondo l'esperienza aziendale LB un processo di separazione risulta tanto più efficiente quanto più i parametri per la valutazione del Prodotto (ovvero D10, D50 e D97) si avvicinano ai valori indicati nella commissione attualmente in produzione e più le correnti di prodotto e ricircolo sono diversificate.

Per quantificare l'efficienza della separazione si sfrutta la correlazione definita nella trattazione di Holderbank⁷ e che riprende la nomenclatura delle correnti entranti e uscenti dal separatore definite in precedenza in questo capitolo.

Equazione 3

$$\eta(D) = \frac{F_D}{A_D} * 100$$

Nell'Equazione 3 si nota che l'efficienza di separazione (η) è riferita a una specifica frazione di particelle (di dimensione D) e si calcola come il rapporto tra la frazione di prodotto fine della dimensione considerata (F_D) e la frazione entrante delle particelle di quelle dimensioni (A_D).

⁵ Granulometria laser in laboratorio, Alfatest, 2009

⁶ Scattering Mie theory, Microtrac, 2023

⁷ Holderbank cement seminar, 2000

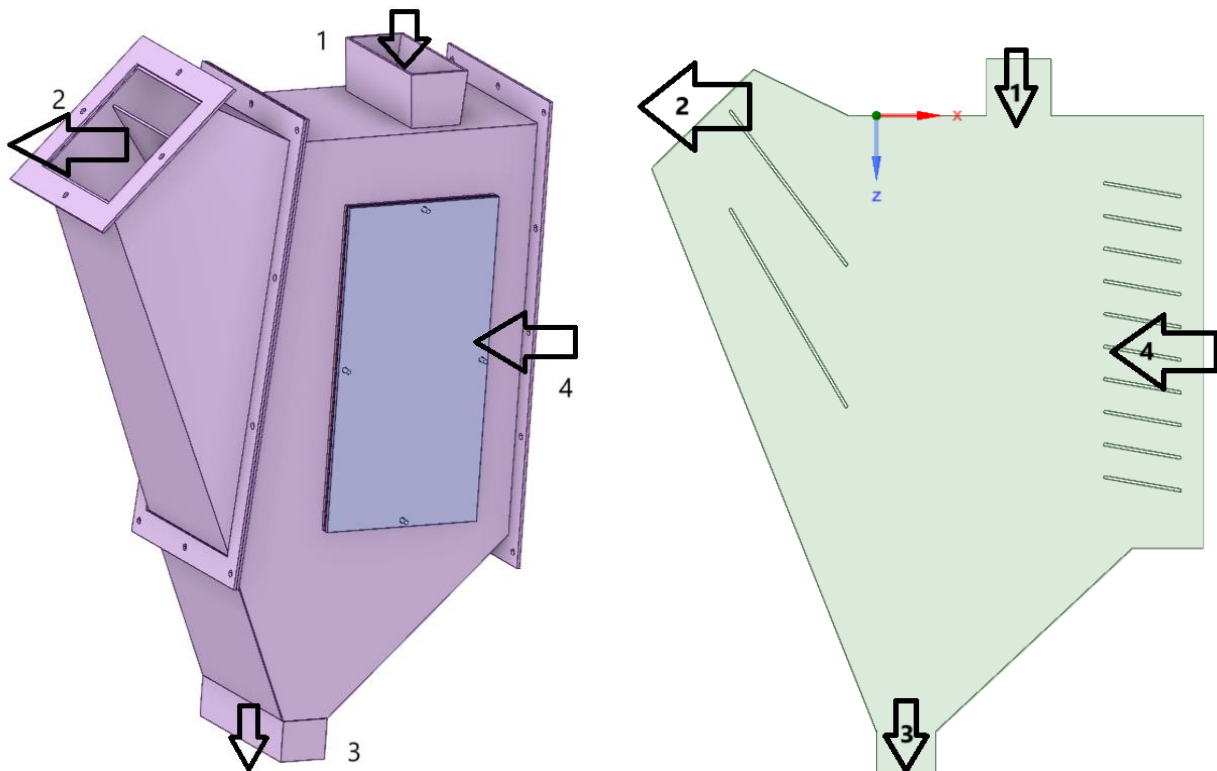
I valori di efficienza che tendono al 100% caratterizzano frazioni di particelle che entrano nel separatore ed escono solamente attraverso la corrente di prodotto fine, quindi sono state efficacemente separate dalle altre frazioni che escono solamente attraverso la corrente di ricircolo (le quali avranno efficienza che tende allo 0%).

Nella realtà c'è anche un notevole numero di frazioni che si suddividono tra il prodotto fine e il ricircolo, sono caratterizzate da valori intermedi dell'efficienza. Maggiore è il range di frazioni con valori intermedi di efficienza e minore sarà la diversificazione tra prodotto e ricircolo; per un'analisi il più possibile conservativa vengono presi come riferimento i valori di efficienza di separazione corrispondente alla dimensione D10, D50 e D97 del prodotto per verificare come varia l'efficienza all'aumentare delle dimensioni delle frazioni desiderate. Dalla distribuzione granulometrica del prodotto e ricircolo è possibile osservare graficamente la sovrapposizione delle due curve, ovvero l'insieme di frazioni di particelle che non vengono totalmente separate e vengono ripartite tra il prodotto fine e il ricircolo.

2.3 Descrizione separatore statico

Il primo modello analizzato consiste in un simulatore statico (mostrato in Figura 11), un'apparecchiatura di dimensioni contenute che sfrutta una depressione e apposite alette per indirizzare la corrente bifase e permettere la fuoriuscita solo a particelle sufficientemente fini.

Figura 11 modello separatore statico, vista 3D e in sezione



L'apparecchiatura è posizionata a valle di un nastro trasportatore che immette dall'alto l'impasto ceramico da separare mentre la corrente d'aria entra lateralmente e attraversa il separatore orizzontalmente grazie all'aspirazione di un ventilatore, quindi in direzione ortogonale rispetto alla corrente solida che cade dall'alto verso il basso.

La corrente bifase si forma all'interno della macchina, le particelle di diametro e peso inferiore vengono trascinate dalla corrente d'aria ed escono dall'apposita bocca laterale mentre le particelle più grossolane subiscono una deviazione ma continuano a precipitare verso il basso.

All'interno del separatore, prima dell'uscita della corrente bifase, sono posizionate delle alette con inclinazione regolabile che insieme alla depressione generata dal ventilatore permettono la fuoriuscita di particelle più o meno grossolane.

In un primo approccio al problema è stato approfondito il separatore statico, con una geometria semplice da riprodurre grazie alla sua simmetria. Partendo dal modello originale è stato realizzato il dominio di interesse in due dimensioni, una riproduzione della sezione sul piano individuato dall'asse di simmetria dell'apparecchiatura.

Nella Figura 11 viene mostrato il separatore statico, è composto da una tramoggia che raccoglie una portata di solido granulare dall'apertura superiore (1), grazie a un ventilatore posto all'estremità del tubo collegato all'apertura a sinistra (2) mentre l'aria entra dall'apertura a destra (4). I solidi con dimensioni, e di conseguenza peso, elevate non vengono trascinati dalla corrente d'aria che attraversa l'apparecchiatura da destra verso sinistra, cadono dalla bocca inferiore (3) per poi tornare al mulino di macinazione.

Il processo di separazione attraverso questo modello viene regolato grazie alla variazione di pressione tra l'entrata e uscita determinata in funzione della frequenza a cui gira il ventilatore in aspirazione posizione sul condotto collegato a (2). Aumentando la frequenza del ventilatore, viene aspirata una portata maggiore di aria e pertanto aumenta la variazione di pressione che permette di trascinare particelle di dimensioni maggiori. In caso contrario, diminuendo la frequenza del ventilatore, si verifica una riduzione della corrente bifase uscente dal separatore poiché diminuisce la portata di aria aspirata e anche la dimensione massima delle particelle che riesce a trascinare. Questo comportamento è dovuto alla velocità, e di conseguenza alla turbolenza, della corrente d'aria aspirata dato che la sezione attraverso cui deve passare è di dimensioni fissate e un aumento della portata provoca velocità e turbolenze maggiori che permettono di trascinare particelle di dimensioni maggiori. Un altro modo per regolare la portata d'aria consiste nel variare l'angolazione delle alette posizionate all'entrata (4), infatti variandone l'inclinazione si può ridurre la velocità dell'aria entrante o direzionarla in modo da avere tempi di permanenza maggiori all'interno del separatore.

Prendendo come riferimento l'asse x Figura 11, una rotazione in senso orario delle alette consente di direzionare l'aria verso la parete superiore del separatore e percorrere un percorso più breve; di conseguenza diminuisce anche la quantità di solido trasportato.

Durante la separazione serve un compromesso tra la produttività e la qualità della corrente fine per rispettare la specifica, ovvero la granulometria desiderata per il solido fine raccolto dalla corrente d'aria.

Maggiori portate d'aria aspirata permettono una produttività più elevata ma se la corrente non ha la granulometria richiesta dovrà tornare come ricircolo al mulino di macinazione. Per determinare la frequenza necessaria a ottenere una certa granulometria l'azienda ha svolto diverse prove pilota nell'apposito laboratorio; tuttavia lo studio del separatore statico ai fini della tesi è rimasto su un aspetto più qualitativo come preparazione alle simulazioni di correnti bifase gas-solido.

2.3.1 Casistiche analizzate per separatore statico

Sono stati analizzati sei diversi casi, in ognuno dei quali è stata modificata la configurazione degli elementi interni al separatore per poi determinare quali effetti avrebbe provocato sulla corrente uscente d'interesse:

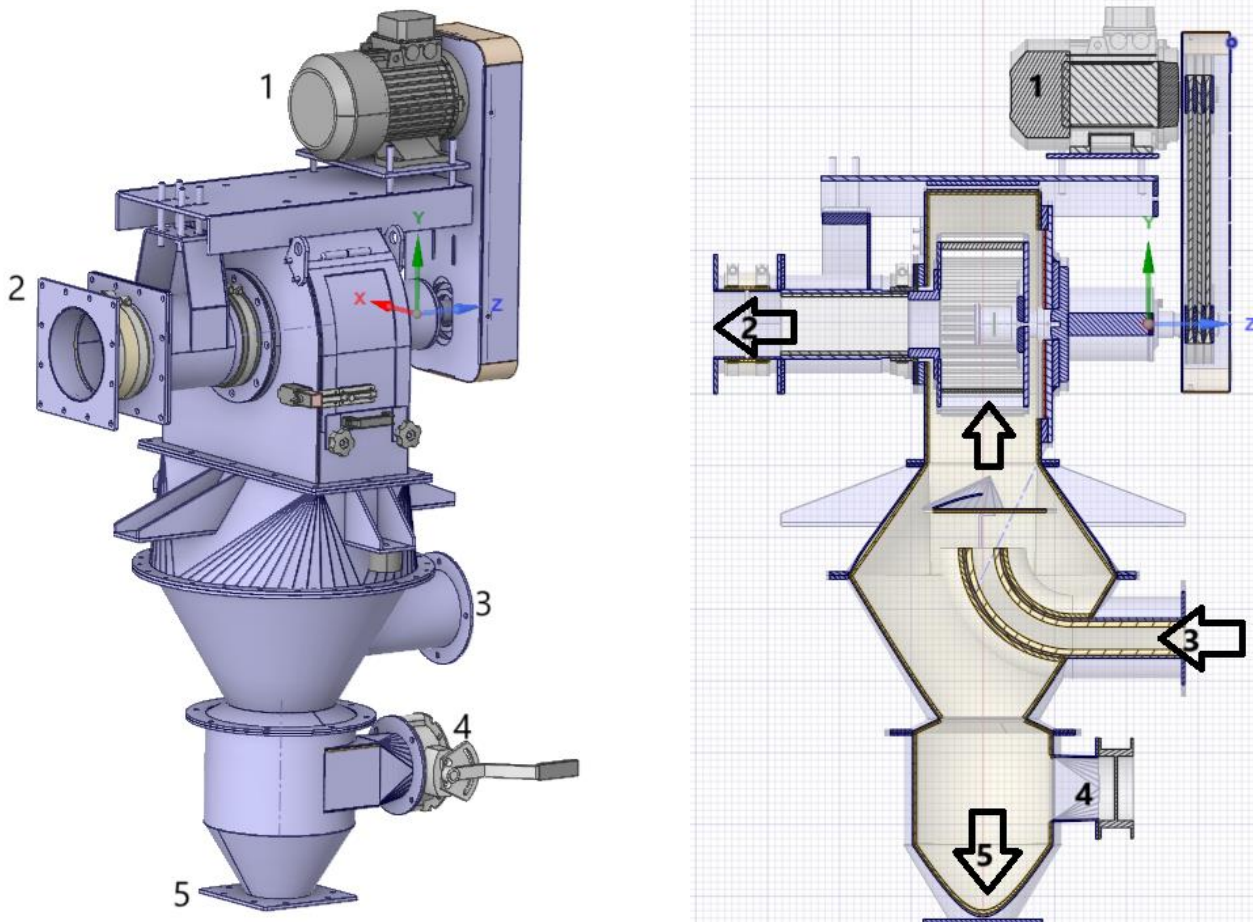
- 1) Viene simulato il funzionamento senza apportare modifiche alla struttura del separatore statico originale;
- 2) Viene modificata la curvatura dell'alette all'uscita 2;
- 3) Viene modificata l'angolazione delle alette in entrata da 10° a 30° mantenendo il resto della struttura fedele al modello originale;
- 4) Vengono applicate le modifiche esplicitate nel secondo e terzo caso;
- 5) Viene riproposta la curvatura delle alette in uscita 2 mentre le alette in entrata sono state poste a un'angolazione prossima a 90° per chiudere quasi completamente il passaggio d'aria così da creare una sezione di passaggio molto ristretta per l'entrata dell'aria;
- 6) Le alette in entrata sono state mantenute alla condizione del terzo caso mentre le alette in uscita sono state accorciate mantenendo la curvatura del secondo caso.

Le alette che regolano l'entrata della corrente d'aria possono essere ruotate in modo indipendente una dall'altra ma mantenendo fisso il loro fulcro, riguardo alle alette presenti in uscita si agisce sulla loro curvatura utile ad indirizzare la corrente bifase. Il compito del secondo set di alette è indirizzare la corrente d'aria verso l'esterno, prima di uscire le particelle possono impattare contro le alette perdendo quantità di moto e velocità e solamente le particelle sufficientemente leggere vengono risollevate dalla corrente d'aria perciò avviene un'ulteriore separazione in base alle dimensioni del solido. La forma di quest'ultime alette modifica anche la velocità dell'aria e il profilo di pressione all'interno dell'apparecchiatura, per questo motivo modificare la forma di questi componenti permette di ottimizzare la fluidodinamica e ridurre le zone morte ovvero quelle zone dove la velocità dell'aria tende a zero causando una perdita di solido trascinato fine.

2.4 Descrizione separatore dinamico

Il secondo modello preso in considerazione è il separatore dinamico presente nell'impianto pilota Microton situato nel laboratorio di LB Technology. Gli elementi mobili del separatore dinamico sono collegati tra loro in una girante, formata da diverse alette fissate su due dischi paralleli attaccati a un rotore alimentato da un motore esterno. Il numero di alette è fisso ma è possibile regolare la frequenza del motore esterno, e quindi la velocità della girante stessa, per permettere il passaggio di particelle con dimensioni variabili.

Figura 12 modello separatore dinamico, vista 3D e sezione



Il separatore dinamico in Figura 12 è il secondo modello analizzato ed è classificato come tale poiché la separazione al suo interno avviene ad opera di componenti meccanici in movimento chiamati girante. La struttura esterna comprende quattro canali di input e output per le correnti gassose e solide e un motore esterno (1) che permette il moto degli elementi interni.

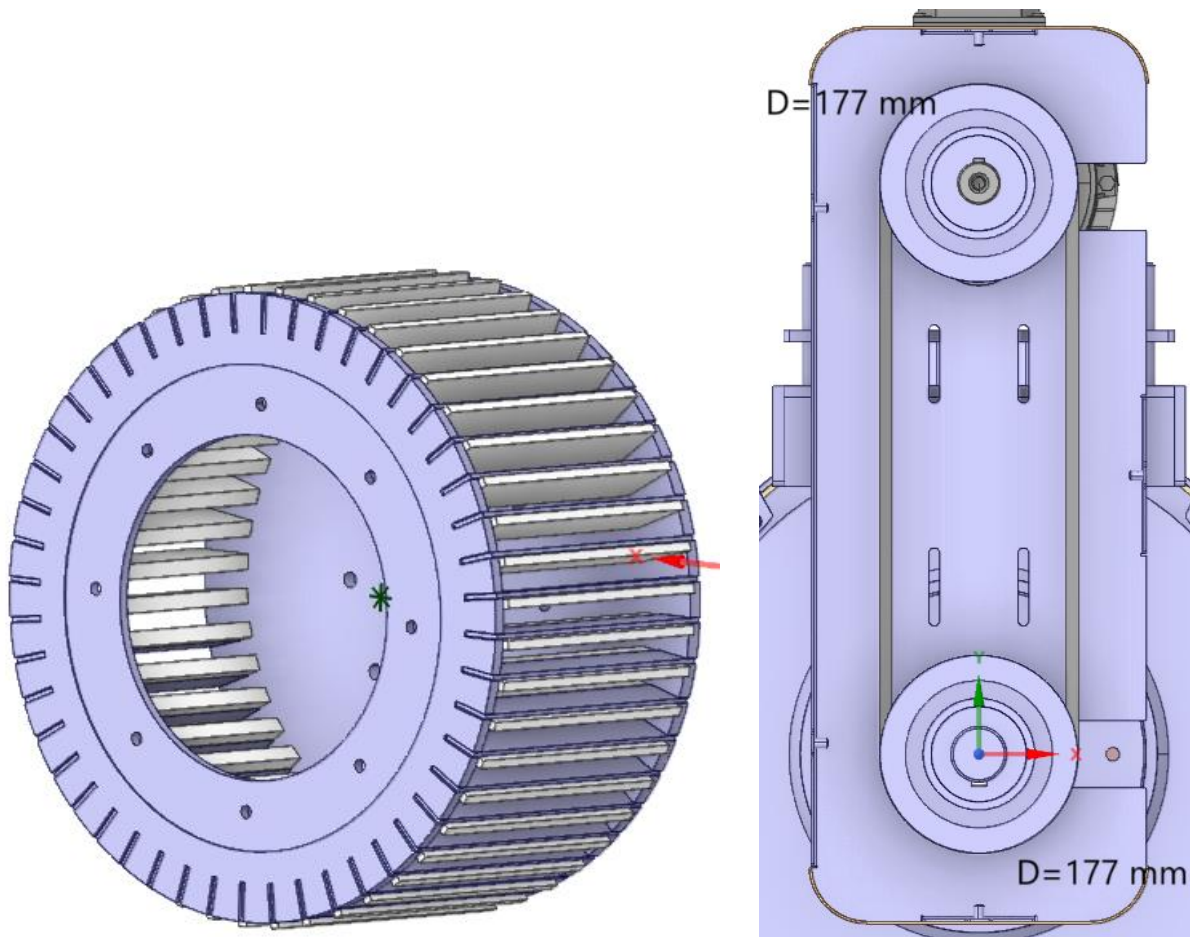
L'entrata (3) appartiene al condotto da cui entra la corrente bifase composta da aria e solido granulare eterogeneo provenienti da un mulino di macinazione a monte, questa corrente per effetto della depressione è costretta ad impattare la girante e uscire dal output (2): viene definita corrente di PRODOTTO. All'interno del separatore è presente una struttura rigida a forma di cappello cinese saldamente fissata alle pareti interne, posizionata sopra l'uscita del condotto (3).

Questo componente ci si aspetta che aumenti notevolmente la turbolenza interna al separatore poiché impedisce alla corrente entrante di mantenere un percorso rettilineo e la obbliga a miscelarsi con il flusso di particelle che non hanno attraversato la girante.

La corrente di particelle grossolane precipita per fuoriuscire dall'output (5): viene definita come corrente di RICIRCOLO. È possibile che, a causa del mescolamento precedentemente spiegato, siano state trascinate nella corrente di ricircolo delle particelle più fini che vengono recuperate con una corrente d'aria aspirata attraverso la presa d'aria (4) regolata grazie a una valvola manuale. La presenza del cappello cinese serve anche a proteggere i componenti interni al separatore dall'impatto con eventuali biglie di macinazione trascinate dalla corrente bifase proveniente dal mulino; queste ultime cadono rapidamente per uscire (5) e tornare insieme al ricircolo alla macinazione.

La girante ruota a velocità variabile in funzione della frequenza del motore esterno che l'alimenta e il rapporto tra le pulegge del motore e dell'albero a cui è collegata la girante; in questo caso il rapporto tra le pulegge è di 1:1 in Figura 13.

Figura 13 esploso della girante e delle pulegge dal modello del separatore dinamico



Il motore che alimenta la girante arriva a una frequenza massima di 50 Hz e di conseguenza a 1480 giri al minuto, regolando la frequenza desiderata ($F_{desiderata}$) cambia anche la velocità di rotazione della girante, in generale per il calcolo delle rivoluzioni al minuto si applica Equazione 4:

Equazione 4

$$rpm\ girante = 1480\ rpm * \frac{D_{albero}}{D_{motore}} * \frac{F_{desiderata}}{50\ Hz}$$

Per velocità molto elevate la distribuzione granulometrica delle dimensioni delle particelle nella corrente uscente è contenuta in un intervallo di qualche decina di micron con delle frazioni esigue di particelle grossolane che riescono sporadicamente a superare gli organi in movimento grazie a effetti di trascinamento e la presenza di zone morte, ovvero a velocità inferiore rispetto al corpo principale. Ci si aspetta che gli effetti di trascinamento siano particolarmente accentuati nella zona superiore della girante, infatti lo spazio tra quest'ultima e la parete superiore del separatore è molto limitato e perciò si può accumulare del particolato con dimensioni grossolane fino a quando non verrà trascinato dalla corrente d'aria oltre la girante.

Il trascinamento è dannoso per il separatore poiché diminuisce la qualità della corrente uscente ma viene limitato grazie alla presenza del cappello cinese che favorisce la precipitazione delle particelle di grosse dimensioni verso la parte inferiore del separatore.

2.4.1 Casistiche analizzate per separatore dinamico

Sono state analizzate cinque diverse condizioni operative del separatore dinamico presente nell'impianto pilota Microton nel laboratorio di LB Technology:

- 1) Frequenza del ventilatore in aspirazione costante a 50 Hz, frequenza del motore a 10 Hz da cui ricavare la portata di aria che attraversa il sistema, la depressione a monte e valle del separatore, le portate e granulometria relativa al prodotto e al ricircolo.
- 2) Frequenza del ventilatore in aspirazione costante a 50 Hz, frequenza motore a 20 Hz da cui effettuare le stesse misurazioni del caso 1.
- 3) Frequenza del ventilatore in aspirazione costante a 50 Hz, frequenza motore a 30 Hz da cui effettuare le stesse misurazioni del caso 1.
- 4) Frequenza del ventilatore per aspirazione costante a 55 Hz, frequenza del motore a 20 Hz da cui effettuare le stesse misurazioni del caso 1.
- 5) Frequenza del ventilatore per aspirazione costante a 45 Hz, frequenza del motore a 20 Hz da cui effettuare le stesse misurazioni del caso 1.

Per le prime tre prove, dopo la procedura di avviamento e dopo aver imposto la frequenza desiderata del motore collegato alla girante, sono state effettuate misurazioni della pressione relativa a monte e valle del separatore in condizioni stazionarie e sono stati prelevati dei campioni dalla corrente del prodotto e del ricircolo per analizzarne la granulometria. Nelle ultime due prove invece, utili allo studio della granulometria in base alla forza di aspirazione, la velocità della girante è stata mantenuta costante ma è stata modificata la frequenza del ventilatore a valle dell'impianto e per questo motivo è stato necessario un periodo di assestamento dell'impianto prima di poter procedere alle misurazioni e prelievi.

3. Modellazione virtuale dei separatori

3.1 Teoria alla base della modellazione CFD

Analizzare sistemi reali, tra cui impianti e processi industriali, comporta risolvere problemi in cui la fluidodinamica assume un ruolo fondamentale e pertanto richiedono soluzioni complesse per le quali risulta conveniente l'utilizzo di un calcolatore e di adeguati software. L'insieme di equazioni e leggi necessarie a descrivere accuratamente un sistema reale comprendono solitamente bilanci locali, con le relative condizioni al contorno, la cui risoluzione passa comunemente attraverso uno strumento matematico molto utilizzato: il CFD. Questo strumento permette di affrontare l'analisi del sistema composto dai bilanci di materia, energia e quantità di moto grazie a una serie di algoritmi che forniscono soluzioni numeriche ai bilanci locali linearizzando le equazioni differenziali che li compongono. Prima di procedere alla modellazione virtuale del problema è necessario analizzare le apparecchiature che diventeranno oggetto della simulazione poiché il simulatore opera su un dominio definito attraverso la geometria fornita dall'utente. Nel caso dei separatori il dominio deve comprendere lo spazio vuoto interno in cui passa la corrente di aria e particelle solide, questo spazio può avere delle irregolarità causate dagli elementi meccanici interni all'apparecchiatura ma deve comunque mantenere una certa continuità: è importante che le zone in cui passa il fluido siano connesse per assicurare il corretto funzionamento del simulatore.

Al tempo stesso, per avere risultati il più possibili fedeli alla realtà, è necessario tenere in considerazione il maggior numero di elementi dell'apparecchiatura in esame. Eliminando o semplificando eccessivamente un elemento la simulazione diventa più semplice ma anche più inaccurata, i componenti possono essere eliminati solamente se non influenzano il moto della corrente bifase.

Considerando i più comuni elementi meccanici all'interno dei separatori, come barriere o elementi mobili, devono essere inseriti nel disegno e di conseguenza nel dominio della simulazione in modo da influenzare il comportamento del fluido e allo stesso tempo permettere la continuità del dominio senza creare zone inaccessibili alla fase fluida. I due modelli di separatori presentano evidenti differenze strutturali e di conseguenza una diversa complessità, per poter approcciare le simulazioni con l'utilizzo di fase discreta solida dispersa (denominata DPM) è stato inizialmente analizzato il modello statico. I benefici dell'apparecchiatura statica sono la sua simmetria, quindi la possibilità di lavorare in 2D e con tempi computazionali molto rapidi, inoltre la sua semplicità strutturale facilita la riproduzione del dominio di interesse nel designer virtuale. Come software, tra quelli associati ad Ansys Fluent, è stato scelto il designer SpaceClaim che permette facilmente di passare dalla struttura planare a quella tridimensionale.

Una volta realizzato il dominio per la simulazione e definito i gruppi, ovvero sezioni o componenti di interesse, è possibile procedere alla realizzazione della matrice, ovvero l'insieme dei volumi di controllo in cui viene suddiviso il dominio iniziale per poi procedere all'effettiva simulazione.

La realizzazione della matrice è un processo fondamentale, come riportato dal forum sul sito ufficiale Innovation Space Ansys nella sezione dedicata al Meshing aggiornata nel 2023, infatti si tratta di un insieme di volumi virtuali la cui unione permette di ricreare il dominio reale, è necessario che questa suddivisione rispetti dei criteri di qualità che certifichino:

- La continuità dei volumi di controllo, infatti non è possibile procedere alla simulazione se nella suddivisione del dominio sono rimasti spazi vuoti.
- La praticità della matrice, è necessario che la suddivisione del dominio produca dei volumi di controllo di dimensioni adeguate. Non devono essere né troppo ridotti, causerebbero alterazioni repentine della proprietà del flusso che li attraversa, né troppo elevate poiché interferirebbero con l'ottenimento di una soluzione omogenea.

Nella guida per utenti riportata sul sito di Ansys aggiornato nel 2024 vengono evidenziati due parametri largamente utilizzati per la valutazione della qualità della matrice:

- Qualità degli elementi, un valore numerico tra 0 e 1 definito come il rapporto tra l'area superficiale dell'elemento di controllo e la sommatoria dei quadrati del loro perimetro, in caso di elementi bidimensionali. In caso di elementi tridimensionali è il rapporto del volume e la radice quadrata del cubo della sommatoria dei quadrati dei perimetri. La qualità dell'elemento viene calcolata automaticamente dal software per ogni elemento di controllo in cui viene suddiviso il dominio virtuale per restituire all'utente sia valori precisi di determinate zone oppure una media globale. Elementi di controllo di qualità sono caratterizzati da un valore tendente a 1, rappresenta una figura piana o un cubo perfetto, mentre elementi di controllo con forme irregolari, con conseguente aumento del termine a denominatore, sono associate a valori prossimi allo zero.
- Asimmetria, un valore numerico tra 0 e 1 che permette di identificare quanto la forma e dimensioni dell'elemento di controllo tendono alle condizioni ideali, ovvero geometria equilatera e simmetrica corrispondenti a un termine di asimmetria prossimo allo zero.

Bisogna specificare che questi criteri non sono collegati ed è sufficiente sceglierne uno per procedere alla valutazione della qualità della matrice, d'altro canto l'utilizzo di più criteri di valutazione può fornire la possibilità all'utente di effettuare un controllo più approfondito. E' sufficiente tenere in considerazione i valori di riferimento corretti per ciascun criterio. Per la produzione di matrici planari, quindi su domini bidimensionali, l'interfaccia di Ansys Fuent suggerisce l'utilizzo di Mechanical Meshing, un software con numerose funzionalità che permettono di suddividere e personalizzare la matrice secondo le scelte dell'operatore e senza uno schema predefinito. Nel caso di matrici per domini tridimensionali Ansys suggerisce l'utilizzo del software Fluent Meshing, appositamente implementato da Ansys Fluent per avere continuità tra il software di configurazione della matrice e il software Fluent che effettua le simulazioni CFD. Rispetto a Mechanical meshing il software Fluent Meshing possiede una sequenza di parametri preimpostati che l'operatore può andare a modificare sequenzialmente avendo un immediato riscontro sulla qualità della matrice ed eventuali errori da dover correggere prima di procedere nella configurazione. Fluent Meshing permette inoltre di definire, oltre ai gruppi presenti nel dominio, le diverse zone attraversate dal fluido e quelle occupate da elementi solidi per poi creare la matrice utilizzando elementi poliedrici (ad esempio Poly-Hexcore).

Questi elementi sono frutto della Tecnologia Mosaico implementata dagli sviluppatori di Ansys per ottimizzare la creazione di matrici, come riportato in una pubblicazione del 2020. L'articolo⁸ spiega i benefici derivati dalla combinazione elementi esaedrici, permettono di riempire il dominio con accuratezza ed efficienza, ed elementi poliedrici/prismatici che permettono la realizzazione di matrici su domini complessi con una maggiore efficienza ma con un relativo aumento del tempo computazionale richiesto dalla simulazione. La combinazione di queste due tipologie di elementi ha portato all'implementazione della Tecnologia Mosaico, una volta inserita nell'interfaccia del software Fluent Meshing ha permesso di ottimizzare la realizzazione di matrici complesse attraverso:

- Il riempimento di zone di Bulk, ovvero zone estese e non particolarmente ricche di dettagli, con elementi esaedrici con un ridotto numero di facce che riduce il tempo computazionale richiesto dal calcolatore.
- L'utilizzo di una complessa rete composta da elementi prismatici multistrato nelle zone ricche di dettagli che richiedono elevata efficienza.
- L'utilizzo di elementi poliedrici per congiungere le diverse zone e preservare sia il livello di dettaglio desiderato nelle zone di confine che la continuità con la matrice presente nella zona di Bulk.

L'articolo⁸ pubblicato da Ansys ha dimostrato che l'utilizzo della Tecnologia Mosaico permette di ottenere matrici di elevata qualità associate a simulazioni con tempi computazionali fino al 50% più rapidi rispetto a simulazioni svolte su sistemi con matrice realizzata esclusivamente da elementi esaedrici o tetraedrici. La diminuzione dei tempi computazionali è associata alla riduzione di elementi richiesti per la formazione di matrici che sfruttano la Tecnologia Mosaico, Ansys ha dimostrato che sono necessari fino al 46% di elementi in meno rispetto a matrici realizzate convenzionalmente.

⁸ ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution, Ansys Inc, 2020

Il corretto utilizzo di CFD comporta la scelta di metodi di discretizzazione utili alla risoluzione del problema, dato che ogni sistema ha una maggiore affinità a un determinato metodo, ciò migliora la convergenza del sistema e soprattutto permette di verificare l'accuratezza e l'affidabilità dei risultati. I metodi di discretizzazione più comuni, secondo Treccani⁹, vengono riportati di seguito:

- Metodo delle differenze finite, utilizzato nell'interpolazione polinomiale di Newton e Lagrange per poter approssimare l'andamento di funzioni complesse. Questo metodo è relativamente semplice poiché è stato tra i primi metodi sviluppati e pertanto non risulta adeguato a sistemi con geometrie complesse.
- Metodo a elementi finiti, viene applicato a sistemi fisici con dominio variabile e che richiedono una soluzione non omogenea. Questo metodo consiste nel suddividere il corpo in esame in molteplici elementi di forma geometrica più semplice ciascuno dei quali verrà considerato un dominio di integrazione numerica omogeneo. Grazie alla flessibilità fornita dalle molteplici suddivisioni del dominio di partenza il metodo a elementi finiti ha un vasto campo di applicazioni, tuttavia lavorare su corpi con dominio variabile comporta un elevato grado di complessità soprattutto in presenza di flussi.
- Metodo a volumi finiti, prevede di suddividere il dominio in volumi di controllo continui tra loro ma che condividono solamente la frontiera per assicurare che non ci siano sovrapposizioni e quindi intervalli con una valenza superiore rispetto agli altri. Su ogni volume di controllo viene applicato il teorema di divergenza di Gauss per ricavare la soluzione al sistema di equazioni che descrive il dominio iniziale.

Il metodo a volumi finiti è nato da studi volti ad approfondire il metodo delle differenze finite e renderlo più adeguato a trattare problemi in cui fossero presenti flussi ed equazioni di trasporto, ovvero il classico caso in cui viene comunemente applicata l'analisi CFD per cui risulta il metodo più utilizzato. Questo approccio è particolarmente adeguato poiché mantiene ben distinte le caratteristiche costitutive del flusso, il termine di accumulo e quello generativo. Lo schema di discretizzazione nel setup di una simulazione CFD permette l'ottenimento di una soluzione numerica per la maggior parte dei domini reali descritti attraverso un sistema di equazioni differenziali ad eccezione dei casi in cui è presente il trasporto della quantità di moto. Questi casi comportano sistemi non lineari per cui è necessario un sistema iterativo per risolvere il bilancio di materia e quantità di moto, la soluzione ha validità sia per problemi stazionari sia per problemi transitori, per quest'ultimi risulta rilevante la dipendenza dal tempo. La soluzione del sistema avviene attraverso un certo numero step ciascuno associato a un intervallo di tempo costante e un numero di iterazioni limite scelto dall'operatore. Nel caso di problemi transitori l'associazione dei valori delle diverse grandezze (come ad esempio pressione, velocità, ecc.) calcolate nei diversi step risolutivi ai rispettivi intervalli di tempo permette al software di stabilire la correlazione tra quelle grandezze e il tempo. Su queste premesse gli approcci CFD scelgono di sfruttare il metodo a volumi finiti, è importante ricordare che l'applicazione di questo metodo comporta un'approssimazione necessaria per discretizzare le equazioni e ottenere una soluzione dal calcolatore con tempi computazionali accettabili. Durante il processo di discretizzazione è necessario verificare la convergenza e la coerenza del metodo utilizzato rispetto al problema di partenza. È necessaria la convergenza della simulazione per dimostrare che il calcolatore abbia condotto i calcoli in maniera logica e sequenziale, un sistema che volge a convergenza è caratterizzato da un errore tra il valore reale e il valore ottenuto dalla simulazione per una stessa grandezza tende al minimo al crescere del numero di iterazioni del calcolatore.

⁹ l'Enciclopedia della matematica sull'enciclopedia online, Treccani, 2013

La coerenza del sistema rappresenta il livello di accuratezza nel riprodurre il problema reale, se fosse possibile utilizzare volumi di controllo con dimensioni nulle, il dominio virtuale dovrebbe coincidere con quello reale di partenza. Nella pratica questo livello di accuratezza non è possibile quindi ci sarà sempre una minima discrepanza tra il dominio creato dall'insieme dei volumi di controllo e il problema reale. Secondo i criteri descritti precedentemente in tutte le simulazioni viene introdotto un errore sistematico dovuto al tentativo di riportare un problema reale in un sistema virtuale, per questo motivo l'ultimo passo fondamentale è assicurare la stabilità del metodo.

Questa caratteristica è verificata se l'errore numerico introdotto nella simulazione resta contenuto. Le proprietà sopraelencate del dominio virtuale ottenuto grazie alla discretizzazione del problema reale iniziale non possono essere garantite seguendo una procedura specifica a causa dell'elevata specificità che ciascun problema richiede per poter essere trasferito sul simulatore; tuttavia l'utilizzo di metodi di discretizzazione (tra cui quello a volumi finiti) si sono rivelati validi in molteplici applicazioni restituendo buoni risultati. È necessario trovare la corretta configurazione che permetta al simulatore di arrivare a convergenza per il sistema fornito, in questo caso una riproduzione del separatore, introducendo un'iniezione di particelle e quindi la presenza di una fase discreta dispersa (Discrete Phase Model, ovvero DPM). Come esposto nel capitolo 1.3 Applicazioni dell'analisi CFD l'utilizzo della DPM permette di simulare e studiare sistemi bifasici, in particolare le interazioni tra fluido e particelle trascinate. Nel caso dei separatori è importante stabilire come il moto delle particelle venga influenzato dalla fluidodinamica interna all'apparecchiatura e la granulometria della DPM che attraversa determinate superfici di controllo, come ad esempio le sezioni di uscita. Una volta scelto un insieme di correlazioni fra le diverse possibilità offerte da Ansys Fluent che permetta di arrivare a convergenza e ottenere dei risultati comparabili con quelli reali, si procede ad analizzare la fluidodinamica all'interno del separatore e il comportamento della DPM.

3.2 Separatore statico

3.2.1 Definizione del dominio del separatore statico

La prima apparecchiatura analizzata è il separatore statico che, come illustrato in precedenza, presenta una simmetria ed è quindi utile effettuare una riproduzione sia bidimensionale che tridimensionale utilizzate rispettivamente per un'analisi preliminare con brevi tempi computazionali e una seconda analisi più accurata per apprezzare la fluidodinamica all'interno del sistema.

Questo separatore contiene al suo interno due diversi set di alette, rispettivamente all'entrata del flusso d'aria e all'uscita di quest'ultimo, con diverse funzionalità e di conseguenza diverse forme; non ci sono altri componenti interni rilevanti. Il dominio di interesse pertanto comprende l'interno del separatore ad eccezione delle alette, rappresentate dalle fessure nei disegni come in Figura 14, che permettono di mantenere la continuità senza necessità di approssimazioni nel dominio interessato dal fluido. Per poter analizzare le diverse configurazioni del separatore statico è stata utilizzata la modellazione CAD bidimensionale, queste variazioni non modificano integralmente la struttura dell'apparecchiatura originale ma servono a determinare la miglior condizione operativa del separatore tra quelle elencate nel successivo capitolo: 2.3.1 Casistiche analizzate per separatore statico.

L'utilizzo di domini bidimensionali, giustificato dalla simmetria del separatore statico, consente tempi computazionali rapidi per identificare la suddivisione delle particelle, i valori di pressione e velocità delle diverse varianti mentre un'analisi più approfondita, che comprenda la struttura tridimensionale e le linee di flusso, verrà svolta solamente per la configurazione ottimale.

Figura 14 caso 1 separatore statico

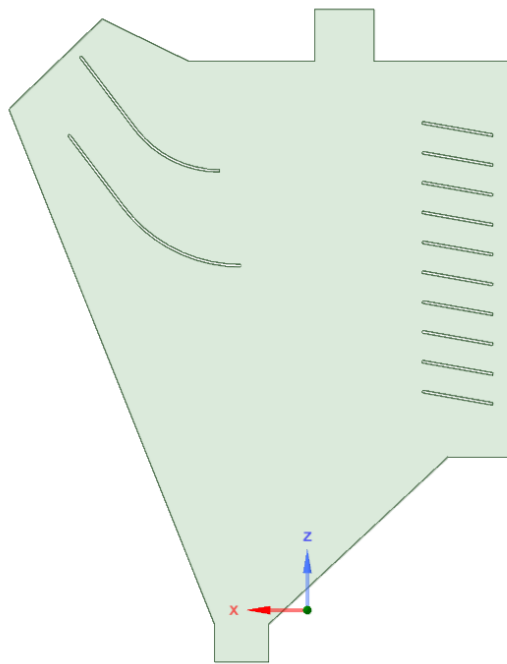
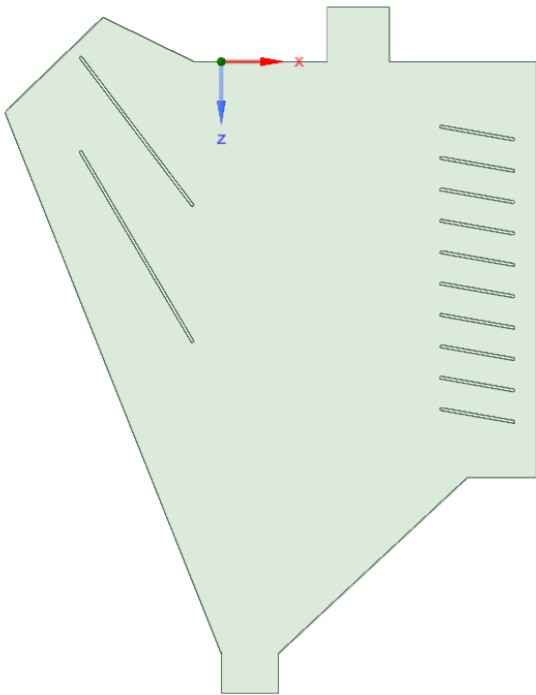


Figura 15 caso 2 separatore statico

Figura 16 caso 3 separatore statico

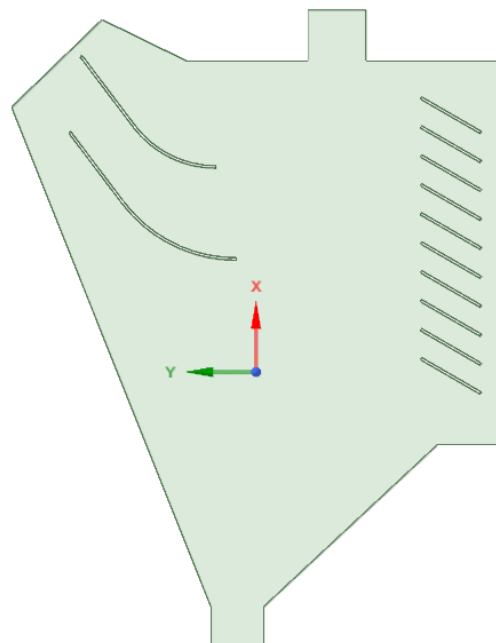
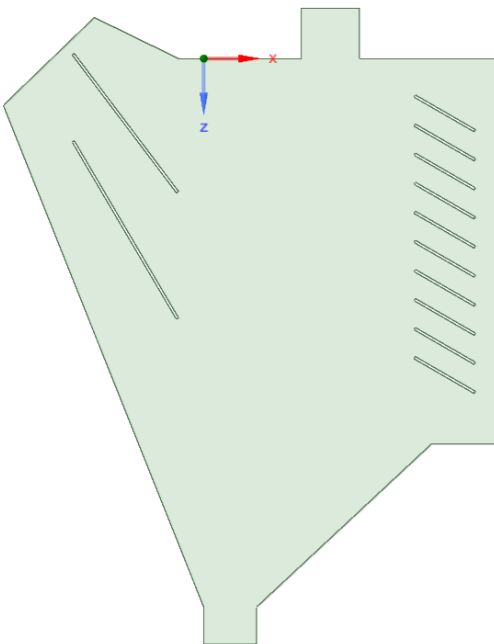


Figura 17 caso 4 separatore statico

Figura 18 caso 5 separatore statico

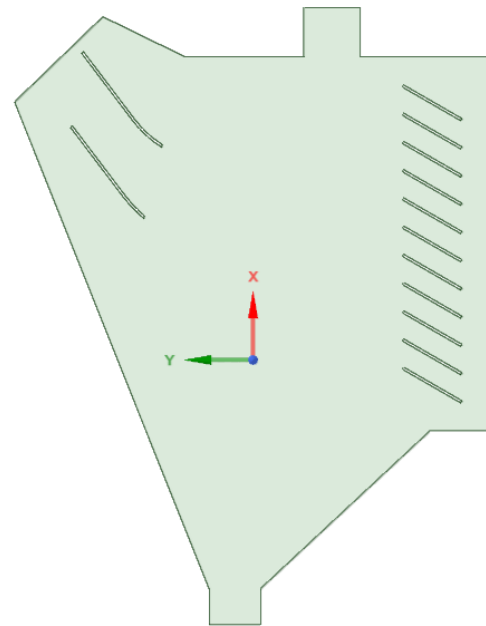
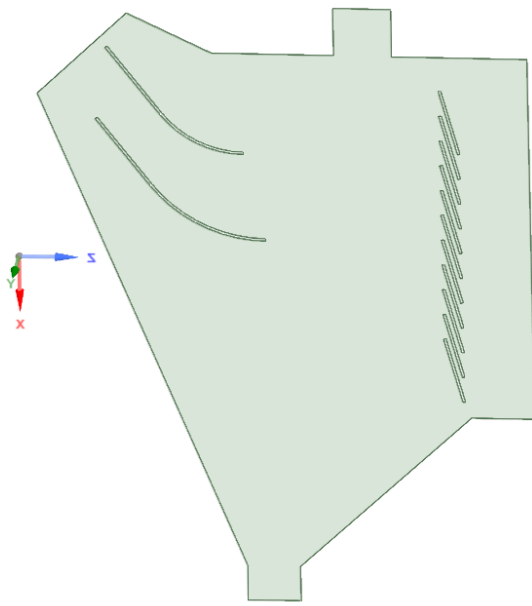
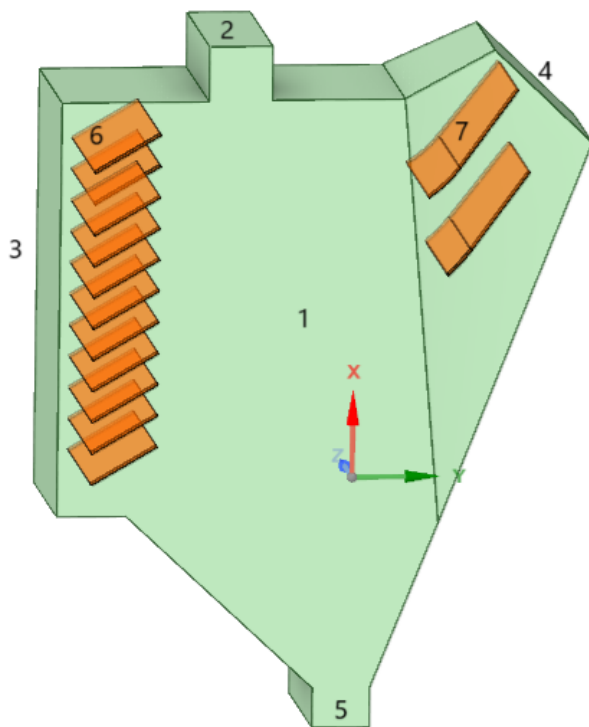


Figura 19 caso 6 separatore statico

Dopo aver stabilito la miglior configurazione operativa del separatore dinamico è necessario riprodurre un modello tridimensionale per analizzare approfonditamente la fluidodinamica interna grazie alle linee di flusso legate alle diverse grandezze, il dominio di interesse riprodotto al CAD viene riportato in Figura 20 grazie all'estrapolazione della sezione bidimensionale tracciata in precedenza.

Figura 20 dominio fluido tridimensionale separatore statico



numero	gruppo
1	Dominio fluido
2	Input solido
3	Input aria
4	Output aria
5	Output solido
6	Alette
7	Alette

I disegni bidimensionali e tridimensionali sono stati riprodotti utilizzando Space Claim, un designer CAD compreso tra le applicazioni collegate al simulatore Ansys Fluent, che permette facilmente di trascinare forme planari e riarrangiarle in strutture tridimensionali. All'interno del designer è importante definire i gruppi ovvero le superfici o componenti fisici del separatore che delimitano zone su cui definire condizioni al contorno, come mostrato in Figura 20.

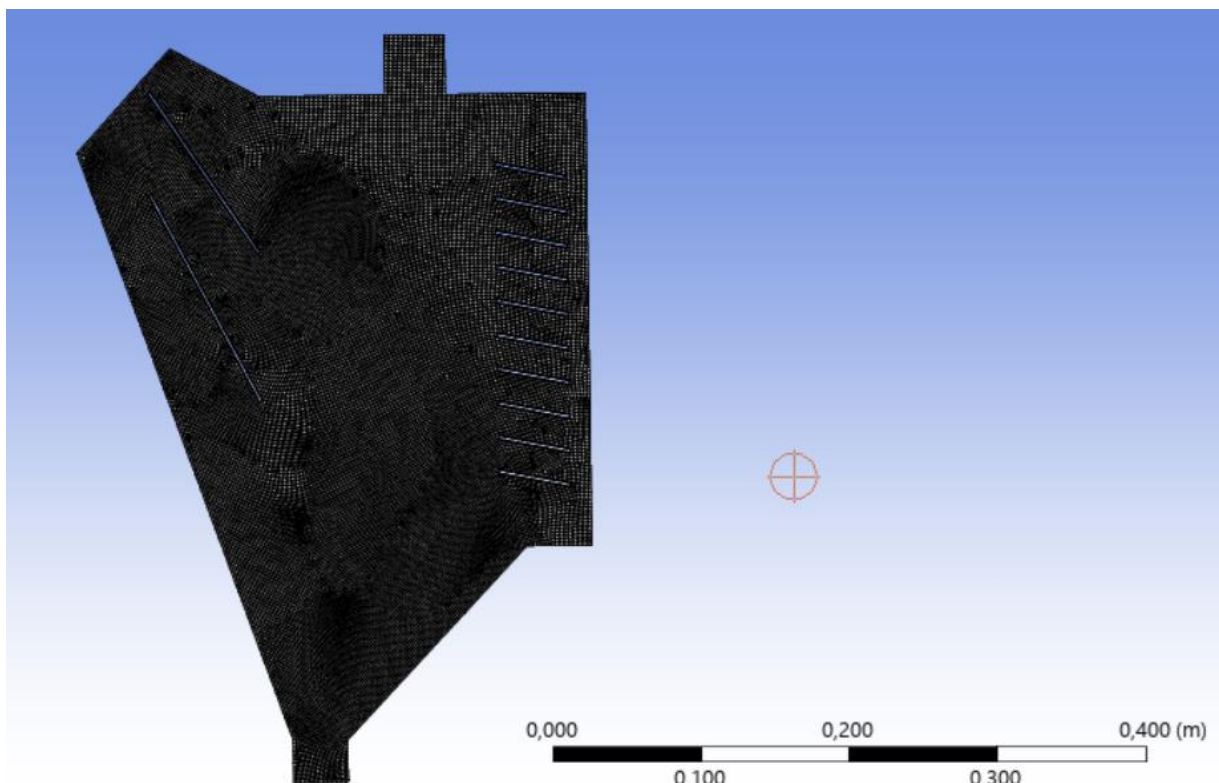
È importante analizzare i gruppi 6 e 7, ovvero le alette, questi componenti sono esclusi dal dominio fluido pertanto non sono fisicamente presenti ma la lacuna che lasciano riprende fedelmente la loro forma. Nel linguaggio del software è possibile raggruppare le superfici che delimitano queste lacune e definirle come se fossero veri e propri componenti fisici presenti nel dominio, in particolare ostacoli che non appartengono al flusso interno al dominio ma ne influenzano il comportamento. Il gruppo 1 rappresenta il dominio fluido quindi la zona d'interesse in cui si svolgerà la simulazione mentre i gruppi da 2 a 5 comprendono gli input e output del sistema e saranno il riferimento per la definizione delle condizioni al contorno durante l'implementazione della simulazione su Fluent.

3.2.2 Preparazione della matrice del separatore statico

Per la realizzazione della matrice per il dominio bidimensionale del separatore statico, che costituisce il caso più semplice analizzato, è stato utilizzato il software Mechanical Meshing associato al simulatore Fluent.

L'interfaccia permette di selezionare il corpo d'origine per la matrice, ovvero il dominio da suddividere, e assegnare una geometria e una dimensione minima dei volumi di controllo; agendo su questi parametri è possibile ottenere una matrice dettagliata con elementi più fini e numerosi aumentando però anche il tempo computazionale legato alla quantità di volumi di controllo.

Figura 21 matrice separatore statico bidimensionale



In Figura 21 è possibile osservare il risultato alla fine del processo di Meshing, ovvero l'elaborazione del software per suddividere il dominio fornito dall'utente nei volumi di controllo. In Figura 22 e Figura 23 vengono riportati i parametri inseriti per la geometria bidimensionale del separatore statico.

Figura 22 setup meshing separatore statico bidimensionale

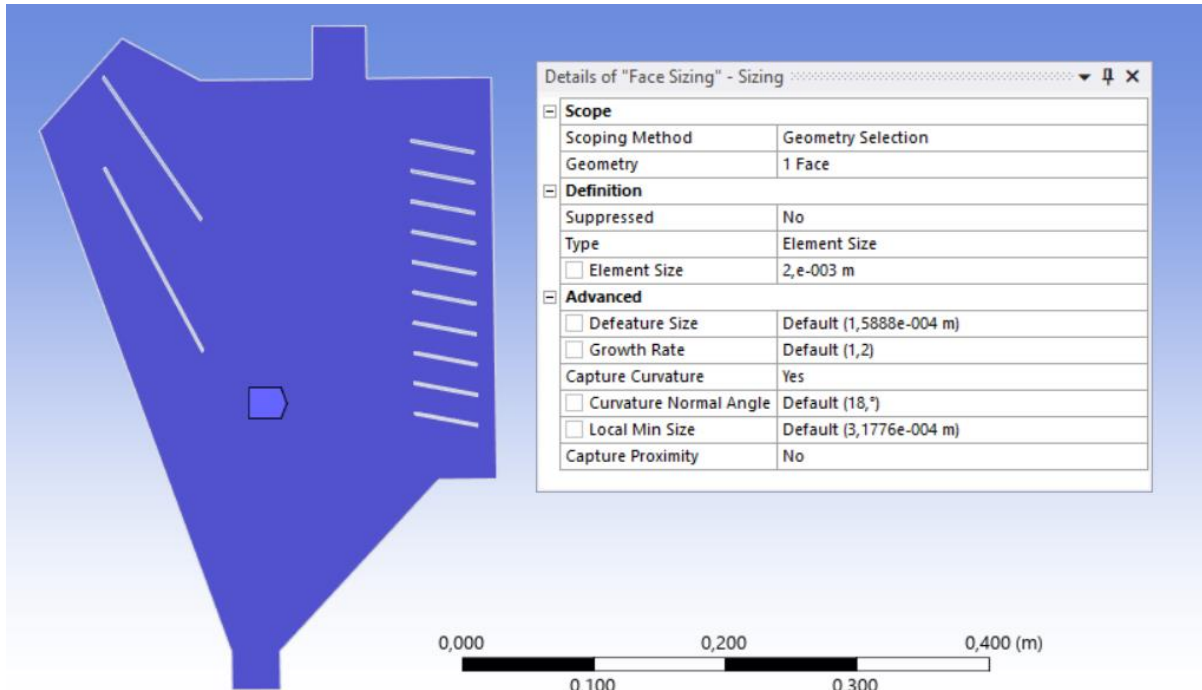
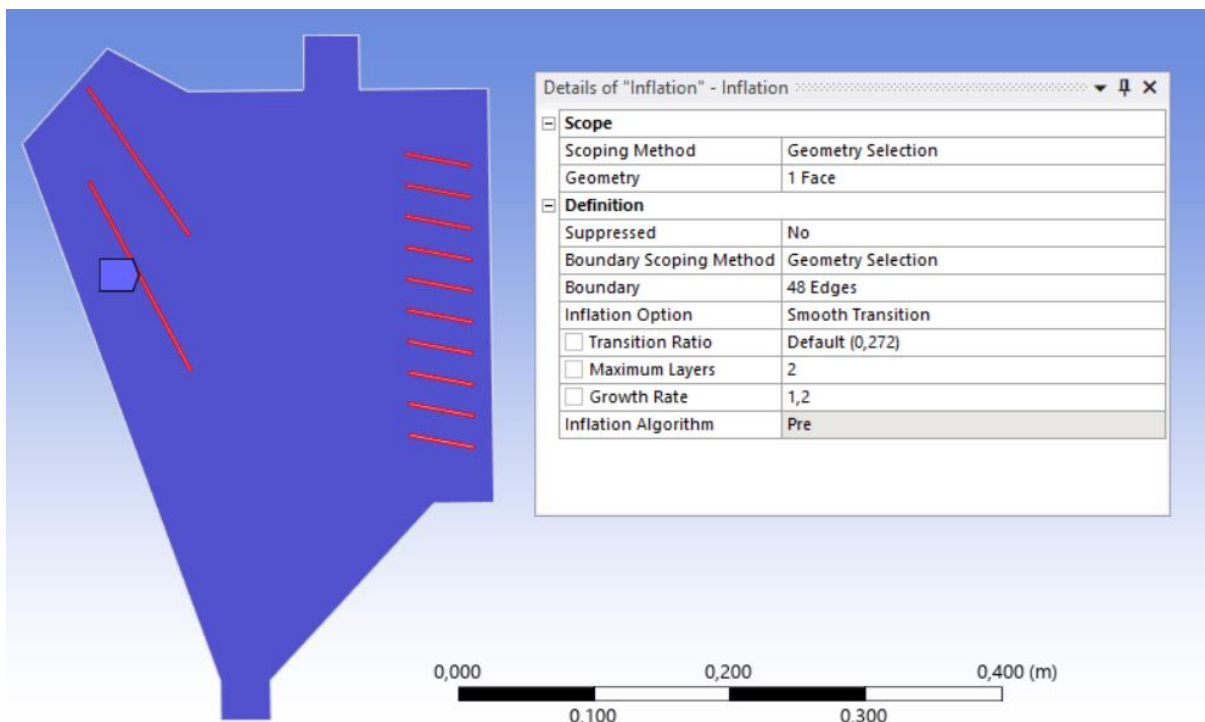
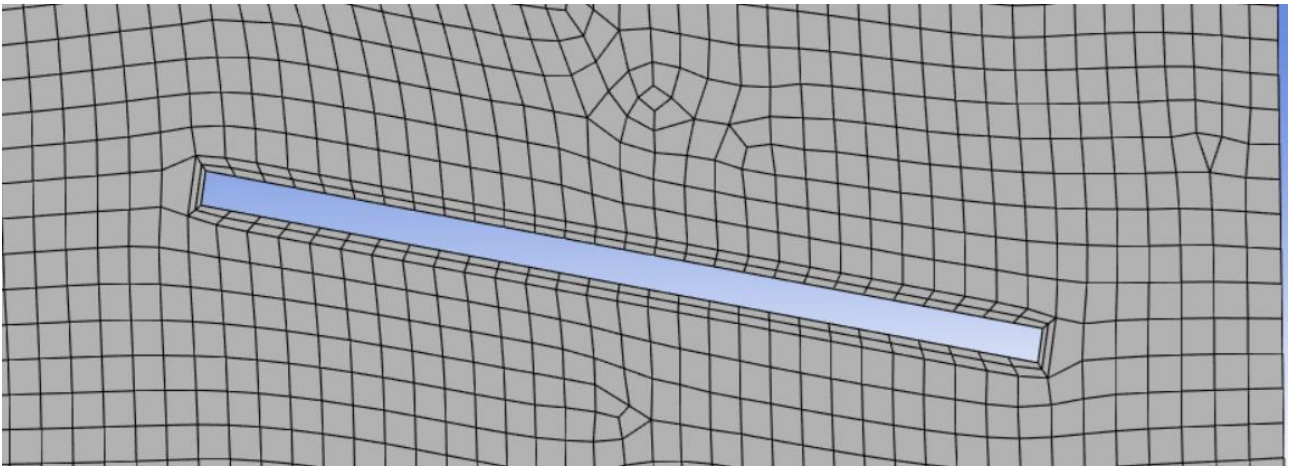


Figura 23 setup meshing separatore statico bidimensionale



Nella Figura 22 è possibile osservare la dimensione assegnata agli elementi della matrice e le facce su cui applicare i parametri scelti, nel caso della sezione del separatore statico considerata è presente un'unica faccia. Per aggiungere livello di dettaglio e quindi un'analisi più approfondita sugli elementi che influenzano il flusso, ovvero le alette, è possibile infittire in quelle specifiche zone la matrice. In Figura 23 si riporta uno dei possibili metodi, ovvero l'Inflation, che consiste nel suddividere determinate zone in segmenti ciascuno dei quali sarà la base di un elemento della matrice; una suddivisione più fitta comporta un notevole numero di elementi concentrati nella zona selezionata.

Figura 24 dettaglio aletta nella matrice separatore statico bidimensionale

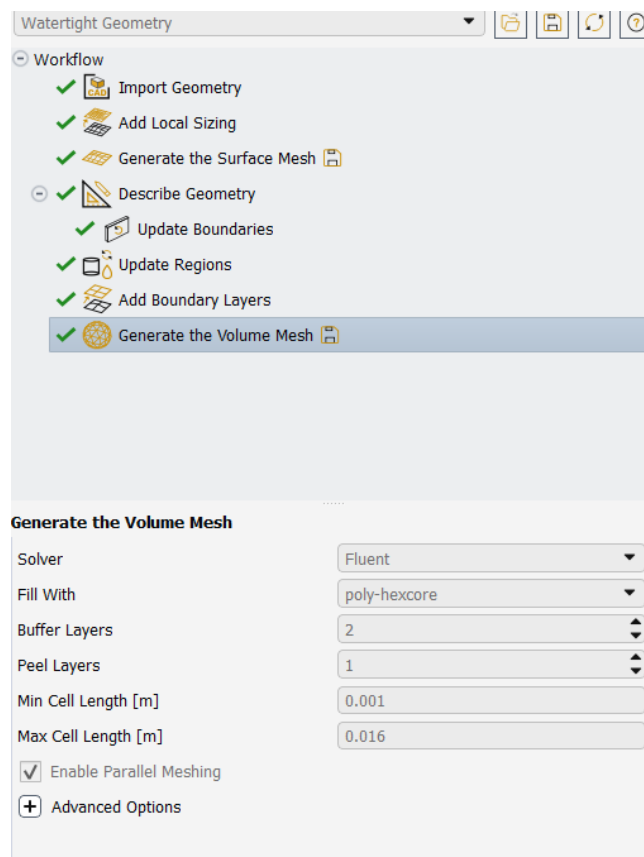


In Figura 24 è possibile osservare la differenza tra la matrice che circonda l'aletta e gli elementi circostanti, i volumi di controllo prossimi all'aletta sono di dimensioni più ridotte e sono limitati dalla forma dell'aletta stessa, al contrario, nel resto della superficie gli altri volumi di controllo hanno una disposizione più regolare.

La forma e la disposizione dei volumi di controllo influenzano la qualità della matrice pertanto è necessario valutare i criteri precedentemente citati per la valutazione della qualità degli elementi e/o l'asimmetria. Per entrambi i criteri è possibile osservare dei valori di massimo, minimo o una media legata al numero di elementi in cui è suddivisa la matrice. È consuetudine, per geometrie complesse o per l'utilizzo di matrici molto dettagliate, avere un elevato numero di elementi pertanto, escludendo casi limite nei valori di massimo e minimo dei criteri, si fa una valutazione basata sul valore medio. Eventuali anomalie potranno essere riscontrate solamente durante l'analisi dei risultati successiva alla simulazione. A questa considerazione si collega un altro criterio che indica la qualità dei risultati, ovvero l'indipendenza dalla matrice: diverse simulazioni su uno stesso sistema si definiscono accurate se restituiscono risultati ragionevoli e ripetibili, entro le tolleranze stabilite, indipendentemente dalla matrice utilizzata. Queste valutazioni verranno approfondite successivamente nella sezione 4.2 Risultati della modellazione virtuale. I parametri utilizzati nella realizzazione della matrice per il primo caso del simulatore statico, tra cui la dimensione degli elementi o i possibili metodi per la suddivisione della matrice come l'Inflation, possono essere applicati anche ai casi successivi citati nelle 2.3.1 Casistiche analizzate per separatore statico.

I risultati sull'analisi del separatore statico dimostreranno che la configurazione del caso 6 è la più ottimale per le condizioni di lavoro dell'apparecchiatura, perciò per approfondire la fluidodinamica del sistema è stata svolta un'ulteriore simulazione utilizzando il dominio tridimensionale del separatore statico configurato secondo la geometria descritta nel sesto caso (riportato in Figura 20).

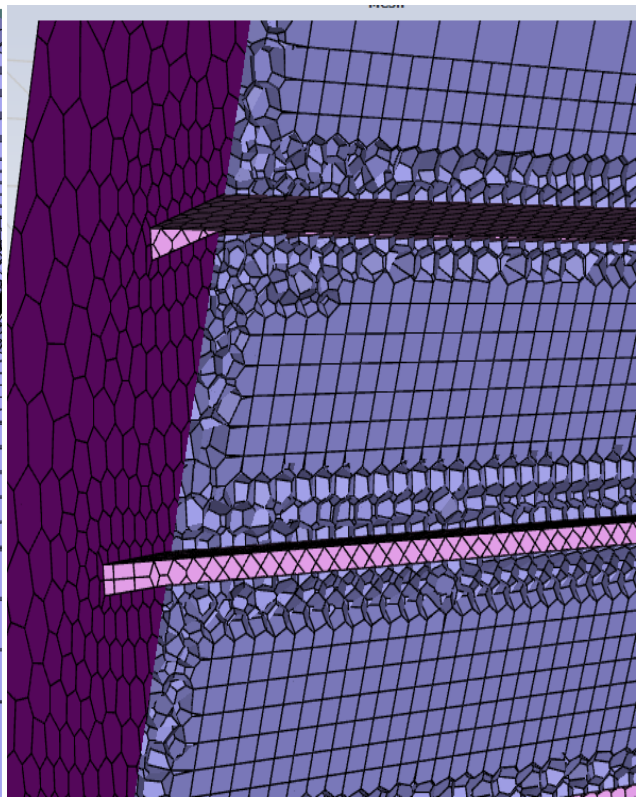
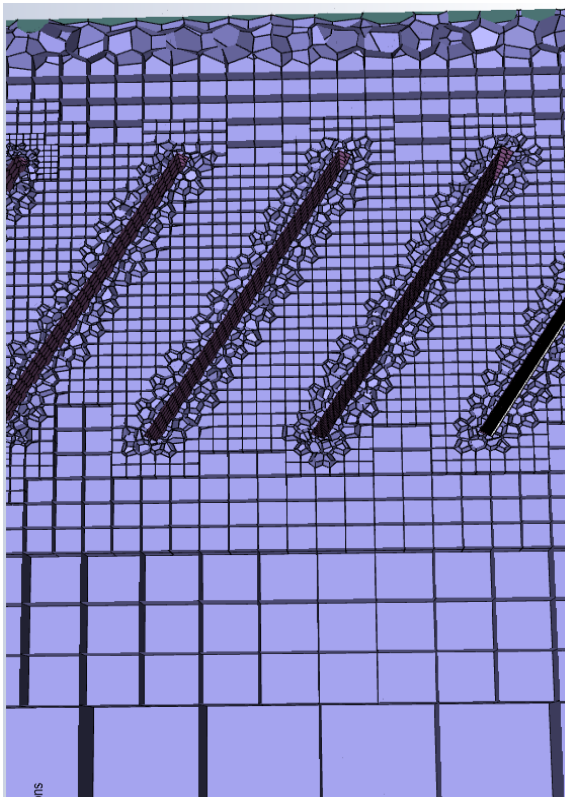
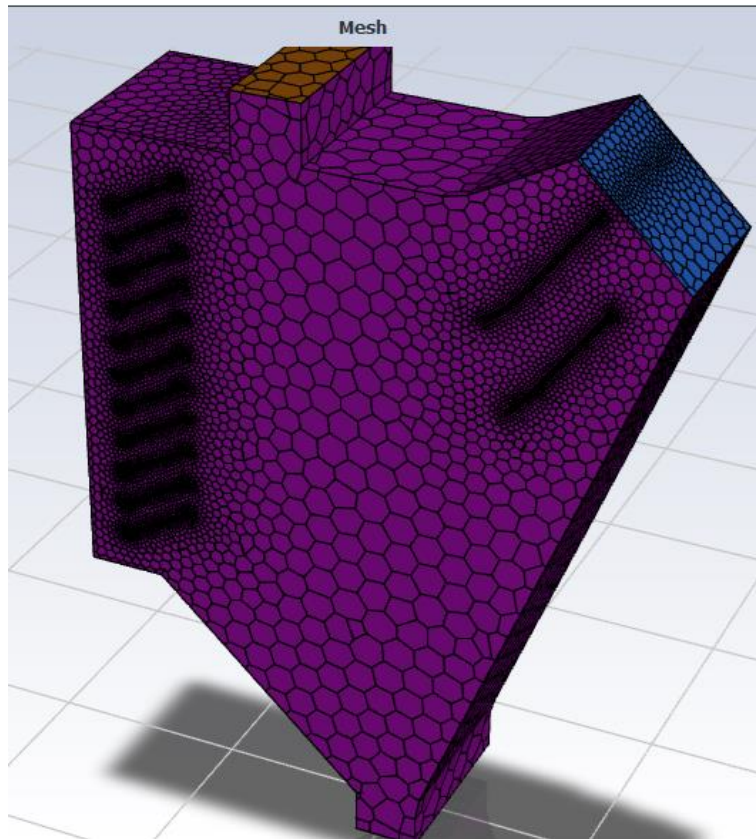
Figura 25 interfaccia fluent meshing applicata al separatore statico



Per la realizzazione della matrice tridimensionale del separatore statico è stato utilizzato il procedimento riportato nell'interfaccia di Fluen Meshing raffigurata in Figura 25; così come le dimensioni e la geometria impostate per gli elementi che andranno a comporre la matrice. In Figura 26 è possibile osservare la matrice generata da Fluent Meshing sul dominio ricavato dal separatore statico sfruttando la tecnologia Mosaico, il software ha generato una matrice composta prevalentemente da elementi esaedrici con una distribuzione relativamente omogenea ad eccezione delle zone in prossimità delle alette. Queste zone comprendono dei vuoti, ovvero elementi meccanici che non rientrano nel dominio fluido, e pertanto sono delimitati da zone di bordo che richiedono una suddivisione della matrice più sofisticata.

Il livello di dettaglio della matrice nei dintorni delle zone di bordo è dovuto all'applicazione della tecnologia Mosaico implementata da Fluent: nei dintorni delle zone di bordo, in questo caso le alette, le forme degli elementi diventano più complesse e poliedriche e con dimensioni variabili per favorire la transizione verso la zona di Bulk con morfologia più grossolana. Come per la valutazione della matrice sviluppata sul dominio bidimensionale anche per il caso tridimensionale è possibile valutare il fattore di asimmetria per stabilire se l'insieme di elementi di controllo possa essere sottoposto a una simulazione.

Figura 26 vista d'insieme della matrice tridimensionale del separatore statico e di alcuni dettagli



3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico

Una volta ultimati i controlli sui criteri di qualità della matrice è possibile procedere al vero e proprio Setup della simulazione, ovvero alla scelta delle apposite correlazioni e leggi nel database di Fluent per il problema reale da riprodurre.

È importante specificare che il modello descritto in questo capitolo è frutto di diversi tentativi, mirati alla realizzazione di un setup che permettesse al simulatore di arrivare a convergenza durante la riproduzione del funzionamento del separatore statico. Nonostante i diversi casi analizzati abbiano delle variazioni nella struttura del dominio ciò non influenza le leggi fondamentali che descrivono il comportamento di una corrente bifase formata da un gas che trascina particelle solide ma solamente i valori delle diverse grandezze che caratterizzano il moto della corrente che a sua volta è influenzato dalla geometria del dominio. Per queste motivazioni viene riportato solamente il setup con la comprovata capacità di fornire risultati con senso fisico e previo raggiungimento dei parametri di convergenza, questa scelta si basa sulla necessità di avere risultati da confrontare con dati reali per valutare l'efficacia del modello di simulazione. L'ottenimento di risultati con valori reali è una condizione necessaria ma non sufficiente alla valutazione della simulazione. Il modello ottenuto è stato applicato a tutti i diversi casi trattati per il separatore statico.

Il software fornisce una scaletta delle varie possibilità tra cui l'utente può scegliere mentre procede seguendo lo schema logico preimpostato nel software; inizialmente è possibile determinare l'effetto della gravità sul sistema e la sua dipendenza dal tempo. Il separatore statico opera senza necessità di elementi meccanici in movimento, quindi non ci sono componenti il cui moto vari in modo rilevante nel tempo nemmeno le particelle solide. Dall'esperienza aziendale è possibile stabilire che una volta superata la fase transitoria di avviamento le correnti all'interno del separatore statico raggiungono uno stato stazionario in cui solo le particelle più fini vengono trascinate dalla corrente d'aria aspirata mentre le più pesanti cadono quasi imperturbate verso il fondo dell'apparecchiatura. Sulla base di queste considerazioni il setup per la simulazione del separatore statico comprende:

- La scelta di affrontare il problema in stato stazionario.
- L'effetto della gravità, il cui orientamento dipende dal sistema di riferimento utilizzato durante la progettazione al CAD.
- L'utilizzo del regime di moto turbolento, basato sulle considerazioni sul funzionamento del separatore e dall'esperienza aziendale.
- La funzionalità per tenere traccia del sistema multifase gas-solido, in particolare attraverso il modello Euleriano.
- La sezione appositamente dedicata alla definizione delle diverse caratteristiche della fase discreta, ovvero le particelle solide che verranno immesse nella simulazione.

Il modello Euleriano usato per descrivere il sistema durante la simulazione del separatore dinamico non è particolarmente limitante da un punto di vista pratico poiché il suo impatto sul tempo computazionale dipende esclusivamente dai requisiti di memoria e dai parametri da soddisfare per il raggiungimento della convergenza, come descritto nella sezione 14.5.1 dedicata alla teoria dei sistemi multifase sul Help Ansys. Il sito web¹⁰ spiega la flessibilità del modello Euleriano, il quale può essere utilizzato per diverse combinazioni di sistemi multifase compresa la casistica d'interesse gas/solido.

¹⁰ 14.5.1 Overview of the Eulerian Model, Ansys Help, 2024

Per definire il flusso granulare è sufficiente assegnare a una delle fasi del sistema come fase granulare, la soluzione per il calcolo delle proprietà del multifase si basa sulle seguenti considerazioni:

- La pressione del sistema è condivisa tra tutte le fasi, ciò implica l'assegnazione di un solo valore di pressione tra gli input e output delle condizioni al contorno. Nella simulazione del separatore statico la pressione è determinata dall'aspirazione a valle che provoca il moto della corrente d'aria, riguardo al contributo fornito dalle particelle solide disperse è plausibile considerarlo trascurabile.
- Le equazioni che descrivono la quantità di moto e la continuità del sistema vengono risolte per ogni fase presente.
- Tutti i regimi di moto turbolento sono applicabili.
- È possibile inserire una funzione definita dall'utente per descrivere le proprietà della fase granulare, per questa trattazione è stata utilizzata l'apposita sezione per la fase discreta.

Nella sezione di Ansys Fluent dedicata all'implementazione della fase discreta è possibile configurare un'iniezione di particelle che verrà immessa nel sistema come rappresentazione della fase solida granulare. La prima caratteristica necessaria a definire la DPM è la tipologia e si riferisce in particolare a quale parte del dominio verrà assegnato l'input delle particelle. Nelle simulazioni del separatore dinamico l'immissione avviene attraverso l'entrata situata sulla parte superiore, nel caso del dominio bidimensionale l'iniezione sarà immessa da uno spigolo mentre nel caso del dominio tridimensionale viene immessa da una superficie.

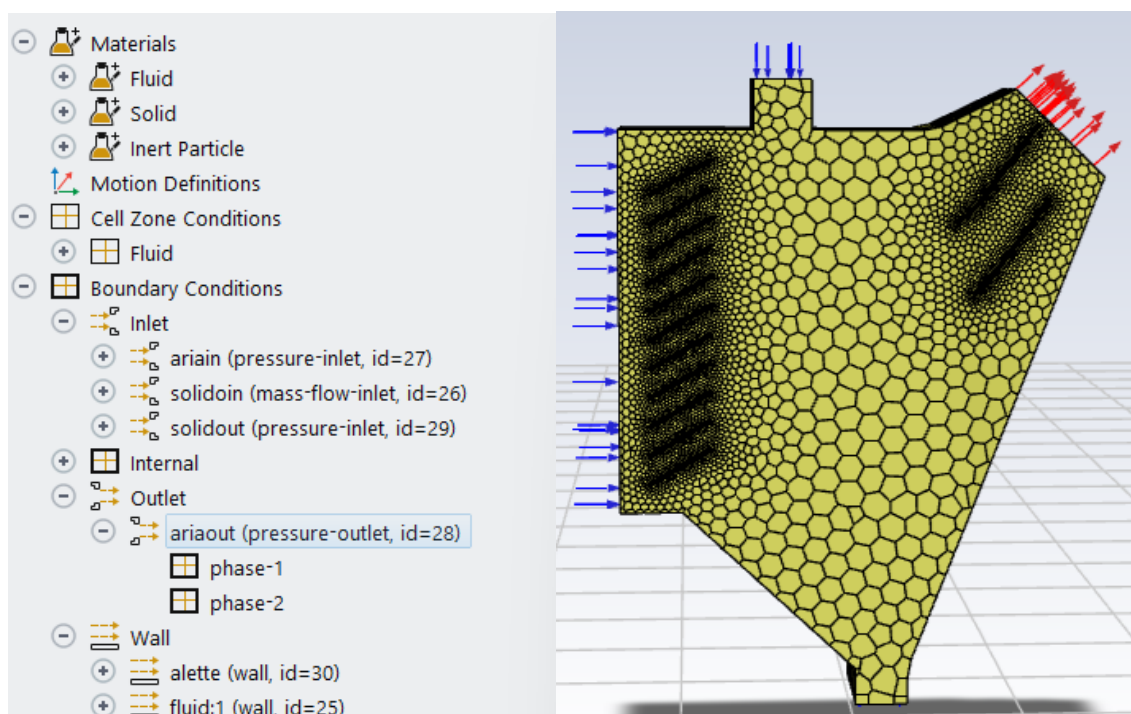
Successivamente è necessario definire la tipologia, fase di appartenenza e materiale delle particelle; per questa simulazione il solido viene assegnato alla seconda fase, e di conseguenza l'aria sarà il componente della prima fase, e si considera inerte poiché non ci sono trasformazioni rilevanti. Il materiale può essere quello standard scelto dal software per cui è possibile cambiare denominazione e densità assegnando quelle del materiale utilizzato nelle prove sperimentali, ovvero la Chamotte.

La distribuzione delle particelle può essere impostata secondo diverse funzioni presenti nel software, per il caso del separatore statico non è rilevante poiché l'analisi delle particelle sarà puramente qualitativa per determinare quale sia la massima dimensione che permetta al solido di essere trasportato alla condizione operative utilizzate. Le possibili distribuzioni verranno approfondite nella 3.3.3 Configurazione della simulazione del separatore dinamico, per cui risultano interessanti le distribuzioni granulometriche ottenute.

Infine è necessario assegnare alla fase discreta una velocità, direzione di immissione e un range di diametri da cui il software possa stabilire una distribuzione granulometrica sulla base della legge scelta in precedenza: per il separatore statico la velocità è disponibile dai dati in letteratura, derivante da esperienza industriale, e la direzione sarà la stessa lungo cui agisce la gravità dato che il solido entra nel separatore per caduta. È presente anche una sezione per assegnare il modello fisico da utilizzare per descrivere il comportamento delle particelle, è stato scelto il modello Syamlal-O'Brien¹¹ adatto per descrivere il comportamento di solidi granulari trascinati da un fluido e adeguatamente approfondito nell'apposita sezione del sito Ansys¹¹.

¹¹ 52.2.110. Set Injection Properties Dialog Box, Ansys Help, 2024

Figura 27 setup simulazione del separatore statico



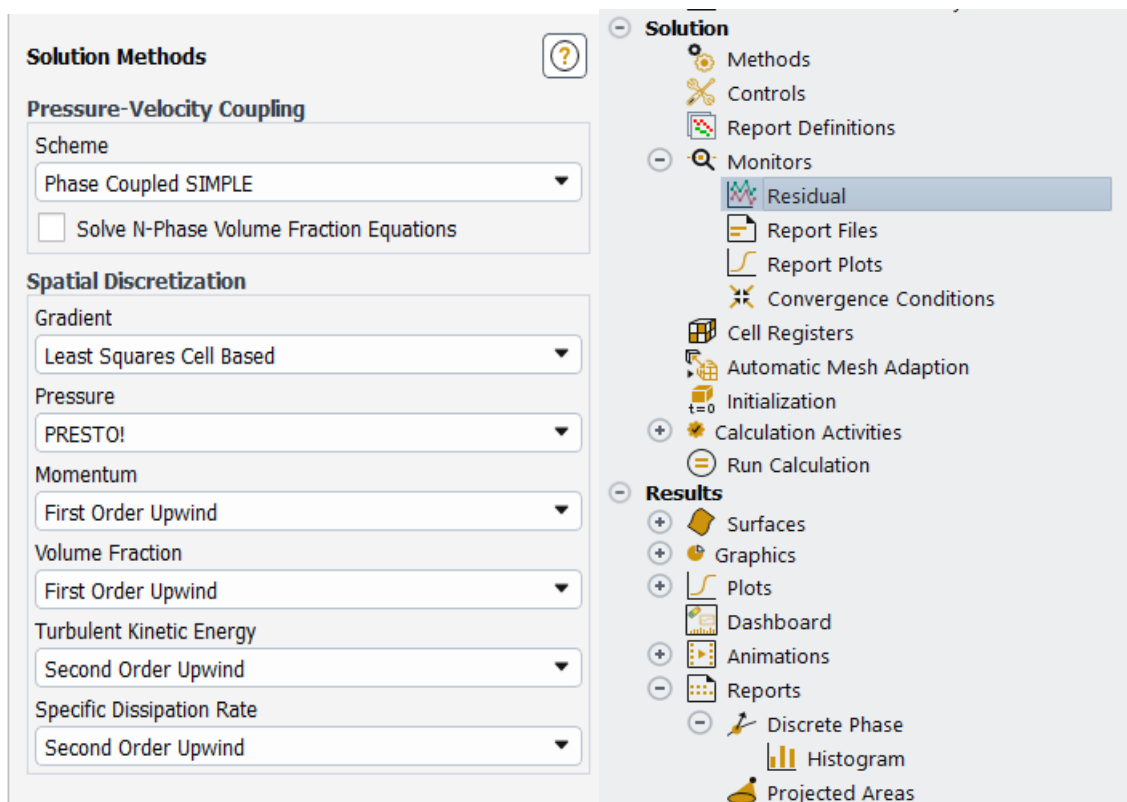
Condizioni al contorno	gruppo
Fluid	Dominio fluido
Mass flow inlet	Input solido
Pressure inlet	Input aria
Pressure outlet	Output aria
Pressure inlet	Output solido
Wall	Alette
Wall	Alette

La Figura 27 riporta le diverse condizioni al contorno assegnate ai diversi gruppi, notare in particolare che canali di entrata e uscita sono caratterizzati da frecce rispettivamente blu e rosse con una congrua direzione, ciò permette all'operatore di verificare che il software abbia correttamente classificato la sezione come input o output per la fase fluida. La sezione di uscita del solido grossolano, per quanto riguarda la fase discreta, è una sezione di output ma per quanto riguarda la fase principale, ovvero l'aria, rappresenta un'apertura da cui può entrare il fluido ad opera dell'aspirazione a valle. Per determinare le condizioni al contorno relative alla fase discreta è presente un'apposita sezione denominata DPM in cui è possibile, per ogni sezione di input e output, selezione come interagisce con la fase discreta. Le principali interazione della DPM con le sezioni di input e output del dominio sono le seguenti:

- Reflect, ovvero a contatto con quella sezione del dominio le particelle vengono riflesse nella direzione opposta rispetto al verso della loro traiettoria precedente all'impatto. Si applica a tutte le sezioni del dominio che non devono permettere la fuoriuscita della DPM. In questo caso viene applicata a tutte le sezioni di input ad eccezione della sezione dedicata allo scarico del solido grossolano sul fondo.

- Escape, ovvero la sezione è permeabile alla fase discreta e una volta attraversata il solido esce dal dominio e non viene ulteriormente considerato all'interno della simulazione. Viene applicata sia alla sezione di output della corrente bifase composta da aria e solido fine trascinato, sia alla sezione di scarico del solido grossolano.
- Trap, ovvero a contatto con quella sezione il solido rimane bloccato e non ha più la possibilità di spostarsi nel sistema, non viene più influenzato dalla fluidodinamica del sistema ma rimane intrappolato sulla sezione; dal punto di vista pratico è come se fosse uscito dal sistema. Si applica a quelle superfici definite chiuse per evitare la fuoriuscita del fluido ma che nella realtà permettono con appositi meccanismi lo scarico del solido accumulato. Non è rilevante per il caso del separatore statico ma verrà impiegata per il separatore dinamico.

Figura 28 setup simulazione separatore statico



Nella parte finale dello schema logico proposto dal software Fluent, riportata in Figura 28, è possibile scegliere il metodo risolutivo il grado di accuratezza desiderato in base a un determinato schema di discretizzazione; per il separatore statico è stato scelto di applicare un metodo SIMPLE con discretizzazione Upwind.

Il metodo SIMPLE¹² è uno dei più semplici e permette di mantenere dei tempi computazionali relativamente brevi grazie anche alla combinazione con lo schema Upwind; non presenta elevata accuratezza ma visto lo scopo della simulazione sul separatore statico e il dominio poco articolato è ragionevole mantenere un approccio non eccessivamente complesso. Per le grandezze più critiche, ovvero con una maggiore necessità di accuratezza per raggiungere la convergenza come l'energia cinetica turbolenta, il software suggerisce di mantenere uno schema del secondo ordine. Ciò dimostra la flessibilità operativa di Fluent nel diversificare le diverse priorità per ridurre i tempi computazionali ma allo stesso tempo raggiungere dei risultati.

Un'altra grandezza particolarmente rilevante nello studio di questa apparecchiatura è la pressione e i suoi effetti sul flusso multifase, perciò viene utilizzato lo schema di discretizzazione PRESTO! (Pressure Staggering Option)¹². Questo schema è particolarmente adeguato al trattamento di problemi in regime di moto turbolento, una trattazione più approfondita si trova nell'apposita sezione del sito Ansys¹².

Oltre alla sezione per la scelta dei metodi sul simulatore Fluent è possibile modificare i parametri di convergenza o tenere traccia in appositi grafici tracciati in tempo reale dal software durante i calcoli; queste funzioni possono essere selezionate nella sezione denominata Reports, non risultano necessarie per il caso del separatore statico ma torneranno utili per il separatore dinamico.

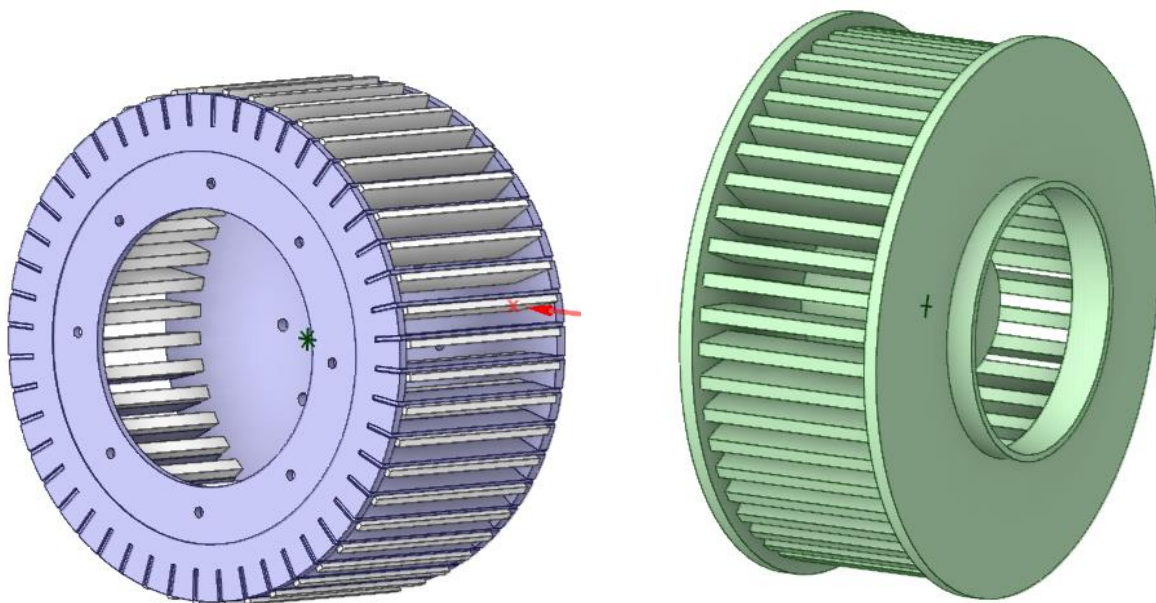
Per la simulazione del funzionamento del separatore statico, affrontato come un problema stazionario, è sufficiente definire un numero di iterazioni, inizializzare il modello così da azzerare eventuali calcoli effettuati in precedenza e infine procedere all'avvio della simulazione nell'apposita sezione Run Calculation. Tutti i valori specifici della modellazione dei diversi casi del separatore statico, compresi i valori dei criteri per il controllo della qualità della matrice e i parametri impiegati nelle condizioni al contorno, verranno riportati nell'apposito capitolo Analisi dei risultati.

3.3 Separatore dinamico

3.3.1 Definizione del dominio del separatore dinamico

La riproduzione del separatore dinamico ha richiesto un disegno nettamente più dettagliato data la presenza di elementi meccanici in movimento, in Figura 29 è possibile osservare il confronto tra la girante del progetto originale e quella riprodotta in Space Claim.

Figura 29 confronto girante di separazione per modello dinamico originale e riprodotta nel designer Space Claim



¹² 18.4.1 Discretization of the Momentum Equation, Ansys website, 2009

Gli elementi fondamentali di questo componente sono le alette, il cui numero e angolazione deve essere fedele all'originale per simularne il più precisamente possibile il funzionamento, queste misurazioni sono state effettuate rilevando l'angolazione tra due alette adiacenti e suddividendo equamente la circonferenza della girante.

L'altro elemento rilevante è l'albero motore di forma cilindrica che si intravede al centro, nel progetto originale questo componente è complesso poiché presenta raccordi, giunzioni e un diametro variabile insieme a diverse scanalature dovute al collegamento di più sottocomponenti meccanici per la formazione dell'albero motore che alimenta la girante.

La presenza dell'albero influenza il comportamento del flusso bifase che entra all'interno della girante perciò bisogna tenere in considerazione la sua presenza, tuttavia è possibile ricrearlo approssimandolo a un cilindro uniforme con il diametro costante pari al maggior diametro misurato tra i vari elementi che lo compongono nel progetto originale.

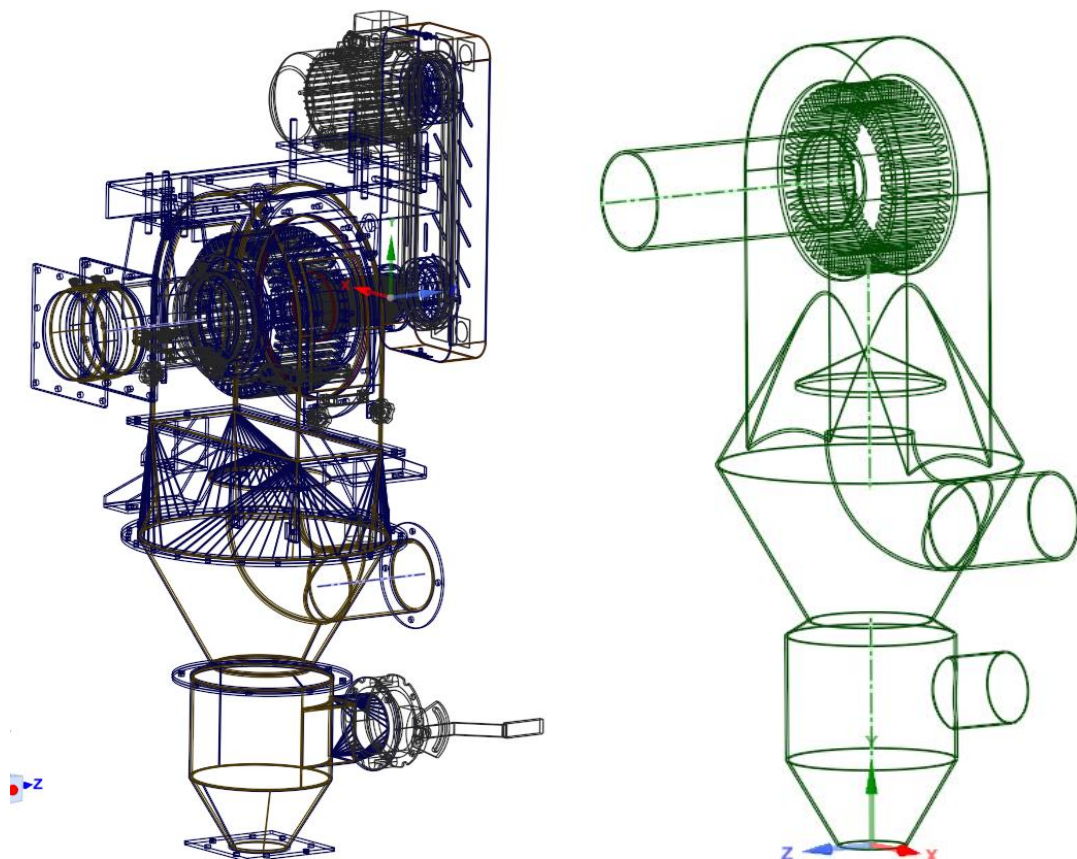
Questa approssimazione è conservativa e accettabile dato che si sta sovrastimando le dimensioni dell'albero e quindi il possibile ostacolo che il flusso bifase deve superare una volta entrato nella girante, nella realtà una frazione dell'albero avrà diametro inferiore quindi ostacolerà in maniera più limitata la corrente di aria e particelle.

Si crea una situazione in cui le prestazioni del modello originale eccedono quelle del modello virtuale, il che è un bene poiché non comporta eventuali incidenti o malfunzionamenti imprevisti; bisogna sempre evitare il caso opposto perché non è intrinsecamente sicuro lavorare con un modello reale con capacità inferiori rispetto al modello virtuale. Questo esempio è un classico compromesso che deve essere affrontato nella modellazione virtuale CFD, per ricreare il dominio di interesse possono essere necessarie approssimazioni per assicurarne la continuità o evitare forme troppo complesse che compromettano i tempi computazionali dilatandoli eccessivamente. Le approssimazioni devono essere accuratamente analizzate e discusse prima di essere apportate pertanto in questa fase ho avuto il supporto del team di progettisti e disegnatori dell'ufficio tecnico di LB Technology.

Nel progetto originale del separatore dinamico è presente uno strato protettivo composto da piccole piastrelle di allumina adiacenti atte a ricoprire la superficie metallica e proteggerla dall'abrasione. Questo strato di piastrelle, seppur possa presentare microscopici difetti, riprende fedelmente la morfologia interna del separatore perciò nella riproduzione al CAD non è stato inserito. In modo equivalente non sono stati riportati tutti i componenti meccanici di piccole dimensioni interni al separatore poiché, nonostante nella realtà svolgano un importante ruolo strutturale come giunzioni, bulloni o raccordi, nel progetto virtuale non modificano considerevolmente la struttura interna ma aggiungerebbero ulteriori dettagli e complessità superflue ai fini della simulazione. In Figura 30 si può apprezzare il confronto tra il CAD originale e la riproduzione in Space Claim.

Il confronto evidenzia gli elementi fondamentali del separatore dinamico, tra cui i canali per l'entrata e la fuoriuscita delle correnti e il loro orientamento interno al separatore che influenza la direzione dei flussi, la presenza del sistema di protezione a forma di cappello cinese, la girante e la morfologia esterna dell'apparecchiatura.

Figura 30 confronto separatore dinamico originale e riprodotto nel designer Space Claim



Una volta aver ottenuto un'adeguata riproduzione dell'apparecchiatura in esame è necessario isolare il dominio del fluido e quindi gli spazi interni del separatore che conterranno la corrente bifase da separare, esattamente come nel caso del separatore statico.

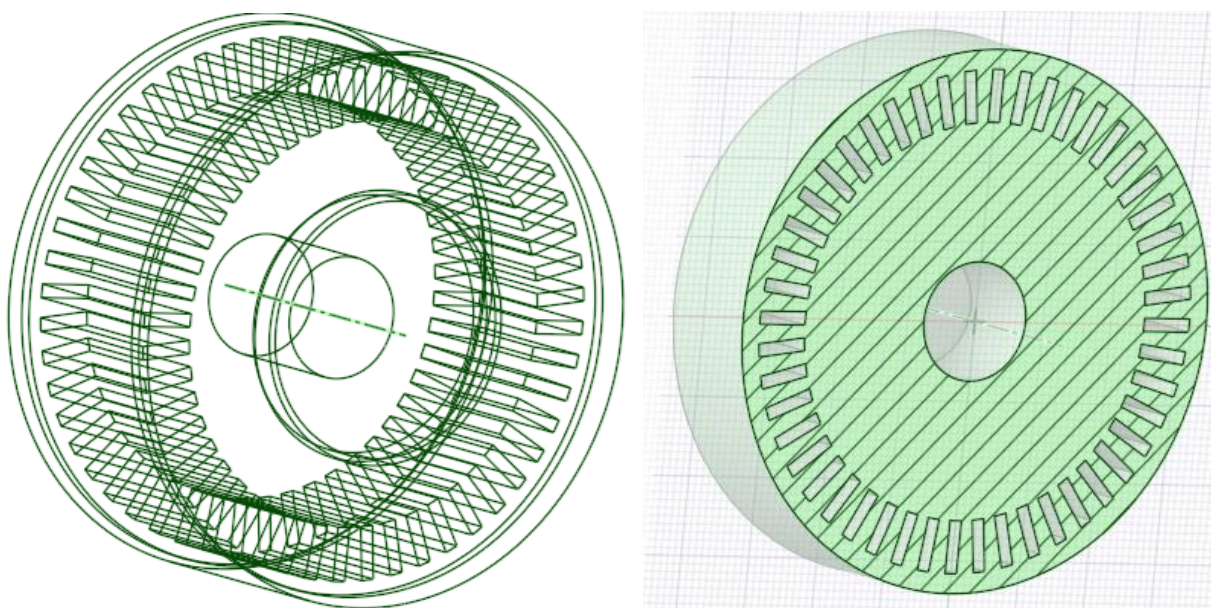
Nel caso del separatore dinamico questo dominio risulta più elaborato poiché bisogna tenere in considerazione il moto indotto dalla girante, a questo scopo è necessario definire un sottodominio limitato alla zona circostante alla girante su cui implementare la funzionalità "Mesh Motion" di Fluent.

Questa particolare funzione è stata implementata appositamente nel simulatore Fluent per lo studio di apparecchiature con elementi in movimento: il fluido all'interno, nelle zone adiacenti all'elemento meccanico in movimento, viene influenzato e assume un moto equiparabile a quello del componente meccanico che lo ha imposto inizialmente.

Il forum sul sito ufficiale Innovation Space Ansys riporta nella sezione dedicata al Mesh Motion aggiornata nel 2023 le indicazioni su come definire il dominio fluido per poter correttamente definire e utilizzare questa funzione, poiché siano rispettate le ipotesi la zona deve essere adiacente all'elemento che trasmette il moto e il più contenuta possibile in accordo con le dimensioni degli elementi della matrice.

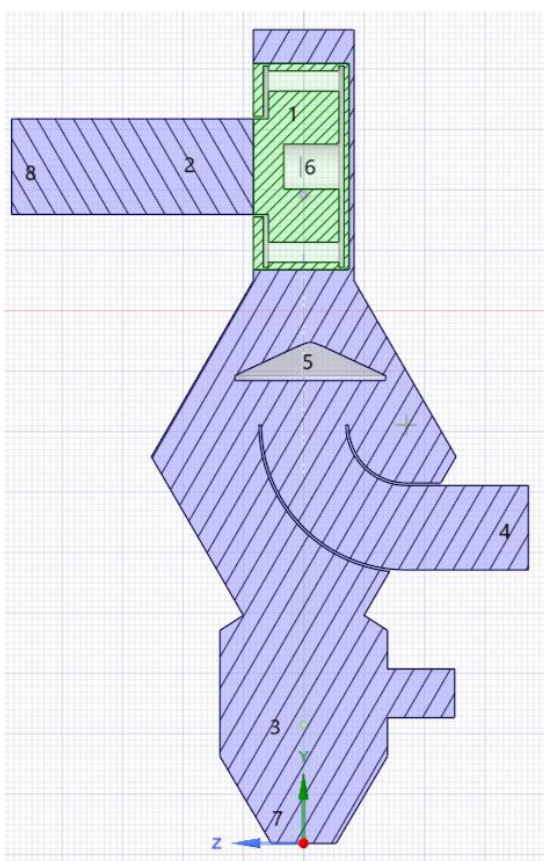
Considerando le dimensioni medie delle alette e degli spessori interni al separatore, che costituiscono gli elementi di dimensioni inferiori e che quindi impatteranno maggiormente sulla matrice, è stata tracciata una zona dedicata alla funzionalità Mesh Motion di forma cilindrica intorno alla girante con un diametro di un centimetro superiore a quello dell'elemento meccanico; il risultato viene mostrato in Figura 31.

Figura 31 zona Mesh Motion definita in Space Claim



È importante ricordare che tutti gli elementi strutturali e meccanici del separatore non rientrano nelle zone di dominio fluido per cui saranno presenti delle lacune che verranno successivamente definite e catalogate come ostacoli ma il dominio complessivo mantiene la sua continuità. Alla fine del processo utile a definire il dominio interessato dal fluido all'interno del separatore dinamico sono state ottenute tre zone adiacenti come evidenziato dai gruppi definiti in Figura 32.

Figura 32 dominio fluido e gruppi del separatore dinamico in Space Claim



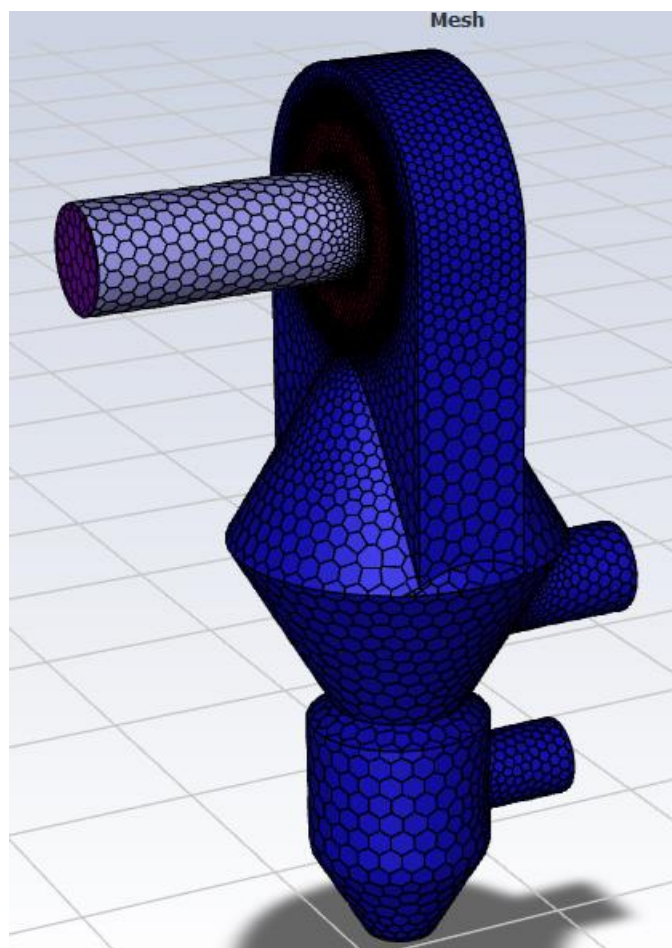
numero	gruppo
1	Zona Mesh Motion
2	Dominio fluido in uscita
3	Dominio fluido del corpo principale
4	Input corrente bifasica
5	Protezione a cappello cinese
6	Girante
7	Output ricircolo
8	Output prodotto

Il dominio fluido interessa tutto il corpo principale del separatore, prosegue attraverso la zona Mesh Motion e si conclude con il tratto finale delimitato dal condotto di uscita del prodotto fine che verrà attraversato solo dalla corrente bifase che trascina le particelle sufficientemente fini. Da notare i gruppi 5 e 6, che si riferiscono rispettivamente alla protezione a forma di cappello cinese e alla girante, non sono fisicamente presenti all'interno del dominio ma le lacune che provocano all'interno del dominio fluido, così come per le alette del separatore statico, vengono classificate come ostacoli che il simulatore dovrà necessariamente considerare per determinare il moto del flusso.

3.3.2 Preparazione della matrice del separatore dinamico

La matrice utilizzata nelle simulazioni del funzionamento del separatore dinamico, il quale richiede necessariamente un modello tridimensionale, sfruttano il software Fluent Meshing e il processo logico descritto nell'interfaccia esposta al capitolo 3.2.2 Preparazione della matrice del separatore statico.

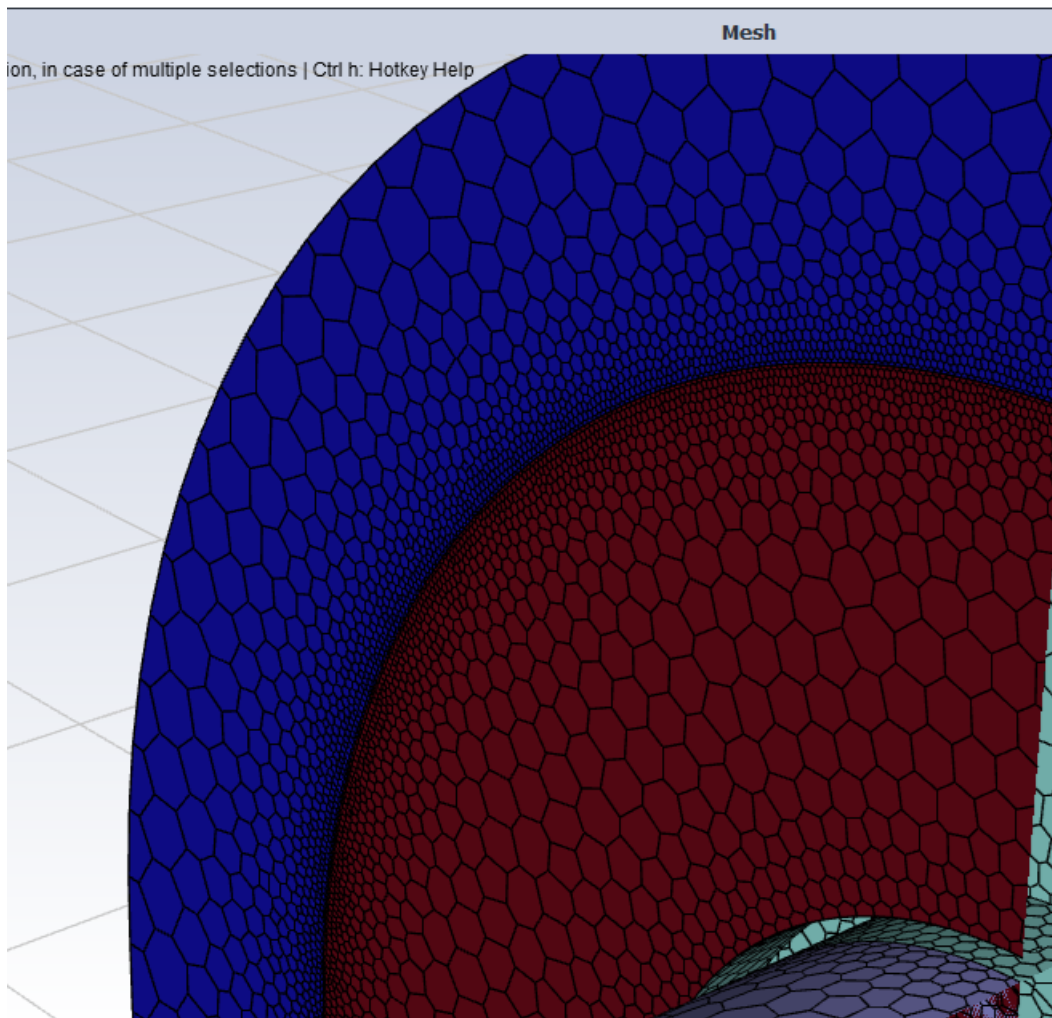
Figura 33 matrice tridimensionale separatore dinamico



In Figura 33 è possibile osservare il risultato una volta ultimata la configurazione dell'interfaccia di Fluent Meshing; per tutte le configurazioni di funzionamento descritte in 2.4.1 Casistiche analizzate per separatore dinamico è stata utilizzata la stessa matrice poiché l'analisi di questa apparecchiatura non è incentrata su cambiamenti strutturali. Come nella simulazione del separatore statico tridimensionale è stata adottata la Tecnologia Mosaico, infatti la zona di Bulk è stata suddivisa in elementi esaedrici con distribuzione più fitta in prossimità delle zone dei confini tra le diverse zone del dominio.

Durante la riproduzione al CAD del separatore dinamico il dominio fluido è stato suddiviso in tre parti: il dominio fluido del corpo principale dell'apparecchiatura, la zona Mesh Motion che circonda la girante del separatore e la zona di dominio fluido in uscita come descritto in Figura 32.

Figura 34 dettaglio zona di confine nella matrice tridimensionale del separatore dinamico



In Figura 34 è possibile osservare nel dettaglio la variazione degli elementi di controllo della matrice nella zona di transizione dal corpo principale alla zona Mesh Motion, entrambe rientrano nel dominio attraversato dal fluido ma vengono identificate come zone separate da un confine che la corrente bifase può attraversare. In particolare la zona rossa, circostante agli elementi meccanici in movimento all'interno del separatore, presenta al suo interno delle lacune dovute proprio allo spazio fisico occupato dalla girante che deve essere eliminato dal dominio fluido e classificato come ostacolo che influenza il comportamento del flusso bifase.

Lo spazio vuoto all'interno della zona Mesh Motion riprende fedelmente la morfologia della girante del separatore e i suoi bordi, essendo ostacoli solidi da considerare durante la simulazione, vengono compresi all'interno della matrice e omogenizzati alle altre zone attraverso volumi di controllo poliedrici come riportato in Figura 35. Analogamente è stato trattato il dispositivo di sicurezza a forma di cappello cinese posizionato alla fine del condotto di entrata della corrente bifase, è un componente fisico che non rientra nel dominio fluido ma i suoi confini vengono classificati come ostacolo che influenza il comportamento del flusso di aria e particelle e che pertanto deve essere compreso nella matrice, viene mostrato in Figura 36.

Figura 35 dettaglio zona Mesh Motion matrici tridimensionale separatore dinamico

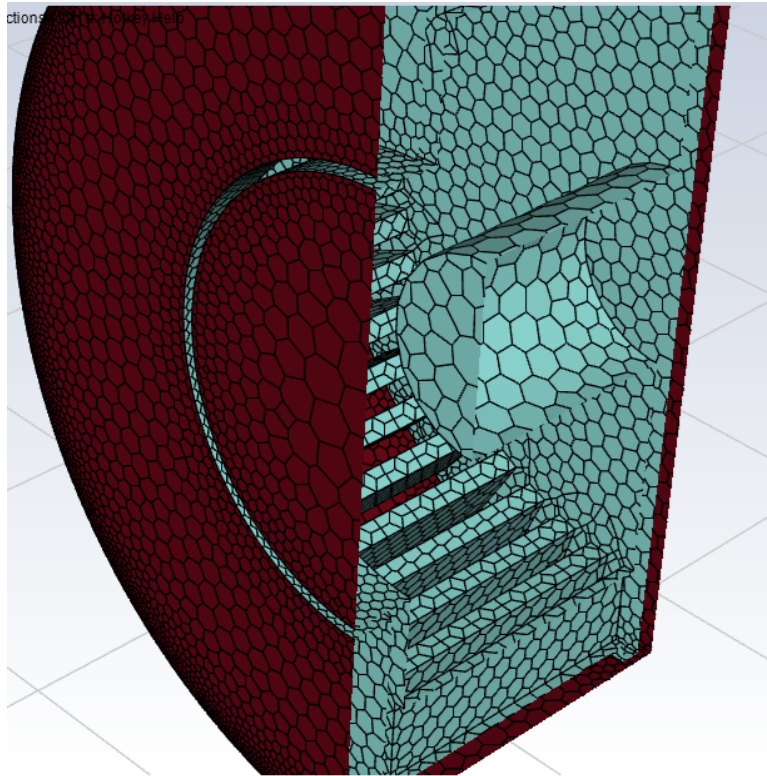
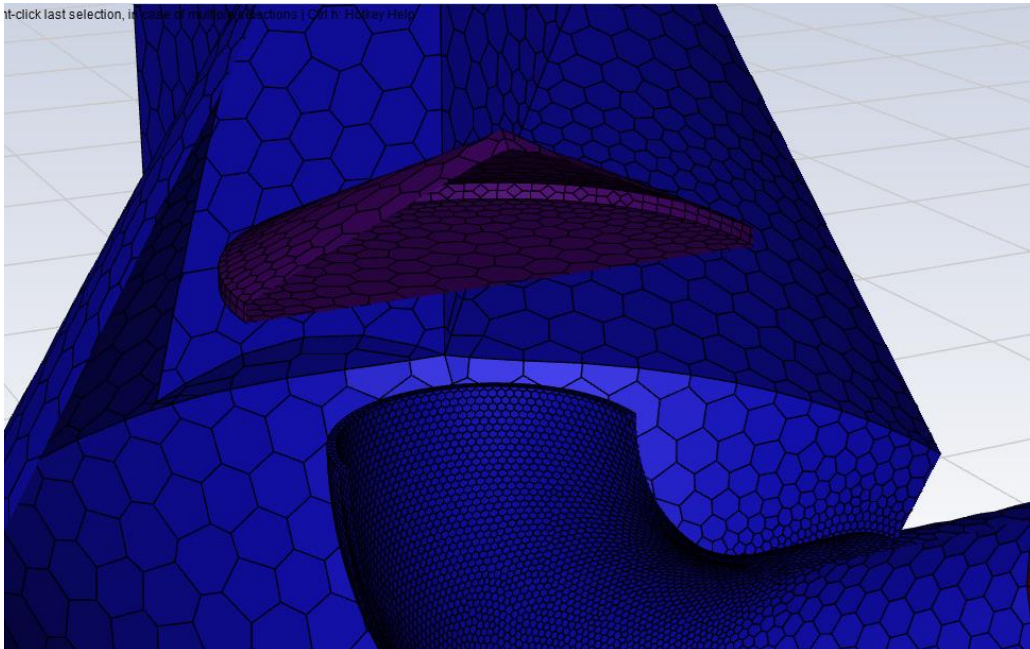


Figura 36 dettaglio dispositivo di sicurezza matrice tridimensionale separatore dinamico



Una volta ultimato il controllo delle diverse zone che compongono la matrice è necessario eseguire la verifica della qualità di quest'ultima attraverso l'apposita funzione di Fluent Meshing descritta e utilizzata nella 3.2.2 Preparazione della matrice del separatore statico. Per la valutazione della qualità della matrice tridimensionale si fa riferimento ai criteri citati in precedenza nella 3.1 Teoria alla base della modellazione CFD, in particolare al valore di asimmetria che può essere ricavato dalla console dei comandi di Fluent Meshing.

È fondamentale, con l'aumento della complessità del dominio computazionale, verificare la qualità della matrice su cui si baserà la simulazione poiché è il primo elemento da dover valutare in caso di risultati inconcludenti o insoddisfacenti.

3.3.3 Configurazione della simulazione del separatore dinamico

Terminata la preparazione e verifica della matrice tridimensionale del separatore dinamico è possibile proseguire con l'effettivo setup guidato dall'interfaccia del simulatore Ansys Fluent descritta accuratamente nella 3.3.3 Configurazione della simulazione del separatore dinamico; in questo capitolo verranno evidenziate le differenze e i parametri operativi utilizzati per la simulazione del separatore dinamico.

Il primo accorgimento consiste nel verificare il sistema di riferimento assegnato al dominio fluido per configurare efficacemente l'effetto della gravità e specificare la tipologia di problema transitorio; nel funzionamento del separatore dinamico è rilevante sia la granulometria del prodotto che l'influenza della girante sul flusso bifase e sull'efficienza della separazione. Per queste motivazioni è nell'interesse del progetto valutare anche le fasi transitorie iniziali del funzionamento dell'apparecchiatura. Come per la simulazione del separatore statico anche per il modello dinamico è necessario imporre un regime di moto turbolento con alcune variazioni:

- Viene utilizzato il regime di moto turbolento k-epsilon, a differenza del separatore statico è necessario utilizzare il modello Realizable¹³. A differenza del modello Standard il regime di moto turbolento k-epsilon Realizable è basato su diverse equazioni per la valutazione della viscosità turbolenta, per la quantità di moto e la vorticosità del flusso. Il sito di Ansys¹³ riporta come queste variazioni consentano una maggiore efficacia nel trattare modelli in cui il flusso subisce movimenti rotatori e vorticosi. Non è ancora possibile stabilire con certezza la fluidodinamica di questa apparecchiatura ma basandosi sull'esperienza aziendale, l'analisi del funzionamento e la consulenza dei progettisti e tecnici del laboratorio LB Technology è plausibile adottare gli accorgimenti descritti finora.
- Selezionare la funzionalità Enhanced Wall Treatment¹⁴, permette al software di ridurre gli errori durante il calcolo di proprietà in zone particolarmente critiche della matrice, come ad esempio le zone di bordo. Queste zone possono dare origine a dati con errori elevati che impediscono al simulatore di raggiungere i parametri di convergenza prestabiliti, ciò può portare all'ottenimento di risultati inconcludenti oppure all'arresto della simulazione poiché non è più possibile soddisfare le correlazioni su cui si basa il sistema. Nella modellazione del simulatore dinamico è stato necessario riprodurre fedelmente la girante, questo elemento meccanico è formato da numerose alette con basso spessore, e nonostante l'utilizzo della Tecnologia Mosaico la matrice potrebbe non essere sufficientemente fine e omogenea in tutte le zone di bordo quindi è plausibile prendere accorgimenti a riguardo. L'utilizzo di questa funzionalità aggiuntiva consente di ridurre gli errori e preservare la convergenza dei risultati durante la simulazione, tuttavia, comporta anche maggiori tempi computazionali.

¹³ 4.3.3. Realizable k-ε Model, Ansys Help website, 2024

¹⁴ 4.18.2.4. Enhanced Wall Treatment ε-Equation, Ansys Help website, 2024

All'interno del separatore dinamico è presente una corrente multifase composta dall'aria aspirata e le particelle prodotte dalla precedente macinazione e trascinate, pertanto è necessario abilitare le impostazioni per il modello multifase e specificare le proprietà della fase discreta nell'apposita sezione dedicata alla DPM. Come descritto durante il setup della simulazione del separatore statico, per definire la fase discreta è necessario specificare la zona da cui verrà immessa; per il separatore dinamico le particelle entrano nel simulatore dalla sezione di ingresso della corrente bifase proveniente dal mulino, che corrisponde al gruppo 4 in Figura 32. È necessario definire la distribuzione granulometrica delle particelle basandosi sui risultati delle analisi granulometriche svolte durante le prove sperimentali e riportate nel capitolo Analisi dei risultati

4.1 Risultati sperimentali Per la simulazione del separatore dinamico si sceglie di utilizzare la distribuzione logaritmica Rosin Rammler¹⁵ basata sull'equazione:

Equazione 5

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{D_m}\right)^n}$$

Il primo termine dell'Equazione 5 rappresenta la concentrazione di particelle con diametro inferiore a d , può essere calcolata attraverso la funzione esponenziale a secondo membro in cui l'esponente è composto dal rapporto tra il diametro considerato d e il diametro medio, il tutto elevato al coefficiente n . Il diametro segnato è definito come diametro medio mentre l'esponente n è il parametro di distribuzione; oltre a questi parametri è necessario stabilire in quante frazioni suddividere la corrente entrante, ovvero il numero di diversi diametri. Questi parametri devono essere determinati sulla base della curva granulometrica della corrente entrante nel separatore per poi essere inseriti come input nella definizione della fase discreta all'interno del simulatore.

È stata scelta la distribuzione logaritmica di Rosin-Rammler poiché, come spiegato nell'apposita sezione Help di Fluent¹⁵, permette di riprodurre fedelmente le curve granulometriche in cui le frazioni più fini hanno portate massiche più rilevanti rispetto alle particelle più grossolane grazie alla legge non lineare che descrive la distribuzione: l'interesse è incentrato sulla frazione più fine che esce come prodotto finale e che contiene, seppur in diverse dimensioni e frazioni, per la maggior parte particelle fini.

In base alla necessità di dati del simulatore e all'effettiva disponibilità di misurazioni possibili sull'impianto pilota, è stata inserita un'importante ipotesi su cui si basano gli input della fase discreta al simulatore, i dati ottenuti e anche le successive considerazioni: non essendo disponibile un punto nell'impianto pilota Microton per prelevare la corrente in ingresso al separatore e poterne determinare sperimentalmente la granulometria si ipotizza che la corrente bifase all'interno del separatore abbia una composizione, e quindi distribuzione delle particelle di diverse dimensioni, omogenea che viene poi suddivisa tra la corrente di prodotto e di ricircolo.

In questo modo è possibile determinare la granulometria in ingresso al separatore come somma delle diverse correnti di particelle che compongono il prodotto e il ricircolo, ogni corrente massica corrisponde a un certo range di dimensioni per le particelle che la compongono e questi range sono gli stessi sia nella granulometria del prodotto che del ricircolo.

¹⁵ 24.3.15. Using the Rosin-Rammler Diameter Distribution Method, Ansys Help website, 2024

Nota la frazione di particelle per un determinato range di dimensioni è possibile calcolarne la portata massica moltiplicando quella percentuale per la portata totale della corrente analizzata, ovvero la corrente di prodotto o di ricircolo.

Equazione 6

$$\dot{m}_{5-10\mu m, ricircolo} = \%_{5-10\mu m, ricircolo} * \dot{m}_{ricircolo}$$

Dopo aver associato a ogni frazione di particelle la relativa portata massica sia per le diverse correnti nel ricircolo che nel prodotto è possibile sommare le portate relative alla stessa frazione di particelle per determinare la corrente contenete le particelle di quel determinato range di dimensioni all'interno della corrente totale entrante nel separatore.

Equazione 7

$$\dot{m}_{5-10\mu m, entrante} = \dot{m}_{5-10\mu m, ricircolo} + \dot{m}_{5-10\mu m, prodotto}$$

Per determinare la frazione di particelle per ogni range di dimensioni nella corrente entrante al separatore è sufficiente dividere la portata entrante relativa a quel range di dimensioni, determinata grazie all'equazione 6, per la portata totale entrante nel separatore, che per le ipotesi citate in precedenza, equivale alla somma della portata di ricircolo e di prodotto uscenti dal separatore

Equazione 8

$$\dot{m}_{tot, entrante} = \dot{m}_{ricircolo} + \dot{m}_{prodotto}$$

Equazione 9

$$\%_{5-10\mu m, entrante} = \frac{\dot{m}_{5-10\mu m, entrante}}{\dot{m}_{tot, entrante}}$$

Per determinare la granulometria entrante nel separatore per il caso 1 del modello dinamico sono necessari i parametri caratteristici della distribuzione di Rosin-Rammler da inserire in Fluent, la distribuzione granulometrica si presenta come una campana abbastanza irregolare e non come una Gaussiana standard. Per questo motivo è necessario un procedimento iterativo basato sulla teoria della distribuzione di Rosin-Rammler¹⁵ e sui parametri che lo influenzano:

- Partendo dall'analisi delle conseguenze di ciascun parametro sulla distribuzione granulometrica scegliere un coefficiente n, un numero di diametri e il valore del diametro medio da inserire nella definizione della DPM su Fluent.
Notare che la variazione del coefficiente n di distribuzione influisce sull'altezza del picco della campana della curva granulometrica, all'aumentare di n aumenta l'altezza del picco e diminuisce progressivamente l'ampiezza della campana. La variazione del numero di diametri invece comporta una traslazione del grafico, l'aumento del numero di frazioni in cui suddividere la granulometria provoca un picco più basso della campana poiché una maggiore percentuale viene associata alle frazioni di dimensioni maggiori mentre per un basso numero di frazioni la maggior parte delle particelle sarà di dimensioni inferiori.

Il diametro medio¹⁵ coincide con la dimensione massima sotto la quale è compreso il 36,8% delle particelle all'interno della corrente quindi la sua variazione provoca uno spostamento del picco della curva granulometrica. Un valore più elevato del diametro medio implica una curva campana spostata verso valori di diametro più elevati rispetto al grafico tracciato considerando un diametro medio inferiore; da notare che questo parametro non influenza né l'ampiezza né l'altezza del picco della campana.

- Confrontare il grafico ottenuto dalla distribuzione granulometrica elaborata da Fluent con il grafico costruito dall'elaborazione delle prove sperimentali fornite dal laboratorio di LB Technology. Se le curve non hanno una sovrapposizione accettabile, valutata qualitativamente dall'operatore entro le tolleranze grafiche di Excel, è necessario tornare al secondo step e variare i parametri di Rosin-Rammler altrimenti è possibile proseguire al setup della simulazione.

Oltre ai parametri necessari all'elaborazione della distribuzione granulometrica di Rosin-Rammler è necessario fornire la velocità e il verso della fase discreta. Grazie a un consulto con il responsabile del laboratorio LB Technology, che ha fornito un resoconto sull'esperienza aziendale accumulata durante i test sull'impianto pilota, è stato stabilito che la velocità delle particelle può essere considerata pari alla velocità della corrente d'aria che le trascina e di conseguenza con verso concorde all'entrata della corrente.

A partire dalle misurazioni riportate nel capitolo 2.4.1 Casistiche analizzate per separatore dinamico è possibile determinare la velocità della corrente bifase conoscendo la portata di aria, la sezione di entrata al separatore misurata dal disegno originale del separatore dinamico riportato in Figura 12 e le condizioni di temperatura e pressione all'entrata dell'apparecchiatura grazie alla legge dei gas perfetti. L'equazione seguente dimostra come ricavare una portata in determinate condizioni (P_{in} , T_{in} : che in questo caso rappresentano la pressione e temperatura in entrata al separatore) sapendo che la portata d'aria è stata misurata in condizioni normali (ovvero $P_1=101325$ Pa, $T_1=273.15$ K).

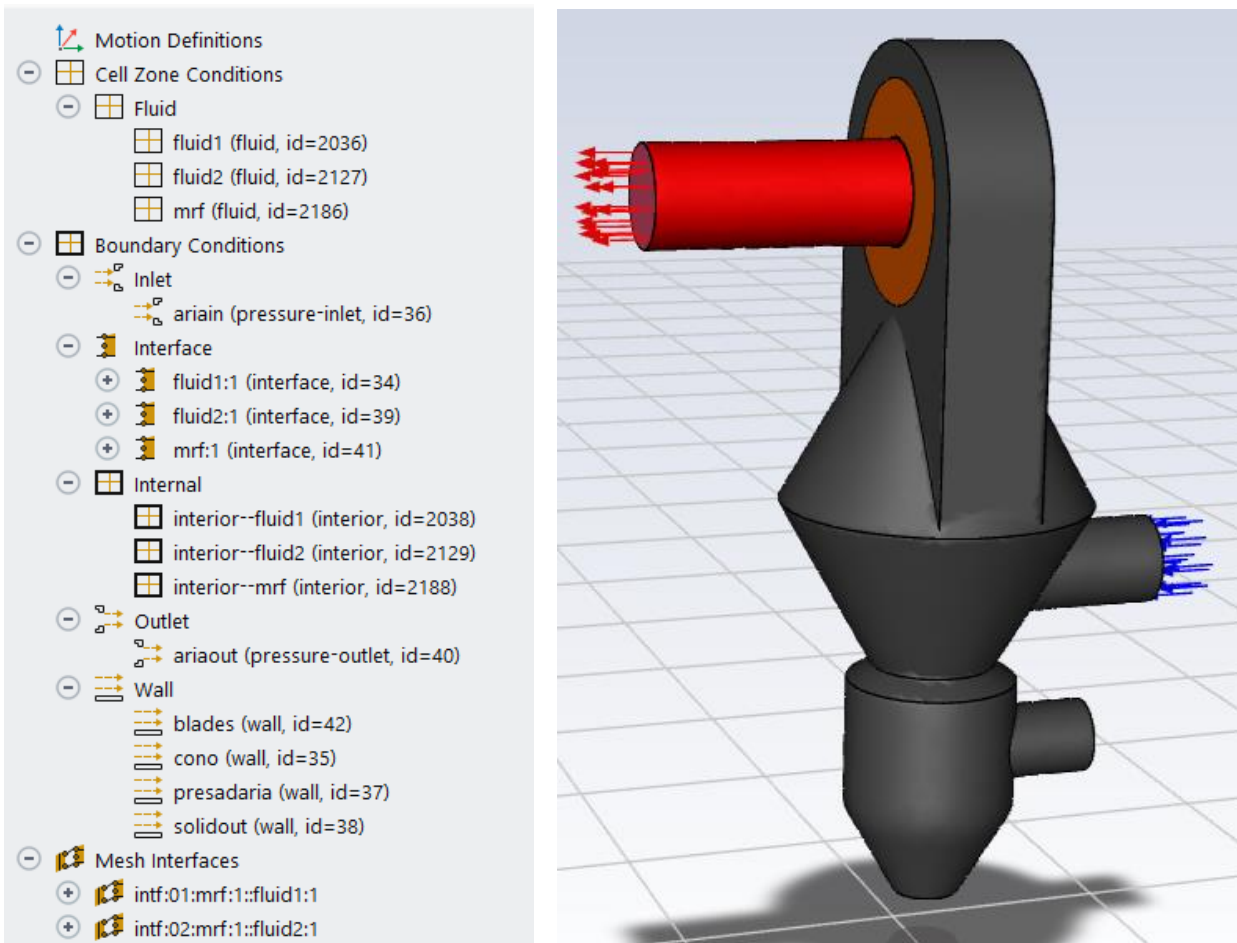
Equazione 10

$$\dot{V} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{P_1 * T_{in}}{T_1 * P_{in}} * V \left(\frac{\dot{N}m^3}{h} \right)$$

Equazione 11

$$v_{in} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\dot{V}}{S_{entrata}}$$

Figura 37 setup simulazione separatore dinamico



Gruppo	Condizione al contorno	Interazione fase discreta
Zona mesh motion	Fluid	/
Dominio fluido in uscita	Fluid	/
Dominio fluido corpo principale	Fluid	/
Input corrente bifase	Pressure inlet	Reflect
Protezione a cappello cinese	Wall	Reflect
Girante	Wall	Reflect
Output ricricolo	Wall	Trap
Output prodotto	Pressure outlet	Escape

In Figura 37 è rappresentato lo schema riportato sull'interfaccia di Fluent dell'apparecchiatura in esame utilizzato per definire le condizioni al contorno secondo la procedura descritta nel capitolo 3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico. Si nota una sola sezione di input, che corrisponde all'entrata della corrente bifase, e una sola sezione di output, ovvero l'uscita del prodotto.

Per entrambe queste sezioni le condizioni al contorno sono definite sulla base della pressione relativa misurata sperimentalmente in entrata (P_{in}) e in uscita (P_{out}), invece la sezione di uscita del ricircolo è classificata come muro poiché nel funzionamento reale c'è una sistema di valvola e rotocella che permette lo scarico della corrente solida di ricircolo ma non l'aspirazione d'aria dal basso. La presa d'aria invece è classificata come muro poiché è rimasta chiusa durante lo svolgimento delle prove sperimentali impedendo un accesso secondario all'aria.

Nella tabella in Figura 37 vengono anche riportate le diverse interazioni dei gruppi con la fase discreta, queste interazioni sono state precedentemente descritte nel capitolo 3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico, perciò verranno analizzati solo i casi più rilevanti:

- La sezione di input della corrente bifase riflette la fase discreta, ovvero impedisce un flusso inverso di particelle lungo il condotto che collega il mulino e il separatore. Questa condizione assicura che tutta la fase discreta definita in precedenza, per ricreare il solido particellare disperso, venga immesso nel dominio durante la simulazione per poi uscire necessariamente come ricircolo o prodotto.
- La sezione di output del prodotto permette la fuoriuscita della fase discreta, così come nella realtà permette la fuoriuscita del solido che supera la girante all'interno del separatore.
- Il dispositivo di protezione e la girante, classificati come muri e quindi ostacoli, riflettono le particelle che impattano su di essi. Questa condizione assicura che le particelle vengano influenzate dalla presenza degli elementi meccanici all'interno del dominio.
- La sezione di output del ricircolo intrappola le particelle poiché, pur essendo classificato come muro, deve essere possibile tracciare le particelle che la impattano. Dato che nella realtà il solido viene scaricato attraverso una rotocella, nella simulazione la funzione Trap assicura che le particelle che raggiungono la sezione di uscita del ricircolo restino intrappolate senza la possibilità di un flusso inverso verso l'interno del dominio.

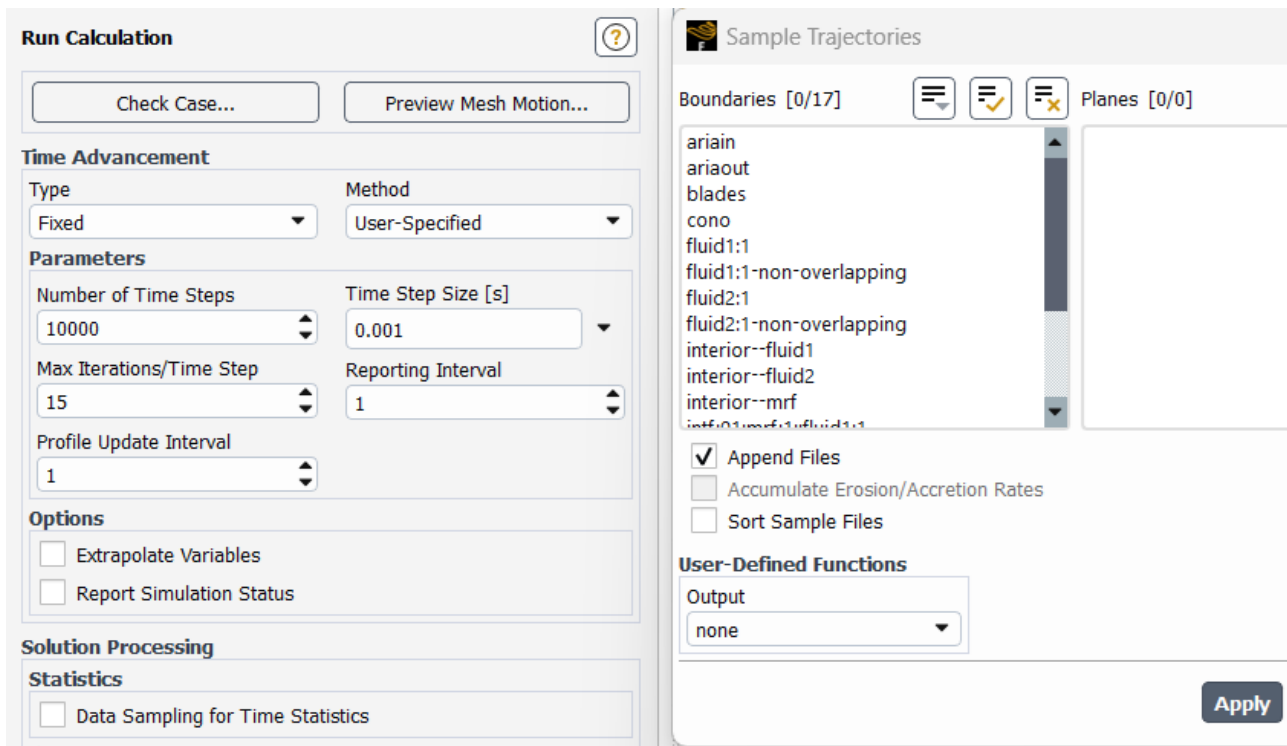
L'ultimo parametro necessario per definire le condizioni al contorno è la velocità della zona Mesh Motion, ovvero la zona di fluido adiacente alla girante del separatore, che è approssimabile alla velocità della girante stessa.

Dopo aver fornito le condizioni al contorno è possibile procedere alla scelta dei metodi di discretizzazione; i metodi utilizzati riprendono fedelmente lo schema e le scelte descritte nella 3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico. La principale differenza consiste nella scelta dell'utilizzo del metodo risolutivo Coupled¹⁶, questo metodo consente l'ottenimento di risultati con errori di approssimazione più contenuti. Nel caso particolare di problemi transitori questo algoritmo favorisce la convergenza dei risultati nei casi in cui la matrice presenti zone a bassa qualità o particolarmente critiche. La qualità della matrice utilizzata per la simulazione del separatore dinamico è stata verificata nei capitoli precedenti; tuttavia, ciò non esclude la presenza di zone critiche dovute a componenti di dimensioni ridotte, specialmente nella zona di Mesh Motion.

Successivamente vengono definiti i limiti di tolleranza per la convergenza dei risultati; così come per il caso del separatore statico non ci sono determinate linee guida da seguire perciò si procede con i valori standard suggeriti dall'interfaccia di Fluent. L'ultimo step prevede l'inizializzazione del problema la configurazione dei diversi step temporali per la simulazione del problema transitorio, come riportato in Figura 38.

¹⁶ 18.4.3 Pressure-Velocity Coupling, Ansys website, 2009

Figura 38 setup simulazione separatore dinamico



La simulazione del separatore dinamico è stata suddivisa in diecimila step ciascuno con una durata di un millisecondo per una simulazione dalla durata totale di dieci secondi; la durata della simulazione è molto ridotta rispetto ai normali tempi operativi ma è il prodotto di diverse considerazioni necessarie alla realizzazione dell'analisi delle diverse casistiche. In primo luogo la presenza della zona Mesh Motion si è rivelata complessa da integrare nel sistema, data la sua elevata velocità di rotazione l'utilizzo di step con durata temporale più elevata ha portato più volte all'interruzione della simulazione dovuta a risultati troppo distanti dalla convergenza poiché le proprietà nella zona adiacente alla girante variano molto rapidamente.

Un secondo fattore molto importante è la potenza computazionale del dispositivo utilizzato a confronto con il tempo computazionale necessario alla simulazione, durante le prime prove effettuate con il simulatore è risultata evidente la necessità di un calcolatore a elevata potenza con caratteristiche incompatibili rispetto ai dispositivi impiegati durante l'esperienza di tirocinio. Per sopperire a queste criticità è stata introdotta la seconda ipotesi fondamentale per lo studio dei separatori attraverso la simulazione in Ansys Fluent: i risultati ottenuti, previa convergenza del software e appurata la loro validità attraverso il confronto con dati fisici reali, saranno considerati validi seppur frutto di una simulazione di breve durata da cui estrapolare un comportamento da confrontare con il funzionamento reale delle apparecchiature e documentato attraverso le prove sperimentali.

Nella sezione Results presente su Fluent citata nella 3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico sono presenti diverse funzionalità per monitorare le diverse grandezze e proprietà del sistema durante la simulazione. Per quanto concerne la simulazione del separatore dinamico è fondamentale determinare la granulometria delle correnti di prodotto e ricircolo; in Figura 38 viene riportata l'apposita funzionalità per monitorare il flusso di particelle che attraversano una determinata superficie di controllo: controllando il flusso attraverso le sezioni di uscita del prodotto e del ricircolo è possibile risalire alla granulometria.

Per tenere traccia del flusso di particelle è sufficiente avviare all'inizio della simulazione la funzione Sample, ovvero il campionamento automatico di Fluent, per le sezioni di uscita del prodotto e del ricircolo e, una volta terminata la simulazione, è possibile fermare il campionamento ed esportare un file di testo che riporta per ogni particella che ha attraversato la superficie di controllo: il diametro, la massa, il volume e il numero di particelle di quelle dimensioni che hanno attraversato la superficie di controllo in un certo istante di tempo.

Grazie a questi dati è possibile, ad esempio con l'utilizzo di Excel, contare il numero complessivo di particelle con lo stesso diametro che hanno attraversato la superficie di controllo tra l'inizio e la fine della simulazione, notare che il numero di diametri diversi che verranno registrati dovrà coincidere con il numero di diametri impostato nella definizione della distribuzione di Rosin-Rammler durante il setup della DPM. Conoscendo il numero totale di particelle per ogni dimensione, la loro rispettiva massa e volume e la durata complessiva della simulazione è possibile calcolare sia per la corrente prodotto che ricircolo:

- Il volume totale di particelle come somma dei volumi corrispondenti al totale di particelle per ciascuna dimensione.
- Le frazioni volumetriche associate ad ogni dimensione come rapporto tra il volume delle particelle di un certo diametro e il volume totale.
- La massa totale di particelle come somma delle masse corrispondenti al totale di particelle per ciascuna dimensione.
- La portata massica totale e la portata massica corrispondente alle particelle di un certo diametro come rapporto tra la massa (totale o della singola frazione corrispondente a un certo diametro) e il tempo totale della simulazione.

In particolare l'associazione tra le frazioni volumetriche e i diversi diametri delle particelle fornirà la granulometria delle correnti di prodotto e ricircolo secondo i calcoli eseguiti dal simulatore, i quali saranno poi confrontati con le granulometrie determinate sperimentalmente. Nell'apposito capitolo Analisi dei risultati verranno riportati i criteri per la valutazione della qualità della matrice, i dati utilizzati nel setup delle condizioni al contorno e i diversi risultati forniti da Fluent a seguito della simulazione dei diversi casi analizzati per il separatore dinamico.

4. Analisi dei risultati

4.1 Risultati sperimentali

4.1.1 Separatore statico

Durante la trattazione dei diversi modelli di separatori analizzati in questo progetto di tesi è stato sottolineato lo scopo dell'analisi del separatore statico: ottimizzare la modellazione CFD di apparecchiature contenenti correnti bifase formate da gas e solido e verificare la bontà dell'approccio considerato su di un sistema più semplice dal punto di vista del suo funzionamento. A questo proposito non sono state effettuate delle misurazioni sperimentali sul separatore dinamico, ma sono stati reperiti dati dalla letteratura presente in azienda come linee guida per il setup di Fluent.

Le simulazioni dei diversi casi analizzati per il separatore statico si basano sulle stesse condizioni operative di cui i parametri rilevanti vengono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1 parametri per separatore statico reperiti da letteratura aziendale LB

Grandezza (unità)	Valore
Diametro massimo particelle trascinate (μm)	300
Diametro massimo particelle entranti (μm)	1000
Diametro minimo particelle entranti (μm)	12
Velocità in ingresso del solido (m/s)	0,5
Pressione relativa alla sezione di ingresso (Pa)	0
Pressione relativa alla sezione di uscita (Pa)	-20
Portata di solido entrante (kg/s)	0,084

Il separatore statico è un'apparecchiatura con capacità di separazione molto ridotte rispetto ai modelli dinamici normalmente utilizzati negli impianti di macinazione LB Technology; l'esperienza aziendale propone di utilizzarlo per i casi in cui non ci siano direttive molto stringenti nella commessa del cliente o nelle situazioni in cui la priorità sia salvaguardare l'investimento capitale iniziale. La forza motrice del processo di separazione all'interno separatore statico è generata dall'aspirazione di un ventilatore a valle, simile al caso del separatore dinamico, tuttavia la depressione applicata è decisamente inferiore. Questa scelta è dovuta a diversi fattori:

- La separazione delle particelle avviene per effetto combinato della gravità, che trascina verso il basso le particelle più grossolane e della depressione a valle, che permette all'aria di prendere un percorso preferenziale e trascinare una parte delle particelle. Se la depressione fosse troppo elevata il suo effetto prevarrebbe sulla forza peso che trascina le particelle grossolane verso il basso.
- Il separatore statico presenta diverse aperture, quindi applicare la depressione per aspirazione è necessario a determinare un percorso preferenziale per l'aria che, in caso contrario, potrebbe dividersi in diversi flussi senza trascinare nemmeno le particelle più fini.

Il valore della depressione applicata è derivato da diverse prove sperimentali riportate nella letteratura aziendale LB Technology, le dimensioni massime e minime sono anch'esse presenti in letteratura e derivano dalle più comuni commesse in cui è stato utilizzato il separatore statico. Le particelle trascinate avranno dimensioni comprese tra la dimensione minima entrante e quella massima trascinata, legata alla depressione applicata secondo correlazioni empiriche stabilite dal reparto R&D di LB Technology, mentre le dimensioni massime delle particelle entranti dipendono dal processo di macinazione a monte. La velocità e la portata del solido sono molto contenute poiché raggiunge il separatore grazie a un nastro trasportatore ed entra per caduta poco per volta così da favorire la separazione delle particelle, un flusso troppo abbondante di solido favorirebbe la caduta verso il basso di un unico agglomerato solido che risentirebbe solo marginalmente del trascinamento dell'aria.

Il confronto tra i risultati sperimentali e i risultati della simulazione del separatore statico servirà a evidenziare un modello di simulazione in grado di trattare sistemi bifase e raggiungere la convergenza secondi i parametri standard proposti da Fluent. Questo modello sarà tanto più affidabile quanto più fedelmente sarà in grado di riprodurre il comportamento della corrente bifase, ovvero valori di pressione e velocità comparabili con quelli riportati in letteratura e un range di dimensioni delle particelle trascinate o meno comparabile con quelle indicate in Tabella 1.

4.1.2 Separatore dinamico

In seguito alle prove sperimentali, effettuate sul separatore dinamico dell'impianto pilota Microton presente nel laboratorio di LB Technology per le diverse condizioni operative riportate tra le 2.4.1 Casistiche analizzate per separatore dinamico, sono stati ottenuti i risultati riportati in Tabella 2.

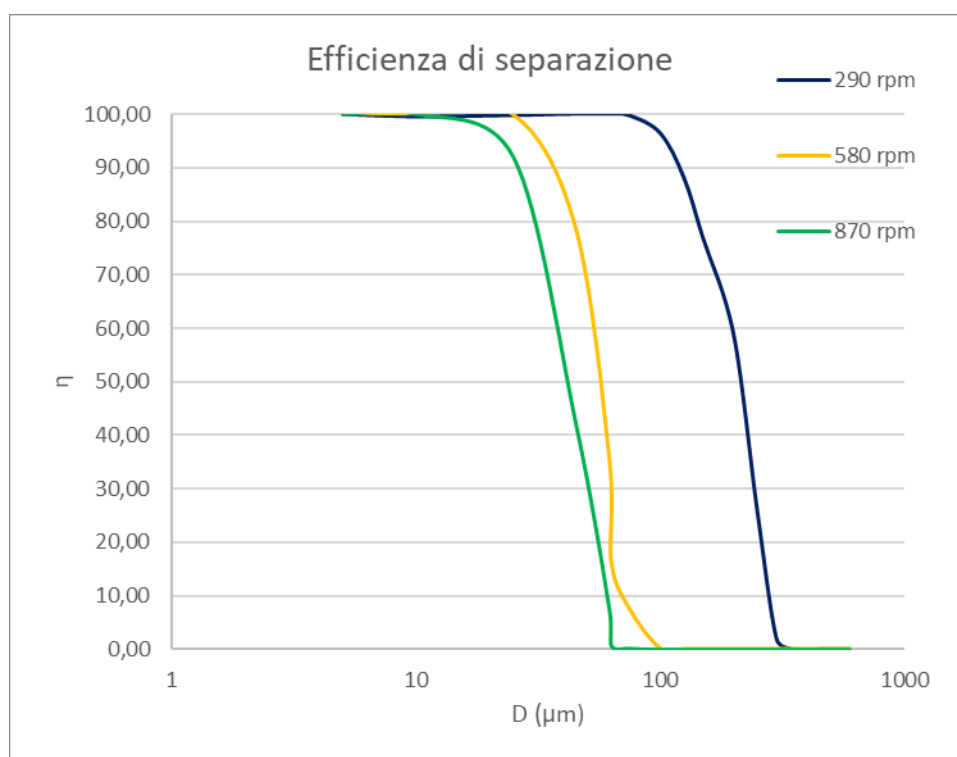
Tabella 2 risultati delle misurazioni sperimentali effettuate sul separatore dinamico

Grandezza	Unità	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Frequenza motore girante	Hz	10	20	30	20	20
Velocità girante (Equazione 4)	rpm	290	580	870	580	580
Pressione relativa ingresso	Pa	1882	1800	1710	2200	1500
Pressione relativa uscita	Pa	3780	4250	5600	5120	3890
Frequenza ventilatore a valle	Hz	50	50	50	55	45
Portata aria	m ³ /h	4140	3995	3773	4339	3551
Portata prodotto	Kg/h	445	174	136	280	241
Portata ricircolo	Kg/h	56,5	209	223	245	248
D97 prodotto	µm	164	56,1	50,5	68,4	57,7
D97 Ricircolo	µm	647	362	340	361	287
D50 prodotto	µm	40,2	20,1	13,7	21,2	17,1
D50 Ricircolo	µm	220	101	86,3	94,9	76
D10 prodotto	µm	6,14	4	3,16	4,2	3,8
D10 Ricircolo	µm	121	49,6	36,6	49,2	39,7

Le prove sono state svolte con frequenza della girante crescente, ovvero con velocità dell'elemento di separazione meccanico interno al separatore crescente per permettere progressivamente il passaggio di particelle con dimensioni inferiori.

Di seguito vengono riportati dei grafici per valutare l'efficienza di separazione (calcolata da Equazione 3) e la diversificazione delle correnti prodotto e ricircolo (sulla base dei parametri D10, D50 e D97) per i diversi casi sperimentali. Bisogna specificare che l'efficienza deve essere valutata, oltre alla sua dipendenza dalle dimensioni delle particelle, in funzione di un unico parametro di lavoro mantenendo costanti gli altri: per i casi da 1 a 3 è stata analizzata la dipendenza dalla velocità della girante mentre nei casi 2,4, e 5 è stata verificata la dipendenza dalla frequenza di aspirazione del ventilatore a valle. Perciò verranno analizzati questi due gruppi separati considerando che gli altri parametri di processo, come ad esempio velocità e portata d'aria, sono dirette conseguenze degli altri parametri fissati.

Figura 39 efficienza rispetto alla velocità della girante



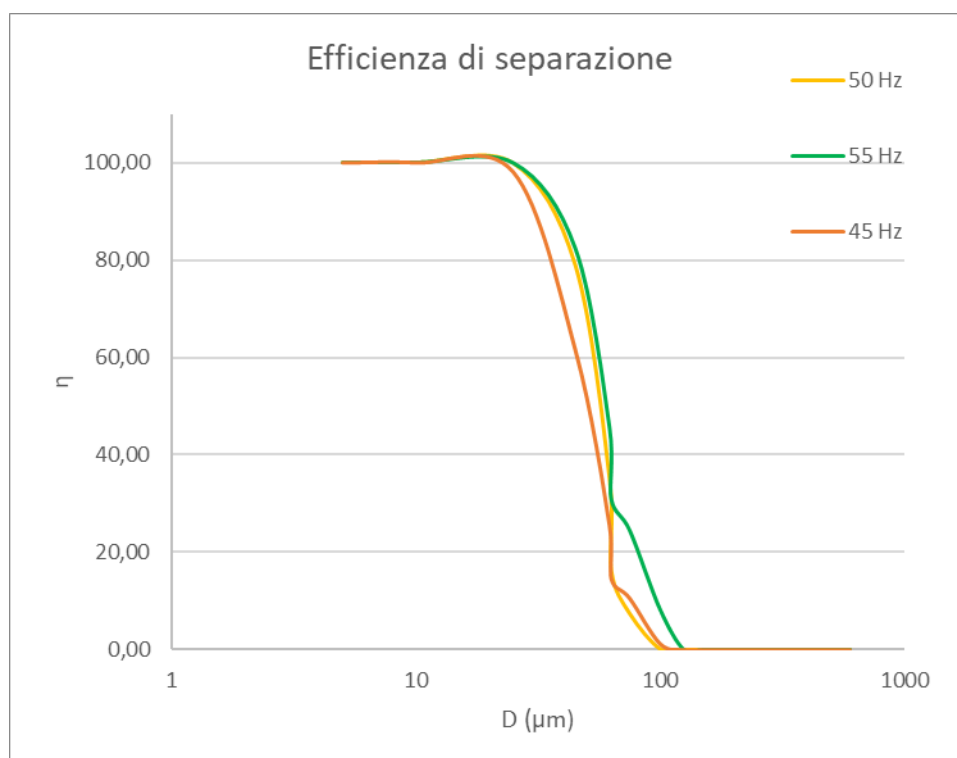
caso	Efficienza di separazione		
	(D10)	(D50)	(D97)
1	99,9%	99,9%	76%
2	99,9%	99,9%	50%
3	99,9%	99,9%	42%

Figura 39 dimostra che all'aumentare della velocità della girante l'efficienza massima di separazione è associata a frazioni di particelle con dimensioni inferiori; ciò significa che facendo ruotare più rapidamente l'elemento meccanico di separazione diminuisce lo spazio disponibile al passaggio delle particelle e il prodotto in uscita sarà caratterizzato da dimensioni più fini. Questo comportamento è in linea con il funzionamento del separatore dinamico analizzato nei capitoli precedenti.

Dal caso 1 al caso 3 l'efficienza di separazione tende al 100% per tutte le frazioni contenute nel prodotto inferiori al D50 e inizia a decrescere per le frazioni vicine al D97, ovvero la massima dimensione misurabile con certezza caratteristica della frazione più grossolana all'interno del prodotto. Naturalmente all'aumentare della velocità della girante diminuisce il valore D97 ma anche l'efficienza di separazione per le particelle più grandi, dato che corrispondono alla massima dimensione in grado di superare l'elemento meccanico in rotazione, è plausibile che una quota parte possa subire degli urti con la girante e venga respinta per poi essere convogliata al ricircolo.

Dalla Figura 40 è possibile osservare che la frequenza di aspirazione del ventilatore a valle, e quindi la portata d'aria, nel range da 45 a 55 Hz non influenza drasticamente l'efficienza di separazione. Questo comportamento è giustificato dal modesto salto di pressione che una variazione di 5 Hz comporta, infatti in Tabella 2 è possibile osservare che il passaggio da 50 a 45 Hz del ventilatore causa una diminuzione della pressione relativa in ingresso di 300 Pa mentre la variazione da 50 a 55 Hz comporta un aumento di 400 Pa, valori molto esigui rispetto alla pressione all'interno del sistema. Seppur queste variazioni rappresentino rispettivamente un decremento del 17% e un incremento del 22% rispetto alla pressione relativa in ingresso del caso 2 (che corrisponde al caso intermedio di riferimento caratterizzato da 50 Hz al ventilatore) rispetto alla pressione assoluta in ingresso registrata nel caso 2 rappresentano rispettivamente un -0,30% e +0,40%. L'efficienza associata ai parametri D10, D50 e D97 segue un andamento coerente coi casi analizzati in precedenza.

Figura 40 efficienza rispetto alla frequenza di aspirazione del ventilatore



caso	Efficienza(D10)	Efficienza(D50)	Efficienza(D97)
2	99,9%	99,9%	50%
4	99,9%	99,9%	28%
5	99,9%	99,9%	38%

È possibile concludere che, per i valori standard dei parametri di processo utilizzati negli impianti di macinazione Microton, la velocità della girante è il parametro più rilevante per influenzare le dimensioni delle particelle associate alla massima efficienza di separazione e di conseguenza la finezza del prodotto finale; nell'ambito delle prove sperimentali svolte le condizioni di processo ottimali per l'ottenimento di un prodotto fine sono quelle corrispondenti al caso 3. Oltre all'efficienza di separazione è interessante valutare la variazione dei parametri D10, D50 e D97 del prodotto in funzione della velocità della girante e della frequenza di aspirazione del ventilatore.

Figura 41 D10, D50, D97 rispetto alla velocità della girante

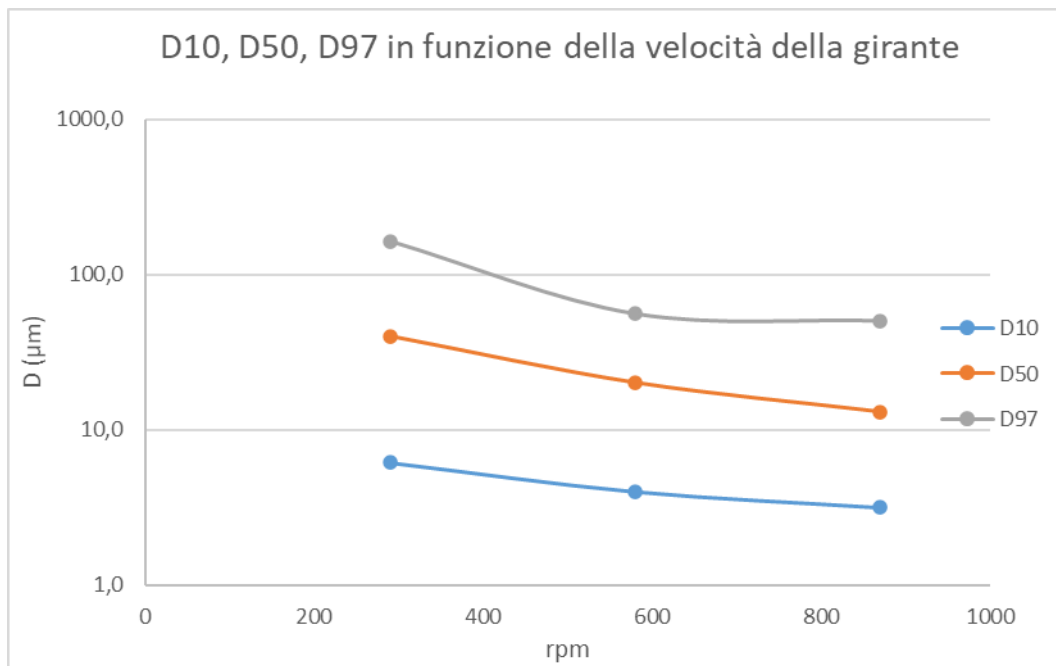


Figura 42 D10, D50, D97 rispetto alla frequenza di aspirazione del ventilatore

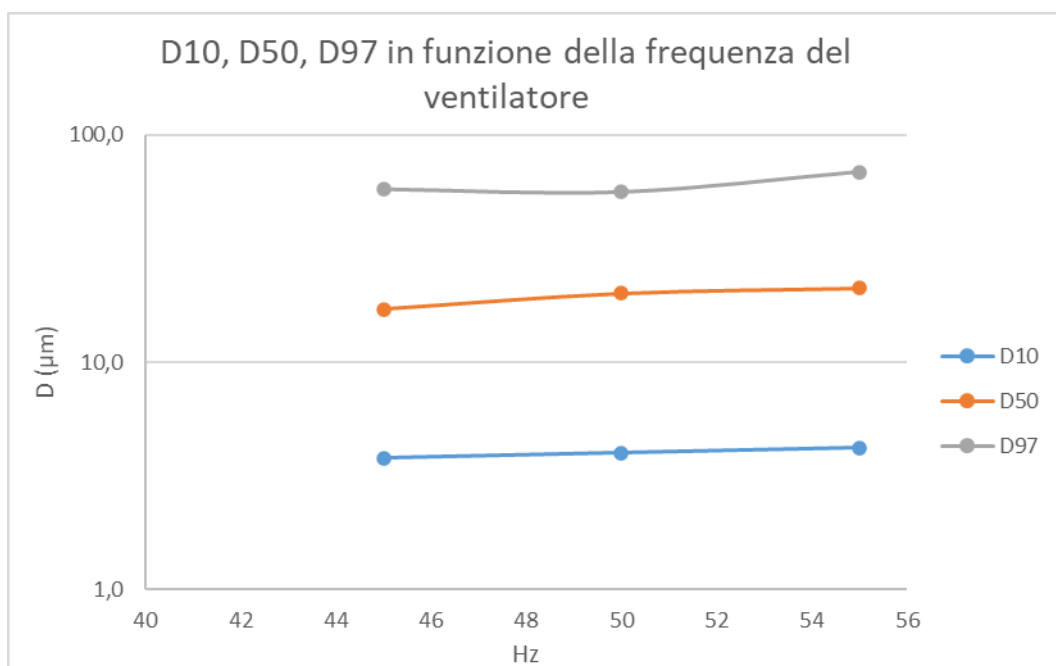
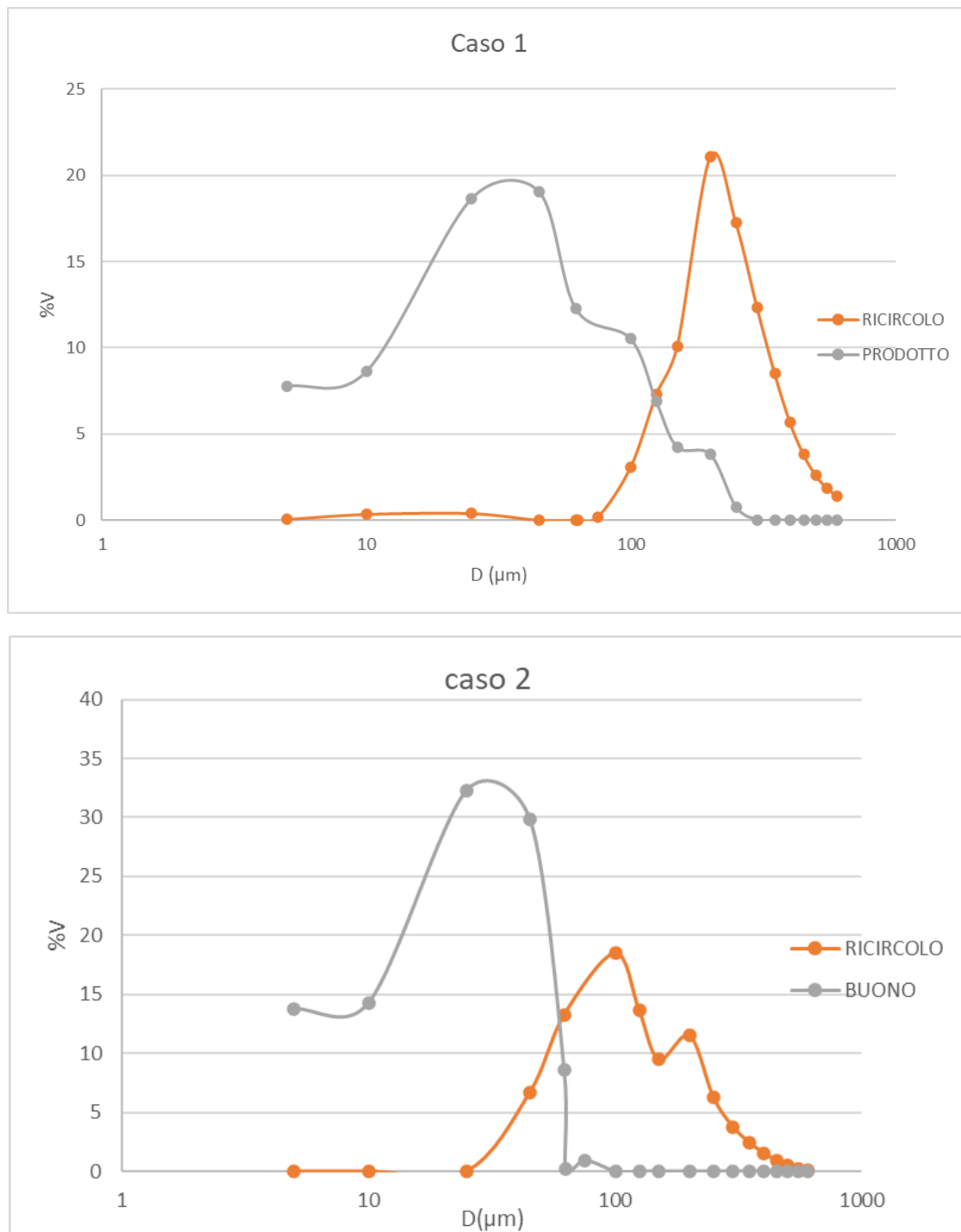
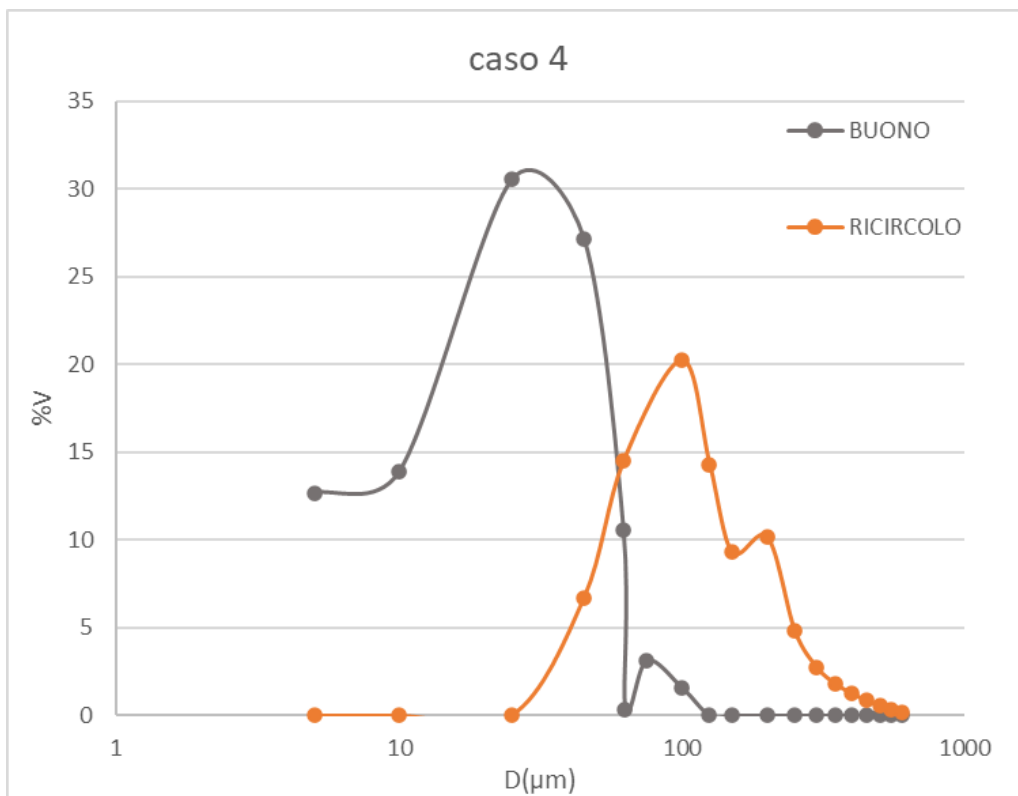
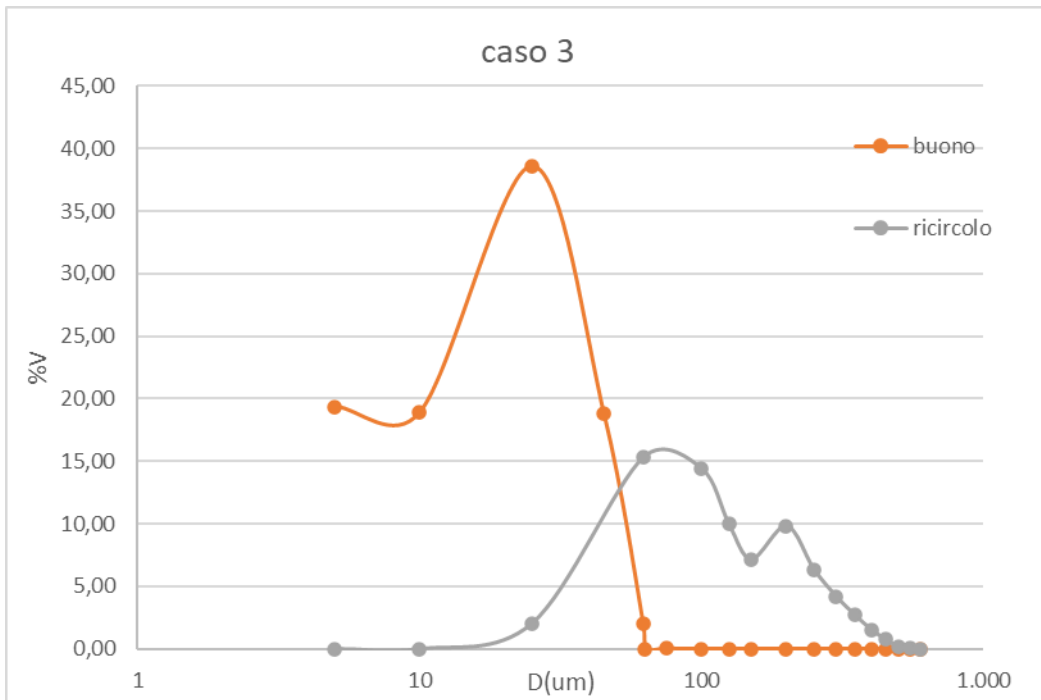
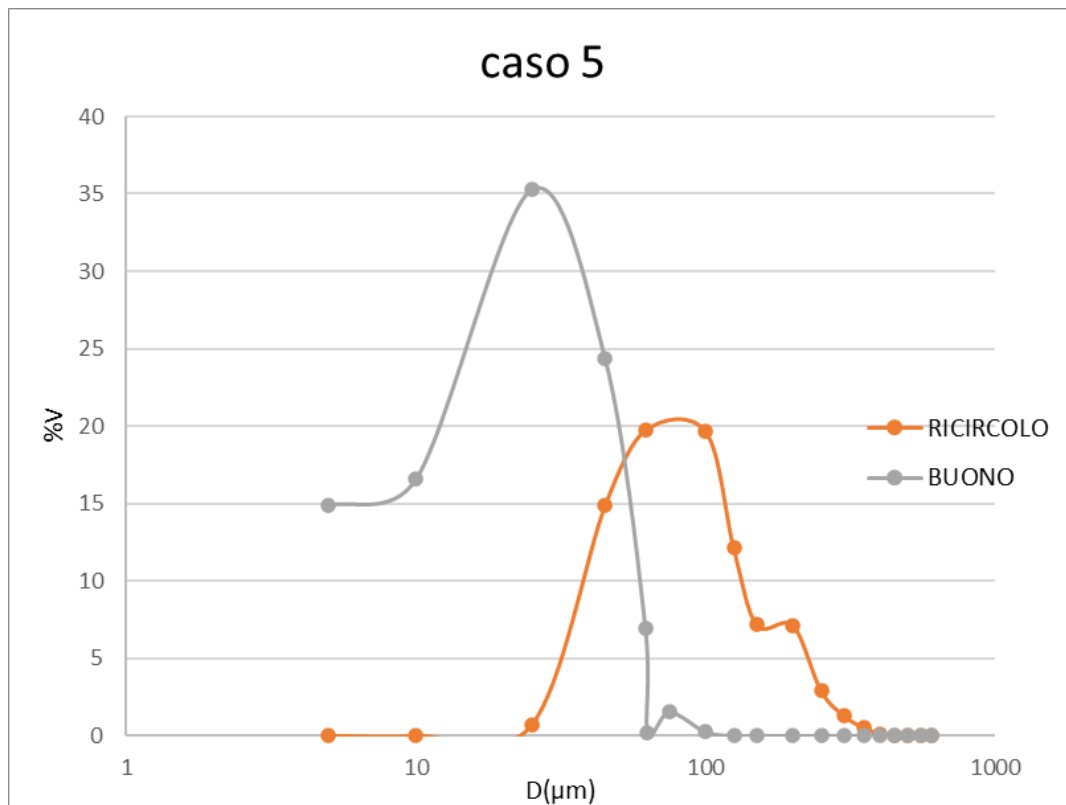


Figura 41 dimostra che all'aumentare della velocità della girante i parametri D10, D50 e D97 presentano valori decrescenti a dimostrazione che il prodotto in uscita è composto da frazioni di particelle di dimensioni inferiori, il che è coerente con le conclusioni derivate dall'osservazione dell'andamento dell'efficienza di separazione. In Figura 42 è possibile osservare un andamento pressoché costante dei parametri D10, D50, D97 in funzione della frequenza del ventilatore in aspirazione dato che, come esposto in precedenza, la variazione di pressione è molto limitata e non influenza drasticamente la granulometria del prodotto in uscita.

Figura 43 curve granulometriche determinate sperimentalmente per i diversi casi analizzati per il separatore dinamico





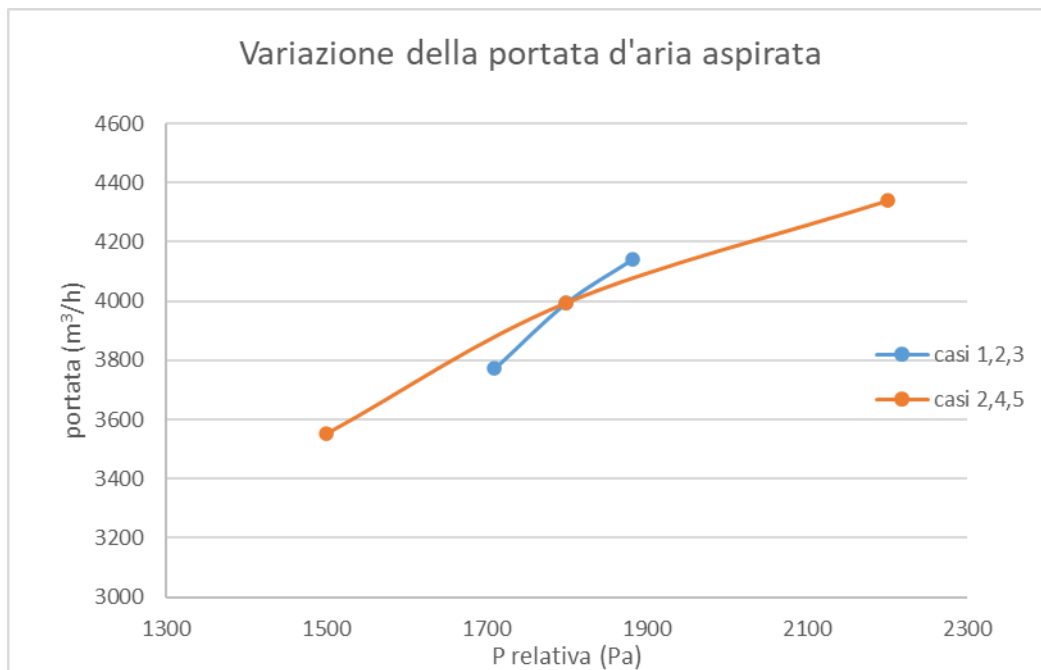


Inseguito alla trattazione sull'efficienza di separazione vengono riportati in Figura 43 le rappresentazioni delle granulometrie delle correnti prodotto e ricircolo per i diversi casi. Confrontando i grafici con i valori di efficienza corrispondenti al caso relativo è possibile osservare che al diminuire di quest'ultima aumenta la sovrapposizione tra la curva granulometrica del prodotto e del ricircolo.

Questa rappresentazione grafica evidenzia il range di dimensioni all'interno di particelle che vengono ripartite tra il prodotto e il ricircolo: l'esperienza aziendale suggerisce che all'aumentare delle dimensioni delle particelle (prendendo come riferimento per i diversi casi il rispettivo D97 del prodotto come dimensione massima delle particelle che riescono a superare la girante) le interazioni tra i corpi solidi, dovute alle caratteristiche del materiale e a tracce di umidità, diventano più rilevanti e aumenta la probabilità della formazione di agglomerati. Ciò spiegherebbe perché particelle di dimensioni intermedie nella curva granulometrica vengano ripartite tra prodotto e ricircolo, le loro normali dimensioni permetterebbero il passaggio attraverso la girante ma la formazione di agglomerati aumenta le dimensioni effettive.

Per completezza i valori numerici associati alle diverse distribuzioni granulometriche vengono riportati nell'Appendice.

Figura 44 variazione della portata d'aria aspirata in funzione della velocità della girante e della frequenza del ventilatore



Per la successiva valutazione fluidodinamica basata sui risultati di Fluent è utile definire la correlazione tra la depressione in ingresso al separatore dinamico e la corrispondente portata d'aria aspirata; come per le precedenti valutazioni saranno analizzati due diversi gruppi che indicano rispettivamente i casi con frequenza al ventilatore costante (casi 1,2 e 3) e variabile (casi 2,4 e 5).

In Figura 44 è possibile osservare che sia nei casi a frequenza costante che in quelli a frequenza variabile la portata d'aria aspirata ha un andamento crescente all'aumentare della depressione generata in ingresso, questa relazione è in linea con il funzionamento del separatore dinamico analizzato nel capitolo 2.4 Descrizione separatore dinamico: una maggiore depressione all'ingresso del separatore comporta maggiore forza motrice per trascinare una maggiore portata della corrente bifase proveniente dal mulino. Dal grafico in Figura 44 e dalla Tabella 2 si nota che la variazione di frequenza al ventilatore comporta una maggiore variazione della depressione in ingresso mentre per i casi a frequenza costante il range della pressione relativa alla sezione d'entrata resta più contenuto.

Variando la frequenza di aspirazione del ventilatore logicamente aumenta anche la depressione generata dal ventilatore stesso, infatti la massima depressione e portata aspirata sono stati misurati nel caso 5 in cui ventilatore era settato su 55Hz. Nei primi tre casi, in cui il ventilatore aveva una frequenza costante di 50 Hz, c'è comunque una leggera variazione della depressione e di conseguenza della portata; in particolare il caso 1 è caratterizzato da una depressione maggiore e una velocità della girante inferiore rispetto ai casi 2 e 3. È possibile dedurre da questi dati una relazione inversamente proporzionale tra la velocità di rotazione della girante e la depressione in ingresso probabilmente dovuta alla variazione che l'elemento meccanico in movimento provoca al campo di pressione interno al separatore. Per ulteriori valutazioni sono necessari i risultati delle simulazioni.

4.2 Risultati della modellazione virtuale

4.2.1 Separatore statico

La modellazione CFD del separatore statico comporta la realizzazione della matrice per i diversi casi, in Tabella 3 vengono riportati i valori dei criteri per la valutazione della qualità delle matrici generate.

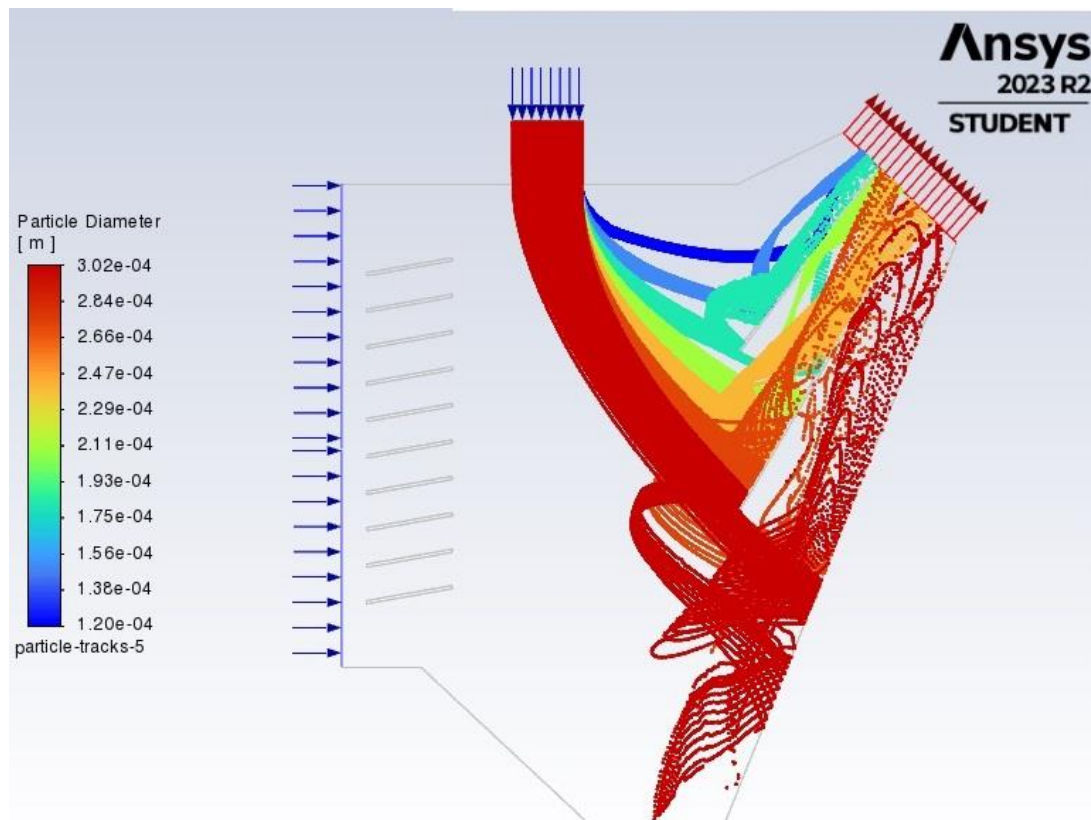
Tabella 3 criteri per la valutazione della qualità della matrice del separatore statico

Caso	Qualità degli elementi	Asimmetria
1	0,953	9,42e-2
2	0,939	8,23e-2
3	0,978	5,87e-2
4	0,946	6,45e-2
5	0,967	4,89e-2
6	0,947	7,45e-2
Caso tridimensionale	/	0,5584

La qualità delle matrici utilizzate nei casi da 1 a 6, determinata secondo i criteri descritti nel capitolo 3.1 Teoria alla base della modellazione CFD, è molto elevata grazie ad una geometria non particolarmente complessa che non presenta componenti rilevanti di piccole dimensioni o zone anguste; ciò permette di mantenere la densità degli elementi di controllo piuttosto uniforme e di forme regolari.

Si può osservare che per la matrice tridimensionale il fattore di asimmetria massimo è comparabile rispetto ai valori ottenuti nel caso di matrice bidimensionale; ciò dimostra i benefici della Tecnologia Mosaico poiché è plausibile aspettarsi matrici caratterizzate da una minore qualità all'aumentare della complessità del dominio ma grazie a un'efficiente distribuzione degli elementi di controllo i criteri di qualità rimangono nel range accettabile. Sulla base dei valori soddisfacenti per i criteri di valutazione delle matrici, il setup esposto nel capitolo 3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico e i valori guida esposti in Tabella 1 sono state svolte le diverse simulazioni riguardanti il separatore statico; di seguito vengono esposti i risultati del caso 1 che verranno utilizzati come base di riferimento per le altre simulazioni.

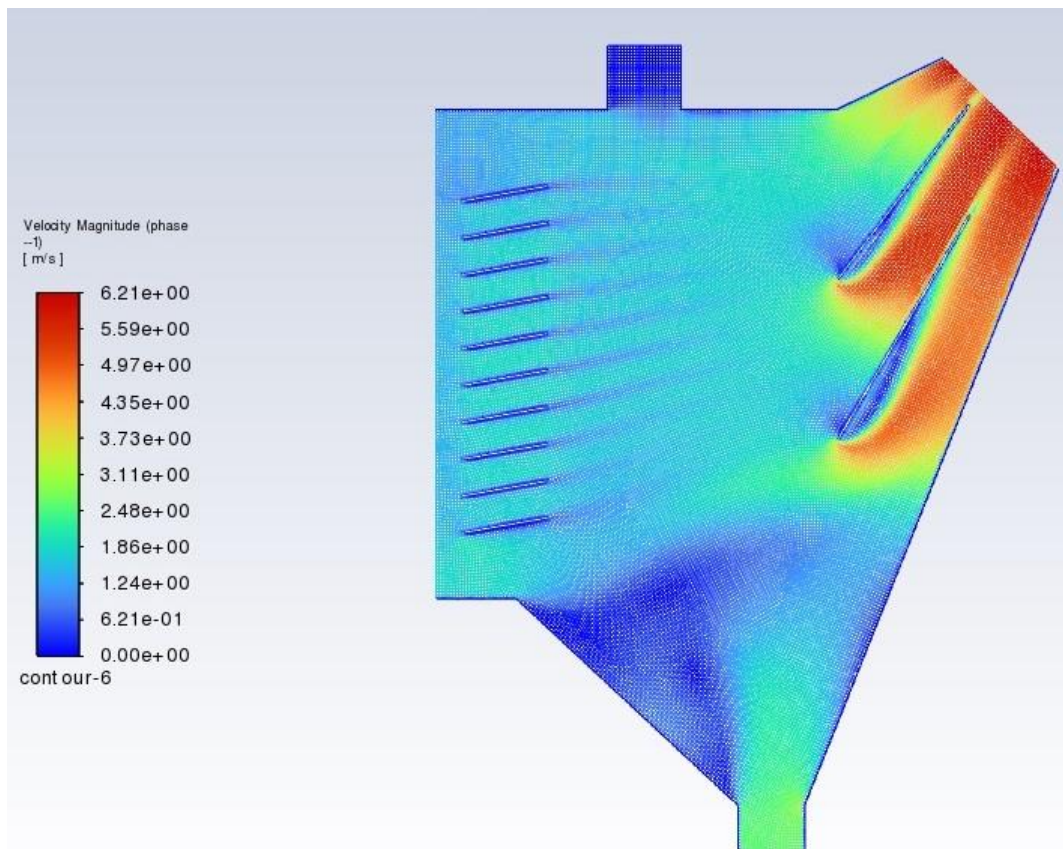
Figura 45 comportamento della fase discreta tracciata durante la simulazione del caso 1 del separatore statico



La Figura 45 mostra le particelle inserite all'interno del separatore statico differenziate per colore: il diametro minimo corrisponde e al crescere delle dimensioni i colori passano a tonalità di arancione (che indica la frazione tra i 200 e 300 μm) fino al rosso che indica tutte le frazioni superiori a 300 μm . Il comportamento della fase discreta viene influenzato dalla corrente d'aria entrante dalla sinistra dell'apparecchiatura, si nota il flusso di solido deviato dall'aria e trascinato verso l'uscita dove viene applicata la depressione a causa dell'aspirazione. In particolare vengono trascinate particelle di dimensioni pari o inferiori a 300 μm mentre le frazioni superiori cadono verso l'uscita inferiore del separatore statico: la separazione delle particelle riprende fedelmente i dati reali reperiti nella letteratura interna LB Technology. È possibile osservare come la corrente d'aria influenzi le particelle in base alle loro dimensioni: le frazioni più piccole vengono trascinate subito dopo aver superato il canale di input superiore, il resto delle particelle viene deviato a una distanza progressivamente maggiore dall'entrata in relazione alle loro dimensioni, e di conseguenza alla loro massa essendo la densità costante per il materiale. Anche le particelle più pesanti vengono deviate ma dopo aver impattato contro la parete sull'estrema destra del separatore o contro le alette solo una frazione prosegue verso l'uscita superiore ovvero quelle di diametro massimo pari a 300 μm .

L'interazione della corrente bifase che si forma all'interno del separatore con gli elementi meccanici, ovvero le alette e le pareti del separatore, influenza la separazione delle particelle poiché, secondo l'esperienza aziendale LB Technology, una perdita repentina di quantità di moto della corrente bifase diminuisce drasticamente l'effetto dell'aspirazione sul solido lasciandolo in balia della sola forza di gravità. Sulla base di queste osservazioni è importante verificare che il percorso della corrente bifase non abbia zone di quiete, ovvero dove la velocità tende a zero, poiché la perdita di frazioni fini che andrebbero a depositarsi verso il basso insieme alle particelle più grossolane.

Figura 46 campo di velocità misurate nella simulazione del caso 1 del separatore statico

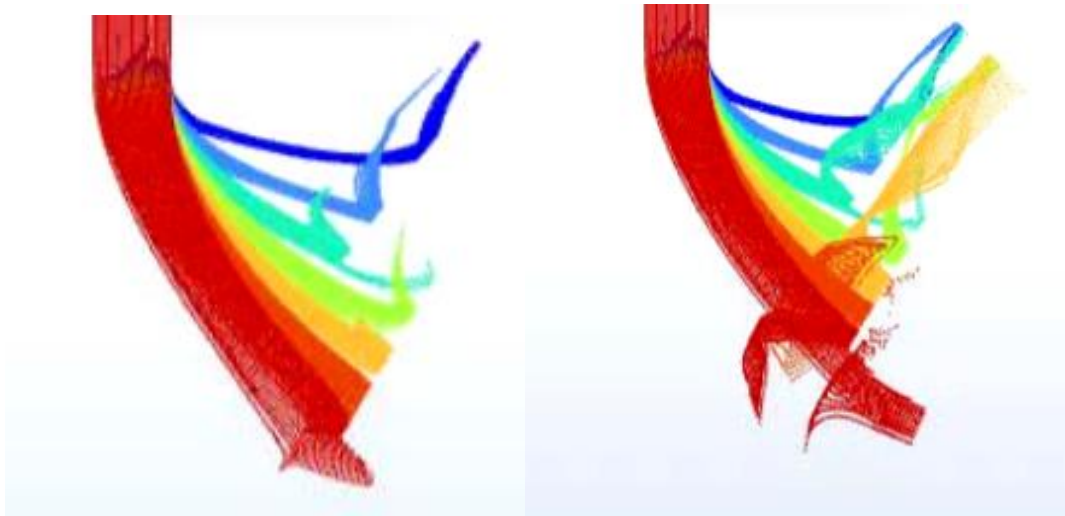


Il campo di velocità interno al separatore è determinato dalla geometria dell'apparecchiatura e l'aspirazione del ventilatore a valle, in Figura 46 viene riportata la velocità dell'aria nei diversi volumi di controllo che formano il dominio, ciascuno associato a un colore e modulo riportati nella legenda. Sulla base del funzionamento del separatore statico è possibile approssimare la velocità della corrente bifase alla velocità dell'aria, le zone critiche sono rappresentate dal colore blu che corrisponde a velocità tendente a zero derivata da un arresto del flusso d'aria dovuto all'impatto con ostacoli o zone che non risentono dell'aspirazione del ventilatore.

Nel campo di velocità è possibile identificare due zone critiche:

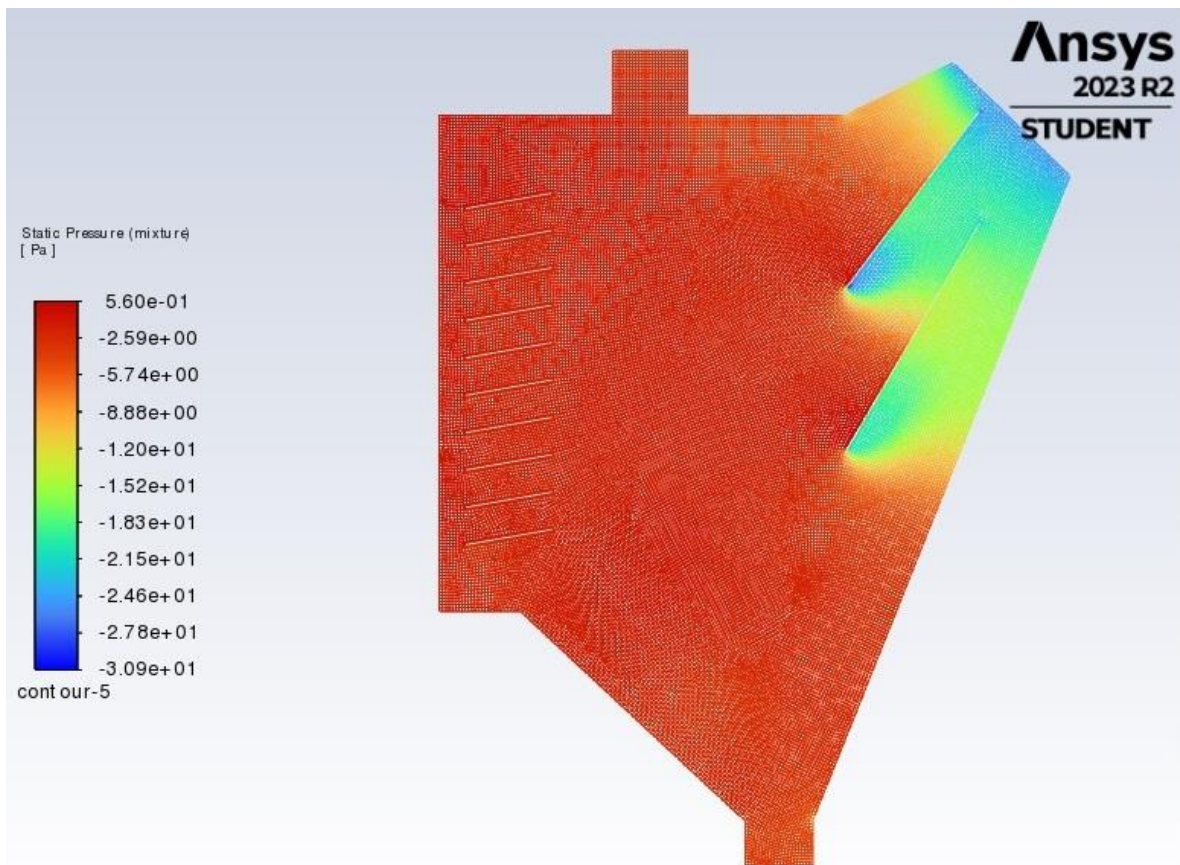
- La zona in basso a sinistra corrisponde a una zona stagnante, a causa della geometria del separatore quella sezione non risente dell'aspirazione del ventilatore e l'aria pertanto ristagna senza essere incanalata dall'effetto della depressione. Tuttavia questa zona non è rilevante ai fini della separazione poiché vi transitano solo particelle grossolane trascinate dall'effetto della gravità verso l'uscita inferiore.
- La zona adiacente alle alette antecedenti alla sezione di uscita superiore, ciò accade a causa dell'impatto della corrente bifase contro la superficie delle alette. Grazie all'effetto dell'aspirazione dopo avviene una rapida accelerazione ma il repentino rallentamento descritto in precedenza può ugualmente causare la perdita di frazioni di particelle fini. In Figura 47 è possibile notare particelle comprese approssimativamente tra i 200 e 300 μm (corrente arancione) venire trascinate verso il basso inseguito all'impatto con le alette, provocando una perdita di una frazione di particelle fini nel prodotto.

Figura 47 dettaglio del comportamento della DPM nella simulazione del caso 1 per separatore statico



Per verificare la correlazione tra l'aspirazione del ventilatore e il campo di velocità si analizza il campo di pressione interno al separatore riportato in Figura 48.

Figura 48 campo di pressione misurato nella simulazione del caso 1 del separatore statico

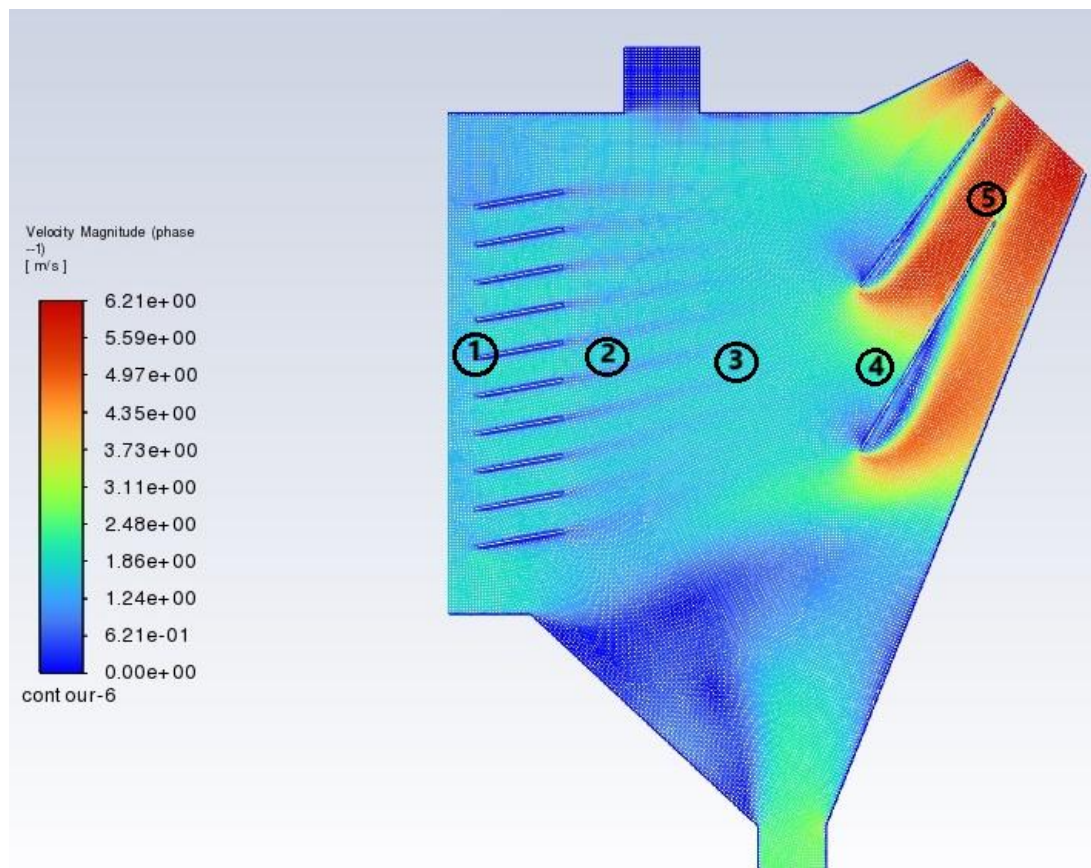


Il campo di pressione riportato in Figura 48 dimostra che la pressione all'interno dell'apparecchiatura rimane prossima al valore atmosferico nella maggior parte del dominio, ad eccezione della zona prossima all'uscita superiore della corrente bifase formata da aria e solido fine trascinato. Secondo la legge di Bernoulli, la quale esprime una relazione inversamente proporzionale tra la pressione e velocità di un fluido, questo comportamento è coerente con il campo di velocità riportato in precedenza per il separatore statico.

Sulla base del campo di pressione determinata dalla simulazione CFD è possibile stabilire la zona del separatore influenzata dall'aspirazione a valle: comprende le alette e la sezione di uscita superiore dell'apparecchiatura. I risultati ottenuti dalla simulazione delle normali condizioni operative del separatore statico, ovvero del caso 1, sono coerenti con il funzionamento descritto nel capitolo 2.3 Descrizione separatore statico, inoltre hanno permesso di osservare il comportamento delle particelle all'interno dell'apparecchiatura. La simulazione è stata svolta sulla base della 3.2.3 Configurazione della simulazione del separatore statico, ha raggiunto convergenza ed ha impiegato un tempo computazionale ragionevole di circa 40 minuti. Sulla base di queste considerazioni riportate finora è possibile affermare che il modello ottenuto per la simulazione del separatore statico riproduce fedelmente il comportamento reale dell'apparecchiatura e pertanto è stata utilizzata anche nelle successive casistiche, comprese quelle riguardanti il separatore dinamico a meno delle differenze riportate nella 3.3.3 Configurazione della simulazione del separatore dinamico.

Considerando le problematiche legate all'impatto della DPM sulle alette del separatore e la zona maggiormente influenzata dall'aspirazione a valle i risultati delle seguenti simulazioni, riguardanti i casi da 2 a 6 del separatore statico, saranno concentrati sulle differenze causate dalle variazioni strutturali che differenziano le varie casistiche. Il comportamento della DPM, il campo di velocità e di pressione non hanno subito rilevanti variazioni perciò non saranno approfondite ma possono essere consultate nel capitolo Appendice.

Figura 49 campionamento dei valori di velocità prendendo come esempio il campo di velocità della simulazione del caso 1 del separatore statico



Per verificare l'influenza dalle variazioni strutturali sul campo di velocità vengono definiti alcuni punti in zone nevralgiche dell'apparecchiatura, tutte caratterizzate dalla presenza di ostacoli ed elementi meccanici interni al separatore che influenzano il moto della corrente bifase, riportate in Figura 49. Misurando la velocità in questi punti per ciascuno dei casi simulati si ottiene l'andamento della velocità della corrente bifase.

Figura 50 profilo della velocità determinato attraverso i punti di campionamento nei casi simulati per il separatore statico

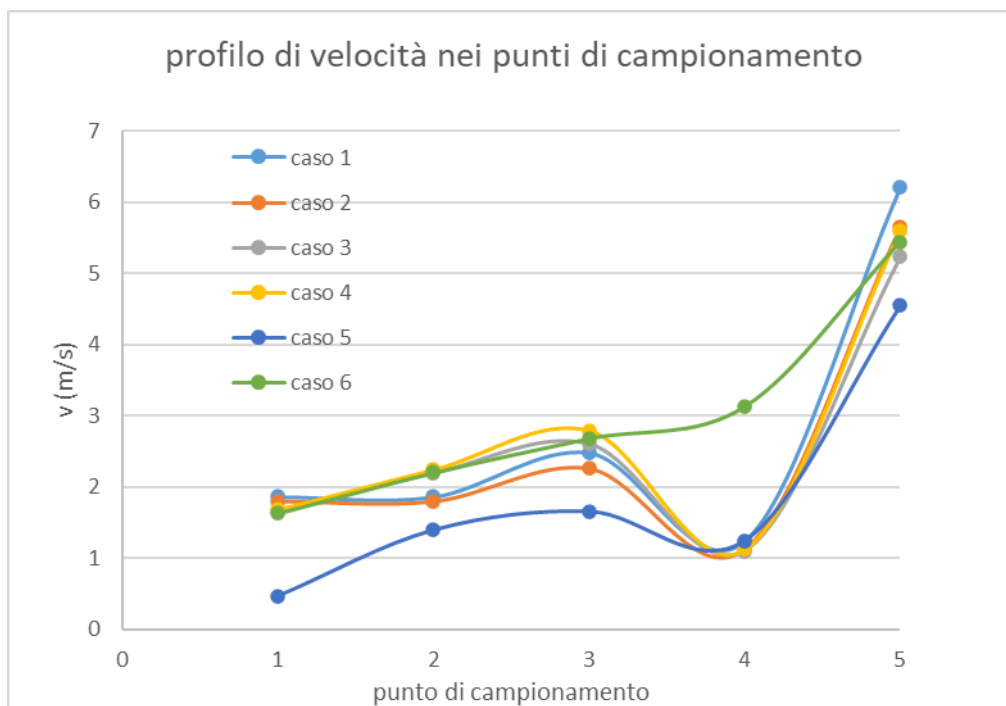


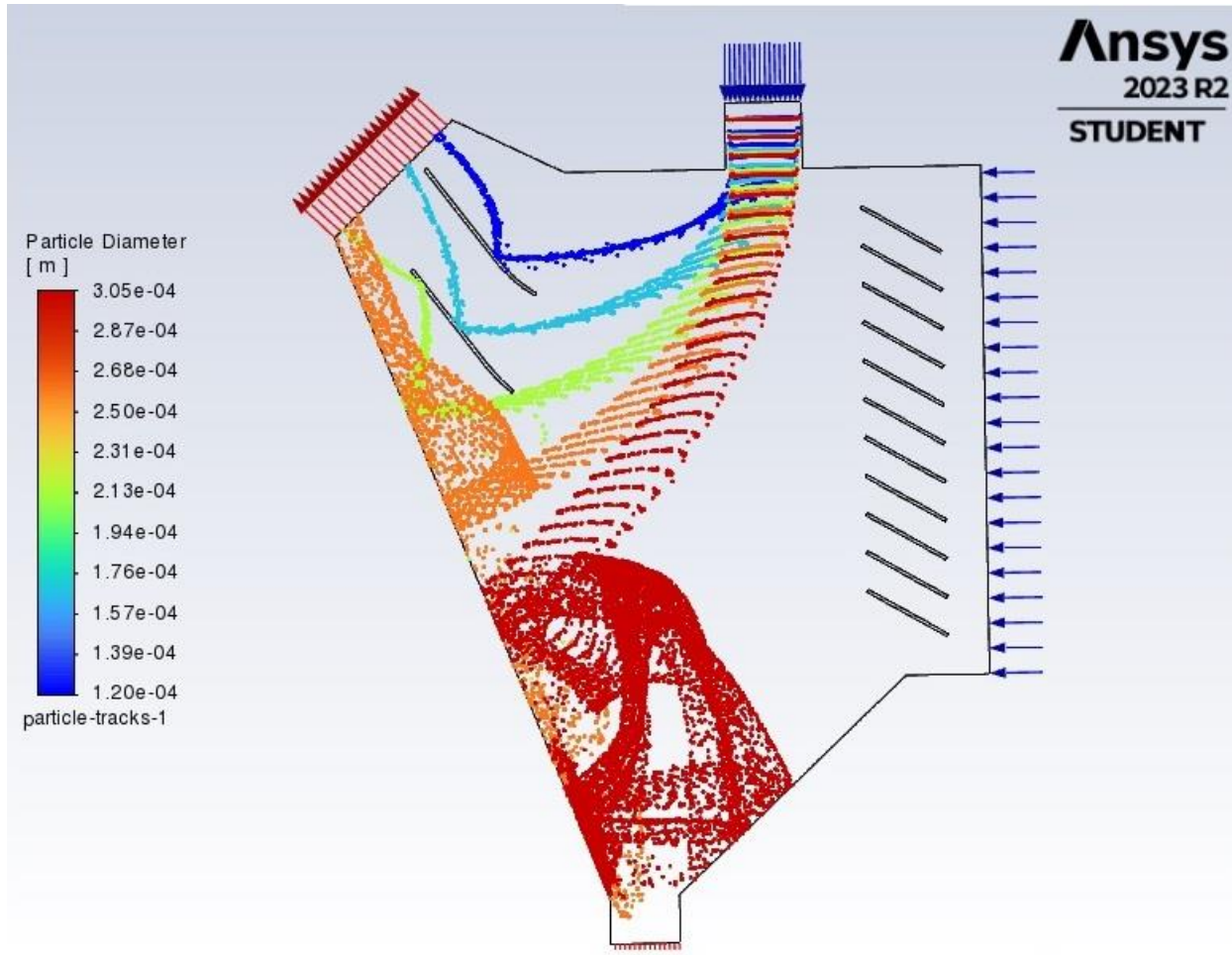
Tabella 4 valori di campionamento della velocità nelle simulazioni del separatore statico

	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5	caso 6
punti	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
1	1,86	1,8	1,65	1,68	0,46	1,63
2	1,86	1,8	2,19	2,24	1,39	2,2
3	2,48	2,26	2,6	2,79	1,65	2,68
4	1,24	1,13	1,1	1,12	1,24	3,13
5	6,21	5,65	5,23	5,59	4,55	5,44

Il grafico riportato in Figura 50 mostra un andamento simile per tutti i casi nei primi tre punti di campionamento, dimostrando quindi che l'angolazione delle alette in entrata non influisce significativamente sul modulo della velocità della corrente bifase nel corpo centrale dell'apparecchiatura ad eccezione di casi limite (come il caso 5) in cui le alette lasciano un minimo spiraglio per il passaggio dell'aria che accelera molto rapidamente una volta superata l'entrata in assenza di ulteriori ostacoli. Dal quarto punto di campionamento in poi è possibile notare le prime differenze sostanziali, i valori di velocità sono stati presi nella zona di primo contatto con le alette in uscita e per tutti i casi si può notare una decelerazione dovuto al repentino cambio di direzione imposto dalle alette alla corrente bifase. Sia in presenza di alette con o senza curvatura il modulo della velocità diminuisce, provocando anche il rallentamento della DPM e la perdita indesiderata di frazioni di solido fine, ad eccezione del caso 6 in cui le alette in uscita hanno una forma ibrida tra il profilo del caso 1 e la curvatura introdotta nel caso 2.

Questa particolare forma consente alla corrente bifase una transizione più uniforme dal corpo centrale del separatore alla sezione di uscita senza provocare rallentamenti eccessivi; la forma contenuta delle alette permette di una migliore separazione delle particelle.

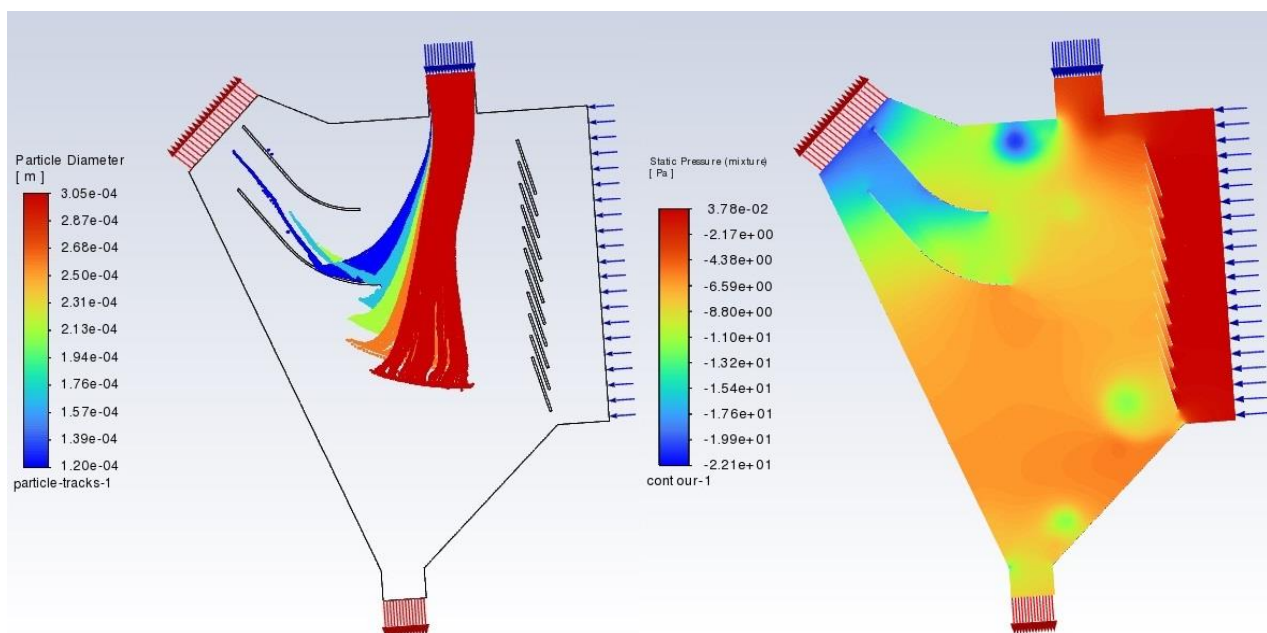
Figura 51 comportamento della DPM nella simulazione del caso 6 del separatore statico



In Figura 51 è possibile apprezzare il comportamento delle particelle durante la simulazione del caso 6: le alette in uscita sono più corte rispetto al design impiegato negli altri casi e ciò permette alla corrente solida entrante di diversificarsi per un tempo maggiore prima di impattare contro le alette. Grazie all'effetto combinato dell'aspirazione e della gravità le particelle trascinate dalla corrente d'aria hanno una dimensione massima compresa tra i 230 e 250 μm a differenza dei 300 μm degli altri casi. A parità delle altre condizioni operative la separazione sarà più efficiente nel caso 6 poiché permette di ottenere un prodotto dall'uscita superiore più fine sfruttando la stessa aspirazione e perciò la stessa forza motrice e stessa produttività dato che, utilizzando il design di partenza del caso 1, sarebbe necessario ridurre l'aspirazione per ottenere la separazione di particelle più fini.

La Figura 52 mostra che il diametro massimo delle particelle trascinate nella simulazione del caso 5 è minore tra tutte le casistiche analizzate per il separatore statico, tuttavia questo comportamento è associato a un campo di pressione disomogeneo con notevoli picchi di sovrappressione e depressione all'interno dell'apparecchiatura dovuto al particolare percorso che deve compiere la corrente d'aria che viene ostacolata da un set di alette con elevata angolazione.

Figura 52 comportamento della fase discreta e campo di pressione misurati nella simulazione del caso 5 del separatore statico



Dal punto di vista del campo di pressione relativa riportato in Figura 53 si nota un andamento generalmente crescente con pendenza maggiore nel tratto iniziale nei casi caratterizzati da alette in entrata con angolazione maggiore (come il caso 4 e 5) poiché è presente un maggiore salto di pressione tra la sezione successiva e quella precedente alle alette in entrata.

Complessivamente il caso 6 ha l'andamento più lineare e anche a pendenza maggiore, ovvero gli effetti dell'aspirazione sono più uniformi all'interno dell'apparecchiatura e influenzano maggiormente anche le zone vicine all'entrata rispetto ad altri casi; ciò permette alla corrente bifase di seguire un moto più regolare. Confrontando Figura 50 e Figura 53 si nota che un profilo di pressione con salti di pressione si traduce in diminuzioni del modulo della velocità e un moto della corrente bifase più irregolare.

Figura 53 profilo di pressione misurato nei punti di campionamento per i diversi casi simulati per il separatore statico

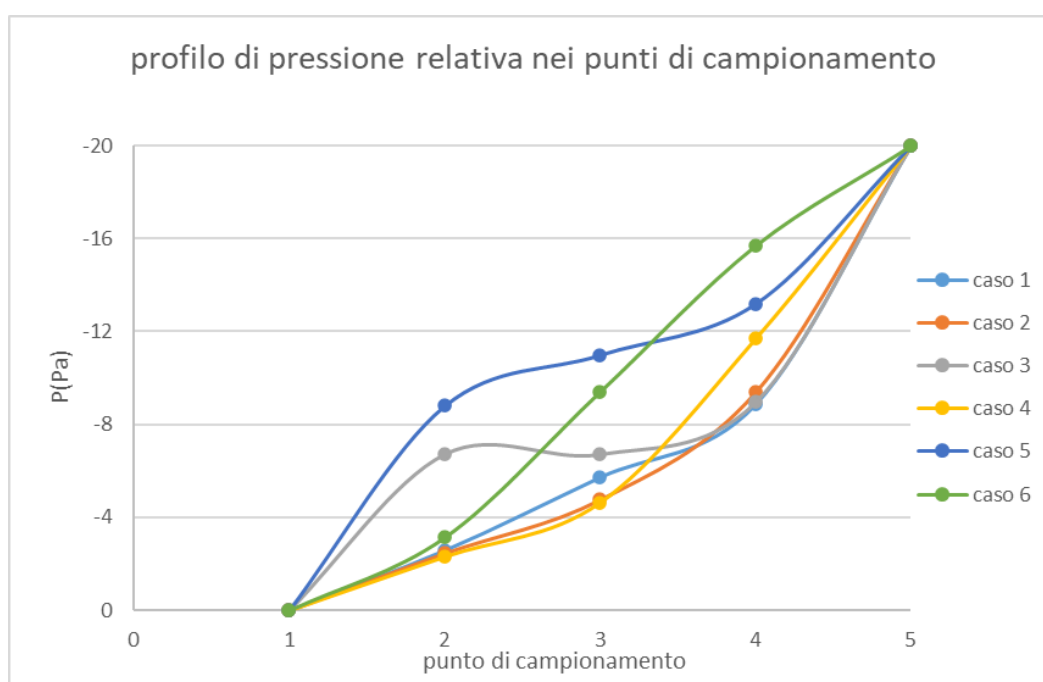
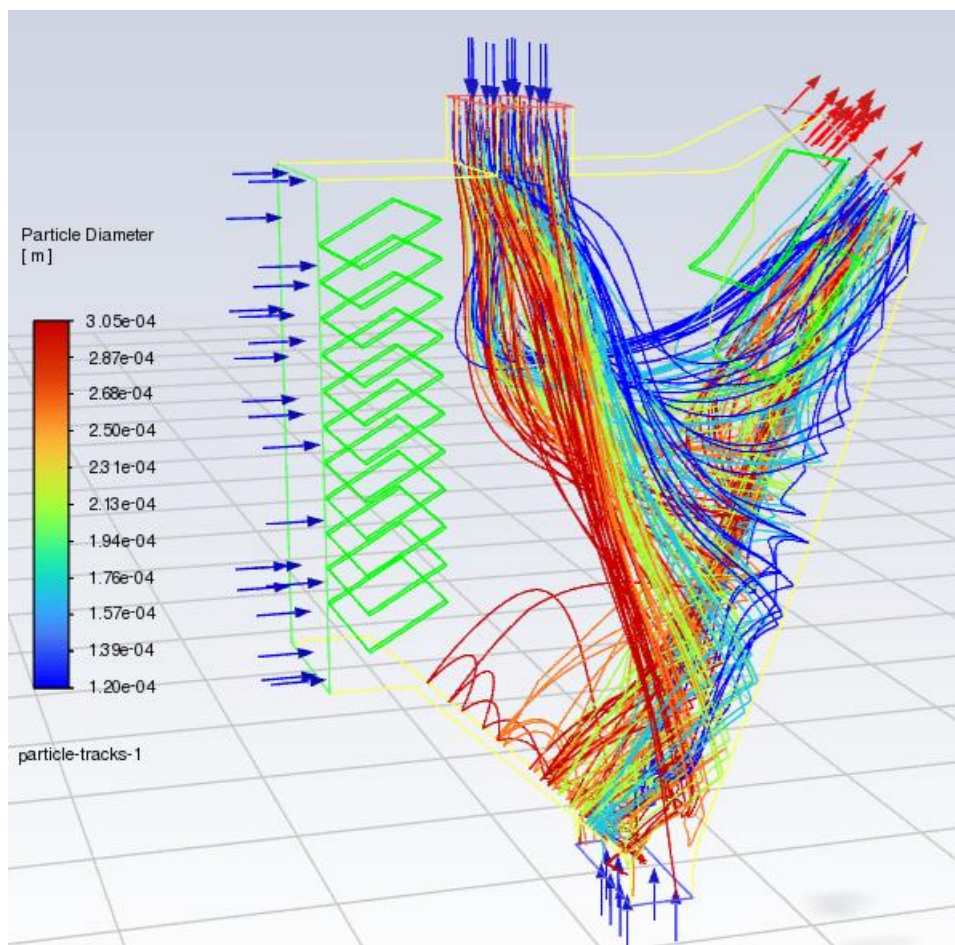


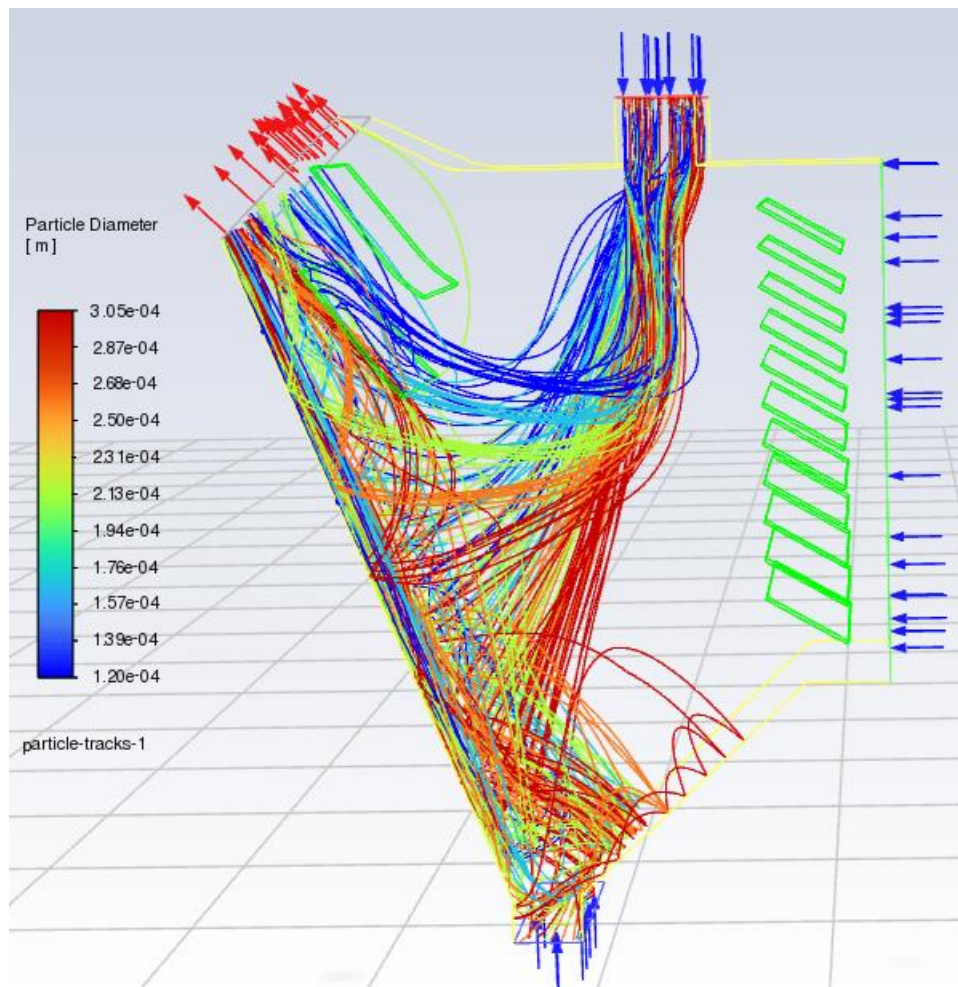
Tabella 5 valori di pressione relativa nei punti di campionamento nelle diverse simulazioni del separatore statico

punti	caso 1 P(Pa)	caso 2 P(Pa)	caso 3 P(Pa)	caso 4 P(Pa)	caso 5 P(Pa)	caso 6 P(Pa)
1	0	0	0	0	0	0
2	-2,59	-2,46	-6,73	-2,32	-8,8	-3,14
3	-5,74	-4,77	-6,73	-4,65	-11	-9,41
4	-8,88	-9,39	-8,97	-11,7	-13,2	-15,7
5	-20	-20	-20	-20	-20	-20

Sulla base delle valutazioni riportate per le diverse simulazioni analizzate attraverso Ansys Fluent è possibile stabilire che il design del caso 6 per il separatore statico è il più efficiente, anche più efficiente del design originale riportato nel caso 1, grazie alla diversa angolazione delle alette in entrata e alla forma ibrida delle alette in uscita il campo di pressione e velocità risultano più regolari. La transizione dalle zone a condizioni atmosferiche a quelle pi prossime all'aspirazione è più omogenea con un andamento crescente e lineare delle grandezze d'interesse, inoltre i risultati ottenuti dalle simulazioni CFD hanno evidenziato una maggiore efficienza della separazione a parità di condizioni operative con il design originale. Per verificare l'indipendenza delle grandezze misurate dalla matrice si riportano i risultati della simulazione del dominio tridimensionale del separatore statico ricavato dal design bidimensionale del caso 6.

Figura 54 comportamento della DPM nella simulazione tridimensionale del separatore statico



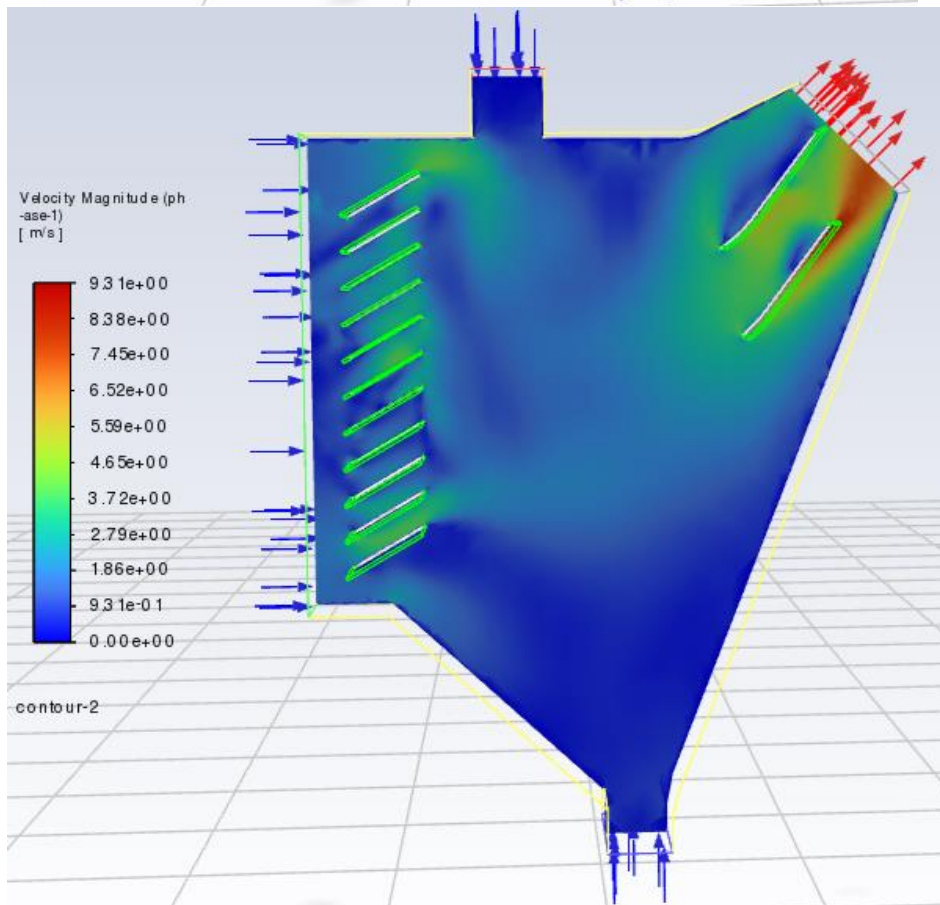
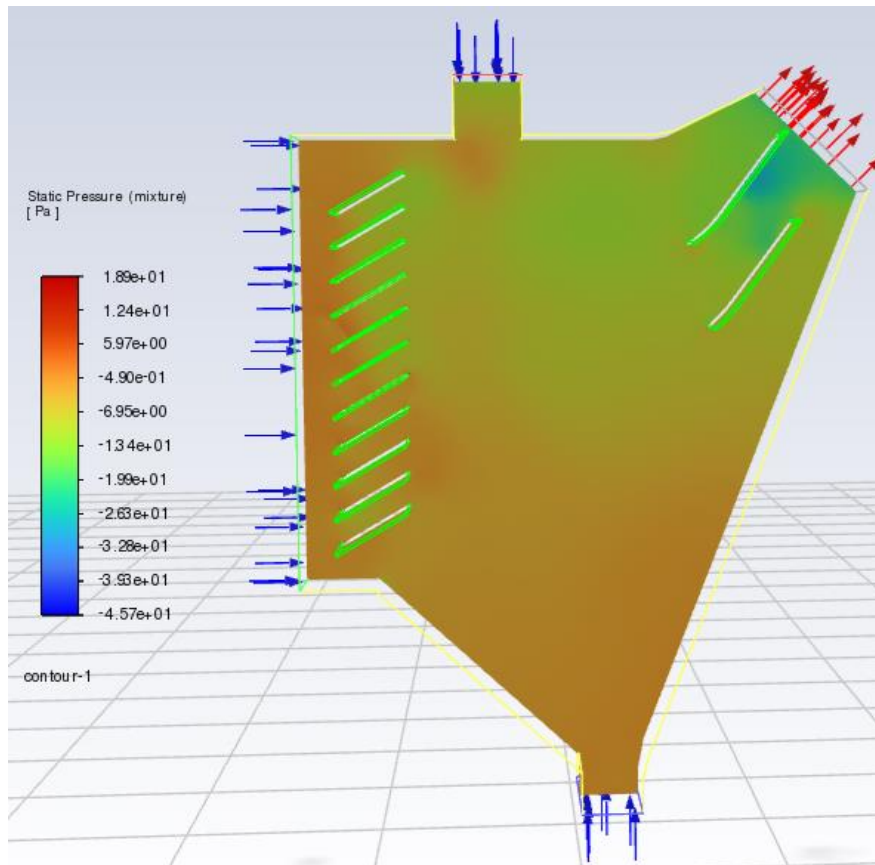


L'analisi del comportamento della fase discreta nel modello tridimensionale del separatore statico, riportata in Figura 54, evidenzia delle criticità che nella simulazione bidimensionale non è possibile individuare:

- È presente una frazione di particelle fini (corrente azzurra che corrisponde a particelle comprese tra i 120 e 160 μm) che viene trascinato verso l'uscita inferiore del separatore inseguito all'impatto con la parete sinistra dell'apparecchiatura. Sembra che, nonostante le dimensioni ridotte di queste particelle, esse risentano maggiormente della gravità piuttosto che dell'aspirazione.
- È possibile osservare una frazione di particelle grossolane (corrente rossa che corrisponde a solidi di dimensioni tra i 250 e 300 μm) uscire dalla sezione superiore del separatore, come se fossero maggiormente influenzate dall'effetto dell'aspirazione.

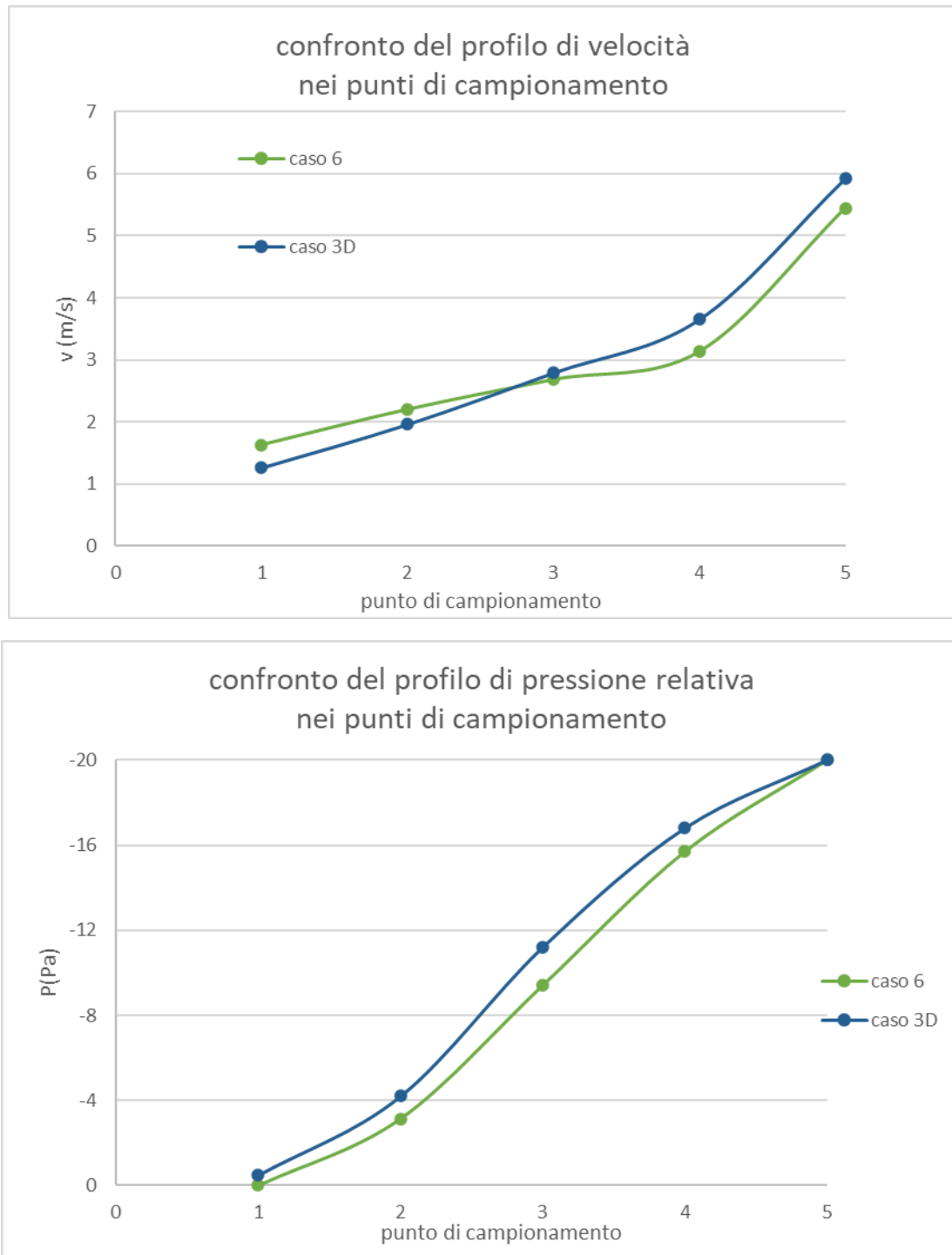
Osservando entrambe le prospettive riportate in Figura 54 le diverse correnti che compongono la fase discreta è possibile determinare, seppur in maniera puramente qualitativa, che, nonostante siano presenti frazioni caratterizzate da un comportamento anomalo, la maggior parte della DPM segue un comportamento coerente con i risultati delle precedenti simulazioni. Dall'analisi del funzionamento del separatore riportata nel capitolo 2.3 Descrizione separatore statico si evince la presenza di possibili interazioni indesiderate tra le particelle che ne influenzano la traiettoria nonostante gli effetti dell'aspirazione e della gravità. È plausibile assumere che il modello matematico Syamlal-OBrien utilizzato per descrivere il comportamento fisico di solidi particellari irregolari, ovvero la DPM, riproduca simili interazioni.

Figura 55 campo di pressione e velocità ottenuti dalla simulazione tridimensionale del separatore statico



Il campo di pressione e velocità ottenuti dalla simulazione del modello tridimensionale del separatore statico mostrati in Figura 55 sono caratterizzati da una distribuzione coerente a quella osservata nel caso 6 bidimensionale. Per poter effettuare un confronto quantitativo vengono presi come riferimento i valori negli stessi punti di campionamento mostrati in Figura 49 e confrontati con quelli misurati nel caso 6.

Figura 56 confronto tra il profilo di pressione e velocità determinati nelle simulazioni del caso 6 e del caso tridimensionale del separatore statico



Gli andamenti riportati in Figura 56 dimostrano la consistenza dei risultati della simulazione tridimensionale rispetto a quelli ottenuti nel caso bidimensionale con lo stesso design, l'andamento e l'ordine di grandezza della velocità e pressione sono comparabili con il caso 6 a meno di un lieve scostamento dovuto ragionevolmente al maggior errore di approssimazione compiuto dal simulatore per il dominio tridimensionale a causa della maggiore complessità del problema.

Il confronto della simulazione bidimensionale e tridimensionale del separatore statico con il design descritto nel sesto caso evidenzia dei risultati coerenti ed indipendenti dalla matrice, l'ultimo criterio fondamentale per la valutazione di un modello virtuale. A seguito di queste considerazioni design del caso 6 è da considerarsi più efficiente del design originale, tuttavia anch'esso è soggetto a problemi di trascinamento dovuti alle interazioni tra particelle riportati nella letteratura aziendale LB Technology.

4.2.2 Separatore dinamico

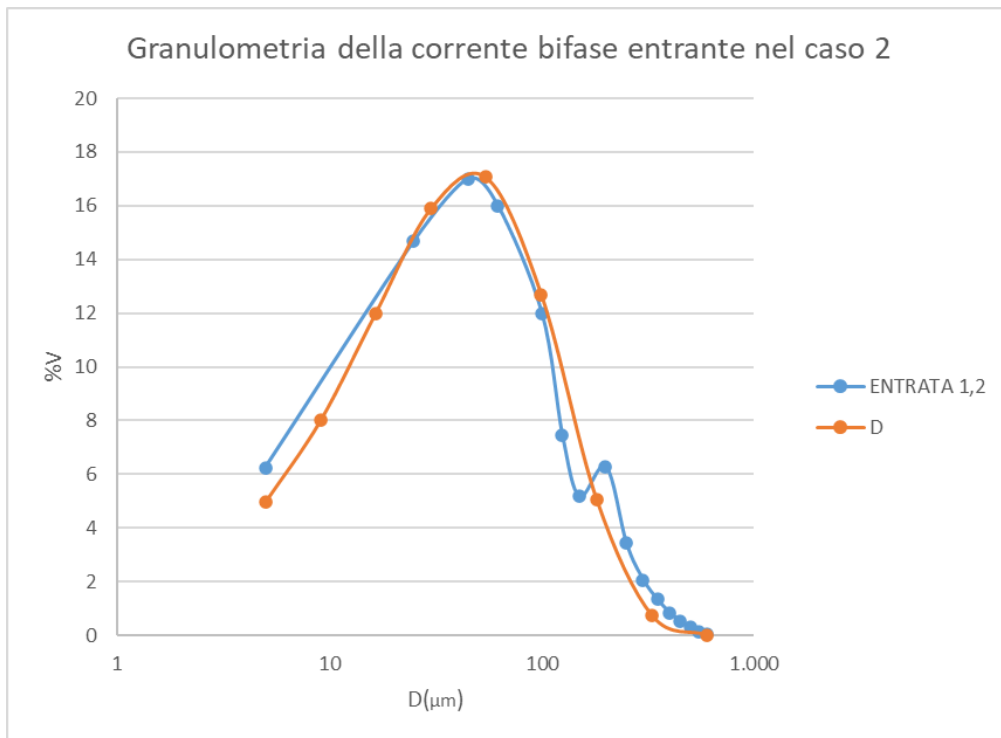
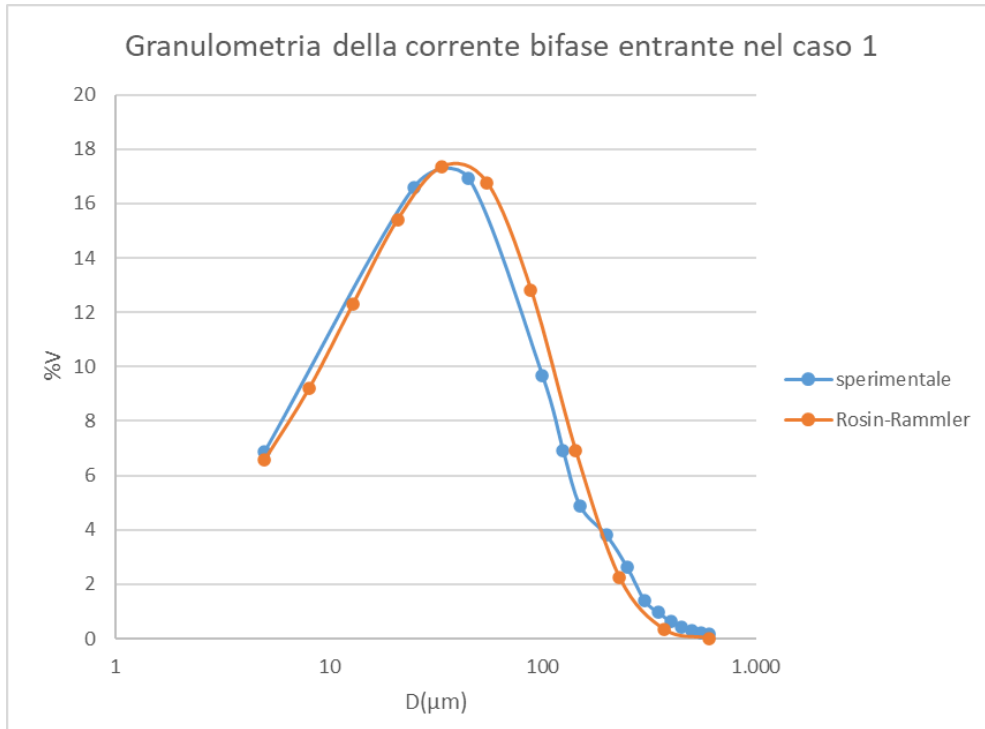
Di seguito viene fornita una tabella riassuntiva dei parametri necessari alle condizioni di contorno delle diverse casistiche affrontate per il separatore dinamico ricavati dal capitolo 4.1 Risultati sperimentali nella sezione dedicata al separatore dinamico. Per il calcolo della portata d'aria (V) e la sua velocità in entrata (v_{in}) è stata utilizzata l'Equazione 11 sapendo che la sezione d'entrata ($S_{entrata}$) misura $0,022 \text{ m}^2$ e la temperatura della corrente in ingresso (T_{in}) misura 303 K e sono costanti per tutti i casi.

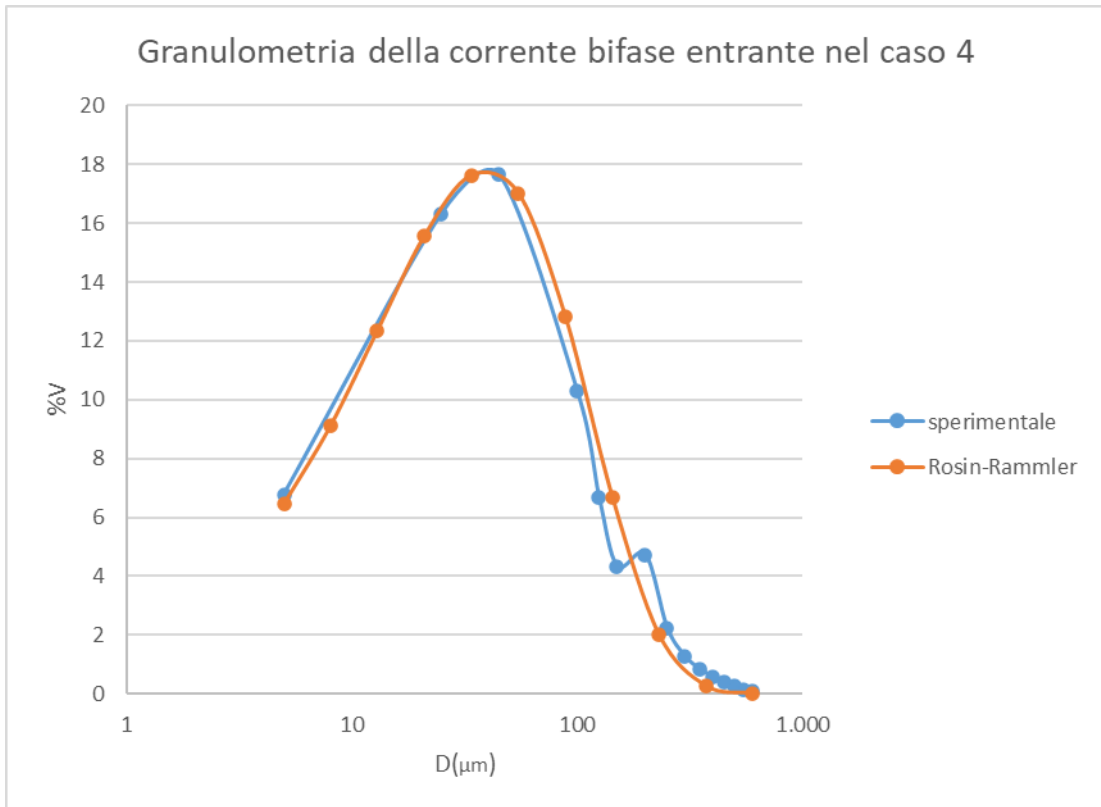
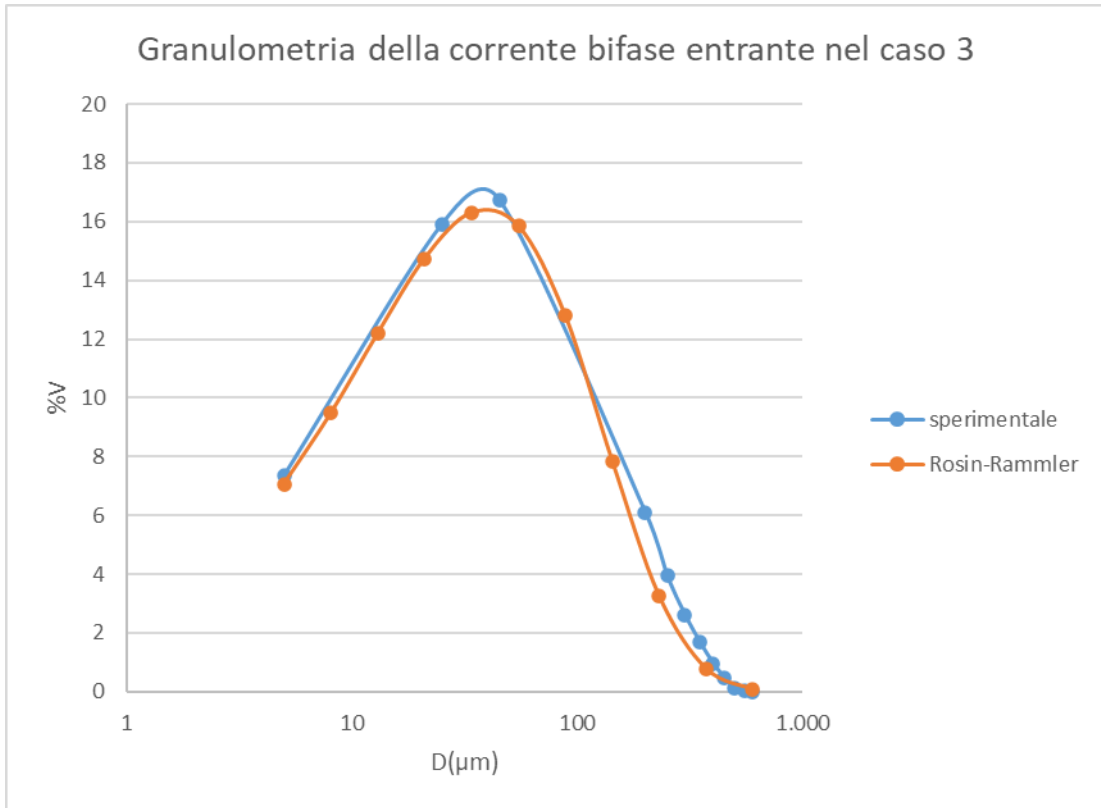
Tabella 6 risultati necessari al setup delle simulazioni dei diversi casi analizzati per il separatore dinamico

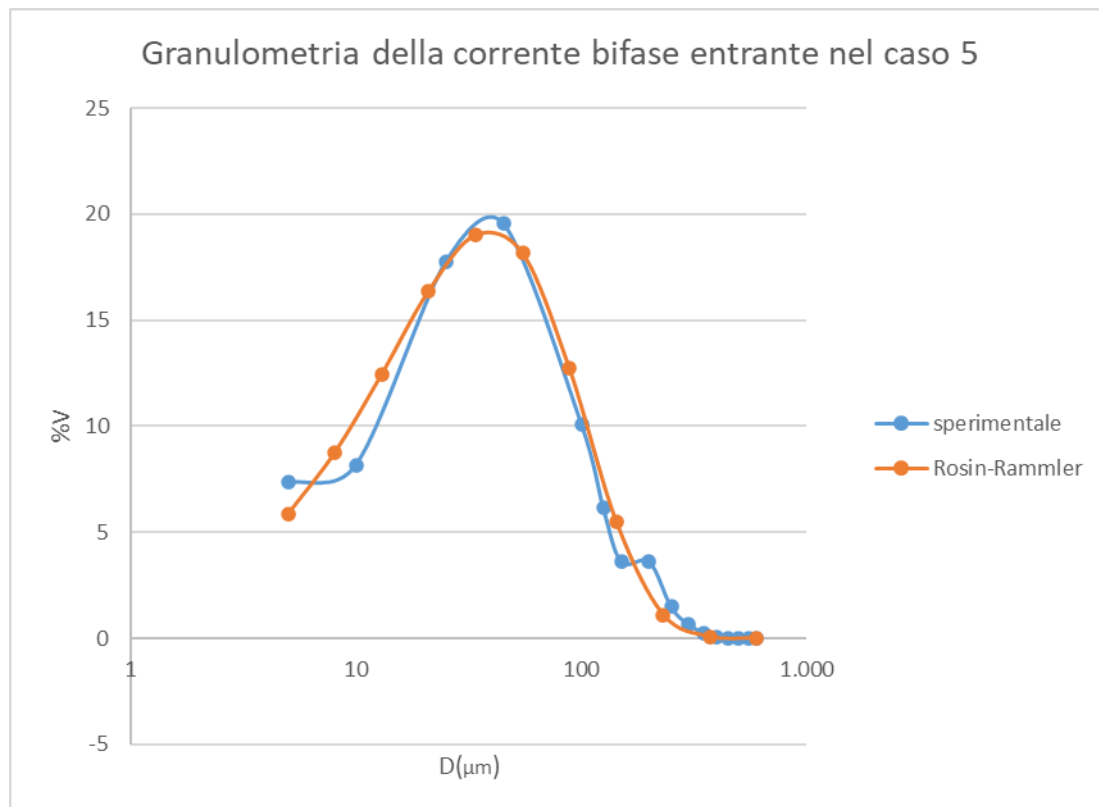
Caso	Numero diametri	D_m (μm)	n	rpm	P_{in} (Pa)	V (m^3/s)	v_{in} (m/s)	P_{out} (Pa)
1	11	40	0,88	290	99442	1,14	51	97545
2	9	45	1,00	580	99525	1,11	50	97075
3	11	40	0,80	870	99615	1,05	47	95725
4	11	40	0,90	580	99125	1,20	53	96205
5	11	40	1,00	580	99825	0,98	44	97435

I valori di velocità e portata dell'aria riportati in Tabella 6 hanno un andamento direttamente proporzionale alla depressione presente in ingresso al separatore, minore è la pressione alla sezione d'entrata e minore è la portata d'aria aspirata che l'attraversa e di conseguenza anche il valore della velocità, poiché è legato alla portata da un fattore costante dipendente dalla geometria della sezione.

Figura 57 riproduzione della granulometria della corrente entrante nel separatore dinamico secondo la distribuzione di Rosin-Rammler







Sulla base del metodo riportato nel capitolo 3.3.3 Configurazione della simulazione del separatore dinamico la

I valori di velocità e portata dell'aria riportati in Tabella 6 hanno un andamento direttamente proporzionale alla depressione presente in ingresso al separatore, minore è la pressione alla sezione d'entrata e minore è la portata d'aria aspirata che l'attraversa e di conseguenza anche il valore della velocità, poiché è legato alla portata da un fattore costante dipendente dalla geometria della sezione.

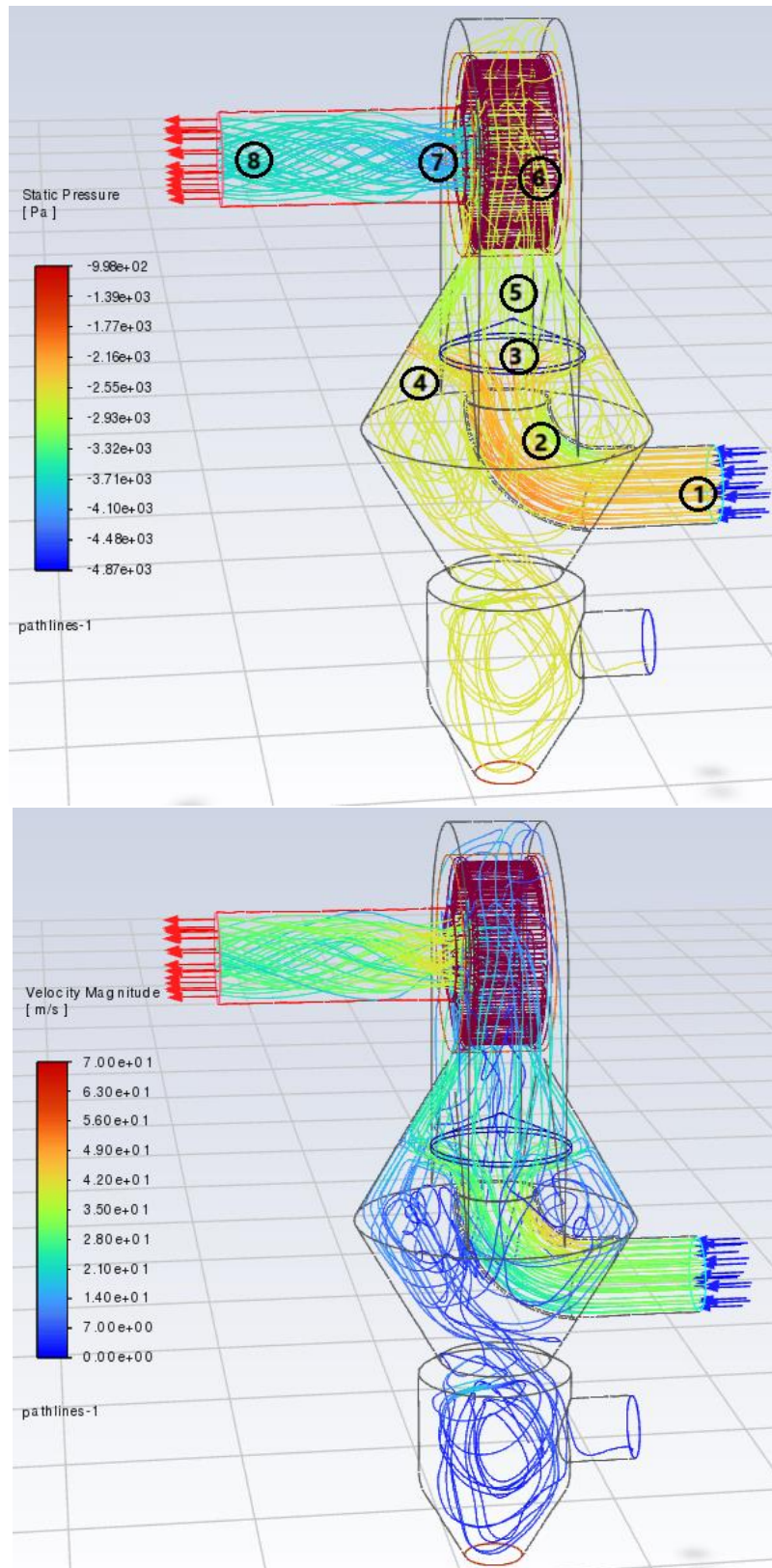
Figura 57 mostra il confronto tra i dati sperimentali e la curva granulometrica generata da Fluent sulla base della distribuzione di Rosin-Rammler e i relativi parametri indicati in Tabella 6; i valori numerici associati alle distribuzioni granulometriche ricavate vengono riportate nel Appendice.

I risultati sperimentali ottenuti nei diversi casi hanno andamenti molto simili con qualche discrepanza dovuta all'errore di calcolo dato che sono state ricavate per estrapolazione dalle misurazioni effettuate sulle rispettive correnti di ricircolo e prodotto; idealmente le curve sperimentali dei diversi casi dovrebbero essere perfettamente sovrapponibili dato che rappresentano la corrente solida proveniente dal mulino il quale è stato mantenuto in regime di lavoro costante durante tutte le prove effettuate. Queste considerazioni giustificano la leggera variazione dei parametri di Rosin-Rammler utilizzati nei diversi casi per adattare la distribuzione elaborata da Fluent alla granulometria della corrente solida entrante nel separatore. Le granulometrie ricavate dal simulatore Fluent nei grafici si presentano come campane più regolari rispetto ai dati sperimentali, grazie alla distribuzione delle diverse particelle più omogenea secondo la legge matematica di Rosin-Rammler, tuttavia, inseguito a diverse iterazioni e un consulto con il gruppo R&D di LB Technology, sono state valutate come appropriate per procedere alla simulazione.

Di seguito verrà analizzata la fluidodinamica interna al separatore dinamico prendendo come riferimento il caso 1, grazie al campionamento in zone nevralgiche dell'apparecchiatura sulla base

del metodo utilizzato per l'analisi del separatore statico e un apposito consulto con il team di progettisti di LB Technology.

Figura 58 profilo di pressione relativa e velocità della simulazione del caso 1 del separatore dinamico



La Figura 58 riporta le linee di flusso percorse dalla corrente bifase all'interno dell'apparecchiatura, rispettivamente caratterizzate da valori di pressione relativa nel riquadro superiore e da valori di velocità nel riquadro inferiore.

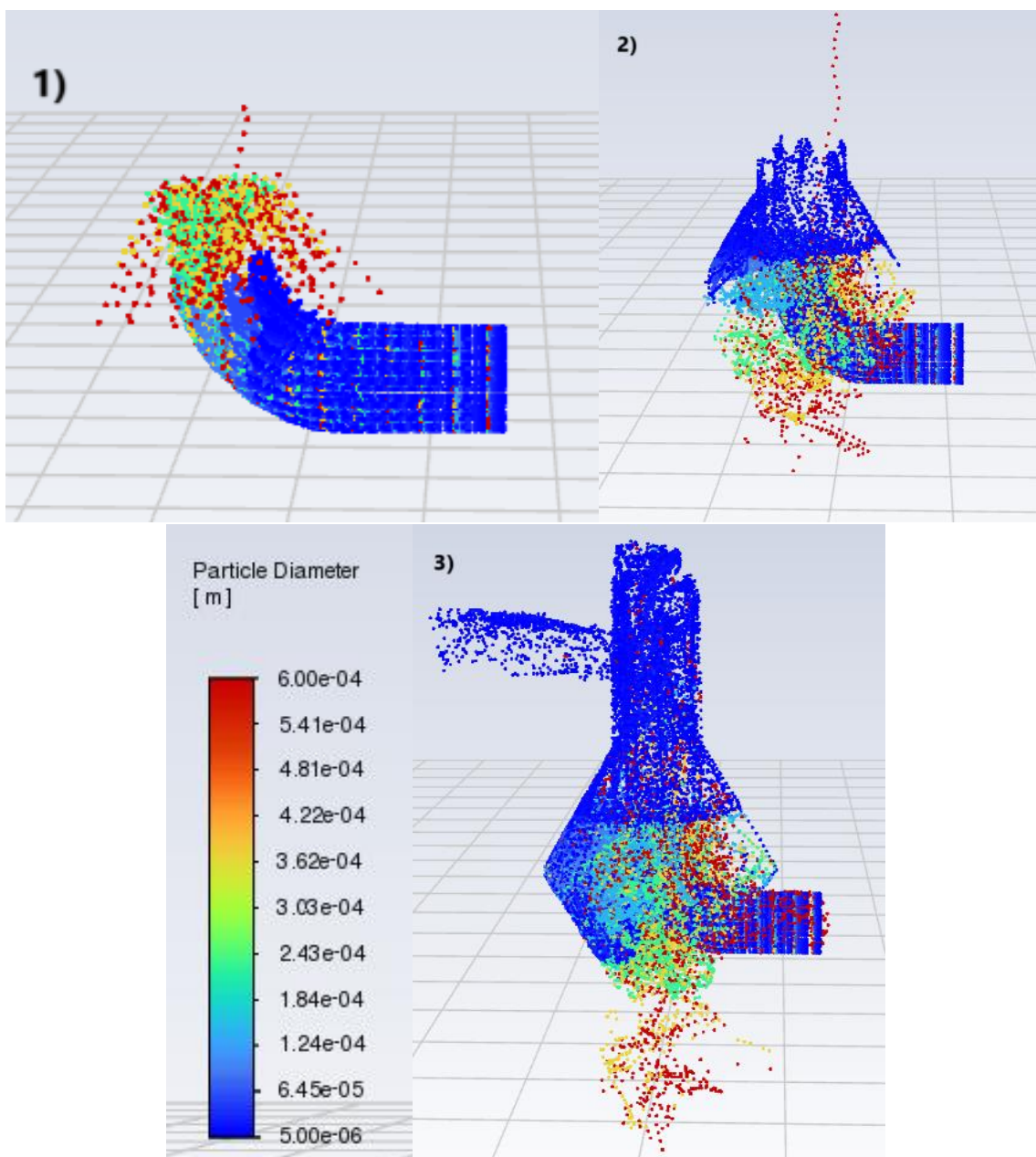
Data la complessa struttura del separatore dinamico l'utilizzo di linee di flusso per evidenziare i profili di pressione e velocità risulta più efficace della distribuzione puntuale impiegata nell'analisi dei risultati del separatore statico; esse permettono di seguire il percorso della corrente bifase all'interno dell'apparecchiatura partendo dall'input selezionato (la sezione d'ingresso della corrente bifase al separatore) fino all'output selezionato (la sezione di uscita del prodotto). Entrambi i profili riportano un andamento delle linee di flusso coerenti con il funzionamento reale riportato nel capitolo 2.4 Descrizione separatore dinamico, ed è possibile inoltre analizzare le turbolenze interne create dalla struttura del separatore:

- Il flusso entrante rallenta a causa della curvatura del condotto, dai valori collegati alle linee di flusso è possibile stabilire che il rallentamento non è eccessivo, tuttavia, la curvatura del condotto provoca una deviazione rilevante verso il sistema di protezione;
- Il cappello cinese posto alla fine del condotto di entrata della corrente bifase è il primo elemento meccanico responsabile di un'elevata turbolenza: l'impatto con quest'ultimo provoca un netto rallentamento del flusso e una diramazione verso il corpo superiore e inferiore del separatore. Di conseguenza c'è una netta suddivisione delle particelle e solo quelle di dimensioni adeguate vengono reindirizzate verso il corpo superiore del separatore dalla corrente ascendente di aria provocata dall'aspirazione a valle.
- La corrente bifase che viene aspirata verso il corpo superiore del separatore subisce un'accelerazione, dovuta al convogliamento della corrente in una sezione ristretta, seguita da un rapido calo di velocità dovuto all'impatto con la girante in movimento. Questo elemento meccanico frena il flusso bifase e consente il passaggio solo di alcune frazioni di particelle.
- Il flusso deviato verso il corpo inferiore del separatore dal cappello cinese contiene prevalentemente frazioni di particelle grossolane che per gravità proseguono verso il basso per uscire come corrente di ricircolo, alcune di queste vengono trasportate verso il corpo superiore. Questa ripartizione è dovuta a effetti di trascinamento e interazioni nella fase solida comparabili a quelle osservate nel funzionamento del separatore statico.

Per visualizzare il comportamento della fase discreta descritto in precedenza vengono riportati alcuni frame dai primi attimi della simulazione, riportati in Figura 59, durante i quali l'apparecchiatura contiene un numero più limitato di particelle ed è possibile apprezzare come viene suddivisa la DPM. Viene anche riportata la legenda che associa le particelle di diverse dimensioni a determinati colori, a partire dalle frazioni più fini distinte da tonalità di blu, fino a frazioni più grossolane caratterizzate da tonalità di rosso.

Il primo frame riporta la prima suddivisione ad opera del dispositivo di sicurezza a cappello cinese, il secondo frame dimostra la diramazione della corrente bifase verso il corpo inferiore del separatore. Nel terzo frame viene evidenziato il comportamento della DPM nel corpo superiore dell'apparecchiatura, in particolare si nota come le frazioni di particelle più fini attraversino molto facilmente la girante al contrario delle frazioni grossolane; la distribuzione accurata delle particelle nel prodotto e ricircolo verrà analizzata nelle successive granulometrie.

Figura 59 comportamento della DPM durante la simulazione del caso 1 del separatore dinamico



Grazie alle misurazioni effettuate nei diversi punti di campionamento riportati in Figura 55 è stato possibile tracciare un grafico che dimostri la variazione del profilo di velocità e pressione relativa all'interno del separatore dinamico in funzione dei due principali parametri di processo d'interesse: la velocità della girante e la frequenza di aspirazione.

Figura 60 profilo di pressione relativa e velocità ricostruiti attraverso i punti di campionamento nelle simulazioni del separatore dinamico in funzione della velocità della girante

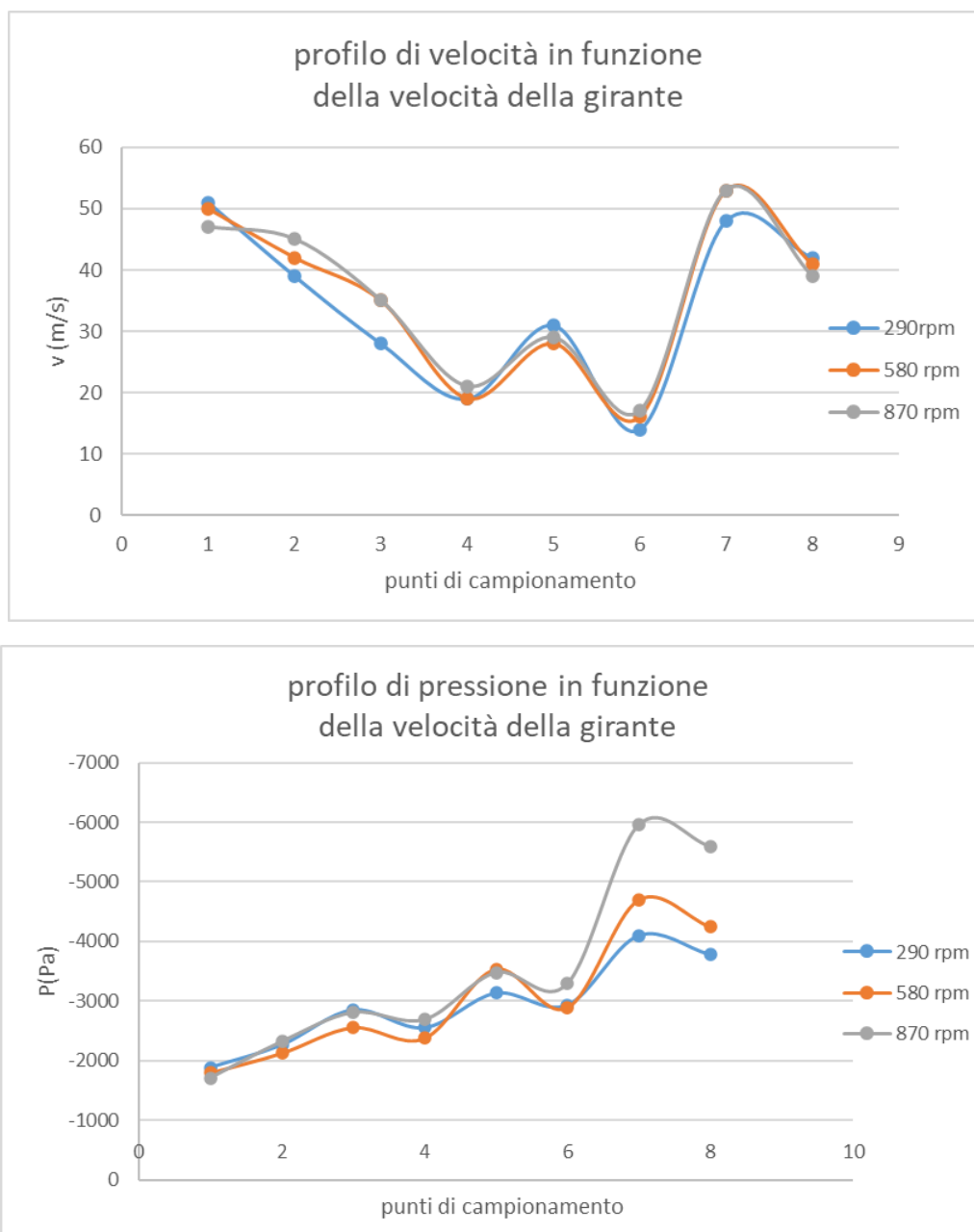


Tabella 7 tabella con i valori dei punti di campionamento dei casi 1,2,3 del separatore dinamico

punto	caso1		caso2		caso3	
	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
1	51	-1882	50	-1800	47	-1710
2	39	-2260	42	-2130	45	-2320
3	28	-2850	35	-2560	35	-2810
4	19	-2550	19	-2380	21	-2690
5	31	-3132	28	-3540	29	-3480
6	14	-2930	16	-2890	17	-3290
7	48	-4100	53	-4700	53	-5960
8	42	-3780	41	-4250	39	-5600

La variazione della velocità della girante interessa i casi 1, 2 e 3 del separatore dinamico durante i quali è stata progressivamente aumentata. Dalla Figura 60 è possibile osservare che il profilo di velocità, nonostante un discreto scostamento nei primi tre punti di campionamento, segue lo stesso andamento all'aumentare della velocità della girante, infatti per i diversi casi ci sono valori di velocità comparabili negli stessi punti di campionamento. Come diretta conseguenza anche i profili di pressione relativa sono molto simili al variare della velocità della girante, ad eccezione dei valori misurati nel tratto finale: ovvero i punti di campionamento che si trovano in prossimità della girante e della sezione di uscita del prodotto. All'aumentare della velocità della girante aumenta il salto di pressione tra la sezione precedente e quella successiva all'elemento meccanico in movimento.

Figura 61 profilo di pressione relativa e velocità ricostruiti attraverso i punti di campionamento nelle simulazioni del separatore dinamico in funzione della frequenza di aspirazione

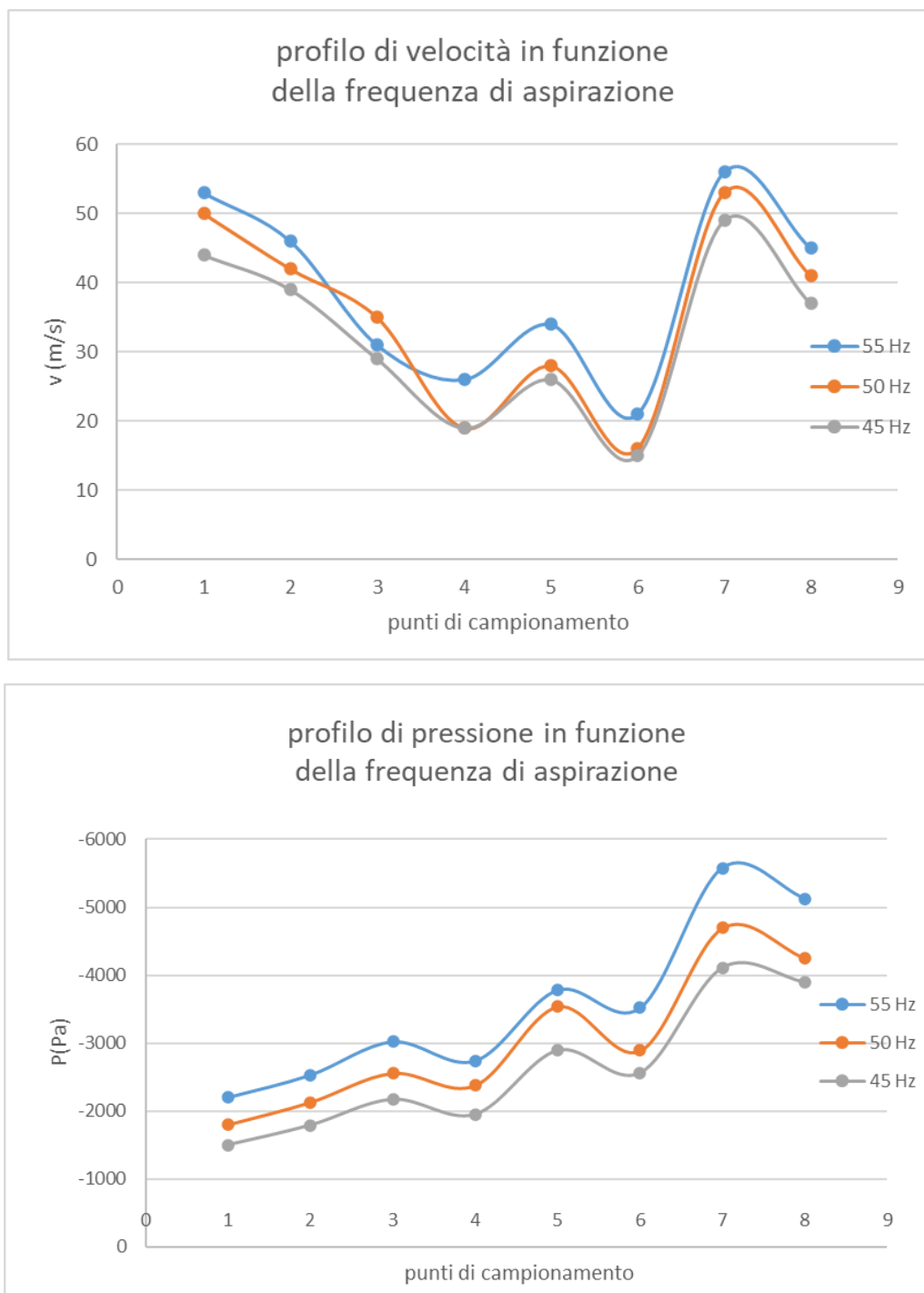


Tabella 8 tabella con i valori dei punti di campionamento dei casi 2,4,5 del separatore dinamico

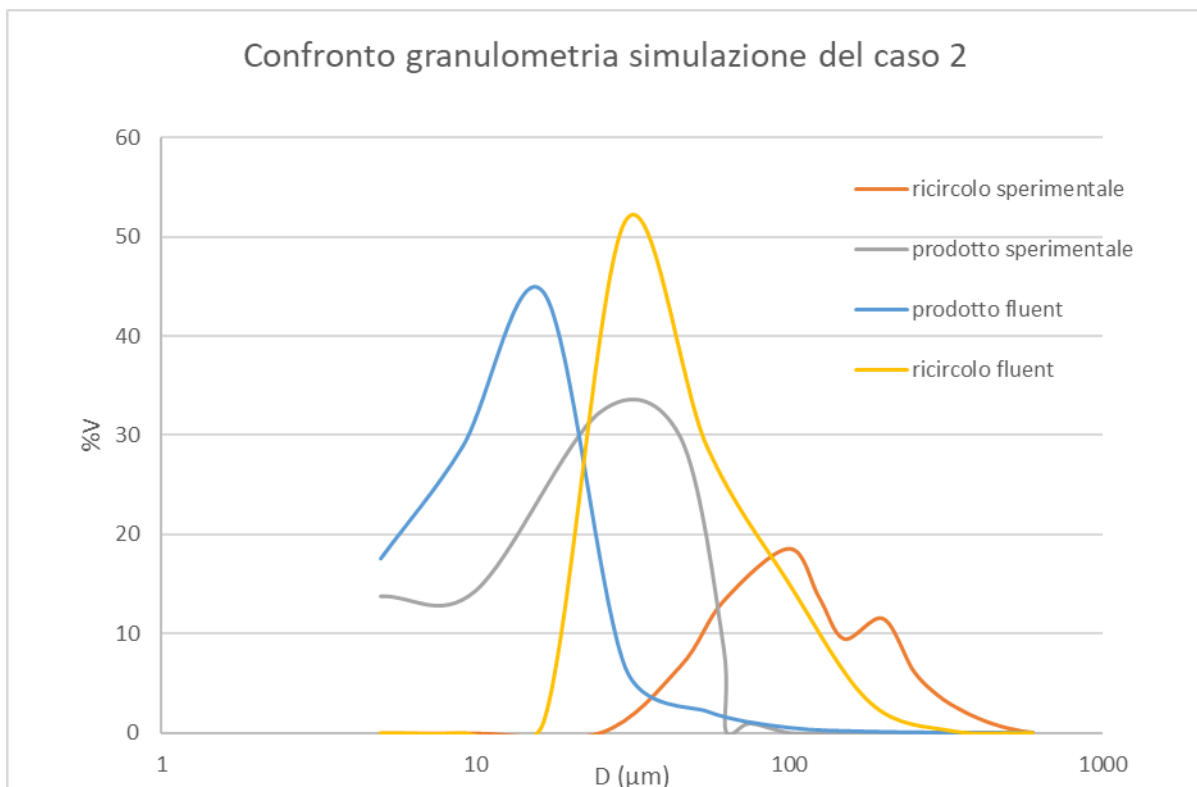
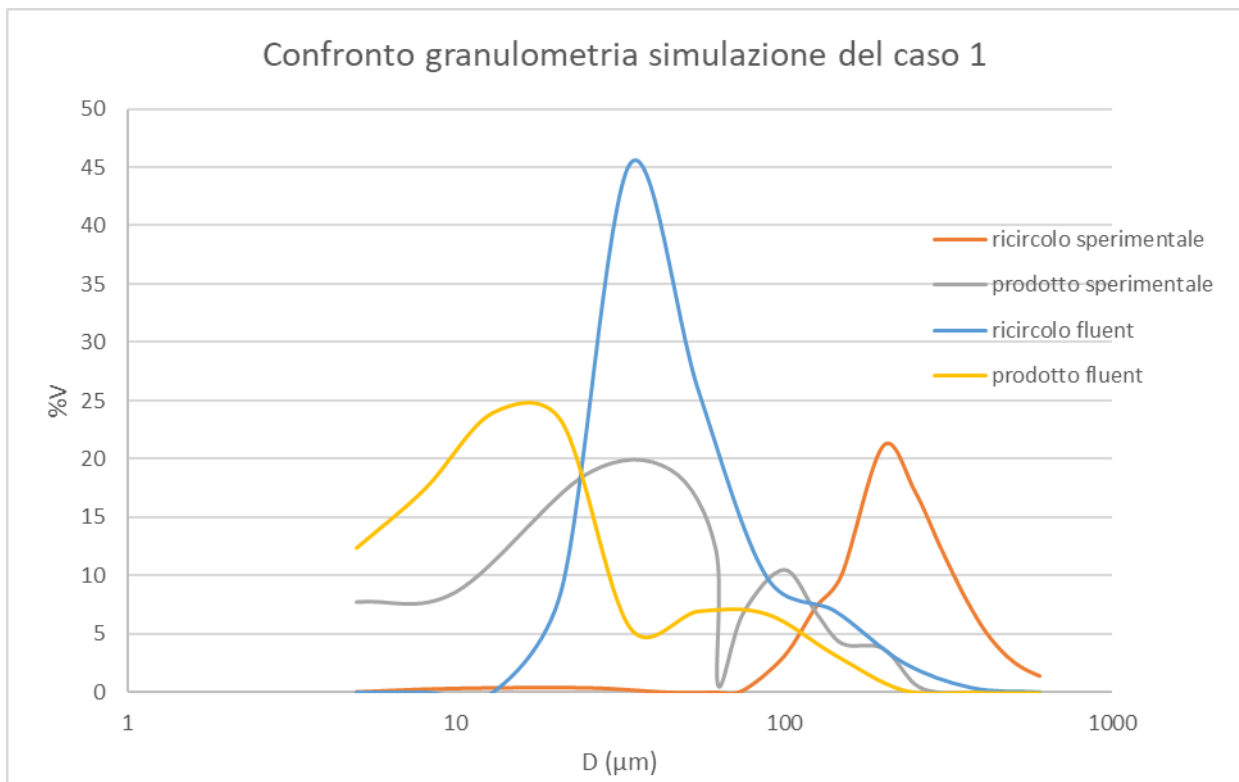
punto	caso4		caso5		caso2	
	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
1	53	-2200	44	-1500	50	-1800
2	46	-2530	39	-1790	42	-2130
3	31	-3020	29	-2170	35	-2560
4	26	-2740	19	-1950	19	-2380
5	34	-3780	26	-2890	28	-3540
6	21	-3520	15	-2560	16	-2890
7	56	-5580	49	-4110	53	-4700
8	45	-5120	37	-3890	41	-4250

La frequenza con cui ruota il ventilatore in aspirazione a valle del separatore varia nei casi 4, 5 e 2 del separatore dinamico rispettivamente da 45 a 55 a 50 Hz. I profili di velocità riportati in Figura 61 hanno un andamento simile, all'aumentare della frequenza di aspirazione si registrano valori di velocità più elevati; sulla base del funzionamento del separatore dinamico è coerente che una maggiore frequenza in aspirazione si traduca in una maggiore portata d'aria presente all'interno del separatore e di conseguenza, a parità di condizione geometriche dell'apparecchiatura, una maggiore velocità di attraversamento di quest'ultima.

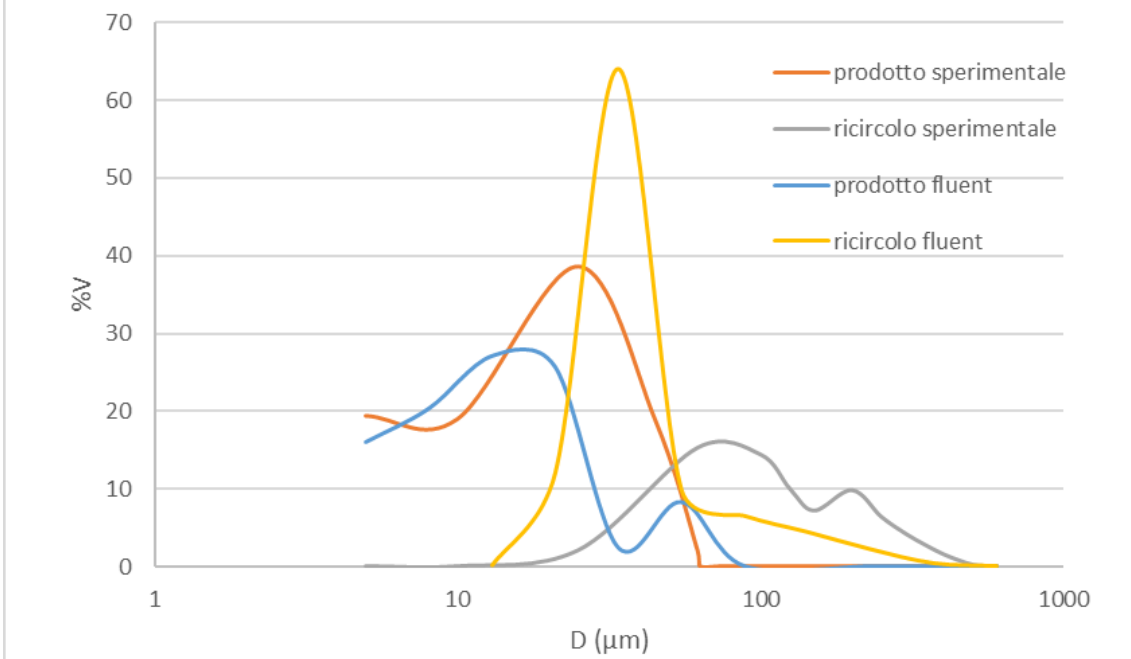
I profili di pressione vengono maggiormente influenzati dalla variazione della frequenza di aspirazione, all'aumentare della frequenza del ventilatore il profilo di pressione trasla verso l'alto poiché a valle viene generata una maggiore depressione infatti all'interno dell'apparecchiatura la pressione risulta inferiore rispetto agli altri casi.

Di seguito vengono riportati i confronti tra le granulometrie virtuali, ottenute attraverso il campionamento di Ansys Fluent durante la simulazione del separatore dinamico, e quelle ricavate sperimentalmente attraverso le prove pilota sull'impianto Microton.

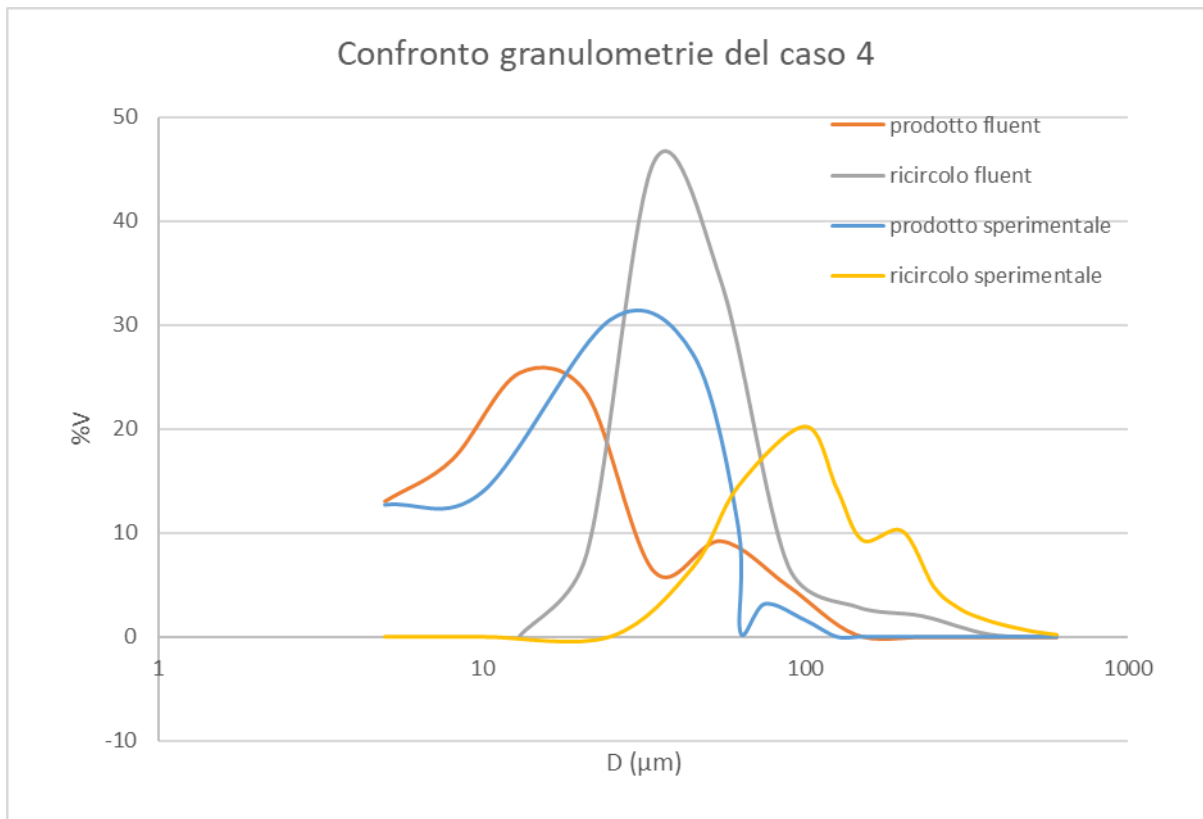
Figura 62 confronto delle diverse granulometrie virtuali ottenute dalle simulazioni del separatore dinamico con le granulometrie sperimentali

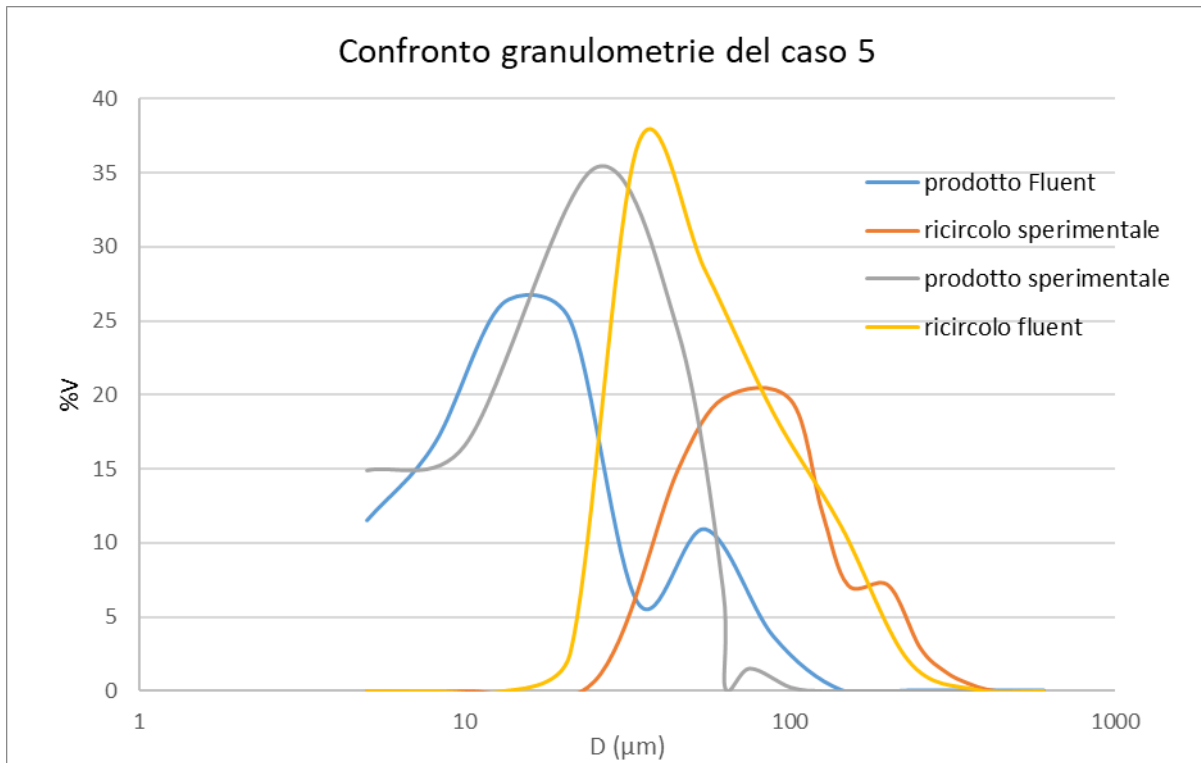


Confronto granulometria simulazione del caso 3



Confronto granulometrie del caso 4





I grafici riportati in Figura 62 evidenziano un notevole scostamento delle curve granulometriche ottenute dal simulatore Ansys Fluent rispetto a quelle tracciate sulla base dei dati sperimentali raccolti dalle correnti di prodotto e ricircolo prelevate durante le misurazioni sull'impianto pilota Microton. La distribuzione granulometrica ottenuta attraverso le simulazioni del prodotto risulta generalmente spostata verso diametri più piccoli nei diversi casi, ciò indica un'elevata presenza di frazioni fini ma anche un'elevata discrepanza nel contenuto di molecole di dimensioni intermedie rispetto al reale funzionamento. Per la valutazione quantitativa delle distribuzioni granulometriche ottenute attraverso le simulazioni vengono utilizzati i criteri D10, D50 e D97 e confrontati con i relativi parametri delle diverse correnti di prodotto prelevate e analizzate durante le prove sperimentali.

Tabella 9 confronto tra i parametri D10, D50, D97 ricavati sperimentalmente e dalle simulazioni per i diversi casi del simulatore dinamico

caso	prodotto sperimentale			prodotto Fluent		
	D10	D50	D97	D10	D50	D97
1	6,1	40,2	164,0	5,0	13,0	88,4
2	4,0	20,1	56,1	5,0	9,1	30,1
3	3,2	13,0	50,5	5,0	13,0	54,8
4	4,2	21,2	68,4	5,0	13,0	88,4
5	3,8	17,1	57,7	5,0	13,0	54,8
caso	Ricircolo sperimentale			Ricircolo Fluent		
	D10	D50	D97	D10	D50	D97
1	121,0	220,0	647,0	21,0	34,0	143,0
2	49,6	101,0	362,0	16,5	30,1	99,6
3	36,6	86,3	340,0	21,0	33,9	143,0
4	49,2	94,9	361,0	21,0	33,9	143,0
5	39,7	76,0	287,0	27,5	44,4	143,0

Figura 63 rappresentazione grafica del confronto tra i parametri D10, D50, D97 ricavati sperimentalmente e dalle simulazioni per i diversi casi del simulatore dinamico

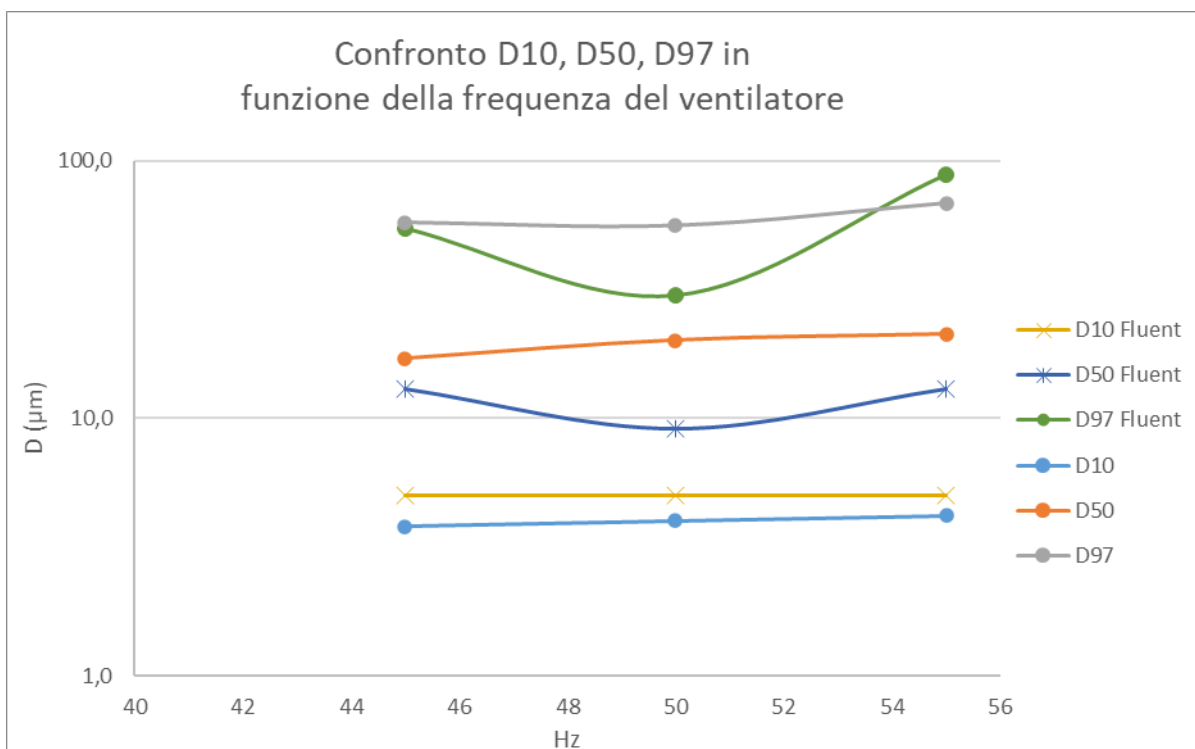
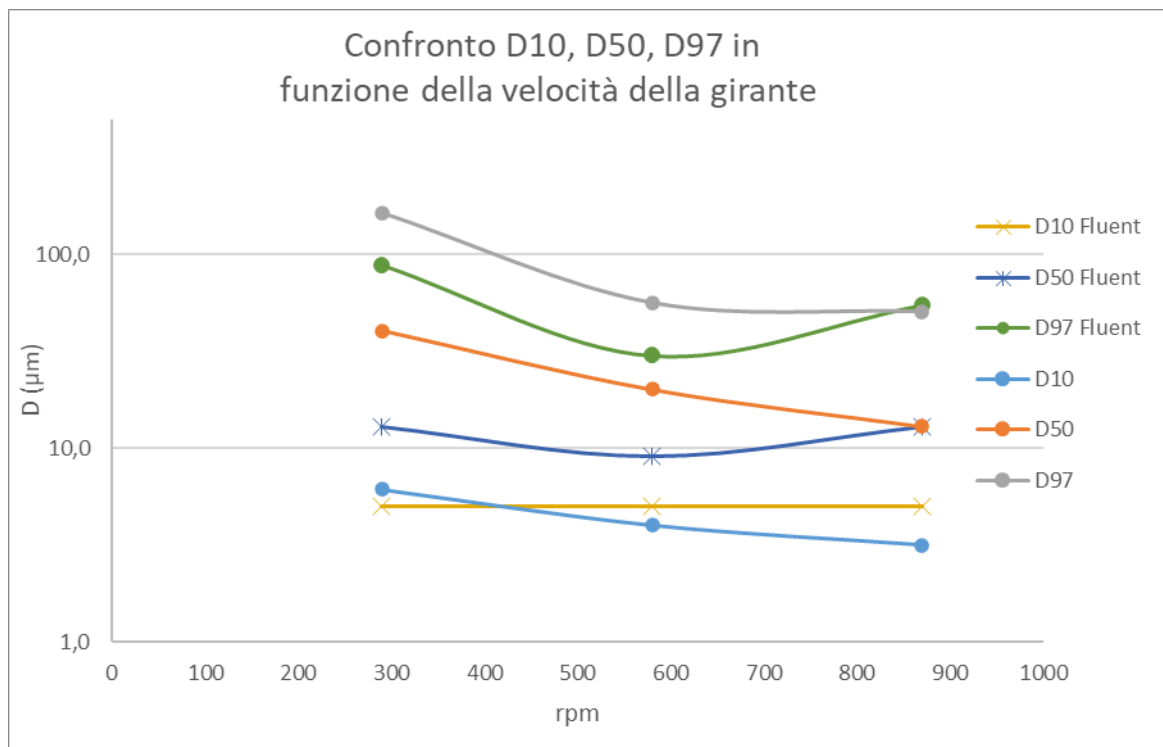


Figura 63 dimostra che i parametri D10, D50 e D97 ricavati dalle simulazioni hanno valori inferiori ai parametri ricavati sperimentalmente sia analizzandone la variazione in funzione della velocità della girante sia rispetto alla frequenza di aspirazione.

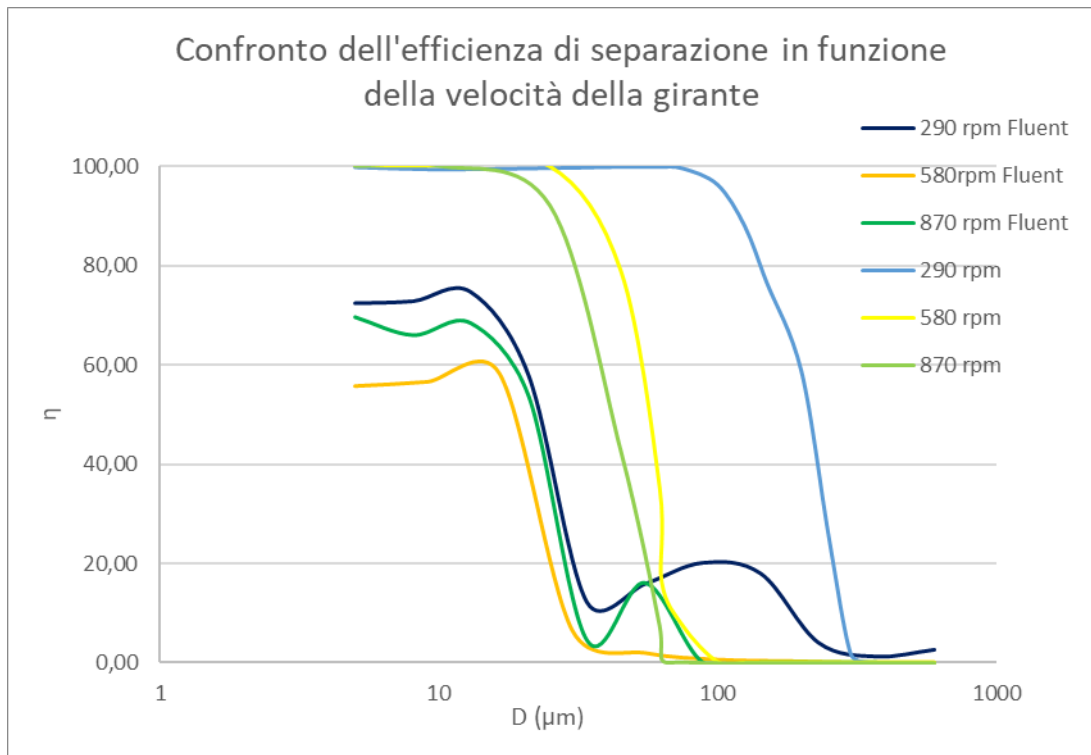
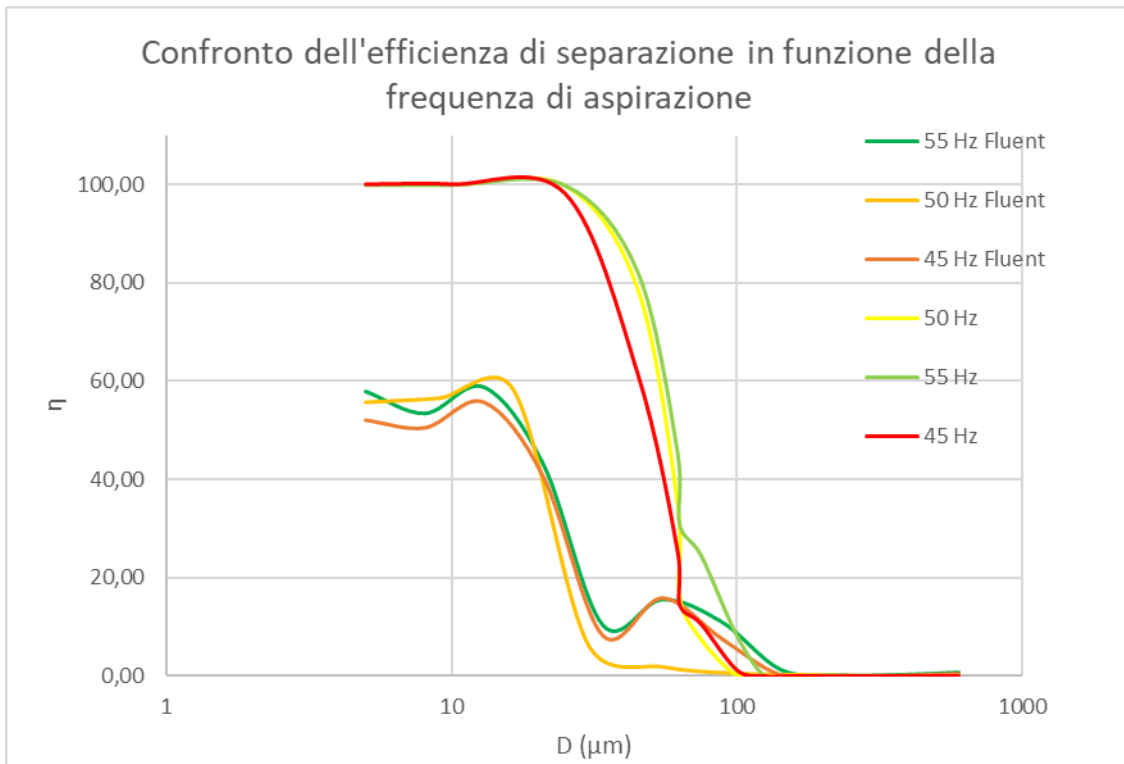
Sulla base dei valori riportati in Tabella 9 è possibile notare che le correnti di prodotto ottenute dalle simulazioni CFD per il separatore dinamico contengono una maggiore frazione di particelle fini rispetto al prodotto analizzato sperimentalmente; tuttavia le curve granulometriche mostrano una notevole area di sovrapposizione tra le correnti di prodotto e il ricircolo virtuali perciò è necessario verificare l'efficienza di separazione virtuale (verrà denominata efficienza simulazioni per distinguerla dall'efficienza sperimentale). Per poter analizzare l'effettiva separazione delle diverse frazioni di particelle è stata calcolata l'efficienza di separazione per i diversi casi simulati e poi confrontata con gli andamenti dell'efficienza di separazione determinata dalle prove sperimentali. Al fine del confronto con i risultati sperimentali vengono riportati i valori corrispondenti ai parametri per la valutazione della qualità del prodotto, i valori di efficienza calcolati per ciascuna frazione di particelle sono disponibili tra i risultati delle simulazioni del separatore dinamico riportati nell'Appendice.

Tabella 10 valori numerici dell'efficienza di separazione corrispondente ai parametri D10, D50, D97 per i diversi casi analizzati del separatore dinamico

caso	$\eta(D10)$ sperimentale	$\eta(D10)$ simulazioni	$\eta(D50)$ sperimentale	$\eta(D50)$ simulazioni	$\eta(D97)$ sperimentale	$\eta(D97)$ simulazioni
1	99,9%	72,5%	99,9%	74,8%	76%	20,2%
2	99,9%	55,8%	99,9%	56,6%	50%	6,50%
3	99,9%	69,6%	99,9%	68,4%	42%	16,1%

caso	$\eta(D10)$ sperimentale	$\eta(D10)$ simulazioni	$\eta(D50)$ sperimentale	$\eta(D50)$ simulazioni	$\eta(D97)$ sperimentale	$\eta(D97)$ simulazioni
2	99,9%	55,8%	99,9%	56,6%	50%	6,50%
4	99,9%	57,9%	99,9%	58,7%	28%	11,0%
5	99,9%	52,1%	99,9%	55,7%	38%	15,9%

Figura 64 rappresentazione grafica del confronto dell'efficienza di separazione ricavata sperimentalmente e dalle simulazioni per i diversi casi del separatore dinamico



I grafici riportati in Figura 64 mostrano che l'efficienza di separazione ottenuta dalle simulazioni risulta inferiore all'efficienza misurata sperimentalmente per tutti i diversi casi analizzati del separatore dinamico. Analizzando l'andamento dell'efficienza simulata in funzione della frequenza di aspirazione, in particolare le curve a 45 e 55 HZ, si nota un picco in corrispondenza di frazioni di particelle più grossolane: ciò è dovuto alla presenza di una considerevole frazione di particelle grossolane all'interno della corrente di prodotto.

Il confronto tra l'efficienza misurata dalle prove sperimentali e i valori virtuali evidenzia un andamento più irregolare nei casi analizzati attraverso Fluent; il massimo dell'efficienza di separazione virtuale non è in linea con il funzionamento reale dell'apparecchiatura poiché risulta più elevato nella curva corrispondente a una frequenza di 55Hz piuttosto che a quella corrispondente a 45 Hz.

Tra le curve che rappresentano l'efficienza di separazione simulata in funzione della velocità della girante si può notare un picco in corrispondenza delle frazioni più grossolane, come riscontrato nel grafico precedente. Le curve non sono traslate al diminuire della velocità ma si differenziano solamente per il valore massimo di efficienza che coincide a dimensioni simili di particelle; questo comportamento non è coerente con il funzionamento reale poiché un numero maggiore di rivoluzioni al minuto comporta una dimensione inferiore corrispondente alla massima efficienza di separazione.

5. Conclusioni

Dal confronto tra la letteratura aziendale e i dati disponibili sul separatore statico e risultati ottenuti attraverso la simulazione dell'apparecchiatura con il software Ansys Fluent si è potuto evincere che il modello sviluppato per l'analisi CFD è in grado di riprodurre fedelmente il funzionamento dell'apparecchiatura e il comportamento della corrente bifase al suo interno. La fluidodinamica del sistema è coerente con gli studi effettuati dai progettisti di LB Technology sul separatore dinamico, la simulazione ha evidenziato la possibilità di riprodurre il funzionamento realistico del separatore statico attraverso l'utilizzo del modello. Il modello di simulazione impiegato è risultato efficiente sulla base dei risultati della modellazione CFD del separatore statico pertanto è stato applicato allo studio del separatore dinamico, la stessa apparecchiatura impiegata nell'impianto Microton. La modellazione e il setup di simulazione necessario allo studio del separatore dinamico sono stati realizzati seguendo le modalità applicate al simulatore statico, tuttavia i risultati ottenuti da Fluent non riproducono accuratamente i dati raccolti durante le prove sperimentali svolte sull'impianto pilota Microton. Anche se la fluidodinamica del sistema simulato è in linea con il funzionamento reale del separatore dinamico, si osserva che nel campionamento delle correnti solide ottenuto dal modello sono state ricavate curve granulometriche differenti da quelle misurate sperimentalmente nel laboratorio LB Technology.

A cause delle discrepanze tra l'efficienza del modello e quella ottenuta dell'apparecchiatura reale, la composizione e la diversa qualità del prodotto elaborate da Fluent la simulazione non risulta adeguata a riprodurre il funzionamento realistico del separatore dinamico. Il modello CFD sviluppato, quando applicato alle condizioni puntuali analizzate in un questo elaborato e di interesse per l'azienda LB, non può essere utilizzato per determinare i parametri di processo in funzione della granulometria del prodotto poiché le analisi condotte su Fluent non hanno restituito distribuzioni granulometriche compatibili in modo preciso con quelle ottenute dalle prove sperimentali. La discrepanza tra le caratteristiche della corrente di prodotto virtuale e quella reale non consente pertanto di modificare i parametri di processo dell'impianto esclusivamente sulla base dei risultati delle simulazioni e non è possibile estraniare il metodo Trial and Error dalla progettazione dei separatori e delle relative condizioni operative. Nonostante la ricerca svolta in collaborazione con LB Technology non abbia prodotto risultati sufficienti a soddisfare l'obiettivo prefissato le simulazioni tramite Fluent e l'analisi CFD collegata hanno fornito un quadro dettagliato sulla fluidodinamica delle apparecchiature, coerente ed in linea con i dati raccolti nella letteratura aziendale.

Soprattutto dal punto di vista qualitativo i risultati delle simulazioni CFD hanno fornito indicazioni interessanti sul funzionamento delle apparecchiature analizzate grazie alla rappresentazione grafica delle linee di flusso è stato possibile analizzare le zone con la presenza di turbolenze o criticità lungo il percorso della corrente bifase. Queste osservazioni sono state supportate dai valori quantitativi riportati nei diversi volumi di controllo, i quali hanno fornito una dettagliata distribuzione dei profili di velocità e pressione all'interno dei separatori. È importante distinguere i risultati ottenuti per il fluido, ovvero il flusso d'aria, da quelli riguardanti la fase discreta poiché rappresentano una fedele riproduzione del comportamento reale arricchendolo di dettagli nei diversi volumi di controllo.

I risultati si basano sui dati raccolti da simulazioni che modellano il comportamento dell'apparecchiatura per un tempo reale molto breve, nell'ordine di alcuni secondi, non sufficienti per l'analisi virtuale del funzionamento in regime stazionario dell'apparecchiatura pertanto sono caratteristici del funzionamento in regime transitorio. Il confronto dei risultati raccolti in due regimi di funzionamento differenti comporta necessariamente un errore e contribuisce alla discrepanza tra i dati sperimentali e quelli virtuali.

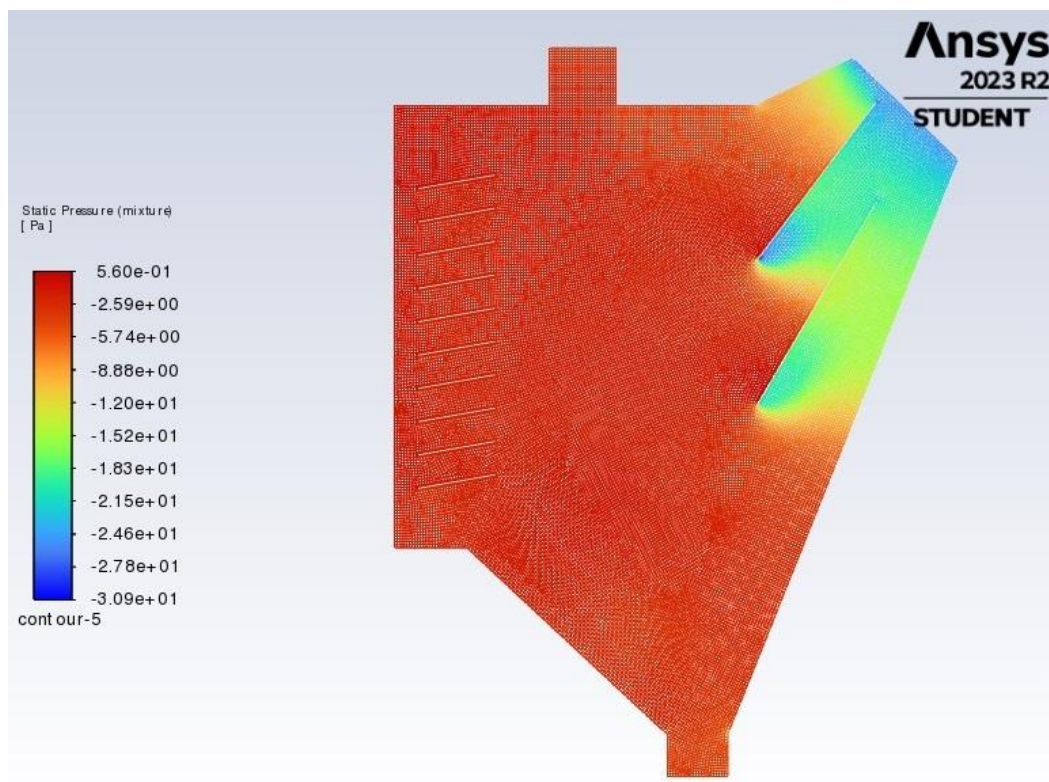
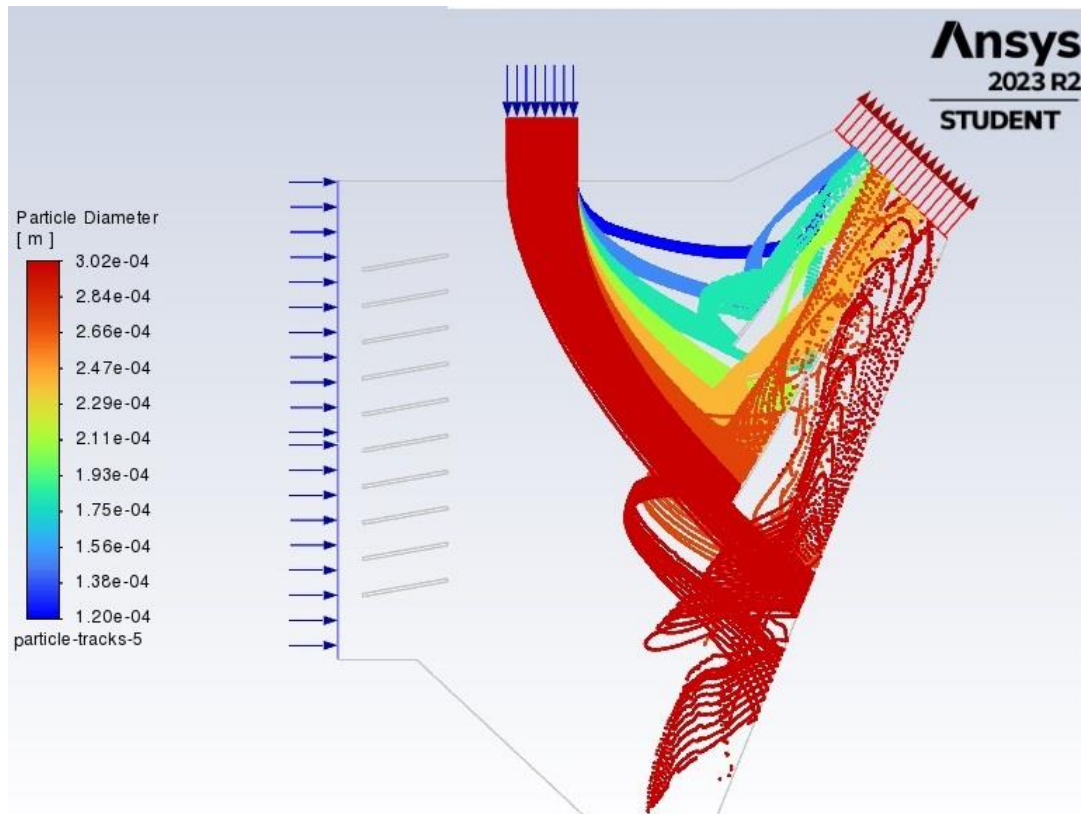
Le decisioni e le ipotesi alla base di questa ricerca sono frutto del compromesso tra il tempo computazionale necessario all'elaborazione della simulazione, i tempi e i calcolatori disponibili allo svolgimento delle analisi; inseguito alle considerazioni effettuate insieme al gruppo di LB Technology sono state proposte future implicazioni. Per approfondire lo studio sull'analisi computazionale della fluidodinamica dei separatori per impianti di micronizzazione sono state proposte diverse soluzioni, il primo approccio consiste nel rivedere e approfondire l'insieme delle impostazioni inserite nel setup del simulatore: le leggi, relazioni ed equazioni di stato impiegate per descrivere in modo accurato il comportamento della corrente bifase.

Il secondo approccio consiste nell'ottimizzazione del tempo computazionale necessario al calcolatore per ultimare la simulazione: la scelta del setup e la matrice utilizzata sono i principali fattori che determinano la durata del tempo computazionale, inoltre permettono di stabilire la durata effettiva del funzionamento dell'apparecchiatura e di conseguenza il regime di moto analizzato. Una volta ottimizzate le tempistiche della simulazione il terzo approccio consiste nell'impiegare più calcolatori per svolgere diverse simulazioni in parallelo, ciascuna macchina dovrà avere caratteristiche adeguate a sopportare e ultimare in tempi lavorativi consoni delle simulazioni rappresentative del regime di funzionamento stazionario dei separatori. Il quarto approccio prevede l'ottimizzazione del design delle apparecchiature dinamiche, così come avvenuto per il separatore statico, una volta ottenuto un modello virtuale efficiente che restituisca risultati coerenti con i dati sperimentali è possibile iterare sulla struttura del separatore dinamico per ottimizzarne il funzionamento ed eliminare criticità legate alla struttura.

6. Appendice

6.1 Lista dei risultati inerenti al separatore statico

Figura 65 risultati simulazione del caso 1 separatore statico



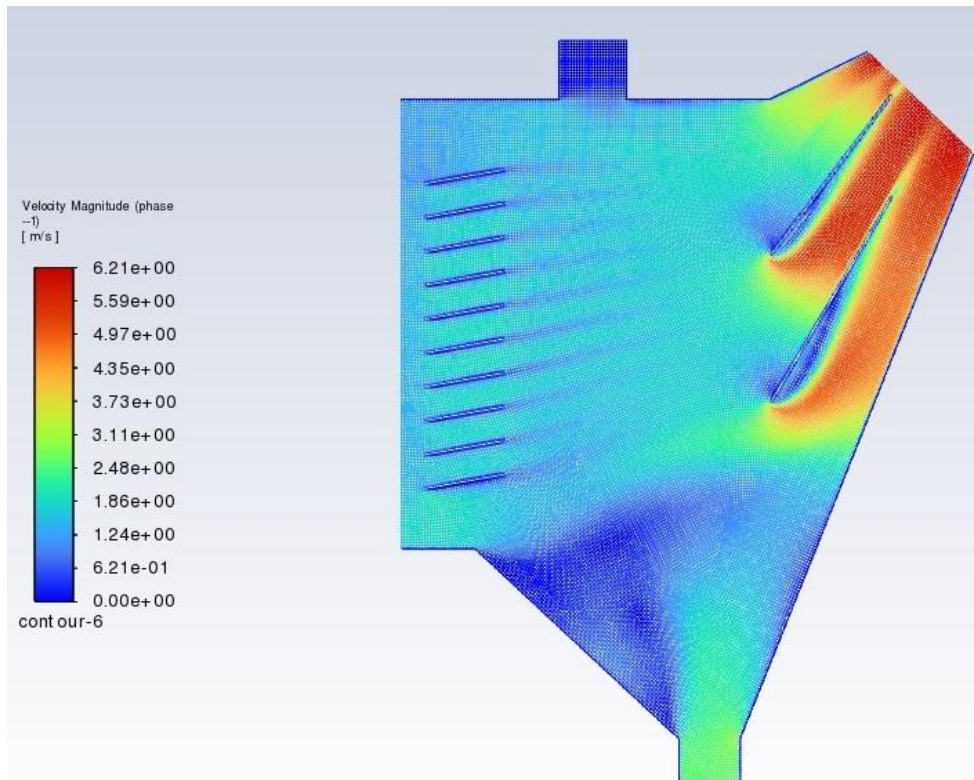
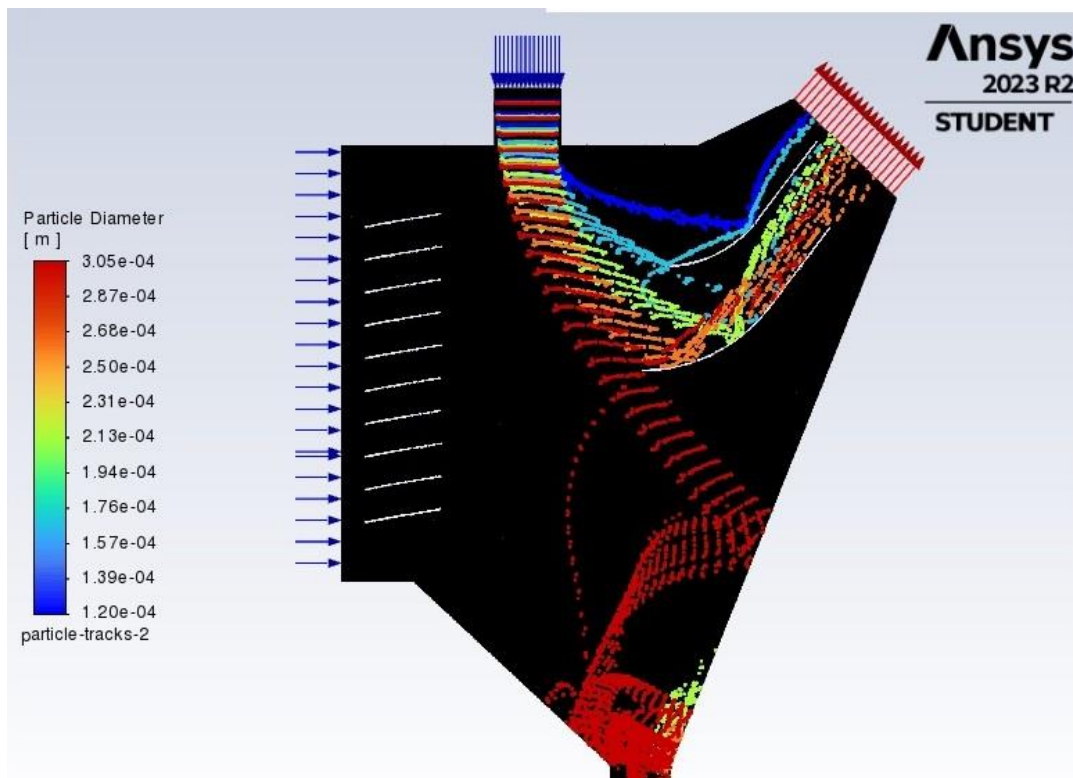


Figura 66 risultati simulazione del caso 2 separatore statico



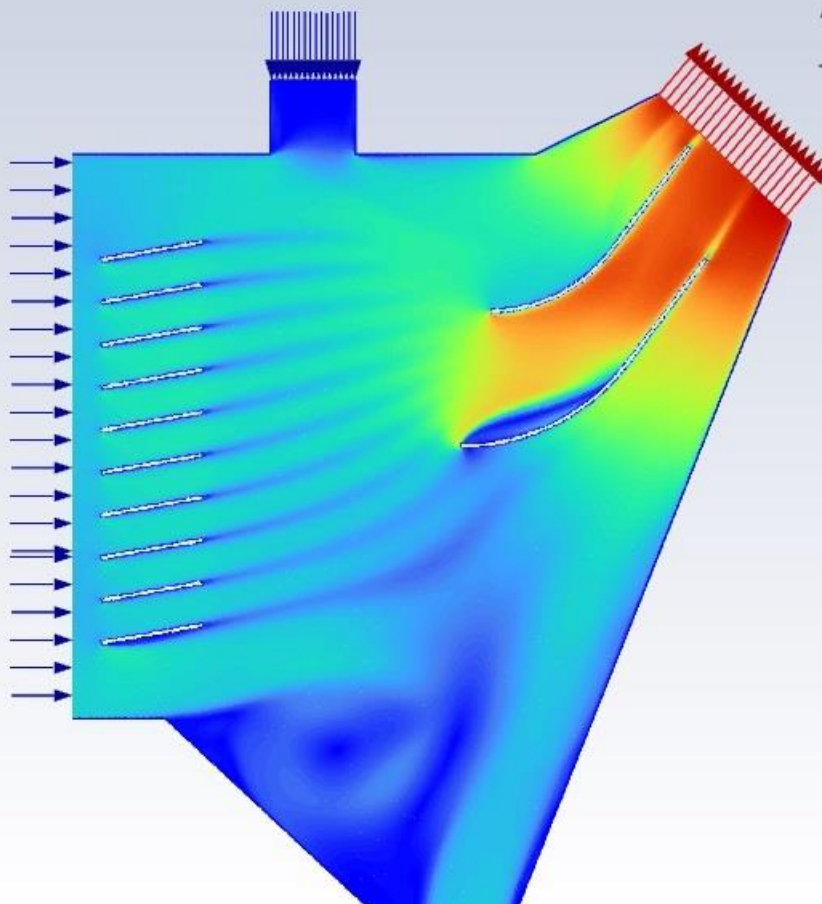
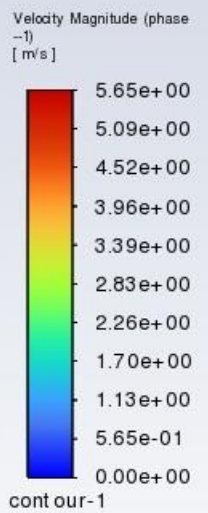
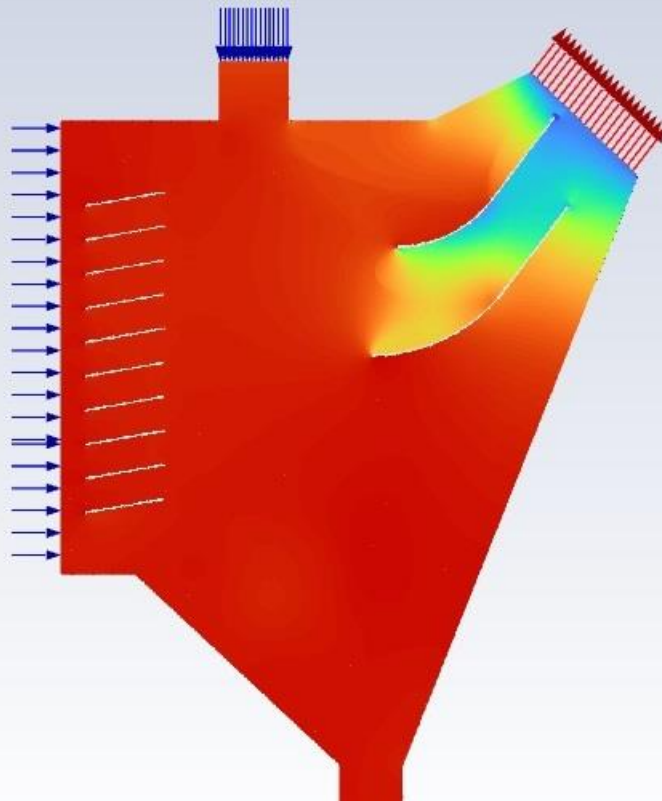
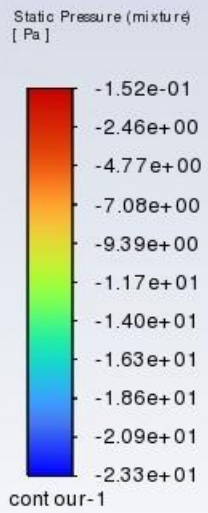
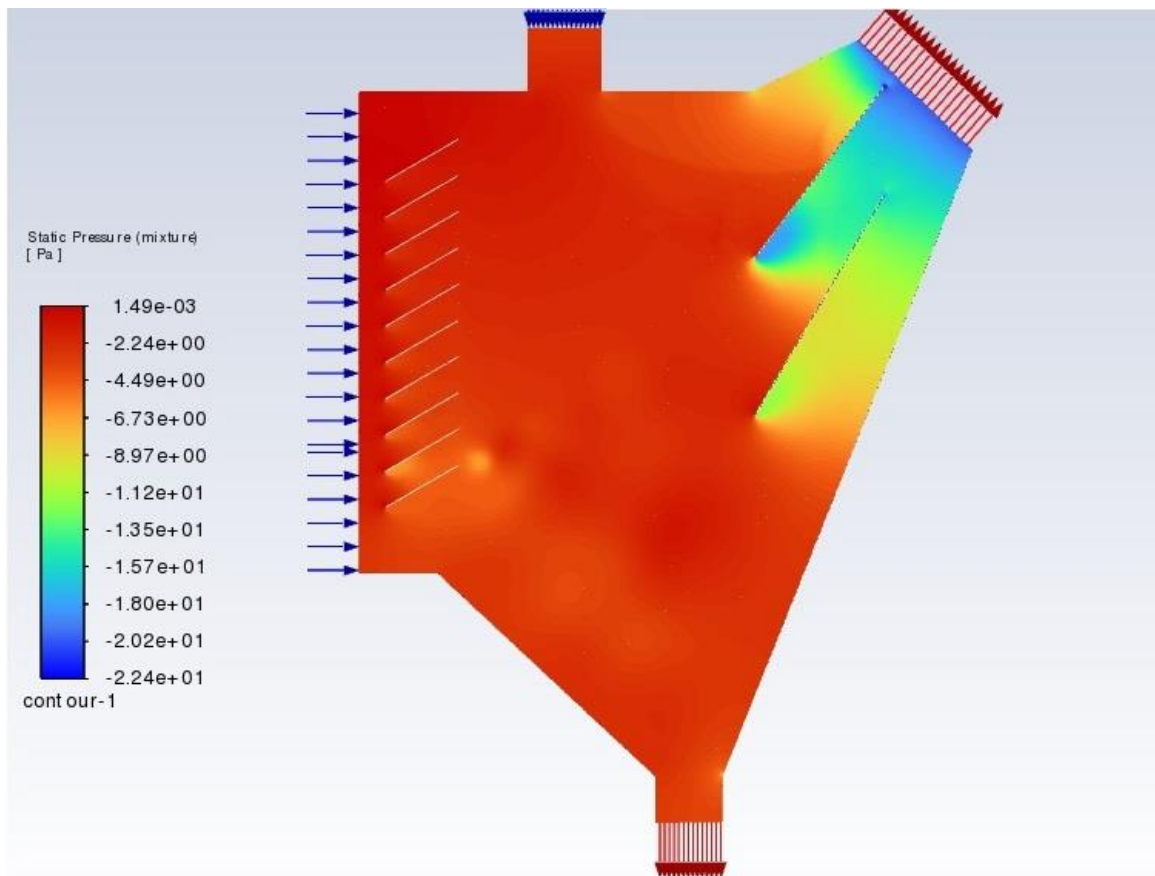
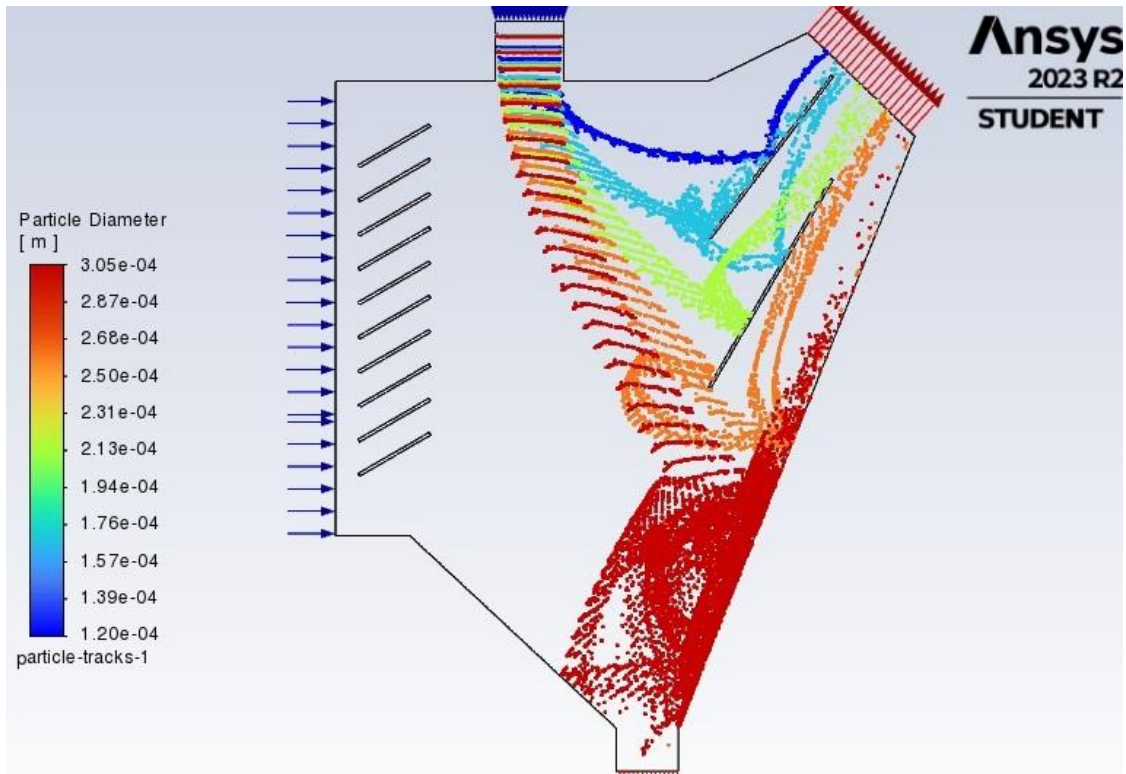


Figura 67 risultati simulazione del caso 3 separatore statico



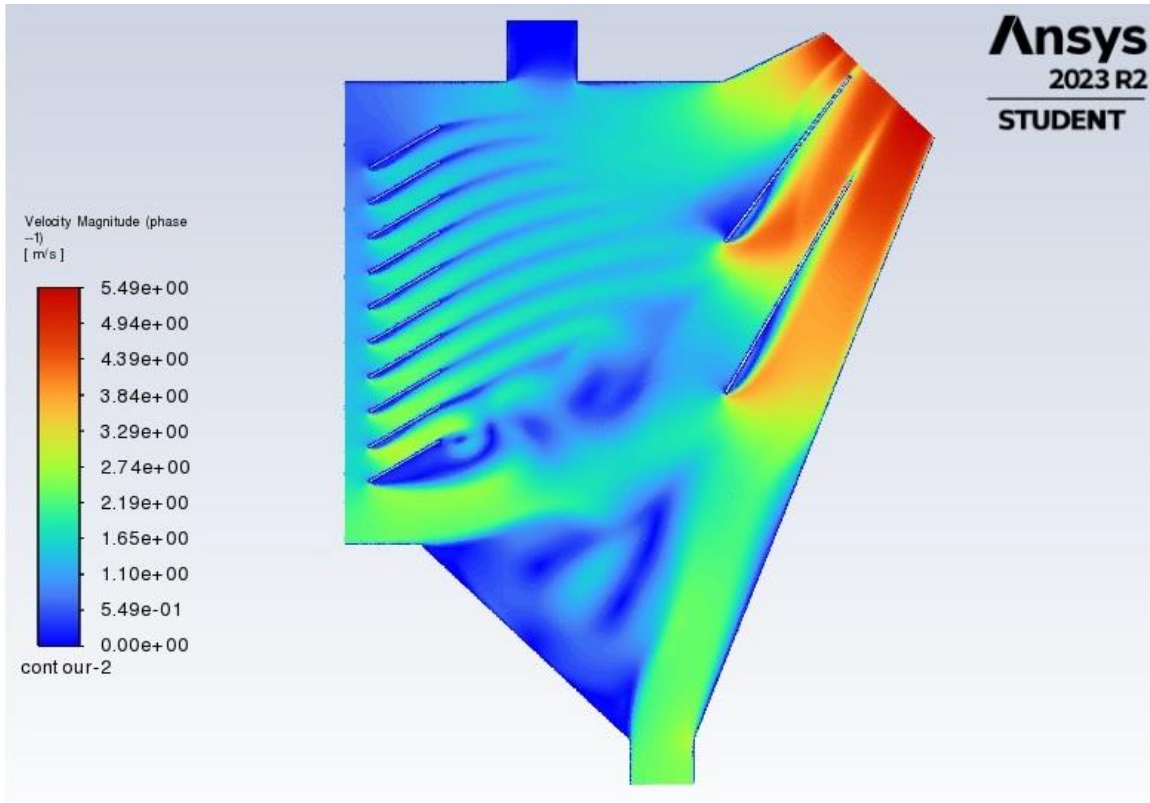
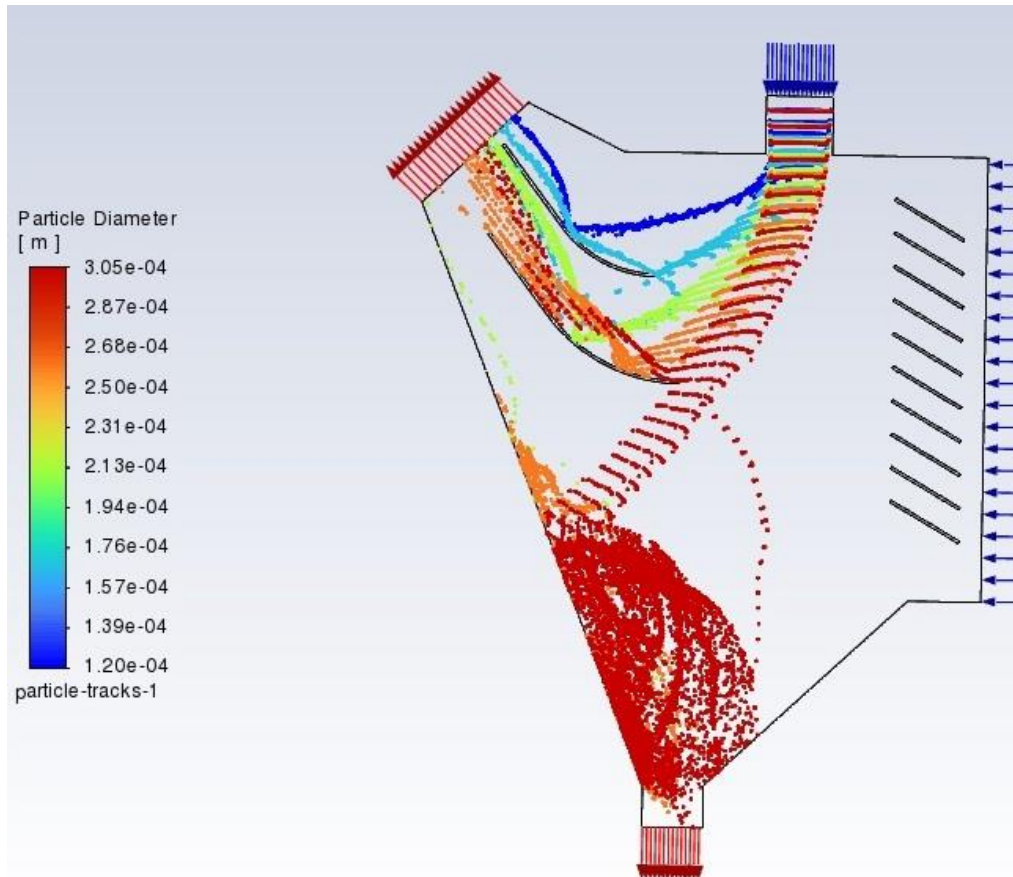


Figura 68 risultati simulazione del caso 4 separatore statico



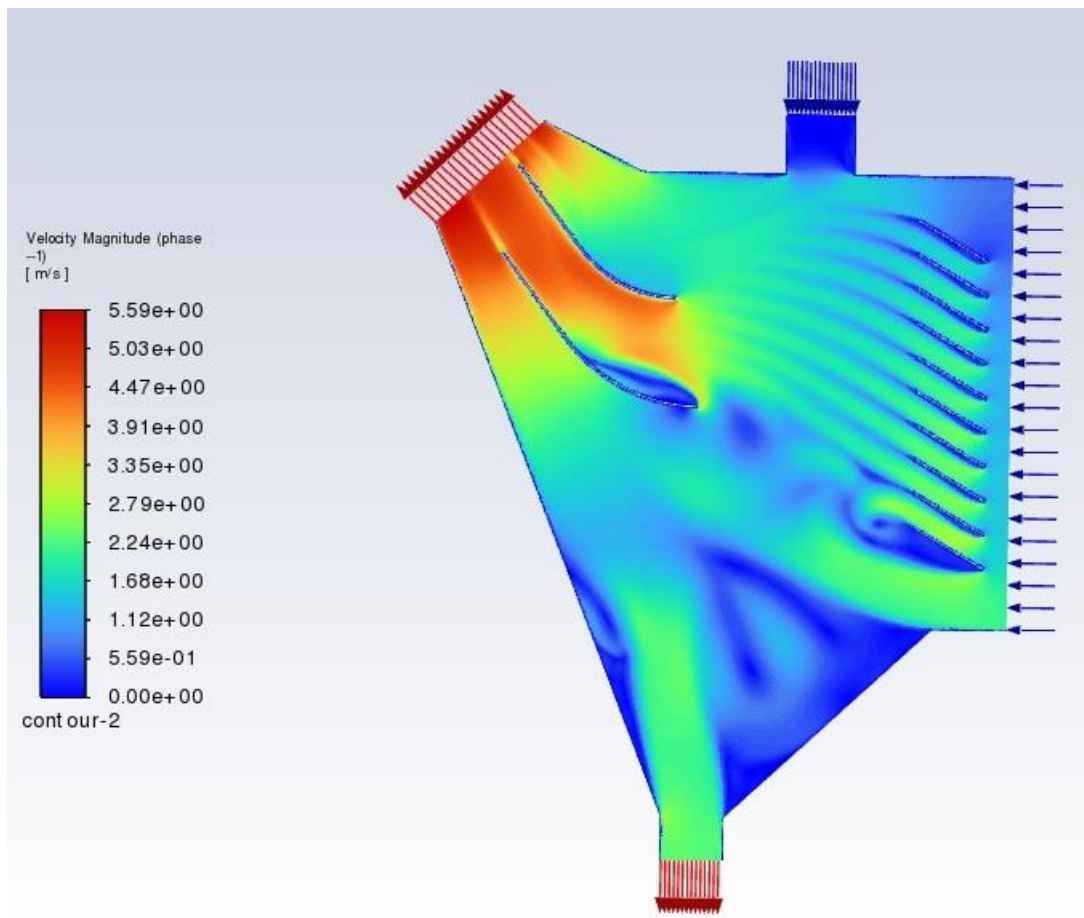
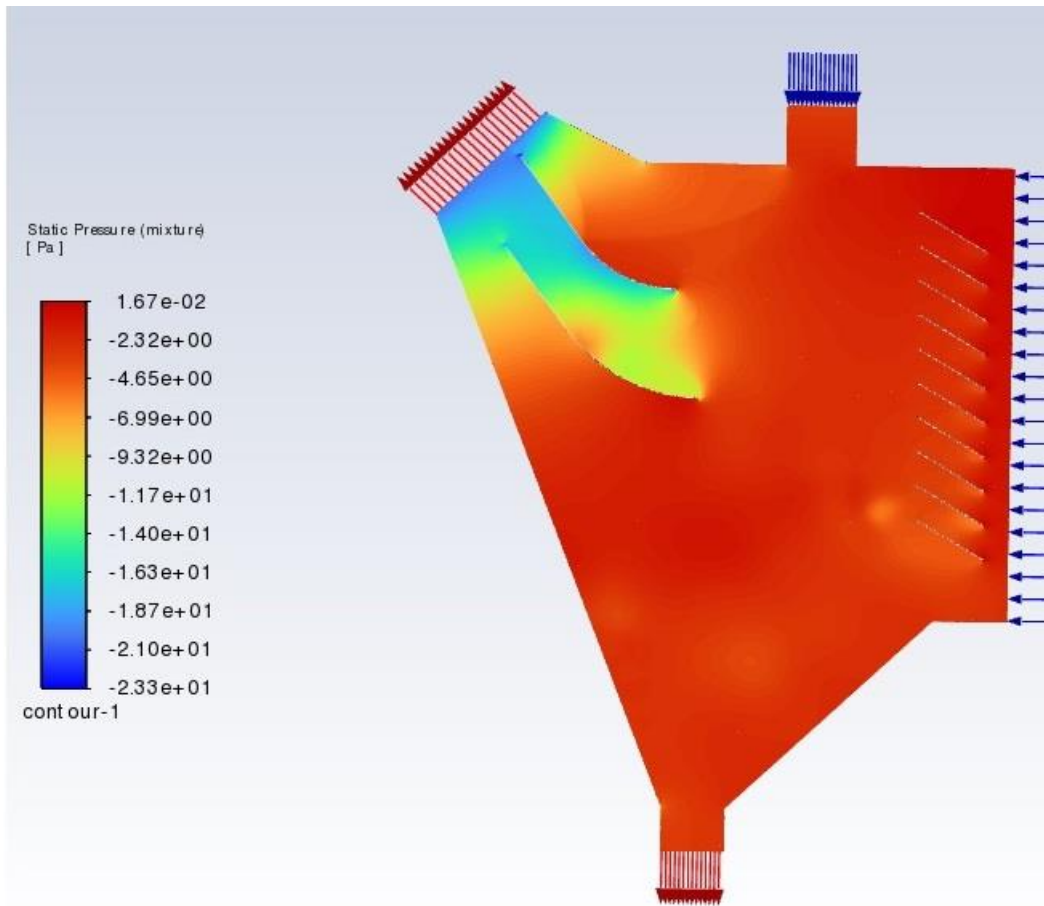
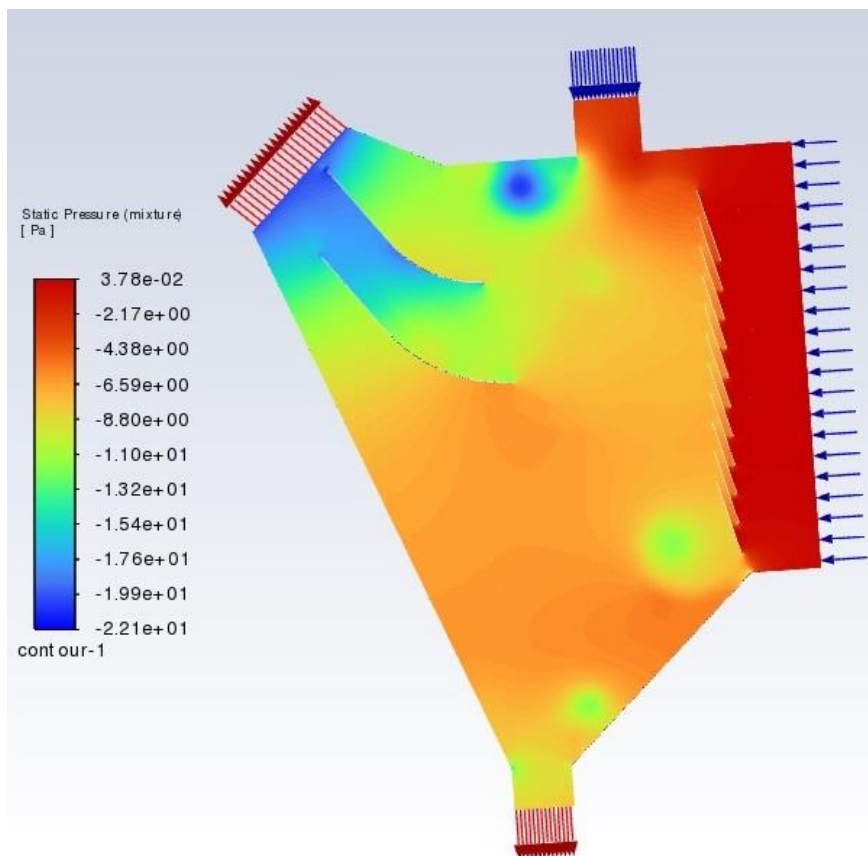
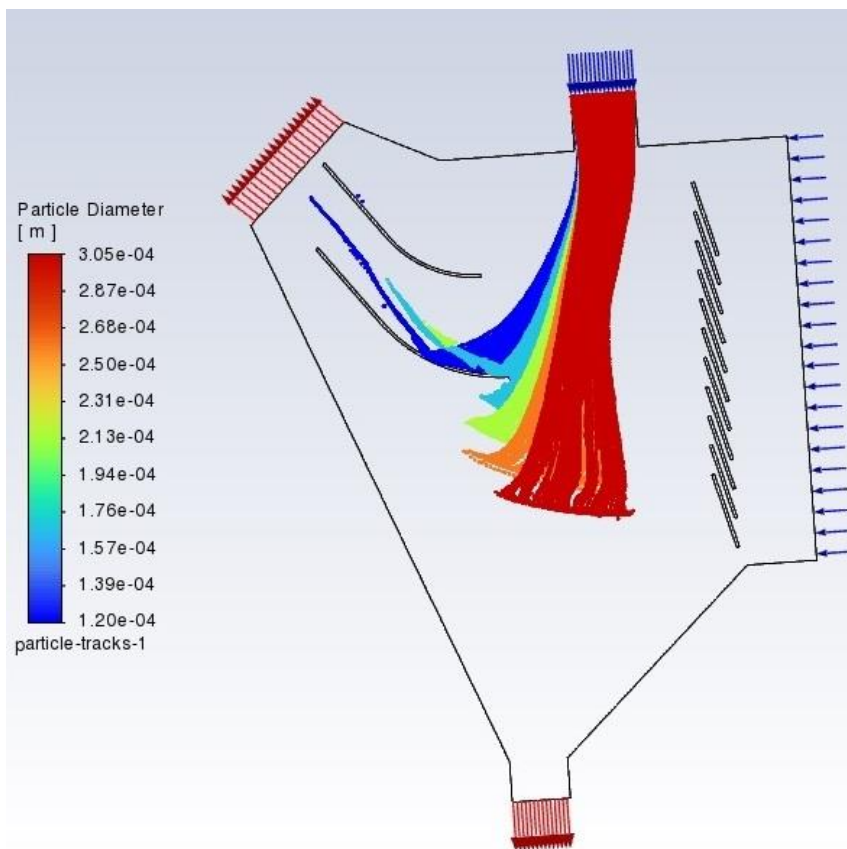


Figura 69 risultati simulazione del caso 5 separatore statico



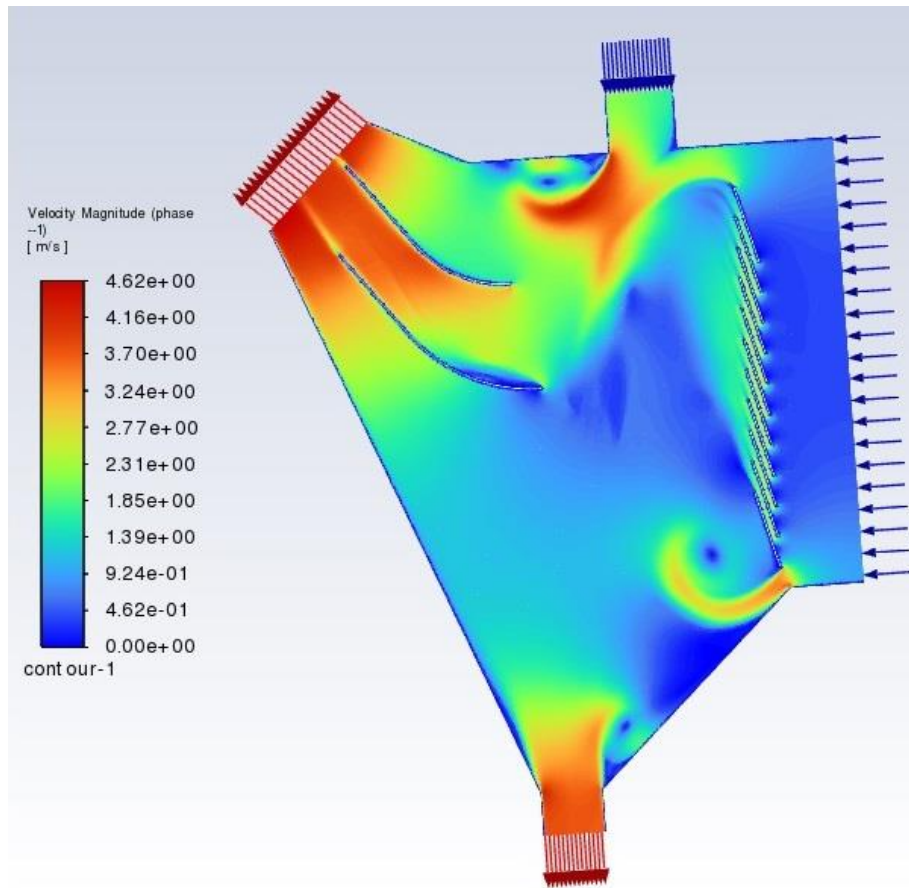
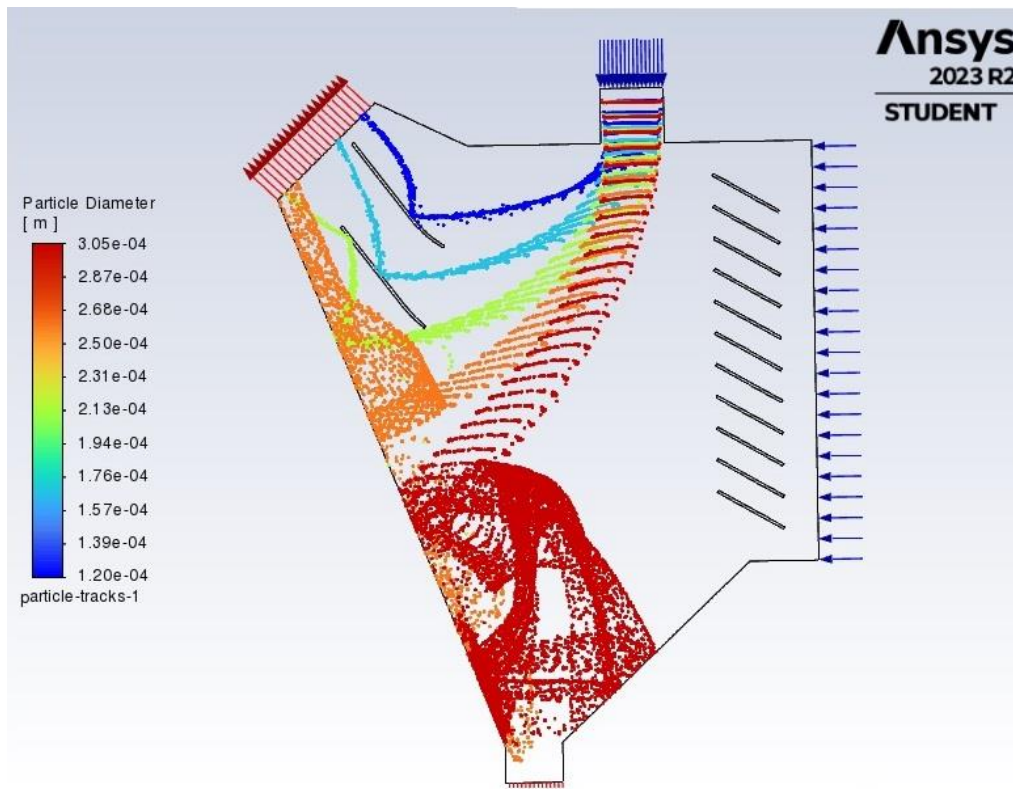


Figura 70 risultati della simulazione del caso 6 del separatore statico



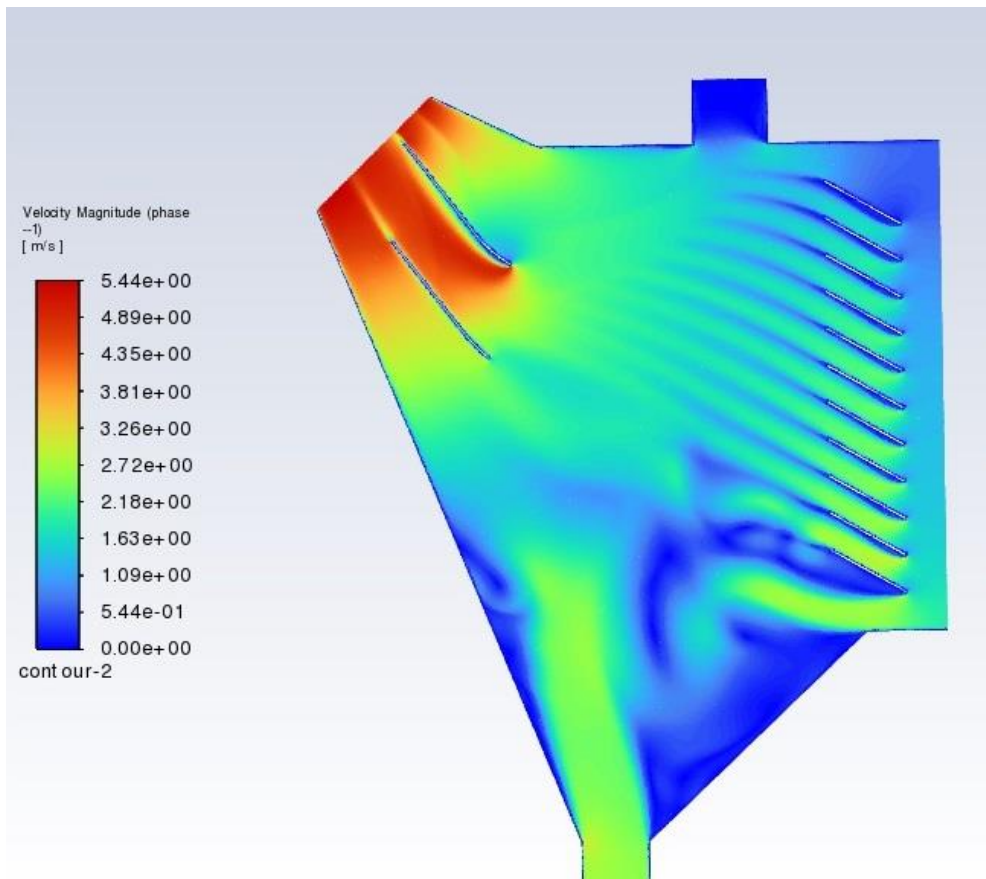
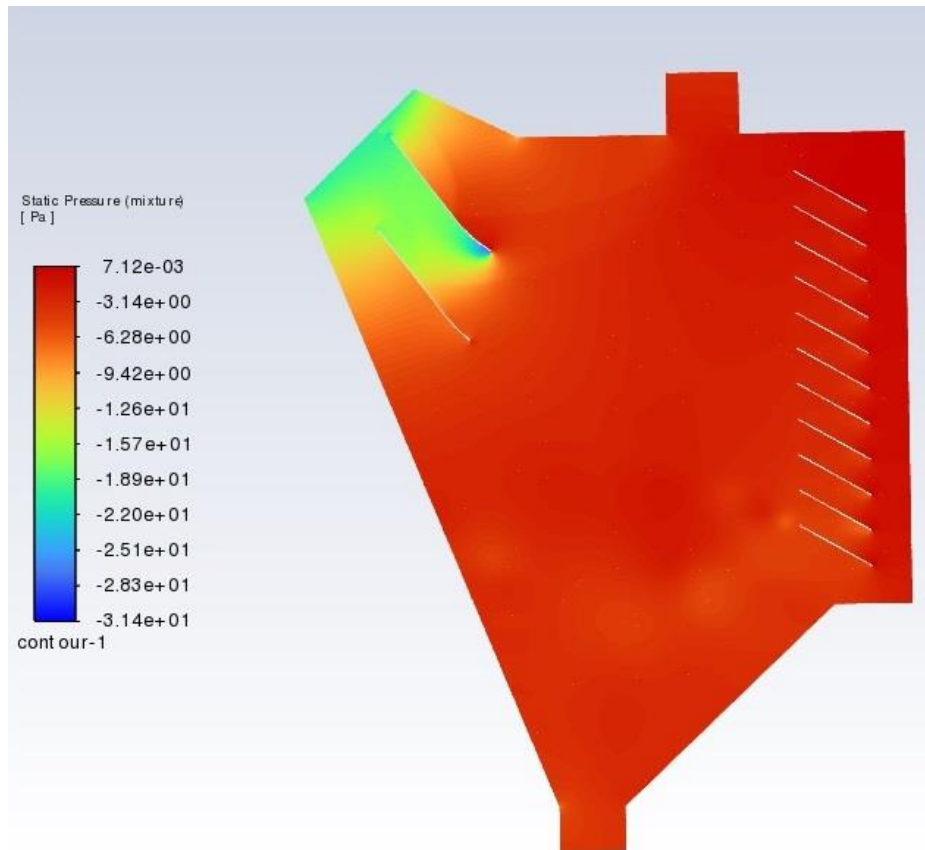
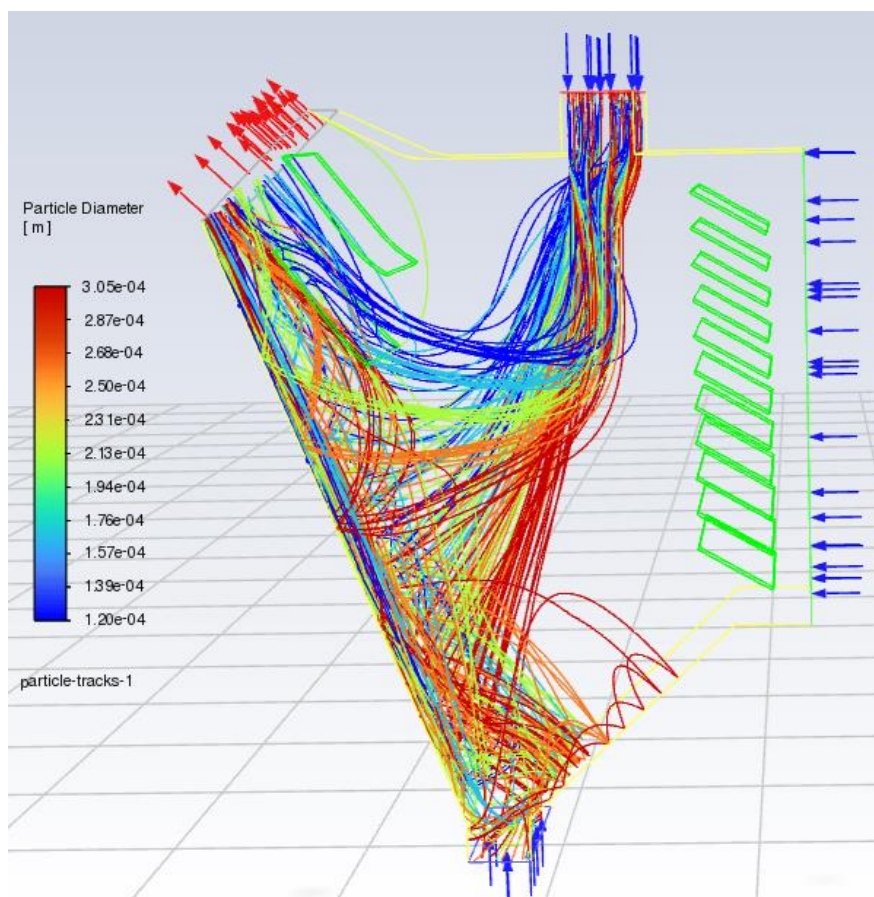
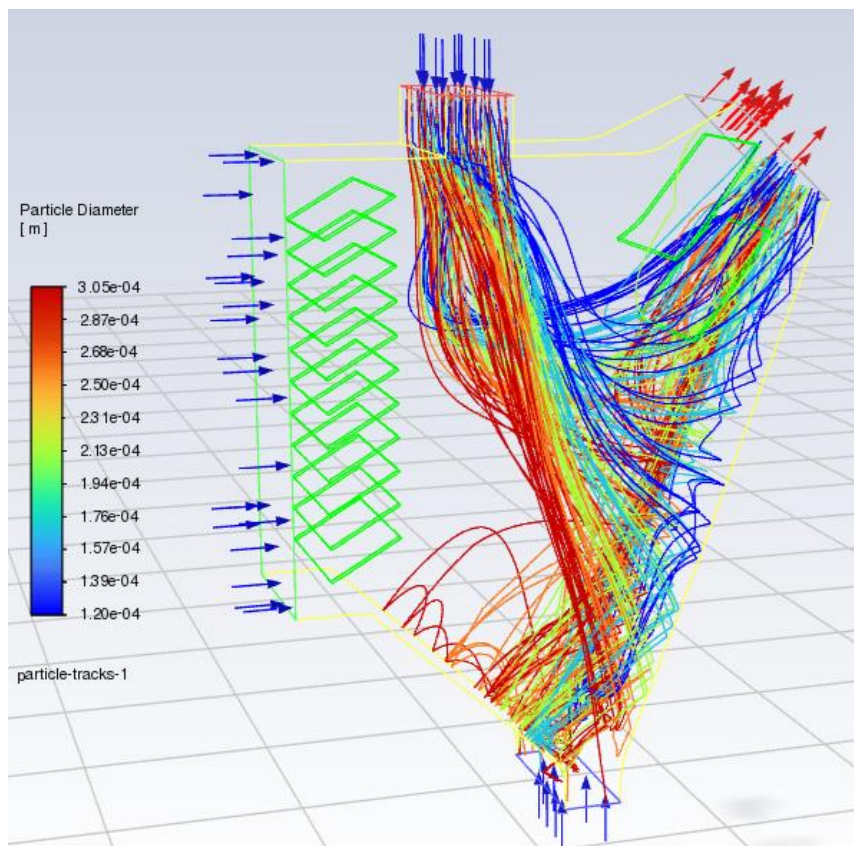
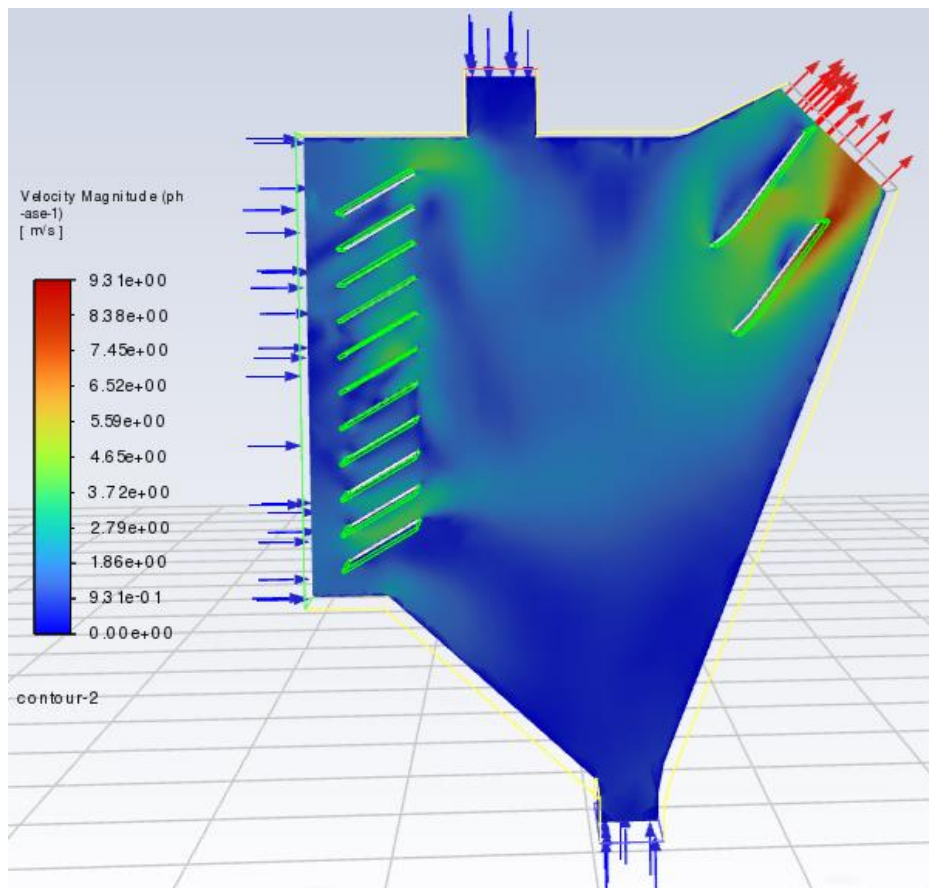
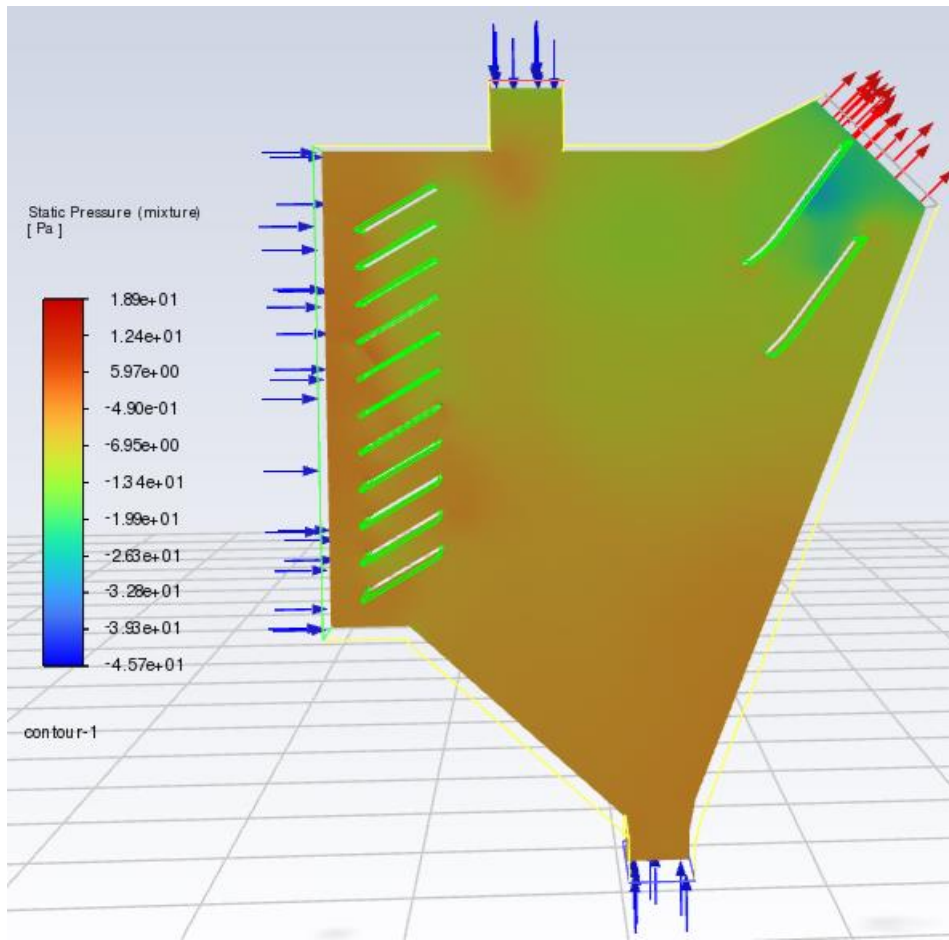


Figura 71 risultati della simulazione del caso tridimensionale del separatore statico





6.2 Lista dei risultati inerenti al separatore dinamico

Tabella 11 valori numerici delle granulometrie sperimentali del caso 1 del separatore dinamico

PRODOTTO			RICIRCOLO				ENTRATA			EFFICIENZA 1	
Size (µm)	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	portata(kg/s)	%V	
5	7,76	7,76	9,58E-03	5	0,05	0,05	7,85E-06	5	9,59E-03	6,89	99,92
10	16,37	8,61	1,06E-02	10	0,39	0,34	5,34E-05	10	1,07E-02	7,68	99,50
25	35,03	18,66	2,30E-02	25	0,78	0,39	6,12E-05	25	2,31E-02	16,60	99,74
45	54,11	19,08	2,36E-02	45	0,78	0	0,00E+00	45	2,36E-02	16,93	100,00
62	66,37	12,26	1,51E-02	62	0,78	0	0,00E+00	62	1,51E-02	10,88	100,00
63	66,99	0,62	7,66E-04	63	0,78	0	0,00E+00	63	7,66E-04	0,55	100,00
75	73,77	6,78	8,37E-03	75	0,95	0,17	2,67E-05	75	8,40E-03	6,03	99,68
100	84,29	10,52	1,30E-02	100	4,04	3,09	4,85E-04	100	1,35E-02	9,68	96,40
125	91,17	6,88	8,50E-03	125	11,35	7,31	1,15E-03	125	9,64E-03	6,93	88,10
150	95,4	4,23	5,22E-03	150	21,46	10,11	1,59E-03	150	6,81E-03	4,89	76,70
200	99,21	3,81	4,71E-03	200	42,55	21,09	3,31E-03	200	8,02E-03	5,76	58,70
250	99,97	0,76	9,39E-04	250	59,79	17,24	2,71E-03	250	3,64E-03	2,62	25,76
300	100	0,03	3,71E-05	300	72,15	12,36	1,94E-03	300	1,98E-03	1,42	1,87
350	100	0	0,00E+00	350	80,66	8,51	1,34E-03	350	1,34E-03	0,96	0,00
400	100	0	0,00E+00	400	86,33	5,67	8,90E-04	400	8,90E-04	0,64	0,00
450	100	0	0,00E+00	450	90,14	3,81	5,98E-04	450	5,98E-04	0,43	0,00
500	100	0	0,00E+00	500	92,75	2,61	4,10E-04	500	4,10E-04	0,29	0,00
550	100	0	0,00E+00	550	94,63	1,88	2,95E-04	550	2,95E-04	0,21	0,00
600	100	0	0,00E+00	600	96,04	1,41	2,21E-04	600	2,21E-04	0,16	0,00

Tabella 12 valori numerici delle granulometrie sperimentali del caso 2 del separatore dinamico

PRODOTTO			RICIRCOLO				ENTRATA			EFFICIENZA 2	
Size (µm)	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	portata(kg/s)	%V	
5	13,77	13,77	6,66E-03	5	0,00	0,00	0,00E+00	5	6,66E-03	6,25	100,00
10	28,06	14,29	6,91E-03	10	0,00	0,00	0,00E+00	10	6,91E-03	6,49	100,00
25	60,35	32,29	1,56E-02	25	0,04	0,04	2,32E-05	25	1,56E-02	14,68	99,85
45	90,20	29,85	1,44E-02	45	6,74	6,70	3,89E-03	45	1,83E-02	17,21	78,75
62	98,80	8,60	4,16E-03	62	20,03	13,29	7,72E-03	62	1,19E-02	11,16	34,99
63	99,00	0,20	9,67E-05	63	20,89	0,86	5,00E-04	63	5,96E-04	0,56	16,21
75	99,97	0,97	4,69E-04	75	30,99	10,10	5,87E-03	75	6,34E-03	5,95	7,40
100	100,00	0,03	1,45E-05	100	49,51	18,52	1,08E-02	100	1,08E-02	10,12	0,13
125	100,00	0,00	0,00E+00	125	63,13	13,62	7,91E-03	125	7,91E-03	7,44	0,00
150	100,00	0,00	0,00E+00	150	72,61	9,48	5,51E-03	150	5,51E-03	5,18	0,00
200	100,00	0,00	0,00E+00	200	84,11	11,50	6,68E-03	200	6,68E-03	6,28	0,00
250	100,00	0,00	0,00E+00	250	90,38	6,27	3,64E-03	250	3,64E-03	3,42	0,00
300	100,00	0,00	0,00E+00	300	94,16	3,78	2,20E-03	300	2,20E-03	2,06	0,00
350	100,00	0,00	0,00E+00	350	96,60	2,44	1,42E-03	350	1,42E-03	1,33	0,00
400	100,00	0,00	0,00E+00	400	98,15	1,55	9,01E-04	400	9,01E-04	0,85	0,00
450	100,00	0,00	0,00E+00	450	99,09	0,94	5,46E-04	450	5,46E-04	0,51	0,00
500	100,00	0,00	0,00E+00	500	99,62	0,53	3,08E-04	500	3,08E-04	0,29	0,00
550	100,00	0,00	0,00E+00	550	99,88	0,26	1,51E-04	550	1,51E-04	0,14	0,00
600	100,00	0,00	0,00E+00	600	99,99	0,11	6,39E-05	600	6,39E-05	0,06	0,00

Tabella 13 valori numerici delle granulometrie sperimentali del caso 3 del separatore dinamico

PRODOTTO			RICIRCOLO				ENTRATA			EFFICIENZA 3	
Size (µm)	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	portata(kg/s)	%V	
5	19,38	19,38	7,32E-03	5	0	0	0,00E+00	5	7,32E-03	7,341727	100,00
10	38,31	18,93	7,15E-03	10	0	0	0,00E+00	10	7,15E-03	7,171253	100,00
25	76,91	38,6	1,46E-02	25	2,04	2,04	1,26E-03	25	1,58E-02	15,89003	92,03
45	95,7	18,79	7,10E-03	45	17,53	15,49	9,60E-03	45	1,67E-02	16,74014	42,52
62	97,68	1,98	7,48E-04	62	32,84	15,31	9,48E-03	62	1,02E-02	10,26019	7,31
63	97,69	0,01	3,78E-06	63	33,67	0,83	5,14E-04	63	5,18E-04	0,519359	0,73
75	97,72	0,03	1,13E-05	75	42,78	9,11	5,64E-03	75	5,65E-03	5,670223	0,20
100	97,72	0	0,00E+00	100	57,2	14,42	8,93E-03	100	8,93E-03	8,95727	0,00
125	97,72	0	0,00E+00	125	67,17	9,97	6,18E-03	125	6,18E-03	6,193064	0,00
150	97,72	0	0,00E+00	150	74,35	7,18	4,45E-03	150	4,45E-03	4,46	0,00
200	97,72	0	0,00E+00	200	84,18	9,83	6,09E-03	200	6,09E-03	6,1061	0,00
250	97,72	0	0,00E+00	250	90,55	6,37	3,95E-03	250	3,95E-03	3,956852	0,00
300	97,72	0	0,00E+00	300	94,76	4,21	2,61E-03	300	2,61E-03	2,615125	0,00
350	97,72	0	0,00E+00	350	97,46	2,7	1,67E-03	350	1,67E-03	1,677159	0,00
400	97,72	0	0,00E+00	400	99,01	1,55	9,60E-04	400	9,60E-04	0,962813	0,00
450	97,72	0	0,00E+00	450	99,76	0,75	4,65E-04	450	4,65E-04	0,465877	0,00
500	97,72	0	0,00E+00	500	99,95	0,19	1,18E-04	500	1,18E-04	0,118022	0,00
550	97,72	0	0,00E+00	550	100	0,05	3,10E-05	550	3,10E-05	0,031058	0,00
600	97,72	0	0,00E+00	600	100	0	0,00E+00	600	0,00E+00	0	0,00

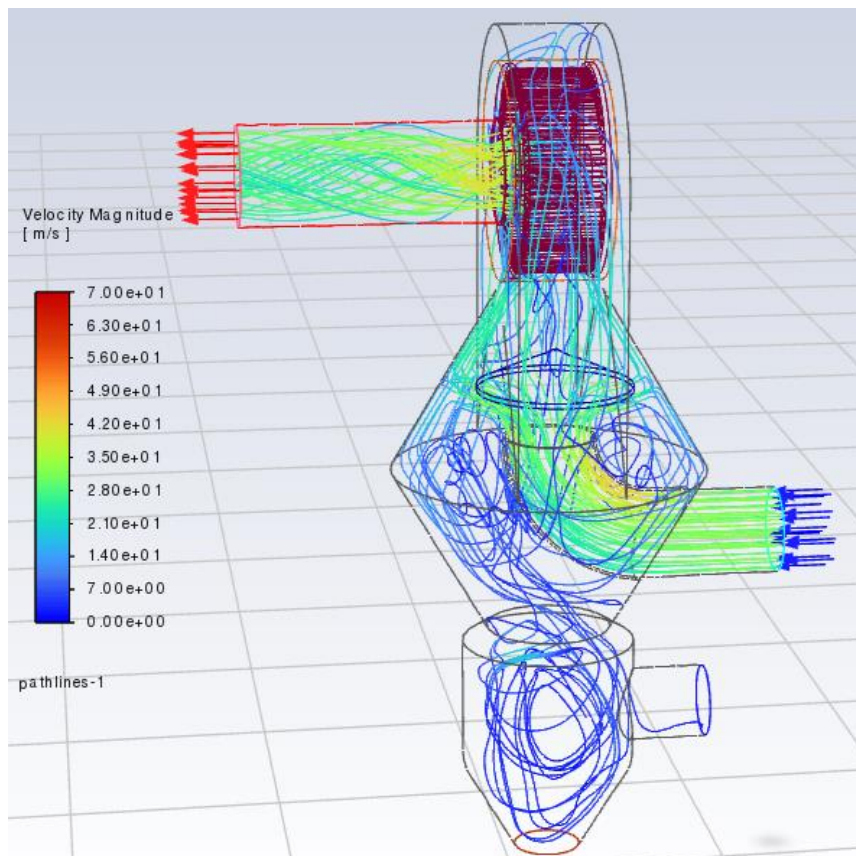
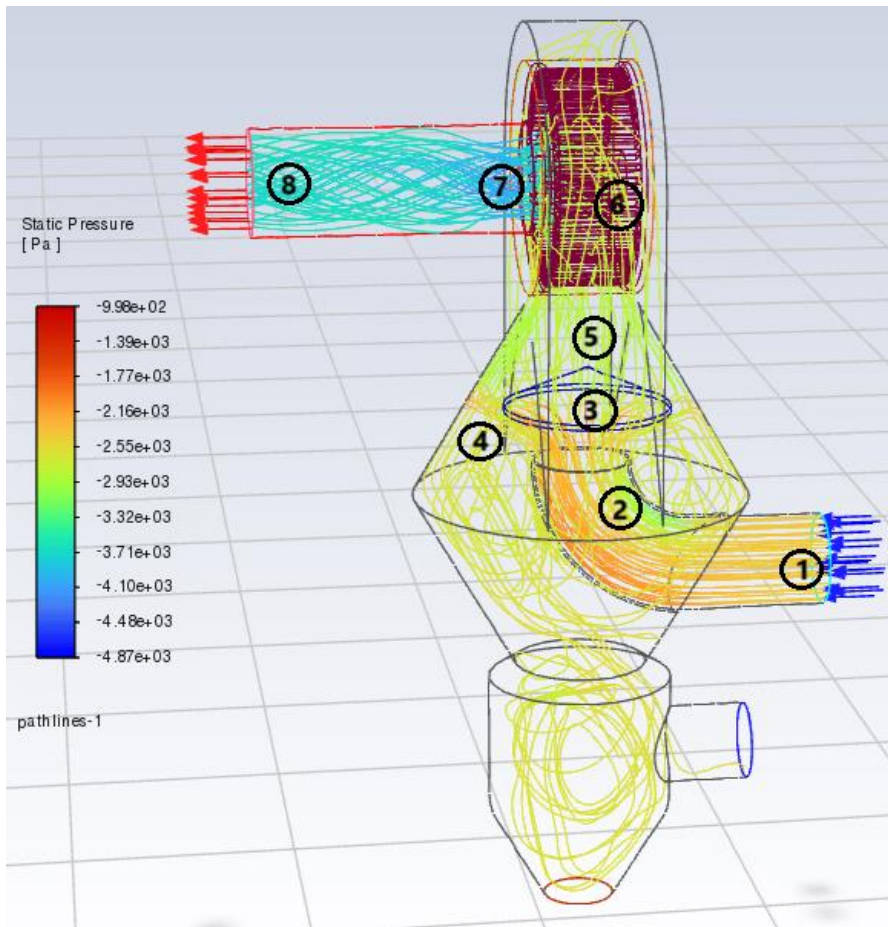
Tabella 14 valori numerici delle granulometrie sperimentali del caso 4 del separatore dinamico

PRODOTTO Size (µm)	portata=0,08kg/s		RICIRCOLO				portata=0,07kg/s		ENTRATA			EFFICIENZA 4
	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	Volume Unitario	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	portata(kg/s)	%V		
5	12,70	12,70	9,88E-03	5	0,00	0,00	0,00E+00	5	9,88E-03	6,78	100,00	
10	26,62	13,92	1,08E-02	10	0,00	0,00	0,00E+00	10	1,08E-02	7,43	100,00	
25	57,17	30,55	2,38E-02	25	0,03	0,03	2,04E-05	25	2,38E-02	16,33	99,91	
45	84,34	27,17	2,11E-02	45	6,76	6,73	4,57E-03	45	2,57E-02	17,65	82,23	
62	94,89	10,55	8,21E-03	62	21,26	14,50	9,85E-03	62	1,81E-02	12,39	45,47	
63	95,26	0,37	2,88E-04	63	22,21	0,95	6,45E-04	63	9,33E-04	0,64	30,86	
75	98,42	3,16	2,46E-03	75	33,38	11,17	7,59E-03	75	1,00E-02	6,89	24,48	
100	100,00	1,58	1,23E-03	100	53,62	20,24	1,37E-02	100	1,50E-02	10,28	8,21	
125	100,00	0,00	0,00E+00	125	67,93	14,31	9,72E-03	125	9,72E-03	6,67	0,00	
150	100,00	0,00	0,00E+00	150	77,24	9,31	6,32E-03	150	6,32E-03	4,34	0,00	
200	100,00	0,00	0,00E+00	200	87,40	10,16	6,90E-03	200	6,90E-03	4,73	0,00	
250	100,00	0,00	0,00E+00	250	92,21	4,81	3,27E-03	250	3,27E-03	2,24	0,00	
300	100,00	0,00	0,00E+00	300	94,93	2,72	1,85E-03	300	1,85E-03	1,27	0,00	
350	100,00	0,00	0,00E+00	350	96,72	1,79	1,22E-03	350	1,22E-03	0,83	0,00	
400	100,00	0,00	0,00E+00	400	97,95	1,23	8,35E-04	400	8,35E-04	0,57	0,00	
450	100,00	0,00	0,00E+00	450	98,80	0,85	5,77E-04	450	5,77E-04	0,40	0,00	
500	100,00	0,00	0,00E+00	500	99,35	0,55	3,74E-04	500	3,74E-04	0,26	0,00	
550	100,00	0,00	0,00E+00	550	99,70	0,35	2,38E-04	550	2,38E-04	0,16	0,00	
600	100,00	0,00	0,00E+00	600	99,91	0,21	1,43E-04	600	1,43E-04	0,10	0,00	

Tabella 15 valori numerici delle granulometrie sperimentali del caso 5 del separatore dinamico

PRODOTTO Size (µm)	portata=0,067kg/s		RICIRCOLO				portata=0,068kg/s		ENTRATA			EFFICIENZA 5
	% Volume Under	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	Volume Unitario	%V	portata(kg/s)	Size (µm)	portata(kg/s)	%V		
5	14,89	14,89	9,98E-03	5	0,00	0,00	0,00E+00	5	9,98E-03	7,34	100,00	
10	31,49	16,60	1,11E-02	10	0,00	0,00	0,00E+00	10	1,11E-02	8,18	100,00	
25	66,77	35,28	2,36E-02	25	0,67	0,67	4,62E-04	25	2,41E-02	17,73	98,08	
45	91,12	24,35	1,63E-02	45	15,57	14,90	1,03E-02	45	2,66E-02	19,56	61,38	
62	98,02	6,90	4,62E-03	62	35,32	19,75	1,36E-02	62	1,82E-02	13,41	25,36	
63	98,22	0,20	1,34E-04	63	36,46	1,14	7,85E-04	63	9,19E-04	0,68	14,58	
75	99,75	1,53	1,03E-03	75	49,05	12,59	8,67E-03	75	9,70E-03	7,14	10,57	
100	100,00	0,25	1,68E-04	100	68,71	19,66	1,35E-02	100	1,37E-02	10,09	1,22	
125	100,00	0,00	0,00E+00	125	80,83	12,12	8,35E-03	125	8,35E-03	6,14	0,00	
150	100,00	0,00	0,00E+00	150	87,99	7,16	4,93E-03	150	4,93E-03	3,63	0,00	
200	100,00	0,00	0,00E+00	200	95,12	7,13	4,91E-03	200	4,91E-03	3,61	0,00	
250	100,00	0,00	0,00E+00	250	98,05	2,93	2,02E-03	250	2,02E-03	1,49	0,00	
300	100,00	0,00	0,00E+00	300	99,34	1,29	8,89E-04	300	8,89E-04	0,65	0,00	
350	100,00	0,00	0,00E+00	350	99,88	0,54	3,72E-04	350	3,72E-04	0,27	0,00	
400	100,00	0,00	0,00E+00	400	100,00	0,12	8,27E-05	400	8,27E-05	0,06	0,00	
450	100,00	0,00	0,00E+00	450	100,00	0,00	0,00E+00	450	0,00E+00	0,00	0,00	
500	100,00	0,00	0,00E+00	500	100,00	0,00	0,00E+00	500	0,00E+00	0,00	0,00	
550	100,00	0,00	0,00E+00	550	100,00	0,00	0,00E+00	550	0,00E+00	0,00	0,00	
600	100,00	0,00	0,00E+00	600	100,00	0,00	0,00E+00	600	0,00E+00	0	0,00	

Figura 72 risultati della simulazione del caso 1 del separatore dinamico



prodotto fluent			ricircolo fluent			efficienza
Size (μm)	%V	portata (kg/s)	Size (μm)	%V	portata (kg/s)	
5	12,4179	0,0066333	5	0	0	7,25E+01
8,0703	17,47166	0,00933288	8,0703	0	0	7,29E+01
13,026	24,00453	0,01282256	13,026	0,018427	2,15174E-06	7,48E+01
21,024	23,24927	0,01241912	21,024	8,812987	0,0010291	5,79E+01
33,935	5,591912	0,00298705	33,935	45,31993	0,005292045	1,24E+01
54,772	6,981353	0,00372925	54,772	25,96065	0,003031447	1,60E+01
88,405	6,764812	0,00361358	88,405	9,923924	0,001158825	2,02E+01
142,69	3,262133	0,00174254	142,69	6,9878	0,000815971	1,81E+01
230,31	0,243023	0,00012982	230,31	2,560688	0,000299014	4,17E+00
371,73	0,01217	6,5011E-06	371,73	0,396686	4,63213E-05	1,37E+00
600	0,001234	6,5943E-07	600	0,018905	2,20752E-06	2,73E+00

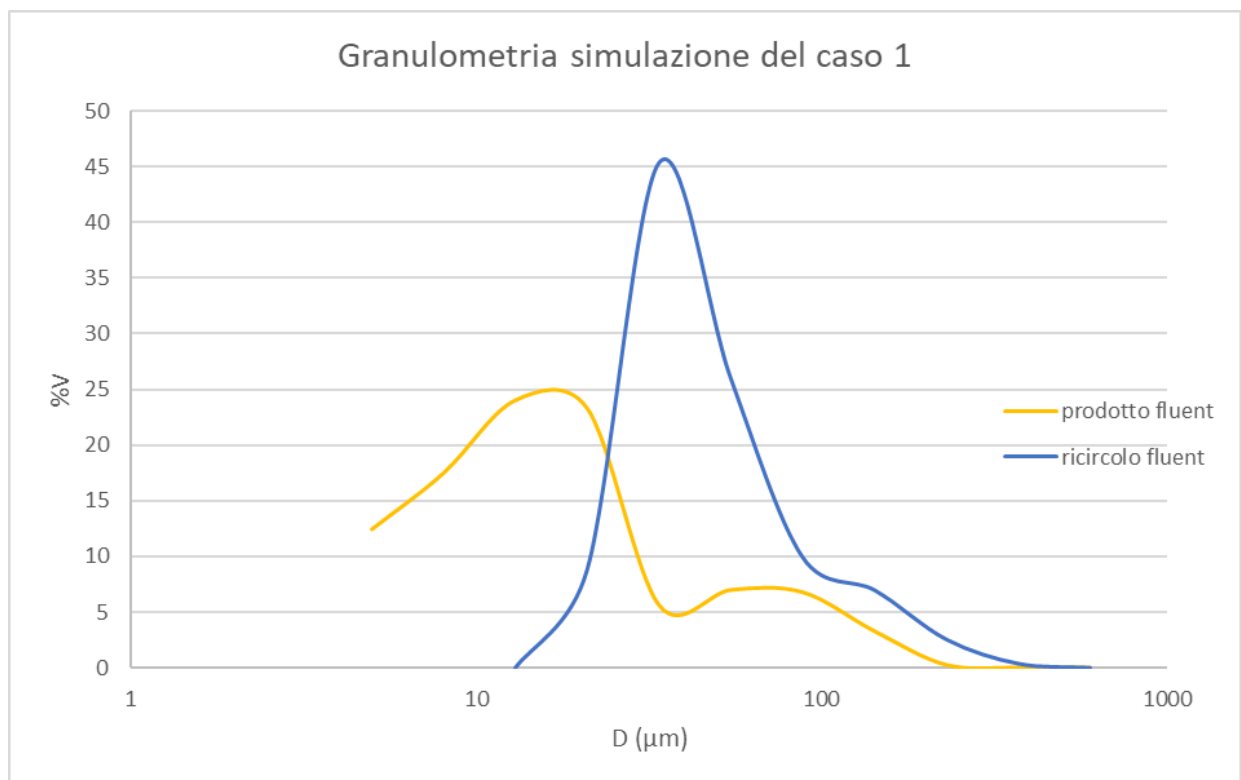
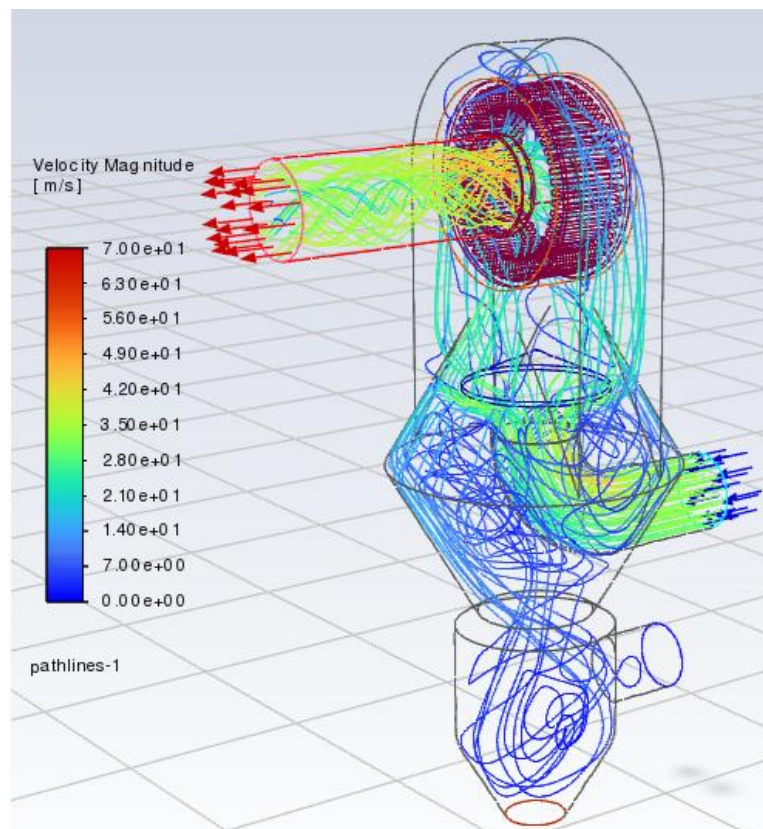
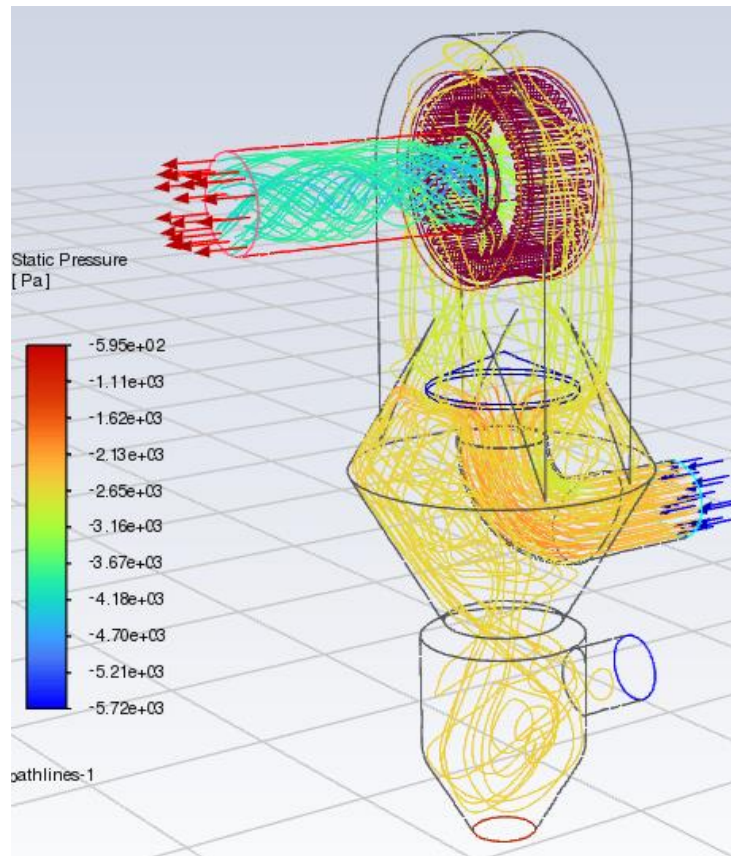


Figura 73 risultati della simulazione del caso 2 del separatore dinamico



prodotto fluent			ricircolo fluent			efficienza
Size (μm)	%V	portata (kg/s)	Size (μm)	%V	portata (kg/s)	
5,00	17,54	3,85E-03	5,00	0,00	0,00E+00	55,78
9,10	28,78	6,32E-03	9,10	0,00	0,00E+00	56,64
16,55	44,36	9,73E-03	16,55	1,14	6,36E-05	58,29
30,11	6,56	1,44E-03	30,11	51,53	2,88E-03	6,50
54,77	2,15	4,72E-04	54,77	28,87	1,62E-03	1,99
99,65	0,51	1,12E-04	99,65	15,16	8,49E-04	0,63
181,28	0,10	2,23E-05	181,28	3,08	1,73E-04	0,32
329,80	0,00	4,98E-07	329,80	0,21	1,18E-05	0,05
600,00	0,00	2,91E-08	600,00	0,00	1,54E-07	0,10

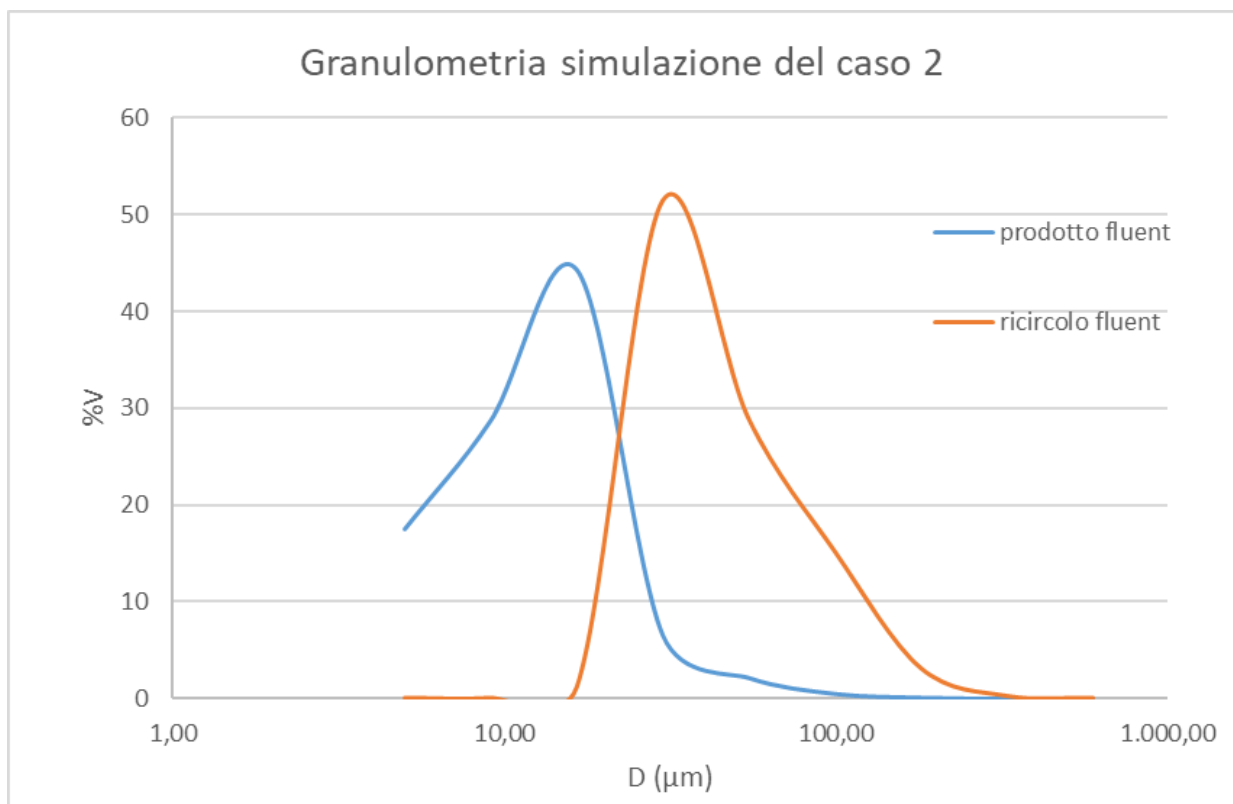
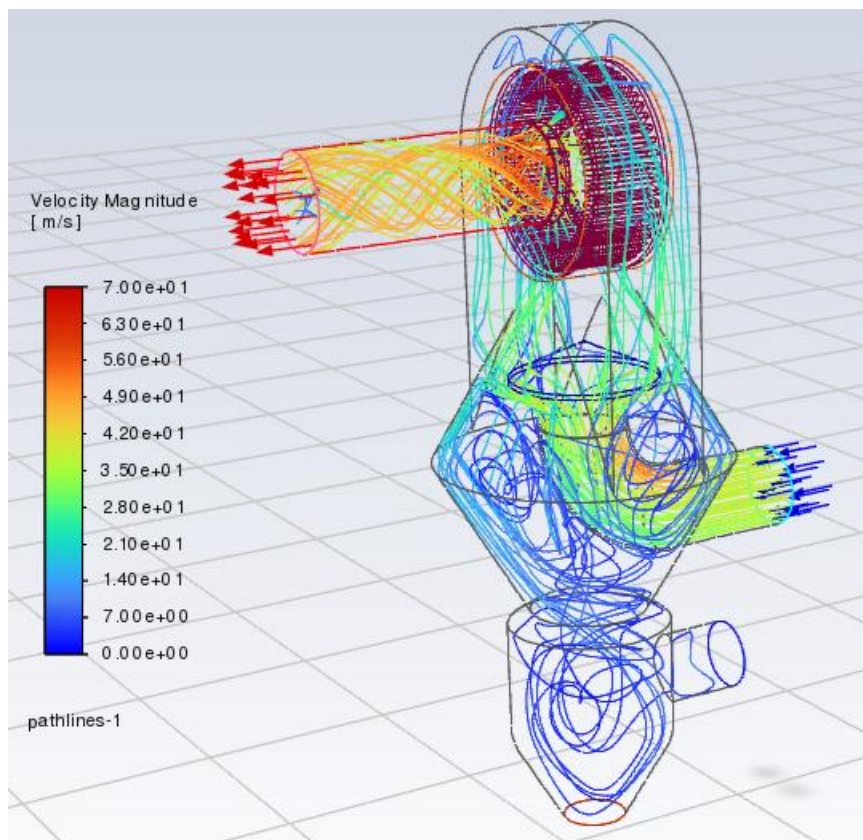
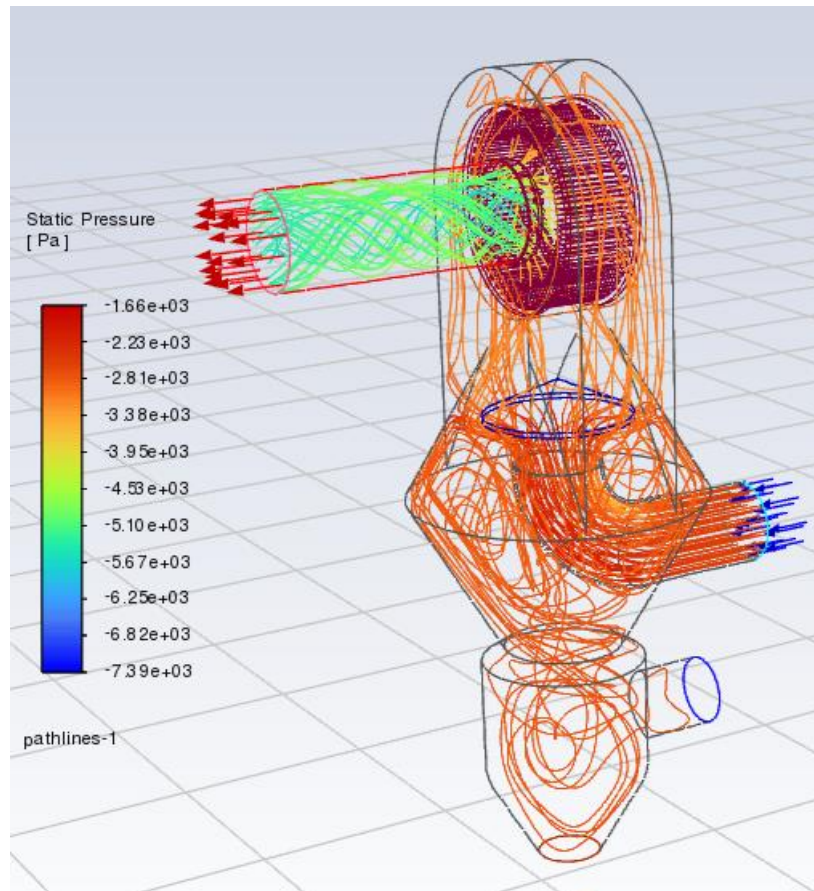


Figura 74 risultati della simulazione del caso 3 del separatore dinamico



prodotto fluent			ricircolo fluent			efficienza
Size (μm)	%V	portata (kg/s)	Size (μm)	%V	portata (kg/s)	
5,00	16,03	4,91E-03	5,00	0,00	0,00E+00	69,60
8,07	20,36	6,23E-03	8,07	0,00	0,00E+00	65,97
13,03	27,14	8,31E-03	13,03	0,17	1,40E-05	68,38
21,02	25,74	7,88E-03	21,02	12,07	1,01E-03	53,60
33,94	2,41	7,39E-04	33,94	64,14	5,36E-03	4,55
54,77	8,29	2,54E-03	54,77	9,90	8,28E-04	16,07
88,41	0,02	4,79E-06	88,41	6,53	5,46E-04	0,04
143,00	0,00	0,00E+00	143,00	4,45	3,72E-04	0,05
230,31	0,00	4,04E-06	230,31	2,24	1,87E-04	0,05
371,73	0,00	1,66E-06	371,73	0,44	3,70E-05	0,04
600,00	0,00	3,42E-07	600,00	0,06	5,41E-06	0,00

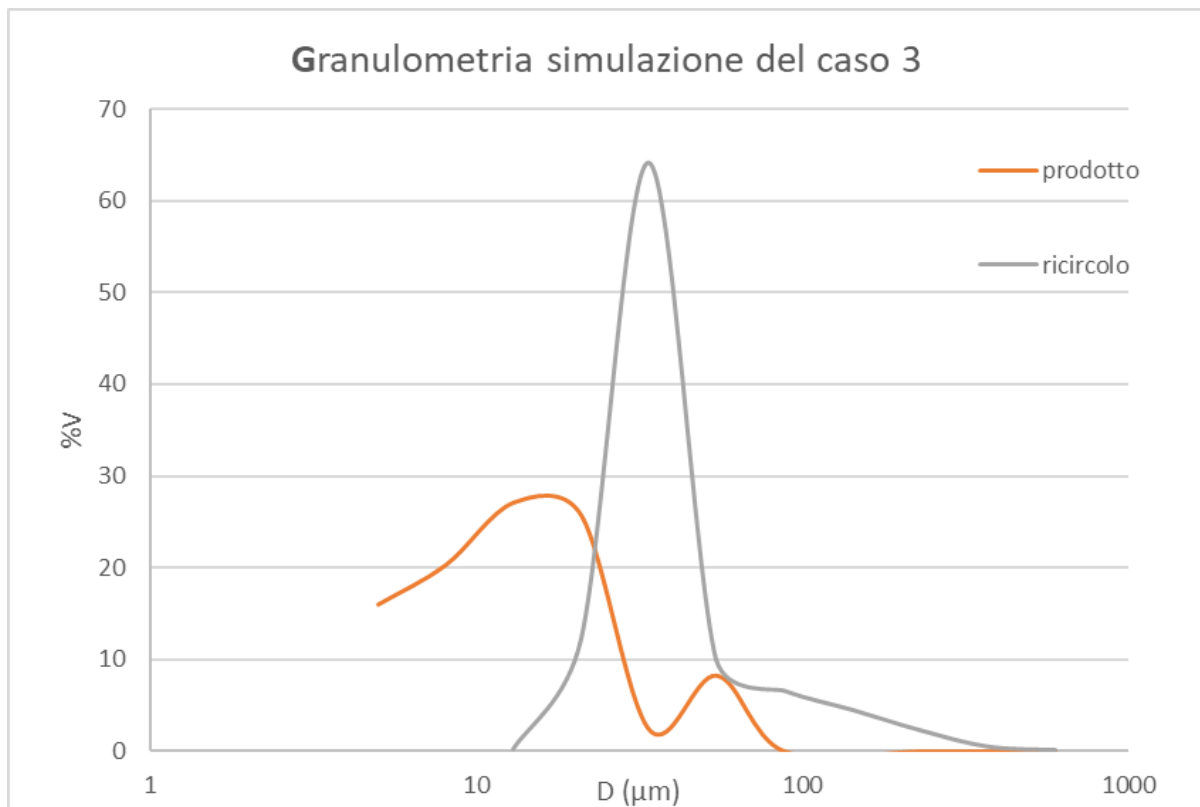
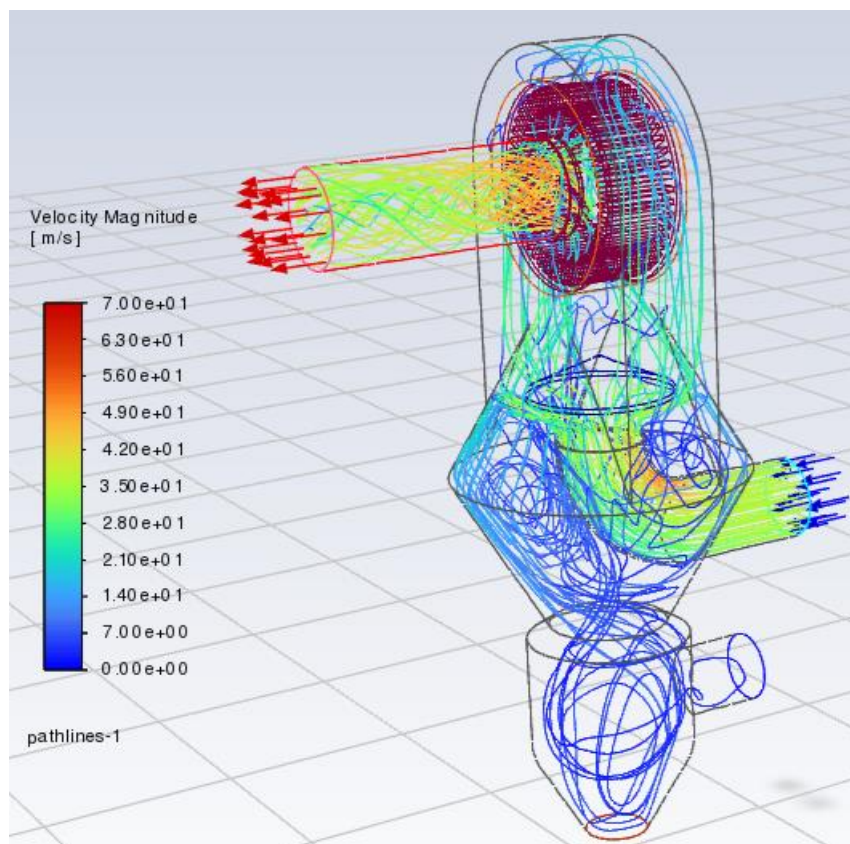
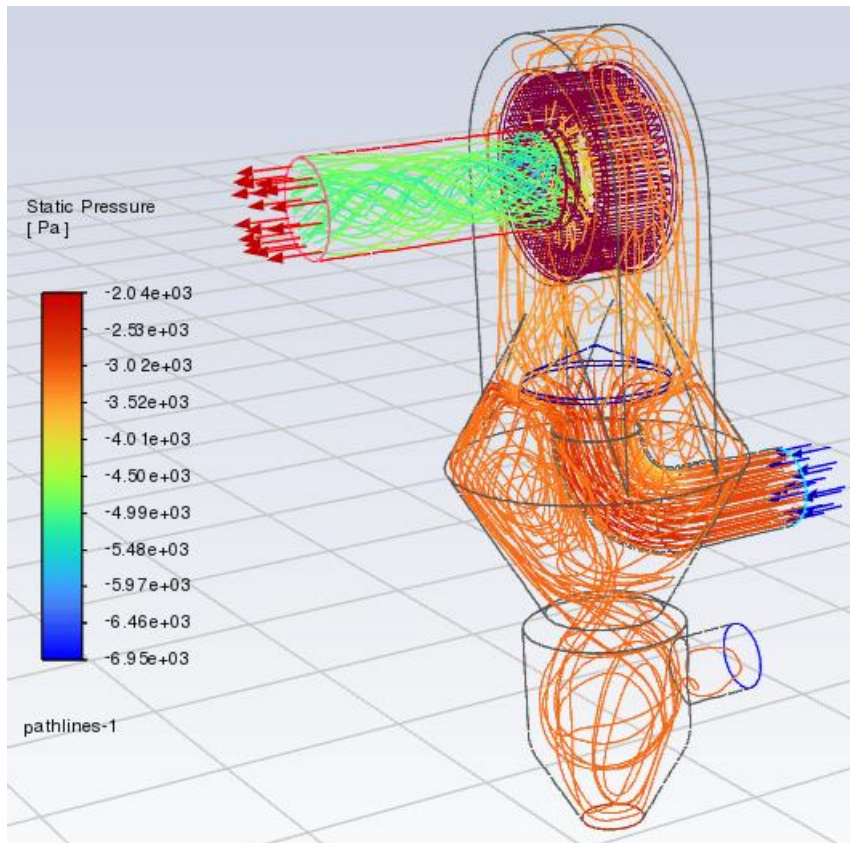


Figura 75 risultati della simulazione del caso 4 del separatore dinamico



prodotto fluent			ricircolo fluent			efficienza
Size (μm)	%V	portata (kg/s)	Size (μm)	%V	portata (kg/s)	
5,00	13,09	9,07E-04	5,00	0,00	0,00E+00	57,87
8,07	17,10	1,18E-03	8,07	0,00	0,00E+00	53,41
13,03	25,45	1,76E-03	13,03	0,08	1,88E-06	58,73
21,02	23,48	1,63E-03	21,02	7,99	1,85E-04	42,97
33,94	6,37	4,41E-04	33,94	45,65	1,06E-03	10,30
54,77	9,27	6,42E-04	54,77	34,20	7,92E-04	15,53
88,41	4,95	3,43E-04	88,41	6,84	1,58E-04	11,00
142,69	0,28	1,96E-05	142,69	2,95	6,84E-05	1,21
230,31	0,01	4,08E-07	230,31	2,01	4,66E-05	0,08
371,73	0,00	1,23E-07	371,73	0,25	5,88E-06	0,19
600,00	0,00	1,85E-08	600,00	0,01	2,47E-07	0,69

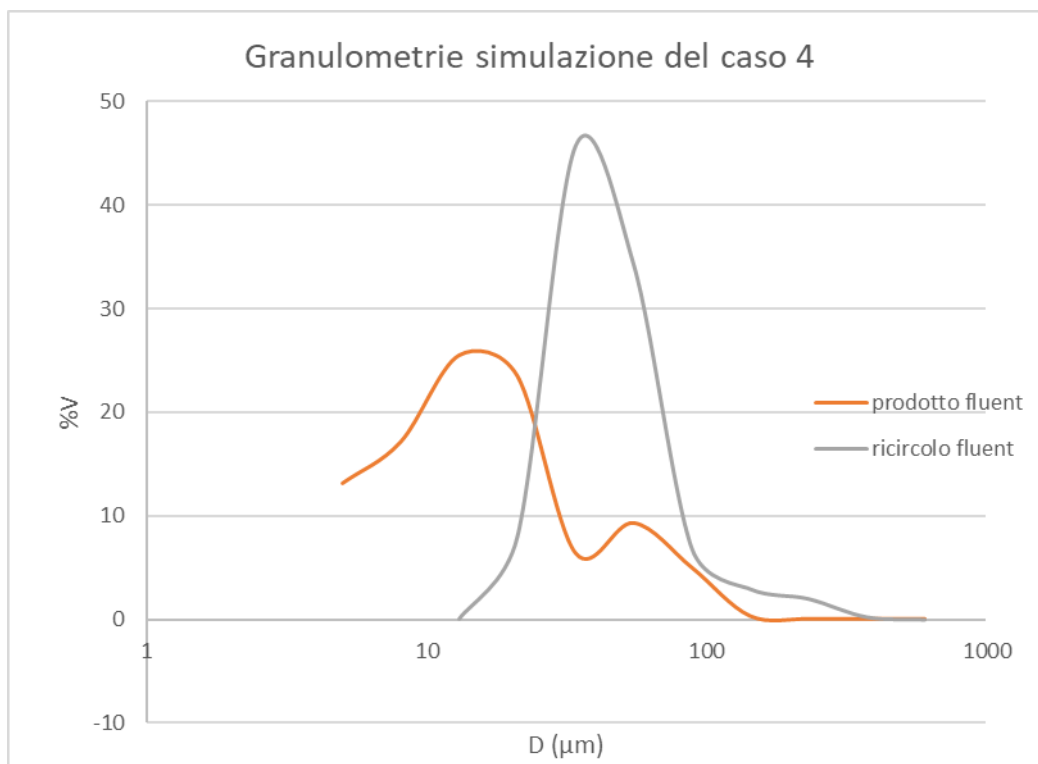
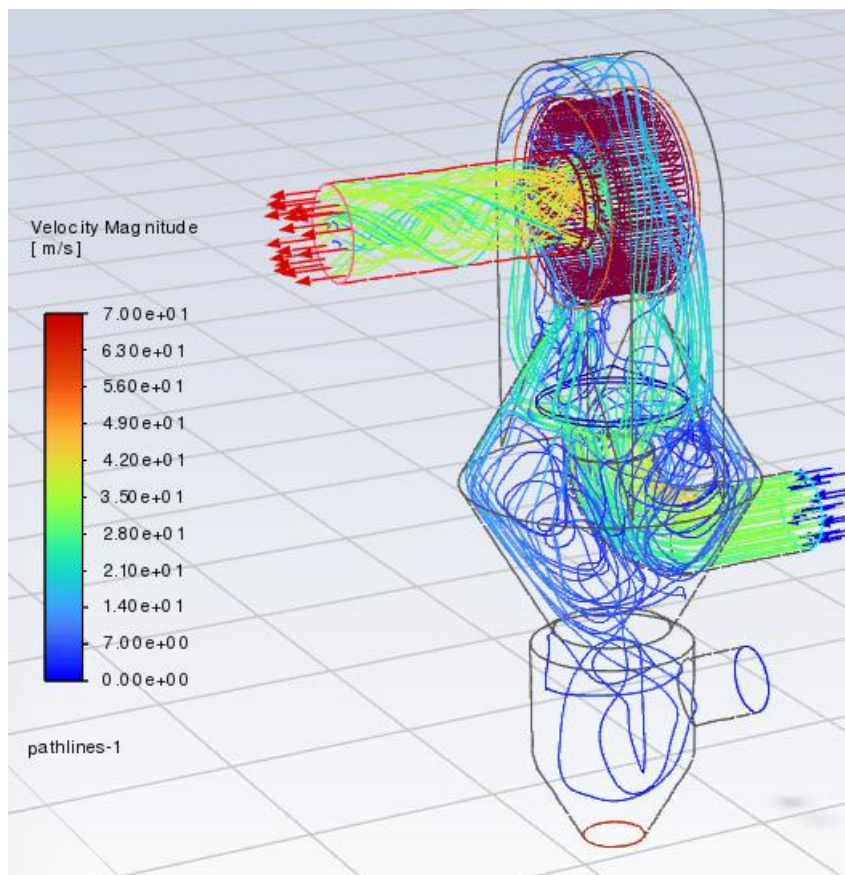
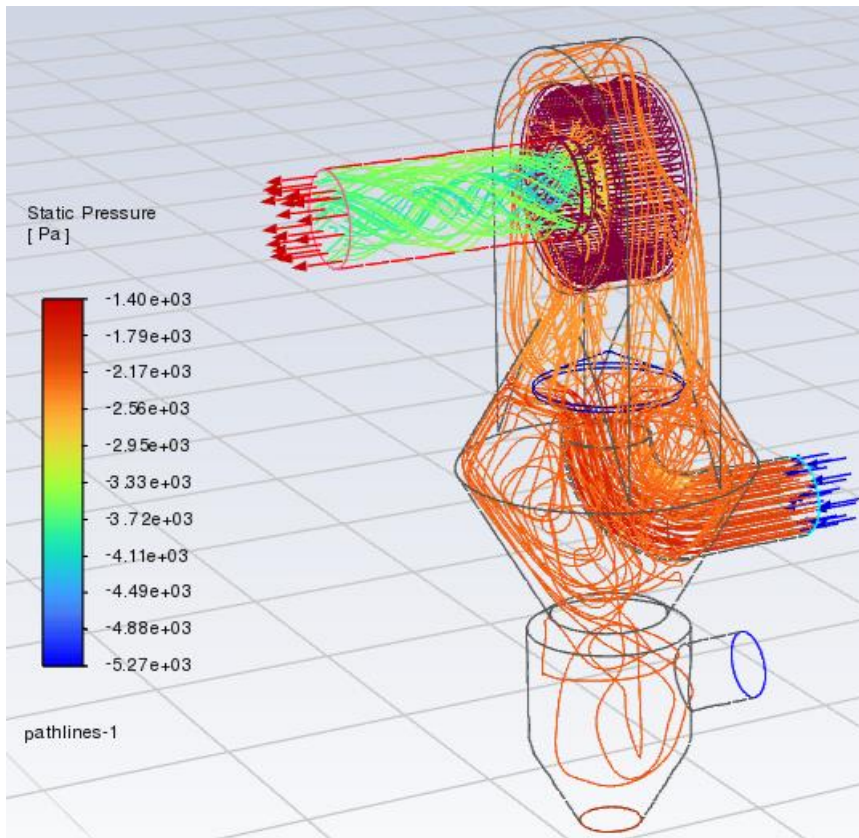
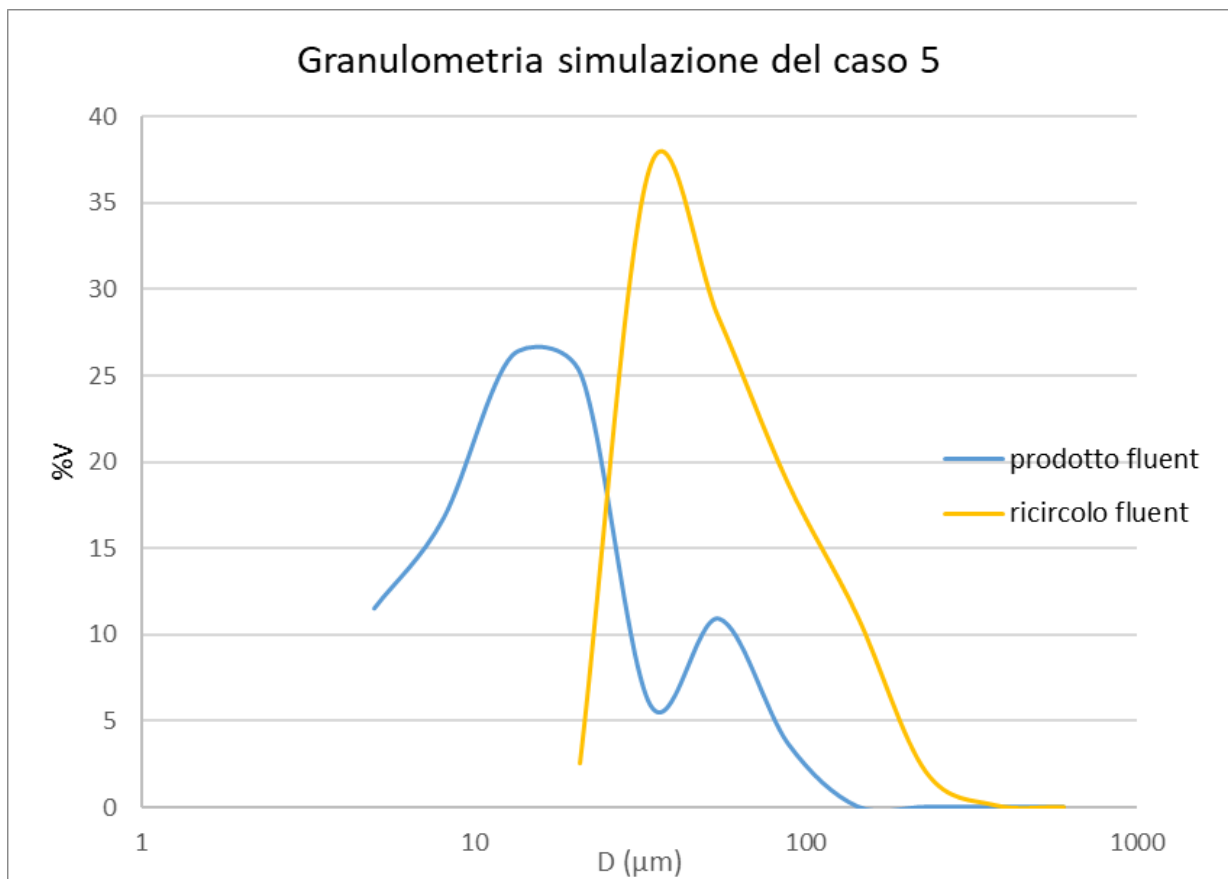


Figura 76 risultati della simulazione del caso 5 del separatore dinamico



prodotto fluent			ricircolo fluent			efficienza
Size (μm)	%V	portata (kg/s)	Size (μm)	%V	portata (kg/s)	
5,00	11,51	1,03E-03	5,00	0,00	0,00E+00	52,07
8,07	16,71	1,50E-03	8,07	0,00	0,00E+00	50,51
13,03	26,17	2,35E-03	13,03	0,00	0,00E+00	55,70
21,02	25,04	2,25E-03	21,02	2,54	3,52E-05	40,47
33,94	5,93	5,33E-04	33,94	36,89	5,11E-04	8,25
54,77	10,91	9,81E-04	54,77	28,38	3,93E-04	15,89
88,41	3,68	3,31E-04	88,41	18,82	2,61E-04	7,65
142,69	0,04	3,89E-06	142,69	11,18	1,55E-04	0,21
230,31	0,00	3,02E-07	230,31	2,06	2,86E-05	0,08
371,73	0,00	2,95E-08	371,73	0,12	1,61E-06	0,12
600,00	0,00	1,42E-09	600,00	0,00	2,31E-08	0,51



Bibliografia

- Alfatest strumentazione scientifica. (s.d.). *Granulometria laser-Laboratorio*. Tratto da <https://www.alfatest.it/tecniche/granulometria-laser-laboratorio/>
- Ansys Inc. (s.d.). *Fluids, Topics related to Fluent, CFX, Turbogrid and more*. Tratto da Ansys innovation space: <https://innovationspace.ansys.com/forum/forums/topic/mesh-motion/>
- Ansys Inc. (s.d.). *14.5.1. Overview of the Eulerian Model*. Tratto da Ansys Help.
- Ansys Inc. (s.d.). *18.4.1 Discretization of the Momentum Equation*. Tratto da <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node371.htm>
- Ansys Inc. (2020). ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution.
- Ansys Inc. (s.d.). *Meshing User's Guide*. Tratto da Ansys Help: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/wb_msh_d5l_jw5_jw.html
- Ansys Inc. (s.d.). *Presto! Discretization*. Tratto da Ansys Help.
- Ansys Inc. (s.d.). *18.4.3 Pressure-Velocity Coupling*. Tratto da <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node373.htm>
- Ansys inc. (s.d.). *24.3 Setting Initial Conditions for the discrete phase*. Tratto da Ansys Help.
- Ansys inc. (s.d.). *4.18.2 Wall Treatment for epsilon-based Models*. Tratto da Ansys Help.
- Ansys Inc. (s.d.). *4.3.3 realizable k-epsilon model*. Tratto da Ansys Help.
- Ansys, Inc. (2020). ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines.
- Chen, X., Zhong, W., Zhou, X., Jin, B., & Sun, B. (2012). CFD–DEM simulation of particle transport and deposition in pulmonary airway. *Powder Technology*, 309-318.
- Guangbin, D., Zongming, L., Guangli, C., shougen, H., & Jun, Z. (2010). Experimental investigation of gas–solid two-phase flow in Y-shaped pipeline. *Advanced Powder Technology*, 468-476.
- Holderbank Managment and Consulting. (2000). Holderbank Cement Seminar.
- Kharoua, N., AlShehhi, M., & Khezzar, L. (2015). Prediction of Black Powder distribution in junctions using the Discrete Phase Model. *Powder Technology*, 202-211.
- Kippax, P. (2005). Appraisal of the Laser. *Pharmaceutical Technology*.
- LB Officine Meccaniche Spa. (2020). *Corporate Company Profile*. Tratto da lb-technology.com.
- Microtrac particle caratterization. (s.d.). *Mie Scattering & Teoria di Mie, Spiegazione sull'uso dell'indice di rifrazione nella misurazione laser delle dimensioni granulometriche*. Tratto da <https://www.microtrac.it/it/conoscenza-base/mie-scattering-mie-theory>
- Sitec Castellarano. (2020). Microton.

- Treccani. (2013). *Differenze finite*. Tratto da Enciclopedia della matematica:
[https://www.treccani.it/enciclopedia/differenze-finite_\(Enciclopedia-della-Matematica\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/differenze-finite_(Enciclopedia-della-Matematica)/)
- Vakhrushev, A., Wu, M., Nitzl, G., & Ludwig, A. (2013). Discrete Phase Modelling for Continuous Casting: Model Verification and Application.
- Zhong, W., Yu, A., Liu, X., Tong, Z., & Zhang, H. (2016). DEM/CFD-DEM Modelling of Non-spherical Particulate Systems: Theoretical Developments and Applications. *Powder Technology*, 108-152.