

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Chimica Industriale “Toso Montanari”

Corso di Laurea Magistrale in

Chimica Industriale

Classe LM-71 - Scienze e Tecnologie della Chimica Industriale

**Analisi fluidodinamica di reattori utilizzati
per la produzione di biogas**

Tesi di laurea sperimentale

CANDIDATO

Lorenzo Sacchi

RELATORE

Prof. Alessandro Paglianti

CO-RELATORE

Prof. Giuseppina Montante

Sessione II

Anno Accademico 2012-2013

Indice

Introduzione	1
1. La miscelazione	3
1.1 I reattori agitati	3
1.2 Tipologie di agitatori e parametri caratteristici	6
1.3 L'importanza della fluidodinamica nei processi fermentativi	9
2. La tecnica PIV	11
2.1 Principi di funzionamento in sistemi monofase	11
2.2 Principi di funzionamento in sistemi bifase	13
2.3 Sorgente di luce: il laser	13
2.4 Le telecamere (CCD)	15
2.5 Il tracciante	17
3. Acquisizione ed elaborazione dei dati PIV	19
3.1 Caratteristiche fisiche e geometriche del reattore studiato in laboratorio	19
3.1.1 Configurazioni studiate	20
3.1.2 Gli agitatori utilizzati	20
3.2 Acquisizioni dei dati PIV	22
3.3 Elaborazione dei dati PIV	24
3.4 Scelta del sistema di riferimento e simbologia utilizzata	25
3.5 Messa a punto della tecnica e ottimizzazione dei parametri operativi	27
3.5.1 Spessore del fascio laser	27
3.5.2 Scelta dell'intervallo di tempo tra gli impulsi laser	30
3.5.3 Determinazione dell'apertura dell'obiettivo delle telecamere	34
3.5.4 Concentrazione di tracciante	36
4. Risultati sperimentali	38
4.1 Sistema monofase	38
4.1.1 Albero in posizione centrata: studio del campo di moto	38
4.1.2 Albero in posizione eccentrica: studio del campo di moto	42
4.2 Sistema bifase	51
4.2.1 Albero in posizione centrata: analisi preliminare	51

4.2.2 Albero in posizione centrata: studio del campo di moto	55
4.2.3 Albero in posizione eccentrica: analisi preliminare	60
4.2.4 Albero in posizione eccentrica: studio del campo di moto	66
5. Conclusioni	77
6. Bibliografia	81

Introduzione

La digestione anaerobica è un complesso processo biologico nel quale, in assenza di ossigeno, la sostanza organica viene trasformata in biogas. Affinché il processo abbia luogo è necessaria l'azione di diversi gruppi di microrganismi in grado di trasformare la sostanza organica in composti intermedi, principalmente acido acetico, anidride carbonica ed idrogeno, utilizzabili dai microrganismi metanigeni che concludono il processo fornendo il prodotto di interesse [Piccinini, 2004].

Per effetto del crescente interesse per le fonti di energia rinnovabile, la produzione di biogas attraverso questo tipo di processi ha recentemente guadagnato una considerevole attenzione.

A livello industriale, i processi fermentativi che hanno subito un maggiore sviluppo negli ultimi anni sono quelli che impiegano come sostanza organica scarti derivanti dal mercato agro-alimentare, particolarmente vantaggiosi a causa del basso costo e della facile reperibilità delle materie prime. L'economicità complessiva di simili processi può essere migliorata agendo su vari aspetti già a partire dalla scala di laboratorio. Tra questi, quelli associati alle caratteristiche fluidodinamiche, assumono un ruolo fondamentale, influenzando notevolmente i fenomeni di miscelazione, trasferimento di materia ed energia. Lo sviluppo di tecniche di diagnostica ottica, come l'Anemometria Laser-Doppler (LDA) o la Velocimetria a Immagini di Particelle (PIV), ha contribuito fortemente alla comprensione di questi aspetti [Alcamo et al., 2005].

Nei bioreattori industriali la miscelazione è tipicamente ottenuta tramite agitazione meccanica [Weiland, 2010]. Per reattori di volume molto elevato, le caratteristiche fluidodinamiche possono essere tutt'altro che omogenee: la miscelazione, infatti, buona in prossimità degli agitatori, può invece essere inadeguata in particolare in prossimità delle pareti fisse del reattore, dove, se si formano zone stagnanti, si può avere accumulo di materiale solido che, nel tempo, può portare alla riduzione del volume utile del digestore. La miscelazione, inoltre, non avviene sempre in modo continuo, ma è spesso intermittente, a causa del grande costo energetico della messa in funzione dei dispositivi di agitazione; questi possono essere attivi più volte al giorno o più volte ogni ora, con input energetici che variano da 10-100 W h m⁻³, a seconda del tipo di reattore, del tipo di agitatore utilizzato, e della quantità della materia prima.

La valutazione e lo studio del campo di moto all'interno dei reattori agitati assume

dunque una notevole importanza al fine di migliorare l'efficienza globale, e massimizzare di conseguenza l'economicità, dell'intero processo.

Questo lavoro di tesi ha avuto l'obiettivo di fornire la caratterizzazione di un reattore agitato meccanicamente attraverso l'impiego della tecnica PIV, che ha consentito di ottenere informazioni per la comprensione del processo globale di miscelazione. I dati ottenuti sono stati utilizzati per effettuare un confronto tra diverse configurazioni geometriche del reattore, esaminate sia in sistema monofase sia in bifase; sono stati inoltre confrontati i campi di moto ottenuti con due diverse tipologie di giranti, al fine di valutarne l'influenza sulla miscelazione.

1. La miscelazione

La miscelazione è un'operazione unitaria tra le più usate nell'industria chimica e di processo. Il fine di questa operazione è ridurre il grado di disomogeneità delle proprietà caratteristiche di un sistema al fine di raggiungere i risultati di processo desiderati; tali disomogeneità possono riguardare la concentrazione dei reagenti, le fasi presenti (sia il sistema bi- o multi-fase) o la temperatura.

Effetti secondari, ma spesso obiettivi principali del processo di miscelazione, sono favorire il trasferimento di materia, lo scambio di calore e la cinetica di reazione al fine di raggiungere specifiche caratteristiche dei prodotti [Paul et al., 2004].

In molte applicazioni dell'industria chimica, tale scopo è raggiunto impiegando l'agitazione meccanica che consente di movimentare il materiale costituente il sistema, attraverso l'uso di pale rotanti opportunamente sagomate. Al giorno d'oggi, i reattori agitati meccanicamente rimangono la prima scelta per applicazioni che prevedono la miscelazione di uno o più liquidi in presenza di solidi o gas in fase dispersa [Hall et al., 2005].

In questo capitolo saranno quindi descritti i componenti principali di un reattore agitato meccanicamente e i parametri caratteristici responsabili dell'efficienza dell'operazione di miscelazione.

1.1 I reattori agitati

Il reattore costituisce il nucleo centrale di un processo chimico, poiché rappresenta il luogo in cui avviene la trasformazione delle materie prime nei prodotti.

La scelta del reattore da utilizzare per un determinato processo dipende da diversi fattori:

- chimici: nella progettazione occorre che il tempo di residenza (o il tempo di riempimento) sia sufficiente a far procedere la reazione in esame, secondo la cinetica, fino al grado di conversione richiesto;
- trasferimento di materia: nel caso di reazioni eterogenee la velocità di reazione può essere controllata dalla velocità di diffusione delle specie che reagiscono, piuttosto che dalla cinetica chimica;
- trasferimento di calore: la rimozione o la fornitura dall'esterno del calore necessario per l'avanzamento della reazione;

- sicurezza: il confinamento di reagenti o prodotti pericolosi, il controllo della reazione e delle condizioni di processo.

A causa delle molteplici tipologie di processo in cui sono impiegati i reattori agitati, sono numerose le configurazioni sviluppate per favorire la miscelazione: le principali differenze riguardano sia la forma del reattore, sia la geometria del sistema di agitazione che provvede al mescolamento, sia il posizionamento del sistema di agitazione all'interno del reattore.

Generalmente, i sistemi utilizzati sono costituiti da recipienti cilindrici verticali, spesso con il fondo bombato e provvisti di setti frangivortice, dispositivi per l'agitazione, condotti di uscita ed entrata che permettono l'alimentazione e il prelievo di materia e, eventualmente, di apparati che provvedono allo scambio termico.

I setti frangivortice sono elementi piatti, di norma a forma di parallelepipedo allungato nella direzione di sviluppo dell'altezza del reattore, ancorati direttamente alla parete del recipiente. La configurazione tipica prevede quattro setti equispaziati (quindi a 90° tra loro), con una larghezza pari a 1/10 o 1/12 del diametro del reattore.

Il principale motivo della più larga diffusione a livello industriale di reattori dotati di setti frangivortici, è che, in assenza di essi, il liquido tende a muoversi seguendo traiettorie circolari, provocando la formazione di un vortice centrale, tanto più sviluppato quanto più è alta la velocità di agitazione, rendendo questi sistemi proibitivi per applicazioni in cui è richiesta una forte agitazione.

La funzione dei setti, infatti, è quella di ostacolare il movimento circolare impresso al fluido per effetto della rotazione dell'albero; oltre a prevenire la formazione del vortice centrale, la loro presenza favorisce la formazione di un flusso assiale di maggiore entità all'interno del liquido, con conseguente miglioramento dell'efficienza di miscelamento [Lamarque et al., 2010].

Esistono però, a livello industriale, applicazioni in cui è necessario l'uso di reattori non dotati di setti frangivortice (detti anche reattori *unbaffled*). Questo è il caso di sistemi con fluidi molto viscosi in cui, la presenza di setti, potrebbe portare alla formazione di zone stagnanti, diminuendo l'efficienza globale di miscelazione [Nagata, 1975]. Come secondo esempio, i reattori *unbaffled* sono largamente impiegati nei processi che prevedono la cristallizzazione di intermedi o prodotti: i setti, infatti, se presenti, potrebbero portare alla rottura per attrito dei cristalli in formazione generando fenomeni

di cristallizzazione secondaria, con una riduzione di omogeneità della distribuzione di dimensione dei cristalli ottenuti [Mazzarotta, 1993].

Come nel caso del reattore agitato studiato in questo lavoro di tesi, i reattori senza setti frangivortici potrebbero favorire inoltre i fenomeni di trasferimento di materia, rendendo questi sistemi particolarmente desiderabili per processi di catalisi eterogenea e degradazione biochimica [Alcamo et al., 2005].

Oltre che dalle caratteristiche e dalla velocità di rotazione dell'agitatore, il regime di moto nel reattore, dipende anche dalle proprietà fisiche del fluido da mescolare.

Generalmente, nelle applicazioni a viscosità medio-bassa e alle usuali velocità di rotazione dei sistemi di agitazione, il fluido si trova in regime turbolento: questo è definito come una condizione di moto, in cui le varie grandezze sono caratterizzate da variazioni casuali nel tempo e nello spazio [Petrone e Fioco, 2000].

È evidente che il processo di miscelazione in regime turbolento sia molto più efficiente in confronto al moto laminare (che si contraddistingue per l'assenza di forme vorticose); per questo motivo, la caratterizzazione del campo di moto in regime turbolento riveste una particolare importanza applicativa.

La descrizione del moto turbolento e il calcolo del campo di moto in un sistema agitato è però complessa. La difficoltà principale nello studio della turbolenza è costituita dalla presenza simultanea di un elevato numero di strutture vorticose di grandezza caratteristica differente, dette vortici: questi possono variare dalla dimensione fisica del corpo che ha provocato il moto, diminuendo fino a quella tale da permettere alle forze viscosive di dissipare in calore tutta l'energia cinetica.

È possibile ottenere una stima quantitativa della dimensione dei vortici più piccoli all'interno di un fluido in moto turbolento, ricorrendo alla scala dei vortici di Kolmogorov, applicabile alla turbolenza omogenea ed isotropa. Questa teoria si fonda sul principio che le dimensioni caratteristiche delle piccole scale di tutti i flussi turbolenti siano indipendenti dal sistema e determinate solo dalla viscosità cinematica ν e dalla potenza dissipata ε [Pope, 2000].

Con un procedimento di analisi dimensionale è possibile quindi ricavare le grandezze caratteristiche delle scale dissipative all'interno di ogni sistema.

Il moto all'interno di un reattore agitato è inoltre caratterizzato da fenomeni, definiti macroinstabilità, contraddistinti da una frequenza di apparizione molto bassa (agenti cioè su una scala di tempi molto lunga rispetto al periodo di rivoluzione della girante). La

natura di queste strutture è ancora oggetto di studio e dibattito; un punto fermo è comunque costituito dal fatto che la frequenza con cui essi si presentano è proporzionale al numero di giri dell'agitatore, e non dipende dal tipo di fluido impiegato [Galletti al., 2005].

1.2 Tipologie di agitatori e parametri caratteristici

La scelta dei sistemi di miscelazione assume un ruolo molto importante, poiché essi devono garantire, all'interno del sistema:

- la presenza di moti convettivi che impediscano la formazione di zone stagnanti;
- la presenza di punti a elevato sforzo di taglio (*shear*).

Più in generale, i criteri per la scelta dell'agitatore opportuno, qualunque sia la geometria e il regime di moto del sistema, sono l'ottenimento di una buona efficienza di mescolamento e la minimizzazione dei costi nell'ottica di massimizzare l'economicità del processo in esame.

Una prima classificazione divide i sistemi di agitazione in due grandi gruppi:

- agitatori veloci;
- agitatori lenti.

Tale classificazione prende come riferimento le dimensioni relative della girante e la sua velocità di rotazione in condizioni normali di impiego. Di seguito, vengono descritte le caratteristiche di alcuni degli agitatori maggiormente utilizzati.

Agitatori veloci: sono caratterizzati da un rapporto tra il diametro dell'agitatore (D) e il diametro del reattore (T) compreso tra 0.2 e 0.5; sono detti veloci poiché, affinché si raggiunga un buon grado di miscelazione in tutto il sistema, è necessario lavorare a velocità di rotazione relativamente alte.

L'energia totale fornita dall'agitatore al liquido può essere trasferita sia per produrre forte turbolenza all'interno del sistema, è il caso questo dei processi detti *shear-sensitive*, nei quali è necessaria una grande forza di taglio (*shear*), come ad esempio la dispersione di una o più fasi in un mezzo, sia per massimizzare la circolazione del fluido, favorendo i processi detti *Flow-sensitive*, come le operazioni di scambio di calore, miscelazione di liquidi o sospensione di solidi.

Gli agitatori veloci sono ulteriormente classificati in base campo di moto da essi generato all'interno del sistema:

- agitatori a flusso assiale → il flusso generato è essenzialmente assiale, con formazione di correnti parallele all'albero della girante; questi agitatori sono principalmente impiegati in processi di miscelazione, di sospensione dei solidi e di scambio di calore. Classico esempio di agitatore assiale è la turbina a pale inclinate (PBT, *Pitched-Blade Turbine*) costituita da un mozzo a cui vengono saldate un numero pari di pale che possono avere un'inclinazione compresa tra i 30° e i 60° sull'orizzontale (la configurazione più diffusa è quella con le pale inclinate a 45°). Una particolare classe è costituita dagli agitatori *Hydrofoil*; questi sono agitatori assiali a profilo ottimizzato, applicati in tutti quei campi in cui è necessario un flusso assiale a basso *shear* (possiedono quindi alta efficienza per il mescolamento di liquidi e la sospensione di solidi). Questi agitatori sono formati da tre o quattro pale affusolate con un profilo aerodinamico di inclinazione variabile lungo l'asse delle pale; ciò permette una maggiore uniformità della velocità del fluido nella sezione di scarico dell'agitatore, un minor consumo di energia e una capacità di pompaggio per unità di potenza superiore rispetto ad una PBT. Tipico esempio di agitatori *Hydrofoil* sono le turbine Lightnin A310, EMI Rotfoil e Lightnin A315;
- agitatori a flusso radiale → il flusso generato da questi tipi di agitatori, tralasciando la componente tangenziale, è essenzialmente radiale; essi vengono utilizzati in tutti quei processi in cui è necessaria un'elevata turbolenza, in particolare in prossimità dell'agitatore. Un classico esempio di agitatore radiale è la turbina Rushton che nella versione standard ha sei pale piatte di lunghezza, larghezza e diametro del disco rispettivamente pari 1/4, 1/5 e 3/4 del diametro dell'agitatore. Recenti sviluppi hanno portato alla costruzione di agitatori a pale concave, utilizzati soprattutto in applicazioni gas-liquido, poiché offrono una migliore capacità di dispersione del gas, e quindi possono trattare, senza che si instaurino fenomeni di ingolfamento, a maggiore portata di gas rispetto alle normali turbine Rushton. Si inseriscono in questa categoria anche gli agitatori ad alto *shear*, particolari turbine che lavorano ad alta velocità di rotazione e sono solitamente utilizzate per l'aggiunta di una seconda fase in processi di frantumazione, di dispersione di pigmenti e di creazioni di emulsioni; hanno una bassa capacità di pompaggio e per questo motivo vengono spesso accoppiati ad

agitatori assiali per garantire buon grado di miscelamento.

Agitatori lenti: caratterizzati da un rapporto tra il diametro della turbina e il diametro del reattore prossimo all'unità, hanno la funzione di rimescolare lentamente il contenuto dell'apparato e assicurare soprattutto il ricambio del fluido che si trova vicino alla parete; vengono quindi generalmente impiegati con fluidi molto viscosi, newtoniani o non newtoniani. È possibile distinguere agitatori tangenziali puri, tipici sono quelli ad ancora o a gabbia, e agitatori a elica, che forniscono al fluido un particolare moto dall'alto verso il basso in grado di favorire il mescolamento.

Considerando un reattore agitato che tratta un flusso monofase, è possibile caratterizzare il campo di moto all'interno dell'apparecchiatura attraverso la definizione di tre parametri adimensionali, dipendenti dalle caratteristiche fisiche del fluido trattato e dal tipo di agitatore:

- il numero di Reynolds (Re) che quantifica il rapporto tra le forze inerziali e quelle viscosi. Esso è identificativo del regime di moto del fluido all'interno dell'apparato, sia esso laminare (bassi numeri di Re) o turbolento (alti Re); è definito dall'equazione (Eq. 1.1):

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad \text{Eq. 1.1}$$

dove ρ , μ , N e D rappresentano rispettivamente la densità del fluido, la sua viscosità, il numero di giri ed il diametro dell'agitatore;

- il numero di Potenza (N_p) che caratterizza il consumo di energia dell'agitatore ed è definito dall'equazione (Eq. 1.2) riportata in seguito.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad \text{Eq. 1.2}$$

dove P , ρ , N e D rappresentano rispettivamente la potenza consumata all'albero dell'agitatore, la densità del fluido, il numero di giri e il diametro dell'agitatore. Tuttavia si valuta che la potenza effettiva da fornire all'albero della girante sia maggiore, in quanto il sistema è sempre interessato da fenomeni dissipativi, il cui contributo è stimabile intorno al 30-40% della potenza richiesta;

- il numero di Pompaggio (N_Q), proporzionale alla portata volumetrica

trattata dell'agitatore. Esso che indica il grado di ricircolazione presente nel reattore ed è definito dall'equazione (Eq. 1.3):

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3} \quad \text{Eq.1.3}$$

con Q, N e D che rappresentano rispettivamente la portata volumetrica trattata dalla turbina, il numero di giri ed il diametro dell'agitatore.

Se il processo di miscelazione di un fluido avviene all'interno di un reattore dotato di setti frangivortice in condizione monofase, il numero di potenza e il numero di pompaggio dipendono esclusivamente dal numero di Reynolds. È possibile perciò ricavare entrambi i parametri attraverso l'uso di grafici (curve di potenza o curve ricavate dalla dipendenza di N_Q in base al numero di Reynolds) o di correlazioni empiriche.

Un altro parametro importante per la descrizione di un sistema all'interno di un reattore agitato meccanicamente è la velocità al bordo della girante (V_{tip}), calcolata attraverso l'Equazione 1.4: essa è definita come la velocità massima che può raggiungere un elemento di fluido del sistema sottoposto ad agitazione.

$$V_{tip} = \pi ND \quad \text{Eq. 1.4}$$

con N velocità di rotazione dell'albero e D diametro della girante.

1.3 L'importanza della fluidodinamica nei processi fermentativi

Il campo di moto determinato del sistema di agitazione presente nel reattore influenza notevolmente l'intero processo di *mixing*: un'accurata caratterizzazione di tale moto risulta quindi di grande importanza al fine di valutare l'entità dei fenomeni fisici che avvengono all'interno del sistema.

Nella maggioranza dei processi biotecnologici la fluidodinamica del sistema assume un ruolo di primo piano, condizionando significativamente la velocità di trasferimento di materia tra le fasi presenti nel reattore.

L'esempio più peculiare è rappresentato dalle fermentazioni aerobiche nelle quali l'ossigeno è, tra i nutrienti impiegati, il substrato meno solubile [Rao et al., 2008]. Una popolazione microbica in respirazione attiva, infatti, può arrivare a consumare una grande quantità di ossigeno rendendo necessario un elevato coefficiente globale di trasferimento di materia del sistema gas-liquido (K_L) per garantire un continuo apporto di

questo nutriente al sistema. Attraverso correlazioni empiriche basate sull'uso di numeri adimensionali, è possibile ricavare l'andamento del coefficiente globale di scambio di materia in funzione del numero di Reynolds, a sua volta dipendente dai parametri fluidodinamici caratterizzanti il moto.

Aumentando l'efficienza di miscelazione è perciò possibile agire sul coefficiente globale di trasporto di materia del sistema gas-liquido (K_L) e di conseguenza migliorare l'intero processo.

Nel caso del processo fermentativo di cui è stata esaminata la fluidodinamica in questo lavoro di tesi, il sistema di agitazione possiede un ruolo fondamentale: esso, infatti, deve essere progettato in modo da garantire l'omogeneità della distribuzione della matrice organica solida e dei batteri all'interno del reattore, favorendo le funzioni metaboliche di questi ultimi e di conseguenza aumentando l'efficienza di produzione del biogas, minimizzando allo stesso tempo le spese energetiche.

2. La tecnica PIV

Al fine di caratterizzare la fluidodinamica dei sistemi trattati in questo lavoro di tesi è stato utilizzato il Velocimetro a Immagini di Particelle (abbreviato PIV, acronimo di *Particle Image Velocimetry*).

I progressi fatti negli ultimi vent'anni nei campi dell'ottica, dell'elettronica e dei sistemi di acquisizione video hanno permesso lo sviluppo della tecnica PIV, rendendo questa particolarmente adatta a visualizzazioni qualitative di flussi e a misure quantitative di complessi campi di velocità istantanei [Raffell et al., 1998].

L'uso di telecamere digitali ad alta definizione di ultima generazione e il parallelo sviluppo dei programmi di elaborazione e analisi delle immagini, infatti, hanno permesso di compiere un notevole progresso riguardo all'accuratezza dei risultati, grazie soprattutto al miglioramento della qualità delle immagini ottenute.

Un grande vantaggio di questa tecnica è che, al contrario di altre che impiegano sonde intrusive (come ad esempio l'anemometria a filo a caldo), la PIV, essendo basata su metodi ottici, non è invasiva e permette perciò l'acquisizione del campo di moto senza creare possibili interazioni con esso. Inoltre, fornendo la misura delle velocità in un piano e non in un punto come altre tecniche di misure analoghe (es. LDA), rende possibile l'individuazione del campo di moto anche condizioni non stazionarie [Galletti et al., 2008].

2.1 Principi di funzionamento in sistemi monofase

Il *set-up* sperimentale per una tipica acquisizione di dati attraverso la tecnica PIV è composto da più sistemi interagenti tra loro, come schematizzato in Figura 2.1.

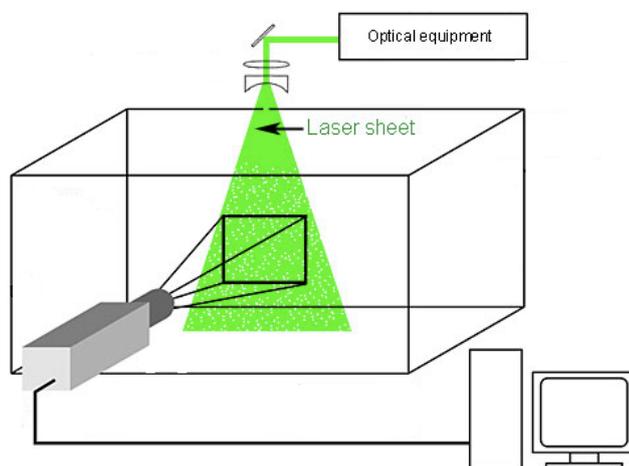


Fig. 2.1 :set-up di un tipico sistema monofase PIV

La strumentazione è costituita da:

- una sorgente di illuminazione pulsata e ad alta potenza (Laser), dotata di un sistema di lenti cilindriche che trasformano il raggio in una lama di luce;
- una telecamere digitale ad alta definizione e ad alta velocità di acquisizione (misure 2D);
- un tracciante solido utilizzato per inseminare il fluido, rilevabile dalla telecamera digitale dopo l'interazione con il fascio luminoso emesso dalla sorgente laser. Il tracciante deve avere una densità apparente prossima a quella del fluido e una dimensione ridotta in modo da seguire l'andamento del campo di moto del liquido senza interagire con esso;
- un acquirettore/elaboratore di immagini che sincronizzi laser e telecamere;
- un *software* per l'elaborazione delle immagini acquisite.

Il principio di funzionamento della PIV è basato sul rilevamento e l'analisi degli spostamenti delle particelle di tracciante in sospensione nella regione di fluido che si vuole caratterizzare.

Il fascio di luce illumina le particelle di tracciante in due istanti successivi posti a una distanza temporale nota e definita; l'intervallo è breve, dell'ordine dei centesimi di secondo, e variabile secondo le velocità caratteristiche del sistema.

La posizione delle particelle di tracciante è determinata da un rilevatore CCD (*Charge Coupled Device*), dotato di un opportuno filtro ottico, posto ortogonalmente rispetto al fascio di luce emesso dal laser; questo è sincronizzato con il laser in modo da acquisire sul *frame 1* la posizione delle particelle all'istante del primo impulso di luce e la posizione delle particelle all'istante del secondo impulso sul *frame 2*.

Per l'analisi ciascuna immagine viene suddivisa in più aree, dette aree di interrogazione: lo spostamento compiuto dalle singole particelle di tracciante nel tempo che intercorre tra le due immagini è determinato da un *software* che provvede, attraverso un algoritmo di correlazione, a quantificarlo tramite l'analisi delle coppie di immagini prodotte. La velocità puntuale è quindi ottenuta dal rapporto tra lo spazio percorso dalla particella e il tempo intercorso tra l'acquisizione delle due immagini [DynamicStudio v3.20 User's Guide, 2011].

2.2 Principi di funzionamento in sistemi bifase

Il principio per l'acquisizione delle immagini e il processo di elaborazione dei dati sono analoghi a quelli descritti per i sistemi monofase, tuttavia sono impiegate particelle di solido, in aggiunta alle particelle di tracciante della fase liquida, e due telecamere (Fig. 2.2): una, dotata di un opportuno filtro ottico, registra il movimento delle particelle di tracciante della fase liquida; l'altra, dotata di un secondo diverso filtro ottico, rileva invece il movimento delle particelle costituenti la fase solida dispersa. In questo modo ciascuna telecamera lavora in parallelo e indipendentemente dall'altra.

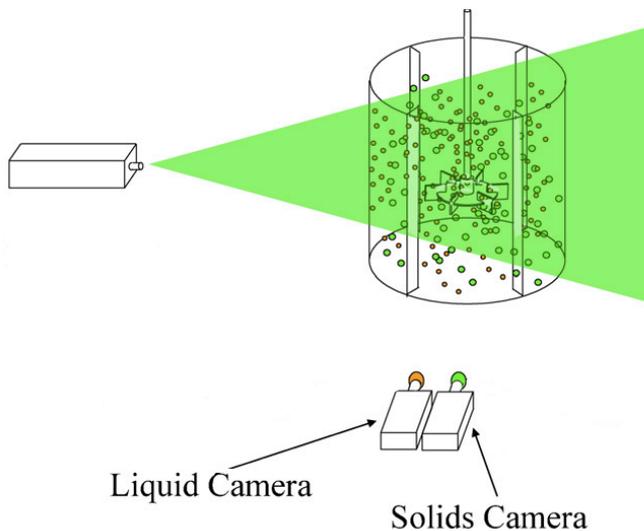


Fig. 2.2: set-up di un tipico sistema bifase PIV [Montante et al., 2012]

In seguito, attraverso il *software* che applica l'algoritmo di correlazione su ciascuna coppia di immagini acquisite dalle telecamere, è possibile ottenere contemporaneamente il campo vettoriale di velocità di entrambe le fasi.

2.3 Sorgente di luce: il laser

Il laser, acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, è un dispositivo utilizzato per ottenere fasci intensi e concentrati di radiazioni elettromagnetiche coerenti nei campi dell'infrarosso, del visibile e dell'ultravioletto. La luce laser è perciò caratterizzata da alta potenza e forte direzionalità.

Il processo usuale di emissione delle radiazioni luminose, detto irraggiamento per eccitazione o per luminescenza, consiste nello spontaneo ritorno di un elettrone di un atomo al suo livello energetico stazionario da un livello più alto in cui esso è venuto a trovarsi; in tale transizione viene emesso un fotone la cui energia è pari alla differenza ΔE tra i livelli in questione e la cui frequenza ν è pari a $\Delta E/h$, con h costante di Planck. I

fotoni emessi in questi atti spontanei d'irraggiamento non sono però correlati tra loro: la radiazione emessa è intrinsecamente incoerente [Atkins e De Paula, 2006].

La transizione dal livello più alto al livello fondamentale può però avvenire, oltre che spontaneamente, per emissione stimolata; le sorgenti laser funzionano sfruttando questo tipo di emissione.

Ciò accade se l'elettrone che si trova al livello superiore interagisce con un fotone avente frequenza ν ; in questo caso l'elettrone, dopo l'interazione, torna al livello energetico più basso e emette un fotone coerente con quello che ha stimolato l'emissione, vale a dire avente la stessa frequenza ν , la stessa fase iniziale e la stessa direzione di propagazione.

In condizioni di equilibrio termodinamico il numero di elettroni allo stato eccitato è però molto minore del numero di elettroni allo stato stazionario, perciò gli atomi vengono prima eccitati con una sorgente energetica esterna di frequenza determinata (questa è detta fase di pompaggio) in modo che i fotoni incontrino un più grande numero di elettroni a livelli più alti e sia quindi favorita l'emissione di altri fotoni coerenti con quelli incidenti.

L'amplificazione della luce è poi ottenuta mediante successive riflessioni dei fotoni in una cavità risonante, costituita essenzialmente da due specchi paralleli posti alle estremità dello strumento, di cui uno totalmente e l'altro parzialmente riflettente. Durante il percorso fra uno specchio e l'altro i fotoni colpiscono altri atomi eccitati che a loro volta emettono altri fotoni caratterizzati dalla medesima frequenza e fase di quelli già presenti: il tutto genera una radiazione monocromatica coerente e di alta intensità. Grazie allo specchio semi-argentato infine, parte della radiazione è fatta filtrare all'esterno rendendola disponibile per l'uso.

Un dispositivo laser è quindi composto da tre componenti principali:

- il materiale attivo, costituito dagli atomi responsabili dell'emissione dei fotoni;
- il sistema di pompaggio, la sorgente esterna che eccita gli atomi del materiale attivo mediante energia elettromagnetica o chimica;
- il sistema ottico, che amplifica e rende disponibile la luce laser.

I laser vengono classificati, a seconda della natura del materiale attivo utilizzato, in laser a stato solido, a gas, a semiconduttore, a liquido, ad elettroni liberi. Nelle applicazioni PIV si utilizzano laser allo stato solido.

La tecnica PIV richiede illuminazione solo nel momento in cui le telecamere

acquisiscono le immagini, rendendo necessario l'utilizzo di laser pulsati; fra questi i più utilizzati sono quelli a doppia cavità. Essi infatti permettono, a differenza di quelli a singola cavità, una doppia pulsazione senza restrizioni riguardo al tempo che intercorre tra le due pulsazioni in serie. Questo concede grande libertà nello scegliere l'intervallo tra gli impulsi, senza avere variazioni della quantità di energia emessa per ogni impulso [Raffel et al., 1998].

Nel presente lavoro di tesi, le misure sono state eseguite utilizzando un laser Nd:YAG LITRON, che emette con frequenza massima pari a 15 Hz: il mezzo attivo è un cristallo YAG (Ittrio-Alluminio-Granato) drogato con neodimio (Nd) in cui il fascio di luce è generato da ioni Nd^{3+} , incorporati nei cristalli YAG. L'Nd:YAG possiede un'alta amplificazione, buone proprietà termiche e meccaniche e può essere pompato otticamente con luce bianca attraverso l'uso di una lampada stroboscopica o con diodi laser.

Lo schema di funzionamento del laser utilizzato in questo lavoro per le acquisizioni PIV è mostrato in Figura 2.3.

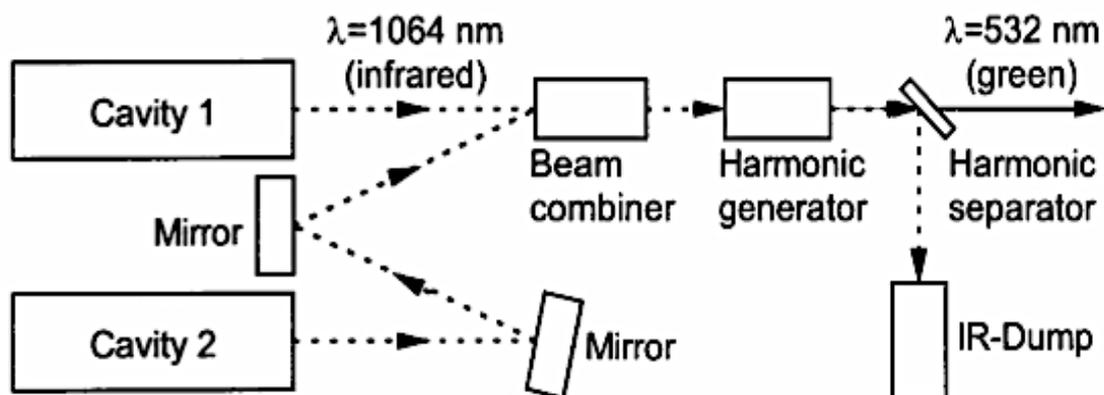


Figura 2.3: laser a doppia cavità per PIV [DynamicStudio v3.20 User's Guide, 2011]

I laser YAG emettono una luce di lunghezza d'onda di 1064 nm (IR): nelle applicazioni PIV tuttavia, questa lunghezza d'onda non è utilizzabile in quanto le telecamere sono maggiormente sensibili allo spettro blu-verde e risulterebbe difficile allineare un fascio di luce invisibile. Si utilizza quindi un generatore armonico che porta la luce laser nel visibile dimezzando la sua lunghezza d'onda a 532 nm.

2.4 Le telecamere (CCD)

Strumento fondamentale per l'acquisizione dei dati è la telecamera, il cui scopo è di

registrare la posizione delle particelle di tracciante nei due istanti successivi di tempo. Storicamente furono usati film fotografici, ma col tempo questi sono stati sostituiti dai dispositivi digitali tuttora in uso.

I dispositivi maggiormente impiegati, utilizzati anche in questo lavoro di tesi, sono telecamere digitali dotate di un sensore CCD (dall'inglese *Charged Coupled Device*), detto anche in italiano DAC (Dispositivo ad Accoppiamento di Carica).

Il CCD è un componente elettrico formato da una riga, o da una griglia, di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi, detti pixel, sono accoppiati in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica a un altro elemento adiacente. I fotoni che colpiscono i pixel vengono poi convertiti in segnale elettrico, il cui voltaggio viene codificato in una scala di colori in base alla quale viene poi ricostruita l'immagine. Le telecamere, dotate di sensori CCD, sono utilizzate per le acquisizioni PIV in quanto permettono di registrare un segnale digitale istantaneo raffigurante la posizione delle particelle di tracciante nel moto [Montante et al., 2012].

Per le configurazioni in sistemi monofase è stata utilizzata una sola telecamera, dotata di un filtro ottico, in modo da rilevare esclusivamente la posizione del tracciante in sospensione all'interno della fase liquida; per le prove in sistemi bifase vengono invece impiegate due telecamere, dotate di filtri ottici diversi, in modo che una registri solo il movimento delle particelle di tracciante della fase liquida, mentre l'altra rilevi unicamente le particelle di tracciante della fase solida.

Per tutti i sistemi analizzati in questo lavoro, le telecamere utilizzate sono state *HiSense MkII* (Fig. 2.4) con un sensore CCD da 1344x1024 pixel e equipaggiate con un obiettivo *Nikon* da 50mm.



Fig. 2.4: telecamera utilizzata per le acquisizioni attraverso la tecnica PIV

Le particelle di tracciante, le cui caratteristiche fisiche sono riportate nel paragrafo seguente, impiegate per rilevare il campo di moto del liquido dopo l'irraggiamento con la luce laser, emettono in fluorescenza a una lunghezza d'onda pari a 584 nm. La telecamera è stata dotata di un filtro ottico di colore arancione che lascia passare questa luce ma esclude dalle immagini acquisite riflessi o emissioni di piccole particelle (polvere, ecc.), presenti all'interno del reattore, che emetterebbero a una lunghezza d'onda di 532 nm. La telecamera per la rilevazione del tracciante rappresentativo della fase solida è stata invece provvista di un filtro ottico verde in modo da registrare la posizione delle sole particelle costituenti la fase solida, senza avere interferenze con le emissioni del tracciante della fase liquida.

Importante ricordare che le telecamere richiedono una calibrazione per poter effettuare misure quantitative; è necessario indicare quale sia il rapporto tra i pixel delle immagini in formato digitale e le dimensioni di ciò che si sta osservando nella realtà ($S = \frac{\text{pixel nell'immagine}}{\text{pixel reali}}$), definendo, attraverso il *software*, la misura di un oggetto preso come riferimento.

2.5 Il tracciante

Per far sì che la caratterizzazione fluidodinamica sia accurata, è necessario che le particelle traccianti seguano fedelmente il moto della fase continua di cui si intende ottenere il campo di velocità; per questo motivo la scelta delle particelle di tracciante risulta di particolare importanza per ottenere risultati affidabili.

Le caratteristiche fondamentali per un buon tracciante sono:

- la capacità di riflettere la luce;
- la capacità di seguire il moto del mezzo nel quale sono sospese senza interferire con esso;
- essere chimicamente inerte con il sistema;
- essere non tossico, non corrosivo, non abrasivo;
- essere possibilmente poco costoso.

La capacità di riflettere la luce incidente è molto importante affinché le particelle di tracciante siano visibili dalle telecamere. Quando un'onda piana incide su una sfera di dimensioni arbitrarie e con indice di rifrazione diverso da quello del mezzo, si ha la generazione di un'onda di riflessione; questo fenomeno è detto *scattering*.

Le particelle aventi dimensioni maggiori generano un'onda di scatter più intensa di quelle piccole per cui la scelta della dimensione deve rispondere alla necessità di un buon segnale alle telecamere, ma allo stesso tempo la scelta della tipologia del tracciante deve essere fatta considerando il fluido utilizzato e le velocità caratteristiche del moto.

Per quanto riguarda le applicazioni in sistemi monofase, i traccianti più comuni per la fase liquida sono [DynamicStudio v3.20 User's Guide, 2011]:

- particelle di poliammide di forma sferica irregolare e densità uguale all'acqua;
- sfere di vetro;
- sfere di vetro cavo rivestite in argento;
- particelle polimeriche fluorescenti.

In sistemi bifasici, i traccianti utilizzati per la fase liquida potrebbero teoricamente rimanere quelli sopradescritti, mentre per la fase solida la tipologia di tracciante deve essere scelta in base alle caratteristiche (dimensioni, densità, forma) del solido di cui si intende esaminare il comportamento.

Poiché nei sistemi multifase risulta di fondamentale importanza disaccoppiare le informazioni provenienti dai traccianti utilizzati per misurare il campo di moto delle due fasi, è importante scegliere traccianti che emettano a lunghezze d'onda diverse.

In questo lavoro, sono state utilizzate sfere di polimetilmetacrilato (PMMA) rivestite di uno strato fluorescente a base di Rodamina-B, che si eccita a una lunghezza d'onda di 532 nm ed emette a 584 nm, come tracciante per la fase liquida e particelle di PMMA, di dimensioni comprese tra i 150 e i 210 μm e densità pari a 1200 Kg/m^3 , per rappresentare la fase solida, che emettono luce a 532 nm.

3. Acquisizione ed elaborazione dei dati PIV

In questo capitolo sono descritte le caratteristiche geometriche e le configurazioni studiate del reattore agitato sottoposto ad analisi. Sono indicate, inoltre, le procedure sperimentali utilizzate nelle diverse prove effettuate con la tecnica PIV.

3.1 Caratteristiche fisiche e geometriche del reattore studiato in laboratorio

Il reattore su cui sono state effettuate le misure è stato realizzato interamente in plexiglass in modo da essere trasparente e permettere l'applicazione della tecnica di analisi prescelta (vedi "2. La tecnica PIV"). Le dimensioni del reattore sono state scelte a partire dalle caratteristiche geometriche e dalle condizioni operative di un reattore industriale, utilizzato per produrre biogas da vinacce, riportate in Tabella 1. Per il passaggio di scala, sono stati considerati diversi criteri.

Fissato il diametro del reattore di laboratorio, T , le dimensioni geometriche sono state ottenute con il criterio della similitudine geometrica sulla base dei rapporti tra le dimensioni del reattore industriale (Tabella 3.1). È stato inoltre scelto di realizzare il reattore di altezza H_{reatt} superiore al valore scalato, per avere la possibilità di studiare l'effetto di diverse altezze di liquido sul comportamento fluidodinamico.

Reattore industriale (a)			Scale-down: criterio P/V costante (b)		
T	24.00	m	T	0.490	m
D	4.43	m	D	0.097	m
H	7.30	m	H	0.149	m
N	12.6	rpm	H_{reatt}	0.250	m
V_{tip}	2.85	m/s	N	146	rpm
N_p	0.60	-	V	0.028	m ³
P	8819.25	W/m ³	P	0.075	W
ρ_L	1000.00	kg/m ³	Re	2.3E+04	-
V	3302.44	m ³			
P/V	2.67	W/m ³			
Re	4.0E+06	-			

Tab. 3.1: caratteristiche geometriche e condizioni operative del reattore industriale (a) e del reattore scalato utilizzato in laboratorio (b)

3.1.1 Configurazioni studiate

Il reattore, agitato meccanicamente, di forma cilindrica e non dotato di setti frangivortici, è stato caratterizzato in due configurazioni: con l'albero posto al centro del reattore (Fig. 3.1) e con l'albero spostato in posizione eccentrica (Fig. 3.2). Quest'ultima configurazione è quella adottata industrialmente.

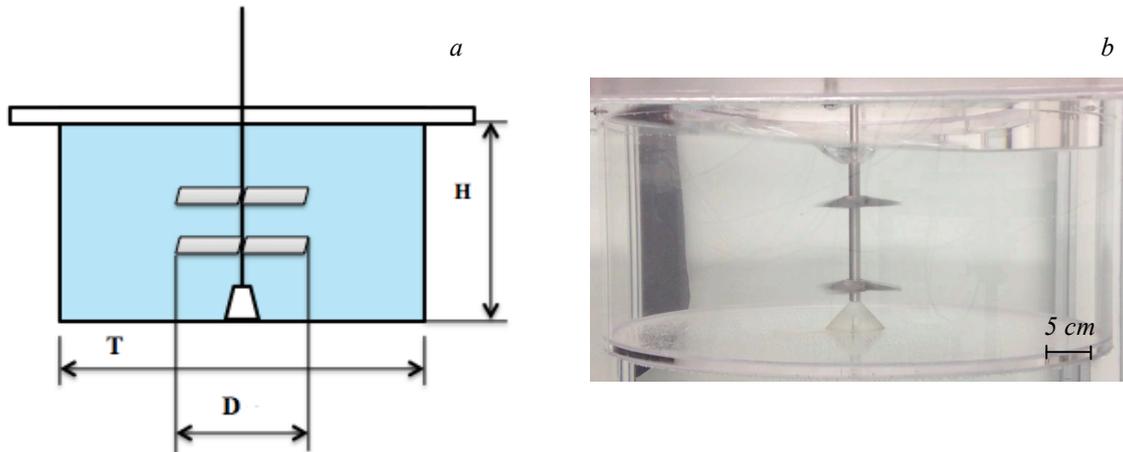


Fig. 3.1: reattore schematicizzato (a) e foto del reattore utilizzato (b) con albero in posizione centrata

L'albero del motore, equipaggiato con due giranti distanziate di 8.7 cm, attraversa tutto il reattore fino ad un supporto tronco conico che si trova sul fondo.

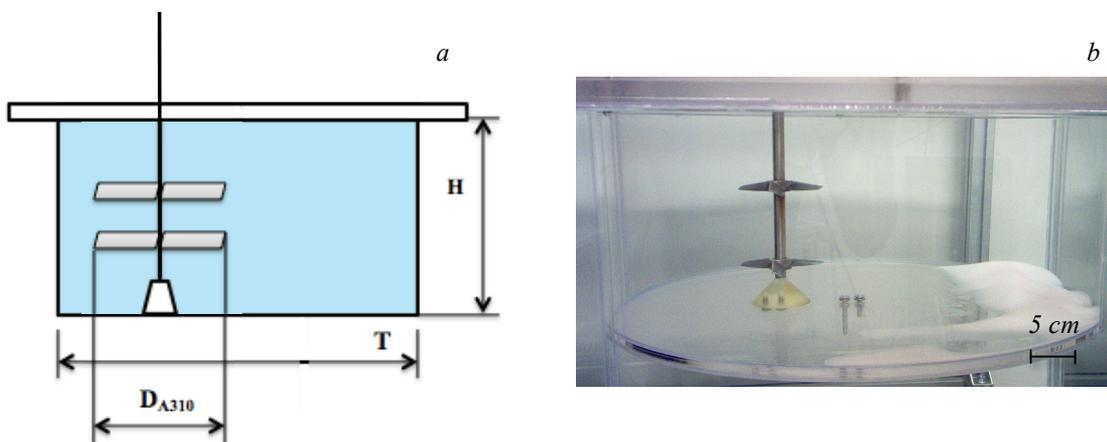


Fig. 3.2: reattore schematicizzato (a) e foto del reattore utilizzato (b) con albero in posizione eccentrica

3.1.2 Gli agitatori utilizzati

Gli agitatori impiegati per la caratterizzazione delle configurazioni studiate del reattore agitato in condizioni bifase e monofase con albero centrato ed eccentrico, sono chiamati *Lightnin A310* e fanno parte della classe di agitatori veloci *Hydrofoil* (vedi “1.2 Tipologie di agitatori e parametri caratteristici”).

Una turbina di questa tipologia, è composta di tre pale profilate, saldate direttamente al mozzo, che producono un flusso prevalentemente assiale. In Figura 3.3 è riportato uno schema delle A310 utilizzate.

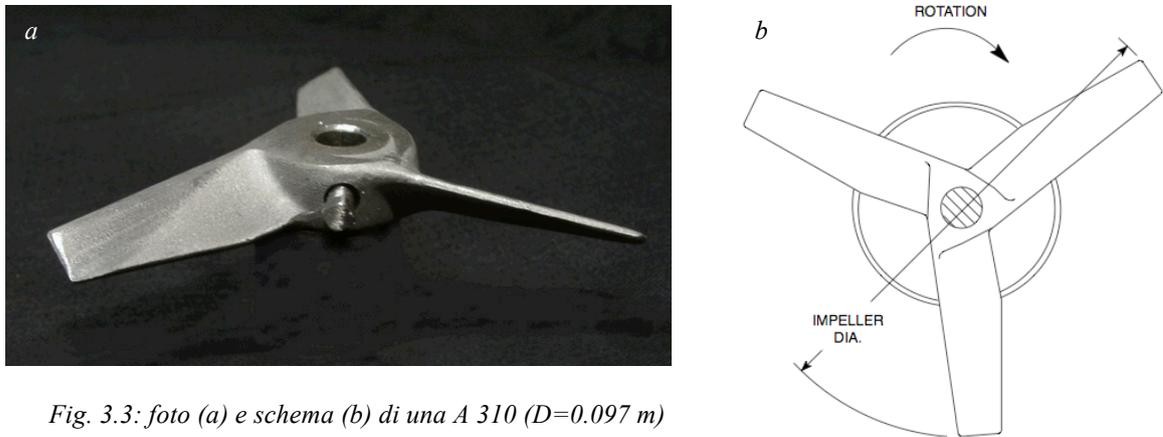


Fig. 3.3: foto (a) e schema (b) di una A 310 ($D=0.097\text{ m}$)

Le due turbine sono state montate all'albero in posizione eclissata l'una rispetto all'altra (quindi sovrapposte, con un angolo di 0° tra le pale).

La configurazione con albero in posizione eccentrica, in condizione monofase, è inoltre stata caratterizzata utilizzando specifiche giranti *Hydrofoil* (Fig. 3.4), scalate direttamente da quelle usate industrialmente: in questo modo è stato possibile avere una analisi ancora più rappresentativa del moto all'interno del reattore reale.



Fig. 3.4: foto (a) e vista in sezione (b) di una girante *Hydrofoil* ($D=0.097\text{ m}$)

Questi agitatori sono detti a triplo strato poiché sono costituiti da due pale formate da tre lamine di acciaio saldate in modo da definirne il profilo.

Le due giranti utilizzate hanno diametro uguale alle *Lightnin* A310 descritte in precedenza e sono state montate all'albero perpendicolarmente l'una all'altra, in analogia con la configurazione industriale.

Nel presente lavoro, quando verrà caratterizzato il reattore nella configurazione eccentrica in sistema monofase (vedi “4. Risultati sperimentali”), sarà fornito un confronto tra i campi di moto venutisi a instaurare per effetto delle due tipologie di giranti. Visto il diverso verso di rotazione delle giranti, orario per le A310 e antiorario per le *Hydrofoil*, al fine di effettuare il confronto è stato necessario, prima del cambio di giranti, invertire il verso di rotazione dell’albero andando ad agire sui cavi di alimentazione del motore collegato all’albero.

3.2 Acquisizione dei dati PIV

Acquisizioni su piani verticali: scopo di queste prove è stato quello di misurare le componenti radiali e assiali delle velocità delle particelle all’interno del reattore. La telecamera è stata posta su di un piedistallo, posizionato davanti al reattore in modo da essere ortogonale al fascio laser.

Per le configurazioni centrate con giranti A310, sia in monofase che in bifase, il piano verticale studiato è stato quello passante per l’albero (Fig. 3.5, a); sono stati esaminati inoltre ingrandimenti di questo piano (un esempio è riportato in Fig. 3.5,b), ottenuti avvicinando la telecamera al reattore, in modo da diminuire l’ampiezza dell’area di interrogazione e di conseguenza migliorare la risoluzione spaziale della telecamera.

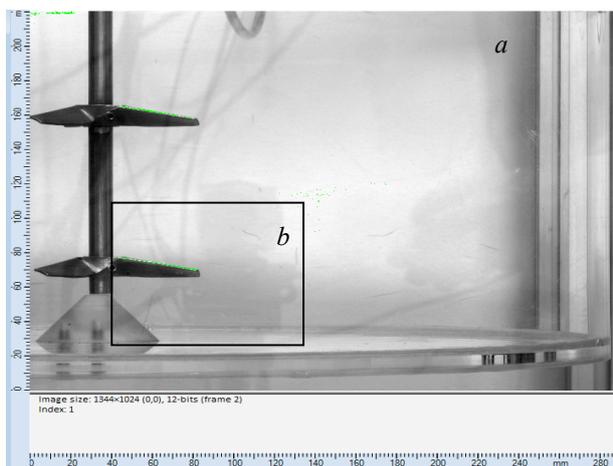


Fig. 3.5: piano verticale analizzato per le configurazioni con albero al centro in sistema bifase (a) e ingrandimento sulla girante inferiore esaminato in condizione bifase (b)

Per risoluzione spaziale si intende in genere lo spazio minimo tra due oggetti per cui, all’interno dell’immagine, essi siano ancora visibili come due entità separate. Nell’ambito della tecnica PIV, essa è definita dalla relazione (Eq. 3.1):

$$\lambda_{\text{struct}} = S N_{\text{int}} d_{\text{pitch}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

dove λ_{struct} è la minima lunghezza rilevabile dalla telecamera, S è il fattore di scala determinato dal *software*, N_{int} è l'ampiezza in pixel dell'area di interrogazione (in questo lavoro di tesi sempre 32 px) e d_{pitch} è la distanza tra due pixel nel sensore CCD (per la telecamera utilizzata pari a $6,45E-03$ mm).

Dalla relazione si evidenzia come avvicinando la telecamera, a causa della diminuzione del fattore di scala S e di conseguenza perciò anche della minima lunghezza che la telecamera riesce a rilevare, è possibile aumentare la qualità dell'acquisizione.

Per la configurazione con albero in posizione eccentrica, in bifase è stato studiato il piano verticale di maggiore lunghezza passante per l'albero (Fig. 3.6) con giranti A310, in modo da avere indicazione sulla velocità e sul moto delle particelle caratterizzanti la fase solida e la fase liquida nella zona delle giranti e in quella vicino alla parete più lontana.

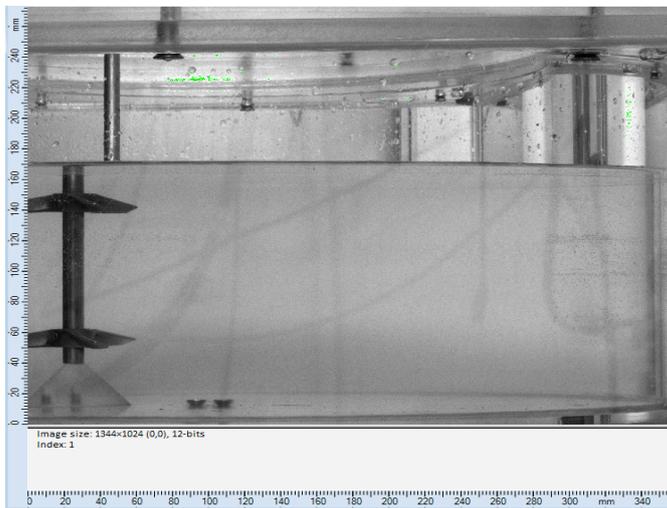


Fig. 3.6: piano verticale esaminato per le configurazioni con albero eccentrico in bifase

In monofase, il reattore è invece stato caratterizzato in tre piani verticali (Fig. 3.7): quello di maggiore lunghezza passante per l'albero (A), sia con giranti A310 che con giranti *Hydrofoil*, quello di minore lunghezza passante per l'albero (B), con giranti *Hydrofoil*, e un piano passante per il centro del reattore ma non per l'albero (C), anch'esso con giranti *Hydrofoil*, in modo da avere un'analisi completa del moto all'interno del reattore.

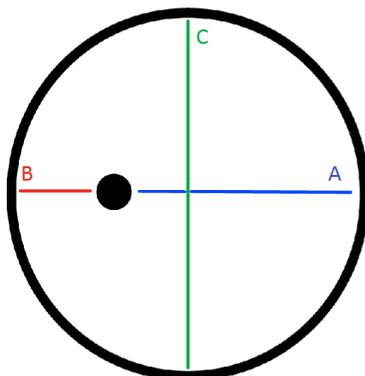


Fig. 3.7: piani verticali studiati per le configurazioni con albero eccentrico in monofase

Acquisizioni su piani orizzontali: con queste misurazioni è stato possibile determinare le componenti radiali e tangenziali delle velocità delle particelle all'interno del reattore; il fascio di luce emessa dal laser è stato dunque ruotato di 90° rispetto alle acquisizioni sui piani verticali in modo che tagliasse orizzontalmente il reattore.

Il problema del posizionamento della telecamera al di sotto del reattore è stato risolto, per ragioni di spazio, mediante l'utilizzo di uno specchio inclinato di 45° , posizionato sotto il reattore: sfruttando la riflessione della luce, secondo la legge di Snellius-Cartesio, l'immagine del fondo del reattore è stata riflessa dallo specchio in direzione della telecamera la quale, al fine di una buona misurazione, è stata opportunamente orientata in modo da ricevere la luce perpendicolarmente e senza distorsioni.

La configurazione esaminata è stata quella in bifase con l'albero in posizione eccentrica e giranti A310. In Fig. 3.8 è mostrata una foto del piano di analisi scelto.



Fig. 3.8: piano orizzontale esaminato per la configurazione con albero eccentrico in bifase

3.3 Elaborazione dei dati PIV acquisiti

È qui riportata la procedura seguita per l'elaborazione delle immagini acquisite con la tecnica PIV sui piani orizzontali e verticali, al fine di ottenere il campo di moto medio del fluido sottoposto ad agitazione.

La sequenza delle operazioni necessarie [Raffel et al., 1998], applicata tramite l'uso del *software Dynamic Studio* a ogni serie di coppie di immagini acquisite dalla telecamera, è la seguente:

1. *Image Mean*: metodo numerico che calcola l'intensità media di tutti i pixel che

compongono l'immagine;

2. *Image Arithmetic*: l'immagine media ottenuta dopo il punto 1. viene sottratta da tutte le immagini acquisite in modo da attenuare il rumore associato al segnale;

3. *Cross-Correlation*: genera un vettore velocità medio per ogni area di interrogazione (IA), dato dal picco principale della funzione di *cross-correlazione* diviso per il tempo trascorso tra le due immagini;

4. *Peak Validation*: valuta la qualità del vettore velocità medio restituito dalla funzione di *cross-correlazione* attraverso il confronto del picco principale con il secondo picco individuato. Se il rapporto tra i due picchi è minore di un valore preimpostato (nel presente lavoro fissato a 1.2), allora la correlazione è di tipo casuale e il vettore è scartato. In caso contrario, esiste correlazione e il vettore viene accettato;

5. *Range Validation*: occorre precisare che la massima velocità del fluido nel reattore è pari alla velocità al bordo della girante, calcolata come $V_{tip} = \pi ND$. Per ogni velocità di agitazione considerata, quindi, vengono eliminati tutti vettori velocità con modulo maggiore o uguale a V_{tip} ;

6. *Vector Statistics*: restituisce la mappa vettoriale risultante dalla media delle mappe istantanee ottenute dalla *Range Validation*.

Per ogni acquisizione il risultato di questa serie di operazioni è, oltre all'immagine del campo di moto medio con espressi i moduli delle velocità in ogni punto, un foglio di calcolo riassuntivo dove, per ogni vettore presente nella mappa, sono riportati: posizione (in pixel e mm) rispetto all'origine del sistema di riferimento considerato dal *software*, le componenti della velocità media, deviazione standard, varianza, status del vettore (0 = vettore valido; 1 = vettore rigettato, generato da disturbi) e il numero N di vettori validi su cui viene fatta la media in ogni posizione del campo.

Per ottenere una mappa vettoriale più corretta i dati sono stati ulteriormente rielaborati, eliminando i vettori con bassa validazione ($N < 1/2$ delle immagini totali acquisite), agendo sul foglio di calcolo ottenuto dal *software*; per ogni acquisizione, la mappa vettoriale è stata poi ricostruita attraverso il programma Tecplot360.

3.4 Scelta del sistema di riferimento e simbologia utilizzata

Al fine di rappresentare i campi di moto ottenuti, è stato operato un cambiamento di

coordinate rispetto a quelle utilizzate dal programma di elaborazione delle immagini a supporto della PIV: mentre il *software* usa un sistema di riferimento cartesiano piano, centrato sul vertice in basso a sinistra dell'immagine acquisita, i risultati sono stati trasformati in un sistema di coordinate cilindriche r , θ , z centrato, per ogni configurazione studiata, al centro del cono a supporto dell'albero, con r coordinata radiale, θ circonferenziale e z assiale.

Lo spostamento dell'origine del sistema cartesiano è stato possibile intervenendo sulle coordinate presenti nei fogli di calcolo ottenuti dopo la fase finale di elaborazione delle immagini acquisite. Le convenzioni adottate circa il verso delle coordinate per le acquisizioni verticali, sono state $z > 0$ verso l'alto e $r > 0$ in direzione delle pareti del reattore, con centro nella posizione prefissata.

In seguito è presentato un esempio di tabella con i dati di acquisizione e i valori per il cambio di coordinate (Tab. 3.1) con il rispettivo campo di moto (Fig. 3.9) ottenuto dopo l'elaborazione.

Condizioni operative		
N	300	rpm
Δt	600	μs
Area di misura	291 x 186	mm^2
IA	9.4 x 9.4	mm^2
Coordinate origine	$x_0 = 101.44$ mm $y_0 = 81.22$ mm	

Tab. 3.1: esempio di dati di acquisizione e per il cambio di coordinate

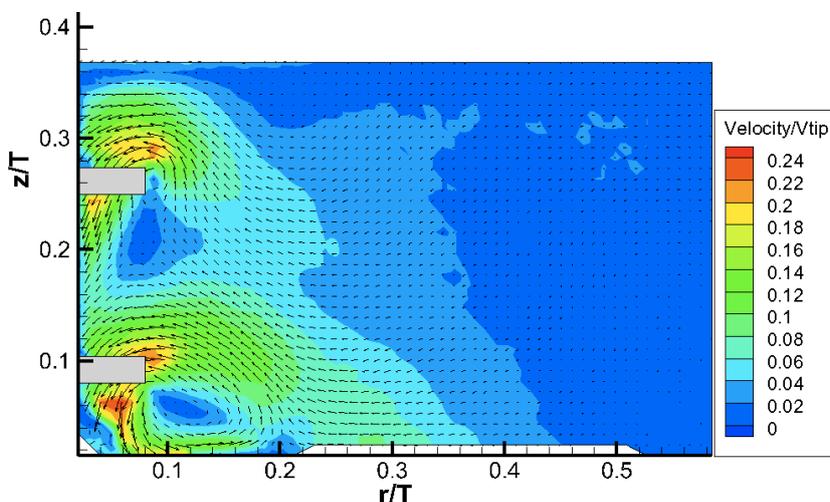


Fig. 3.9: esempio di campo di moto ottenuto dopo l'elaborazione, lo spostamento delle coordinate e la successiva ricostruzione con TecPlot360

Per ogni acquisizione, è stata quindi calcolata la nuova origine e sono stati ricavati i dati relativi all'area di misura e di interrogazione.

Per quanto riguarda la simbologia, è stata adottata quella comunemente utilizzata nell'ambito dello studio della miscelazione, vale a dire:

- V componente radiale del vettore velocità medio;
- U componente assiale del vettore velocità medio;
- W componente tangenziale del vettore velocità medio.

Le tre componenti risultano positive quando concordi con il loro asse di riferimento.

3.5 Messa a punto della tecnica

La fase di messa a punto della tecnica è consistita nell'ottimizzare i parametri operativi da utilizzare per le acquisizioni dei dati nelle varie configurazioni studiate. I parametri esaminati sono stati: lo spessore del fascio di luce emesso dal laser, l'intervallo di tempo tra gli impulsi, l'apertura dell'obiettivo delle telecamere e la concentrazione di seeding introdotto.

Tutte le misure sono state eseguite in un luogo oscurato, in modo da minimizzare il disturbo dovuto alla luce dell'ambiente e rendere massimo il rapporto segnale/rumore. Tale condizione è stata realizzata operando in una stanza completamente buia e schermando il reattore con un telo nero al fine di evitare eventuali riflessi.

3.5.1 Spessore del fascio laser

Le prove per l'ottimizzazione dello spessore del fascio sono state effettuate in condizioni monofase, con l'albero posto in posizione centrata dotato di giranti A310 e livello di liquido pari a 23,5 cm.

Tradizionalmente, nelle acquisizioni dei dati per la costruzione del campo di moto attraverso la tecnica PIV, la sorgente laser viene posta in modo che lo spessore del fascio di luce emesso sia minimo (1-2 mm) nella zona di campo di maggiore interesse, al fine di rilevare esclusivamente le particelle di tracciante presenti nel piano e evitare che il movimento ortogonale alla sezione di interesse interferisca con la misura.

Nello studio del reattore utilizzato in questo lavoro, agendo sul fuoco del laser e spostando dunque il minimo spessore della lama di luce nelle varie zone del campo, essendo esso convergente nel fuoco, è stato evidenziato come lo spessore del fascio, in

reattore privo di setti frangivortici, abbia un effetto rilevante sulla qualità delle misure.

Per prima cosa, proprio nella zona di minimo spessore del fascio, è stato osservato un calo delle validazioni, cioè un maggior numero di vettori scartati nella costruzione del campo di velocità (vedi “3.3 Elaborazione dei dati PIV”). Come evidenziato in Fig. 3.10, fissando lo spessore del fascio minimo a metà sezione di interesse, le validazioni al centro dell’immagine risultano praticamente dimezzate, rispetto alle zone di misura in cui lo spessore della lama di luce è maggiore.

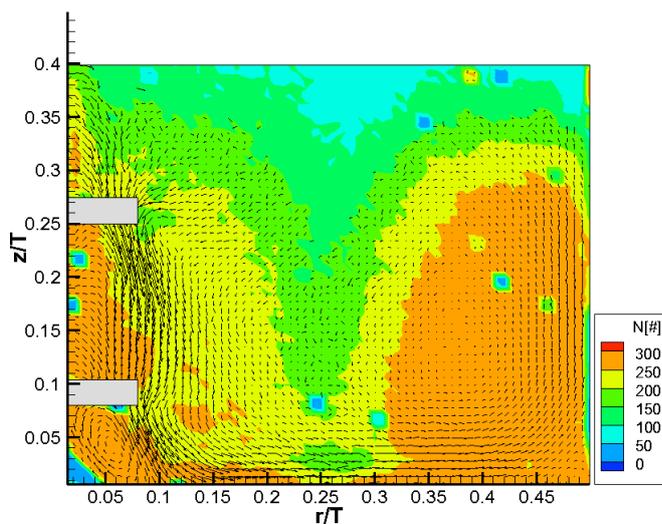


Fig. 3.10: campo delle validazioni con minimo spessore del fascio laser posto a metà della sezione, a $N = 300$ rpm, $\Delta t = 300 \mu s$ e 300

Questo fenomeno può essere causato dalla presenza di un vettore velocità con una rilevante componente perpendicolare al fascio laser. Infatti, nei sistemi *unbaffled*, la componente principale del vettore velocità risulta essere la componente tangenziale, che in queste misure è quella ortogonale al piano di misura. Se lo spessore del fascio è troppo piccolo, le particelle di tracciante, dopo essere state rilevate sul primo *frame* registrato dalla telecamera, “escono” dal piano di analisi non potendo più essere rilevate nella seconda immagine, con conseguente perdita di dati e peggioramento delle validazioni.

Secondo effetto osservato, è stato che, ponendo il fuoco del laser nella zona dell’albero in modo da esaminare al meglio i getti di scarico delle giranti, è possibile notare la presenza di vettori orizzontali non verosimili nella zona adiacente all’albero (Fig. 3.11).

Dal confronto con i campi relativi a sistemi analoghi presenti in letteratura [Hidalgo-Millan et al., 2011], infatti, questi vettori non sembrano essere rappresentativi del reale moto del liquido. Il campo vettoriale di Fig. 3.11, evidenzia come, nella zona adiacente all’albero compresa tra le due giranti, il liquido si sposti orizzontalmente verso le pareti del reattore; questo comportamento non è verosimile, poiché il liquido dovrebbe

provenire dal centro dell'albero, zona in cui, per la presenza dello stesso albero, non è però possibile il passaggio di fluido.

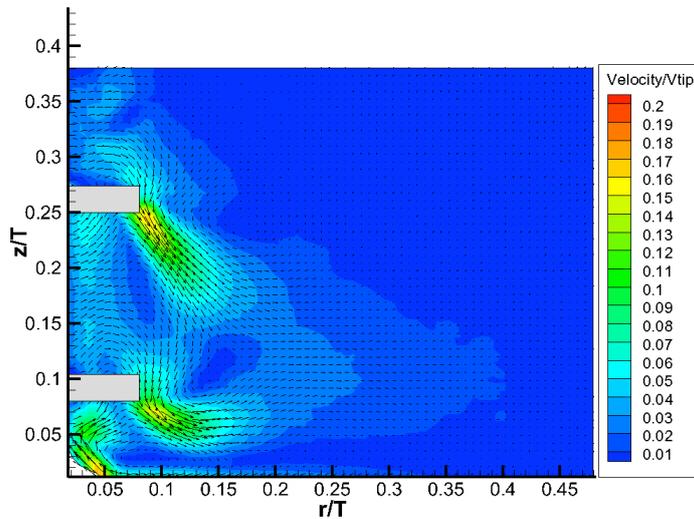


Fig. 3.11: campo di velocità con minimo spessore del fascio posto nella zona dell'albero ($N=300$ rpm, $\Delta t=500$ μ s, 1000 immagini acquisite)

È stato ipotizzato dunque, che questi vettori siano dovuti a un errore di correlazione determinato dal fatto che le particelle correlate presenti nelle due immagini non siano le stesse: le prime particelle acquisite, infatti, a causa della forte velocità tangenziale (*out-of-plane*) caratterizzante il moto, non riescono a essere rilevate anche nel secondo *frame* e vengono così sostituite da altre. Ciò ne rende impossibile la determinazione dello spostamento nel piano, causando l'errore osservato.

Per eliminare questi vettori, sono state trovate due soluzioni variando i parametri operativi. Al fine di mantenere all'interno del fascio laser le particelle, come prima cosa, è stato spostato il fuoco del laser fino a ottenere uno spessore di circa 7 mm nell'intorno dell'albero (Fig. 3.12): in questo modo è possibile mantenere le particelle di tracciante all'interno del fascio risolvendo perciò il problema dell'errore nella fase di correlazione.

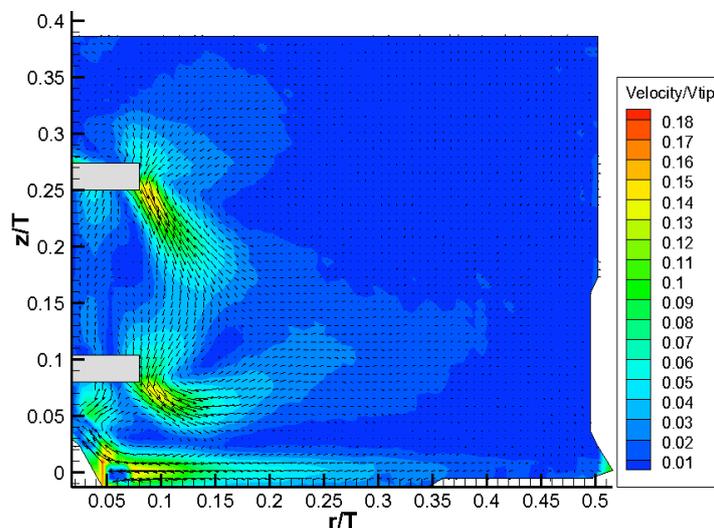


Fig. 3.12: campo di velocità con spessore del fascio di circa 7 mm nella zona dell'albero, a $N=300$ rpm, $\Delta t=300$ μ s, 1000 immagini acquisite

Una seconda alternativa è stata individuata ponendo il minimo spessore della lama di luce nella zona vicino all'albero (quella cioè di maggiore interesse per l'analisi) ma diminuendo significativamente l'intervallo di tempo tra i due *frame* acquisiti (Fig. 3.13): in questo modo le particelle di tracciante non hanno il tempo di “uscire” dal piano di analisi e la correlazione risulta valida.

Queste due soluzioni permettono di risolvere il problema dei vettori orizzontali osservato nella zona adiacente all'albero, ma entrambe portano a indurre gravi errori nella zona di reattore più lontana dall'albero e sono state quindi scartate per le successive analisi.

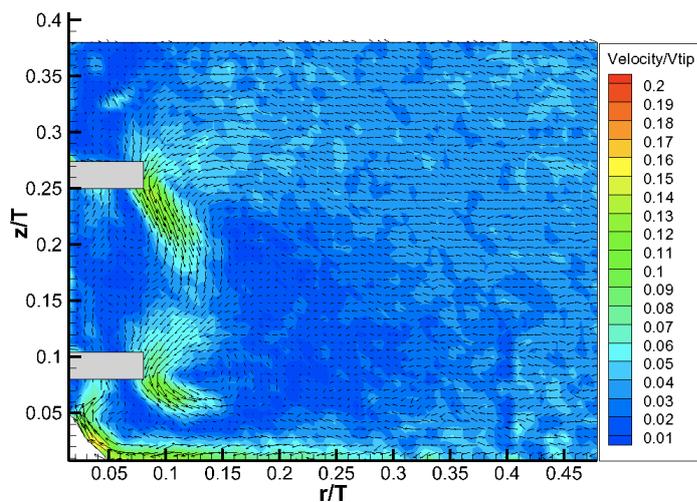


Fig. 3.13: campo di velocità con spessore del fascio di circa 1 mm nella zona dell'albero, a $N=300$ rpm, $\Delta t=30$ μ s, 1000 immagini acquisite

È stato quindi concluso che, in base alla zona di interesse, occorre ottimizzare lo spessore del fascio in modo di trovare il campo di moto corretto. Per le prove successive è stato deciso di porre il fuoco del laser sull'albero, pur sapendo che nella zona compresa tra le due giranti si potranno avere vettori non rappresentativi del moto reale.

3.5.2 Scelta dell'intervallo di tempo tra gli impulsi laser

Basando la scelta su precedenti lavori trovati in letteratura [Gomez et al., 2010], si è cercato di identificare l'effetto indotto da variazioni dell'intervallo temporale tra i due impulsi laser, quindi tra le due immagini acquisite dalla telecamera, sulla qualità delle misure di velocità. L'analisi è stata effettuata solo per il sistema monofase, assumendo validi i risultati ottenuti anche per i sistemi bifase.

Sia per la configurazione con l'albero posto al centro del reattore, sia per quella con l'albero in posizione eccentrica, sono state effettuate acquisizioni a diversi Δt tra le immagini acquisite; per prima cosa è stata poi scelta una corda all'interno della sezione di analisi su cui sono stati presi, in più punti, i valori delle velocità assiali. Questi valori sono stati poi analizzati per confronto delle Deviazioni Quadratiche Medie (*Root Mean*

Square, rms, Eq. 3.2) calcolate, grazie alle quali è stato possibile quantificare le differenze tra le misurazioni:

$$\text{rms} = \frac{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (u_{\Delta t1} - u_{\Delta t2})^2 \right]^{1/2}}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (u_{\Delta t2})^2 \right]^{1/2}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

L'analisi sul reattore in configurazione centrata è stata condotta effettuando acquisizioni ripetute al variare dei valori di Δt (1500-1000-750-500 μs) tra gli impulsi laser; per ogni prova, sono state acquisite 1000 coppie di immagini ad una velocità di rotazione dell'albero costante pari a 300 rpm (giranti A310) e un livello di liquido pari a 23.5 cm.

In Fig. 3.14, è riportato come esempio il campo di moto ottenuto a 750 μs . La corda per il confronto degli rms è stata scelta a un valore di $r/T = 0.15$.

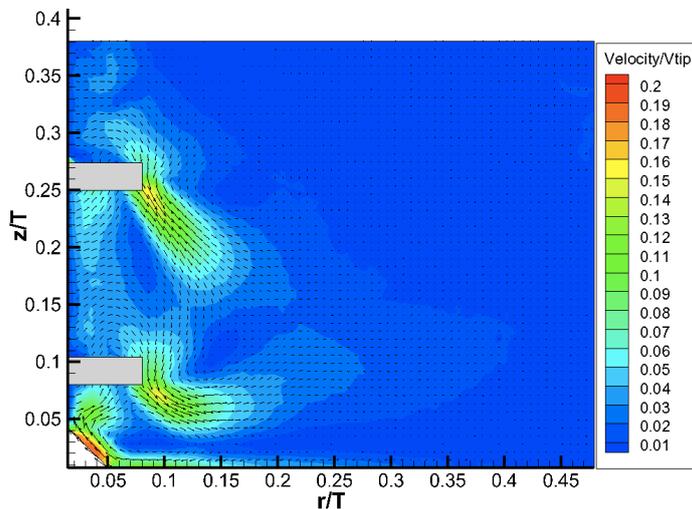


Fig. 3.14: campo di velocità ottenuto per confronto degli rms per la configurazione con l'albero posto al centro ($N=300$ rpm, $\Delta t=750$ μs , 1000 immagini acquisite)

L'interpolazione dei dati (Fig. 3.15) ha permesso di identificare un minimo in corrispondenza dell'intervallo di tempo di 850 μs . Questo valore è stato quindi scelto per le successive acquisizioni per la configurazione con l'albero posto al centro del reattore.

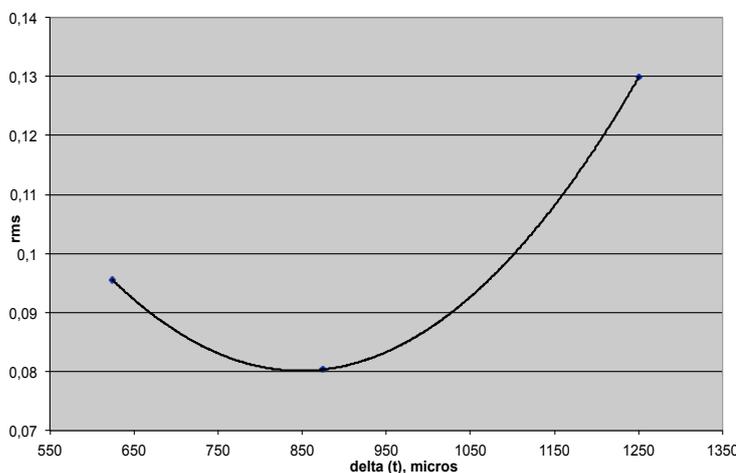


Fig. 3.15: interpolazione dei dati ottenuti dal confronto degli rms per la configurazione con albero al centro

Analogamente è stato ricavato anche il Δt necessario per la configurazione con l'albero eccentrico: sono state effettuate acquisizioni di 1000 coppie di immagini a 250 rpm (giranti *Hydrofoil*), con livello di liquido pari a 14.9 cm, al variare dell'intervallo di tempo tra gli impulsi (700-650-600-550-500-450 μs).

Vista l'ampiezza della sezione di analisi, sono state fissate due corde, una presa nella zona vicino alle giranti, "corda 1" a $r/T = 0.15$, e l'altra vicino alla parete del reattore, "corda 2" a $r/T = 0.55$.

Un esempio di campo di moto ottenuto è riportato in Fig. 3.16.

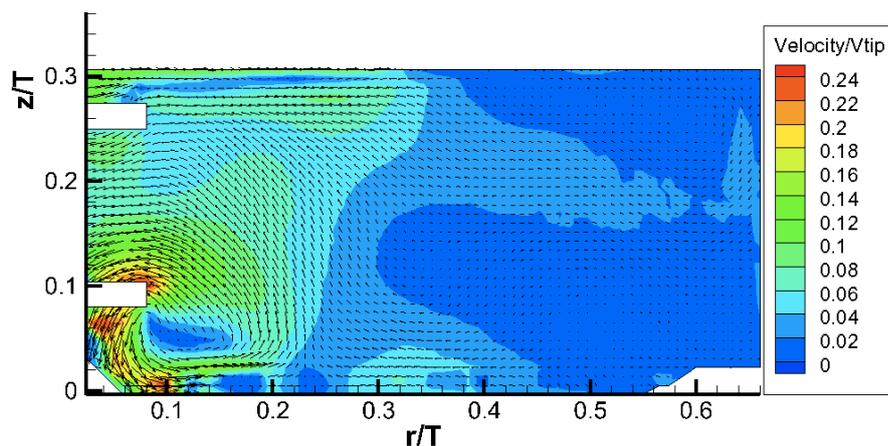


Fig. 3.16: campo di velocità ottenuto per confronto degli rms in configurazione eccentrica a $N=250$ rpm, $\Delta t=600 \mu s$, 1000 immagini acquisite

In Fig. 3.17 e in Fig. 3.18, sono riportati i grafici dei dati ottenuti dal confronto degli rms, rispettivamente per la "corda 1", situata nella zona ad alte velocità, e per la "corda 2", scelta in una zona di liquido stagnante.

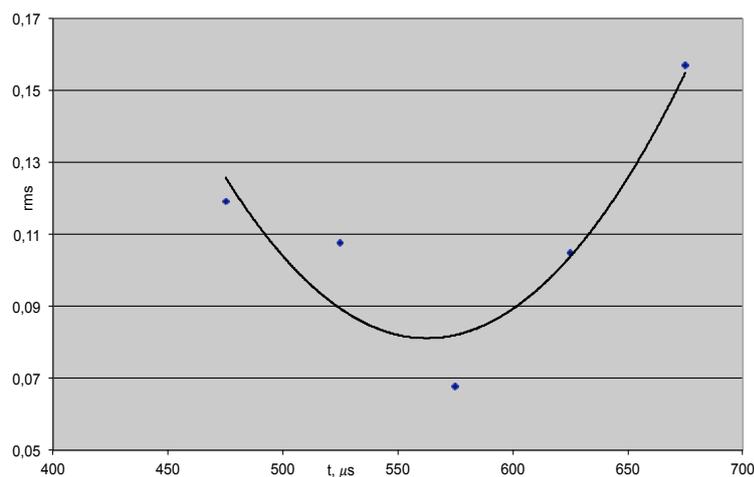


Fig. 3.17: interpolazione dei dati ottenuti dal confronto degli rms per la configurazione con albero eccentrico, "corda 1"

Come evidenziato dai grafici, per la "corda 1" grazie al confronto degli rms è stato identificato un minimo in corrispondenza di $\Delta t = 570 \mu s$, mentre per la "corda 2" in corrispondenza di $\Delta t = 630 \mu s$. Questo risultato è coerente con i risultati attesi: nella zona dove le velocità sono maggiori è necessario un intervallo di tempo tra gli impulsi più basso in modo da riuscire a rilevare le particelle in tutte e due le immagini e procedere

alla correlazione; nella zona a ridosso della parete, caratterizzata da moduli del vettore velocità inferiori, è invece necessario un tempo maggiore affinché possa essere registrato il movimento delle particelle che con un intervallo temporale troppo piccolo risulterebbero ferme.

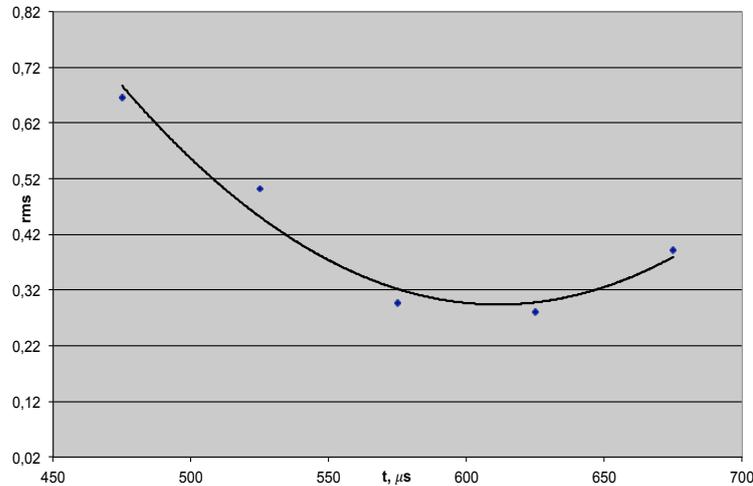


Fig. 3.18: interpolazione dei dati ottenuti dal confronto degli rms per la configurazione con albero eccentrico, "corda 2"

Per le prove successive con l'albero in posizione eccentrica, il Δt utilizzato è stato dunque scelto in base all'area di interesse: $\Delta t = 570 \mu\text{s}$ per le acquisizioni nella zona vicino alla girante, $\Delta t = 630 \mu\text{s}$ per quelle nella zona a ridosso della parete e $\Delta t = 600 \mu\text{s}$ per i campi di moto totali.

Per ultimo, è stato ricavato il Δt tra gli impulsi laser da utilizzare per le acquisizioni sul piano orizzontale del reattore con albero eccentrico in condizione bifase. Per l'analisi, sono state effettuate acquisizioni di 2000 immagini a 170 rpm (giranti A310), con il livello di liquido pari a 23.5 cm, al variare dell'intervallo di tempo tra gli impulsi (1000-850-500-250 μs). Un campo di moto ottenuto è riportato in Fig. 3.19.

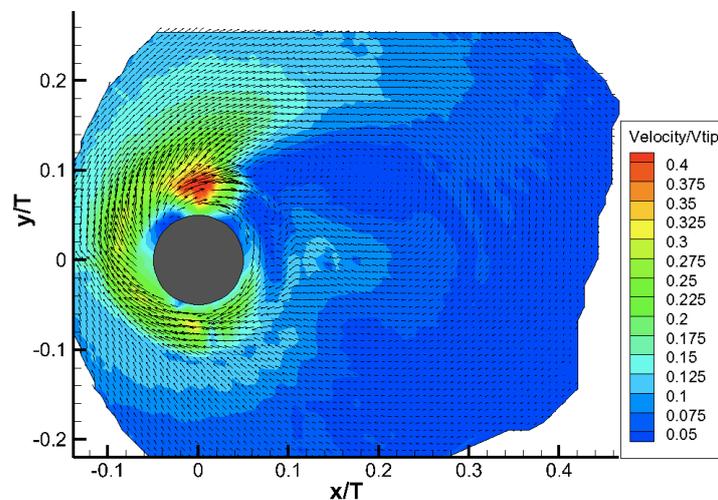


Fig. 3.19: campo di velocità del piano orizzontale, ottenuto per confronto degli rms in configurazione eccentrica a $N=100 \text{ rpm}$, $\Delta t=500 \mu\text{s}$, 2000 immagini acquisite

Considerando la misura relativa a una corda fissata a r/T pari a 0.16, l'andamento della

deviazione quadratica media delle velocità ottenute, al variare del Δt di acquisizione, mostra la presenza di un minimo in corrispondenza dell'intervallo di tempo a 550 μs . Questo è stato quindi il valore utilizzato per le prove.

3.5.3 Determinazione dell'apertura dell'obiettivo delle telecamere

Per le prove in bifase, è stato necessario determinare preliminarmente l'apertura degli obiettivi delle telecamere. I filtri ottici utilizzati, infatti, non sono dispositivi ideali per cui non oscurano completamente le telecamere da tutte le altre radiazioni; l'operazione di chiusura degli obiettivi assume quindi una grande importanza poiché, andando ad agire sugli otturatori delle due telecamere, che controllano per quanto tempo il sensore digitale resta esposto alla luce, si assicura che le particelle di tracciante di una fase vengano rilevate solo dalla telecamera con l'opportuno filtro ottico e analogamente il tracciante della seconda fase venga rilevato solamente dalla seconda telecamera.

Effetto conseguente alla chiusura dell'obiettivo delle telecamere tuttavia, è la diminuzione della quantità di luce assorbita a ogni immagine acquisita e quindi influenza le validazioni dei campi di moto ottenuti; per questo motivo l'apertura deve essere massima, evitando però la rilevazione delle emissioni di luce non desiderate.

Le acquisizioni sono state eseguite nella configurazione con l'albero al centro del reattore, velocità di rotazione dell'albero di 300 rpm (giranti A310) e livello di liquido pari a 23.5 cm. Il tempo tra gli impulsi è stato scelto di 850 μs (vedi "3.5.2 Scelta dell'intervallo di tempo tra gli impulsi laser").

Per trovare l'apertura massima dell'obiettivo della telecamera della fase liquida sono state effettuate prove con acqua e, come tracciante per la fase solida, una concentrazione di particelle di PMMA di 0,5% w/w ($\text{g}_{\text{particelle}}/\text{g}_{\text{liquido}}$): in questo modo è stato possibile verificare quando la telecamera con filtro arancione, con il compito di rilevare unicamente le particelle rivestite di Rodamina-B, non rilevasse alcuna particella di PMMA.

Dopo l'analisi è stato concluso che l'obiettivo della telecamera per il tracciante della fase liquida dovesse essere chiuso a 8. In Fig. 3.20 i campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b), con entrambi gli obiettivi chiusi a 8, evidenziano come la telecamera con filtro arancione non riesca a registrare quasi completamente nessuna particella.

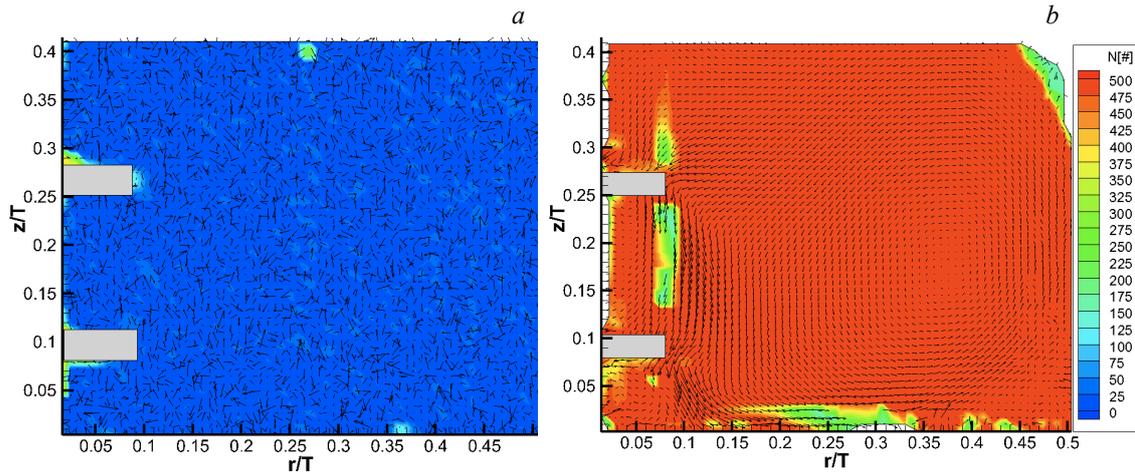


Fig. 3.20: campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b) sovrapposti al numero dei vettori validati in ogni punto con obiettivo della telecamera della fase liquida chiuso a 8 e della fase solida chiuso a 8

Allo stesso modo è stata ottenuta l'apertura massima dell'obiettivo della telecamera dotata di filtro verde, destinata quindi all'acquisizione della posizione delle particelle rappresentanti la fase solida.

Nel reattore è stata inserita acqua e alcune gocce della sospensione di particelle rivestite di Rodamina-B; sono state fatte acquisizioni chiudendo progressivamente l'obiettivo della telecamera della fase solida fino a che questa non vedesse alcuna particella. L'analisi ha definito che l'obiettivo della telecamera con filtro verde dovesse essere chiuso a 22. In Fig. 3.21 sono mostrati i campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b): anche in questo caso si nota come la telecamera con il compito di registrare la posizione delle particelle di solido, come desiderato, non rileva alcuna particella.

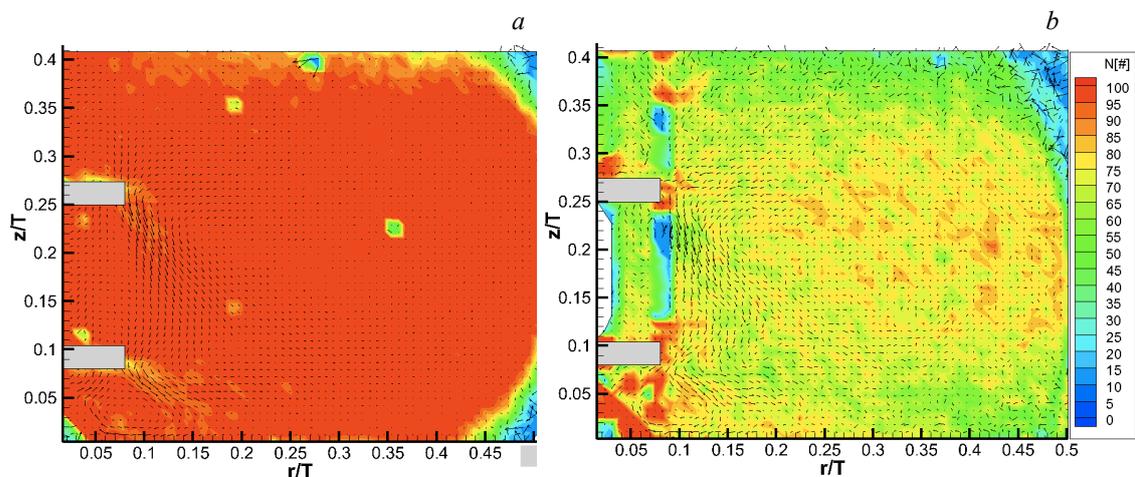


Fig. 3.21: campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b) sovrapposti al numero dei vettori validati in ogni punto con obiettivo della telecamera della fase liquida chiuso a 8 e della fase solida chiuso a 22

3.5.4 Concentrazione di *seeding*

Per quanto riguarda la concentrazione delle particelle di tracciante per la fase liquida da inserire all'interno del reattore affinché la misurazione sia accurata, non vi sono indicazioni precise, ma in linea generale la quantità ottimale risulta essere di alcune gocce di sospensione, fino a raggiungere, osservando le immagini acquisite dalla telecamera attraverso il *software*, circa 5 particelle di tracciante per ogni area di interrogazione.

La procedura empirica, messa a punto in questo lavoro e nei precedenti, consente di determinare la concentrazione ottimale anche se risulta comunque fondamentale l'esperienza dell'operatore nel valutare la bontà dell'inseminazione.

In sintesi, la procedura è la seguente:

1. si riempie il reattore di liquido;
2. si preleva dal fondo del contenitore con una spatola il tracciante in modo da avere una certa quantità di particelle in sospensione che vengono trasferite nel reattore e qui miscelate con il liquido grazie all'azione della girante;
3. si indirizza il fascio laser sul piano prescelto e si procede all'acquisizione di una singola immagine;
4. con l'ausilio del software e agendo sulla scala dei colori dell'immagine si evidenziano le particelle all'interno del reattore: utilizzando lo zoom e una griglia con maglie di dimensioni pari all'area di interrogazione si procede alla conta del numero di particelle per maglia;
5. si procede aggiungendo particelle (una goccia di sospensione alla volta circa) finché il numero di particelle per maglia risulta essere circa pari a 5.

L'operazione è stata ripetuta ogni qualvolta è stato necessario svuotare il reattore o variare il volume di liquido.

I problemi principali sono stati riscontrati nel trovare la giusta quantità di tracciante da inserire nel liquido: se la concentrazione era troppo bassa non arrivava sufficiente luce alla telecamera, rendendo l'acquisizione inutilizzabile; se veniva aggiunta una quantità troppo alta di tracciante invece, il liquido poteva assumere una torbidità eccessiva non permettendo il passaggio del fascio laser lungo tutto il piano di interesse.

L'operazione di aggiunta della fase solida è stata invece effettuata inserendo una quantità definita di particelle (220 g), corrispondenti a una concentrazione dello 0.5% in peso (g

particelle/g liquido): la procedura è più semplice poiché le particelle di solido riflettono maggiormente la luce laser incidente per cui non vi sono mai stati problemi di bassa concentrazione. Unici accorgimenti utilizzati sono stati il prelavaggio delle particelle, per assicurare la completa bagnabilità del PMMA, e che il liquido, a causa dell'aumento della velocità di agitazione e del conseguente aumento di solido in sospensione, non diventasse troppo torbido impedendo così il passaggio del fascio di luce all'interno del reattore.

È inoltre importante evidenziare che, a basse velocità di rotazione, il reattore studiato può essere fortemente influenzato da perturbazioni, responsabili della formazione di instabilità. Il fenomeno è stato osservato nei risultati ottenuti dalle acquisizioni effettuate pochi minuti dopo aver riportato il tracciante della fase liquida in sospensione (operazione spesso necessaria poiché esso tende a depositarsi sul fondo) attraverso l'utilizzo di un pennello inserito verticalmente grazie a un foro nel coperchio del reattore. Il passaggio del pennello provoca una variazione del moto del liquido all'interno del reattore, spostando il sistema dalla condizione di regime stazionario a una di regime transitorio. Il tempo necessario affinché si ristabiliscano condizioni di moto stazionario a basse velocità è elevato (dell'ordine delle ore), non permettendo la corretta acquisizione del campo vettoriale.

Lavorando a velocità più alte, questo fenomeno non risulta più rilevante poiché il campo di moto che si instaura nel reattore assume caratteristiche di maggiore stabilità fluidodinamica.

4. Risultati sperimentali

In questo capitolo vengono presentati i dati sperimentali ottenuti dalle acquisizioni effettuate con la tecnica PIV per la caratterizzazione del reattore in esame.

I risultati sono suddivisi in base ai due sistemi studiati: per primo viene presentato il reattore in condizione monofase, nelle configurazioni con albero centrato ed eccentrico, e successivamente in bifase, nelle stesse due configurazioni geometriche considerate.

4.1 Sistema monofase

Le prove sono state effettuate riempiendo il reattore con acqua e aggiungendo alcune gocce di sospensione del tracciante fluorescente. I parametri operativi utilizzati, per ogni configurazione, sono stati in precedenza ottimizzati (vedi “3.5 Messa a punto della tecnica e ottimizzazione dei parametri operativi”). Nei paragrafi successivi sono riportati i risultati ottenuti per la caratterizzazione del reattore nelle due configurazioni studiate.

4.1.1 Albero in posizione centrata: studio del campo di moto

Le misure per l'analisi del campo di velocità del liquido sono state effettuate su un piano verticale e i parametri operativi utilizzati sono riassunti in Tab. 4.1.

Condizioni operative		
N	300	rpm
Δt	850	μs
H_{liq}	23.5	cm
Giranti	A310	-
Re	4.85E+05	-
Area di misura	236 x 192	mm ²
IA	6.9 x 6.9	mm ²
Tracciante fase liquida	particelle di PMMA rivestite di Rodamina-B	

Tab. 4.1: condizioni operative utilizzate per le acquisizioni in monofase con albero centrato

Nel piano di interesse, sono state effettuate più misure: sia dopo un'ora dall'accensione dell'agitazione, in modo da ottenere il campo di moto del liquido in regime stazionario, sia a intervalli di tempo variabili dopo l'accensione, al fine di rilevare la presenza di regimi transitori caratteristici del sistema.

Il reattore esaminato infatti, a causa della mancanza di setti frangivortici, è caratterizzato da un moto fortemente instabile, con frequenze caratteristiche molto inferiori rispetto alla frequenza associata al moto della girante. Il comportamento dei reattori *unbaffled* si discosta da quello dei reattori settati [Ciofalo et al., 1996] ed è stato osservato che la durata del transitorio necessario per raggiungere condizioni di moto pseudo-stazionario a partire dal fluido fermo può essere di oltre due ordini di grandezza più elevata rispetto ai tempi caratteristici dei reattori agitati convenzionali, che risultano tipicamente pari ad alcune decine di secondi. Nel caso in esame, la durata del transitorio varia da alcuni minuti a oltre 40 minuti, a seconda della velocità di agitazione o del livello di liquido.

La prova per l'acquisizione del campo di moto in regime stazionario è stata effettuata dopo 1 h dall'accensione dell'agitazione; sono state acquisite 1000 coppie di immagini utilizzando un Δt di 850 μs tra i due impulsi laser. Il campo di moto medio, sovrapposto alla mappa delle velocità, è riportato in Fig. 4.1.

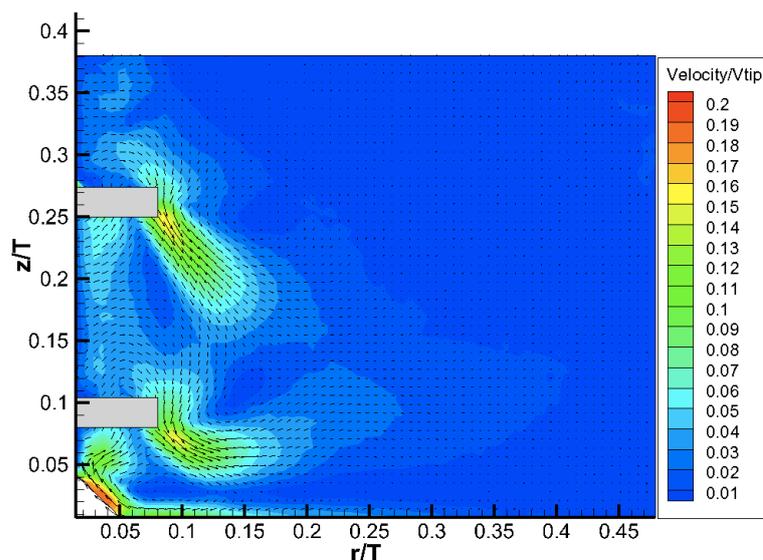


Fig. 4.1: campo di moto sovrapposto al modulo delle velocità a $N=300$ rpm e $\Delta t=850$ μs

Il campo di moto ottenuto evidenzia che entrambe le giranti imprimono al fluido un forte movimento in direzione assiale, che diminuisce significativamente avvicinandosi alle pareti del reattore: questo permette una buona miscelazione solamente nella zona centrale del reattore, mentre vicino alla parete, il liquido è quasi completamente stagnante.

Si nota inoltre la presenza di un vortice intorno alla girante inferiore che si distacca dal fondo del reattore; il fluido si muove verso il basso per essere poi richiamato verso la girante, parallelamente al fondo.

Lo studio dei moti transitori all'interno del reattore è stato invece effettuato acquisendo i dati a tempi intermedi dopo l'accensione del motore, in particolare dopo 1 minuto, 10 minuti, 20 minuti, 40 minuti e 70 minuti. Le condizioni operative utilizzate sono state quelle impiegate per lo studio del campo in regime stazionario (Tab. 4.1); per ogni prova sono state acquisite 300 coppie di immagini in modo da ridurre il tempo complessivo dell'acquisizione e ottenere così ogni singolo possibile regime transitorio. I campi di moto ottenuti sono riportati in Fig. 4.2 (a-b-c) e in Fig. 4.3 (d-e).

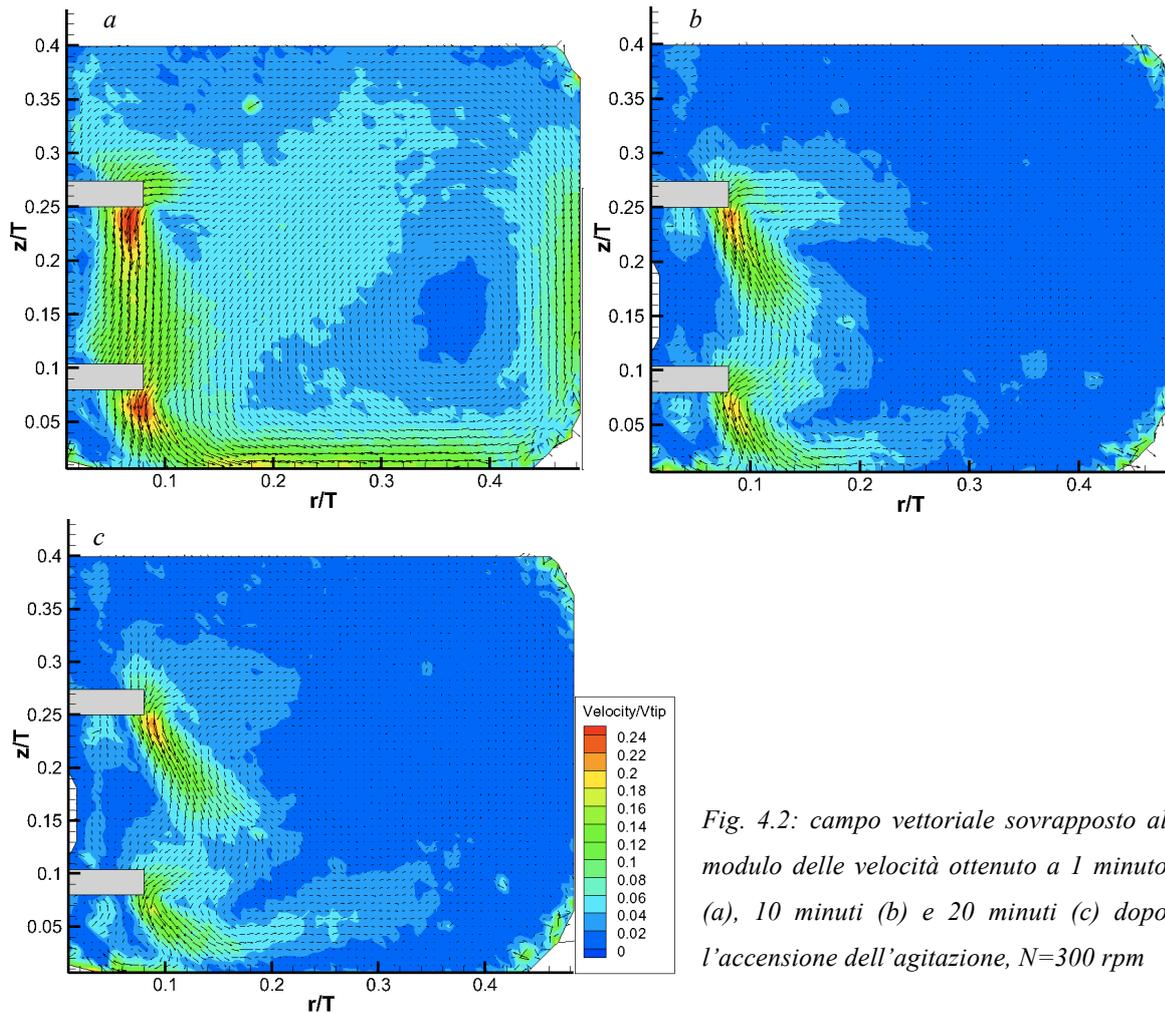


Fig. 4.2: campo vettoriale sovrapposto al modulo delle velocità ottenuto a 1 minuto (a), 10 minuti (b) e 20 minuti (c) dopo l'accensione dell'agitazione, $N=300$ rpm

Dalla Fig. 4.2 (a), si nota come, appena il motore collegato all'albero viene acceso, il fluido è spinto dalle giranti verso il basso e, dopo aver interagito col fondo, si muove in direzione della parete per poi ricircolare verso la girante alta, formando un vortice di grandezza pari a tutta la sezione di reattore analizzata; dopo 10 minuti (b), i getti di scarica di entrambe le giranti cambiano e cominciano a definirsi due zone definite di circolazione del fluido in prossimità dell'albero. Passati 20 minuti poi (c), si nota che il getto della girante inferiore non arriva più sul fondo del reattore ($z/T=0.01$) e si individua

la presenza di un vortice di liquido nella zona del cono posto a sostegno dell'albero.

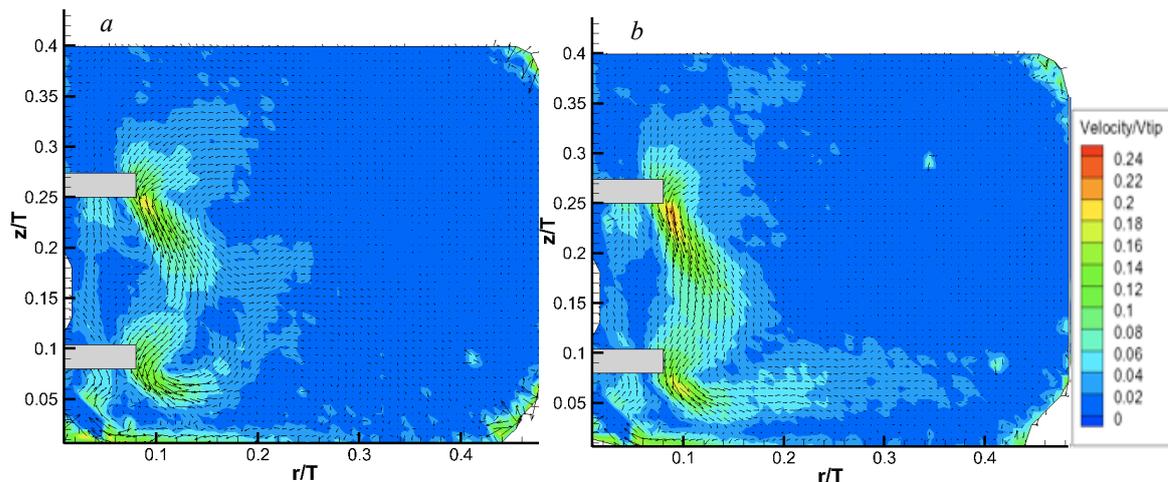


Fig. 4.3: campo vettoriale sovrapposto al modulo delle velocità ottenuto a 40 minuti (a) e 70 minuti (b) dopo l'accensione dell'agitazione, $N=300$ rpm

Passati 40 minuti, come si nota in Fig. 4.3 (a), il getto della girante bassa si chiude sempre più su se stesso e si alza ancora ($z/T=0.05$): sul fondo si osserva uno strato di liquido che si muove verso l'albero, in direzione opposta al getto della girante. Dopo 70 minuti (b) non si evidenziano più variazioni significative.

In conclusione, la rilevazione e lo studio del moto transitorio del liquido all'interno del reattore, hanno permesso di evidenziare che:

- all'inizio il moto del fluido coinvolge tutta la sezione del reattore;
- il movimento impresso dalle giranti al liquido, appena l'agitazione viene avviata, è fortemente assiale e rivolto verso il basso;
- all'aumentare del tempo trascorso il getto di scarica di entrambe le giranti cambia, spostandosi in direzione radiale;
- il movimento si concentra nella zona vicino alle giranti lasciando la sezione di reattore vicino alla parete essenzialmente ferma;
- raggiunto il regime stazionario, all'interno del reattore si vengono a creare due zone distinte, una ad alta velocità, vicino alle giranti, in cui la miscelazione è buona, e un'altra, in prossimità della parete, in cui il liquido è pressoché stagnante. In quest'ultima zona i bassi valori di velocità non permettono una miscelazione efficace del fluido.

4.1.2 Albero in posizione eccentrica: studio del campo di moto

Nella configurazione con l'albero in posizione eccentrica, sono state effettuate acquisizioni su tre piani verticali (vedi "3.2 Acquisizione dei dati PIV"), utilizzando i parametri operativi riassunti in Tab. 4.2.

Condizioni operative		
N	250	rpm
Δt	600	μs
H_{liq}	14.9	cm
Giranti	Hydrofoil	-
Re	4.04E+05	-
Area di misura		
piano A	333 x 162	mm ²
piano B	161 x 158	mm ²
piano C	391 x 160	mm ²
IA		
piano A	8.4 x 8.4	mm ²
piano B	8.7 x 8.7	mm ²
piano C	9.3 x 9.3	mm ²
Tracciante fase liquida	particelle di PMMA rivestite di Rodamina-B	

Tab. 4.2: condizioni operative utilizzate per le acquisizioni in monofase con albero eccentrico

In questa configurazione, il reattore è stato caratterizzato con giranti *Hydrofoil* e un livello di liquido pari a 14.9 cm, parametro ottenuto dallo scale-down del reattore utilizzato industrialmente.

Tutte le prove sono state effettuate dopo 1 ora dall'accensione dell'agitazione in modo da esaminare il moto del liquido in regime stazionario; sono state acquisite, per ogni piano, 2000 coppie di immagini con un Δt di 600 μs tra gli impulsi laser (vedi "3.5 Messa a punto della tecnica e ottimizzazione dei parametri operativi").

Il campo vettoriale di velocità ottenuto per il piano A, il piano verticale di maggiore lunghezza passante per l'albero, è riportato in Fig. 4.4.

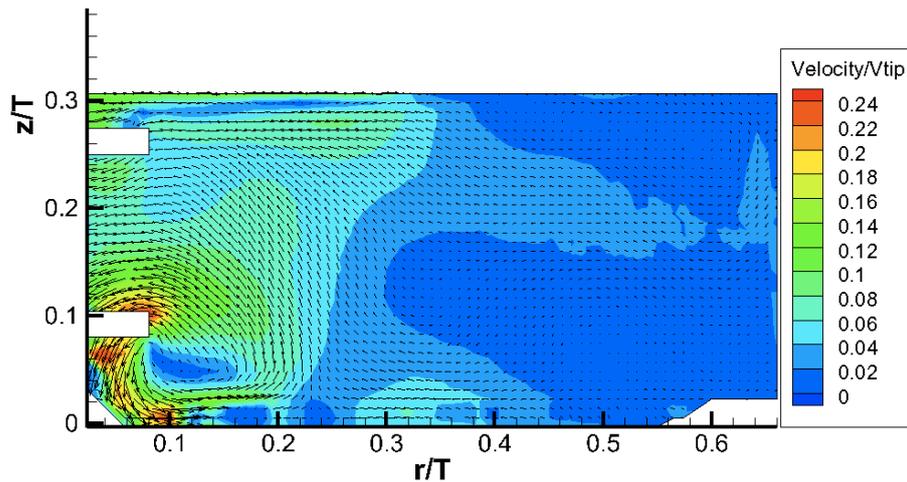


Fig. 4.4: campo di moto ottenuto per il piano A, a $N=250$ rpm e $\Delta t = 600 \mu s$

Dal campo ottenuto è evidente la differenza di velocità tra la zona vicino alla girante, dove la miscelazione è buona, e quella vicino alla parete, dove il liquido sembra essere quasi totalmente fermo.

Come si nota in figura inoltre, il liquido forma, per effetto della girante bassa e per interazione con il fondo del reattore, un vortice nella zona vicino all'albero, che richiama parte del liquido dal centro della sezione verso le giranti.

La turbina superiore, tuttavia, sembra non riesca a pompare liquido, imprimendo un campo di moto assiale; la Figura 4.4 mostra come il campo di moto indotto sia praticamente radiale. È stato ipotizzato che questo avvenga a causa dell'influenza dell'aria inglobata dal sistema per effetto del livello di liquido molto vicino alla girante. A conferma di questa ipotesi, è stata effettuata una prova aumentando la quantità di liquido in modo da alzare il livello a 17.5 cm. Sono stati utilizzati gli stessi parametri operativi utilizzati per le prove eseguite sul piano A e il campo di moto ottenuto è riportato in Fig. 4.5.

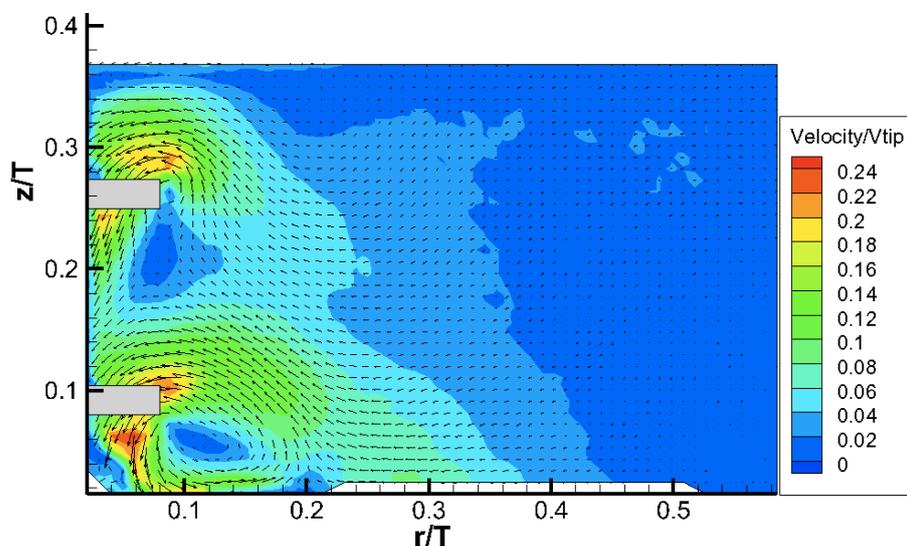


Fig. 4.5: campo di moto ottenuto per il piano A con livello di acqua di 17,5 cm, a $N=250$ rpm e $\Delta t = 600 \mu s$

Dal confronto tra le due figure (Fig. 4.4 e Fig. 4.5), si nota come una volta aumentato il livello di liquido, si riduce l'influenza del vortice di aria che si viene a formare sul pelo libero e quindi anche la girante superiore riesce a imprimere un movimento in direzione assiale al fluido, in analogia con la girante inferiore; nella zona bassa del reattore invece (da $z/T = 0.15$ in giù), non si osservano variazioni significative tra i due campi.

Grazie a questa prova è stata confermata l'influenza dell'aria inglobata sul campo di moto nella parte superiore del reattore, vicino all'albero; questo risultato andrà considerato per le altre prove effettuate con livello di liquido pari a 14.9 cm.

Al fine di approfondire l'analisi delle zone di maggiore interesse, quelle cioè nell'intorno delle due giranti, sono state effettuate acquisizioni con maggiore risoluzione spaziale sul piano verticale, ottenuti avvicinando la telecamera al reattore. Anche queste misure sono state effettuate dopo circa 1 ora dalla messa in funzione dell'agitazione. L'area di interrogazione è stata ridotta a $2.9 \times 2.9 \text{ mm}^2$. I campi di moto ottenuti per la girante inferiore e quella superiore sono riportati in Fig. 4.6 (a e b).

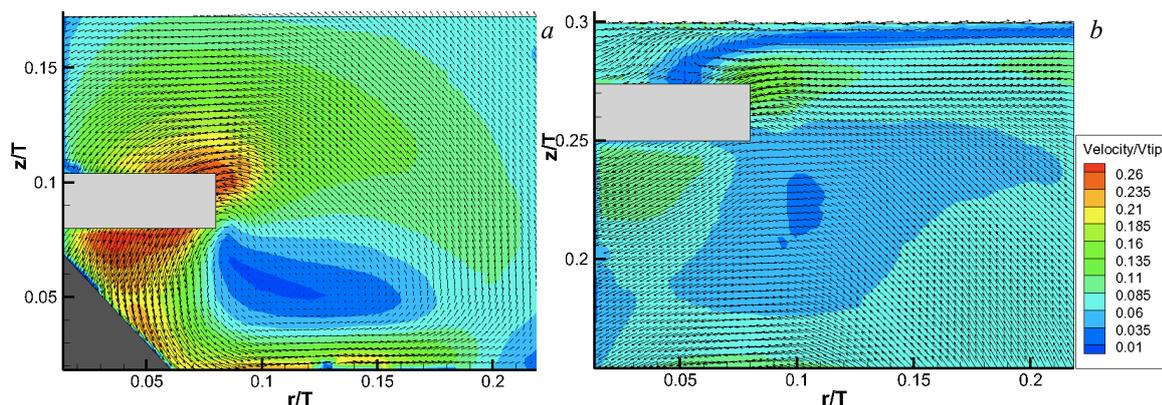


Fig. 4.6: campi vettoriali di velocità del liquido vicino alla girante inferiore (a) e alla girante superiore (b) per il piano A, a $N=250 \text{ rpm}$ e $\Delta t = 570 \mu\text{s}$

Entrambi i campi di moto confermano i risultati ottenuti dall'analisi precedente, evidenziando meglio le caratteristiche dei vortici venutisi a formare per effetto delle giranti. Nella zona inferiore (Fig. 4.6, a), il fluido viene spinto verso il basso dalla girante. L'interazione con il fondo e il passaggio della pala successiva richiamano poi il liquido verso l'albero: quel che si forma è un vortice di ricircolazione ben definito. Nella parte superiore del reattore invece (Fig. 4.6, b), la girante non riesce a imprimere al liquido alte velocità, probabilmente a causa della vicinanza del pelo libero. È possibile notare comunque con maggiore chiarezza, il funzionamento della girante superiore.

Il campo di moto ottenuto per il piano B (Fig. 4.7), la sezione di reattore più corta passante per l'albero, ha evidenziato risultati analoghi a quelli ottenuti per il piano A.

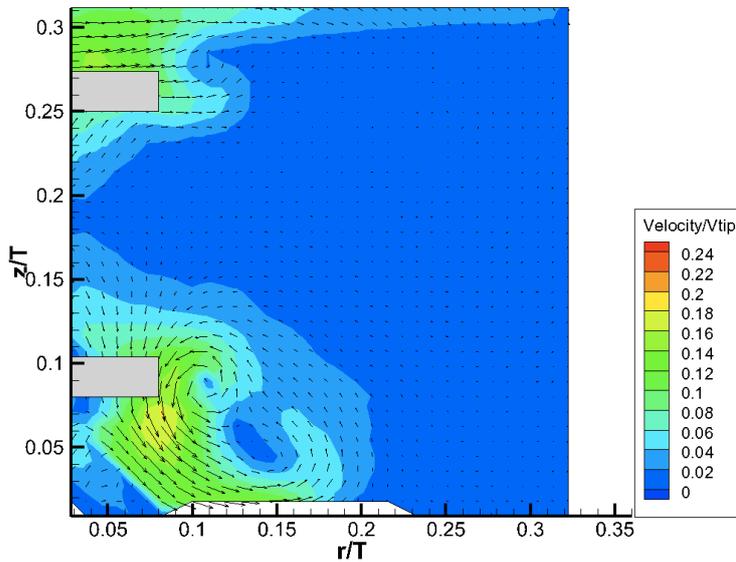


Fig. 4.7: campo di moto ottenuto per il piano B, a $N=250$ rpm e $\Delta t = 600 \mu s$

Anche in questo caso si nota la differenza tra la zona nei pressi delle due giranti, in movimento, e la zona vicino alla parete dove il liquido è ancora pressoché stagnante nonostante la minore distanza dall'albero. La girante superiore, inoltre, risulta ancora ingolfata per effetto del fenomeno già descritto per il piano A.

Gli ingrandimenti del piano B (misure effettuate dopo 1 ora dall'accensione del motore collegato all'albero ed elaborate con area di interrogazione pari a $2.9 \times 2.9 \text{ mm}^2$) chiariscono meglio i risultati ottenuti in precedenza.

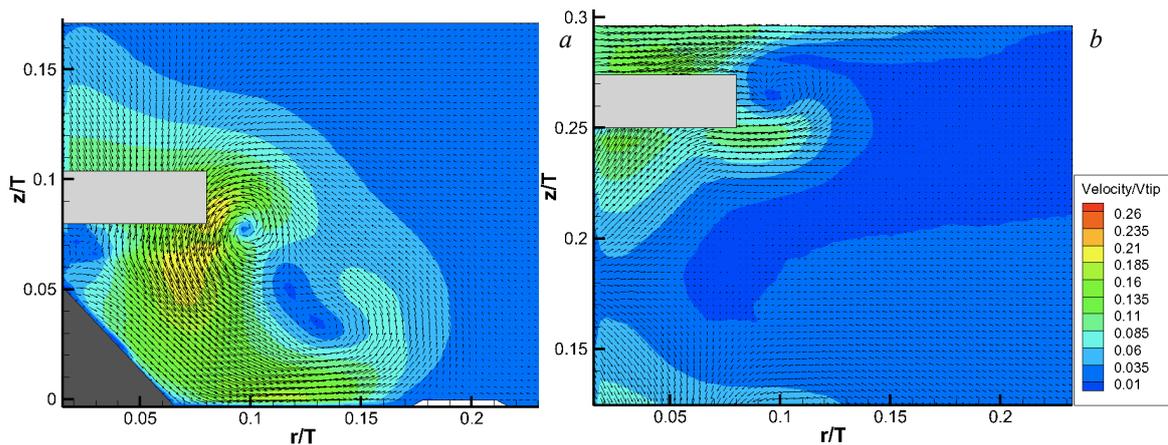


Fig. 4.8: campi vettoriali di velocità del liquido vicino alla girante inferiore (a) e alla girante superiore (b) per il piano B, a $N=250$ rpm e $\Delta t = 570 \mu s$ (vedi "Messa a punto della tecnica")

Come si nota in Fig. 4.8 (a), la zona di ricircolo formatasi nella parte inferiore del reattore presenta un doppio vortice, probabilmente a causa dell'interazione del fluido con

la vicina parete. In Fig. 4.8 (b) invece, è possibile osservare il campo di moto derivato dall'azione della girante superiore: ciò che si viene a creare è un vortice, ma la turbina sembra imprimere un movimento in direzione radiale al fluido, probabilmente a causa dell'interazione con l'aria inglobata durante la misura.

Per concludere la caratterizzazione del reattore in condizioni monofase con l'albero in posizione eccentrica, è stato esaminato anche il piano C, passante per il centro del reattore e perpendicolare al piano A (vedi "3.2 Acquisizione e elaborazione dei dati PIV").

Il campo di moto ottenuto (Fig. 4.9) mostra chiaramente la forte asimmetria caratterizzante il reattore senza setti frangivortici.

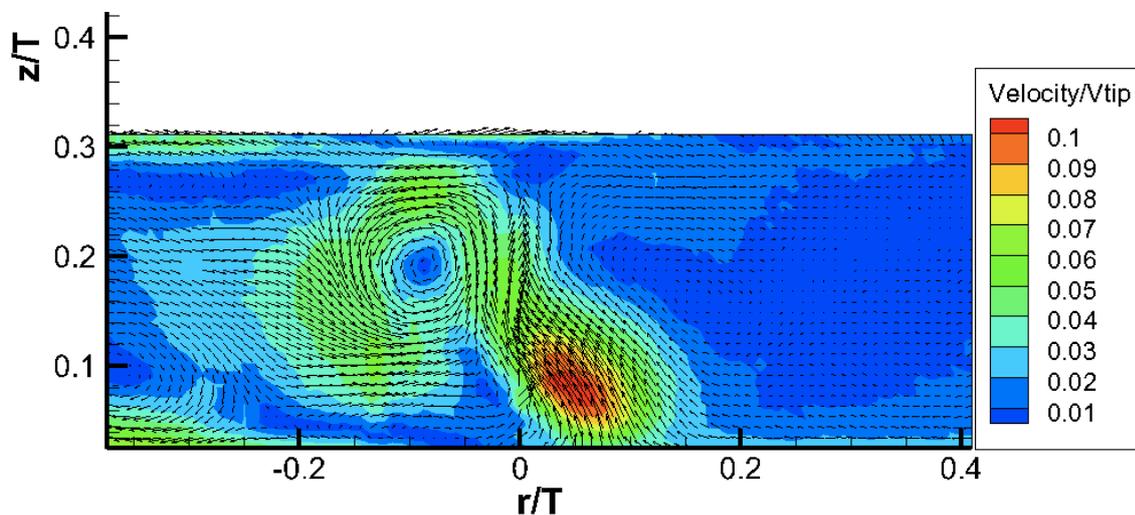


Fig.4.9: campo di moto ottenuto per il piano C con livello di acqua di 14,9 cm, a $N=250$ rpm e $\Delta t = 600 \mu s$

Dalla figura si evidenzia come nella parte sinistra della sezione, il fluido è quasi tutto in moto ed è presente, un vortice ben definito in corrispondenza della girante alta. Nella parte destra, caratterizzata da velocità inferiori, si nota, invece, il vortice osservato in precedenza (piano A) e generato dalla girante bassa: la direzione del ricircolo sembra essere perpendicolare a questo piano di analisi permettendo di vedere solo la parte di liquido che risale per poi muoversi verso l'albero.

Per avere un'idea dell'efficienza di miscelazione al variare delle due tipologie di giranti utilizzate in questo lavoro di tesi, è stato eseguito un confronto tra il campo di moto ottenuto per il piano A con le giranti Hydrofoil (già esaminato) e quello ottenuto montando al loro posto due giranti Lightning A310.

In Fig. 4.10 sono riportati i due campi di moto ottenuti: quello con giranti Hydrofoil (a) e

quello ottenuto con giranti A310 (b).

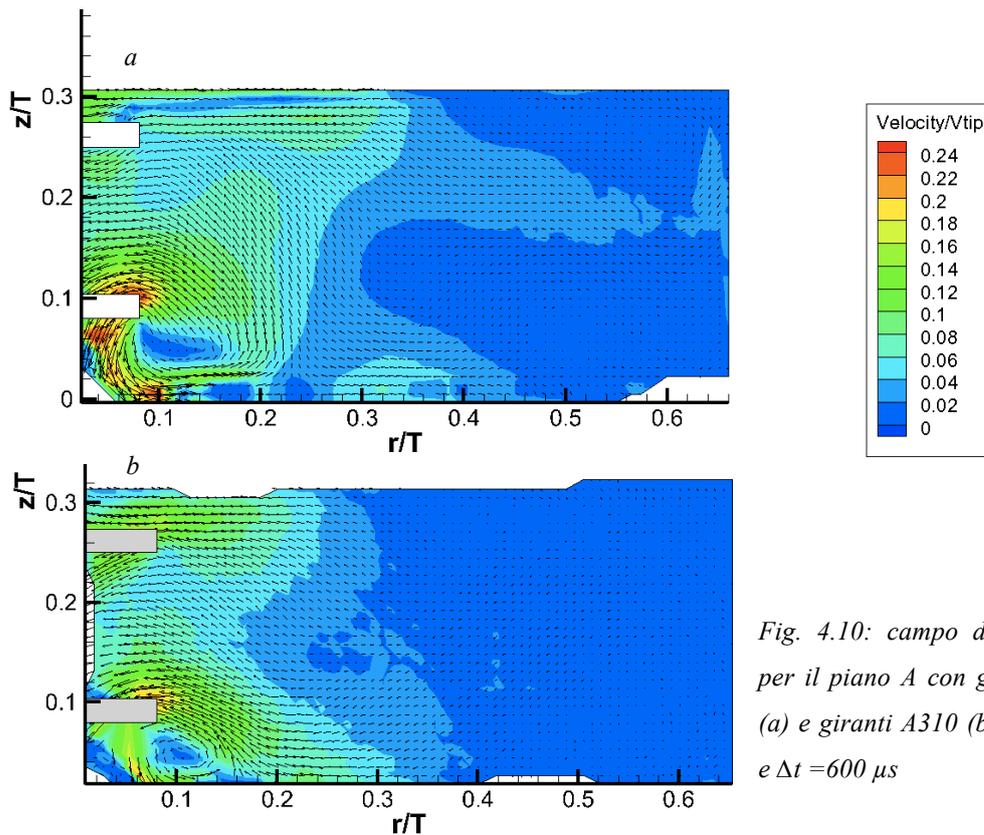


Fig. 4.10: campo di moto ottenuto per il piano A con giranti Hydrofoil (a) e giranti A310 (b), a $N=250$ rpm e $\Delta t = 600 \mu s$

I campi di moto ottenuti evidenziano principalmente una discordanza tra i vortici formati nella parte inferiore della sezione: è possibile notare che le giranti *Hydrofoil*, ottenute dalle caratteristiche geometriche di quelle utilizzate in industria, formano un vortice più allungato; questo provoca un aumento di liquido ricircolante verso la girante superiore. Per evidenziare al meglio le differenze tra i due campi vettoriali ottenuti, sono stati costruiti tre profili radiali delle componenti assiali delle velocità prese a tre diversi livelli ($z/T = 0.06 - 0.14 - 0.20$).

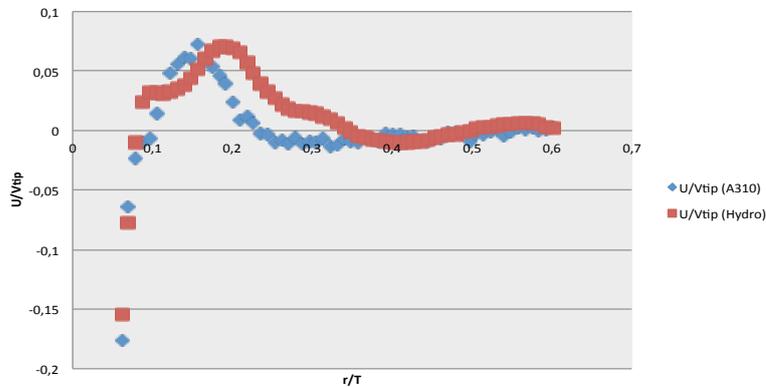


Fig. 4.11: profili radiali delle velocità assiali prese sulla corda a $z/T=0.06$

Il profili di velocità riportati in Fig. 4.11, ottenuti nelle zona appena al di sotto della girante inferiore ($z/T=0.06$), non evidenziano particolari differenze di comportamento tra

le due giranti: il movimento impresso al fluido è sostanzialmente il medesimo, sia per quanto riguarda il verso del moto sia per quanto riguarda il modulo delle velocità delle particelle di tracciante.

In Fig. 4.12, è riportato il grafico dei profili ottenuti nella zona poco al di sopra della girante inferiore ($z/T=0.14$). È possibile osservare come le giranti *Hydrofoil*, ottenute dallo *scale-down* delle giranti industriali, riescano a muovere in modo più efficace il fluido: il vortice inferiore infatti, richiama più liquido provocando un aumento del modulo delle velocità nella zona a ridosso delle giranti. Avvicinandoci alla parete (oltre $r/T=0.45$), i moduli delle velocità sono confrontabili ma si osserva un'inversione del verso del moto del liquido (verso l'alto con le giranti *Hydrofoil*, verso il basso con le A310).

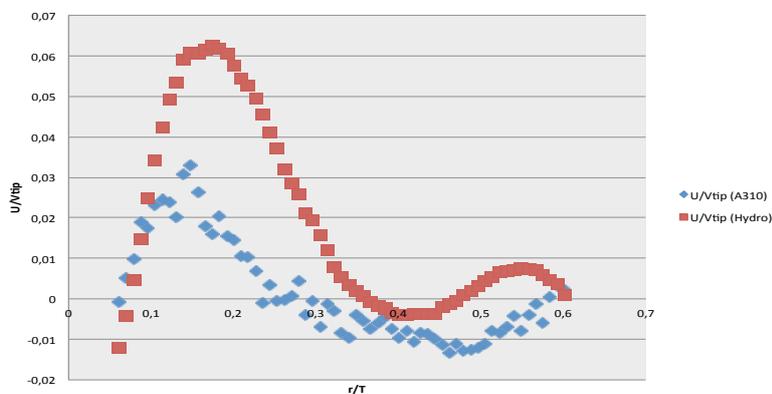


Fig. 4.12: profili radiali delle velocità assiali prese sulla corda a $z/T=0.14$

La differenza di comportamento tra le due tipologie di giranti è confermata dai profili ottenuti nella zona a metà tra le turbine (Fig. 4.13): anche qui è possibile notare come le giranti *Hydrofoil*, scalate da quelle utilizzate in industria, imprimano, rispetto alle A310, velocità più alte al liquido a ridosso dell'albero. Inoltre, come evidenziato dai profili ottenuti in precedenza a $z/T=0.14$, oltre $r/T=0.4$, non vi è più differenza per quanto riguarda i moduli delle velocità, ma si osserva una variazione nel moto del liquido: esso si muove verso l'alto con le giranti *Hydrofoil* e verso il basso con le A310.

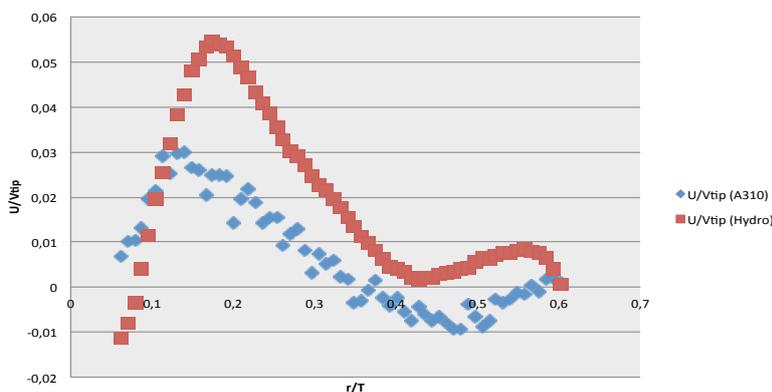


Fig. 4.13: profili radiali delle velocità assiali prese sulla corda a $z/T=0.20$

Oltre agli effetti visti in precedenza vicino alla girante superiore, ad alte velocità di rotazione, anche il campo di moto nella zona inferiore della sezione è influenzato dal livello di liquido. Le acquisizioni sono state effettuate utilizzando giranti *Lightnin* A310. Come si nota in Fig. 4.14 aumentando il livello a 23.5 cm rispetto ai 14.9 cm delle prove precedenti, il vortice generato dalla girante inferiore è differente: il liquido sul fondo del reattore non ricircola più verso l'albero (Fig. 4.10, b), ma prosegue parallelamente al fondo del reattore in direzione della parete.

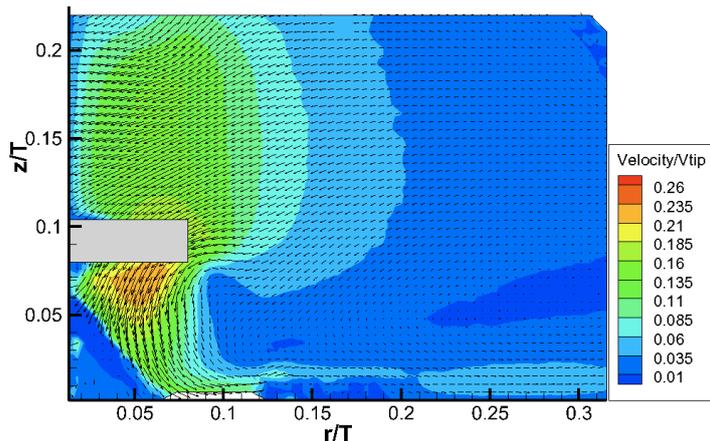


Fig. 4.14: campo di moto del liquido vicino alla girante inferiore nel il piano A con livello di liquido di 23.5 cm, a $N=250$ rpm e $\Delta t = 570 \mu s$ ($AI=4.56 \times 4.56 \text{ mm}^2$)

Questo fenomeno è da imputare probabilmente alla differenza di comportamento della girante superiore: aumentando il livello infatti, la turbina riesce a trattare in modo più efficace il liquido imprimendo un moto assiale e provocando una ricircolazione di liquido in tutta la sezione analizzata. Quindi l'anello di ricircolazione non si chiude nell'intorno della girante inferiore, ma interessa tutta la sezione analizzata fino alla zona prossima al bordo del reattore.

A velocità più basse invece, l'anello di ricircolazione indotto dal moto della girante inferiore si richiude nei pressi di quest'ultima. In Fig. 4.15 è riportato il campo di moto ottenuto nella zona della girante inferiore (piano A) a 100 rpm, impiegando un intervallo di tempo tra gli impulsi laser pari a 1500 μs .

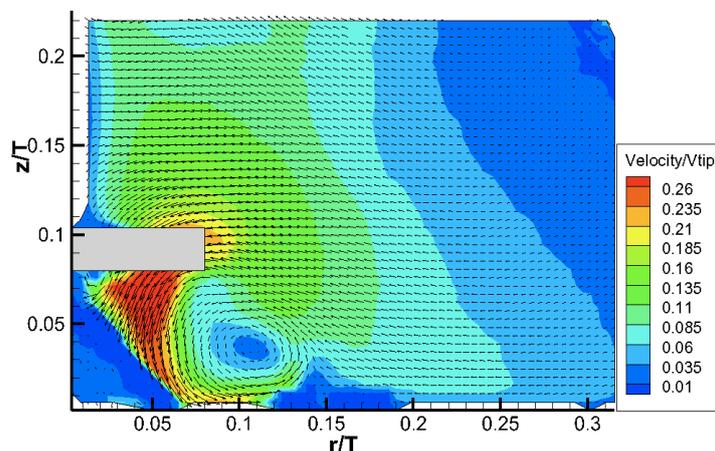


Fig. 4.15: campo di moto del liquido vicino alla girante inferiore nel il piano A con livello di liquido di 23.5 cm, a $N=100$ rpm e $\Delta t = 1500 \mu s$ ($AI=4.56 \times 4.56 \text{ mm}^2$)

Come evidenziato in figura, nella zona inferiore della sezione di analisi, la girante genera un vortice sul fondo del reattore che, richiudendosi, richiama il liquido verso l'albero. Questo effetto è probabilmente indotto da un cambio di regime all'interno del reattore. Calcolando il numero di Reynolds delle giranti (Eq. 1.1) è infatti possibile notare un significativo aumento di questo parametro passando da 100 rpm ($Re \cong 15000$) a 250 rpm ($Re \cong 39200$). Per sistemi dotati di setti frangivortici (reattori *baffled*) il passaggio a regime di moto turbolento tipicamente avviene per $Re > 10000$ [Perry e Green, 2007]: i numeri di Reynolds ricavati per il nostro sistema non sono molto distanti per cui è possibile, vista l'assenza di setti e la forte asimmetria geometrica caratterizzante la configurazione con albero eccentrico, che le differenze di campo di moto registrata a 100 rpm e 250 rpm siano indotte da un cambio di regime che passa dalla condizione laminare/di transizione a pienamente turbolento.

4.2 Sistema bifase

Per le prove in condizione bifase, all'acqua inseminata con il tracciante fluorescente sono state aggiunte particelle di PMMA (220 g, 0.5% w/w) rappresentative in prima approssimazione della fase solida introdotta all'interno del reattore industriale. La concentrazione introdotta è comunque inferiore a quella utilizzata nel processo industriale per evitare un eccessivo intorbidimento della miscela.

Nei paragrafi successivi sono riportati i parametri operativi utilizzati e i risultati ottenuti per la caratterizzazione del reattore nelle due configurazioni studiate (reattore con albero centrato ed eccentrico) sia per quanto riguarda la fase liquida sia per la fase solida.

Per entrambe le configurazioni geometriche, inoltre, è stata eseguita un'analisi visiva preliminare del comportamento del solido all'interno del reattore in modo da definire le principali zone di interesse.

4.2.1 Albero in posizione centrata: analisi preliminare

L'analisi preliminare è stata effettuata esaminando visivamente il comportamento del solido sospeso all'interno del reattore secondo due diversi percorsi operativi. Dapprima si è partiti dalla condizione di solido completamente depositato sul fondo del reattore e se ne è osservato il moto aumentando la velocità di rotazione delle giranti A310 (nello specifico a 50-100-150-200-230 rpm) a intervalli di tempo regolari; successivamente lo stesso tipo di analisi è stato effettuato partendo dal solido totalmente in sospensione (condizione raggiunta a 400 rpm) al diminuire della velocità di rotazione (rispettivamente a 400-300-250-230 rpm). Il principale obiettivo di questo duplice studio è stato verificare che la conformazione finale del deposito di solido (a 230 rpm, velocità scelta come traguardo intermedio) fosse la medesima in entrambi i casi e scongiurare quindi l'ipotesi di regimi pseudo-stazionari diversi al variare della velocità di partenza.

Nel primo caso, partendo quindi dalla condizione di liquido fermo e solido completamente depositato, al crescere della velocità di rotazione è stato osservato, come previsto, un aumento della quantità di solido sospeso.

Le Fig. 4.16 (a-b-c-d) rappresentano delle immagini del fondo del reattore, ottenute rispettivamente a 50, 100, 150, 200 e 230 rpm. Il sistema è stato mantenuto a ogni velocità per un tempo di circa 1 ora in modo da assicurarci di aver raggiunto lo stato di moto stazionario. Dalla loro osservazione, è possibile notare la lenta formazione di una zona circolare priva di solido concentrica all'asse del reattore. Tale regione si allarga,

all'aumentare della velocità di rotazione dell'albero ed è indice del movimento del solido verso le pareti del reattore.

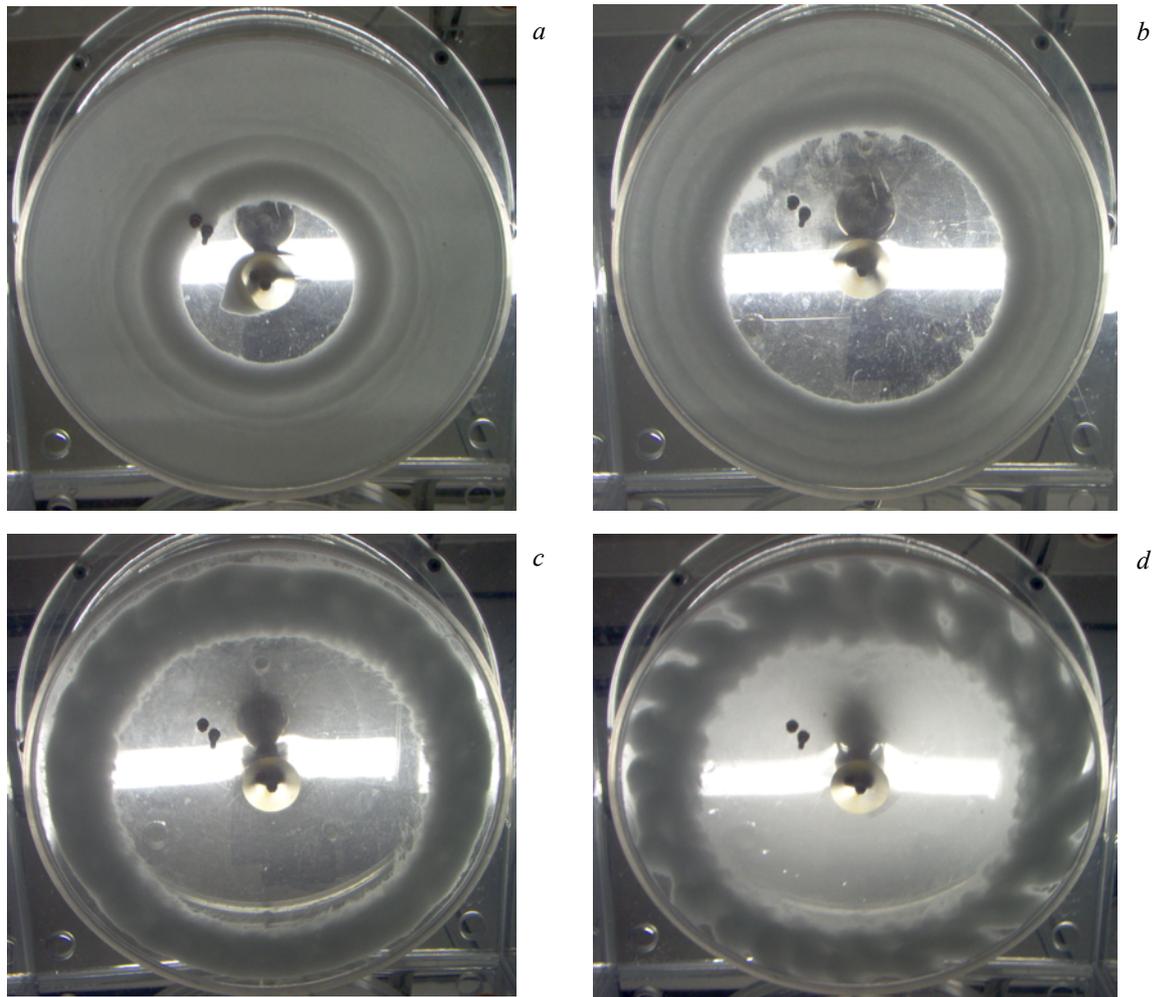


Fig. 4.16: immagini del fondo del reattore a $N = 50$ rpm (a), 100 rpm (b), 200 rpm (c) e 230 rpm (d)

Come si nota in Fig. 4.15 (d), alla velocità di agitazione di 230 rpm il deposito di solido sul fondo del reattore assume una forma a frange. Questo effetto è dovuto alla presenza di un moto transitorio durante il passaggio da 200 a 230 rpm: nei primi minuti dopo l'aumento di velocità, infatti, una frazione del solido comincia a spostarsi verso il centro del reattore, accumulandosi soltanto in alcune zone e cominciando a formare le caratteristiche frange; tuttavia dopo pochi minuti il fenomeno si interrompe, il solido torna a muoversi verso l'esterno e il moto raggiunge lo stato stazionario, evidenziando comunque gli effetti del moto transitorio. In Fig. 4.17, è riportata una foto scattata durante il regime transitorio descritto.

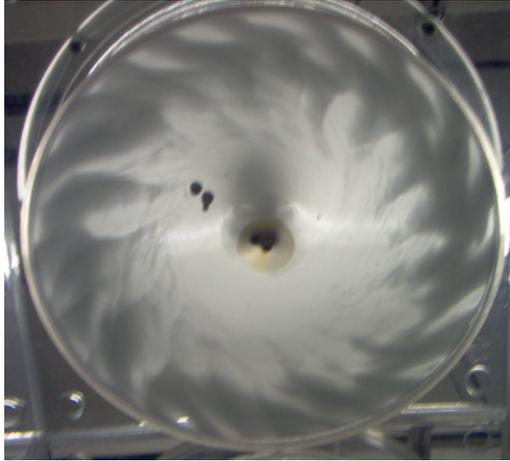
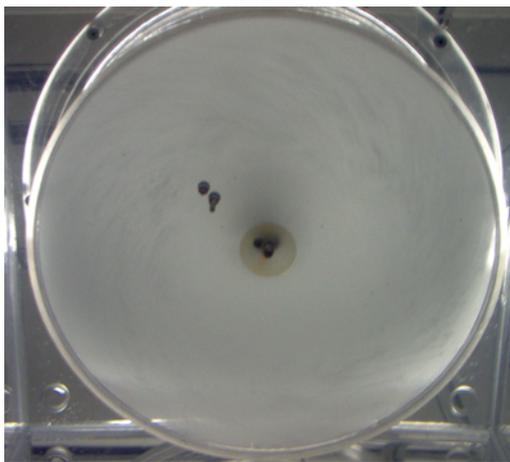
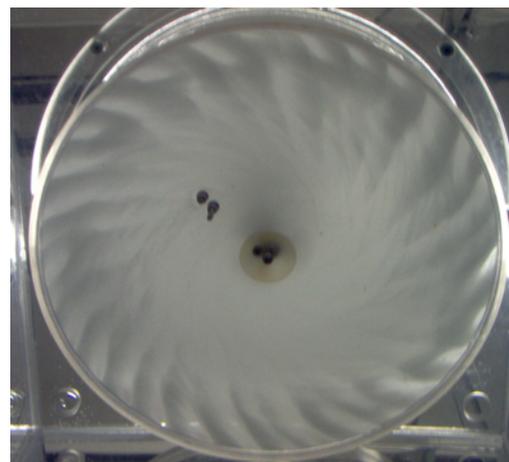


Fig. 4.17: immagine del fondo del reattore ricavata durante il moto transitorio a $N=230$ rpm, con una parte del solido che viene trascinato verso il centro

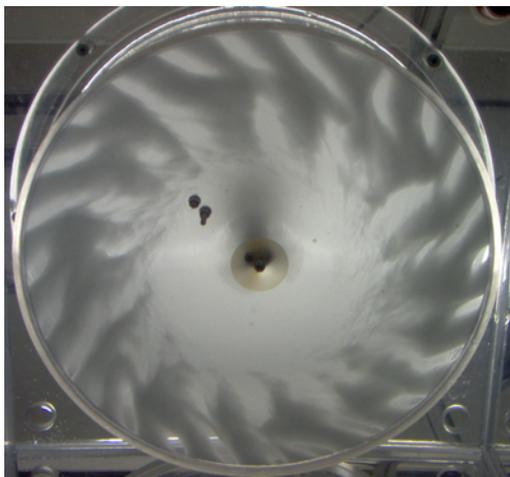
Seguendo il secondo percorso di sospensione del solido, è stato osservato questo stesso tipo di regime transitorio del moto a tutte le velocità. In Fig. 4.18 (a-b-c-d), sono riportate le foto scattate del fondo del reattore rispettivamente a $N = 400$ rpm, 300 rpm, 250 rpm e 230 rpm.



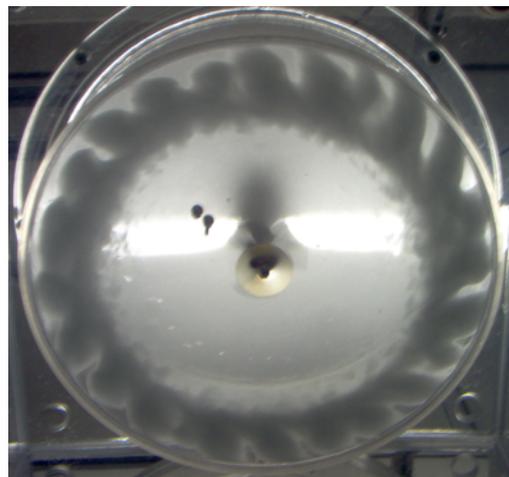
a



b



c



d

Fig. 4.18: immagini del fondo del reattore a $N = 400$ rpm (a), 300 rpm (b), 250 rpm (c) e 230 rpm (d)

Per queste velocità di rotazione si nota che il solido accumulato sul fondo del reattore assume una disposizione a frange, determinata dal richiamo di solido verso il centro del reattore, e non a corona circolare come osservato per le velocità inferiori.

A 230 rpm (Fig. 4.18, d), il movimento della fase liquida e della fase solida, una volta raggiunto lo stazionario, è invece rivolto verso l'esterno.

In conclusione, l'analisi preliminare appena descritta, ha permesso di rilevare un particolare regime transitorio del moto all'interno del reattore alla velocità di rotazione di 230 rpm. L'analisi ha consentito inoltre di verificare che, a questa velocità, partendo da velocità diverse e assicurando di lasciar trascorrere un tempo opportuno, il sistema assume il medesimo stato stazionario come confermato dalla forma del deposito di solido rimasto sul fondo del reattore (Fig. 4.19, a-b-c-d). Lo studio del campo di moto del regime stazionario sarà approfondito in seguito con l'acquisizione contemporanea dei campi di moto della fase liquida e della fase solida.

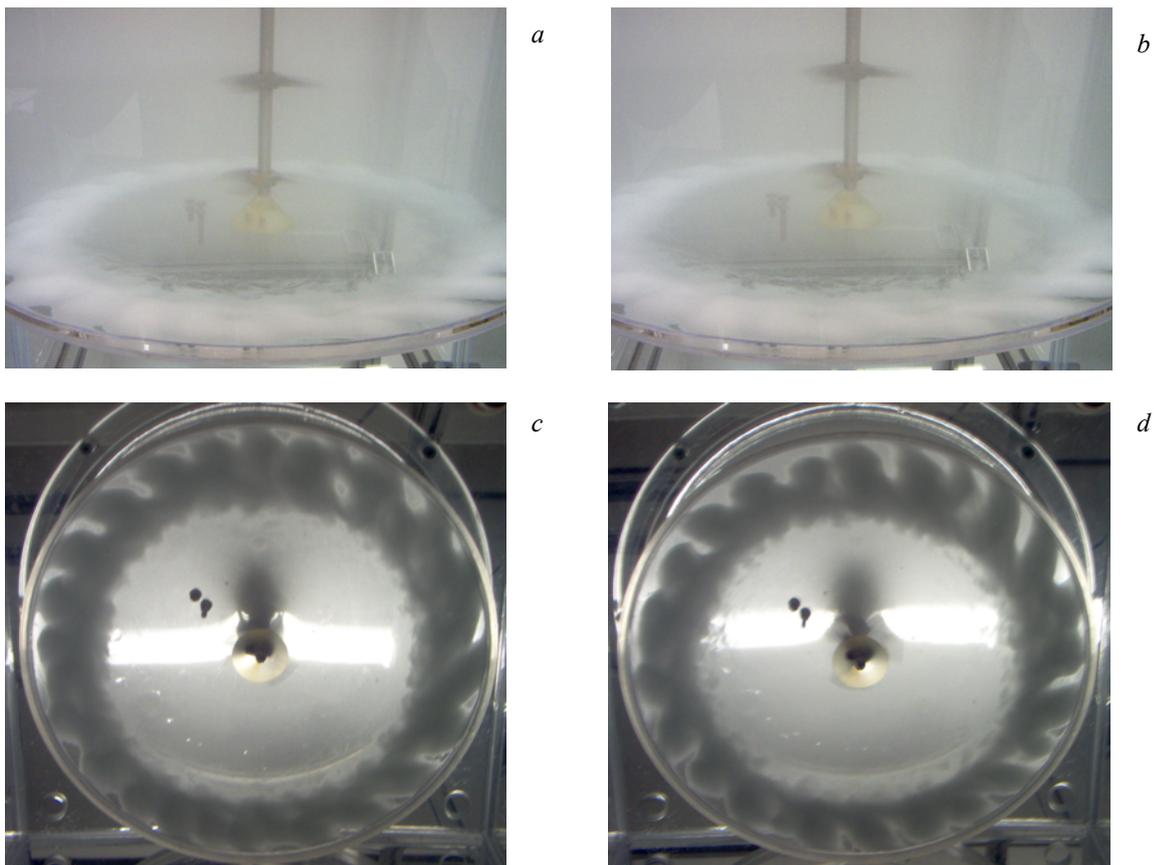


Fig. 4.19: immagini del fondo del reattore a $N = 230$ rpm, partendo da tutto il solido depositato (a-c) e tutto il solido sospeso (b-d)

4.2.2 Albero in posizione centrata: studio del campo di moto

Come in condizione monofase, le misure per l'analisi del campo di velocità del liquido, in regime di moto stazionario, sono state effettuate sul piano verticale passante per l'albero. Di questo, sono stati esaminati in particolare due ingrandimenti (Fig. 4.20): la zona vicino alla girante inferiore (a) e quella nell'intorno del deposito di solido (b), in modo da evidenziare nel primo caso l'influenza del solido sul getto della girante, mentre nel secondo caso il meccanismo di sospensione delle particelle di tracciante della fase solida ad opera del liquido.



Fig. 4.20: piano verticale preso in esame in sistema bifase con albero centrato e i due ingrandimenti analizzati (a, zona girante e b, zona deposito)

Ogni prova è stata effettuata dopo 1 ora dall'accensione dell'agitazione in modo da esaminare il moto del liquido in regime stazionario; sono state acquisite, per ogni prova, 1000 coppie di immagini con un Δt di 850 μs tra gli impulsi laser nella zona della girante inferiore e un Δt di 950 μs nella zona del deposito di solido.

Le velocità di rotazione analizzate sono state di 100 rpm e di 170 rpm, poiché a velocità superiori l'intorbidimento dell'acqua, a causa della maggiore concentrazione di solido in sospensione, non ha permesso di ottenere risultati rappresentabili (il fascio laser non riesce a penetrare in tutta la sezione del reattore di interesse).

I parametri operativi utilizzati sono riassunti in Tab. 4.3 (per la parte di ottimizzazione di questi parametri vedi "3.5 Messa a punto della tecnica e ottimizzazione dei parametri operativi").

Condizioni operative		
N	100 - 170	rpm
Δt		
zona girante	850	μs
zona deposito	950	μs
H_{liq}	23.5	cm
Giranti	A310	-
Re	1.62E+05 (100 rpm) – 2.75E+05 (170 rpm)	
Area di misura		
zona girante	104 x 88	mm ²
zona deposito	144 x 83	mm ²
IA		
zona girante	3.8 x 3.8	mm ²
zona deposito	3.8 x 3.8	mm ²
Tracciante fase liquida	particelle di PMMA rivestite di Rodamina-B	
Tracciante fase solida	particelle di PMMA (0.5% w/w), $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 150 \div 210 \mu m$	

Tab. 4.3: parametri operativi utilizzati per le acquisizioni in bifase con albero centrato

In Fig. 4.21, sono riportati i campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b) ottenuti nella zona intorno alla girante inferiore alla velocità di rotazione dell'albero di 100 rpm.

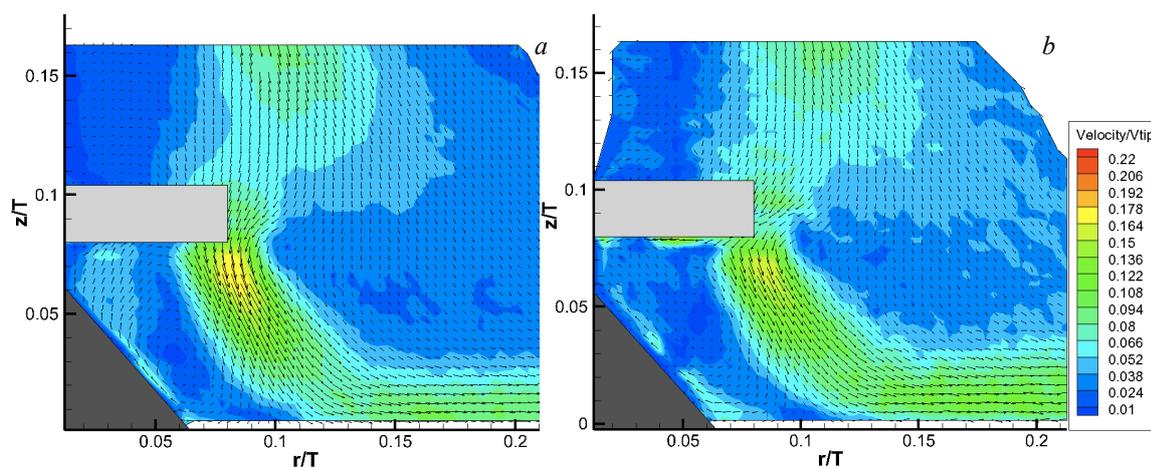


Fig. 4.21: campo di moto ottenuto nella zona della girante inferiore della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=100 \text{ rpm}$ e $\Delta t = 850 \mu s$

Come si evidenzia dai due campi vettoriali ottenuti, dal confronto tra le due fasi, non si

osservano particolari differenze sia per quanto riguarda la forma del campo sia per quanto riguarda i moduli delle velocità in ogni punto.

È possibile notare inoltre che la girante imprime al liquido un movimento verso il basso, che sposta le particelle di PMMA depositate sul fondo, portando alla formazione della zona circolare libera da solido intorno all'albero (vedi Fig. 4.16, b). Dopo aver interagito con il fondo, il sistema solido-liquido prosegue poi parallelo al fondo del reattore, trascinando le particelle depositate verso la parete.

Dalle figure è possibile osservare anche la presenza di un piccolo vortice sul cono a supporto dell'albero, responsabile dell'instaurarsi di un ricircolo di fluido.

I campi vettoriali ottenuti a $N=170$ rpm non presentano differenze significative rispetto a quelli ottenuti a $N=100$ rpm appena descritti, se non per l'aumento dei moduli delle velocità in gioco.

Passando alla seconda zona di interesse, ovvero quella centrata sul deposito di solido sul fondo del reattore, i campi di moto di entrambe le fasi ottenuti a $N=100$ rpm sono riportati in Fig. 4.22 (a-b).

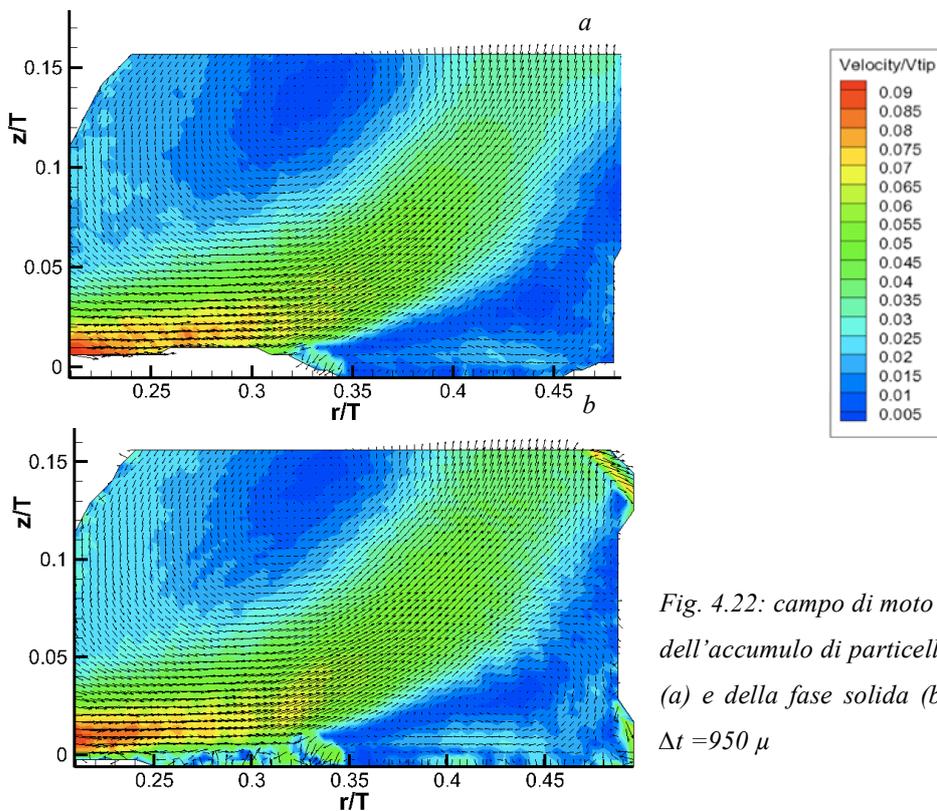


Fig. 4.22: campo di moto ottenuto nella zona dell'accumulo di particelle della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=100$ rpm e $\Delta t = 950 \mu$

Dai campi vettoriali ottenuti, si evidenzia chiaramente il movimento del liquido che trascina il solido in sospensione e modella quello restante sul fondo del reattore: entrambe le fasi, dopo aver proseguito parallele al fondo del reattore, si alzano,

ricircolando verso la girante superiore, formando un vortice lungo tutta la sezione del reattore.

È possibile notare inoltre, la presenza di un secondo vortice situato vicino alla parete (centro in $r/T=0.44$). Considerando le foto già esaminate nell'analisi preliminare, esso è, con tutta probabilità, il responsabile dell'interapedine circolare libera da solido individuabile tra la parete e il deposito a $N=200$ rpm (vedi Fig. 4.16, c) e che tuttavia non è presente nella foto che ritrae il moto a 100 rpm (Fig. 4.16, b). Ciò è probabilmente dovuto al fatto che la presenza del vortice ha un effetto visibile macroscopicamente solo se le velocità in gioco sono abbastanza alte; a velocità sotto i 200 rpm, il liquido non possiede abbastanza inerzia per portare in sospensione tutto il solido che si trova sul fondo, pertanto il fenomeno si verifica ma non può essere osservato attraverso l'analisi visiva.

È stata inoltre effettuata una prova per esaminare il campo di moto del regime transitorio osservato durante l'analisi preliminare (vedi "4.2.1 Albero in posizione centrata: analisi preliminare") alla velocità di rotazione di 230 rpm. In Fig. 4.23, sono riportati i campi vettoriali ottenuti dopo 10 minuti (a) e dopo 1 ora (b) di agitazione. È stato possibile ottenere i soli campi di moto della fase solida, poiché l'intorbidimento del liquido all'interno del reattore non ha permesso la rilevazione delle particelle traccianti della fase liquida.

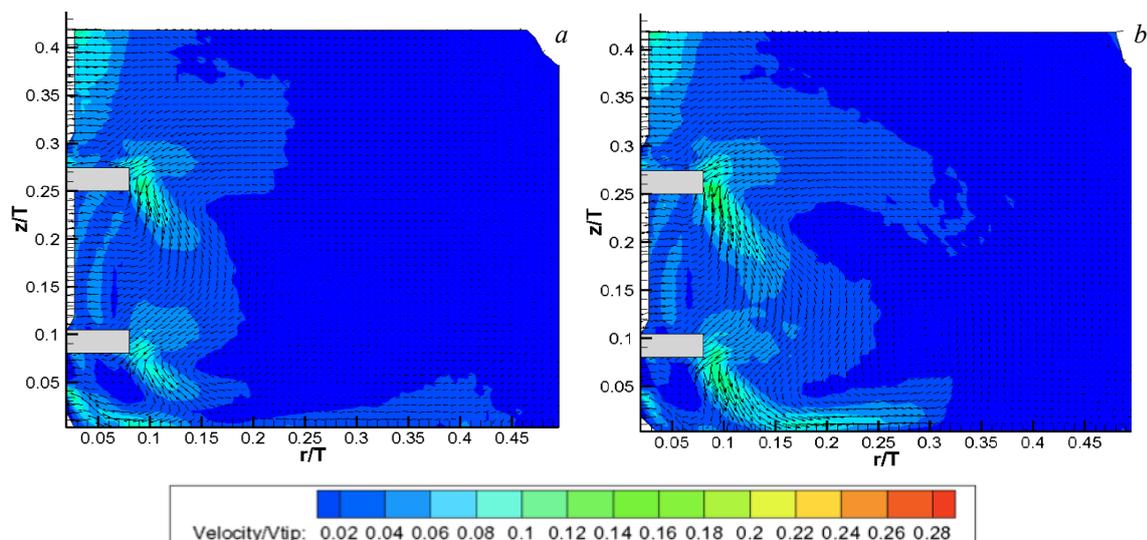


Fig. 4.23: campo di moto della fase solida ottenuto sul piano verticale dopo 10 minuti (a) e dopo 40 minuti (b) di agitazione, a $N=230$ rpm e $\Delta t = 850 \mu$

Dai campi di moto ottenuti, è possibile osservare il cambiamento del moto della fase solida: nei primi minuti, come osservato nell'analisi preliminare (Fig. 4.17), il solido sul

fondo del reattore viene richiamato verso l'albero; passata 1 ora, il getto della girante torna a spingere le particelle di solido verso le pareti, formando la corona circolare osservata nelle immagini dell'analisi preliminare (Fig. 4.16, d).

È perciò possibile affermare che il campo di moto ottenuto è condizionato fortemente dalla presenza del solido depositato sul fondo del reattore: quando la velocità di rotazione è bassa (50-100-200 rpm), l'accumulo è situato nei pressi dell'albero, e le fasi, per effetto delle giranti, vengono spinte verso le pareti del reattore, determinando gradualmente l'allontanamento del solido dall'albero; aumentando la velocità (250-300-400 rpm), aumenta anche la quantità di solido sospeso e il deposito si allontana ulteriormente dal centro del reattore: il sistema si avvicina perciò alle caratteristiche della condizione di regime monofase e si instaura un regime di moto caratterizzato dal movimento di entrambe le fasi dalle pareti verso il centro del reattore.

È stato inoltre osservato che alla velocità di rotazione di 230 rpm, il sistema è in una condizione limite: nei primi minuti, viene sospesa una grande quantità di solido ed è possibile osservare il movimento verso il centro di parte del solido sul fondo del reattore; una volta che il solido torna a depositarsi e l'accumulo si avvicina all'albero, il movimento delle fasi sul fondo torna diretto verso le pareti, come osservato a basse velocità di rotazione.

In conclusione, se il liquido spinto dalle giranti interagisce con il solido accumulato sul fondo del reattore si osserva un moto delle fasi diretto verso le pareti in tutta la sezione; se invece, le particelle depositate sono in minore quantità e vicino alle pareti, il liquido non viene influenzato da esse e i campi di moto risultano analoghi a quelli ottenuti in condizione monofase, con il getto della girante inferiore rialzato rispetto al fondo del reattore e parte del liquido che ricircola verso l'albero.

In Fig. 4.24, sono riportati i campi di moto della fase solida e della fase liquida sovrapposti e la mappa dei moduli della velocità di *slip*. Questa è definita come la differenza tra la velocità assiale della fase solida U_S e la velocità assiale della fase liquida U_L , divisa per la velocità caratteristica del sistema V_{tip} .

Come evidenziato in figura, in quasi tutte le zone i valori calcolati hanno segno negativo e modulo prossimo a 0: il moto delle fasi è diretto verso il basso per cui la velocità delle particelle di solido è di poco maggiore di quella del liquido per effetto della forza peso agente su di esse (la differenza di densità è però piccola). Nella zona vicino al cono a supporto dell'albero, inoltre, il moto è diretto verso l'alto a causa della formazione del

vortice e il valore della velocità di *slip* ottenuto è ancora negativo: come atteso, infatti, la velocità assiale del liquido è maggiore di quella del solido.

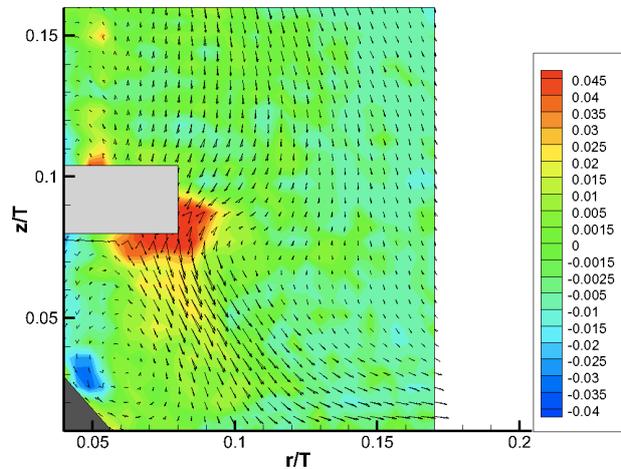


Fig. 4.24: campi di moto della fase solida e della fase liquida sovrapposti alla mappa dei moduli della velocità di *slip*, a $N=100$ rpm e $\Delta t = 850 \mu$

Si può osservare, comunque, una zona in cui il valore della velocità di *slip* assume segno positivo: appena al di sotto della girante, infatti, il liquido ha una velocità superiore a quella del solido, probabilmente a causa dell'interazione della particelle di solido con le pale della turbina e alla maggiore inerzia della fase solida. È comunque da sottolineare che le particelle di solido utilizzate, essendo di piccole dimensioni ($150 \div 210 \mu\text{m}$), sono essenzialmente in regime di Stokes [Montante et al., 2012] e per questo in molte zone il valore ottenuto di velocità di *slip* è confrontabile con l'incertezza della misura, rendendo l'analisi poco significativa.

4.2.3 Albero in posizione eccentrica: analisi preliminare

In questo caso, per prima cosa è stato osservato il moto transitorio del solido all'interno del reattore a una velocità fissata (100 rpm), partendo dalla condizione di solido completamente depositato sul fondo. Il sistema è stato quindi lasciato in agitazione per un tempo complessivo di 3 ore; le foto riportate in seguito, sono state scattate rispettivamente dopo 5 minuti (Fig. 4.25, a-b), 45 minuti (Fig. 4.26, a-b), 2 ore (Fig. 4.27, a-b) e 3 ore (Fig. 4.28, a-b).

Dopo pochi minuti dall'accensione del motore, si può notare la formazione della sezione circolare di fondo libera da solido, come già osservato nella configurazione con albero centrato (vedi "4.2.1 Albero in posizione centrata: analisi preliminare").

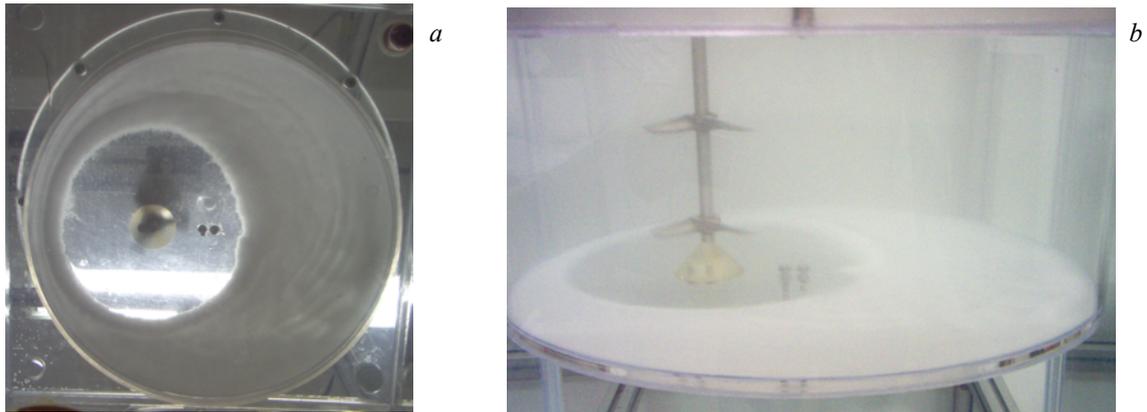


Fig. 4.25: immagini del fondo del reattore (a) e del davanti (b) a $N = 100$ rpm dopo 5 minuti di agitazione

Dopo 45 minuti, la conformazione del deposito di solido evidenzia la forte asimmetria del sistema in esame: l'area di fondo libera da solido non è più circolare, bensì presenta una zona in cui una maggior quantità di particelle viene trascinata verso l'esterno da parte del liquido, formando un deposito maggiore nella sezione di reattore dietro all'albero (cioè la prima frazione di accumulo incontrata dalla girante, muovendosi essa in senso orario).

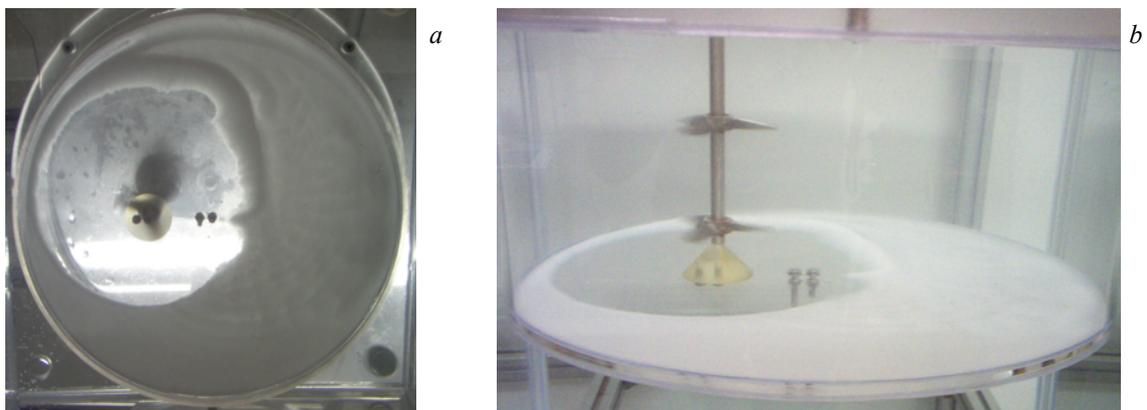


Fig. 4.26: immagini del fondo del reattore (a) e del davanti (b) a $N = 100$ rpm dopo 45 minuti di agitazione

Trascorse 2 ore dall'accensione dell'agitazione, le foto scattate evidenziano maggiormente la disomogeneità del mescolamento all'interno del reattore, causata dall'eccentricità dell'albero: il solido tende ad accumularsi in maggior quantità nella zona centrale posteriore a ridosso della parete (dove le pale della girante incontrano l'accumulo di particelle) formando qui un deposito sul fondo più alto che altrove.

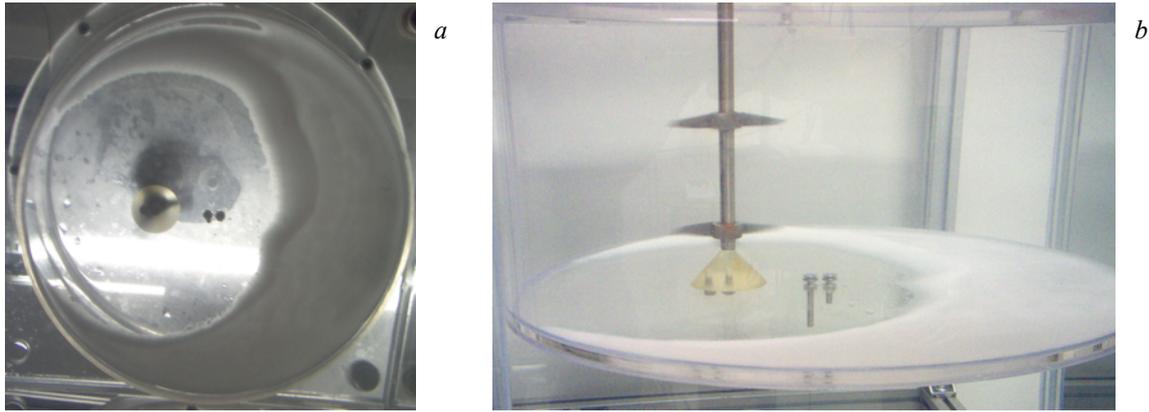


Fig. 4.27: immagini del fondo del reattore (a) e del davanti (b) a $N = 100$ rpm dopo 2 ore di agitazione

La forma e la quantità di solido depositato sul fondo del reattore, passate 3 ore, non presenta variazioni significative rispetto alle ultime immagini descritte (Fig. 4.27, a-b): il sistema sembra aver raggiunto quindi un regime stazionario.

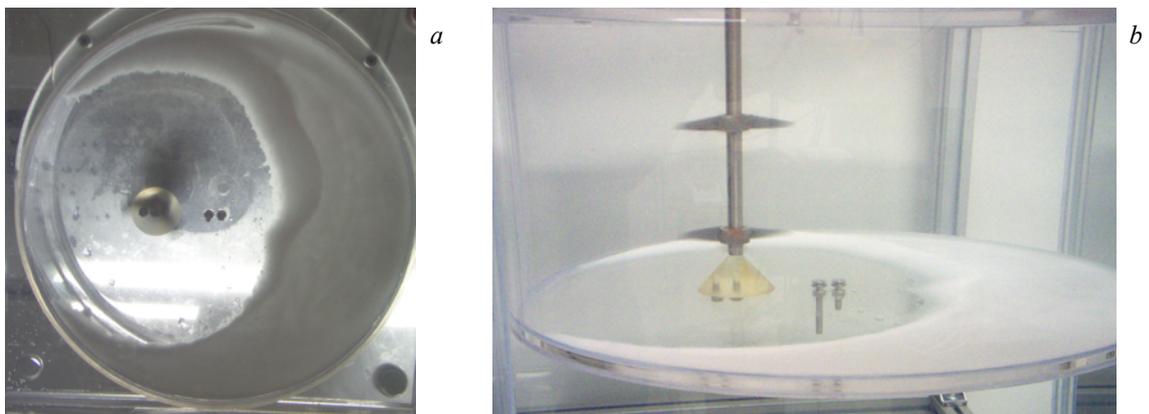


Fig. 4.28: immagini del fondo del reattore (a) e del davanti (b) a $N = 100$ rpm dopo 3 ore di agitazione

Conclusa questa prima analisi, al fine di rilevare se, lasciando il sistema ad alte velocità di rotazione e decrescendo gradualmente fino a una velocità intermedia (400-300-250-170 rpm) o partendo dal liquido fermo e solido completamente depositato e aumentando la velocità di rotazione fino alla stessa velocità (70-100-150-170 rpm), il sistema pervenga allo stesso regime stazionario, è stata effettuata un'analisi visiva valutando la conformazione del deposito solido sul fondo. La velocità intermedia scelta è stata di 170 rpm, in modo da poter avere in seguito un riscontro con i campi di moto ottenuti attraverso l'analisi PIV.

Considerando le Fig. 4.29 (a-b-c-d), immagini ricavate rispettivamente a 70, 100, 150 e 170 rpm, è possibile osservare l'evoluzione della sezione libera da solido all'aumentare della velocità di rotazione dell'albero.

Nonostante lo studio del regime di moto a 100 rpm avesse messo in evidenza che il sistema ha bisogno di alcune ore per raggiungere la stabilità, per ragioni di tempo, il liquido è stato mantenuto a velocità costante per un tempo di circa 1 ora prima di scattare le fotografie, in modo da poter completare l'analisi in una sola giornata senza interrompere l'agitazione. È stato inoltre considerato che, all'aumentare della velocità di agitazione, i tempi dei moti transitori dovrebbero ridursi, rendendo 1 ora un tempo sufficiente per lo studio dei regimi pseudo-stazionari.

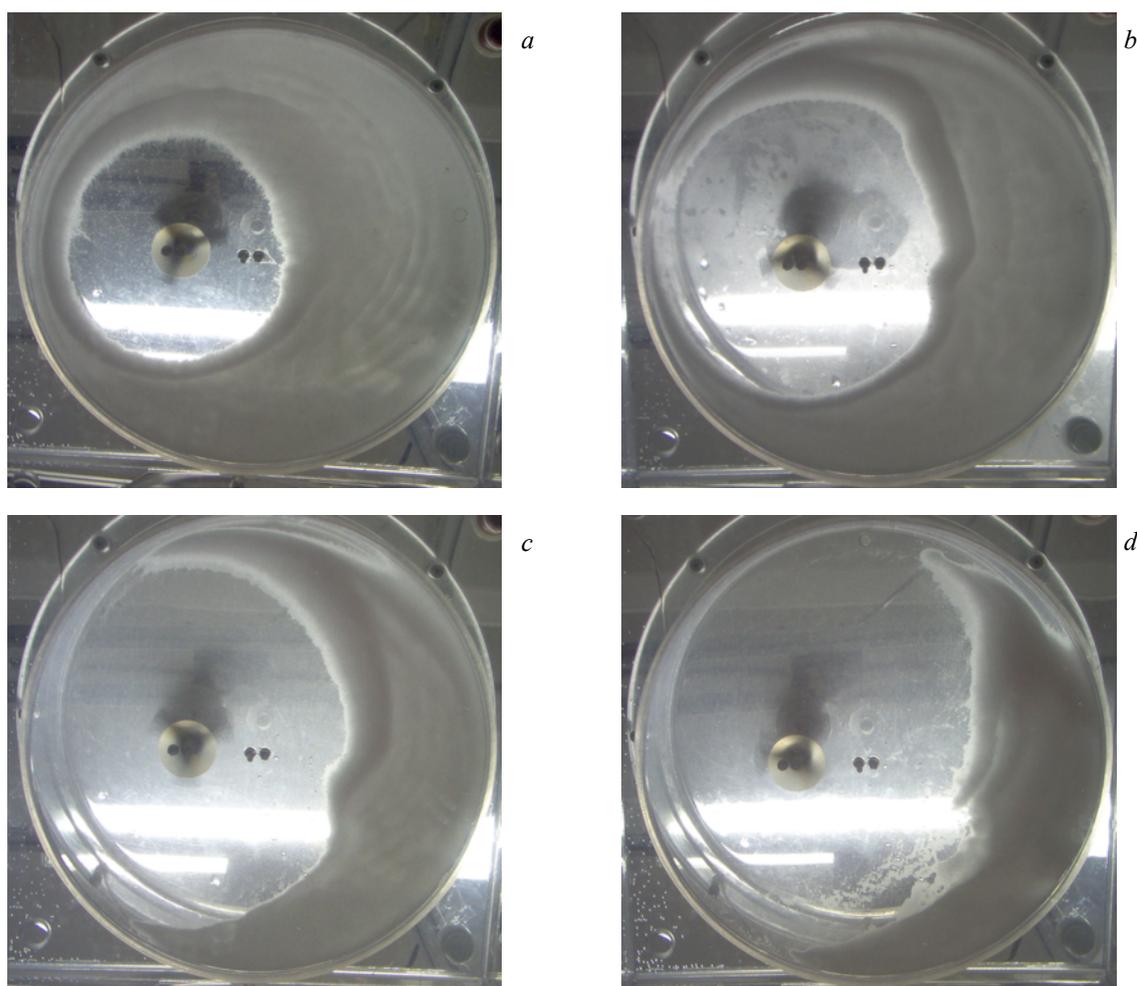


Fig. 4.29: immagini del fondo del reattore a $N = 70$ rpm (a), 100 rpm (b), 150 rpm (c) e 170 rpm (d)

Come si evidenzia dalle figure, all'aumentare della velocità di agitazione le particelle di solido tendono ad accumularsi nella zona più lontana dalle giranti, vicino alla parete. Il deposito non è comunque simmetrico, ma presenta una zona di maggiore accumulo nella zona posteriore all'albero (sempre la prima incontrata dalla turbina, girando essa in senso orario). In Fig. 4.30, è riportata un'immagine del reattore, in cui è possibile vedere la differenza tra il deposito nella zona anteriore all'albero (l'ultima cioè incontrata dalla

girante) rispetto a quello nella zona posteriore.

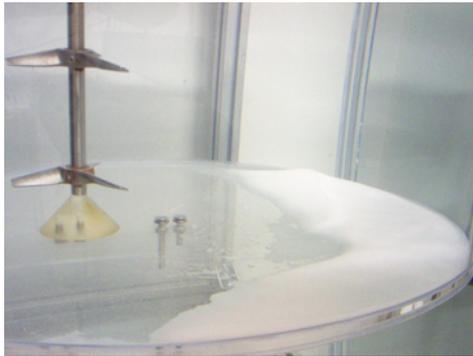


Fig. 4.30: immagine frontale del reattore con visibile il deposito di solido formato

Nella seconda analisi si è partiti dalla condizione di solido quasi completamente in sospensione e si è diminuita la velocità di rotazione fino a 170 rpm, ma i risultati riguardanti la conformazione del deposito di solido in regime stazionario sono differenti dal caso precedentemente esaminato; le immagini del sistema a 400 rpm, 300 rpm, 250 rpm e 170 rpm sono riportate rispettivamente in Fig. 4.31 (a-b-c-d).

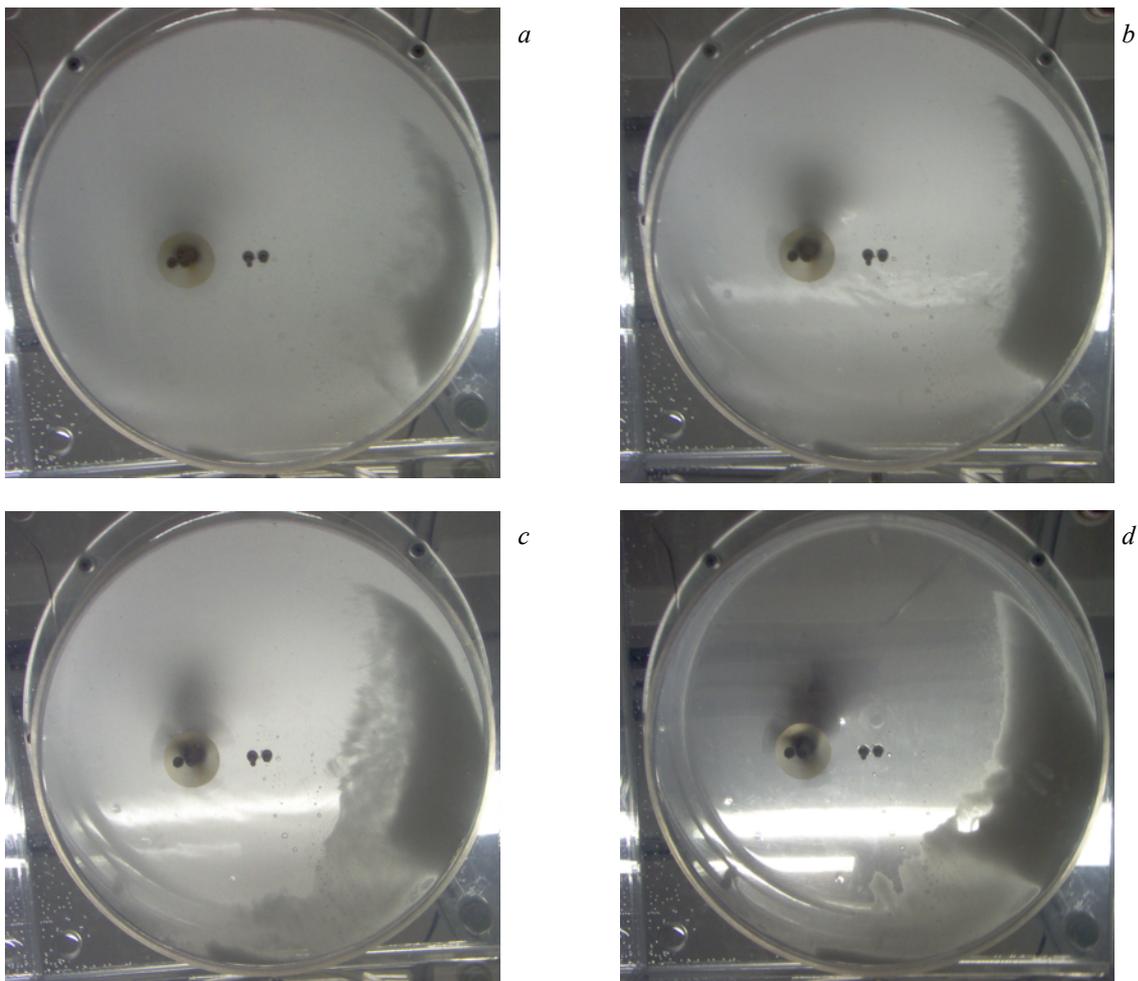


Fig. 4.31: immagini del fondo del reattore a $N = 400$ rpm (a), 300 rpm (b), 250 rpm (c) e 170 rpm (d)

Dalle immagini ottenute è possibile osservare il comportamento delle particelle di solido al diminuire della velocità di agitazione: esse si depositano, nella zona di reattore più lontana dalle giranti, formando una mezza luna, indice della forte asimmetria del sistema in esame. La forma dell'accumulo di solido risultante a 170 rpm, però, è differente da quella osservata partendo da entrambe le fasi ferme e aumentando gradualmente la velocità di rotazione dell'albero: in queste condizioni, infatti, l'accumulo occupa una sezione minore del reattore e presenta un'altezza mediamente maggiore.

In conclusione, l'analisi preliminare del comportamento delle particelle di solido all'interno del reattore in configurazione eccentrica, ha permesso di valutare l'evoluzione del regime di moto al trascorrere del tempo a velocità di rotazione dell'albero fissata (100 rpm). Inoltre, è stato possibile rilevare che questo tipo di sistema, partendo da condizioni opposte per arrivare a una intermedia (170 rpm), sembra raggiungere regimi di moto stazionario diversi, con la conseguente formazione di depositi di solido di aspetto differente sul fondo del reattore, come riportato dal confronto tra gli accumuli di solido ottenuti a 170 rpm partendo dalla condizione di solido completamente depositato (Fig. 4.32, a-c) o da quella di solido quasi totalmente in sospensione (Fig. 4.32, b-d).

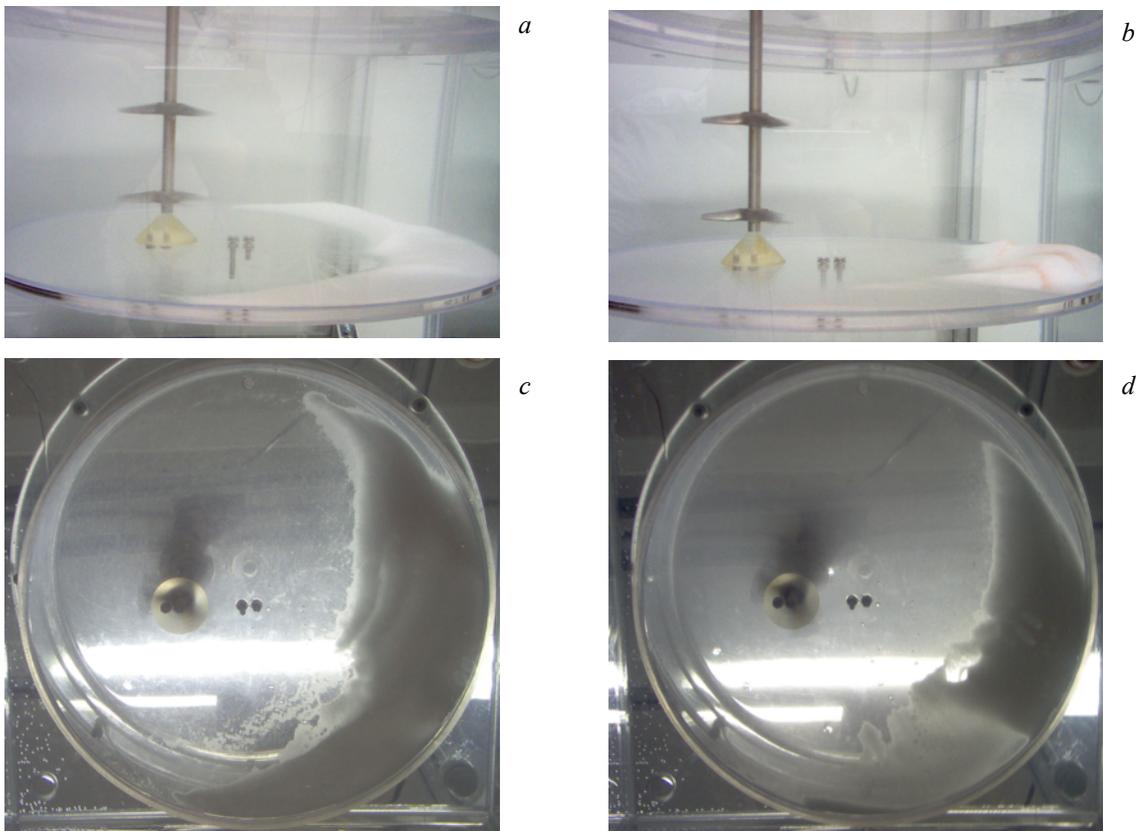


Fig. 4.32: immagini del fondo del reattore a $N = 170$ rpm, partendo da tutto il solido depositato (a-c) e tutto il solido sospeso (b-d)

Questo comportamento è differente da quello osservato durante lo studio della configurazione con albero in posizione centrata, dove, partendo da condizioni e velocità diverse, il regime stazionario raggiunto era il medesimo.

Albero in posizione eccentrica: studio del campo di moto

Le misure per l'analisi del campo di velocità delle due fasi sono state effettuate sul piano verticale di maggiore lunghezza passante per l'albero. Di questo, come per la configurazione con albero centrato, sono stati esaminati in particolare due ingrandimenti: la zona vicino alla girante inferiore (Fig. 4.33, a) e quella nell'intorno del deposito di solido (Fig. 4.33, b).

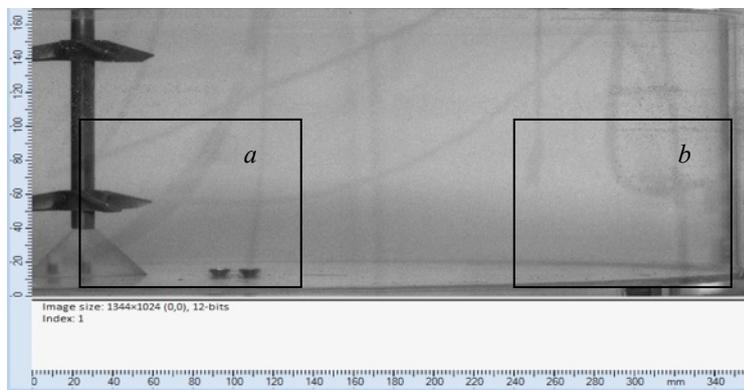


Fig. 4.33: piano verticale preso in esame in sistema bifase con albero centrato e i due ingrandimenti analizzati (a, zona girante e b, zona deposito)

Il sistema è stato studiato alla velocità di rotazione di 100 rpm e di 170 rpm; le acquisizioni sono state effettuate dopo circa 1 ora dal raggiungimento della velocità fissata in modo da ottenere i campi vettoriali delle velocità in condizioni di stabilità del moto. I parametri operativi utilizzati sono riportati in Tab. 4.4.

Per ogni prova, sono state acquisite 7000 coppie di immagini con un Δt di 850 μs tra gli impulsi laser nella zona della girante inferiore e un Δt di 950 μs nella zona del deposito di solido. La scelta di questo intervallo di tempo, e non di quello ottenuto per la configurazione eccentrica attraverso il confronto degli rms (vedi “3.5 Messa a punto della tecnica e ottimizzazione dei parametri operativi”), è stata basata sui risultati ottenuti nella precedente caratterizzazione del reattore con albero centrato in presenza della fase solida. È stato infatti ipotizzato che le velocità delle fasi all'interno del reattore fossero simili, in condizione bifase, per entrambe le configurazioni: essendo l'entità delle velocità in gioco un elemento fondamentale per la scelta dell'intervallo di tempo tra gli impulsi, per le prove sono stati utilizzati tempi analoghi.

Condizioni operative		
N	100 - 170	rpm
Δt		
zona girante	850	μs
zona deposito	950	μs
H_{liq}	23.5	cm
Giranti	A310	-
Re	1.62E+05 (100 rpm) – 2.75E+05 (170 rpm)	
Area di misura		
zona girante	115 x 74	mm ²
zona deposito	198 x 91	mm ²
IA		
zona girante	3.8 x 3.8	mm ²
zona deposito	4.7 x 4.7	mm ²
Tracciante fase liquida	particelle di PMMA rivestite di Rodamina-B	
Tracciante fase solida	particelle di PMMA (0.5% w/w), $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 150\text{-}210 \text{ }\mu\text{m}$	

Tab. 4.4: parametri operativi utilizzati per le acquisizioni in bifase con albero centrato

A causa della possibile differenza tra i regimi stazionari raggiunti dal sistema partendo dalle due condizioni esaminate nell'analisi preliminare, è stato deciso di acquisire i campi di moto della fase liquida e della fase solida, seguendo entrambi i percorsi:

1. partendo dalla condizione di solido depositato (0 rpm) e aumentando gradualmente la velocità di rotazione;
2. partendo dalla condizione di solido quasi completamente in sospensione (400 rpm) e diminuendo l'agitazione fino alla velocità prevista.

In Fig. 4.34 e in Fig. 4.35, sono riportati i campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b) ottenuti nella zona intorno alla girante inferiore alla velocità di rotazione dell'albero di 100 rpm e di 170 rpm, raggiunte aumentando gradualmente la velocità di agitazione, dalla condizione di liquido fermo e di solido completamente depositato (percorso 1).

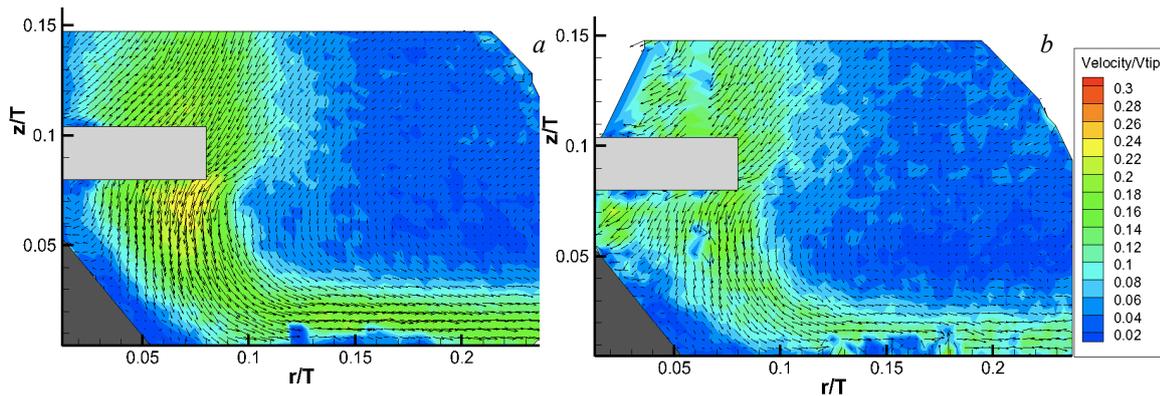


Fig. 4.34: campo di moto ottenuto nella zona della girante inferiore della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=100$ rpm e $\Delta t = 850 \mu s$

Come si nota dai campi di moto ottenuti a 100 rpm (Fig. 4.34, a-b), il movimento del fluido è coerente con quello osservato nella configurazione con l'albero posto al centro del reattore: il liquido trascina il solido verso la parete con moto dall'albero verso l'esterno. Sul fondo del reattore si crea così una sezione libera da particelle, osservabile nelle immagini dell'analisi preliminare (vedi "4.2.3 Albero in posizione eccentrica: analisi preliminare").

Considerando invece i campi vettoriali ottenuti a 170 rpm (Fig. 4.35, a-b), è possibile notare la formazione di un ricircolo di liquido che, dopo l'interazione con il fondo del reattore, torna verso la girante, richiamando parte del fluido circostante: questo provoca un movimento generale delle due fasi all'interno del reattore verso l'albero, da destra verso sinistra, opposto a quello osservato nella stessa configurazione con velocità di agitazione di 100 rpm.

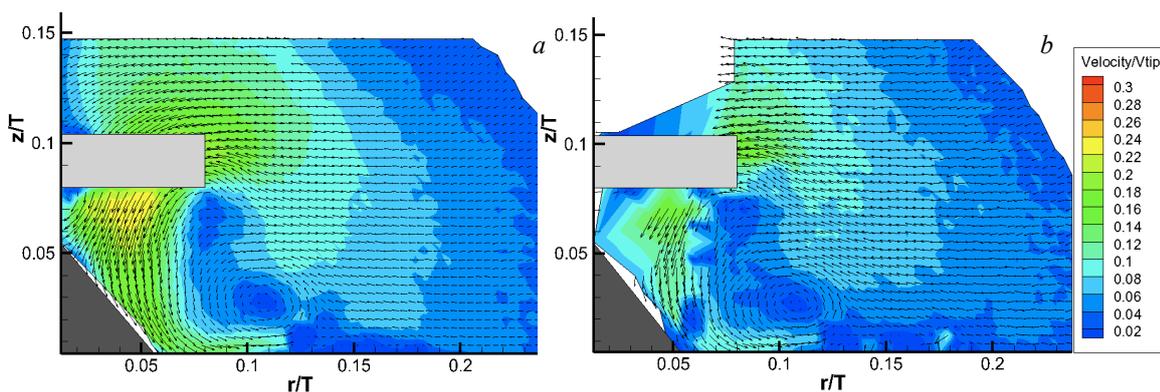


Fig. 4.35: campo di moto ottenuto nella zona della girante inferiore della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=170$ rpm e $\Delta t = 850 \mu s$

A conferma di questa differenza di comportamento, in Fig. 4.36 (a-b) e in Fig. 4.37 (a-b), sono riportati i campi di moto ottenuti alle due velocità (100 e 170 rpm, rispettivamente) nell'intorno dell'accumulo di solido sul fondo del reattore.

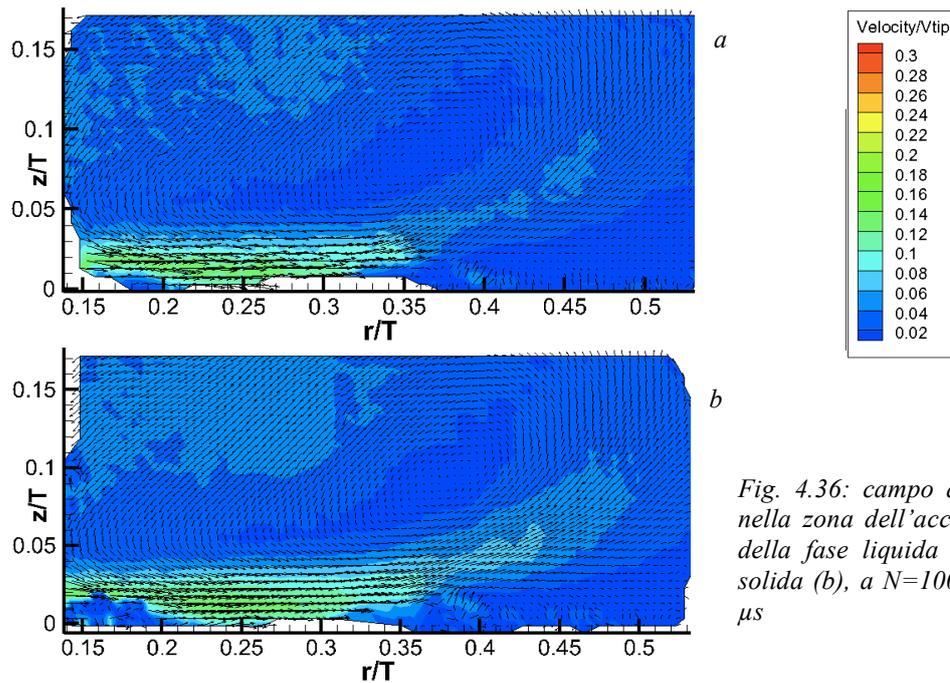


Fig. 4.36: campo di moto ottenuto nella zona dell'accumulo di solido, della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=100$ rpm e $\Delta t = 950 \mu s$

I campi vettoriali ottenuti a entrambe le velocità sono coerenti con quelli ottenuti in precedenza vicino alla girante inferiore: a 100 rpm, sia la fase liquida che la fase solida si muovono verso la parete, in analogia con il comportamento osservato, nella stessa zona, nella configurazione con albero centrato in condizione bifase; aumentando la velocità di agitazione a 170 rpm invece, è chiara dalle figure l'inversione di moto del fluido che non viene più spinto dalle giranti verso la parete ma ricircola verso l'albero, generando un movimento di entrambe le fasi da destra verso sinistra (per il piano analizzato).

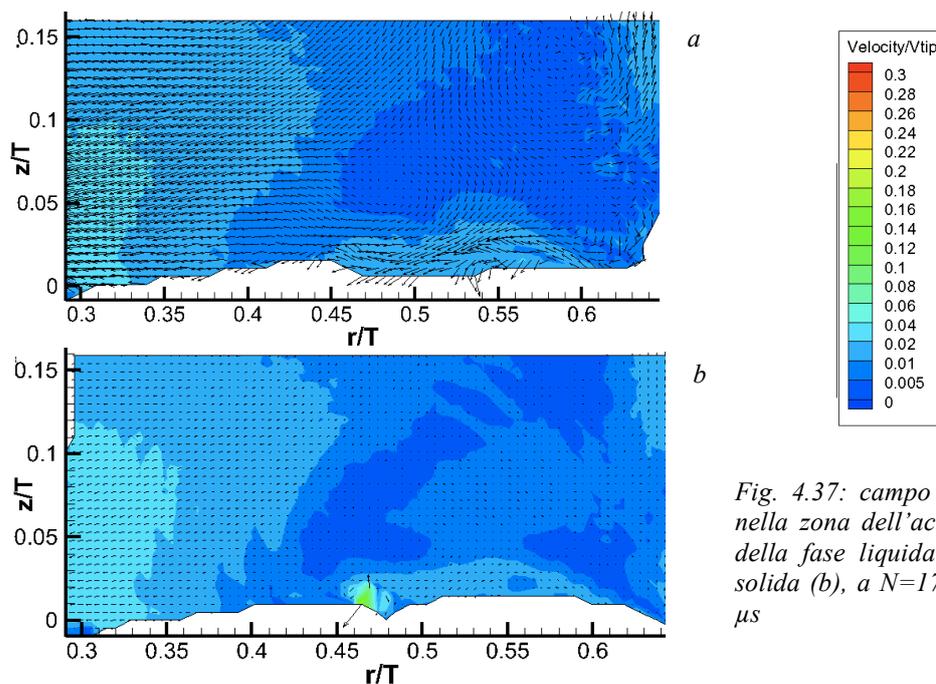


Fig. 4.37: campo di moto ottenuto nella zona dell'accumulo di solido, della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=170$ rpm e $\Delta t = 950 \mu s$

Lo stesso comportamento osservato a 170 rpm, è stato rilevato dalle acquisizioni a 100

rpm e a 170 rpm, questa volta raggiunte partendo dalla condizione di solido completamente in sospensione (percorso 2) e diminuendo la velocità fino ad arrivare a quella desiderata.

Sfortunatamente, la maggior altezza del deposito di solido rimasto nei pressi della parete, non ha permesso di ottenere il campo di moto delle fasi intorno alla girante inferiore poiché il raggio laser, incontrando il solido, veniva oscurato in quella zona. Sono stati ricavati dunque solamente i campi vettoriali della zona vicino al deposito di solido, in quanto, al di sopra di esso, è stato possibile ottenere le immagini delle particelle per l'elaborazione e la costruzione del campo.

Le immagini raffiguranti il campo di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b), ottenuti a 100 rpm, sono riportate in Fig. 4.38.

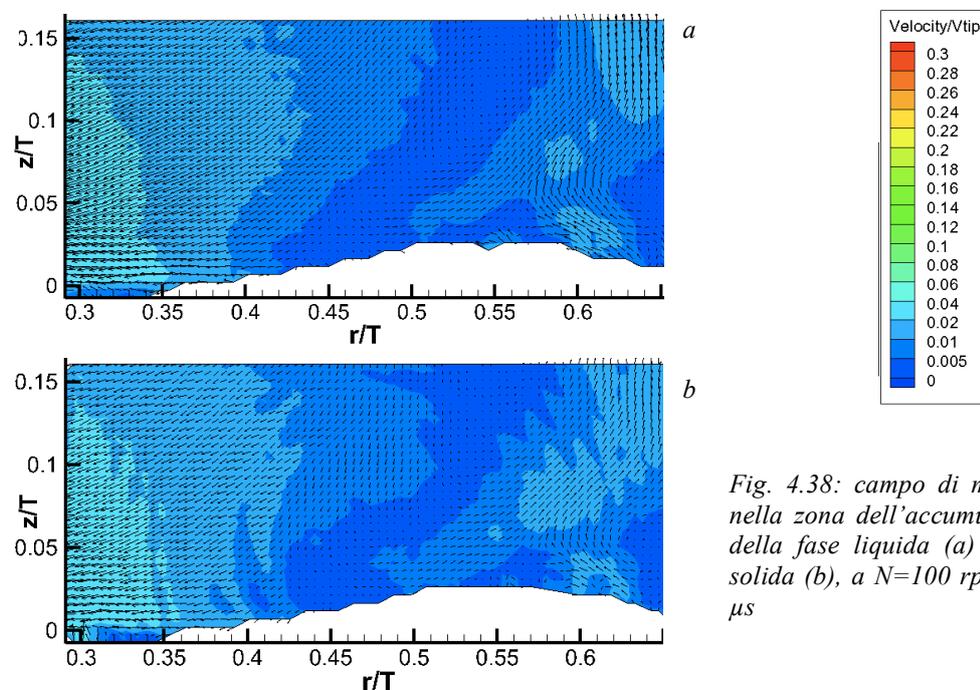


Fig. 4.38: campo di moto ottenuto nella zona dell'accumulo di solido, della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=100$ rpm e $\Delta t = 950 \mu s$

È evidente come, nella parte inferiore della sezione, la direzione del moto di entrambe le fasi sia opposta (da destra verso sinistra) a quella osservata alla stessa velocità partendo dal fluido fermo e aumentando gradualmente la velocità di agitazione. Come ipotizzato nell'analisi preliminare, il sistema in condizione bifase e con albero spostato in posizione eccentrica, sembra assumere regimi stazionari diversi al variare dei percorsi che hanno portato al raggiungimento della condizione di stabilità del moto.

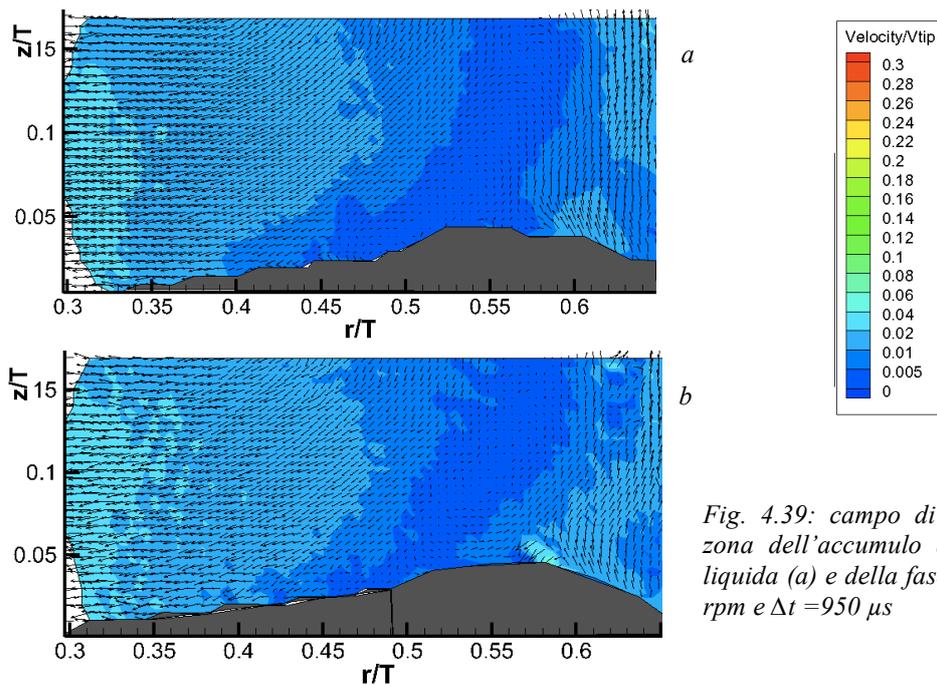


Fig. 4.39: campo di moto ottenuto nella zona dell'accumulo di solido, della fase liquida (a) e della fase solida (b), a $N=170$ rpm e $\Delta t = 950 \mu s$

Alla velocità di agitazione di 170 rpm invece (Fig. 4.39, a-b), il campo di moto osservato seguendo le due diverse strade per arrivare in condizione di stabilità, è il medesimo: nonostante partendo dal solido quasi completamente in sospensione e diminuendo la velocità di agitazione non sia stato possibile ottenere il campo vettoriale nella zona intorno alla girante inferiore, i risultati ottenuti vicino al deposito di solido sul fondo del reattore confermano il particolare movimento di entrambe le fasi dalla parete verso l'albero già osservato in precedenza.

Attraverso l'esame dei campi vettoriali di velocità descritti, è stata evidenziata una caratteristica del sistema studiato: il moto stazionario che si instaura varia a seconda delle condizioni del sistema o del procedimento che è stato seguito per arrivare al raggiungimento di quello stato.

L'ipotesi della forte instabilità del sistema analizzato sembra essere confermata anche dalla presenza di un moto transitorio rilevato a 170 rpm, durante l'osservazione visiva dell'evoluzione del solido depositato partendo dalla condizione di liquido fermo e aumentando la velocità di agitazione gradualmente (percorso 1): dopo pochi minuti a 170 rpm, è stato osservato che le particelle all'interno del reattore venivano spinte dal liquido verso la parete del reattore, ma questo movimento è in contraddizione con quello rilevato dai campi di moto ottenuti dopo 1 ora, al raggiungimento del moto stazionario. Per questo motivo, è stata effettuata una prova dopo 10 minuti di agitazione a 170 rpm, acquisendo 300 coppie di immagini al fine di ridurre il tempo complessivo della prova

per non superare il tempo caratteristico del regime transitorio. Il campo di moto è riportato in Fig. 4.40 (a-b).

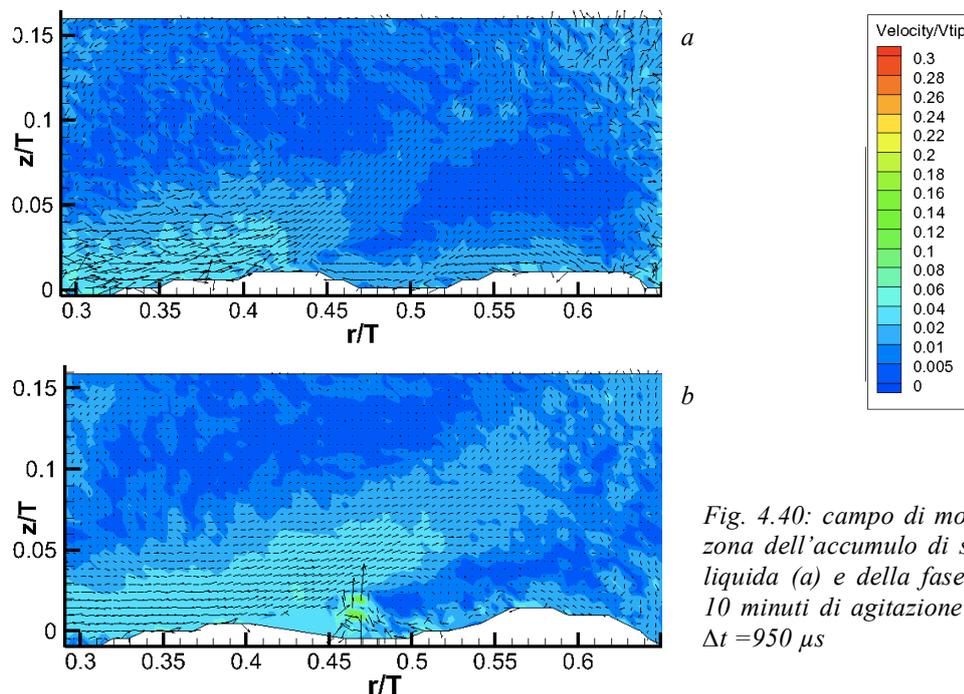


Fig. 4.40: campo di moto ottenuto nella zona dell'accumulo di solido, della fase liquida (a) e della fase solida (b) dopo 10 minuti di agitazione a $N=170$ rpm e $\Delta t = 950 \mu s$

Il campo vettoriale di velocità ottenuto (Fig. 4.40, a-b) presenta molte differenze con quello ottenuto nelle stesse condizioni in regime stazionario: se in precedenza il fluido presentava un movimento diretto dalla parete verso l'albero anche sul fondo del reattore (Fig. 4.39, a-b), in questo caso, la girante imprime al fluido un movimento più marcato verso l'esterno, evidenziato dalla direzione dei vettori velocità che si trovano nella zona inferiore della sezione ($z/T=0.02$).

Al fine di ottenere dati quantitativi sulla componente tangenziale della velocità delle particelle di tracciante della fase solida e della fase liquida, le misure PIV sono state eseguite su un piano orizzontale, parallelo al fondo del reattore e distanziato da esso di 1,5 cm.

Il sistema è stato studiato alla velocità di rotazione di 100 rpm e di 170 rpm, raggiunte partendo sia dalla condizione con entrambe le fasi ferme e aumentando l'agitazione fino alla velocità desiderata (percorso 1) sia dalla condizione di sistema in forte agitazione e diminuendo la velocità (percorso 2) in modo da avere risultati confrontabili con quelli ottenuti in precedenza dall'analisi sui piani verticali; le acquisizioni sono state effettuate dopo circa 1 ora dal raggiungimento della velocità fissata in modo da ottenere il campo vettoriale delle velocità in condizioni di moto stazionario.

I parametri operativi utilizzati sono riportati in Tab. 4.5.

Condizioni operative		
N	100-170	rpm
Δt	550	μs
H_{liq}	23.5	cm
Giranti	A310	-
Re	1.62E+05 (100 rpm) – 2.75E+05 (170 rpm)	
Area di misura	312 x 238	mm^2
IA	7.4 x 7.4	mm^2
Tracciante fase liquida	particelle di PMMA rivestite di Rodamina-B	
Tracciante fase liquida	particelle di PMMA (0.5% w/w), $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 150 \div 210 \mu m$	

Tab. 4.5: parametri operativi utilizzati per le acquisizioni in bifase sul piano orizzontale

L'analisi è stata dunque portata a termine per i quattro casi di interesse già esaminati:

1. a 100 rpm, aumentando gradualmente la velocità di agitazione dalla condizione di liquido fermo e solido depositato (percorso 1);
2. a 170 rpm, aumentando gradualmente la velocità di agitazione dalla condizione di liquido fermo e solido depositato (percorso 1);
3. a 100 rpm, diminuendo gradualmente la velocità di agitazione dalla condizione di liquido in agitazione e solido sospeso (percorso 2);
4. a 170 rpm, diminuendo gradualmente la velocità di agitazione dalla condizione di liquido in agitazione e solido sospeso (percorso 2) .

In Fig. 4.41 e in Fig. 4.42, sono riportati i campi di moto della fase liquida (a) e della fase solida (b) ricavati a 100 rpm e a 170 rpm (percorso 1).

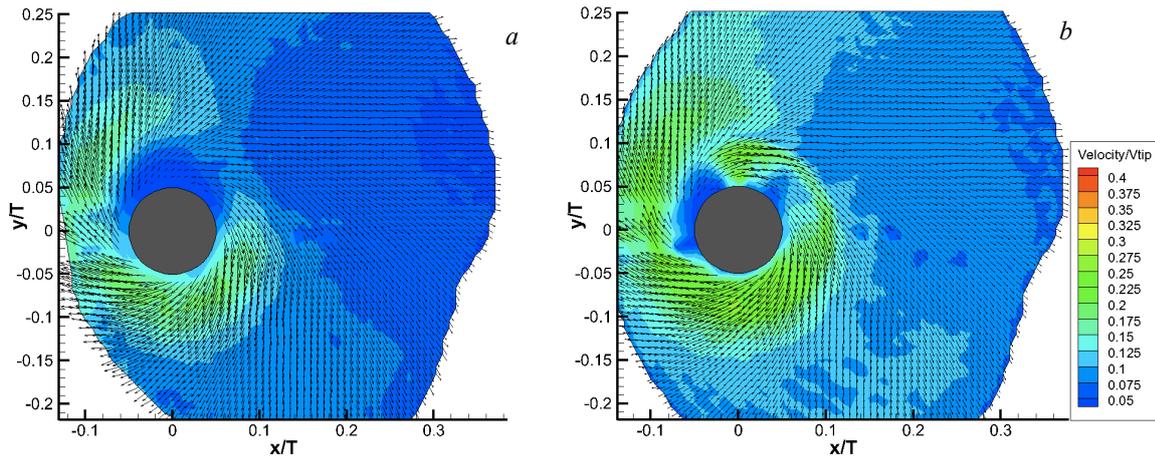


Fig. 4.41: campo di moto, della fase liquida (a) e della fase solida (b), della sezione orizzontale partendo dal solido completamente depositato, a $N=100$ rpm e $\Delta t = 550 \mu s$

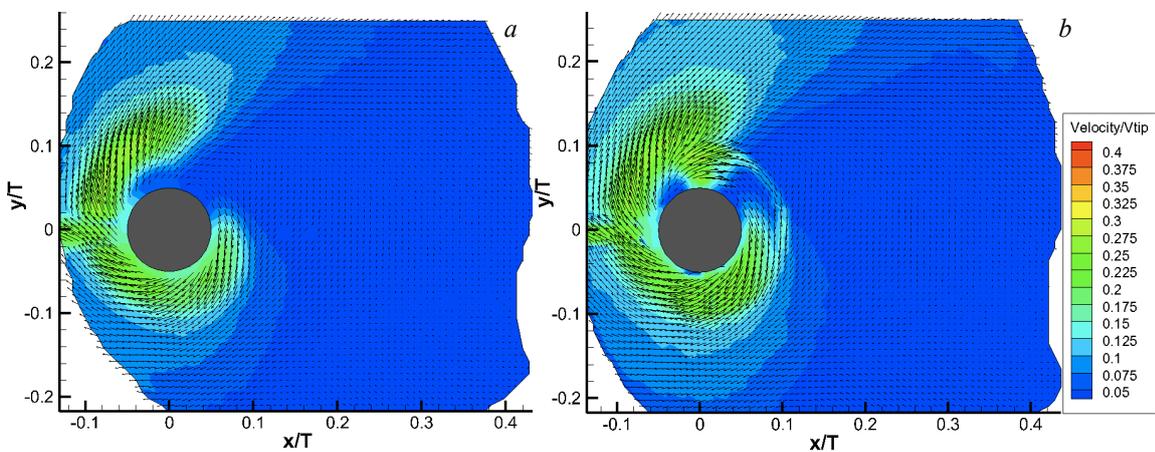


Fig. 4.42: campo di moto, della fase liquida (a) e della fase solida (b), della sezione orizzontale partendo dal solido completamente depositato, a $N=170$ rpm e $\Delta t = 550 \mu s$

I risultati sono coerenti con quelli ottenuti sui piani verticali: a 100 rpm infatti (Fig. 4.41), il fluido viene spinto, ad ogni angolo, dalla girante verso la parete; a 170 rpm invece (Fig. 4.42), il moto del fluido verso la parete è probabilmente ostacolato dalla presenza del più alto deposito di solido, pertanto si osserva un movimento generale di entrambe le fasi verso l'albero nella sezione destra del reattore (guardando le immagini), mentre non si evidenziano particolari distinzioni, rispetto al campo ottenuto a 100 rpm, nella parte sinistra.

I campi ottenuti a entrambe le velocità, partendo invece dalla condizione di solido completamente in sospensione e diminuendo gradualmente la velocità (percorso 2), sono riportati in Fig. 4.43 (a-b) e in Fig. 4.44 (a-b).

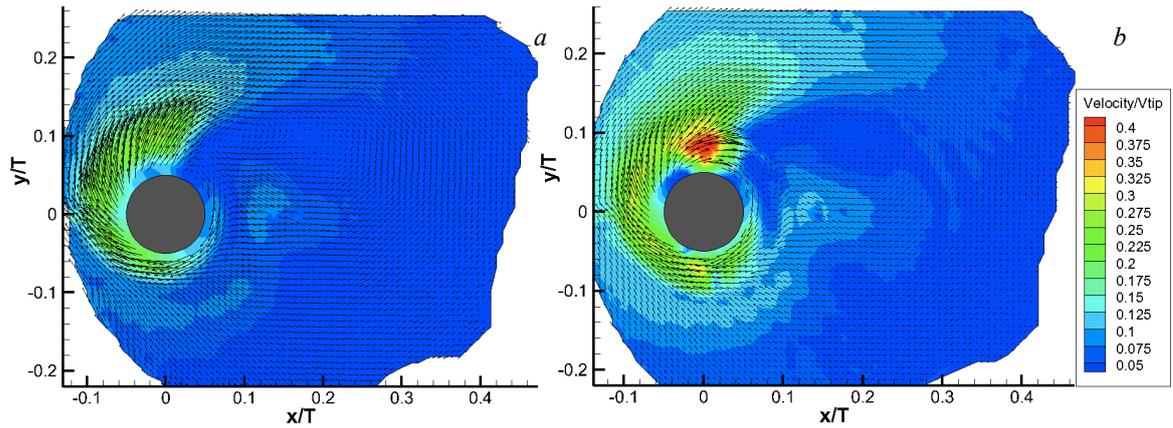


Fig. 4.43: campo di moto, della fase liquida (a) e della fase solida (b), della sezione orizzontale partendo dal solido completamente sospeso, a $N=100$ rpm e $\Delta t = 550 \mu s$

Sia a 100 rpm sia a 170 rpm, i campi osservati confermano quelli ottenuti nelle stesse condizioni sul piano verticale (quello di maggiore lunghezza passante per l'albero): in entrambi i casi, le immagini evidenziano un movimento generale delle fasi dalle pareti del reattore all'albero nella zona di destra, determinato probabilmente dall'interazione del liquido con l'accumulo di solido generatosi sul fondo.

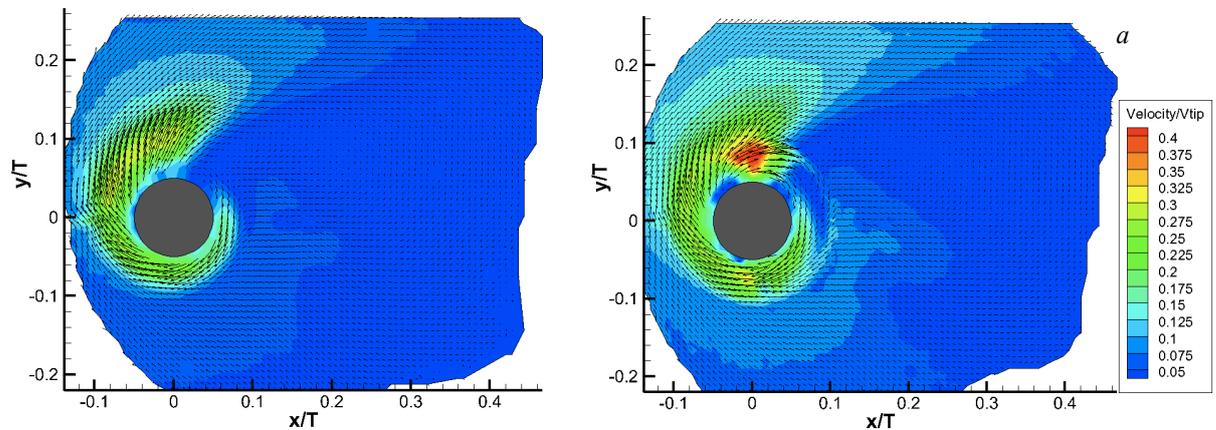


Fig. 4.44: campo di moto, della fase liquida (a) e della fase solida (b), della sezione orizzontale partendo dal solido completamente sospeso, a $N=100$ rpm e $\Delta t = 550 \mu s$

In conclusione, rispetto ai campi vettoriali ottenuti in condizione bifase con albero centrato, i risultati con albero eccentrico appena elencati, presentano caratteristiche differenti: in configurazione centrata, infatti, è stato osservato che le giranti imprimono alle fasi un movimento sempre in direzione delle pareti; con l'albero spostato in posizione eccentrica invece, il campo di moto varia a seconda del percorso seguito per il raggiungimento dello stazionario, a causa probabilmente dell'asimmetria geometrica di questa configurazione.

Volendo perciò conoscere l'andamento del moto all'interno del reattore, sarà necessario specificare la configurazione geometrica, il numero di fasi presenti e per quanto tempo il sistema dovrà essere sottoposto ad agitazione.

5. Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state caratterizzate dal punto di vista fluidodinamico due configurazioni geometriche di un reattore utilizzato per la produzione di biogas da scarti dell'industria agro-alimentare. Il sistema è stato studiato sia in condizione monofase che in quella bifase, grazie all'introduzione nel reattore di particelle di PMMA rappresentative della fase solida.

L'analisi è stata possibile attraverso la PIV, tecnica di diagnostica ottica non invasiva, in grado di determinare i campi vettoriali di velocità delle diverse fasi presenti nel reattore, utili per la comprensione del processo di miscelazione.

Una parte del lavoro è stata inoltre incentrata sull'ottimizzazione dei parametri operativi della tecnica al fine di ottenere risultati corretti per ogni acquisizione. Tale operazione è stata necessaria a causa della particolare configurazione geometrica del sistema preso in esame: l'assenza di setti frangivortici e l'eccentricità dell'albero non hanno infatti permesso uno studio tradizionale dei campi di moto, rendendo opportuno approfondire l'effetto del variare delle condizioni di lavoro sui risultati ottenuti.

La fase di messa a punto della tecnica ha permesso di determinare che:

- lo spessore del fascio laser deve essere minimo nella zona di maggiore interesse, anche se questa scelta può indurre errori significativi nell'intorno dell'albero;
- l'intervallo tra gli impulsi laser deve essere calcolato, per ogni configurazione geometrica, attraverso un processo che tende a minimizzare le Deviazioni Quadratiche Medie (rms) delle velocità assiali medie in posizioni selezionate della sezione in esame;
- la concentrazione di tracciante della fase liquida è una variabile fondamentale per ottenere misure affidabili;
- per le acquisizioni in condizione bifase, è necessario ottimizzare l'apertura dell'otturatore della telecamera della fase solida al fine di evitare l'insorgere di errori sistematici dovuti a interferenze generate dalla contemporanea presenza di due fasi all'interno del reattore.

Il reattore utilizzato in laboratorio, agitato meccanicamente e costruito in plexiglas, è stato progettato scalando le dimensioni geometriche di un reattore utilizzato industrialmente; il sistema è stato esaminato con l'albero centrato e con l'albero in posizione eccentrica, utilizzando due diverse tipologie di giranti.

Con l'albero in posizione centrata, in condizioni monofase, grazie alle acquisizioni su un piano verticale passante per l'albero, è stato possibile identificare un regime transitorio caratterizzato da una buona efficienza di miscelazione in tutta la sezione di reattore esaminata; raggiunto il moto stazionario invece, all'interno del reattore si vengono a creare due zone distinte, una in cui la miscelazione è buona (vicino alle giranti) e un'altra in cui il liquido è pressoché stagnante (vicino alle pareti).

Considerando sempre la configurazione con albero centrato, le acquisizioni in condizione bifase hanno invece permesso di osservare la forte influenza che la presenza di particelle di solido ha sui campi di moto della fase liquida. Se la concentrazione della fase solida è trascurabile, oppure quando la fase solida è completamente sospesa o presente esclusivamente nei pressi delle pareti del reattore, il campo di moto della fase liquida misurato nel sistema bifase risulta praticamente analogo a quello misurato nel sistema monofase. Viceversa, se la quantità di solido depositato sul fondo del reattore in prossimità delle giranti non è trascurabile, il getto indotto dal moto della girante ha caratteristiche completamente diverse da quelle registrate nel sistema monofase. La presenza della fase solida, infatti, tende a deformare il getto indotto dalla girante che rimane adiacente al fondo del reattore fino a raggiungere le pareti dello stesso.

Per l'assetto con albero in posizione eccentrica, in condizione monofase e regime di moto stazionario, i risultati ottenuti nelle sezioni verticali analizzate hanno permesso di identificare ancora una volta una differenza di velocità tra la zona vicino alle giranti, dove la miscelazione è buona, e quella nei pressi delle pareti, dove il liquido risulta pressoché stagnante. È stata inoltre evidenziata una significativa influenza del livello di liquido all'interno del reattore sui campi di moto ottenuti: con livello pari a 14.9 cm (valore scalato da quello utilizzato nel processo industriale), a tutte le velocità di rotazione esaminate, la girante superiore risulta praticamente ingolfata e nella zona inferiore del reattore si forma un vortice che porta parte del liquido a ricircolare verso l'albero; aumentando il livello e ad alte velocità di rotazione, la girante superiore riesce ad imprimere una rilevante componente assiale inducendo variazioni significative anche al campo di moto indotto dalla girante inferiore. Queste variazioni del campo di moto sono dovute probabilmente a una transizione del regime di moto all'interno del reattore e ad un effetto significativo del battente di liquido che insiste sulla girante superiore.

I risultati ricavati dall'analisi del piano verticale perpendicolare a quello di maggiore lunghezza passante per l'albero, hanno infine evidenziato la forte asimmetria tipica di questa configurazione geometrica.

Il confronto tra le due tipologie di giranti utilizzate ha permesso di quantificare le differenze indotte da giranti aventi stesso diametro ma diversa configurazione geometrica.

Passando alla condizione bifase, sempre con albero eccentrico, i risultati hanno evidenziato la forte asimmetria del reattore, come già osservato in condizione monofase. Gli effetti principali sono stati evidenziati esaminando la conformazione del deposito di solido rimasto sul fondo: il sistema sembra infatti assumere stati stazionari diversi a seconda delle velocità di rotazione e delle condizioni adottate per il raggiungimento della stabilità, rendendo l'analisi di complessa valutazione.

Le acquisizioni effettuate sul piano orizzontale, che permettono di misurare le componenti tangenziali e radiali del vettore velocità, hanno evidenziato come le soluzioni geometriche attualmente in uso inducano un campo di moto prettamente tangenziale, con componenti assiali del vettore velocità minori o uguali alla componente tangenziale. Questo risultato è degno di nota e, certamente, in futuro sarà oggetto di uno studio più approfondito.

La tipologia di reattori analizzati prevede infatti che, all'interno dello stesso, sia presente una fase solida, caratterizzata da un materiale organico da convertire in metano. I reattori che lavorano quindi con una miscela solido-liquido, per riuscire a operare con elevata efficienza, devono essere caratterizzati da campi di moto in cui la componente prevalente del vettore velocità sia quella assiale, in grado di assicurare la risospensione della fase solida, e non quella tangenziale che non risulta utile ai fini del processo di miscelazione e neppure per quello di sospensione.

In conclusione, quindi, i reattori attualmente utilizzati sembrano presentare ampi margini di miglioramento sia in termini di efficienza energetica che di ottimizzazione dei processi.

6. Bibliografia

Alcamo R. , Micale G. , Grisafi F. , Brucato A. , Ciofalo M. , “*Large-eddy simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank driven by a Rushton turbine*”, Chemical Engineering Science 60 (2005)

Atkins P. , de Paula J. , “*Physical Chemistry*”, W H Freeman & Co (2006)

Ciofalo M. , “*Large-Eddy Simulations of Turbulent Flow with Heat Transfer in Simple and Complex Geometries Using Harwell-FLOW3D*”, Applied Mathematical Modelling 20 262-271 (1996)

Dantec Dynamics, “*DynamicStudio v3.20 User’s Guide*” (2011)

Galletti C. , Paglianti A. , Yianneskis M. , “*Observations on the significance of instabilities turbulence and intermittent motions on fluid mixing processes in stirred reactors*”, Chemical Engineering Science 60 (2005)

Galletti C. , Brunazzi E. , “*On the main flow features and instabilities in an unbaffled vessel agitated with an eccentrically located impeller*” , Chemical Engineering Science 63 (2008)

Gómez C. , Bennington C. P. J. , Taghipour F. , “*Investigation of the Flow Field in a Rectangular Vessel Equipped With a Side-Entering Agitator*”, Journal of Fluids Engineering 132 (2010)

Hall J.F , Barigou M. , Simmons M.J.H. , Stitt E.H. , “*Comparative study of different mixing strategies in small high throughput experimentation reactors*” , Chemical Engineering Science 60 (2005)

Hidalgo-Millán A. , Soto E. , Zenit R. , Ascanio G. , “*Effect of eccentricity on the pumping capacity in an unbaffled vessel*”, The Canadian Journal of Chemical Engineering 89 1051–1058 (2011)

Lamarque N. , Zoppé B. , Lebaigue O. , Dolias Y. , Bertrand M. , Ducros F. , “*Large-eddy simulation of the turbulent free-surface flow in an unbaffled stirred tank reactor*”, Chemical Engineering Science 65 (2010)

- Mazzarotta, B. , “*Comminution phenomena in stirred sugar suspensions*”, A. I. Ch. E. Symposium Series 89 (1993)
- Montante G. , Paglianti A. , Magelli F. , “*Analysis of dilute solid-liquid suspensions in turbulent stirred tanks*”, Chemical Engineering Research & Design 90 (2012)
- Nagata, S. , “*Mixing: Principle and Applications*”, Wiley (1975)
- Paul E. L. , Atiemo-Obeng V. , Kresta S.M. , “*Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*”, Wiley (2004)
- Perry R. H. , Green D. W. , “*Perry's Chemical Engineers' Handbook*”, McGraw-Hill (2007)
- Petrone V. , Fioco E. , “*L'impianto chimico*”, Siderea (2000)
- Piccinini S. , “*Biogas: produzione e prospettive in Italia*”, Convegno Nazionale sulla Bioenergia (2004)
- Pope S. B. , “*Turbulent Flows*”, Cambridge University Press (2000)
- Raffel M. , Willert C. , Kompenhans J. , “*Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*”, Springer (1998)
- Rao Y.R. , Hawley N. , Charlton M.N. , “*Physical processes and hypoxia in the central basin of Lake Erie*”, Limnol. Oceanogr. 53 (2008)
- Weiland P. , “*Biogas production: current state and perspectives*”, Appl Microbiol Biotechnol 85 (2010)