

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE
E DEI MATERIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CHIMICA E DI PROCESSO

TESI DI LAUREA

in

Dinamica e Controllo dei Processi Chimici

**ANALISI DEL PROCESSO DI MISCELAZIONE DI UN SISTEMA LIQUIDO-
LIQUIDO AGITATO MECCANICAMENTE**

Candidato:

TERESA MEGNA

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing.

ALESSANDRO PAGLIANTI

Anno Accademico 2017/18

Sessione II

ABSTRACT

L'operazione di miscelazione di sistemi bifase, in serbatoi agitati meccanicamente, è un'operazione industriale molto diffusa, ampiamente utilizzata nelle industrie chimiche, alimentari, petrolifere, farmaceutiche ed elettriche.

Nell'ambito della miscelazione di liquidi immiscibili, l'agitazione del sistema influisce sulla dinamica di dispersione, sospensione e coalescenza delle gocce, e i regimi che si instaurano dipendono dalla geometria del sistema, oltre che essere influenzati dalle proprietà fisiche delle due fasi.

Per questo scopo, lo studio condotto si propone di monitorare i regimi di flusso di tali sistemi in un serbatoio agitato meccanicamente, al variare dell'intensità di agitazione e della frazione volumetrica totale della fase dispersa, utilizzando come strumento di indagine un tomografo a resistenza elettrica.

In accordo con le caratteristiche del metodo di misura sfruttato, per facilitare l'interpretazione dei dati ottenuti, si riporta l'effetto indotto dalla non omogeneità del sistema bifase gasolio/acqua sull'accuratezza delle misurazioni effettuate con la tecnica tomografica, sottolineando la variabilità della topografia del campo elettrico e l'estensione delle linee di flusso oltre la dimensione dei sensori di misura. Infine, per verificare l'estensione del campo di misura si conducono delle misure in via preliminare in cui si prevedono due piani di elettrodi che fungono da guardie con lo scopo di limitare il fringe effect.

È stato trovato che in condizioni di omogeneità del volume di misura, la modellazione bidimensionale implementata con l'algoritmo Linear Back Projection è una buona approssimazione della distribuzione tridimensionale del campo elettrico, mentre quando il sistema presenta forti disomogeneità delle caratteristiche elettriche, i risultati sperimentali si discostano da quelli teorici in quanto il campo soffre di effetti di distorsione significativi.

Per il monitoraggio di sistemi liquido-liquido in serbatoi agitati attraverso l'impiego dell'ERT si propone quindi una procedura di acquisizione ed una metodologia di trattamento dati, individuando le possibili sorgenti di errore.

Indice

Introduzione	1
1 Miscelazione di sistemi liquido-liquido	3
1.1 Meccanismo e fluidodinamica della miscelazione.....	3
1.2 Miscelazione in recipienti agitati meccanicamente.....	6
1.2.1 Geometria.....	7
1.2.2 Parametri caratteristici: potenza, pompaggio, sforzo	9
1.2.3 Tipologie di girante	12
1.3 Dinamica dei processi di dispersione per due fasi liquide immiscibili.....	16
1.3.1 Fenomeni di breakup e coalescenza	17
1.3.2 Sospensione delle gocce e velocità di <i>just draw-down</i> e <i>complete dispersion</i>	20
1.3.3 Influenza della frazione volumetrica della fase dispersa	23
1.4 Scale-up di sistemi liquido-liquido agitati meccanicamente.....	25
1.5 La tomografia a resistenza elettrica come strumento per il monitoraggio delle operazioni di miscelazione nell'industria chimica	26
2 La tomografia a resistenza elettrica applicata allo studio del sistema gasolio/acqua in un serbatoio agitato	28
2.1 Apparecchiatura sperimentale.....	28
2.1.1 Principio di misurazione dei dati.....	30
2.1.2 Sensori di misura.....	31
2.1.3 Data Acquisition System.....	33
2.2 Strategie di raccolta dati.....	33
2.3 Algoritmo di ricostruzione dell'immagine	35
2.3.1 Linear Back Projection.....	39
2.4 La natura "flessibile" dei campi elettromagnetici, il problema del fringe effect.....	40
3 Valutazione di una metodologia di acquisizione e trattamento dati da tomografia elettrica	42
3.1 Inquadramento del problema.....	42

3.2	Set-up sperimentale	43
3.3	Scelta del riferimento	46
3.3.1	Evidenza sperimentale	47
3.4	Misure di conducibilità	56
3.5	Analisi dei tomogrammi.....	57
4	Studio qualitativo della distribuzione spaziale delle due fasi	59
4.1	Formulazione di un modello matematico descrittivo per la valutazione del <i>fringe effect</i>	60
4.2	Validazione del modello con i dati sperimentali	62
4.3	Elaborazione dei dati	65
4.3.1	Criteri di identificazione per Njd, Ncd e Npm	67
4.3.2	Analisi dei risultati.....	67
4.4	Analisi preliminare con gli elettrodi di guardia	76
5	Conclusioni	84
	Bibliografia	86
	Appendice	88

Introduzione

Nell'ambito industriale le operazioni di miscelazione hanno un impatto determinante sull'efficienza di numerose operazioni unitarie e sono necessarie spesso per la conduzione del processo.

In base all'applicazione e ai vincoli processuali, l'efficienza di miscelazione di un sistema può essere determinata valutando diversi parametri, riconducibili a due concetti fondamentali, il grado di omogeneità che si vuole raggiungere e il tempo entro il quale lo si vuole fare.

In questo elaborato si espone lo studio condotto nel laboratorio di fluidodinamica applicata alla miscelazione-DICAM, sulla miscelazione di due liquidi immiscibili, in un serbatoio in plexiglass agitato meccanicamente per mezzo di una girante, con lo scopo di fornire informazioni utili sul processo di dispersione delle fasi, al variare dell'intensità di agitazione.

Le analisi sono state effettuate utilizzando come strumento di misura un tomografo a resistenza elettrica, in grado di fornire la distribuzione spaziale della conducibilità del sistema rispetto ad una conducibilità di riferimento in condizioni note. In un sistema di due fasi liquide ed in presenza di componenti con differente conducibilità elettrica, è possibile risalire alla distribuzione di concentrazione, radiale avendo a disposizione una mappa di conducibilità relativa alla sezione del piano misurato e assiale, predisponendo sul reattore più piani di misura.

La miscelazione di sistemi liquido-liquido è ancora oggi di difficile comprensione a causa di fenomeni quali rottura o coalescenza delle gocce, che dipendono dalla geometria del sistema e sono governati dal regime di flusso che si instaura nell'apparecchiatura, oltre che essere influenzati dalle proprietà fisiche dei due fluidi.

Con l'obiettivo di ottimizzare i parametri geometrici del sistema e le condizioni operative in cui condurre le operazioni di miscelazione, ausiliare per numerosi processi chimici, è necessario conoscere tali fenomeni e le condizioni nelle quali si verificano.

Questo elaborato affronta gli aspetti principali da tenere in considerazione quando si studiano sistemi bifase liquido-liquido; evidenzia le potenzialità ed i limiti della tomografia a resistenza elettrica, valutando l'estensione del campo elettrico generato per effettuare la misura ed introduce il problema del fringe effect aggravato dalla presenza dell'interfaccia tra i due liquidi immiscibili; riportando gli esperimenti condotti si propone una procedura di acquisizione ed una metodologia di trattamento dei dati per studiare il processo di dispersione di un sistema acqua/gasolio, tramite la tecnica di tomografia a resistenza elettrica e successivamente si effettuano delle analisi preliminari con l'implementazione di due guardie elettriche

Con l'osservazione sperimentale e attraverso la definizione di un modello matematico è stato possibile definire per il sistema in esame una mappa di flusso, in cui si identificano le velocità di inizio draw

down indicata con N_{jd} , di completa dispersione N_{cd} , e di perfetta miscelazione N_{pm} , alla quale le fasi sono uniformemente distribuite nel serbatoio.

Nel capitolo 1 si descrivono i fenomeni che si verificano durante la miscelazione di due fasi liquide immiscibili, evidenziando le relazioni tra i parametri che ne definiscono l'efficienza e le caratteristiche del sistema in esame.

Nel capitolo 2 viene descritta l'apparecchiatura sperimentale ed il principio di funzionamento del tomografo, focalizzando l'attenzione sul fenomeno conosciuto in letteratura come fringe effect. Tale effetto è dovuto all'estensione del campo elettrico oltre il piano di misura degli elettrodi e si evidenzia durante le prove sperimentali per basse velocità di agitazione, alle quali è ancora presente l'interfaccia tra i due liquidi.

Il Capitolo 3 riporta la sperimentazione condotta e propone una procedura di acquisizione ed una metodologia di analisi dati, per valutare il fringe effect in sistemi geometricamente simili e per identificare la dipendenza che c'è tra la velocità di agitazione e la distribuzione spaziale della frazione di gasolio dispersa.

Nel capitolo 4 si riportano i risultati ottenuti dalle prove sperimentali e i criteri con i quali è stato possibile definire i regimi di flusso che si instaurano nel serbatoio, potendo analizzare qualitativamente la distribuzione di concentrazione delle due fasi tenute in agitazione; infine, si riporta uno studio preliminare del sistema dopo l'implementazione di due guardie elettriche con lo scopo di attenuare il fringe effect.

1 Miscelazione di sistemi liquido-liquido

La miscelazione può essere definita come la riduzione della non omogeneità di un sistema; tale disomogeneità può essere poi riferita a diverse variabili operative quali: concentrazione, temperatura o distribuzione delle fasi, nel caso si trattino sistemi eterogenei.

Con il termine sistema liquido-liquido ci si riferisce invece a due o più liquidi mutuamente insolubili presenti come fasi separate. Queste fasi sono indicate come fase dispersa e fase continua. La fase dispersa è di solito più piccola in volume rispetto alla fase continua, ma in certe condizioni, può rappresentare fino al 99% del volume totale del sistema.

Gli aspetti principali che influiscono sulla miscelazione di sistemi liquido-liquido sono la distribuzione della dimensione delle gocce, la velocità minima della girante affinché s'induca la dispersione, la rottura, coalescenza e sospensione delle gocce, l'inversione di fase e l'influenza della tensione superficiale delle due fasi (E. L. Paul & S. M. Kresta, 2004)

Si trattano qui di seguito i principali aspetti riguardanti la miscelazione di sistemi liquido-liquido in recipienti agitati meccanicamente.

Nella prima sezione si illustrano i principi fondamentali dei serbatoi agitati, focalizzandosi sugli aspetti fluidodinamici e geometrici. Particolare attenzione è posta sulle caratteristiche dei diversi tipi di girante e sui campi di moto che queste inducono.

Nella seconda sezione ci si focalizza sulla miscelazione di due fasi liquide immiscibili, trattando la dinamica del processo di dispersione. Si evidenzia a tal proposito l'influenza della velocità di rotazione della girante e delle caratteristiche geometriche del sistema sui regimi fluidodinamici.

1.1 Meccanismo e fluidodinamica della miscelazione

Il movimento rotatorio della girante crea, all'interno del recipiente, un moto convettivo d'insieme che consente ai fluidi di disperdersi nel volume a disposizione.

Dal punto di vista termodinamico si distinguono:

Miscela positive, in cui la miscelazione è favorita termodinamicamente, è spontanea ed irreversibile (questo vale per sostanze miscibili: solido solubile in un liquido, liquidi miscibili, ecc.).

Miscela negative, in cui la miscelazione è sfavorita termodinamicamente, come nel caso di liquidi non miscibili, solidi insolubili in liquidi, ecc. Per omogeneizzare miscele negative è quindi necessario fornire lavoro; cessata l'agitazione del sistema si ha separazione spontanea dei componenti (*segregazione*).

Infine, si definiscono *Miscele neutre*, quelle in cui la miscelazione non è favorita termodinamicamente, ma una volta mescolato, il sistema rimane miscelato e non tende a segregarsi se l'agitazione è interrotta, come ad esempio avviene nelle miscele di polveri.

Per miscele termodinamicamente favorite, i meccanismi convettivo e diffusivo coesistono, la miscelazione in sé avviene per diffusione, mentre il moto convettivo è necessario per incrementarne la velocità.

Diversamente, nel caso di fasi immiscibili, la dispersione e sospensione delle gocce avviene solo grazie ai moti convettivi indotti dalla girante, che causano la miscelazione e l'omogeneizzazione degli elementi di fluido dispersi.

La rotazione della girante induce infatti degli sforzi tangenziali sugli elementini di fluido, con conseguente aumento dell'area interfacciale disponibile per la diffusione.

Tale concetto può essere meglio chiarito introducendo le nozioni di scala e intensità di segregazione. Dato il componente B da miscelare nella fase continua di A , la scala di segregazione può essere definita come la misura del processo di rottura degli elementi di fluido su larga scala, ovvero come la dimensione dei volumetti di B che possono essere distinti nel fluido A circostante; l'intensità di segregazione può essere invece espressa come la misura della differenza tra la più pura concentrazione di B e la più pura concentrazione di A nel fluido. La prima viene ridotta solo attraverso i moti convettivi, mentre la seconda solo per diffusione molecolare. La Figura 1.1 mostra una rappresentazione grafica intuitiva di questi fenomeni.

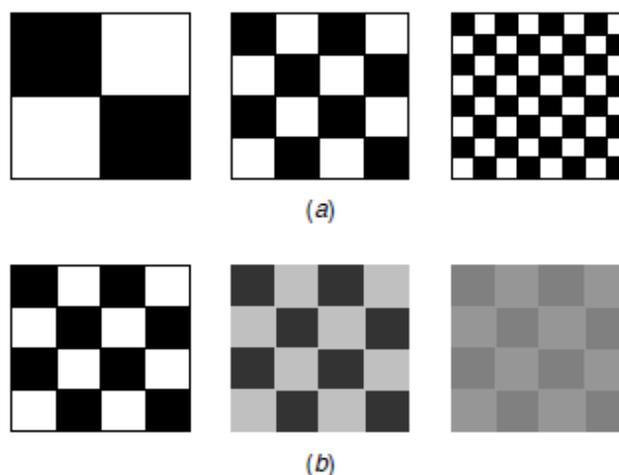


Figura 1.1 Rappresentazione grafica di a) scale di segregazione e b) intensità di segregazione decrescenti

Il sistema può considerarsi completamente miscelato quando l'intensità di segregazione è ridotta a zero; ciò può avvenire anche senza una diminuzione della scala di segregazione, ma in tal caso l'area

interfacciale disponibile per la diffusione molecolare è molto inferiore e dunque il processo molto più lento.

I concetti di scala e intensità di segregazione sono indipendenti dal regime fluidodinamico che si instaura nel sistema, ma la velocità con cui avviene la loro riduzione è molto diversa a seconda che il moto sia laminare o turbolento, essendo molto maggiore per quest'ultimo in quanto al moto convettivo di insieme si sovrappone il moto dei vortici turbolenti, i quali favoriscono la rottura degli elementi di fluido.

Ai fini della corretta progettazione del sistema di miscelazione adatto ad operare in uno dei due regimi è bene conoscere le loro peculiarità e punti critici. In particolare, le giranti comunemente impiegate nei due casi sono molto diverse tra loro per forma e dimensione.

Nei recipienti agitati meccanicamente la distinzione tra i vari regimi di flusso viene fatta sulla base del numero di Reynolds rotazionale, nel quale la lunghezza e la velocità caratteristiche sono il diametro D e la velocità di punta πND (eventualmente a meno del fattore pigreco) della girante:

$$Re_{impeller} = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

Si assume che il regime sia laminare per $Re_{impeller} < 10$, turbolento completamente sviluppato per $Re_{impeller} > 10^4$ e di transizione per valori compresi tra i due limiti.

Con i valori tipici di potenza fornita, il regime laminare si instaura generalmente con fluidi molto viscosi ($\mu > 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), spesso non newtoniani (soluzioni polimeriche, paste, gomme). Il flusso è dominato dalle forze viscosi, a causa delle quali la velocità impartita al fluido decade rapidamente allontanandosi dalle pale dell'agitatore, formando una sorta di caverna nell'intorno dell'albero motore all'infuori della quale il livello di miscelazione è molto scarso. Per limitare questo fenomeno le giranti adatte a funzionare in regime laminare devono essere molto ampie, come le ancore e le eliche. I grandi livelli di sforzo in prossimità delle pale provocano deformazioni tangenziali ed elongazionali degli elementi di fluido, su scale via via inferiori fino a giungere alle dimensioni tali per cui la diffusione può prendere piede a velocità apprezzabile, ma comunque limitata. Si ricorda infatti che in regime laminare la diffusività molecolare è inversamente proporzionale alla viscosità del fluido e quindi molto bassa.

Il regime turbolento si instaura generalmente con fluidi a bassa viscosità, inferiore a $10^{-2} \text{ P}\cdot\text{s}$; in questo caso le forze dominanti sono quelle inerziali, sufficienti a far circolare il fluido per tutto il recipiente anche con giranti di dimensioni limitate; le forze viscosi diventano importanti solo una volta che gli elementi di fluido raggiungono scale molto piccole, alle quali si ha la dissipazione della potenza introdotta. La caratteristica fondamentale della turbolenza è la formazione di vortici di varie dimensioni, il cui moto di sovrappone a quello convettivo d'insieme rendendo il processo di miscelazione molto rapido.

1.2 Miscelazione in recipienti agitati meccanicamente

Si trattano qui di seguito i principali aspetti fluidodinamici e geometrici dei sistemi fluidi agitati meccanicamente, concentrando l'interesse sui diversi tipi di girante e i corrispondenti parametri caratteristici.

Le operazioni di miscelazione in un recipiente possono essere condotte in molti modi diversi. La via più comune è quella di fornire un'agitazione meccanica; di fatto più del 50% della produzione mondiale nei settori chimico, petrolifero, farmaceutico e agroalimentare coinvolge dei recipienti agitati meccanicamente (*mechanically stirred vessel*). In essi vengono condotti i più svariati tipi di processo, come l'omogeneizzazione e l'emulsificazione di fasi liquide, anche reologicamente complesse, la sospensione e la dissoluzione di solidi, la dispersione di gas e le operazioni di trasferimento di calore.

I recipienti agitati possono essere fatti operare in modalità continua, batch oppure semi-batch; il regime di flusso instaurato può essere sia laminare che turbolento, oppure di transizione tra i due.

Il meccanismo fondamentale di funzionamento implica la movimentazione fisica di materiale tra le varie zone del recipiente, attraverso la rotazione di una girante (*impeller*). Ogni tipo di girante, funzionante in un determinato regime fluidodinamico, genera un campo caratteristico di moto (*flow pattern*) e dunque corrispondenti livelli di sforzo, potenza richiesta e fluido circolante. Ognuno di questi parametri dipende fortemente dalla geometria del sistema e dal tipo fluido movimentato.

Nel caso di sistemi di liquidi immiscibili, la distribuzione delle dimensioni delle gocce ed il diametro medio raggiungibile, dipendono dal tipo di girante, dalla sua posizione rispetto alle due fasi e dalla velocità operativa di agitazione. L'eccessiva velocità porta ad emulsioni difficili da separare, d'altro canto basse velocità possono indurre separazione delle fasi.

1.2.1 Geometria

La configurazione standard di un recipiente agitato meccanicamente è quella mostrata in figura 1.2, dove in (a) sono rappresentati gli elementi fondamentali e in (b) alcune quote caratteristiche (b).

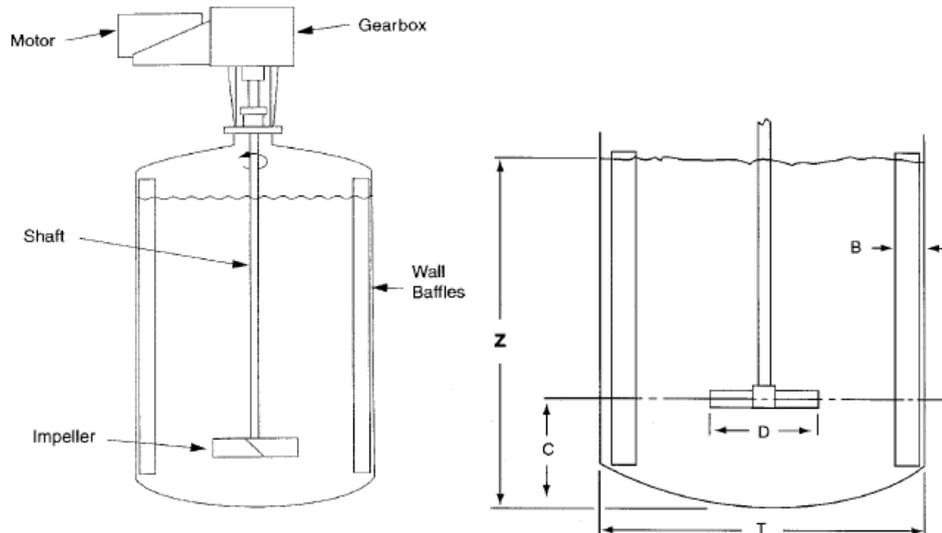


Figura 1.2 a) Configurazione standard di recipiente agitato; b) quote principali

Il sistema è costituito da un serbatoio cilindrico ad asse verticale di diametro T e altezza riempita Z ; la disposizione verticale consente di minimizzare l'ingombro in pianta, ma talvolta viene usata anche quella orizzontale, ad esempio per i grandi serbatoi di stoccaggio. La sezione cilindrica è da preferire per la mancanza di angoli lungo l'altezza, punti preferenziali per l'accumulo di particelle e impurezze e per la deviazione dei campi di moto, ma possono essere impiegate anche sezioni rettangolari o quadrate. Il fondo è tipicamente piatto o bombato (emisferico, ellissoidale, toroidale); la sua configurazione influenza in maniera rilevante il moto dei fluidi che si instaura sotto la girante e quindi la scelta è effettuata principalmente sulla base degli obiettivi e dell'efficienza di miscelazione richiesti, oltre che sulle dimensioni del recipiente. Per esempio, i fondi bombati sono più efficaci per i sistemi solido-liquido in quanto con i piatti le particelle tendono ad accumularsi negli angoli; d'altronde i fondi piatti di grandi dimensioni sono più semplici ed economici da realizzare. Talvolta, soprattutto quando sono coinvolte quantità di materiale rilevanti, possono essere scelti fondi conici, che però sono più costosi e richiedono l'utilizzo di una girante specializzata e disposta vicino alla punta in modo da provvedere un'agitazione adeguata anche negli strati di liquido inferiori; in ogni caso il loro impiego è sconsigliato in presenza di fasi solide da sospendere.

Il recipiente è tipicamente dotato di alcuni diaframmi laterali (*baffles*), superfici solide verticali disposte perpendicolarmente in parete. Il loro scopo è quello di prevenire il fenomeno di rotazione da corpo rigido

con formazione di un vortice in corrispondenza dell'asse della girante, trasformando il flusso tangenziale in verticale e causando così la miscelazione tra la parte superiore e inferiore del recipiente. Essi limitano inoltre l'intrappolamento di bolle di aria. Per contro, la presenza dei diaframmi incrementa la potenza da fornire e favorisce la formazione di zone morte dove tendono ad accumularsi particelle e impurezze; per limitare quest'ultimo fenomeno i diaframmi sono leggermente distanziati dalle pareti, creando così un piccolo condotto per il passaggio del fluido. La configurazione standard prevede quattro diaframmi equidistanti e di uguali dimensioni, con una larghezza B compresa tra $T/12$ e $T/10$; possono essere usati diaframmi più stretti quando è desiderabile avere un piccolo vortice centrale, come nel caso di fluidi viscosi e solidi flottanti. In alcuni casi i recipienti possono essere *unbaffled*: i diaframmi non sono necessari quando il regime di flusso è laminare, quando il serbatoio è a sezione rettangolare o quadrata e quando la girante entra da un lato o dall'alto ma non perpendicolarmente; inoltre i diaframmi non vengono usati con fluidi molto sporcanti che richiedono una frequente pulizia delle pareti e degli *internals*.

L'elemento primario del sistema di miscelazione è l'agitatore, di diametro D , tipicamente inserito nel recipiente dall'alto attraverso l'albero motore e posto ad un'altezza C dal fondo detta *clearance*. L'agitatore può essere introdotto anche da un angolo se il recipiente è di volume ridotto, oppure dal basso, se esso invece è alto, così da limitare la lunghezza dell'albero; se il recipiente è ad asse orizzontale o di dimensioni elevate, l'introduzione può essere laterale.

Vi sono svariati tipi di girante, il cui impiego varia a seconda del regime fluidodinamico e dell'applicazione, come meglio trattato nella Sezione 1.2.3.

Se $Z/T > 1,5$ può essere necessario impiegare più di una girante sullo stesso albero.

Il moto dell'agitatore viene imposto da un motore esterno e la velocità di rotazione viene stabilita regolando la frequenza attraverso un riduttore connesso ad esso.

Il serbatoio agitato è poi dotato di bocchelli di ingresso e uscita, oltre che per il prelievo di eventuali campionamenti, il drenaggio e l'attacco di strumenti di misura.

Infine, il sistema può essere equipaggiato con tutta una serie di dispositivi necessari a seconda del processo, come sparger per l'insufflaggio di gas e serpentine e/o camicie per lo scambio di calore.

1.2.2 Parametri caratteristici: potenza, pompaggio, sforzo

Ogni girante è caratterizzata da potenza richiesta P , capacità di pompaggio Q e livello di sforzo o velocità di deformazione $\dot{\gamma}$.

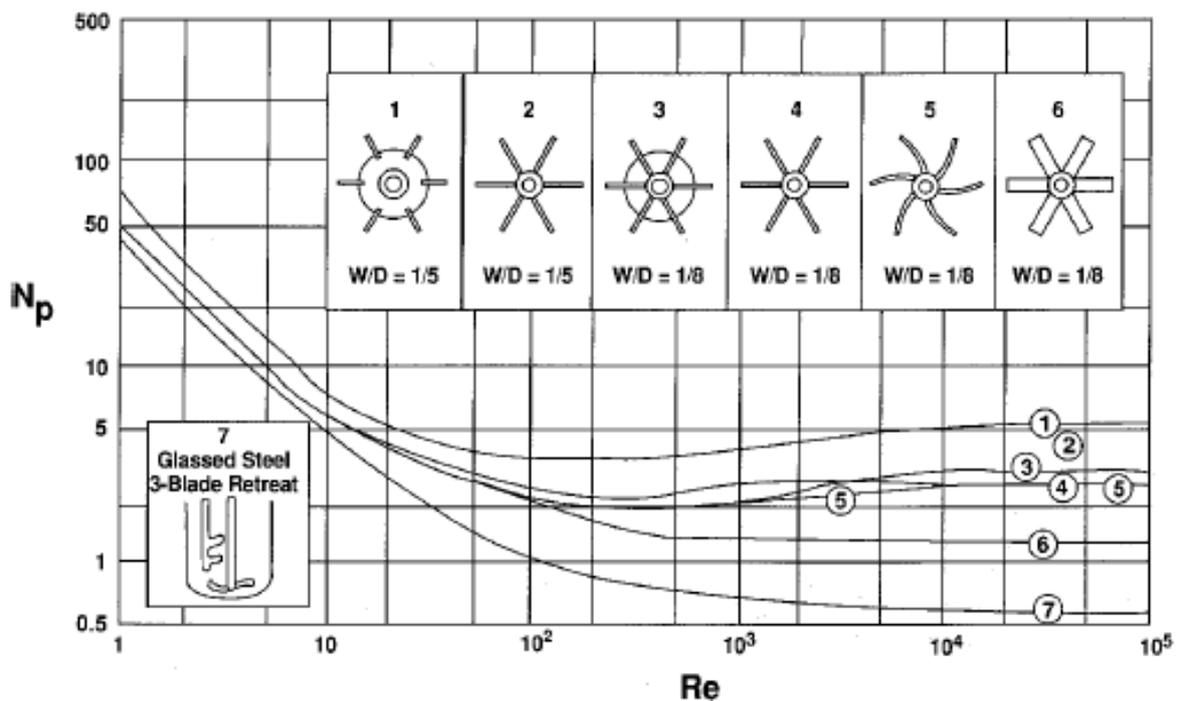
I primi due parametri sono tipicamente espressi in forma adimensionale, rispettivamente con il numero di potenza N_P e il numero di pompaggio N_Q :

$$N_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad N_Q = \frac{Q}{ND^3}$$

L'espressione precedente del numero di potenza vale quando l'influenza del numero di Froude ($Fr = N^2 D/g$) è trascurabile, ovvero quando il pelo libero non si deforma eccessivamente; in presenza di diaframmi questa condizione è generalmente verificata.

Conoscendo dunque N_P e N_Q è possibile determinare potenza e portata di circolazione. Si fa notare come la potenza aumenti con il cubo della velocità di rotazione.

Entrambi i parametri sono funzione del tipo di girante, del fluido circolante, dei rapporti dimensionali del sistema e del numero di Reynolds rotazionale ovvero del regime fluidodinamico. Il loro andamento con quest'ultimo può essere determinato sperimentalmente e in generale è quello mostrato in figura 1.3, sia per agitatori classici che appositamente progettati per scopi particolari.



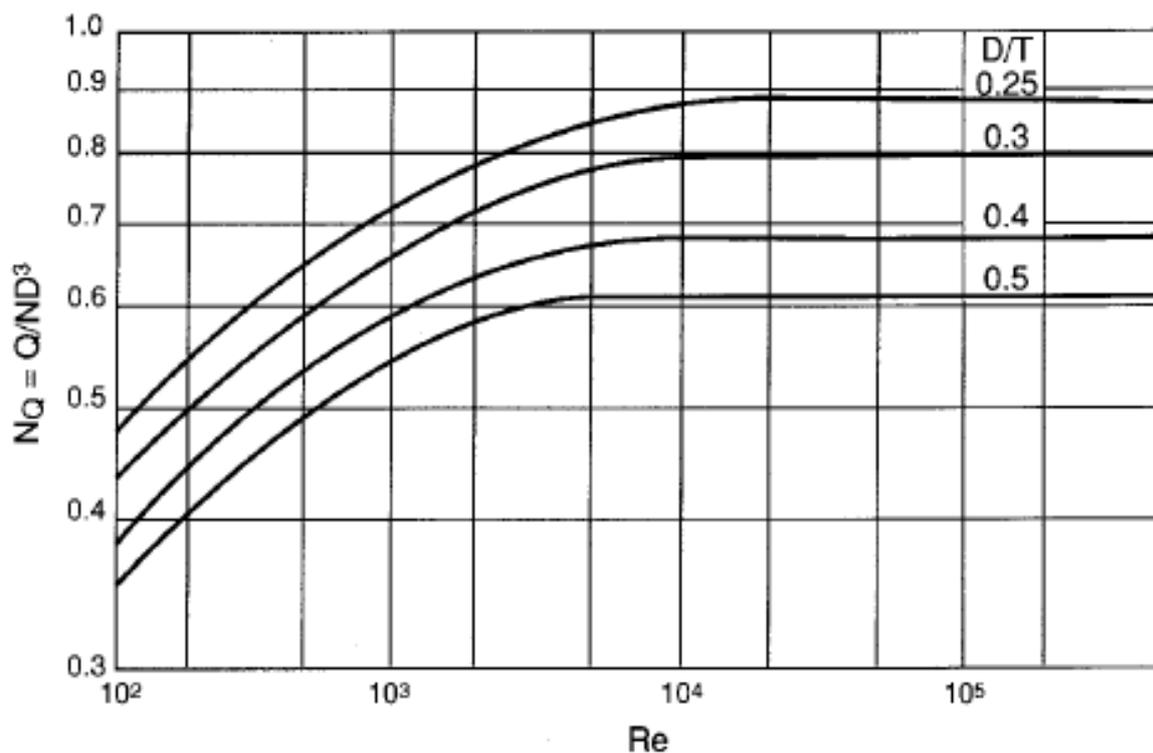


Figura 1.3 Esempi di curve di potenza e di pompaggio.

Per una data configurazione, il numero di potenza è proporzionale a $1/Re$ (ovvero alla viscosità) per bassi numeri di Reynolds e quindi in regime laminare; decresce non linearmente in regime transitorio mentre in regime turbolento assume un valore pressoché costante, che dipende fortemente dalla densità del fluido e che varia di anche un ordine di grandezza tra le varie tipologie di girante. In generale N_p aumenta con la larghezza e il numero delle pale e con il numero dei diaframmi, mentre l'effetto di D/T e C/T è molto meno marcato.

Il numero di pompaggio aumenta con il numero di Reynolds, fino a divenire pressoché costante in regime turbolento. A differenza del numero di potenza, esso si assesta tra lo 0,3 e lo 0,8 per tutte le giranti standard; questo significa che esse generano, a parità di diametro e velocità di rotazione, una portata di scarico dello stesso ordine di grandezza, mentre richiedono potenze anche molto diverse per ottenerla. In generale N_Q decresce all'aumentare di D/T .

Si fa notare che le curve di potenza e di pompaggio di un determinato agitatore possono essere determinate in tutte le condizioni di moto; ciononostante il loro utilizzo deve essere limitato al regime fluidodinamico per il quale sono progettate, così da evitare scarse efficienze di miscelazione.

Lo sforzo di taglio è determinato dal fatto che il moto della girante induce nel fluido un movimento relativo tra i vari elementi e dunque un gradiente di velocità, che può essere più o meno marcato a seconda del tipo di agitatore. Esso ricopre un ruolo fondamentale per la miscelazione, deformando in vario modo gli elementi di fluido e riducendo di conseguenza la scala di segregazione. È importante

osservare che gli sforzi influenzano il mixing e il campo di moto in generale in tutti i regimi fluidodinamici, dal laminare al turbolento. È anche vero però che per numeri di Reynolds molto elevati (regime turbolento completamente sviluppato) la loro influenza è trascurabile rispetto a quella dell'inerzia e pertanto la viscosità non è più il meccanismo predominante di trasporto della quantità di moto all'interno del fluido. Questo è confermato dal fatto che il valore dello sforzo medio in tale regime è di ordine di grandezza molto inferiore a quello della velocità di punta della girante.

Lo sforzo in generale non è costante all'interno del recipiente ma varia con la distanza dall'asse dell'agitatore, secondo funzioni complesse che dipendono dal tipo di fluido, dalla sua velocità di deformazione e dal livello di turbolenza. Il livello minimo di sforzo si instaura in prossimità delle pareti, nelle zone morte come gli angoli e in prossimità del pelo libero, mentre quello massimo si verifica nell'immediata vicinanza delle pale. Volumi molto piccoli di fluido risentono del massimo livello di sforzo.

Per un fluido newtoniano in regime laminare, transitorio o nella prima regione del turbolento, la velocità di deformazione $\dot{\gamma}$, sia media che locale, può essere espressa come una funzione lineare della velocità di rotazione N della girante secondo la relazione di Metzner-Otto:

$$\dot{\gamma} = KN$$

dove la costante di proporzionalità K dipende sia dal tipo di girante che dalla distanza da essa. In termini di ordini di grandezza:

- velocità di deformazione massima (regione delle pale): $\dot{\gamma} \sim 2000N$
- velocità di deformazione minima (pelo libero): $\dot{\gamma} \sim 0,10 \div 1N$
- velocità di deformazione media nella regione delle pale: $\dot{\gamma} \sim 5 \div 40N$
- velocità di deformazione media nel recipiente: $\dot{\gamma} \sim 0,5 \div 4N$

Al momento della progettazione è importante conoscere la futura distribuzione degli sforzi richiesti nel serbatoio, così da poter ottimizzare il processo di miscelazione; per esempio, se l'alimentazione possiede una notevole quantità di moto è bene porre il bocchello di ingresso in prossimità delle regioni dove lo sforzo è più basso, così da prevenire la formazione di zone morte grazie al carico energetico della corrente stessa. Inoltre, se si lavora con materiali facilmente danneggiabili come cristalli o cellule biologiche occorre scegliere una girante che lavori con livelli di sforzo mediamente più bassi.

1.2.3 Tipologie di girante

Schematicamente, gli agitatori possono essere distinti in due grandi classi, il cui impiego dipende essenzialmente dalle richieste di processo e dal regime fluidodinamico ovvero dalla viscosità del fluido: *Agitatori “veloci” o turbine*, utilizzati a velocità di rotazioni elevate, garantendo così la miscelazione in tutto il volume dell'apparato; sono caratterizzati da rapporti D/T pari a $0,2 \div 0,5$, per cui la girante è piccola rispetto alla sezione del recipiente, e quindi sono adatti a fluidi di viscosità media o bassa che operano in regime di moto turbolento. Le pale possono avere varie dimensioni e curvature e sono in numero variabile tra due e dodici; tipicamente se ne usano da tre a sei, sì da avere una buona stabilità meccanica pur limitando la complessità costruttiva;

Agitatori “lenti” in genere utilizzati con bassa *clearance*, la cui azione principale è il rimescolamento del fluido a bassa velocità di rotazione; sono tipicamente impiegati con fluidi ad alta viscosità, e quindi in regime laminare, che richiedono giranti di grandi dimensioni sì da raggiungere anche gli elementi a ridosso delle pareti; il rapporto D/T è difatti in questo caso prossimo all'unità. Hanno geometrie e forma delle pale particolari, come ad ancora, gabbia, elica o a vite.

Ognuna delle due classi precedenti può poi essere ulteriormente suddivisa secondo svariati criteri, come la tipologia di moto indotto o la modalità prevalente di utilizzazione dell'energia fornita.

Ai fini del lavoro di tesi sono di interesse gli agitatori veloci, classificati secondo il campo di moto creato e i livelli di sforzo indotto nel fluido. Si distinguono in tal senso turbine assiali, radiali, hydrofoil e ad alto sforzo.

Le *giranti assiali* generano un campo di moto principale parallelo all'asse dell'albero, facendo circolare il fluido in tutto il recipiente in un singolo stadio. Una rappresentazione è mostrata in Figura 1.4.

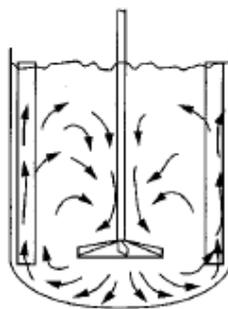


Figura 1.4 Campo di moto con turbina assiale

Le turbine assiali sono caratterizzate da capacità di pompaggio elevata e livelli di sforzo ridotti ma non bassissimi.

L'azione pompante può essere verso l'alto (*up-pumping*) oppure verso il basso (*down-pumping*), a seconda del verso di rotazione in cui è posta la girante. La maggior parte delle applicazioni richiede di

indirizzare il flusso verso il basso, prediligendo quindi la seconda azione; il pompaggio verso l'alto può però essere migliore nel caso della dispersione di gas e dell'incorporazione di solidi flottanti in una fase liquida.

Le turbine assiali sono tipicamente dotate di tre o quattro pale. Alcuni esempi sono mostrati nell'immagine seguente:

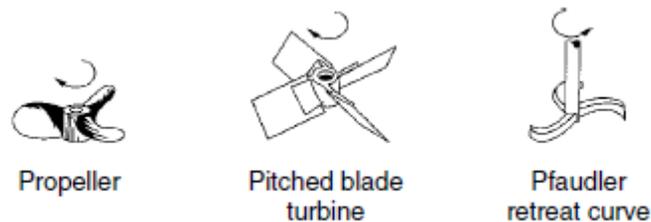


Figura 1.5 Esempi di turbine assiali

Le *giranti di tipo hydrofoil* sono turbine assiale con profilo idrodinamico ottimizzato, tale per cui al moto ad alta capacità di pompaggio è associato un basso livello di sforzo. Sono tipicamente brevettate. Il campo di moto generato è molto simile a quello mostrato in Figura 1.4, mentre la geometria presenta delle differenze rilevanti nella conformazione della palettatura; essa è costituita da tre o quattro lame curvate e affusolate in vario modo, spesso con angoli finali arrotondati. Una tale configurazione produce un flusso più dritto e uniforme in tutta la sezione di scarico; ne conseguono un basso gradiente di velocità e dunque uno sforzo limitato. A ciò si associano bassi consumi e difatti il numero di potenza di una turbina hydrofoil è anche quindici volte inferiore a quello di una turbina radiale o assiale del primo tipo ($N_p \sim 0,2 \div 0,4$).

Alcuni tipi di hydrofoil sono prodotti dalla *Lightnin*, due dei quali sono mostrati in Figura 1.6.

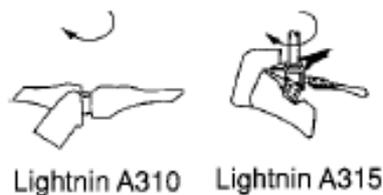


Figura 1.6 Esempi di turbine hydrofoil

Le *giranti radiali* scaricano il fluido radialmente verso le pareti del recipiente; per applicazioni con fluidi non viscosi in moto turbolento è quindi necessario dotare il serbatoio di diaframmi che convertano tale flusso radiale in uno assiale. Ne risultano due anelli di circolazione, uno sopra e uno sotto la girante,

come mostrato in Figura 1.7, che creano una sorta di compartimentazione all'interno del fluido: la miscelazione può essere ottima all'interno dei due loop, ma molto meno intensa nella zona tra di essi.

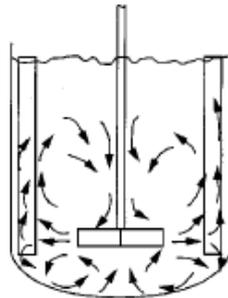


Figura 1.7 Campo di moto con turbina radiale

Le turbine radiali sono caratterizzate da bassa capacità di pompaggio e grandi livelli di sforzo, con conseguente numero di potenza elevato ($N_p \sim 5$ per la Rushton).

Nelle configurazioni standard, il centro della turbina può essere costituito sia da un disco che da un mozzo (in questo caso si parla di turbine aperte), sui quali vengono innestate le pale, che possono essere sia dritte che curve. Pur determinando un maggior consumo di potenza, le giranti col disco offrono tipicamente prestazioni migliori di quelle col semplice mozzo: il flusso è radialmente più uniforme e si evita l'accumulo di bollicine di gas attorno all'albero motore, essendo il disco essenzialmente un diaframma orizzontale. La palettatura curva è generalmente migliore per applicazioni con fluidi sporcanti ed erosivi, in quanto la forma stessa delle lame previene l'accumulo di materiale su di esse.

La Figura 1.8 riporta alcuni esempi di turbine radiali.

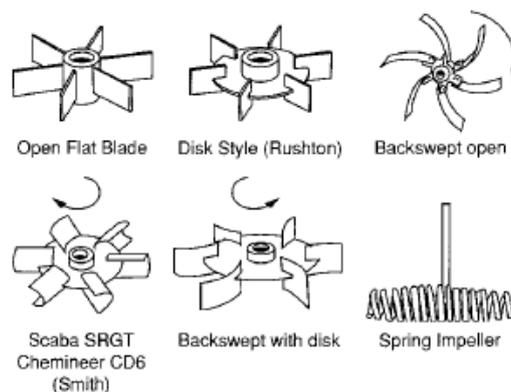


Figura 1.8 Esempi di turbine radiali

La Rushton è la tipica turbina radiale, costituita da sei pale dritte verticali fissate su un disco; le dimensioni standard prevedono una lunghezza delle pale pari a $D/4$, con uno spessore pari a $D/5$ e un diametro del disco pari a $0,66D$ ($0,75D$ considerando anche l'estensione delle pale). Una turbina tipo Rushton può essere costruita anche con le pale curve (*backswept* con disco), caratterizzata da un numero di potenza del 20% inferiore.

Riassumendo quanto sopra discusso, ogni agitatore posto in un determinato regime fluidodinamico genera con il suo moto un caratteristico schema di flusso. Si descrivono nel dettaglio le caratteristiche del moto indotto da una girante radiale Rushton che è stata utilizzata per la conduzione delle prove sperimentali.

La Rushton genera un flusso radiale cui corrispondono basso pompaggio e alto sforzo. È evidente quindi che in base a queste caratteristiche una turbina è più o meno adatta a svolgere determinate operazioni. Per esempio, l'omogeneizzazione di fasi liquide può essere raggiunta all'interno di un singolo anello ad alta velocità e quindi con turbine assiali o hydrofoil, per la sospensione di particelle solide sedimentabili invece è necessario indirizzare il flusso di liquido direttamente verso la base del recipiente e quindi occorrono turbine di tipo assiale; la scelta migliore ricade in particolare sulle hydrofoil, per il basso livello di sforzo che combinano al moto assiale, il che si traduce in un livello di turbolenza inferiore e quindi in minori consumi e inglobamento di gas, il quale in generale interviene negativamente sull'operazione di sospensione.

È importante tenere presente che i campi di moto generati e quindi i livelli di sforzo e pompaggio sopra esposti dipendono fortemente dalle condizioni nelle quali la turbina viene inserita e in particolare dalle dimensioni relative al recipiente (rapporti D/T e C/T), dalla configurazione dei diaframmi e dalla viscosità del fluido movimentato, oltre che dall'eventuale impiego di giranti multiple.

1.3 Dinamica dei processi di dispersione per due fasi liquide immiscibili

Il processo di miscelazione per operazioni industriali di liquidi immiscibili coinvolge comunemente svariati fenomeni interdipendenti, come la dispersione, coalescenza, sospensione ed altri meccanismi eventualmente richiesti dalla specifica operazione, quali ad esempio trasferimento di calore o di materia attraverso il volume processato.

Attualmente risulta ancora complesso gestire tali fenomeni perché sono fortemente dipendenti dalle dimensioni geometriche del sistema ed influenzano la distribuzione del diametro delle gocce disperse nella fase continua; infatti, in serbatoi di piccole dimensioni i fenomeni dominanti sono quelli di dispersione delle gocce, mentre per grandi geometrie la coalescenza è favorita.

Ciò è dovuto al fatto che la coalescenza viene promossa da uno sforzo limitato che porta a collisioni morbide e di lunga durata, mentre la dispersione richiede uno sforzo di taglio intenso. Nel flusso turbolento, i fenomeni di collisione e break-up sono governati dalla struttura del moto turbolento su piccola scala, che è alquanto insensibile alle dimensioni del serbatoio. Tuttavia, la quantità di tempo che il liquido trascorre nelle regioni ad alto sforzo o quiescenza dipende dal tempo medio di circolazione, regolato dalla frequenza di pompaggio della girante (quindi dalla geometria) e dai fenomeni di turbolenza macroscopici (F. Laurenzi; M. Coroneo; G. Montante; A. Paglianti, 2009).

I regimi di flusso e la struttura del moto turbolento risultano quindi complessi da studiare, a causa di tali fenomeni, che sono dipendenti dalla geometria dell'agitatore, dal numero di giranti, dalla sua posizione nel volume da movimentare, oltre che dalle caratteristiche fisiche ed interfacciali delle due fasi.

Per alcuni processi industriali la gestione può essere semplificata se il sistema liquido-liquido può essere classificato come non coalescente o a coalescenza lenta, facilitandone la progettazione e lo scale-up. Di solito la coalescenza può essere trascurata, per scopi pratici, in applicazioni in cui la frazione di volume della fase dispersa, $\varphi \leq 0,1$, ciò è particolarmente vero se sono presenti tensioattivi e / o contaminanti interfacciali.

Quindi, in base alla tipologia di girante utilizzata si potranno creare diversi tipi di flussi ma, a prescindere da questo, per un regime di moto turbolento si formeranno dei vortici ad alta energia vicino le pale dell'agitatore che favoriranno la dispersione delle gocce e dei vortici di energia più bassa situati più lontano, dove la probabilità di coalescenza è maggiore.

1.3.1 Fenomeni di breakup e coalescenza

La comprensione dei fenomeni di break-up e coalescenza delle gocce per un sistema agitato è di fondamentale importanza, essi accompagnano e determinano l'evoluzione delle dispersioni liquido-liquido, quindi una quantificazione è necessaria per controllare l'evoluzione delle dimensioni delle gocce e la loro distribuzione, ottimizzando le prestazioni dei sistemi liquido-liquido (Sathyagal et al., 1996). Church e Shinnar (1961) descrissero l'interrelazione tra sospensione, dispersione e coalescenza, attraverso la definizione di una regione operativa in cui la miscelazione può essere definita stabile, al variare della dimensione delle gocce ed in funzione della velocità di agitazione, in un recipiente miscelato in regime turbolento. Tale regione delimitata da tre linee che rappresentano la dispersione, coalescenza e sospensione, potrebbe fornire uno strumento pratico per individuare le condizioni operative che permettono di bilanciare questi tre fenomeni.

Facendo riferimento alla figura 1.9 si possono ottenere informazioni sul meccanismo predominante sotto determinate condizioni operative.

Per una certa velocità di agitazione, se si considerano elevati diametri al di sopra della linea di dispersione, allora gli sforzi indotti dal moto convettivo d'insieme continueranno a rompere le gocce; quando la dimensione delle gocce interseca la linea di dispersione si entra nella regione di stabilità in cui la distribuzione delle dimensioni risulta invariabile.

Di contro, l'agitazione può portare alla formazione di gocce di dimensioni che se si trovano al di sotto della linea di coalescenza; queste inizieranno a coalescere formando gocce di diametro maggiore finché non verrà raggiunta la linea di coalescenza.

All'interno della regione delimitata da queste linee si stabilisce l'equilibrio tra dispersione e coalescenza. Diversamente, per valutare la sospensione delle fasi nella regione di stabilità, in cui la dispersione e la coalescenza risultano bilanciate, si fa riferimento ad un certo diametro delle gocce e si valuta l'efficienza di sospensione al variare della velocità di agitazione.

Per velocità che si trovano a sinistra della linea di sospensione, la fase dispersa non sarà completamente presente nel mezzo continuo in forma discreta e per ottenere una sospensione stabile sarà necessario aumentare la velocità di agitazione fino all'intersezione con la linea di sospensione stessa.

Se invece le velocità di agitazione sono a destra della linea di sospensione, le gocce risultano essere sospese. Le equazioni ricavate per le tre linee riportate in figura, sono applicabili alla fase dispersa, le costanti adimensionali C_{24} , C_{25} , C_{26} hanno derivazione empirica.

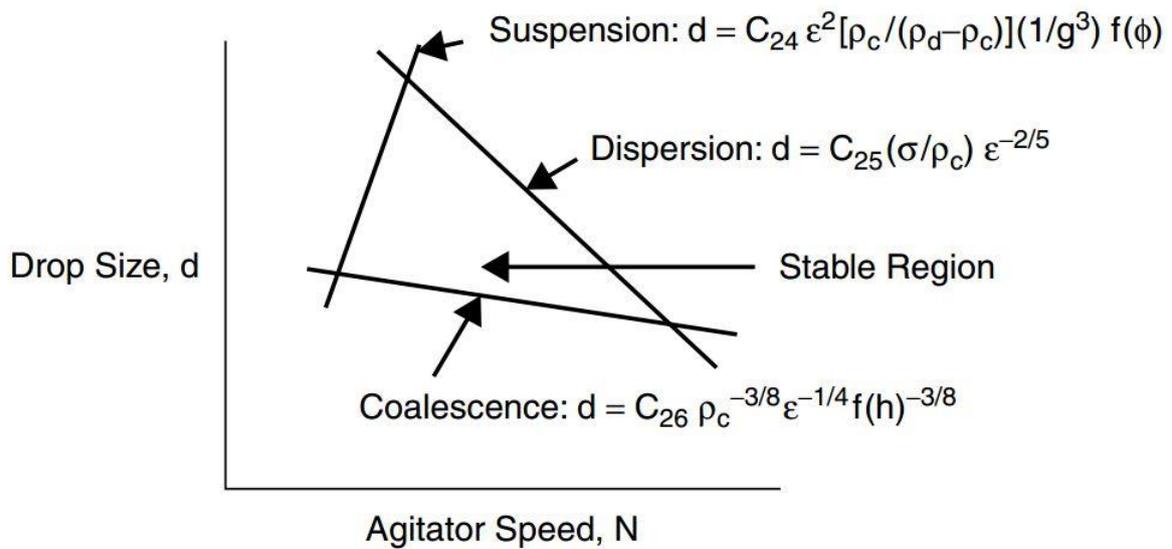


Figura 1.9 Concetto di regione di stabilità per un sistema liquido-liquido processato in un serbatoio agitato meccanicamente.

Difatti la dimensione delle gocce è fortemente influente per i fenomeni che potrebbero verificarsi. A livello microscopico, quando una goccia è contenuta all'interno di un vortice di grandi dimensioni, essa ruota all'interno di quel vortice e non si rompe. Tuttavia, se ne incontra uno delle sue stesse dimensioni o più piccolo, può essere deformata e dispersa. Si avrà sempre, vicino alla girante, una zona con elevata turbolenza tale da favorire la rottura delle gocce; ed una zona con minore turbolenza o condizioni laminari altrove nel serbatoio, che consentono alle gocce di rimanere in contatto per un tempo sufficientemente lungo da favorirne la coalescenza. Se una goccia è allungata oltre il punto di allungamento critico essa si rompe, in caso contrario, appena entra in una zona a minore turbolenza ritorna allo stato precompressso (Y. Zhao, X. Li, J. Cheng, C. Yang & Z. Mao, 2011).

Comunque, l'entità e la direzione dei flussi convettivi prodotti dalla girante influenzano la distribuzione e l'uniformità delle fasi nonché la cinetica di dispersione, risultando determinante per questa anche l'intensità dell'agitazione. Difatti la deformazione di un volume di liquido è indotta dalle forze meccaniche impresse dal fluido circostante, alle quali si oppongono le forze resistenti viscosive e superficiali (G. W. Zhou; S. M. Kresta, 1998).

La Figura 1.10 mostra diversi tipi di deformazione della goccia a causa di diverse forze dirompenti (Hinze, 1955). Collisioni di impatto, ad esempio con le pareti o con le pale della girante conducono a deformazione lenticolare (a) , forze di taglio uniformi portano ad una deformazione a forma di sigaro (b), mentre condizioni turbolente portano a deformazioni ingombranti (c).

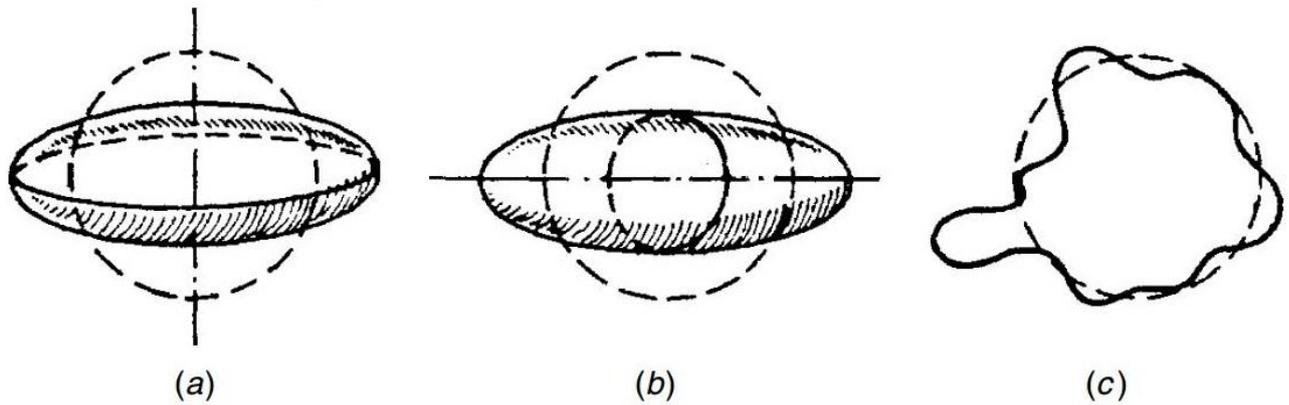


Figura 1.10 Tre tipi di deformazione globulare: (a) lenticolare; (b) a forma di sigaro; (c) protuberante.

È pratica comune riferire tutte le forze dinamiche che causano la deformazione a goccia come forze di taglio indipendentemente dal meccanismo controllante, che può essere di allungamento della goccia in regime laminare o dovuto a fluttuazioni di pressione in regime turbolento.

Di contro, le forze dovute alla tensione interfacciale tentano di minimizzare l'area superficiale forzando la goccia allungata a tornare alla sua forma sferica originale. La rottura non si verifica a meno che non venga raggiunta una deformazione critica durante lo stretching. La goccia o si rompe o ritorna ad una condizione di deformazione minore quando passa in una regione a minore velocità di taglio. Come annunciato, la rottura si verifica anche in caso di collisione con superfici solide come le pale della girante, deflettori e pareti, un tale meccanismo è indesiderato perché difficile da controllare, quindi la scelta della girante e la geometria del serbatoio sono importanti per prevenire questa forma indesiderata di dispersione.

Nei serbatoi agitati quindi, si può assumere che le forze responsabili della deformazione e rottura delle gocce siano principalmente quelle di taglio, diversamente nel caso di miscelatori statici non si possono trascurare le forze d'impatto con le pareti del miscelatore stesso (C. Y. Wang; R. V. Calabrese, 1986). In alcune condizioni operative fenomeni di coalescenza prevalgono sui meccanismi di rottura delle gocce. La coalescenza è definita come la combinazione di due o più gocce, o come la fusione di una goccia con uno strato già coeso.

Nel primo caso, tale processo comporta la collisione seguita dal drenaggio del film di liquido che si trova tra le superfici delle gocce; nel secondo caso invece avviene sotto le forze di gravità.

Il volume di liquido che rimane intrappolato tra le superfici di due gocce che tendono ad entrare in contatto, assume la forma di un disco con dimensioni che dipendono dalle proprietà interfacciali tra le fasi. La velocità di drenaggio del film liquido dipende ovviamente dalla tensione interfacciale e dalla viscosità, mentre la frequenza di collisione dipende dalla velocità di agitazione e dalla frazione volumetrica della fase dispersa. Liquidi a bassa tensione superficiale, tendono ad intrappolare un volume

maggiore che dovrà essere poi essere drenato, ciò riduce la probabilità di coalescenza; allo stesso modo un'elevata viscosità della fase continua agisce diminuendo il tasso di drenaggio.

Il fenomeno di coalescenza inoltre è fortemente dipendente dalla grandezza e durata della forza che agisce sulle due gocce, che spinge il liquido fuori dallo spazio interposto tra esse fino a che non si raggiunge uno spessore critico, che si suppone si aggiri intorno ai 50 Å, oltre il quale le gocce coalescono.

Se il contatto è di breve durata, lo spessore critico non ha il tempo di essere raggiunto e le gocce non riescono a coalescere, diversamente tutto il liquido che separa le gocce viene drenato ed esse si fondono. La probabilità di coalescenza è quindi proporzionale al tempo di contatto ma inversamente proporzionale al tempo di drenaggio.

Un'altra problematica da considerare è l'inversione di fase, ovvero la commutazione in fase dispersa del componente inizialmente presente come fase continua e viceversa; ciò può verificarsi in sistemi ad elevata concentrazione della fase dispersa o a causa della variazione delle caratteristiche fisiche delle fasi miscelate; infatti, se aumenta la viscosità della fase dispersa è probabile che si abbia inversione di fase e quindi che questa diventi la nuova fase continua.

Si tratteranno di seguito i parametri che maggiormente influiscono sui fenomeni di coalescenza e break-up delle gocce in caso di moto turbolento e per sistemi concentrati, come avviene nel caso di studio sperimentato.

1.3.2 Sospensione delle gocce e velocità di *just draw-down* e *complete dispersion*

Quando le fasi dispersa e continua hanno diversa densità e quando l'agitazione fornisce solo una minima circolazione in tutto il serbatoio è possibile che le fasi si separino per coalescenza delle gocce disperse, portando a decantazione della fase leggera.

Si ha l'interesse quindi di determinare due velocità di agitazione caratteristiche, velocità di *just draw-down* alla quale inizia la dispersione di una fase nell'altra e di *complete dispersion*, alla quale non è più possibile individuare nel sistema la presenza della fase dispersa sotto forma di strato coeso.

Queste velocità sono dipendenti dal sistema e dalla posizione della girante rispetto all'interfaccia di separazione.

Inoltre, la posizione della girante rispetto alla posizione iniziale occupata dall'interfaccia fra le due fasi separate e da miscelare, può essere determinante per definire quale delle due fasi sarà presente in forma dispersa.

Come illustrato nelle Figure 1.11 e 1.12, in cui è rappresentata una fase leggera oleosa ed una fase acquosa più pesante, posizionando una girante Rushton (RDT) nella fase acquosa inferiore, ad una certa distanza dall'interfaccia, si possono creare dispersioni di olio in acqua.

Con il moto della girante si forma un vortice centrale che dirige il flusso della fase più leggera verso le pale, in queste condizioni inizia la dispersione, *just draw-down*. Il volume dello strato leggero

diminuisce con la continua dispersione fino a quando raggiunta la velocità di *complete dispersion* si esaurisce.

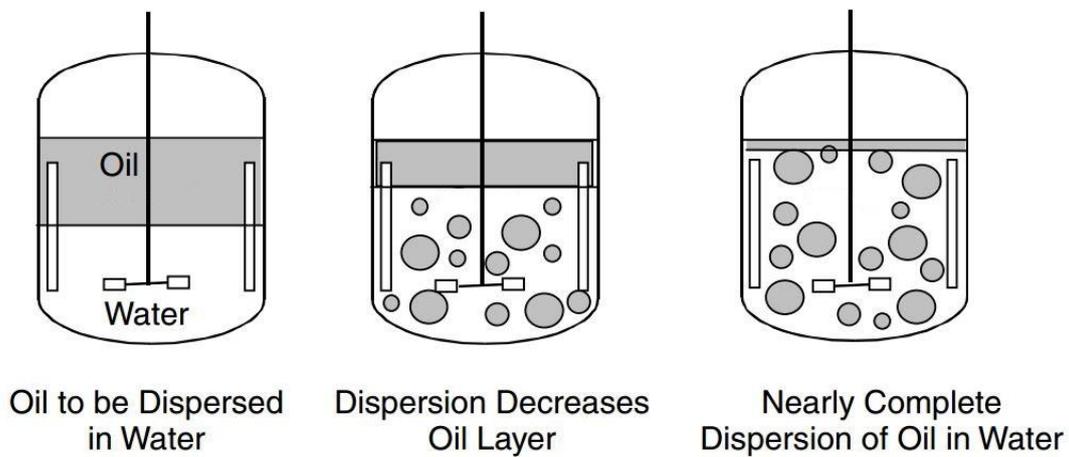


Figura 1.11 Rappresentazione della dinamica di dispersione di olio in acqua per un sistema inizialmente segregato a diverse intensità di agitazione.

Posizionando la girante nella fase superiore invece, vicino all'interfaccia si può avere dispersione di acqua in olio, difatti si forma un vortice contenente acqua che disperde nella fase più leggera.

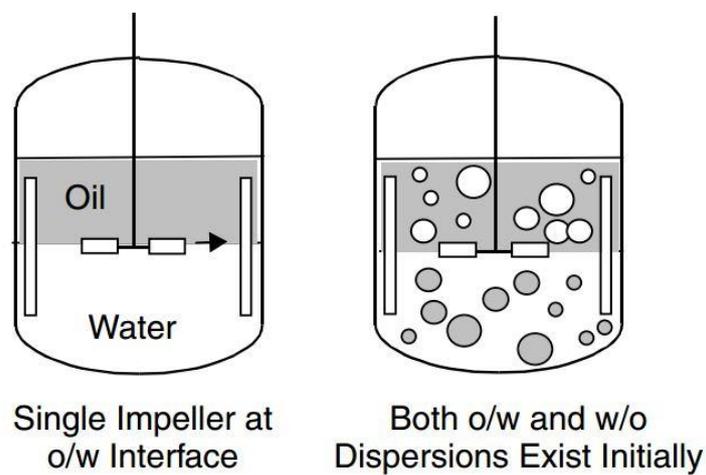


Figura 1.12 Rappresentazione della dinamica di dispersione di acqua in olio per un sistema inizialmente segregato.

Le ricerche precedentemente condotte sulla dispersione liquido-liquido in serbatoi agitati si sono focalizzati molto sull'influenza della velocità di agitazione e successiva determinazione della velocità

minima di agitazione per la completa dispersione della fase dispersa, mentre non sono state trovate in letteratura correlazioni per la valutazione di just draw-down.

La maggior parte degli studi riportati per la determinazione di N_{cd} sono semiempirici e seguono l'approccio di Zwietering (1958) per la definizione dello stato di *just suspension* di particelle solide in un mezzo liquido.

Esistono analogie tra la velocità N_{cd} e N_{js} , entrambi dipendono dalla differenza di densità, dalla viscosità della fase continua e dal diametro della girante. Tuttavia, N_{js} dipende direttamente dalla dimensione delle particelle, mentre N_{cd} dipende dalla tensione interfacciale e dalle altre proprietà fisiche che determinano la dimensione delle gocce.

Skelland e Seksaria (1978) determinarono la velocità minima per indurre completa dispersione a partire da due fasi separate di diversa densità, includendo anche la dipendenza dalla posizione delle giranti.

I loro risultati sono correlati dalla seguente equazione adimensionale:

$$\frac{N_{cd} D^{0.5}}{g^{0.5}} = C_{20} \left(\frac{T}{D} \right)^{\alpha_5} \left(\frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{1/9} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c} \right)^{0.25} \left(\frac{\sigma}{D^2 \rho_c g} \right)^{0.3} \quad (1-1)$$

Le costanti C_{20} e α_5 , misurano la facilità di formazione della sospensione. Valori bassi di C_{20} indicano che le dispersioni si formano a basse velocità, valori elevati suggeriscono che sono richieste velocità più elevate per la sospensione completa.

In uno studio precedente, Nagata (1975) determinò le condizioni minime di agitazione per ottenere la dispersione completa usando un recipiente cilindrico dotato di frangiflutti ed una girante a quattro pale, con $D/T = 1/3$, poste a $C = T/2$. La seguente equazione mostra la sua correlazione dimensionale:

$$N_{cd} = C_{21} T^{-2/3} \left(\frac{\mu_c}{\rho_c} \right)^{1/9} \left(\frac{\rho_c - \rho_d}{\rho_c} \right)^{0.26} \quad (1-2)$$

Il valore di C_{21} è 750 per agitatore centrato con l'asse del reattore e 610 per agitazione decentrata con eccentricità $D/4$. Le unità di misura sono ρ_c (kg / m³), ρ_d (kg / m³), μ_c (kg / m · s), T (m) e N_{cd} (rpm). Le posizioni decentrate favoriscono la dispersione perché grazie all'eccentricità si crea un vortice che facilita il flusso verso la girante. Come può notarsi dalla precedente equazione non si ha dipendenza da μ_d , ciò indica che tale equazione risulta valida per fasi disperse a bassa viscosità.

Successivi studi furono condotti sui vantaggi nell'utilizzare giranti multiple per aumentare l'efficienza dell'operazione di miscelazione. Armenante e Huang (1992) e Armenante et al. (1992) non hanno

praticamente riscontrato alcun vantaggio nell'uso di tali giranti durante la determinazione di N_{cd} ; tuttavia, queste risultano essere utili per migliorare l'uniformità della fase dispersa.

I risultati riportati da Armenante (1992) concordano con il lavoro condotto da Skelland e Seksaria (1978).

1.3.3 Influenza della frazione volumetrica della fase dispersa

La concentrazione della fase dispersa, espressa solitamente come frazione volumetrica φ , influenza i fenomeni di coalescenza e dispersione, difatti all'aumentare della frazione volumetrica aumenta la velocità di coalescenza delle gocce. Questo è dovuto sia ad un aumento della frequenza di collisione delle gocce, sia ai cambiamenti reologici del sistema che inducono tempi di contatto più lunghi.

Inoltre, se le concentrazioni sono elevate, le gocce influenzano il comportamento dei vortici riducendone l'intensità e quindi la loro capacità di indurre la rottura delle gocce.

Pertanto, l'approccio alla progettazione delle apparecchiature che trattino due liquidi immiscibili, dipende in modo significativo dalla concentrazione della fase liquida dispersa; risulta utile classificare i vari tipi di sistemi in base a questa variabile, definendo sistemi diluiti, moderatamente concentrati o concentrati, come discusso in seguito.

Si definiscono diluiti i sistemi con $\varphi < 0,01$. Idealmente, in un sistema diluito la dispersione è influenzata solo dalla fluidodinamica della fase continua, ed ogni goccia è una singola entità su cui agiscono le forze impresse dal fluido circostante. La coalescenza viene trascurata perché si verificano poche collisioni. Queste semplificazioni consentono di effettuare un trattamento teorico abbastanza semplice per modellare il processo di dispersione. La coalescenza può diventare significativa per sistemi puliti a $\varphi \geq 0,05$.

Per frazioni volumetriche $\varphi < 0,2$ il sistema è considerato essere moderatamente concentrato; il comportamento e la trattazione tecnica in questo intervallo di concentrazione dipendono essenzialmente dai fenomeni di rottura.

Per sistemi concentrati $\varphi > 0,2$. La coalescenza risulta essere più probabile e veloce, si otterranno quindi delle distribuzioni di diverse dimensioni, la cui forma dipende dall'equilibrio raggiunto tra i fenomeni di coalescenza e quelli di rottura. Questo comportamento è molto complesso ed estremamente difficile da riportare su scala reale, poiché entrambi i fenomeni di coalescenza e rottura risultano essere dominanti ma in diverse regioni del serbatoio.

Tipicamente per sistema in cui $\varphi \approx 0,5$, come nel caso pratico industriale, la coalescenza è prevenuta mediante l'uso di agenti chimici, in modo da poter utilizzare teorie basate su sistemi diluiti, rendendo più accettabile la loro gestione e progettazione.

Per il sistema studiato, le frazioni volumetriche indagate sono relativamente alte, tanto che il sistema può considerarsi concentrato; inoltre, dall'osservazione sperimentale del fenomeno può essere classificati come a lenta coalescenza.

1.4 Scale-up di sistemi liquido-liquido agitati meccanicamente

Risulta chiaro, da quanto esposto fino ad ora, che la gestione delle operazioni industriali che richiedono la miscelazione di due fasi liquide non miscibili, non è cosa banale.

Fenomeni quali rottura e cinetica di rottura, coalescenza e sospensione delle gocce, come precedentemente descritto, sono dipendenti dal sistema e dalle dimensioni dell'apparecchiatura, per cui la progettazione in scala deve essere in grado di prevedere la struttura del campo di moto all'interno dell'apparecchiatura, che influisce su tali fenomeni (Colenbrander, 2000).

Il ridimensionamento ovviamente dipenderà dal sistema fisico; ad esempio, per un sistema diluito non coalescente, lo scale-up potrà essere condotto considerando solamente gli stress di taglio e il tempo di rottura; tuttavia, in un sistema coalescente concentrato risulta molto più complesso.

In quest'ultimo caso, le diverse dimensioni del serbatoio agiscono sul moto del fluido circolante, ciò influenza la probabilità di rottura e coalescenza delle gocce, perciò si ha la necessità di correlare tali fenomeni al variare della struttura del campo di moto.

La struttura del moto turbolento su piccola scala, in realtà non è influente sulla velocità di deformazione a goccia, collisione e drenaggio del film; tuttavia, la quantità di tempo che il volumetto di fluido trascorre nelle zone ad elevati sforzi di taglio e quiescenza dipende dal tempo di circolazione medio, regolato dalla velocità di pompaggio della girante e da fenomeni di turbolenza macroscopica, fortemente influenzati dalle dimensioni dell'apparecchiatura, quindi risulta complicato ridimensionare il sistema mantenendo gli stessi tassi di coalescenza e rottura (Derksen, J.J., 2007).

Ne risulta infatti che in serbatoi di piccole dimensioni il processo di miscelazione tende ad essere dominato dai fenomeni di rottura, mentre per serbatoio di grandi dimensioni, la coalescenza è favorita.

Alla luce di queste complessità, il corretto dimensionamento di apparecchiature operino con sistemi liquido-liquido non può avvenire secondo le comuni "regole" di scale-up, come velocità costante di agitazione o costanza della potenza spesa per l'agitazione.

Un metodo di scale-up efficiente deve essere in grado di ottenere risultati prevedibili e accettabili perché errori di previsione possono portare a perdite di capacità, qualità, sicurezza e profitti.

Ne deriva quindi che la conoscenza dell'evolversi di tali fenomeni al variare delle condizioni operative è fondamentale, così da poter sfruttare i risultati ottenibili su scala di laboratorio e riportarli su applicazioni processuali, dove problemi come la formazione di incrostazioni, agglomerazione di prodotti altamente viscosi o inefficienza nello smaltimento del calore di reazione possono comportare un sostanziale aumento dei costi, essendo questi proporzionali al tempo di miscelazione richiesto e alla qualità del prodotto. A tale scopo, nei capitoli successivi si studia la possibilità di caratterizzare un sistema miscelato liquido-liquido, monitorando la distribuzione della fase dispersa tramite la tecnica di tomografia a resistenza elettrica (ERT).

1.5 La tomografia a resistenza elettrica come strumento per il monitoraggio delle operazioni di miscelazione nell'industria chimica

In ambito industriale la tomografia a resistenza elettrica rientra nella categoria più generale della tomografia di processo; un insieme di tecniche diagnostiche che, sfruttando diversi principi fisici, consentono di indagare ciò che avviene all'interno dell'oggetto sottoposto ad analisi.

Attraverso la tomografia è possibile ottenere l'immagine di una sezione trasversale o volumetrica riferita alle proprietà fisiche interne di un oggetto, esposto ad un'onda penetrante.

Ci sono tre elementi principali che differenziano le varie tecniche tomografiche: la sorgente dell'onda, i sensori di misura e l'algoritmo di ricostruzione dell'immagine.

A seconda del tipo di segnale che viene sfruttato, si distinguono tecniche tomografiche a raggi-x, a infrarossi, a raggi gamma, a emissione di positroni, a risonanza magnetica, sonica, ottica e, ovviamente, elettrica; nella classe della tomografia elettrica rientrano quelle capacitiva, a resistenza e a induttanza. La scelta della tecnica adatta dipende dalle proprietà fisiche dei fluidi coinvolti, dalle condizioni di processo, dalla risoluzione desiderata e dal costo affrontabile.

Inoltre, in base alla natura del campo si è introdotta recentemente la definizione di tomografia "hard-field" e "soft-field".

La suddivisione delle tecniche tomografiche secondo questa classificazione è riportata in fig. 1.13.

	tomography technique	characteristics
electromagnetism (hard field)	gamma-ray	radioactive source, fast scanning
	X-ray	high resolution, mechanically scanned, radiation confinement
	UV, optical	fast, optical access
	millimetre wave	system component emerging
electromagnetism (soft field)	microwave	fast, moderate resolution (wavelength dependence)
	capacitive (ECT)	low resolution, contactless
	impedance (EIT)	fast, low cost
	inductance (MIT)	contactless, low cost
nuclear particle	positron emission	similar to computed tomography reconstruction, functional imaging
	neutron	high resolution, radioactive source
others	MRI	high resolution, soft-tissue imaging
	ultrasound	high resolution
	thermal conduction	slow, soft field

Figura 1.13 Caratterizzazione delle tecniche tomografiche.

La caratteristica che differenzia queste due categorie è la risoluzione spaziale dell'immagine; infatti, nell' hard-field, come avviene per i raggi X, la direzione di marcia del segnale è costante, e l'unico fattore che può influenzare la potenza del segnale è il materiale attraversato, indipendentemente dalla sua posizione, diversamente nella tomografia soft-field, altri fattori possono influenzare il segnale di trasmissione; ciò implica che la sensibilità di una particolare posizione all'interno della zona di misura dipende dalla variazione spaziale del parametro fisico che viene ripreso all'interno dell'intera zona di rilevamento.

Potendo visualizzare in maniera non intrusiva la distribuzione spaziale delle proprietà elettriche di una fase continua conduttiva, nella quale una fase non conduttiva è dispersa è possibile indagare il comportamento fluidodinamico nelle operazioni di miscelazione di liquidi immiscibili come nello studio riportato in questo elaborato.

La tomografia a resistenza elettrica è stata applicata con successo a varie operazioni unitarie nell'industria di processo e largamente per la miscelazione in recipienti agitati, coinvolgenti diversi tipi di fluidi e materiali, con lo scopo di misurare o monitorare diversi aspetti quali la performance di miscelazione, analisi di flussi multifase, quantificazione degli hold-up di diverse fasi o distribuzione spaziale delle fasi. Il vantaggio più grande nell'utilizzo dell'ERT sono i bassi costi computazionali e quindi brevi tempi di calcolo, il che rende una tale tecnologia applicabile al monitoraggio in tempo reale di quelle operazioni che coinvolgono due liquidi immiscibili, per le quali in presenza di fenomeni quali breakup o coalescenza delle gocce lo scale-up diventa difficoltoso (H.S. Tapp; A.J. Peyton; E.K. Kemsley; R.H. Wilson, 2002).

Benché l'ERT, con un opportuno algoritmo di ricostruzione dell'immagine, possa essere convenientemente impiegata per il monitoraggio in tempo reale e anche in scala di impianti, gran parte delle applicazioni di questa tecnica sono state svolte in laboratorio (R.Mann F.J.Dickin M.Wang, 1997).

Le sperimentazioni di seguito riportate hanno ricoperto due aspetti principali, ovvero le condizioni di applicabilità della tomografia a resistenza elettrica per lo studio di sistemi di liquidi immiscibili e l'analisi qualitativa della distribuzione spaziale delle fasi al variare del grado di miscelazione del sistema.

2 La tomografia a resistenza elettrica applicata allo studio del sistema gasolio/acqua in un serbatoio agitato

2.1 Apparecchiatura sperimentale

Per studiare il processo di miscelazione in un serbatoio agitato contenente il sistema acqua/gasolio, la strumentazione impiegata è costituita da tre parti principali: l'apparecchiatura dedicata all'operazione di miscelazione, correlata di agitatore meccanico, i sensori di misura dello strumento, disposti lungo la periferia del serbatoio, e il sistema di acquisizione dati (DAS) che rappresenta il corpo del tomografo a resistenza elettrica.

Le due fasi miscelate sono contenute in un serbatoio in plexiglass cilindrico a fondo piatto, dotato di quattro diaframmi di dimensioni $l \times s$, di diametro (T) e altezza (H) rispettivamente pari a 0,232 m e 0,280 m; mentre l'agitazione è fornita per mezzo di una singola girante, di tipo Rushton a sei pale, di diametro $D=T/3$, centrata rispetto all'asse del recipiente con *clearance* $C=T/3$ e fissata sul coperchio del serbatoio, anch'esso in plexiglass e di spessore pari a 0.02 m, in tabella 2-1 si riassumono le caratteristiche geometriche dell'apparecchiatura.

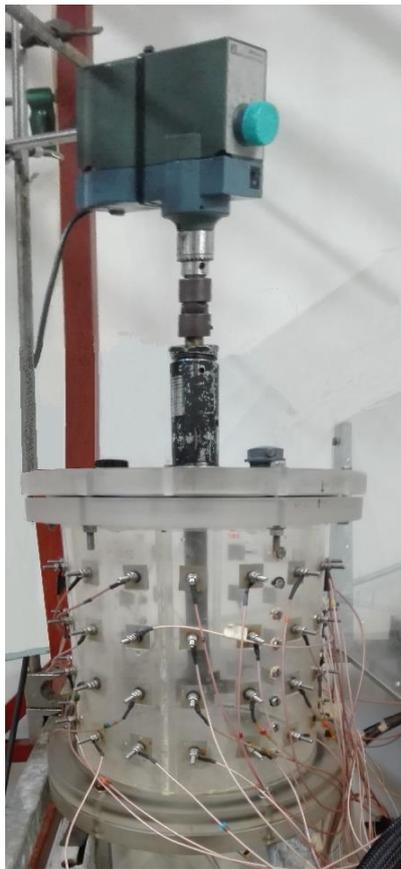
Tabella 2-1 Caratteristiche geometriche dell'apparato sperimentale

SERBATOIO	[m]
Diametro serbatoio (T)	0.232
Altezza serbatoio (H)	0.280
Altezza del volume di liquido H_L	0.250
Dimensione dei baffles	
Lunghezza (l)	$T/10$
Spessore (s)	0.004
SISTEMA DI AGITAZIONE	
Tipo di girante	Rushton a 6 pale
Diametro girante (D)	$T/3$
Clearance (C)	$T/3$

Il grado di miscelazione del sistema è stimato utilizzando la strumentazione P2+ fornita da ITS (Industrial Tomography Systems), misurando la conducibilità locale su quattro piani trasversali al serbatoio contenente le due fasi, tenute in agitazione dall'agitatore meccanico.

L'agitatore montato sull'albero della girante è il modello IKA, RW 16 basic e consente di regolare il numero di giri per variare la velocità di agitazione, la quale è stata misurata con un foto-tachimetro digitale (Extech Instruments) in grado di rilevare con precisione (± 0.1 rpm nel range tra 5 e 999.9 rpm) le rotazioni per minuto.

Si riporta l'immagine dell'apparecchiatura utilizzata e della strumentazione accessoriata nelle figure 2-1 2-2.



a)



b)

Figura 2.1 a) Serbatoio cilindrico, correlato di agitatore meccanico e sensori di misura. b) Agitatore Rushton a 6-pale.



Figura 2.2 Foto-tachimetro digitale, Extech Instruments.

2.1.1 Principio di misurazione dei dati

Come mostrato nello schema a blocchi di figura 2.3, la strumentazione che costituisce un tipico tomografo a resistenza elettrica è composta dai sensori di misura, sistema di acquisizione dati e sistema di ricostruzione dell'immagine/computer ospite. Ognuna di queste parti sarà considerata di seguito nel dettaglio.

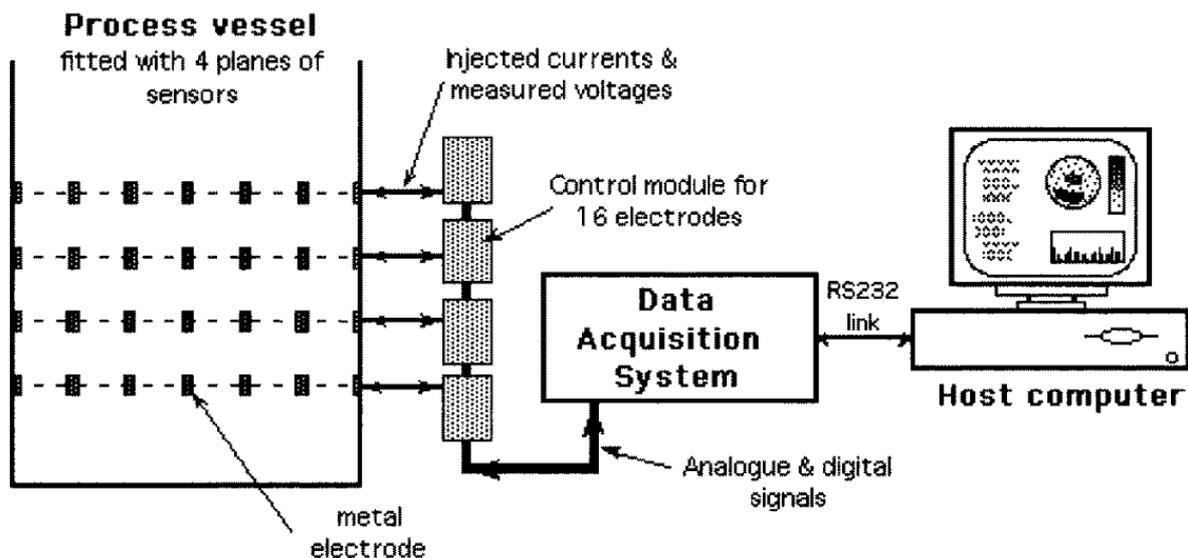


Figura 2.3 Schematizzazione del sistema di misura e acquisizione dati.

Il principio di funzionamento della tomografia a resistenza elettrica si basa sull'iniezione di corrente elettrica nel mezzo d'interesse e successiva misura del voltaggio, per mezzo di una serie di elettrodi disposti circolarmente lungo la periferia interna del recipiente.

Ogni piano di misura viene suddiviso in una griglia di 316 pixel, ad ogni istante e per ognuno dei pixel viene ricostruito un dato a partire dal set di misure sperimentali acquisite; ne deriva un'immagine istantanea detta tomogramma, che mostra con una scala di colori, la distribuzione spaziale di conducibilità nella sezione corrispondente a quel piano di misura. Disponendo più piani di misura lungo l'altezza del recipiente si ricerca l'andamento della conducibilità nell'intero volume.

Per questo scopo, è necessario sottolineare il fatto che il campo elettrico generato non è confinato sul piano ideale identificato dagli elettrodi, ma si estende per un certo volume sia sopra che sotto il piano. Questa caratteristica del campo implica un'analisi più accurata qualora si voglia quantificare la differenza di conducibilità assiale nel recipiente considerato; inoltre, la sua natura "flessibile" rende poco precisa la misura sperimentale.

Ne consegue che da misure di intensità di corrente e di potenziale elettrico applicate ad un sistema agitato conduttivo è possibile risalire a delle mappe di conducibilità che, in presenza di una seconda fase non conduttiva, ne indicano la distribuzione fornendoci informazioni sullo stato di miscelazione e di avanzamento del processo, all'interno del recipiente che si sta considerando.

2.1.2 Sensori di misura

Il design dei sensori è una parte importante in quanto svolge un ruolo significativo sia in termini di qualità generale dei dati dopo la ricostruzione dell'immagine, sia perché influisce sul fenomeno di distorsione del campo.

Tradizionalmente, la configurazione dell'elemento di misura comprende numerosi elettrodi, generalmente 16, disposti attorno al perimetro del serbatoio. I sensori devono essere in continuo contatto elettrico con l'elettrolita all'interno del recipiente di processo; inoltre, devono essere più conduttivi dell'elettrolita per ottenere misurazioni affidabili. Per la maggior parte delle applicazioni di processo, gli elettrodi sono metallici e possono essere fabbricati in acciaio inossidabile, argento, oro, platino, palladio d'argento o qualsiasi altro materiale adatto, che esibisca un certo numero di proprietà. Le proprietà più favorevoli, senza alcun ordine di priorità, sono basso costo, facilità di fabbricazione e installazione, buona conduzione elettrica e resistenza all'abrasione e alla corrosione (E. Fransolet; M. Crine; G. L'Homme; D. Toye & Marchot, 2002).

La forma e la dimensione degli elettrodi è un fattore importante per la bontà della misura, ma la loro scelta viene largamente influenzata dalle esigenze di economicità e semplicità di installazione. Gli elettrodi di iniezione richiedono un'area relativamente elevata così da generare una adeguata densità di corrente nel fluido; viceversa è bene che gli elettrodi di misura siano piccoli, idealmente puntiformi, così da evitare la raccolta di dati medi su diverse linee di flusso equipotenziale. L'immagine seguente mostra due configurazioni ottimali dei sensori, a sinistra quella proposta da Hua et al. (1993) e a destra quella da Paulson et al. (1992).

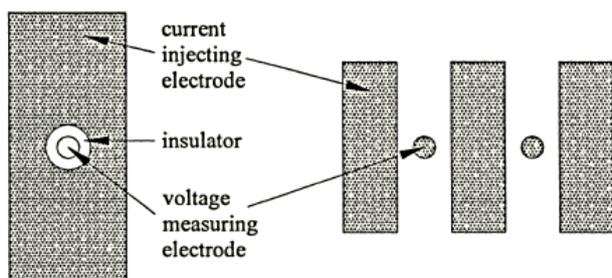


Figura 2.4 Possibili configurazioni degli elettrodi

La struttura di Hua prevede la sovrapposizione degli elettrodi di iniezione e di misura, separati da uno strato di isolante; i primi sono rettangolari e di area elevata, mentre i secondi sono circolari e centrati, di piccole dimensioni. La qualità e l'accuratezza della misura sono notevoli, ma il tempo e il costo richiesti per la fabbricazione e l'installazione di elettrodi di questo tipo risulta proibitivo per gran parte delle applicazioni della tomografia di processo.

La configurazione di Paulson prevede l'utilizzo degli stessi tipi di elettrodi di Hua, ma installandoli separatamente uno accanto all'altro in maniera alternata. Il montaggio è più semplice, ma richiede comunque il doppio del cablaggio e dei connettori rispetto ad un sistema che impiega un solo tipo di elettrodo.

Di fatto, per questioni di economicità e semplicità, la quasi totalità delle configurazioni del tomografo prevede l'utilizzo di un solo tipo di elettrodo sia per l'iniezione che per la misura, tipicamente rettangolare, di area intermedia tra quella che avrebbero gli elettrodi di dimensione ottimizzata per la corrente e il voltaggio.

Nel caso più semplice, gli elettrodi vengono montati per bullonatura, forando le pareti del recipiente e fissandoli all'interno di esso, con il dado sul lato esterno.

È importante che il posizionamento degli elettrodi sia scrupoloso, in quanto gli algoritmi di ricostruzione dell'immagine assumono che essi siano disposti secondo precisi intervalli; quest'esigenza è in qualche misura meno marcata qualora si impieghino algoritmi qualitativi, i quali offrono delle ricostruzioni in termini relativi rispetto ad una misura di base, pulendo quindi il sistema da ogni elemento di imprecisione e disturbo.

Gli elettrodi sono collegati al sistema di acquisizione attraverso cavi elettrici coassiali e di lunghezza limitata, sì da limitare le perdite di corrente e le interferenze elettromagnetiche dall'ambiente di lavoro, che è tipicamente ricco di macchinari elettrici pesanti.

Nella configurazione sperimentale utilizzata, gli elettrodi sono disposti sul serbatoio secondo la configurazione circolare ed equamente distanziati, in continuo contatto con l'elettrolita acquoso; hanno forma quadrata di dimensioni 20x20 mm e 1 mm di spessore e sono costruiti in acciaio inox.

Essi sono collegati al sistema di acquisizione attraverso cavi elettrici coassiali e di lunghezza limitata, sì da limitare le perdite di corrente e le interferenze elettromagnetiche dall'ambiente di lavoro.

Il DAS è a sua volta collegato al computer ospite, adoperato come interfaccia per l'utente, tramite cui è possibile settare i parametri per l'acquisizione, effettuare la ricostruzione dell'immagine, utilizzando il software P2+ v8 fornito da ITS, ed estrarre i dati ottenuti sotto diverse forme.

Come anticipato si utilizzano quattro piani di sensori P_n , numerati dal basso con $n = 1, 2, 3$ e 4 , posizionati alle seguenti altezze: $z_{(P1)} = 60$ mm, $z_{(P2)} = 110$ mm, $z_{(P3)} = 160$ mm, $z_{(P4)} = 210$ mm.

2.1.3 Data Acquisition System

Le variazioni di potenziale misurate dai sensori vengono digitalizzate e trasferite al computer ospite attraverso il sistema di acquisizione dati.

I segnali vengono memorizzati prima di essere trasferiti al multiplexer, che li seleziona sotto il controllo del programma. A causa dell'ampia gamma di sensibilità dovuta alle diverse combinazioni di elettrodi, viene impiegato un amplificatore a guadagno programmabile per assicurare un range dinamico adeguato dei segnali convertiti da analogici a digitali. Il segnale amplificato viene filtrato, con vari gradi di sofisticazione, prima di essere digitalizzato nell'ADC. Questa informazione è ora in forma digitale e viene passata dal DAS al computer ospite per la ricostruzione dell'immagine.

Fattori importanti sono il tempo di misurazione dei dati e l'accuratezza del sistema nel rilevare in tempo reale le piccole variazioni di conducibilità, dati che poi saranno ricostruiti tramite un algoritmo che potrà essere iterativo o non-iterativo; il settaggio dei parametri del DAS è riportato nel paragrafo 3.1.

2.2 Strategie di raccolta dati

La metodologia con la quale vengono campionati i dati varia in base alle diverse modalità di iniezione della corrente e misurazione del potenziale. Tenendo presente che, la risoluzione dell'immagine ricostruita, ovvero la qualità del dato elaborato, è tanto migliore quanto più sensibile riesce ad essere la variabile misurata alle variazioni di conducibilità, di norma la strategia migliore la si sceglierà rispetto alla sensibilità richiesta nelle aree del recipiente di maggiore interesse, dove si vuole che la misura sia più precisa.

La sensibilità nei confronti della percezione delle variazioni di conducibilità nel fluido, viene quantificata con un parametro che prende il nome di *distinguishability* δ (D. G. Gisser 1990), così definito

$$\delta = \delta(i) = \frac{\|R(\sigma_1) - R(\sigma_2)\|}{\|i\|} \geq \varepsilon$$

dove i è l'intensità di corrente, σ_1 e σ_2 sono due valori di conducibilità vicini tra loro, $R(\sigma_j)$ è una funzione non lineare della conducibilità associata ai dati di voltaggio misurati e ε è la precisione di misura.

La *distinguishability* consente quindi di quantificare l'abilità del flusso di corrente di riconoscere una piccola variazione di conducibilità del fluido che attraversa. Tanto maggiore è tale parametro, tanto migliore è la sensibilità della strategia nel mappare la distribuzione di conducibilità. Le aree del

recipiente che vengono meglio indagate con una strategia piuttosto che un'altra dipendono dal percorso compiuto dalle linee di corrente nel fluido, che determinano la distribuzione del potenziale al suo interno. Tale percorso dipende dalla disposizione degli elettrodi di iniezione rispetto a quelli di misura. Con riferimento a ciò, è evidente che è bene che tale parametro per la strategia scelta sia elevato almeno nell'area dove si concentrano maggiormente le linee di corrente.

In base ad ognuno di questi aspetti in riferimento alle proprie esigenze, è possibile scegliere la strategia di raccolta dei dati più opportuna.

Si riconoscono quattro strategie, rappresentate in figura 2.5: a) adiacente, b) opposta, c) diagonale e d) *conductive boundary*.

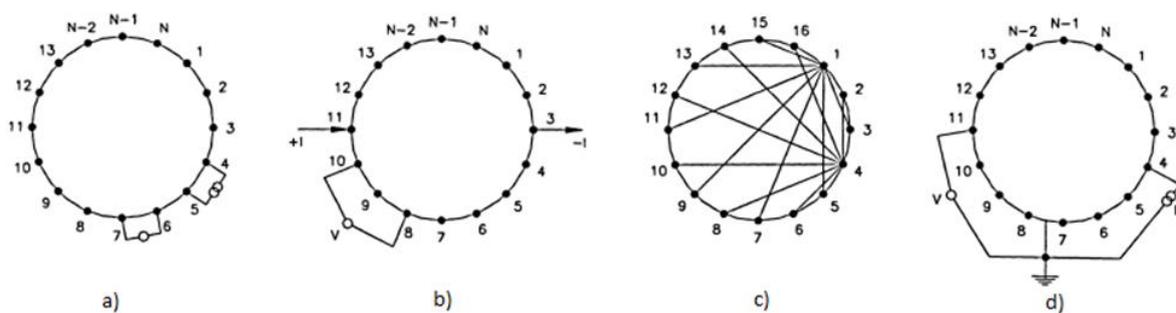


Figura 2.5 Rappresentazione delle quattro possibili strategie di misura per la tomografia a resistenza elettrica.

Per le sperimentazioni che si sono condotte, la strategia implementata è quella adiacente a); secondo questa tecnica di misura, la corrente viene applicata attraverso una coppia adiacente di elettrodi e la misurazione della tensione viene effettuata sulle coppie successive di elettrodi vicini. La corrente viene quindi commutata su una coppia alternata di elettrodi vicini e le misurazioni di tensione vengono effettuate su un secondo set di sensori. Questo viene ripetuto fino a quando tutte le misurazioni indipendenti sono state completate.

Poiché le misure di tensione non sono effettuate sugli elettrodi di trasporto della corrente, il numero di misure indipendenti sarà uguale a $M = N(N-3) / 2$, in cui con N si indicano il numero totale di elettrodi; per un piano di misura composto da 16 elettrodi il numero di misurazioni indipendenti è 104.

Questo metodo è rapido in termini di ricostruzione dell'immagine e non richiede memoria computazionale. Tuttavia, la densità di corrente nel centro dell'apparecchiatura sarà più bassa, poiché la corrente rimane vicina agli elettrodi; il metodo è suscettibile di errore di misura e interferenze di rumore.

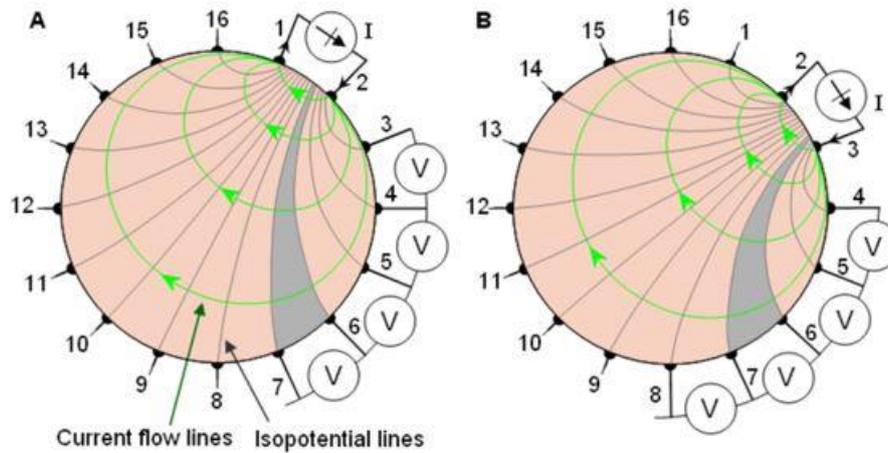


Figura 2.7 Rappresentazione delle linee di corrente che attraversano il mezzo in analisi, al variare della coppia di elettrodi di iniezione (A, B). Si riporta anche la distribuzione delle linee equipotenziali del campo elettrico.

Esistono appunto due metodi per la ricostruzione dell'immagine; uno qualitativo non iterativo e uno quantitativo iterativo. La differenza fondamentale tra i due è che, il primo genera un'immagine che rappresenta la conducibilità come variazione relativa ad una distribuzione di riferimento, acquisita in un tempo precedente a quello della prova, mentre con il secondo ogni pixel della mappa identifica il valore numerico effettivo di conducibilità all'interno del recipiente.

Nel caso di algoritmi qualitativi, il calcolo implica la determinazione del potenziale φ dalla conoscenza della distribuzione di conducibilità σ , quando nel sistema si immette una certa corrente i nota. Questo viene detto *problema diretto* e si sintetizza nella risoluzione dell'equazione di Poisson tramite cui si vuole predire la risposta dei sensori basandosi sui dati di resistività elettrica, disponibili dalla misura stessa, in Ω che è il dominio del campo di rilevamento, ed n versore normale agli elettrodi (1).

$$\nabla \cdot [\sigma \nabla \varphi] = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2-1)$$

Utilizzando le condizioni al contorno per il sistema:

$$\int \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = +i \quad \text{in corrispondenza dell'elettrodo di iniezione della corrente}$$

$$\int \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -i \quad \text{in corrispondenza dell'elettrodo di uscita della corrente}$$

$$\int \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{in corrispondenza degli altri elettrodi}$$

Se la distribuzione della conducibilità nel campo e la corrente iniettata sono noti dalle misure di riferimento, allora la distribuzione del potenziale φ può essere derivata dall'equazione di Poisson. Per una distribuzione spaziale uniforme del campo elettrico la soluzione analitica del problema tridimensionale può essere ottenuta per separazione di variabili. Analogamente può farsi nel caso in cui il campo non abbia una distribuzione spaziale uniforme ma sia nota la sua topografia e si abbiano ulteriori condizioni al contorno per poter risolvere il problema ottenendo un'unica soluzione. Per altre situazioni in cui non si conosce la distribuzione spaziale, è difficile ottenere la soluzione analitica del problema, si utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM) per fare un'analisi approssimativa bidimensionale e si risolve l'equazione per via numerica, discretizzando il piano di misura (N. J. Avis, D. C. Barber, B. H. Brown and M. A. Kiber, 1992).

Poiché la corrente, sebbene immessa attraverso un piano, fluisce sia sopra che sotto di esso, la scelta di una modellazione 2D del fenomeno consente di condurre la ricostruzione dell'immagine in modo più semplice e veloce, con un minor costo computazionale, ammettendo possibili errori.

Il problema discretizzato e linearizzato assume la forma in equazione (2-2):

$$\varphi_{(jx1)} = S_{(jxk)} \cdot \sigma_{(kx1)} \quad (2-2)$$

dove φ è il vettore dei valori da calcolare del potenziale ai confini del dominio, ovvero del recipiente, S è la matrice rappresentativa della mappa di sensibilità, valutata utilizzando come distribuzione di conducibilità quella del set di misure di riferimento $\sigma_{(kx1)}$, essendo j e k rispettivamente il numero di misure indipendenti e il numero di pixel.

L'elemento della matrice di sensibilità corrispondente al pixel centrato nel punto (x, y) del piano cartesiano di discretizzazione, date le coppie m e n di elettrodi, può essere definito come:

$$S_{j,k} = - \int \frac{\nabla \varphi_m}{i_m} \frac{\nabla \varphi_n}{i_n} d a_k \quad (2-3)$$

dove φ_m e φ_n sono i gradienti del potenziale dovuto al passaggio di corrente agli elettrodi m e n della misura indipendente j , relativi all'area a_k del singolo pixel.

Come detto, la risoluzione preliminare di questo problema è necessaria a causa dell'inferiorità numerica delle misure indipendenti rispetto al numero di celle che si vuole ricostruire, ma non sufficiente per la caratterizzazione del sistema, che viene fatta ricostruendo la distribuzione di conducibilità tramite la risoluzione di un problema inverso.

La risoluzione lineare del problema inverso prevede che le immagini vengano generate semplicemente moltiplicando le misurazioni di potenziale per una singola matrice pre-calcolata, ovvero la trasposta $S_{(jxk)}^T$.

$$\sigma_{(kx1)} = \varphi_{(jx1)} * S_{(jxk)}^T \quad (2-4)$$

Numerosi algoritmi sono stati implementati, utilizzando metodi approssimativi più o meno efficaci per la ricostruzione dei tomogrammi da misure di tensione, la maggior parte fanno uso della mappa di sensitività derivata dalla risoluzione preliminare del problema diretto per una o più geometrie note.

I metodi lineari sono rapidi, in quanto le operazioni di calcolo hanno bassa complessità, diversamente i metodi non lineari si basano su cicli di calcolo iterativi di tipo Newton-Raphson, e sfruttando la stessa equazione degli algoritmi qualitativi la risolvono in più cicli, partendo da valori di tentativo per la distribuzione di conducibilità e aggiornando il vettore σ ad ogni iterazione. La prima distribuzione di tentativo viene solitamente impostata variando di una quantità a piacere la conducibilità di base del sistema; con essa si risolve il problema diretto ottenendo un vettore φ di potenziali calcolati, si valutano i residui tra i potenziali calcolati e quelli misurati fintanto che non siano inferiori ad un errore prestabilito e il ciclo termina, mentre in caso contrario la conducibilità viene aggiornata e si procede con un ulteriore ciclo di iterazione.

I metodi non lineari risultano quindi molto più precisi e consentono dunque di quantificare in termini assoluti la variazione di conducibilità all'interno del piano di misura, ma sono molto più lenti e richiedono un maggior costo computazionale; tipicamente non sono adatti per il monitoraggio in tempo reale dei processi o per condurre in tempi ridotti prove sperimentali che coinvolgono la ricostruzione di molte immagini (K. Wei, C. Qiu, M. Soleimani, 2015).

La scelta tra un algoritmo e l'altro dipende essenzialmente dall'accuratezza richiesta e dal tempo ritenuto accettabile per ricostruire i tomogrammi.

Barber and Brown hanno sviluppato l'algoritmo Sensitivity Back-Projection basato sul principio di retroproiezione lineare (LBP), in cui si utilizza la matrice $S_{(jxk)}^T$ al posto della matrice inversa; questa approssimazione offre la soluzione migliore dal punto di vista degli scarti quadratici, ma non è l'operatore migliore in ogni caso (T. Dyakowski, F. C. J. Laurent, A. J. Jaworski, 2000).

ITS con il software P2+, utilizzato per le sperimentazioni riportate, propone una modifica dell'algoritmo lineare (MSBP) estendendo il raggio operativo del pacchetto standard; infatti, la caratteristica di molti schemi di ricostruzione che utilizzano una misura di riferimento è che le immagini ricostruite prelevate da condizioni di processo significativamente distanti dalle condizioni di riferimento sono probabilmente dotate di artefatti di ricostruzione, attraverso l'algoritmo MSBP si estende l'intervallo di misurazione dei dati che possono essere ricostruiti.

Vi è inoltre un secondo metodo implementato da ITS, Sensitivity Conjugate Gradient Method (SCG), che permette in modo iterativo di ricostruire il tomogramma a partire dai dati grezzi (M. Wang, 2001).

2.3.1 Linear Back Projection

Fino ad oggi l'algoritmo Linear Back Projection, in breve LBP, è stato l'algoritmo standard utilizzato nei tomografi di uso commerciale, grazie alla sua semplicità e velocità di calcolo.

La sua semplicità è dovuta alla modellazione bidimensionale del campo elettrico, seppur in realtà esso si estende al di fuori del piano identificato dagli elettrodi, distribuendosi quindi in uno spazio tridimensionale, come riportato in numerosi studi (Simulation study of the electrode array used in an ERT system).

L' algoritmo LBP rientra nell'ambito degli algoritmi qualitativi e non iterativi; tramite la sua applicazione si calcola la distribuzione di conducibilità riutilizzando la stessa formula linearizzata del problema diretto, in cui ora l'incognita è il vettore σ_k , mentre φ_j contiene i valori di potenziale misurati e S è la matrice valutata con il metodo degli elementi finiti, utilizzando come distribuzione di conducibilità quella del set di misure di riferimento σ_1 . In realtà, poiché S non è quadrata non è possibile calcolarne l'inversa e quindi l'equazione risolutiva viene approssimata usandone la trasposta:

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_1} \approx \frac{\sum_{j=1}^J S_{k,j}}{\sum_{j=1}^J S_{k,j} \frac{\varphi'_j}{\varphi_j}} \quad (2-5)$$

In cui $S_{k,j}$ è un elemento della matrice trasposta calcolata dal problema diretto, φ_j e φ'_j sono rispettivamente le misure di voltaggio nelle condizioni di analisi a cui corrisponde una conducibilità nel pixel k pari a σ_k e nel riferimento a cui si associa un valore di conducibilità σ_1 .

Come quelli qualitativi in generale, ha il vantaggio di basarsi su un semplice prodotto matriciale e quindi di essere diretto e veloce e di richiedere risorse computazionali minime per l'implementazione; questo lo rende adatto in particolare per le applicazioni in tempo reale della tecnica tomografica.

Anche se esistono vari altri metodi lineari, ci sono una serie di motivi per cui LBP è ancora ampiamente utilizzato, seppur tenda a produrre immagini con scarsa risoluzione ed affette da errore in quanto sfrutta la soluzione trasposta del problema diretto che in alcune situazioni è in realtà una scarsa stima della soluzione al problema inverso.

Una delle motivazioni fondamentali è che per un dato numero di elettrodi, è possibile utilizzare la stessa matrice di ricostruzione indipendentemente dall'applicazione o dal particolare design del sensore, ad esempio dimensione e forma dell'elettrodo nell'ERT; inoltre, la qualità dell'immagine ottenuta utilizzando una strategia adiacente è ottimale se si usa tale algoritmo.

2.4 La natura “flessibile” dei campi elettromagnetici, il problema del fringe effect

La tomografia a resistenza elettrica, o più brevemente ERT, come discusso precedentemente sfrutta i campi elettrici per determinare la distribuzione di conducibilità all'interno di un fluido di processo contenuto in una tubazione o in un reattore agitato, monitorando la corrente elettrica o la differenza di potenziale, imponendo viceversa o l'una o l'altra.

Si riassumono i due problemi fondamentali legati alla scarsa risoluzione delle immagini ricostruite, peculiari di tale tecnica;

La Natura flessibile del campo elettrico

La natura soft-field della tomografia elettrica è dovuta al fatto che le proprietà del campo elettrostatico variano al variare della distribuzione delle proprietà elettriche del mezzo che è attraversato dal campo; il fascio trasmesso infatti è attenuato e deflesso qualora incontra una particella o un'interfaccia di diversa conducibilità, l'attenuazione sarà dovuta alla diversa conducibilità in quel punto, mentre il cambio di direzione dipenderà dalla posizione del punto incontrato; ciò comporta una non uniformità delle linee di campo che incontrando una resistenza nel mezzo cambiano direzione.

Se ne deduce che utilizzando come matrice di sensibilità per la risoluzione del problema inverso, quella ottenuta dal problema diretto in cui la distribuzione del campo risulta essere differente, si commettono errori nella ricostruzione dei dati (S. Lioumbas, A. Chatzidafni and T. D. Karapantsios, 2014). Questo comportamento non lineare rende difficile la ricostruzione dell'immagine.

Fringe effect

Oltretutto, il campo elettrico risulta distorto e le linee di campo si estendono lungo l'asse perpendicolare al piano di elettrodi.

Questa estensione in una regione sensibile che non è vincolata all'interno del piano di elettrodi, ma si propaga anche in un certo volume distante da esso, si accentua al diminuire della dimensione degli elettrodi e anche se può essere ridotta al minimo utilizzando elettrodi di dimensioni maggiori, così facendo si perderebbe il carattere locale delle misurazioni, potendo utilizzare meno elettrodi e quindi ottenere un numero di misure indipendenti minore (Jiangtao Sun and Wuqiang Yang 2013).

L'approssimazione del fenomeno tridimensionale in un piano bidimensionale in alcune situazioni può comportare errori di ricostruzione dell'immagine non indifferenti, com'è stato appurato per il caso di studio riportato; infatti, poiché il campo di misura è un campo di corrente non parallelo e tridimensionale, le tensioni misurate riflettono la distribuzione di conduttività in una regione più ampia,

in cui passa una corrente eccitante distribuita in maniera non omogenea (Yixin Ma, Ling-An Xu, Changzhen Jiang, 1999).

La risoluzione dell'immagine dipende anche da altri fattori, quali ad esempio il numero di discretizzazioni della griglia di pixel, la risoluzione intrinseca dei dati misurabili e il rapporto segnale/rumore.

Difatti, quando i dati misurati hanno una bassa risoluzione rispetto alla loro propria dimensione, ovvero bassa differenza di conducibilità tra i due componenti da indagare, l'acquisizione dei dati è altamente incerta e non lineare; e ancora, l'utilizzo di eccitazioni a bassa intensità provoca misurazioni deboli così che un piccolo cambiamento nella variabile misurata porta ad errori di misurazione di grandi dimensioni. Inoltre, sebbene i problemi diretti e inversi della tomografia elettrica siano sempre associati a comportamenti non lineari, un'approssimazione lineare viene comunque implementata nelle applicazioni di tomografia reale a causa della ridotta complessità computazionale, questa approssimazione lineare ha un prezzo di precisione del sistema.

I diversi algoritmi implementati nel corso degli anni sono volti a soddisfare due esigenze della tomografia applicata ai processi industriali; aumentare l'accuratezza dei dati e velocizzare il processo di ricostruzione dell'immagine. Sfortunatamente maggiore è l'accuratezza richiesta, maggiore è la complessità computazionale, inversamente proporzionale alla velocità di calcolo.

Per tali motivi non si è reso ancora possibile sfruttare la tomografia elettrica per monitorare in tempo reale le operazioni coinvolte nei processi industriali; tuttavia risulta uno strumento di analisi competitivo e a basso costo.

A tal proposito si propone una procedura di acquisizione dei dati che ne faciliti la leggibilità tenendo conto del fringe effect, e con lo scopo di aumentare la qualità delle immagini ottenute attraverso una modellazione bidimensionale, si effettuano delle prove preliminari implementando dei sensori di guardia per confinare il campo di misura dei piani.

3 Valutazione di una metodologia di acquisizione e trattamento dati da tomografia elettrica

3.1 Inquadramento del problema

Il sistema studiato è composto da due fasi liquide immiscibili, costituite da una fase acquosa conduttiva all'interno della quale la fase oleosa viene fatta disperdere, grazie al sistema di agitazione incorporato al serbatoio.

Essendo la densità del gasolio inferiore a quella dell'acqua, il sistema in condizione di fasi completamente separate si presenta con la fase acquosa più pesante, in basso ed uno strato di gasolio in alto a formare un'interfaccia di separazione ben definita.

Con l'obiettivo di valutare la relazione che c'è tra velocità di agitazione e frazione volumetrica della fase dispersa, nell'intero volume indagato, sono state condotte prove sperimentali al variare della velocità di agitazione per tre hold-up di gasolio.

Per i tre quantitativi utilizzati si sono effettuate misure a diversi gradi di miscelazione, per poter ricoprire tutto il range della mappa di flusso che va dalla situazione in cui le fasi sono completamente separate alla situazione in cui potrebbe essere inglobata aria atmosferica nel sistema.

Per ogni set-up sperimentale si ottiene quindi un set di dati di conducibilità locale ed istantanea, scegliendo il numero di acquisizioni da registrare si ottengono poi per ogni pixel i valori istantanei, di cui si calcola il valore medio. Conoscendo le coordinate che ogni pixel occupa nel piano cartesiano di discretizzazione, se ne valutano le distanze radiali all'interno della sezione trasversale del serbatoio; per ogni corona di pixel a distanza r_k si calcolano le conducibilità medie delle misurazioni istantanee, delle quali per ogni distanza radiale se ne considera la mediana $\sigma_{MED,k}$, ottenendo la distribuzione di conducibilità adimensionale in funzione del raggio.

A causa del fringe effect, l'interfaccia tra le fasi influenza il dato sperimentale anche se questa non è fisicamente compresa nella zona cilindrica data dall'altezza degli elettrodi, questo fenomeno è da considerarsi sia per la scelta del sistema di riferimento, sia per la valutazione del grado di miscelazione durante le prove sperimentali (Jiangtao Sun, 2014).

In generale quindi è possibile studiare tramite le tecniche di tomografia a resistenza elettrica qualsiasi aspetto che sia correlabile, in maniera più o meno diretta, alla distribuzione di conducibilità del sistema; tuttavia vi sono determinate regioni della mappa di flusso in cui il dato misurato appare diverso da quello osservabile nella zona compresa fra gli elettrodi, ciò avviene a causa del fringe effect e della distribuzione non uniforme delle linee di campo nelle zone in cui il sistema presenta una forte disomogeneità delle caratteristiche elettriche.

Per tale scopo prima di procedere con lo studio dei profili di concentrazione nel volume del reattore si va ad indagare in quali condizioni il campo viene distorto, proponendo una procedura di acquisizione dati pensata in modo da ridurre i fattori di incertezza sui dati.

Successivamente, con l'obiettivo di determinare l'estensione e la forma del campo elettrico si è valutato un modello matematico descrittivo per la valutazione del fringe effect, validato con misure sperimentali di conducibilità, tramite cui è possibile effettuare considerazioni qualitative sulla distribuzione spaziale del gasolio nel mezzo conduttivo.

3.2 Set-up sperimentale

Le prove di dispersione sono state condotte utilizzando l'apparecchiatura sperimentale descritta nel paragrafo 2.1, coinvolgendo due fasi liquide immiscibili; di cui una fase conduttiva continua, preparata aggiungendo 0.5g/L di sale da cucina ad acqua demineralizzata, per aumentarne la conducibilità, ed una seconda fase dispersa non conduttiva, costituita da gasolio commerciale.

Le misurazioni sono state acquisite a diverse velocità di rotazione della girante, variabile all'interno di un intervallo che va dalla condizione in cui il gasolio non riesce ad essere disperso nella fase acquosa, fino a velocità alle quali il gasolio sembra essere uniformemente distribuito nel volume di liquido e la girante tende a far inglobare aria nel reattore.

Per la definizione della mappa di flusso sono state identificate tre condizioni operative in cui la frazione volumetrica media di gasolio è stata scelta pari a $\phi=0.047$, $\phi=0.09$ e $\phi=0.14$.

In queste tre condizioni, il volume di gasolio rispettivamente risulta pari a 500ml, 1000ml e 1500ml, facendo sì che l'interfaccia tra le fasi si disponga in prossimità del piano di misura P4 allagandolo completamente per volumi maggiori; l'altezza $h_{g,eff}$ della zona occupata dal gasolio prima che la girante sia posta in rotazione, nei tre casi è calcolata escludendo lo spazio occupato dai frangiflutti per il calcolo della sezione effettivamente a disposizione:

$$A = \frac{\pi * T^2}{4} = 0.0423 \text{ m}^2.$$

$$A_b = 4 * l * s = 0.000368 \text{ m}^2.$$

Dove l ed s sono la lunghezza e lo spessore del frangi vortice.

$$A_{eff} = A - A_b = 0.041905 \text{ m}^2.$$

È allora possibile calcolare l'altezza della zona occupata dal gasolio in condizioni statiche

$$h_{g,eff} = \frac{V_g}{A_{eff}}$$

Tabella 3-1 Set-up sperimentale.

VOLUME GASOLIO	$h_{g,eff}$
0.5 L	0.012 m
1 L	0.024 m
1.5 L	0.036 m

In fase preliminare, non vengono analizzate le misure ottenute con il piano P4 in quanto risultano fortemente influenzate dalla distorsione che il campo elettrico subisce trovandosi in prossimità di uno strato di gasolio troppo vicino, il che comporta un errore relativo ε elevato (W Q Yang and Lihui Peng, 2003).

$$\varepsilon = \left\| \frac{\hat{g}-g}{g} \right\| \quad (3-1)$$

Difatti, quando la distribuzione del campo elettrostatico è fortemente disomogenea, utilizzando un algoritmo lineare come in questo caso di studio, la stima della matrice di sensibilità inversa con la sua trasposta S^T non è una buona approssimazione, quindi l'errore che si commette durante la ricostruzione bidimensionale si può esprimere come sopra, in cui con \hat{g} si è indicata la distribuzione di conduttanza adimensionale ottenuta utilizzando la matrice di sensibilità S^T come approssimazione della matrice inversa, mentre con g la distribuzione che effettivamente si avrebbe se si usasse per la ricostruzione dei dati la matrice inversa S^{-1} ;

$$\hat{g} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{rif}} = \frac{S_{j,k}^T * \varphi_j}{S_{j,k}^T * \varphi'_j} \quad g = \frac{\sigma_k}{\sigma_{rif}} = \frac{S_{j,k}^{-1} * \varphi_j}{S_{j,k}^{-1} * \varphi'_j}$$

Avendo imposto un'altezza totale di riempimento pari 0.25 m si valuta la distanza tra l'interfaccia e i piani di misura, come riassunto in tabella, in cui si è indicato con $h_{0,i}$ la distanza tra interfaccia e piano i-esimo;

$$h_{0,i} = (H_L - h_{g,eff}) - z_i$$

Essendo z_i l'altezza del piano i-esimo, per $i=1, 2, 3, 4$, misurata dal fondo del serbatoio fino al centro dei sensori che lo costituiscono.

Tabella 3-2 Distanza tra i piani di elettrodi Pn e l'interfaccia di separazione gasolio/acqua, per i tre set-up sperimentali.

	$z_1 = 0.06$ m	$z_2 = 0.11$ m	$z_3 = 0.16$ m	$z_4 = 0.21$ m
Volume di gasolio	$h_{o,1}$	$h_{o,2}$	$h_{o,3}$	$h_{o,4}$
500ml	0.178 m	0.128 m	0.078 m	0.028 m
1000ml	0.166 m	0.116 m	0.066 m	0.016 m
1500ml	0.154 m	0.104 m	0.054 m	0.004 m

All'inizio e alla fine di ogni acquisizione si è misurata la temperatura del sistema, così da utilizzare per ogni prova sperimentale il riferimento opportuno, e per considerare eventuali variazioni influenti sui dati di conducibilità; si sono assunte accettabili differenze di temperatura fino a 0,2 °C.

Ogni set di dati acquisiti riporta la conducibilità adimensionale pixel per pixel dei quattro piani di misura, per ogni misurazione vengono acquisiti 1000 frame, come riportato in figura 3.1, in cui si riportano i parametri sperimentali impostati nel DAS.

Oltre al numero di frame per acquisizione, è necessario impostare altri parametri, alcuni dei quali sono stati scelti volendo effettuare delle acquisizioni in tempi brevi senza perdere in qualità dei dati, e poiché all'aumentare della velocità di acquisizione, in genere si ha una riduzione del rapporto segnale/rumore (SNR), i parametri del sistema di acquisizione sono settati per equilibrare questi due fattori.

Per un'acquisizione rapida dei dati, i parametri *sampling time interval* e *delay cycles* possono essere impostati al minimo consigliato di 55 ms e 20 rispettivamente; essi si riferiscono al tempo necessario per inviare il segnale di inizio acquisizione al *data acquisition system*, in molte situazioni questi due parametri possono essere ridotti al di sotto di questi minimi raccomandati per velocizzare le acquisizioni, ma così facendo si potrebbe peggiorare il rapporto SNR. [riferimento manuale ITS]

Per aumentare allora la velocità di acquisizione si potrebbe agire sulla frequenza di iniezione della corrente e decidere di scaricare i tomogrammi tutti insieme soltanto quando tutti i frame sono stati acquisiti, in modo che il trasferimento dal DAS al computer ospite sia effettuato al termine dell'acquisizione, come difatti si è deciso di fare per i casi analizzati.

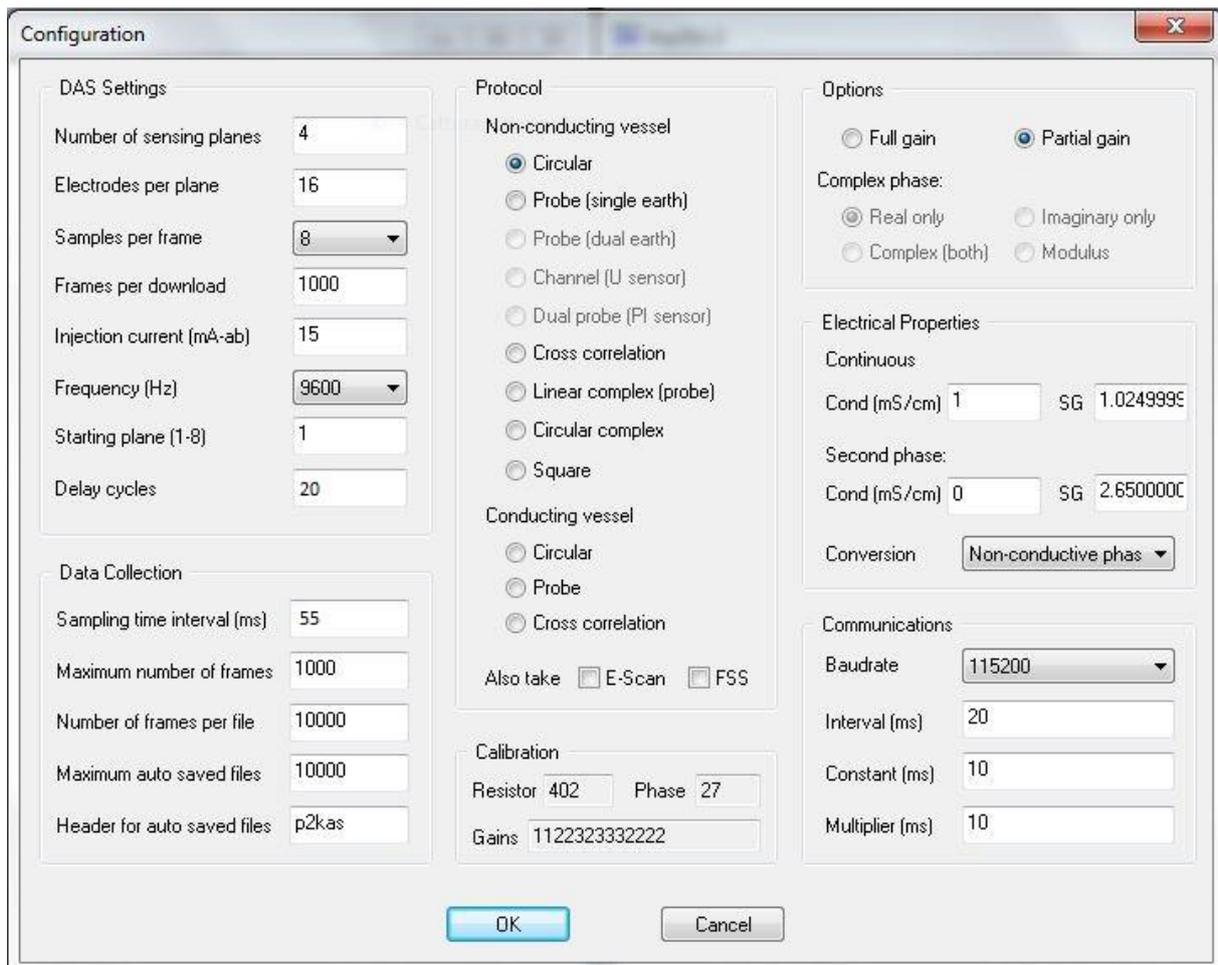


Figura 3.1 Finestra di cofigurazione DAS.

3.3 Scelta del riferimento

Dopo la fase preliminare di preparazione dell'apparecchiatura sperimentale, calibrazione dello strumento di misura e settaggio dei parametri del DAS, prima di procedere con le prove di dispersione è necessario acquisire le misure di riferimento del sistema.

Come già anticipato, utilizzando un algoritmo di misura qualitativo quale LBP modificato, la conducibilità ottenuta dalle acquisizioni sarà un valore adimensionalizzato rispetto alla conducibilità di una sistema di riferimento, a cui si associa alla differenza di potenziale misurata una conducibilità corrispondente pari a 1mS/m, facendo variare la variabile di output nell'intervallo [0-1].

In questa fase il sistema è tenuto in leggera agitazione, la misura è presa acquisendo 100 frame e associando al valore di conducibilità, ricostruito dalla distribuzione di potenziale misurato, il valore prefissato e settato tra i parametri del DAS.

In base al principio di funzionamento del tomografo è facile accettare la possibilità di valutare la variazione della conducibilità sia rispetto ad un riferimento che contenga solo acqua, sia in presenza di gasolio. In entrambi i casi, seppur in condizioni di miscelazione diverse, il fatto che il campo elettrico

non sia limitato entro le dimensioni degli elettrodi può indurre criticità nell'analisi dei risultati; inoltre, si dovrà considerare la presenza dello strato di gasolio non disperso, intercettato o meno rispetto alla condizione di riferimento.

Sono state condotte alcune misurazioni utilizzando entrambi i riferimenti per valutare quale delle due situazioni risulti più vantaggiosa. A partire dai dati di conducibilità adimensionale ottenuti dall'acquisizione di 1000 frame si è valutato il valore medio temporale per ogni pixel dei piani di misura, a cui si associa la distanza radiale corrispondente considerando la posizione che ogni pixel della maglia di discretizzazione occupa nel piano cartesiano trasversale all'apparecchiatura utilizzato per il metodo degli elementi finiti, centrato con l'asse del reattore alle coordinate $X, Y = (116, 116)$.

Durante la fase di analisi, bisogna dunque porre attenzione alla presenza di una zona totalmente non conduttiva, costituita dalla fase oleosa e stratificata sulla fase acquosa; il gasolio tuttavia, si trova stratificato in alto a formare un'interfaccia di separazione con la seconda fase liquida solo per velocità inferiori a quella di *complete dispersion*, che sarà di altezza variabile superato il punto di *just draw-down*; per cui, si valutano i vantaggi che comporta la scelta di uno dei due riferimenti anche in funzione della sensibilità dei dati nelle varie zone della mappa di flusso.

3.3.1 Evidenza sperimentale

Se si scegliesse di usare durante la misura di riferimento un sistema costituito dalla sola fase acquosa, non vi sarebbe gasolio stratificato in alto, l'immagine ricostruita dalle misure di riferimento si può ritenere affidabile essendo la conducibilità della fase acquosa uniforme nel volume.

Durante le misure di hold-up, in cui sarà presente anche il gasolio, i piani in condizioni statiche si troveranno ad una distanza dall'interfaccia pari a $h_{o,i}$, come riportato in tabella 3-2 per ogni hold-up di gasolio analizzato.

Se l'interfaccia è nella zona di lettura del tomografo, allora le linee di flusso vengono deviate dalla resistenza incontrata, disponendosi con un assetto diverso rispetto a quello del riferimento.

In queste condizioni la matrice di sensibilità utilizzata per la risoluzione del problema inverso è ricavata rispetto all'assetto che il campo elettrico aveva nelle condizioni di riferimento, diverso da quello assunto durante le prove di dispersione; inoltre, per le misurazioni in cui la distanza $h_{o,i}$ è minore dell'altezza massima raggiunta dalle linee di flusso $h_{max,k}$, lo strumento registra la presenza dell'interfaccia e i dati indicano di gasolio sul piano i-esimo che si sta considerando.

I risultati ottenuti utilizzando i due riferimenti sono diagrammati in figura 3.2, per il sistema contenente 0.5L di gasolio, che occupano nel reattore un'altezza pari a $h_{g,eff} = 12\text{mm}$, distante dal piano di misura P3 $h_{o,3} = 78\text{mm}$.

Si riporta l'andamento radiale di conducibilità del sistema nella condizione in cui il gasolio non era disperso in acqua, $N=120\text{rpm}$. La curva in verde è relativa ad un'acquisizione presa con un riferimento in cui il sistema conteneva solo acqua, ed in viola la curva nel caso in cui il riferimento lo si prenda in presenza del gasolio.

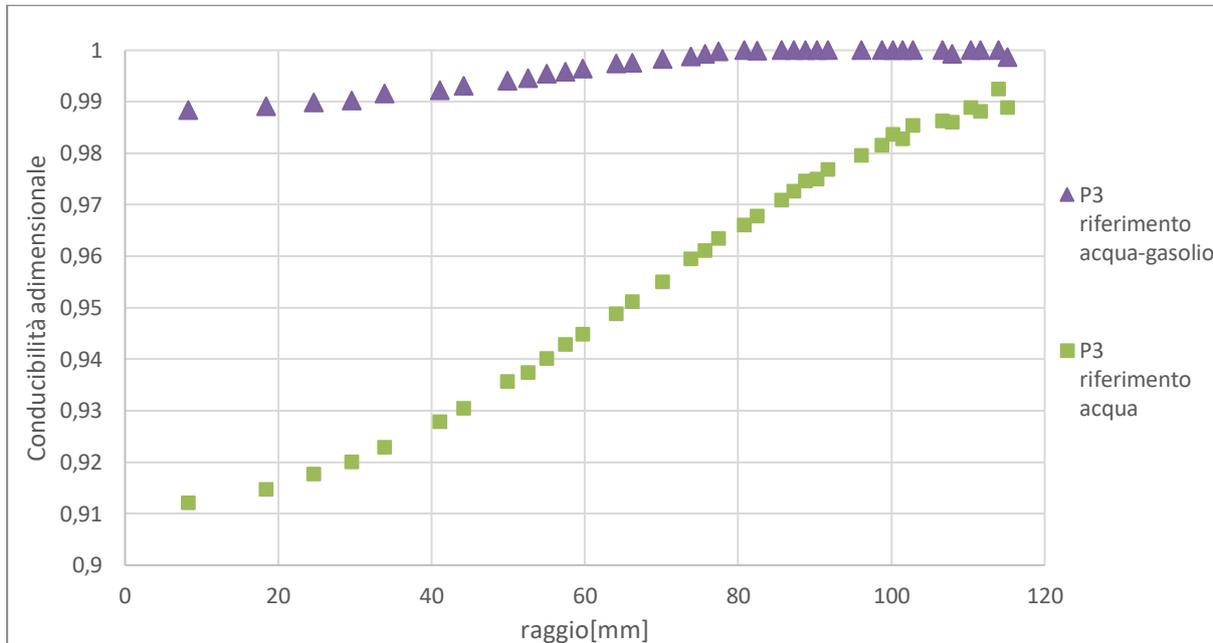


Figura 3.2 Andamento della conducibilità adimensionale valutata su P3, in condizioni di no draw-down e $\varphi_{\text{gasolio}} = 0.047$, $N=120\text{rpm}$.

Ci si può rendere conto che nel caso in cui si riferiscano le misure di conducibilità ad un sistema senza la presenza del gasolio, valutando il sistema a basse velocità di rotazione, sembra che lo strumento percepisca l'interfaccia acqua-gasolio, soprattutto per bassi valori del raggio, dove probabilmente si ha maggior estensione assiale del campo elettrico.

Questo effetto tende a pesare sempre meno se il piano di analisi si allontana dall'interfaccia; tuttavia, guardando al profilo ottenuto con riferimento acqua-gasolio, si ha anche un leggero abbassamento di conducibilità per piccoli raggi, attribuibile all'effetto che la rotazione dell'albero della girante provoca sui due fluidi, facendo abbassare nel centro del reattore l'interfaccia, rispetto alla posizione occupata durante la misura di riferimento.

Si riportano di seguito i piani inferiori, per il piano P2 la distanza dall'interfaccia è $h_{o,2} = 128\text{ mm}$, nelle condizioni di cui sopra; per basse distanze dal centro del reattore si percepisce ancora l'interfaccia se il riferimento che si usa contiene solo acqua, mentre per il piano P1 distante $h_{o,1} = 178\text{ mm}$ i due andamenti di conducibilità risultano svilupparli a meno di qualche errore casuale.

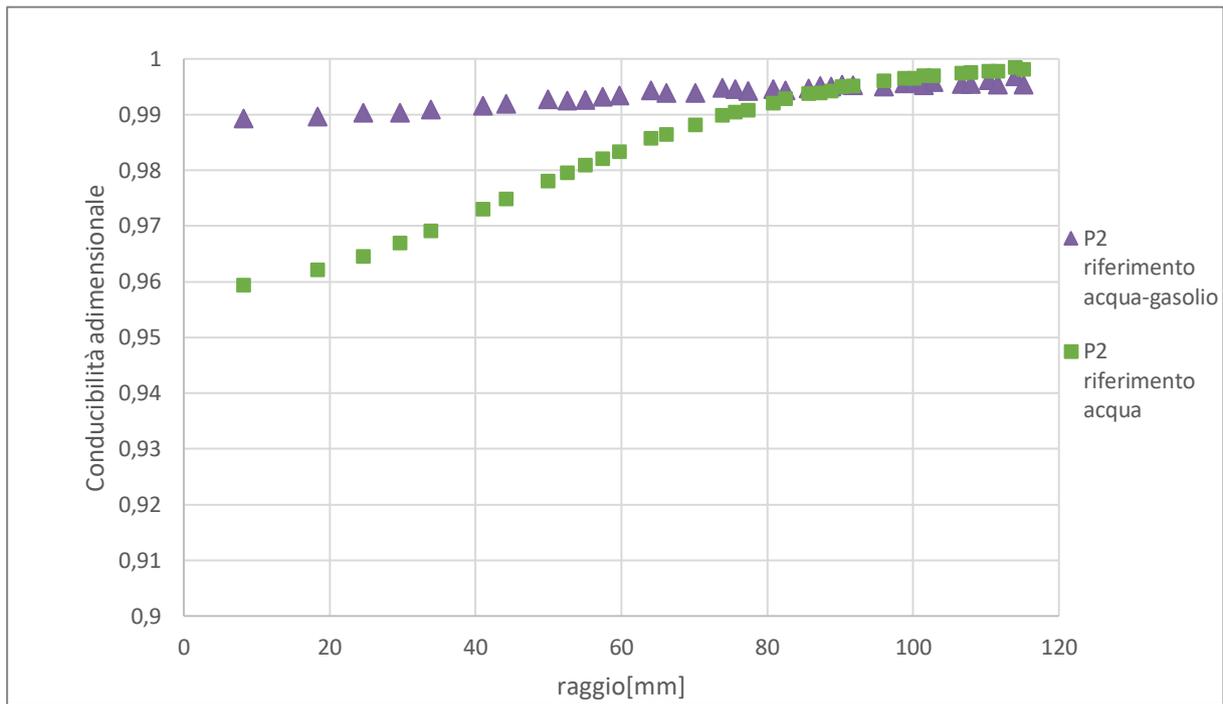


Figura 3.3 Andamento della conducibilità adimensionale valutata su P2, in condizioni di no draw-down e $\phi_{\text{gasolio}} = 0.047$, $N=120\text{rpm}$.

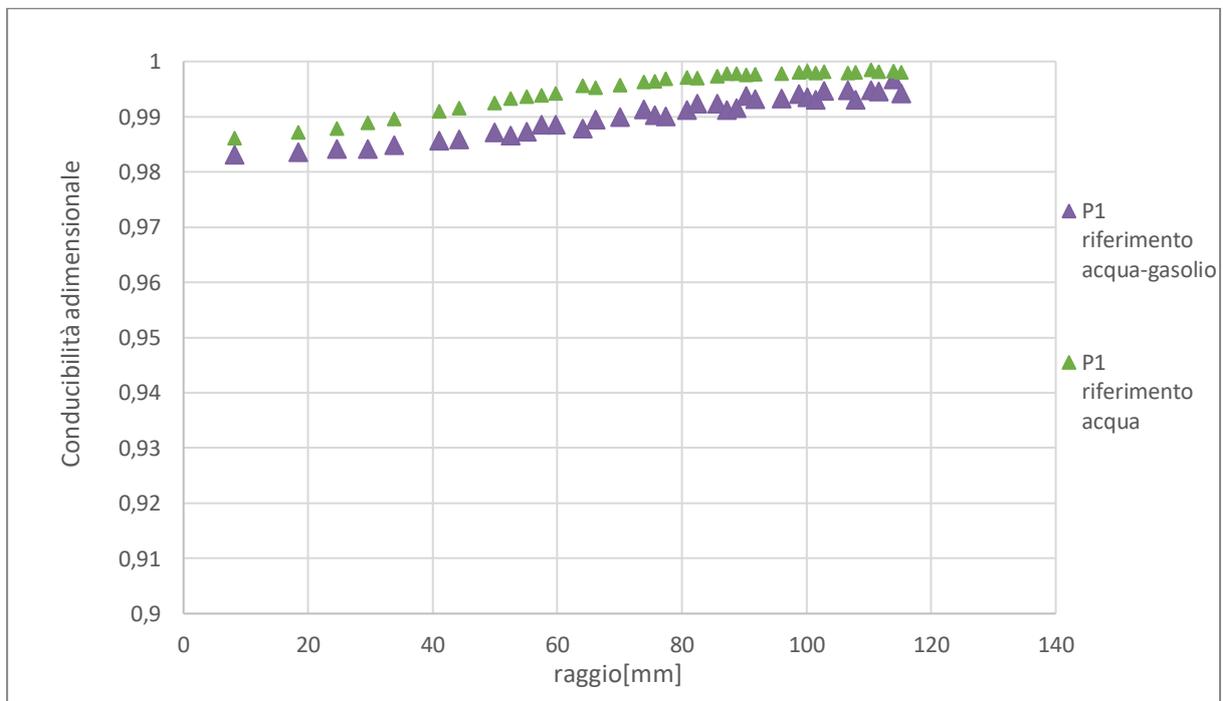


Figura 3.4 Per il piano uno e per questa frazione di gasolio introdotto si può concludere che la distanza dall'interfaccia è sufficiente per evitare che il campo elettrico intercetti il gasolio, $N=120\text{rpm}$.

Se si prende in considerazione il campo elettrico relativo al piano di elettrodi P3, per ogni set-up sperimentale a basse velocità di agitazione, le linee di flusso intercettano lo strato non conduttivo; i dati ottenuti seguendo questa procedura saranno influenzati dalla variazione di altezza dell'interfaccia, che si muove tra due condizioni limite.

In questa fase di *just draw-down*, sembrerebbe che la scelta del riferimento in presenza di gasolio sia adeguata; in realtà tale riferimento va in crisi qualora si voglia studiare la distribuzione della fase dispersa all'interno della *dispersed zone*.

Al variare della velocità di agitazione e per velocità superiori alla velocità di draw down, il gasolio tende a disperdersi nella fase acquosa e l'interfaccia si sposta verso l'alto allontanandosi dal piano considerato poiché il gasolio stratificato in alto diminuisce. Questa condizione operativa, delimitata superiormente dalla velocità alla quale il gasolio è presente nel sistema tutto in forma dispersa, se si valutano gli andamenti radiali di conducibilità adimensionale, si nota che per velocità crescenti la conducibilità sul piano P3 aumenta, contrariamente a quanto ci si aspetta dal momento che il gasolio sta disperdendo verso il basso.

Una tale risposta potrebbe essere dovuta al fatto che aumentando l'intensità di agitazione lo strato di gasolio presente come fase continua diminuisce e un quantitativo crescente disperde verso i piani più bassi, uscendo via via dal volume di misura del piano considerato.

Nelle figure 3.5 e 3.6 sono rappresentate le condizioni limite della posizione dell'interfaccia prima che inizi il draw-down e poco prima che il gasolio sia tutto disperso nella fase acquosa, nelle figure è riportato anche la posizione del piano P3.

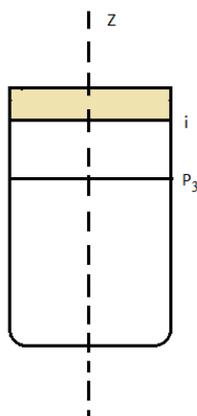


Figura 3.5 Disposizione dell'interfaccia per basse velocità di agitazione.

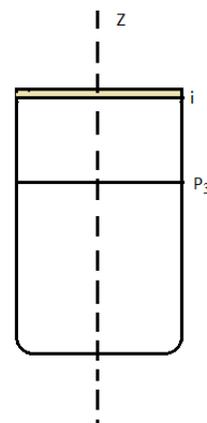


Figura 3.6 Disposizione dell'interfaccia per alte velocità di agitazione.

Per velocità di rotazione elevate si può notare che nel caso in cui il riferimento è preso con la presenza di gasolio, la conducibilità adimensionale raggiunge valori superiori all'unità. Si riporta in figura 3.7 un caso sperimentale per entrambi i riferimenti e relativi al piano P3, limitando la conducibilità adimensionale al valore massimo 1, a velocità di agitazione alla quale il gasolio non è ancora tutto disperso all'interno della fase conduttiva, il set-up sperimentale è sempre lo stesso.

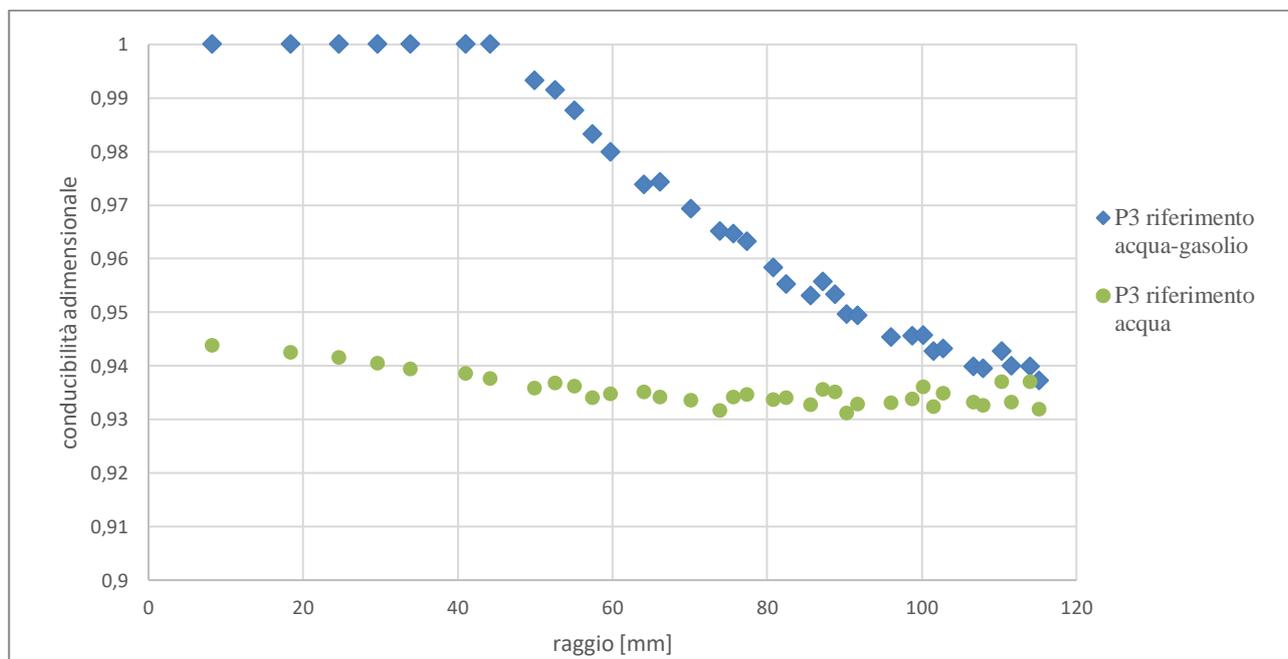


Figura 3.7 Nel grafico in figura si è limitato l'andamento della conducibilità adimensionale ad uno, poiché il valore massimo di conducibilità che si può misurare lo si ha qualora nel sistema non ci sia gasolio e quindi nelle condizioni del riferimento. $N=420\text{rpm}$

Un tale risultato è dovuto al fatto che il gasolio presente in alto durante la misurazione del riferimento, restituisce una differenza di potenziale la cui conducibilità corrispondente è settata ad 1mS/m , diversamente durante le misure di dispersione la resistenza incontrata nella zona in cui prima era presente l'interfaccia di gasolio sarà minore, in quanto il gasolio viene sostituito dalla fase acquosa più conduttiva, di conseguenza la conducibilità adimensionale risulta maggiore di uno.

Inoltre, se si valutano gli andamenti radiali di conducibilità alla stessa velocità di agitazione per i piani P1, P2, P3, sia con riferimento contenente la sola fase acquosa e con il riferimento in presenza della due fasi, si nota come nel primo caso in figura 3.8 i risultati risultano essere fisicamente accettabili, nel secondo caso riportato in figura 3.9 la conducibilità aumenta lungo l'altezza del serbatoio, contrariamente a quanto suggerisce l'osservazione del fenomeno.

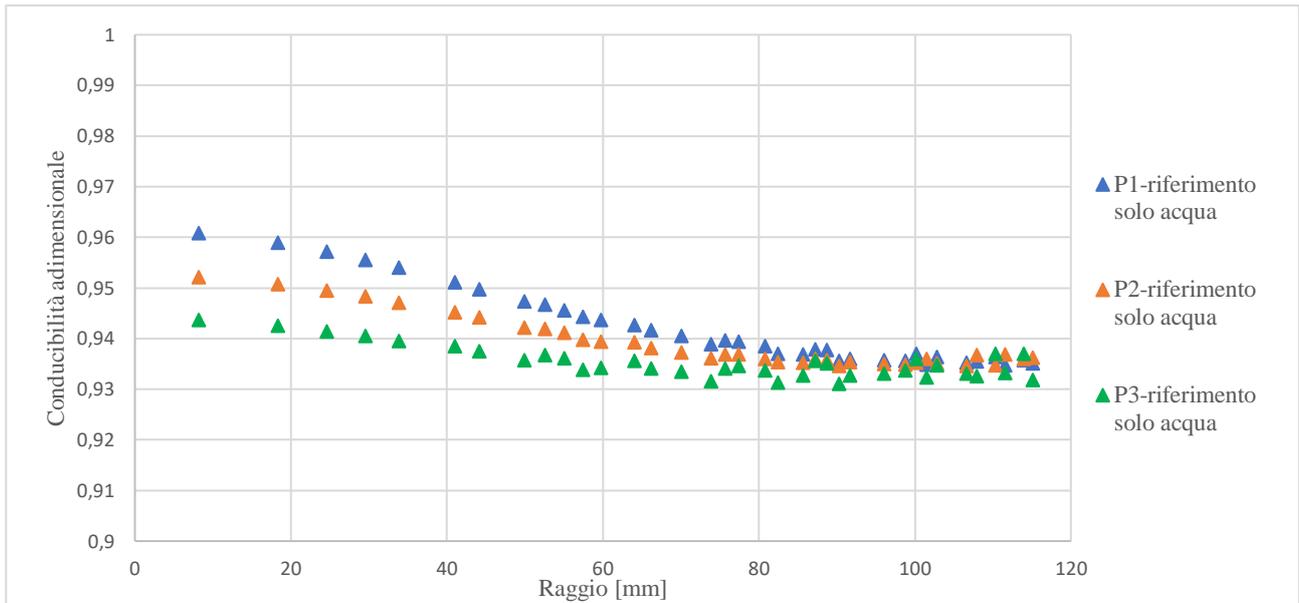


Figura 3.8 Andamento radiale della conducibilità adimensionale rispetto al sistema conduttivo, $N = 420$ rpm, $\phi_g = 0.047$.

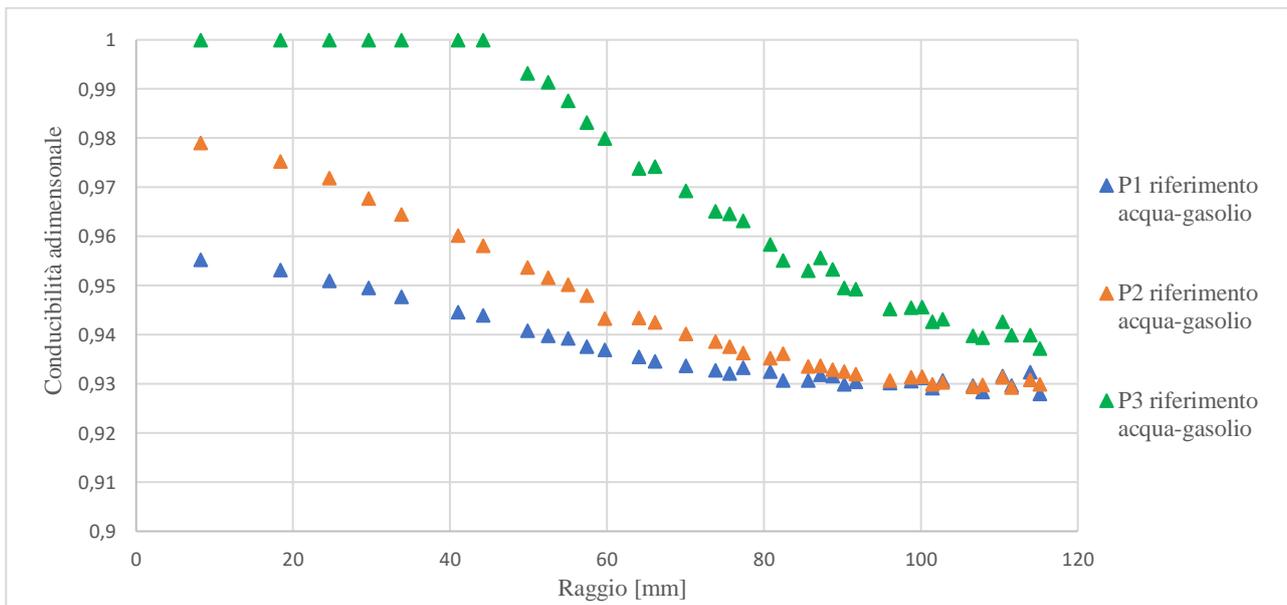


Figura 3.9 Andamento radiale della conducibilità adimensionale rispetto al sistema acqua/gasolio, $\phi_g = 0.047$, $N = 420$ rpm, a questa velocità il gasolio non era tutto disperso, rimanendo accumulato nelle zone alte del serbatoio, per cui i dati non sono affidabili.

Si evince dai dati analizzati che se il riferimento è preso in presenza della fase non conduttiva, i risultati ottenuti non sono validi al fine di valutare, seppur qualitativamente, la distribuzione di gasolio disperso.

Di seguito si riportano in figura 3.10 gli andamenti radiali di conducibilità utilizzando un riferimento contenente solo la fase conduttiva, relativi al piano P3 per un hold-up di gasolio pari a 0.047, per velocità crescenti a partire dalla velocità alla quale visivamente si osservava draw down, $N=285$ rpm, fino alla velocità di 395 rpm alla quale probabilmente il campo non intercetta più l'interfaccia, ovvero $h_{o,3} > h_{max,k}$.

Si riportano anche le immagini rappresentanti il sistema agitato durante le prove sperimentali, in cui si percepisce visivamente che l'interfaccia si sta allontanando dal piano P3.

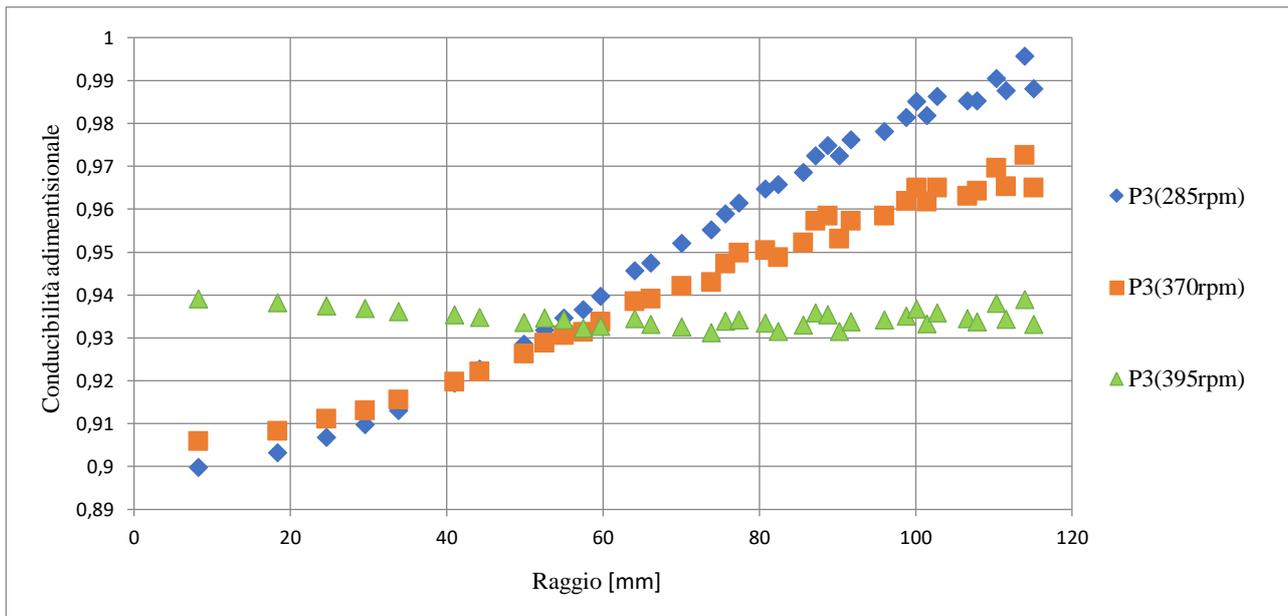


Figura 3.10 Andamento radiale della conducibilità adimensionale rispetto al sistema conduttivo acquoso misurato da P3, $\phi_g = 0.047$, $N = 285$ rpm, $N = 370$ rpm, $N = 395$ rpm.



Figura 3.11 Immagini scattate durante le prove di dispersione a velocità di agitazione a) $N=285$ rpm, b) $N=370$ rpm, c) $N=395$ rpm.

Finito il draw down il gasolio presente si trova tutto disperso nell'intero volume, in maniera più o meno omogenea a seconda delle condizioni di mixing.

Nel primo caso con il riferimento preso con acqua, i valori ottenuti sono affidabili ma sono relativi ad un volume di misura e non al piano identificato dagli elettrodi, per cui si commettono degli errori durante la ricostruzione dell'immagine.

Utilizzando il riferimento con acqua e gasolio, i valori non sono precisi a causa dell'estensione del campo, ma neppure affidabili in quanto riportano una conducibilità crescente lungo l'altezza del reattore e superiore alla conducibilità della sola fase conduttiva, come se il gasolio si disponesse nei piani più bassi al posto della fase pesante.

Si riportano di seguito gli andamenti per i piani P1, P2, P3 e P4, in figura 3.12 con riferimento acqua ed in 3.13 con riferimento acqua gasolio, a velocità di rotazione rispettivamente di $N=510$ rpm e $N=563$ rpm, in cui il gasolio risultava tutto disperso.

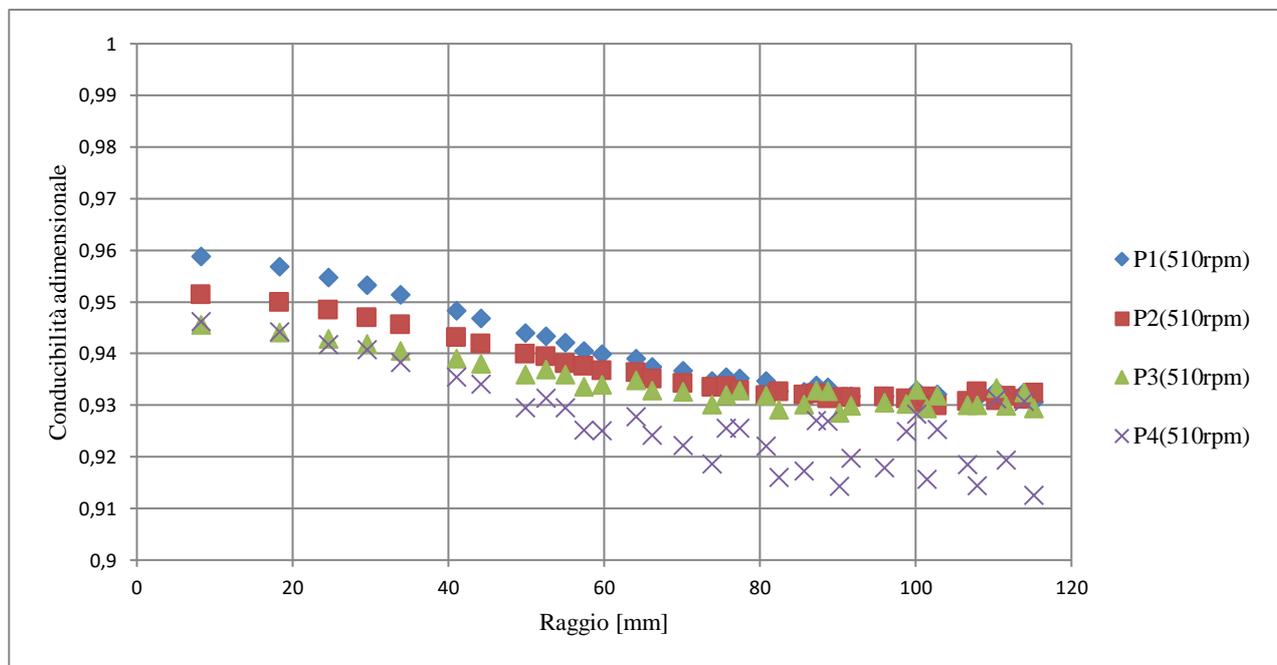


Figura 3.12 Andamento radiale della conducibilità adimensionale rispetto al sistema conduttivo acquoso, $N=510$ rpm.

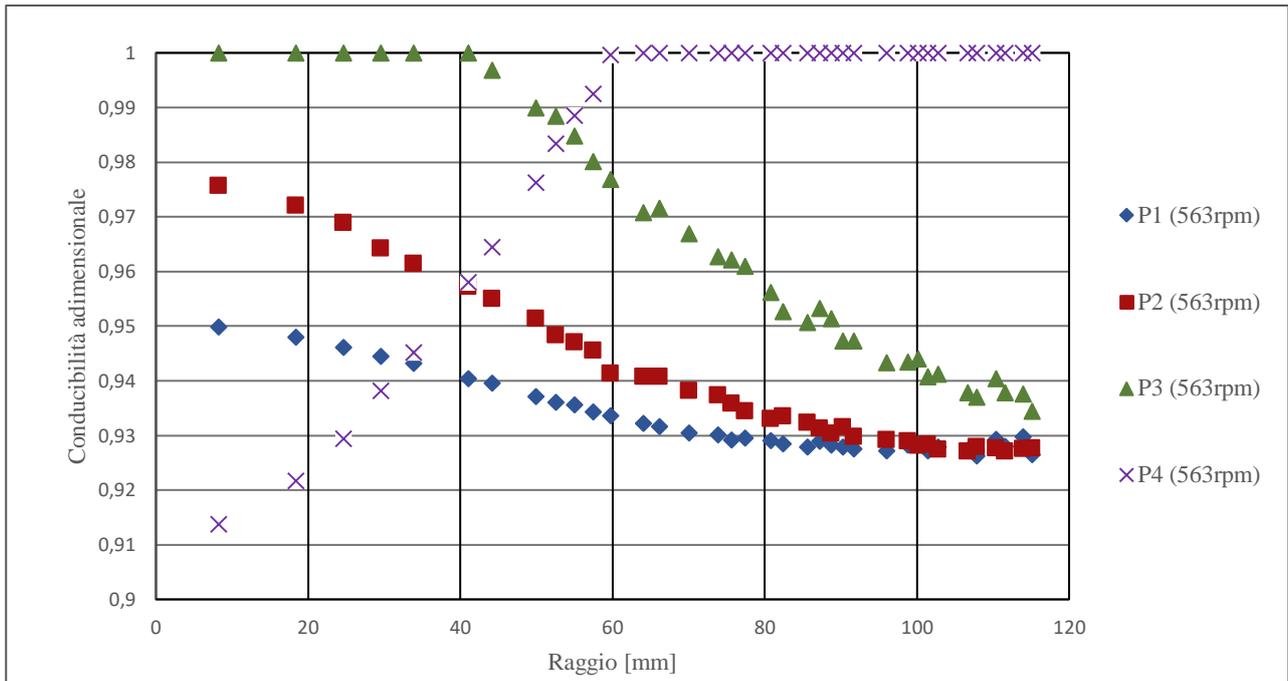


Figura 3.13 Andamento radiale della conducibilità adimensionale rispetto al sistema acqua/gasolio, N=563 rpm.

Per queste ragioni si è deciso di utilizzare come riferimento la sola fase acquosa; d'altro canto, per poter annullare l'effetto dovuto all'estensione delle linee di corrente al di fuori del piano di misura, sono state effettuate delle prove sperimentali volte all'identificazione dell'effettivo volume di misura corrispondente ad un piano di elettrodi.

Un altro fattore da tenere in considerazione usando il tomografo a resistenza elettrica per risalire alla concentrazione delle due fasi in miscela, è la variazione della conducibilità, al variare della temperatura del sistema. Infatti, la temperatura potrebbe aumentare durante le prove a causa dell'energia termica generata dall'agitatore per attrito col il fluido; poiché la misura ricostruita è la variazione rispetto al riferimento, una variazione di temperatura comporta un risultato affetto da errore.

Si è deciso quindi di prendere più riferimenti all'interno di un range di temperatura così da poter utilizzare per una determinata prova il riferimento relativo alla stessa temperatura del sistema, misurata con un termometro da laboratorio.

#RIF	TEMPERATURA	#RIF	TEMPERATURA	#RIF	TEMPERATURA	#RIF	TEMPERATURA
1	27.2 °C	4	28.1 °C	7	28.5 °C	10	29.1 °C
2	27.9 °C	5	28.2 °C	8	28.7 °C	11	29.2 °C
3	28 °C	6	28.3 °C	9	29 °C	12	29.3 °C

3.4 Misure di conducibilità

Per il sistema sottoposto ad analisi sperimentale, si cerca quindi di dare una misura qualitativa della frazione di gasolio disperso nella fase acquosa, provando a descrivere in funzione della conducibilità della soluzione i regimi di flusso delle due fasi liquide, contenute in un recipiente agitato meccanicamente.

Dopo aver individuato una metodologia di acquisizione dei dati, definendo il sistema di riferimento ed individuando le possibili fonti di errori per l'analisi dei risultati, si è andati ad analizzare le prestazioni del tomografo nel monitoraggio del sistema bifase gasolio/acqua.

Le prove sono state eseguite utilizzando il settaggio dei parametri del data acquisition system, discusso precedentemente e sintetizzati in figura 3-1, e i riferimenti come da procedura, sono stati presi a diverse temperature, così che un'eventuale variazione durante le misure, causata da condizioni ambientali diverse tra una prova e l'altra, oppure dovuta alla dissipazione di potenza meccanica sottoforma di energia termica da parte dell'agitatore, possa essere tenuta in considerazione.

Difatti, prima di ogni acquisizione si è misurata la temperatura del sistema scegliendo successivamente il riferimento opportuno *off-line*, in modo da escludere possibili variazioni di conducibilità associabili a variazioni di temperatura.

Si procede con le misure di conducibilità, effettuando le prove con velocità di agitazione crescente, per i tre hold-up di gasolio, come riportato in tabella 3-3.

Tabella 3-3 Set di acquisizioni sperimentali.

<i>Frazione volumetrica di gasolio</i>	<i>Velocità di rotazione (rpm)</i>
<i>0.047</i>	130, 210, 256, 285, 318, 370, 395, 420, 510, 610, 840
<i>0.09</i>	180, 230, 280, 325, 380, 420, 465, 520, 595, 700, 870
<i>0.14</i>	115, 188, 220, 278, 340, 395, 420, 466, 500, 588, 650, 815

Per ogni velocità di agitazione scelta, le misurazioni sono state prese in condizioni stazionarie, nel senso che si sono effettuate le acquisizioni quando la frazione di fase dispersa corrispondente ad un certo grado di miscelazione si manteneva costante nel tempo; si è osservato che un tempo di agitazione di due minuti prima di effettuare l'acquisizione è sufficiente per considerare il sistema agitato in condizioni stazionarie.

Attraverso il software P2000+ le misure effettuate vengono elaborate e applicando l' algoritmo bidimensionale di ricostruzione dell'immagine MSBL, che è essenzialmente una modifica dell'algoritmo LBP , si ricostruiscono 316 dati di conducibilità per ogni piano di misura.

I tomogrammi ottenuti, secondo quanto detto in precedenza, mostrano le variazioni di conducibilità adimensionale, in quanto alla fase acquosa è stato dato il valore di conducibilità pari a 1 mS/cm e alla fase non conduttiva monitorata si è associato il valore di 0 mS/cm.

Così facendo, si ottiene una scala di valori che varia da 0% in presenza di solo gasolio al 100 % in presenza della sola fase acquosa.

Volendo sarebbe possibile esportare i dati di conducibilità anche sottoforma di tomogrammi, che rappresentano già i valori di conducibilità mediati sui frame acquisiti; oppure si potrebbero esportare direttamente i dati di concentrazione, rielaborati dal software applicando l'equazione di Maxwell.

Tuttavia, si è preferito esportare i dati di conducibilità, per non perdere informazioni utili alla comprensione di eventuali fenomeni che potessero deviarne la misura.

3.5 Analisi dei tomogrammi

Il tomografo a resistenza elettrica consente quindi di estrapolare, dalla distribuzione di conducibilità, informazioni circa il grado di miscelazione del sistema, calcolando la frazione volumetrica di gasolio su ogni piano di misura e per ogni pixel della griglia di discretizzazione.

Per il sistema studiato, la frazione volumetrica φ_g di gasolio disperso dall'agitazione è calcolata tramite l'equazione di Maxwell applicata ad ogni pixel per il piano di misura sotto analisi:

$$\varphi_g = \frac{2\sigma_l + \sigma_g - 2\sigma_m - \left(\frac{2\sigma_m^2\sigma_g}{2\sigma_l}\right)}{\sigma_m - \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_l}\right)\sigma_m + 2(\sigma_l - \sigma_g)} \quad (3-2)$$

dove con σ_l si è indicata la conducibilità della fase liquida conduttiva, con σ_g la conducibilità della fase liquida non conduttiva e con σ_m la conducibilità misurata dal tomografo e ricostruita per il pixel considerato.

Poiché si è assunta la conducibilità del gasolio pari a zero, $\sigma_g = 0$, l'equazione precedente si semplifica come:

$$\varphi_g = \frac{\sigma_l - \sigma_m}{\sigma_l + \frac{\sigma_m}{2}} \quad (3-3)$$

È in questo modo possibile ottenere delle mappe di concentrazione di gasolio sui tre piani di misura considerati, oppure, a partire dai valori di concentrazione radiali, si può calcolare la frazione media volumetrica su ogni piano di misura, indicata con $\overline{X_g}$ e calcolata come segue:

$$\overline{\varphi_g} = \frac{\sum_{k=1}^K r_k * \varphi_{g_{MED,k}}}{\sum_{k=1}^K r_k} \quad (3-4)$$

In cui con $\varphi_{g_{MED,k}}$ si è indicato il valore mediano di concentrazione, dei dati associati ai pixel che si trovano sulla corona circolare al raggio k-esimo.

4 Studio qualitativo della distribuzione spaziale delle due fasi

Come verificato attraverso le prove sperimentali condotte in via preliminare per la scelta del sistema di riferimento, il volume intercettato dal campo elettrico durante la misura non si limita alla sola zona delimitata dalle dimensioni geometriche degli elettrodi e quindi il dato di conducibilità ricostruito è ricavato a partire da misure di voltaggio in uno spazio tridimensionale, prese al di fuori della zona interessata.

Inoltre, a causa della presenza di un'interfaccia di separazione tra le due fasi liquide, per velocità di agitazione inferiori alla velocità di *complete dispersion*, il dato di conducibilità ottenuto risulta essere molto inferiore di quanto ci si aspetta.

Questo discostamento è tanto più evidente se si considerano i piani di misura più vicini all'interfaccia, dove la distanza tra il piano di elettrodi e la fase non conduttiva $h_{o,i}$, è tale da rientrare nell'altezza di misura effettiva. Utilizzando un riferimento registrato in assenza della fase non conduttiva, le misure ottenute risentono dell'interfaccia tra le fasi. Inoltre, si ammette la possibilità di commettere degli errori di misura dovuti alla difformità delle caratteristiche elettriche nel volume sottoposto ad analisi; difatti, durante la fase di ricostruzione del dato, per la risoluzione del problema inverso si utilizza una matrice di sensibilità erronea, relativa ad una distribuzione del campo elettrico diversa.

Ricercando una metodologia di trattamento dei dati al fine di quantificare gli errori, che renda possibile una valutazione qualitativa del grado di miscelazione, sono state effettuate delle misure in condizioni statiche, ovvero senza agitare le due fasi, in cui si è valutata la conducibilità ottenuta al variare della distanza tra l'interfaccia e il piano di misura, considerando il piano P3.

Questo è stato fatto aggiungendo all'interno del sistema 25ml di gasolio alla volta, mantenendo il volume totale costante così da far variare l'altezza dell'interfaccia tra le fasi e senza agitare il sistema per non perturbarla. In totale sono state effettuate 150 misure sperimentali, a partire da un volume di gasolio di 50ml con una distanza $h_{o,3} = 88 \text{ mm}$, fino ad un volume di 3.775 L al quale $h_{o,3} = 0$, quindi allagando metà lunghezza degli elettrodi del piano P3.

In questo modo si è voluto discretizzare il volume di misura compreso tra il piano P3 ed il pelo libero, in modo da ricercare l'assetto del campo elettrico nello spazio considerato; con le misure di conducibilità ottenute dalle prove statiche, ci si rende conto che più l'interfaccia si trova vicina al piano di elettrodi, più la conducibilità misurata diminuisce, fino ad una distanza minima $h_{o,i} = 30 \text{ mm}$, oltre la quale la conducibilità aumenta raggiungendo valori prossimi a quelli del riferimento, questo effetto è risentito essenzialmente dai pixel centrali, come riportato nel paragrafo 4.2.

Un tale comportamento potrebbe essere spiegato dall'eccessiva distorsione del campo elettrico, che risulta limitato superiormente dalla presenza incombente dello strato di gasolio, perciò si espande in maggiore misura nel volume sottostante al piano, in cui è presente la sola fase acquosa, comunque si ritengono tali risultati poco attendibili per l'analisi di miscelazione.

Per descrivere l'andamento dei dati ottenuti dalle misure statiche, che in effetti ci restituiscono informazioni sulla probabile distribuzione del campo elettrico, si è ipotizzato di considerare delle resistenze poste in parallelo che contribuiscano alla determinazione del dato di output.

Dunque, è stato implementato un modello matematico ad un parametro, corrispondente al numero di resistenze che il flusso di corrente attraversa durante le misure, avvicinando l'interfaccia agli elettrodi del piano analizzato.

Attraverso il modello si calcola la conducibilità teorica locale al variare del numero di resistenze in parallelo. La ricerca del parametro che ottimizzi il modello viene fatta minimizzando l'errore relativo tra i valori teorici e i dati sperimentali ottenute effettuando 150 misure statiche e assumendo simmetria del campo generato dagli elettrodi.

Si ricorda che tutte queste ipotesi sarebbero valide nel caso di distribuzione spaziale uniforme delle caratteristiche elettriche del mezzo, il che non è sempre vero per le prove effettuate.

4.1 Formulazione di un modello matematico descrittivo per la valutazione del *fringe effect*

Per poter considerare l'estensione assiale del campo elettrico si è implementato un modello matematico che tenga conto dei punti spaziali lungo l'asse z che contribuiscono al dato di conducibilità restituito dallo strumento, valutando così la forma e il volume del campo.

Il sistema presenta un'interfaccia mobile che separa le due fasi immiscibili per velocità di agitazione $0 < N < N_{cd}$. Con l'obiettivo di voler individuare una mappa di flusso per il sistema in esame, il problema della presenza dell'interfaccia acqua-gasolio si ha fin da subito, dovendo per prima cosa definire una velocità di draw down. Infatti, l'estensione del campo elettrico sopra e sotto il piano identificato dai sensori di misura, fa sì che il valore di conducibilità ottenuto non possa essere attribuito al valore medio sul piano, ma piuttosto ad un valore dovuto ad una variazione di potenziale elettrico misurato su un volume più o meno simmetrico rispetto al piano stesso.

Si cerca quindi un modello che possa descrivere il volume di misura dei vari piani, indagando in particolar modo il piano P3.

Ipotesi:

1. È possibile descrivere il campo elettrico con una serie di resistenze in parallelo lungo l'altezza del serbatoio; queste resistenze si estendono sopra e sotto il piano.
2. Resistività dell'acqua costante (conducibilità).

Sistema di riferimento: Acqua, conducibilità adimensionale = 1

Sistema statico: Acqua/Gasolio, conducibilità adimensionale da dati sperimentali ottenuti discretizzando lungo l'altezza del reattore, 150 discretizzazioni, aggiungendo 25ml di gasolio a girante ferma, N= 0.

Dunque, la differenza di potenziale misurata e normalizzata, sulla quale si basa il processo di ricostruzione dei dati di conducibilità, si suppone sia riferita ad un certo numero di resistenze in parallelo come mostrato in figura 4.1.

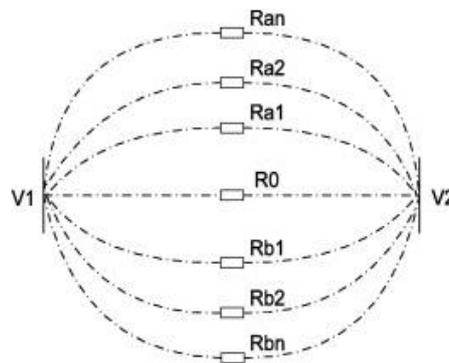


Figura 4.1 Rappresentazione delle resistenze ipotetiche in parallelo tra due elettrodi di misura che contribuiscono alla differenza di potenziale misurata.

Per le ipotesi fatte la conducibilità del sistema di riferimento contenente solo acqua, sarà data dalla somma di $2 \cdot N_r$ resistenze poste in parallelo e sarà uguale ad 1:

$$sig_w = 1 = \frac{1}{\rho_{eq}} = \sum_{i=1}^{2 \cdot N_r} \frac{1}{\rho_i} \quad (4-1)$$

Identificando con N_r il numero di resistenze per metà del volume di misura, si moltiplica per due per considerare anche il volume sottostante.

Per la ricerca del numero di resistenze che contribuiscono al potenziale adimensionale misurato, il volume sottostante al piano P3 non è stato allagato dal gasolio, si pone la resistenza equivalente in questa zona pari alla metà della resistenza equivalente che si avrebbe nel riferimento, ovvero $\frac{1}{2}$.

Nella metà del volume restante il dato ottenuto può essere considerato come la somma di $(N_r - N_a)$ resistenze in parallelo, variabili al variare dell'altezza dell'interfaccia; dunque, un modello lineare che descrive la relazione tra conducibilità e numero di resistenze effettive in presenza dello strato di gasolio sovrastante potrà essere descritto dall'equazione (4-2)

$$sig_{th} = \sum_{i=1}^{N_r - N_a} \frac{1}{\rho_i} + 0,5 \quad (4-2)$$

In cui, si è indicato con Na il numero di resistenze allagate al variare di $h_{o,3}$, il contatore di Na scala allo scalare dell'iterazione ed avendo assunto grazie all' ipotesi di resistività dell'acqua costante

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{1}{2 * Nr} \quad (4-3)$$

si può infine scrivere ogni singola conducibilità come:

$$sig_{th} = \sum_{i=1}^{Nr-Na} \frac{1}{2 * Nr} + 0,5 \quad (4-4)$$

Tramite il modello si calcolano 150 sig_{th} che corrispondono alla conducibilità adimensionale allo scalare di Nr , avendo a disposizione il set di dati di 150 acquisizioni sperimentali al variare di $h_{o,3}$.

Si ricercano il numero di resistenze che minimizzino l'errore tra conducibilità teorica e conducibilità misurata.

4.2 Validazione del modello con i dati sperimentali

Calcolato sig_{th} dal modello, per valutare il numero effettivo di resistenze da considerare si itera il modello, scalando il numero di resistenze totali poste in parallelo a due a due, in modo da variare simmetricamente il parametro che si vuole ottimizzare; si considera poi di tutte le iterazioni quella che restituisce il valore minimo della somma degli errori commessi nel valutare la conducibilità adimensionale con il modello descrittivo;

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{150} \frac{sig_{th} - sig_{exp}}{sig_{exp}} \quad (4-5)$$

Avendo calcolato il numero di resistenze in parallelo che sta minimizzando lo scarto tra le resistenze ipotizzate e le resistenze immaginarie correlate ai dati sperimentali, è possibile immaginare la distribuzione del campo elettrico sfruttato per le acquisizioni. In figura 4.3 si riporta in un grafico tridimensionale, la distanza relativa al numero di resistenze ottimali per ogni pixel, ovvero che minimizzano ε , pari ad $h_o = Nr * dh$, in cui con dh è l'incremento di altezza dovuto all'aggiunta di 25ml di gasoli.

L'ottimizzazione è fatta pixel per pixel, perché da misure preliminari si è visto che al centro della sezione il fringe effect è più evidente. In figura 4.2 si riporta su un grafico bidimensionale il piano di misura suddiviso in 316 pixel, ai quali è associato il numero ottimale di resistenze in parallelo da considerare calcolate con il modello.

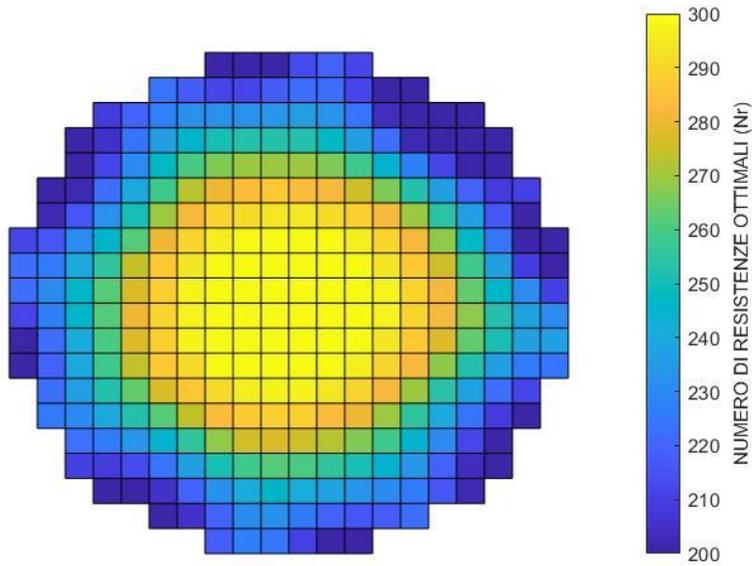


Figura 4.2 Numero di resistenze in parallelo ottimizzate simulate con MATLAB R2018a.

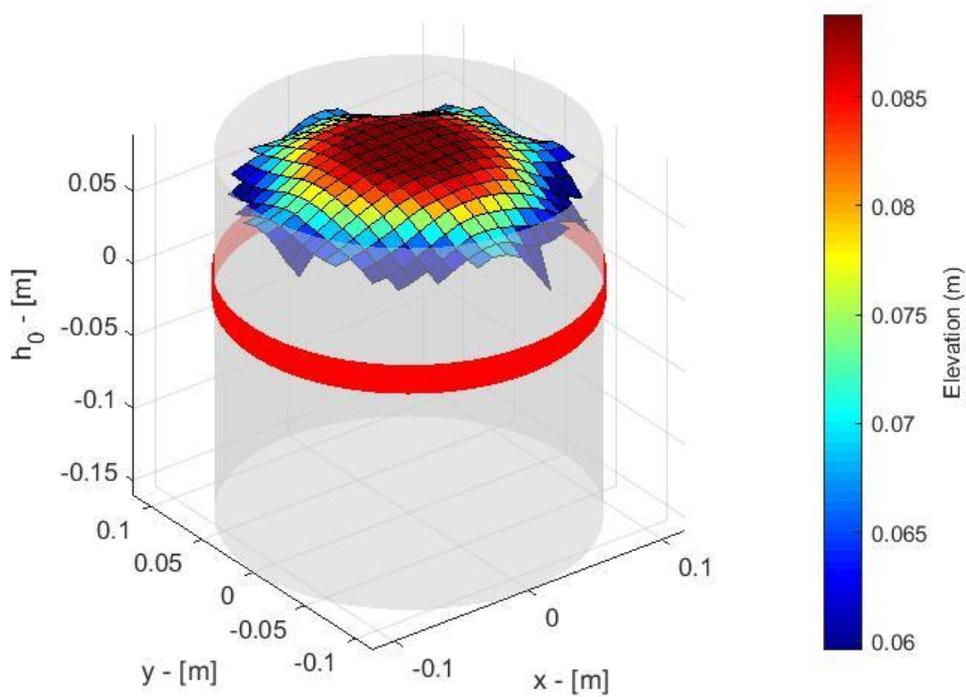


Figura 4.3 Rappresentazione tridimensionale dello spazio attraversato dalle linee di flusso, simulate con MATLAB R2018a.

Alla luce di questi risultati si cerca una strategia di analisi per l'identificazione della velocità di inizio dispersione della fase leggera.

Dall'analisi qualitativa dei dati come anticipato si è escluso il piano di misura P4, in quanto per i tre volumi di gasolio sperimentati si trovava troppo vicino all'interfaccia di separazione tra le fasi, riportando dei valori non coerenti con l'osservazione visiva del fenomeno.

Come mostrato in figura 4.4 in cui è diagrammata la conducibilità adimensionale al variare di $h_{o,3}$, le varie curve si riferiscono a diversi pixel, se ne riportano un numero limitato; un tale andamento ci fa capire che in assenza di gasolio per $h_{o,3} = H_L - z_3$ la conducibilità misurata è pari a 1, validando lo strumento.

Aggiungendo gasolio la conducibilità diminuisce, evidentemente il campo elettrico si estende fino al pelo libero del reattore.

All'avvicinarsi dell'interfaccia al piano di misura la conducibilità continua a diminuire fino ad un punto nel quale una famiglia di pixel, individuata da quelli prossimi al centro della mappa, risentono di un aumento di conducibilità, come avviene per il piano P4.

Questo probabilmente è dovuto al fatto che più il gasolio è vicino all'elettrodo più un numero crescente di linee di campo sono deflesse incontrando l'interfaccia e quindi la distribuzione spaziale del campo sarà sconosciuta e diversa da quella utilizzata per la determinazione della matrice di sensibilità e per la ricostruzione dell'immagine, per tale motivo ci si aspettano errori di misura non indifferenti.

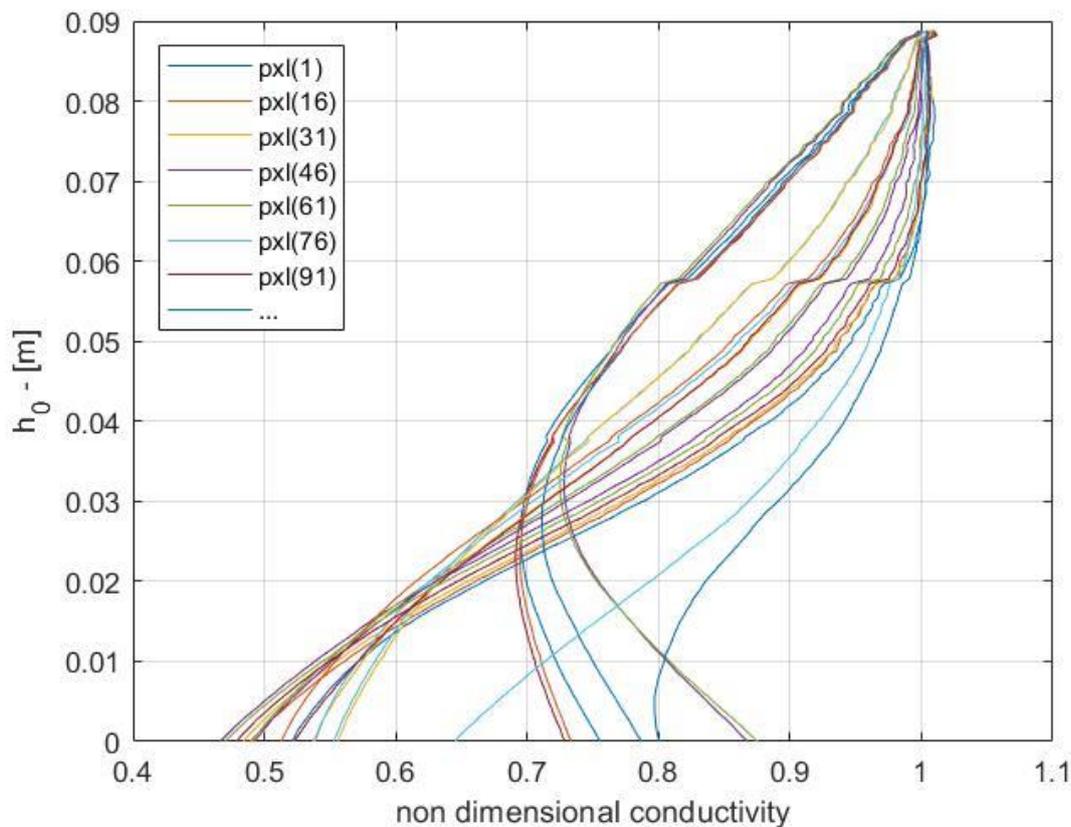


Figura 4.4 Curve rappresentative dell' andamento di conducibilità adimensionale al variare di $h_{o,3}$ riportate per un gruppo di pixel.

4.3 Elaborazione dei dati

Trovato il modello in grado di descrivere l'andamento delle linee di corrente attraverso un volume limitato, si vogliono correggere le misure di conducibilità ottenute, considerando l'effettiva deviazione dei dati a causa del fringe effect.

Dopo aver ottenuto i valori di conducibilità puntuali σ_{M3} con le prove di dispersione, per valutare il grado di miscelazione del sistema al variare della velocità di agitazione, si calcola lo scostamento tra $\sigma_{M3,0}$ misurata durante le prove statiche rispetto alla conducibilità σ_{M3} , ovviamente prese nelle stesse condizioni di hold-up di gasolio e normalizzata rispetto a $\sigma_{M3,0}$. Questo viene fatto perché la presenza dell'interfaccia fa sì che si misuri una conducibilità minore rispetto alla realtà, perciò risulterebbe difficile investigare l'effettivo quantitativo di gasolio disperso.

Questo discostamento, indicato con $\Delta\sigma$ sarà indice della presenza di gasolio nei piani che si trovano ad $h < h_{0,3}$, per cui al variare della velocità di agitazione un aumento potrebbe essere indice dell'effettiva presenza di gasolio disperso per l'agitazione.

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{M3,0} - \sigma_{M3}}{\sigma_{M3,0}} \quad (4-6)$$

Avendo a disposizione delle conducibilità locali per ogni pixel costituente il piano, si è deciso di valutare lo scostamento massimo e medio sul piano. In figure 4.5, 4.6 e 4.7 è riportato lo scostamento massimo per i tre hold-up di gasolio analizzati.

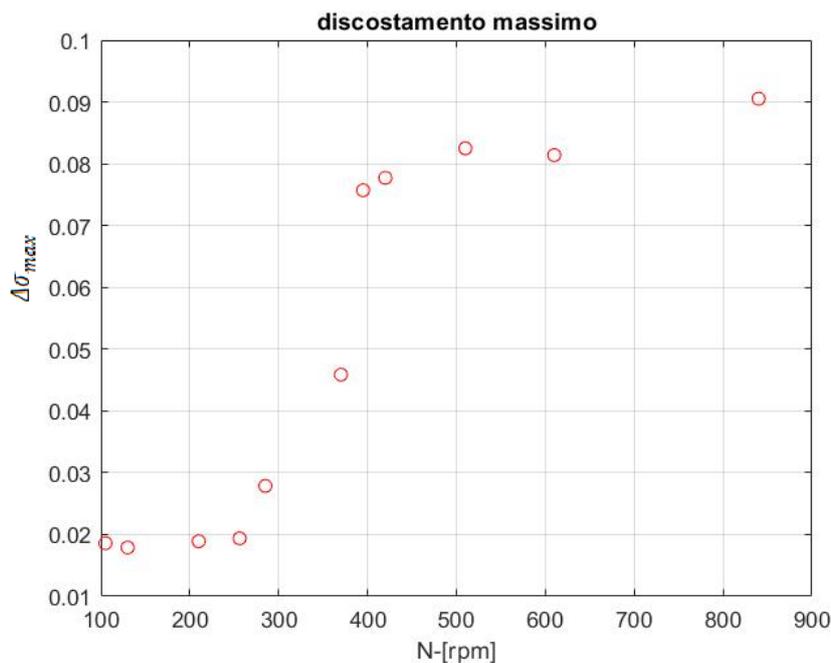


Figura 4.5 Scostamento massimo adimensionale, frazione volumetrica totale di gasolio presente 0.047.

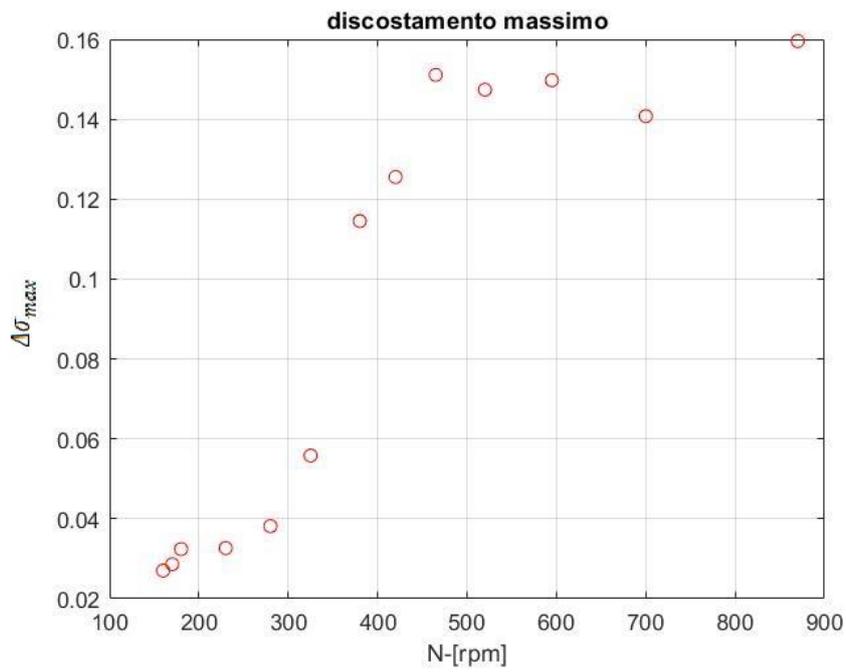


Figura 4.6 Scostamento massimo adimensionale, frazione volumetrica totale di gasolio presente 0.09.

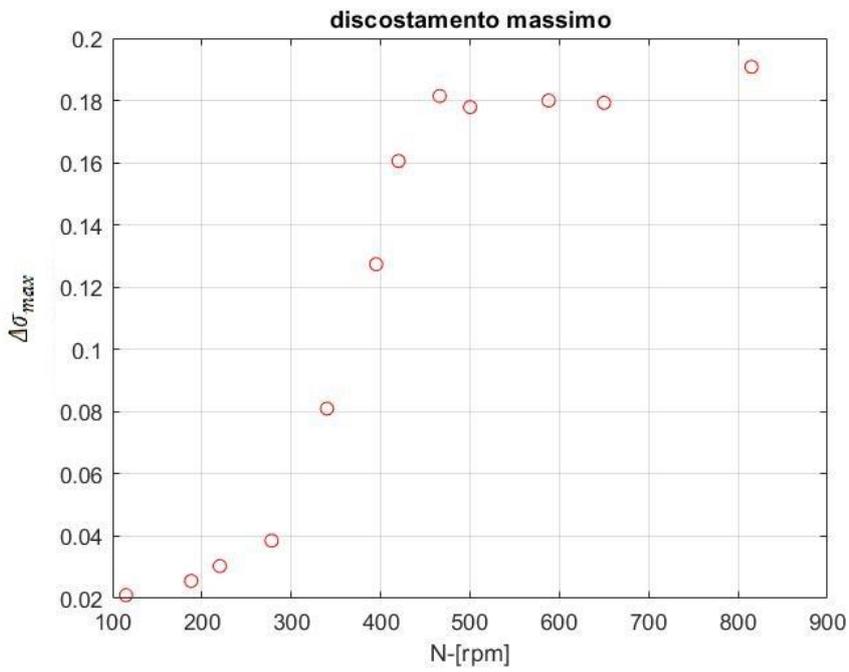


Figura 4.7 Scostamento massimo adimensionale, frazione volumetrica totale di gasolio presente 0.14.

4.3.1 Criteri di identificazione per Njd, Ncd e Npm

Come mostrato nelle figure da 4.5 a 4.7 il trend della differenza massima di conducibilità fino ad ora considerato, mostra un andamento simile ad una curva logistica, presentando due punti in cui la curva cambia concavità, il primo è stato identificato come probabile punto di inizio draw-down in quanto in tale condizione il gasolio disperso fa aumentare il discostamento normalizzato, il secondo invece viene identificato come punto di completa dispersione, oltre il quale dopo un aumento repentino i discostamenti si mantengono pressoché costanti.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti stimando i punti di crescita della curva, per i tre casi analizzati, interpolando l'andamento con tre tratti lineari, l'intersezione dei quali è assunto pari al valore ricercato.

La linearizzazione è fatta considerando una regressione dei punti nella zona di crescita della curva, con un intervallo di confidenza pari all'80%, riportato nelle figure 4.8, 4.9 e 4.10 insieme alle rette interpolanti.

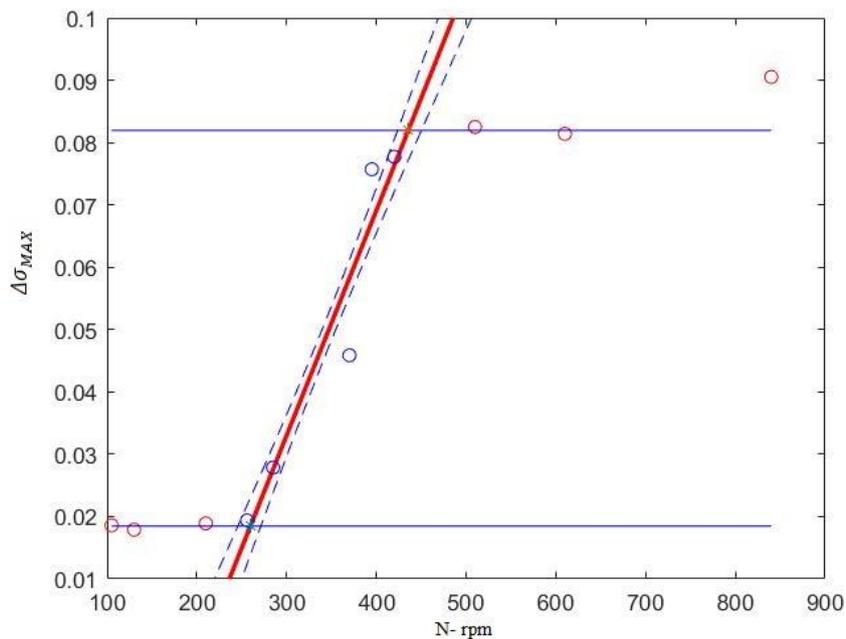


Figura 4.8 Differenza massima di conducibilità adimensionale per $\varphi_g = 0.047$. In rosso è rappresentata l'approssimazione lineare ottenuta con la regressione ai minimi quadrati ed un intervallo di confidenza dello 0.8.

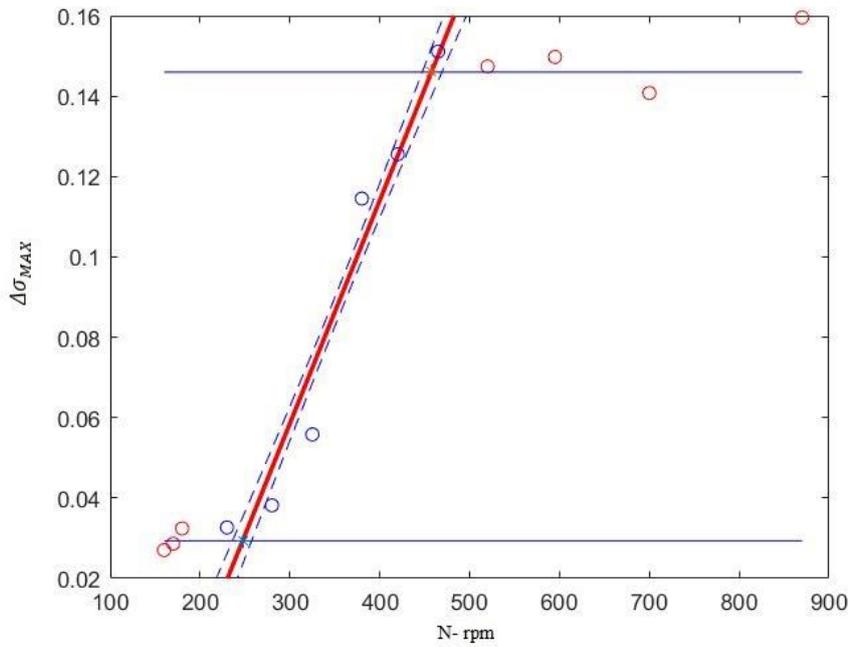


Figura 4.9 Differenza massima di conducibilità adimensionale per $\varphi_g = 0.09$. In rosso è rappresentata l'approssimazione lineare ottenuta con la regressione ai minimi quadrati ed un intervallo di confidenza dello 0.8.

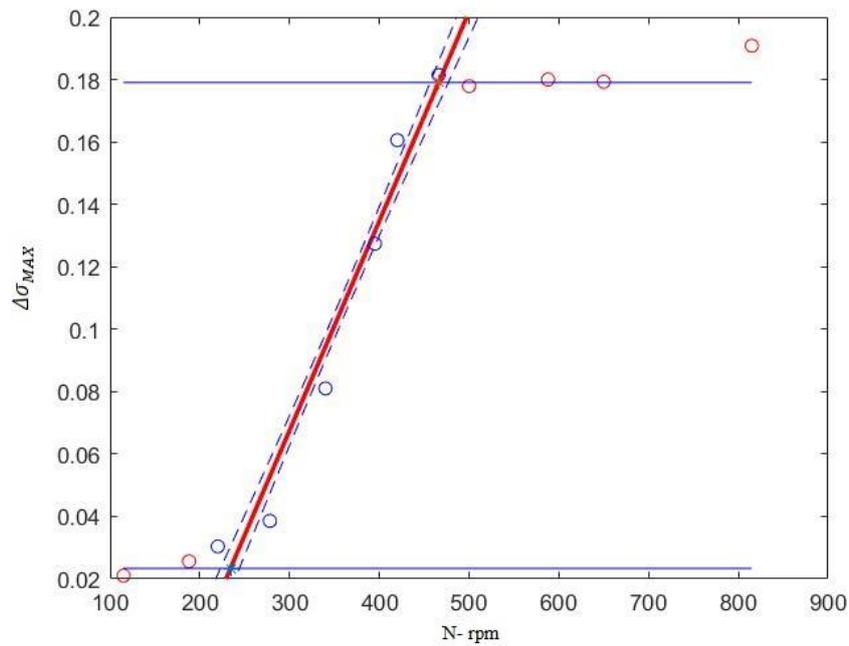


Figura 4.10 Differenza massima di conducibilità adimensionale per $\varphi_g = 0.14$. In rosso è rappresentata l'approssimazione lineare ottenuta con la regressione ai minimi quadrati ed un intervallo di confidenza dello 0.8.

A questo punto ottenuta la retta di regressione lineare, si identificano come velocità di inizio dispersione e di complete draw-down, le velocità corrispondenti ai punti d'intersezione minimo e massimo con le rette identificate da due valori in ordinata pari alla media tra i punti esclusi dalla regressione, rispettivamente per basse ed alte velocità di agitazione, come riportato (in blu) nelle figure precedenti.

In tabella 4-1 si riassumono i risultati ottenuti seguendo questa metodologia di analisi, che risultano coerenti con quanto osservato sperimentalmente.

Tabella 4-1 valori delle velocità di *just draw-down* e *complete dispersion* identificati con il criterio proposto.

Hold-up di gasolio	Velocità di <i>just draw-down</i>	Velocità di <i>complete dispersion</i>
0.047	260 rpm	436 rpm
0.09	247 rpm	457 rpm
0.12	234 rpm	466 rpm

Successivamente si è valutata la frazione standardizzata di gasolio α definita dal rapporto tra la frazione volumetrica di gasolio mediata sui pixel al variare di N, calcolata come in equazione (3-4), e la frazione volumetrica totale, prendendo in considerazione questa volta anche i piani di misura P1, P2 e P4;

$$\alpha = \frac{\overline{\varphi_g}}{\varphi_{tot}} \quad (4-7)$$

A velocità superiori a quella in cui il gasolio è uniformemente disperso nella fase continua, la frazione media si mantiene costante sia al variare del numero di giri che lungo l'altezza, assumendo per i quattro piani di misura un valore più o meno identico. Poiché si sta considerando la frazione misurata rispetto alla frazione totale φ_{TOT} per i tre set-up sperimentali, allora si conclude che nella fase di miscelazione tale parametro dovrà raggiungere valori prossimi all'unità.

Si riportano per i quattro piani e i volumi indagati gli andamenti della frazione media di gasolio al variare della velocità di agitazione, con delle bande orizzontali nell'intorno centrato in 1, pari a $\pm 10\%$; difatti, si assume come velocità di perfetta miscelazione quella corrispondente alla frazione media standardizzata che rientra nell'intervallo di accettabilità 1 ± 0.1 .

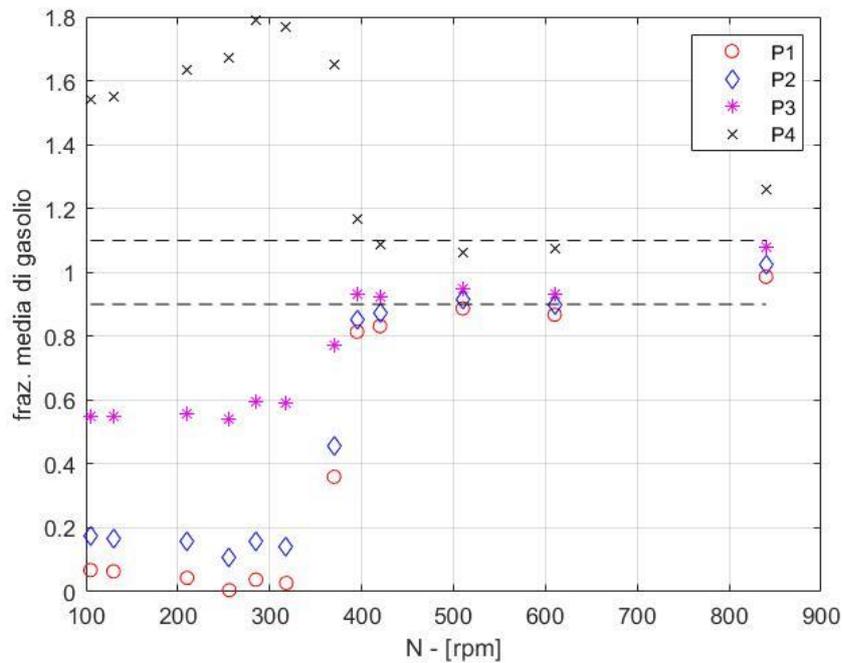


Figura 4.11 Variazione standardizzata della frazione di gasolio media misurata sui piani P1, P2, P3 e P4 per una frazione volumetrica totale di 0.047.

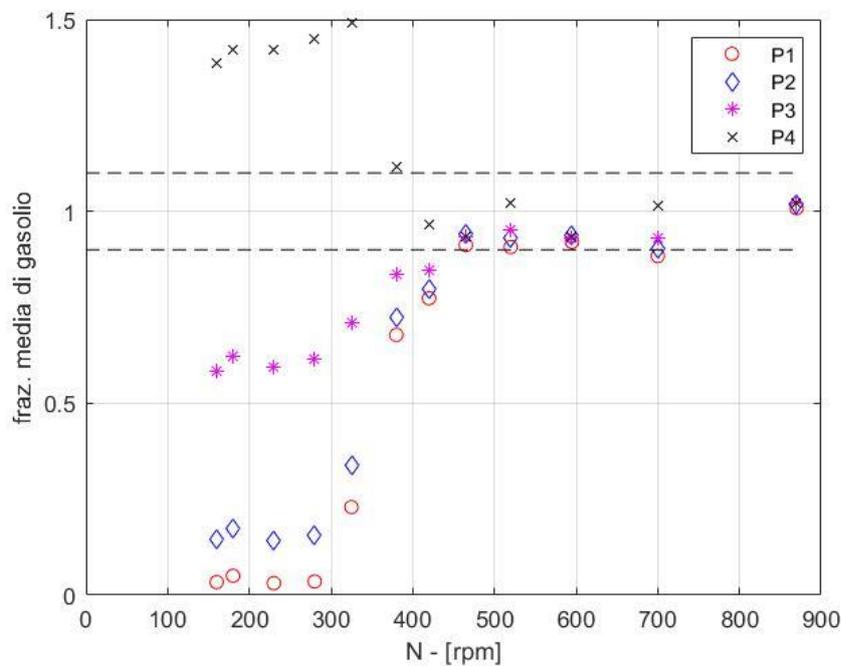


Figura 4.12 Variazione standardizzata della frazione di gasolio media misurata sui piani P1, P2, P3 e P4 per una frazione volumetrica totale di 0.09.

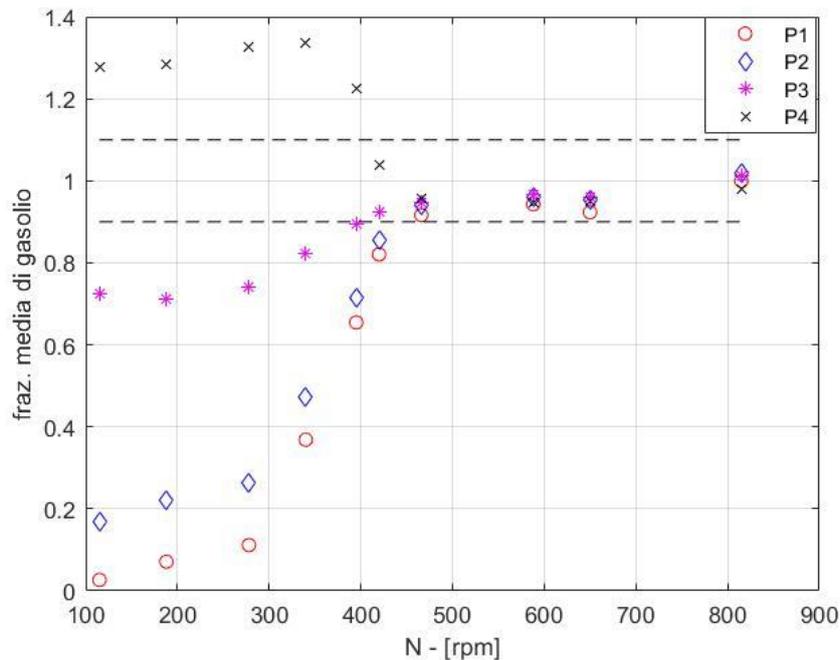


Figura 4.13 Variazione standardizzata della frazione di gasolio media misurata sui piani P1, P2, P3 e P4 per una frazione volumetrica totale di 0.14.

Infine, si assumono come velocità di *perfetta miscelazione* per gli hold-up analizzati, quelle riportate in tabella 4-2.

Tabella 4-2 Velocità teoriche di *perfect mixing*.

Hold-up di gasolio	Velocità di <i>perfect mixing</i>
0.047	510 rpm
0.09	595 rpm
0.14	588 rpm

Come può notarsi dagli andamenti derivati dalle analisi, i dati ottenuti per un hold-up del 14% sembrano essere più consistenti; nel paragrafo successivo si è deciso di riportare gli andamenti radiali di concentrazione per questo set-up, mentre tutti gli altri dati elaborati sono presenti come allegati (Appendice B).

4.3.2 Analisi dei risultati

In conclusione, in questo paragrafo si espongono i risultati ottenuti dallo studio dei profili di concentrazione durante le prove di dispersione, soffermandosi in particolar modo sulle analisi effettuate per le velocità caratteristiche della mappa di flusso che si ha l'obiettivo di identificare, si riportano gli andamenti radiali della frazione di gasolio, calcolata con la formula di Maxwell dai valori di conducibilità adimensionale, per i tre hold-up di gasolio.

Il set di dati presentato, si riferisce alle misure effettuate utilizzando un volume di gasolio pari a 1.5L, come annunciato in precedenza; fino ad ora, il piano P4 non è stato preso in considerazione nelle analisi effettuate; d'altronde, dagli andamenti radiali si capisce bene che aumentando la distanza tra l'interfaccia e il piano di misura P4, per $h_{o,4}$ superiore a circa 30 mm, i dati ricostruiti e analizzati tendono ad assumere un andamento riproducibile con quello dei piani sottostanti.

In figura 4.14 e 4.15 si riportano gli andamenti a ridosso della velocità individuata come inizio draw-down, in cui si nota un aumento della frazione media di gasolio solo sul piano P1 e leggermente sul piano P2, mentre il piano P3 non percepisce la variazione di conducibilità.

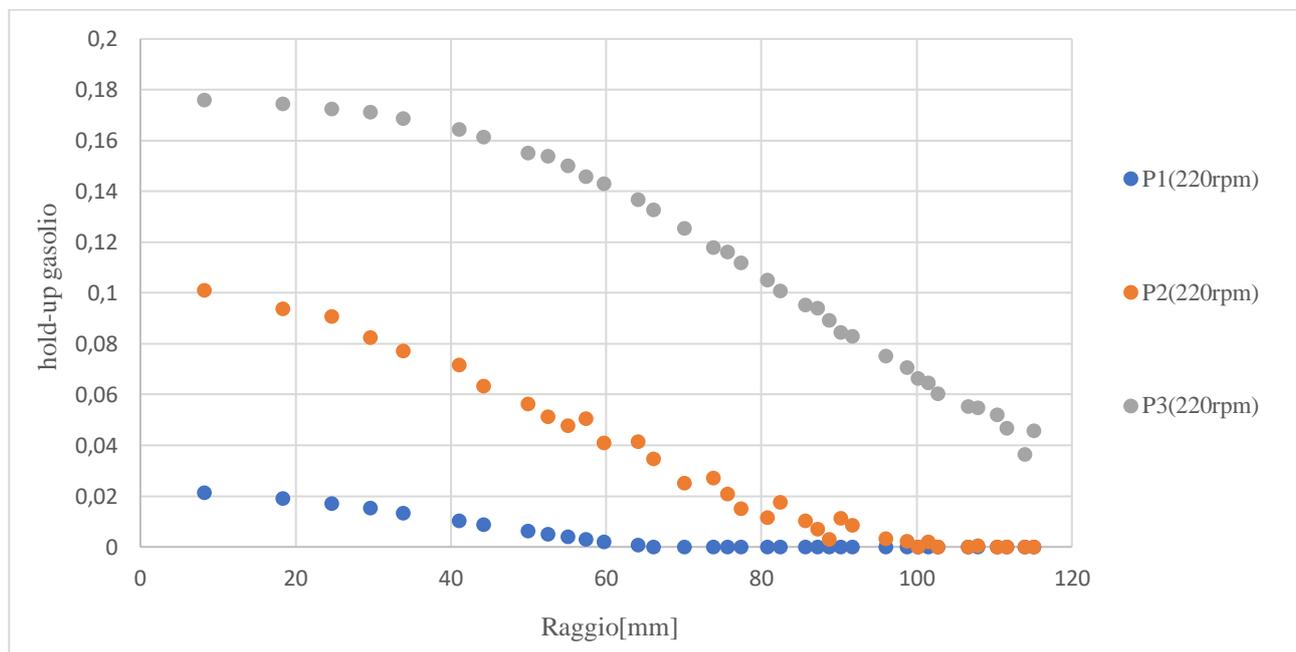


Figura 4.14 Andamento della frazione di gasolio per N=220 rpm, il draw-down non è ancora iniziato.

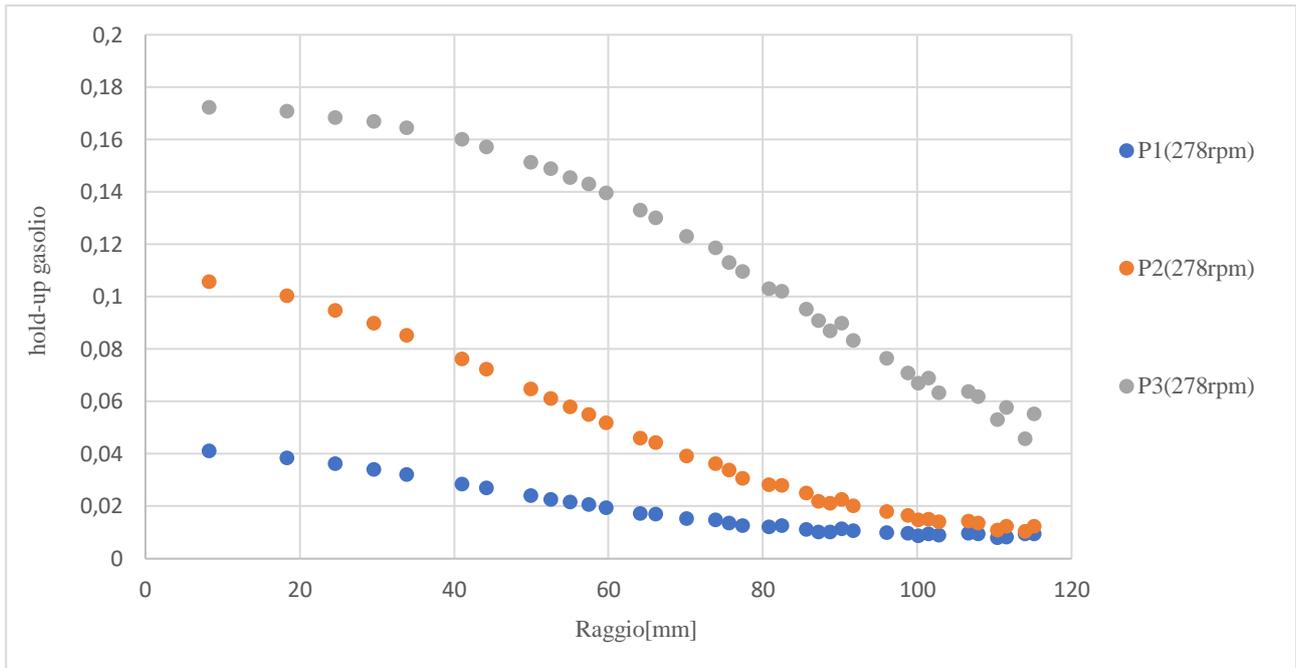


Figura 4.15 Andamento radiale della frazione di gasolio per $N=278$ rpm. A questa velocità si ha già draw-down ma il piano P3 risulta insensibile alle variazioni di conducibilità.

Nella zona di miscelazione della mappa di flusso, come si può notare dagli andamenti riportati nelle figure 4.16 e 4.17, a partire da una velocità di 588 rpm, la concentrazione del gasolio disperso risulta essere costante se confrontata con velocità superiori, come riportato a $N=650$ rpm.

Quanto ottenuto risulta concorde con il criterio utilizzato per determinare la velocità alla quale il volume risulta uniformemente miscelato.

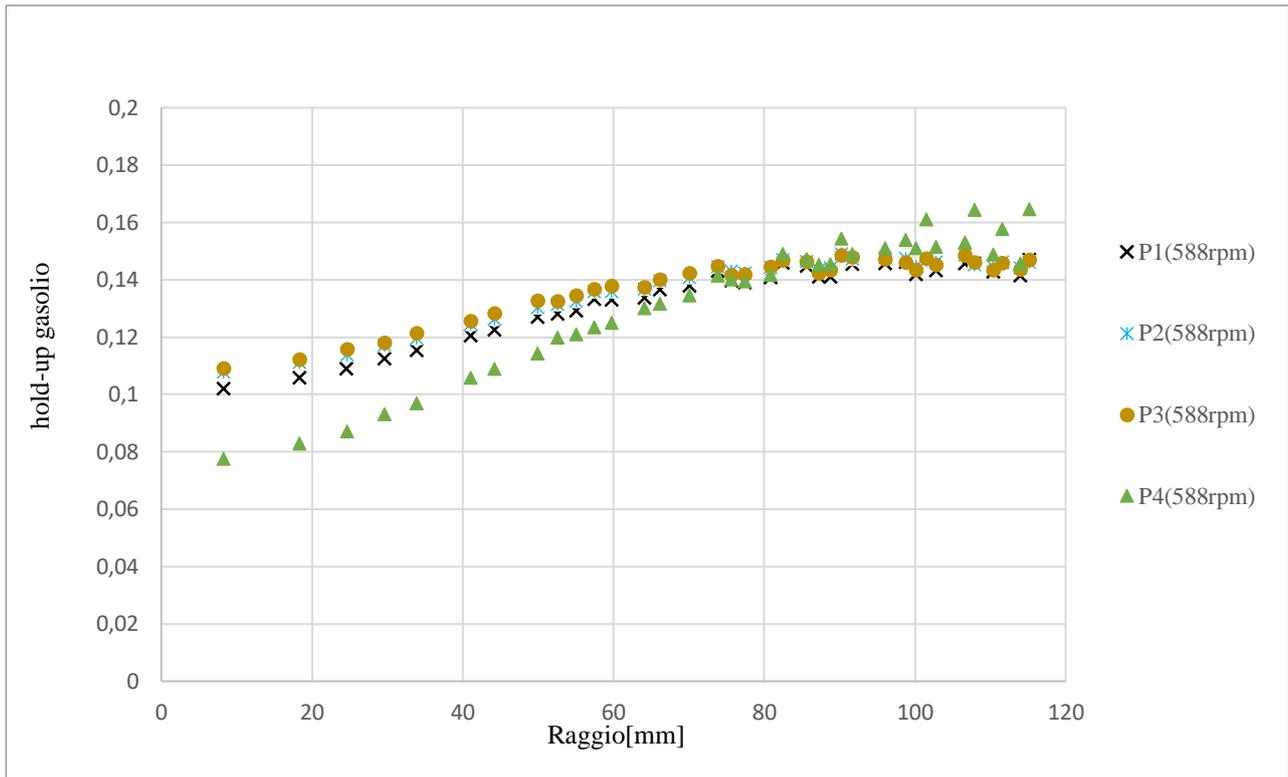


Figura 4.16 Andamento radiale della frazione di gasolio per $N=466$ rpm.

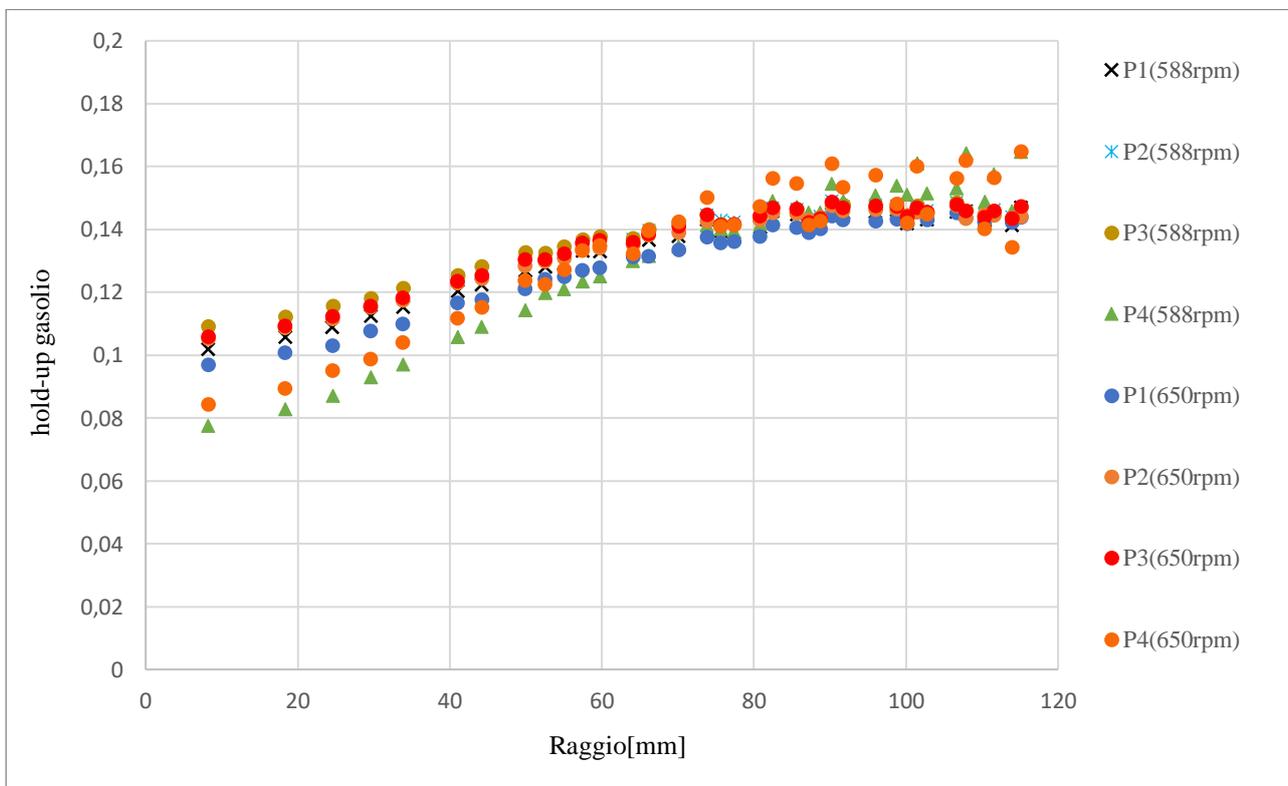


Figura 4.17 Confronto tra la frazione media di gasolio calcolata a diverse velocità di agitazione, per i piani P1, P2, P3 e P4.

Si propone infine, la mappa di flusso teorica riportata in figura 4.18 per il sistema studiato, ed in seguito in figura 4.19 la mappa di flusso osservata, ovvero da valutazioni dovute all'osservazione sperimentale.

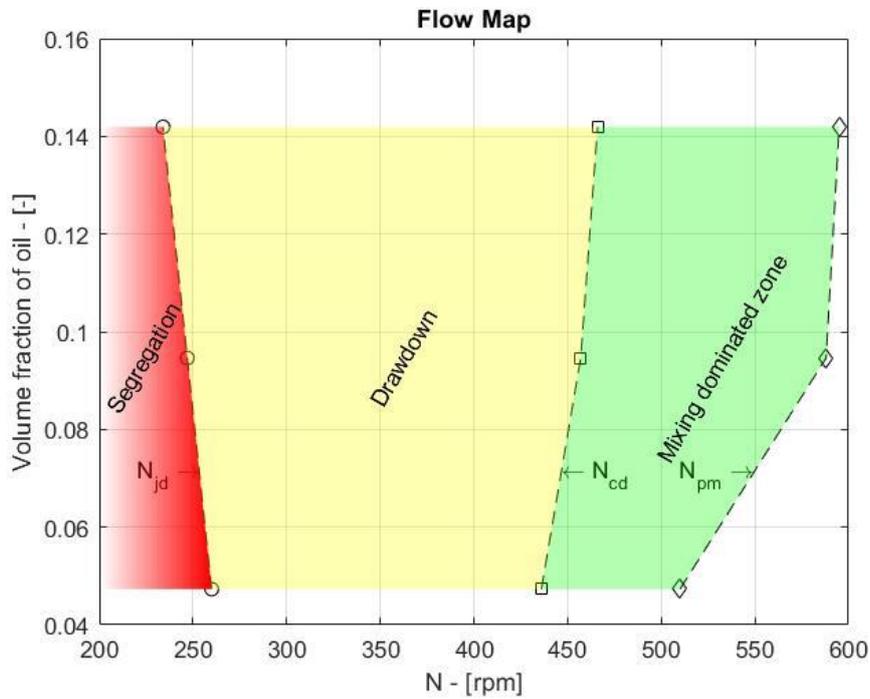


Figura 4.18 Mappa di flusso teorica del sistema miscelato bifase gasolio/acqua.

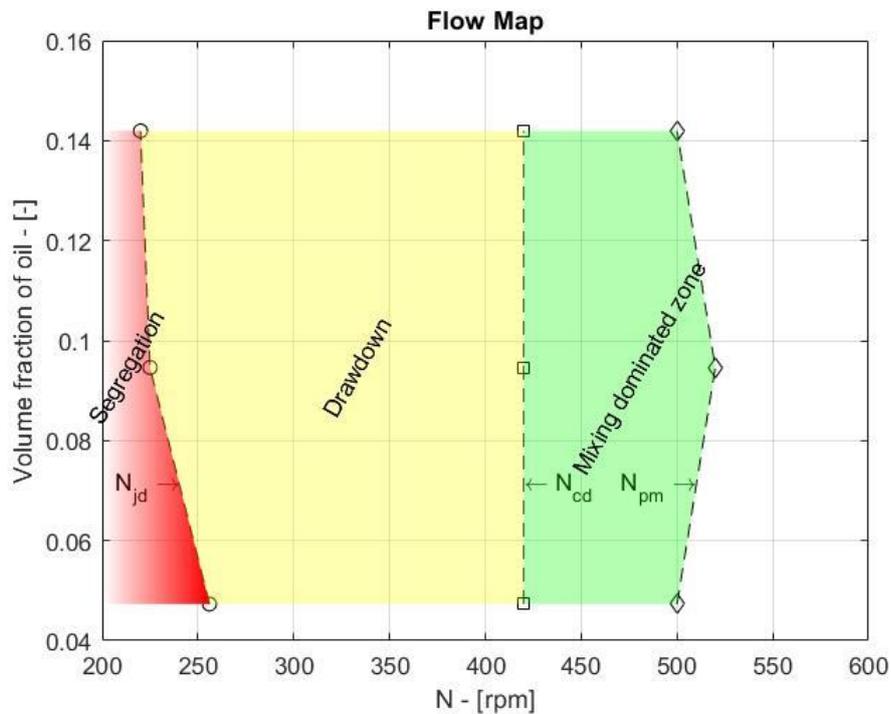


Figura 4.19 Mappa di flusso osservata del sistema miscelato bifase gasolio/acqua.

4.4 Analisi preliminare con gli elettrodi di guardia

Come conclusione del lavoro svolto, per validare le ipotesi fatte e i risultati ottenuti, si sono effettuate delle acquisizioni di conducibilità predisponendo l'apparecchiatura di due guardie elettriche.

Infatti, lo studio condotto sul sistema liquido-liquido dimostra che la distribuzione assiale del campo elettrico è fortemente difforme, questo comporta un errore di ricostruzione dei dati qualora si decide di utilizzare un algoritmo bidimensionale per la descrizione del fenomeno 3D. (Y. X. Ma, H. Wang, 1997).

Con l'obiettivo di rendere la ricostruzione bidimensionale dell'immagine il più fedele possibile alla distribuzione tridimensionale del campo di misura, è necessario migliorare l'uniformità assiale del campo elettrico e confinare l'altezza di misura dei sensori dello strumento.

Nel primo caso bisognerebbe aumentare la dimensione degli elettrodi, ricercando l'ottimo affinché nel mezzo analizzato le linee di corrente si distribuiscano parallelamente tra due elettrodi, come mostrato in figura 4.20 in cui si rappresentano due situazioni (a) e (b) con diverse dimensioni degli elettrodi; come si può notare, se la regione in cui ci si aspettano variazioni di conducibilità è quella rappresentata in figura, allora utilizzando elettrodi più lunghi è possibile che le linee di corrente che li attraversano siano disposte con una configurazione parallela, rendendo fattibile la semplificazione bidimensionale del problema.

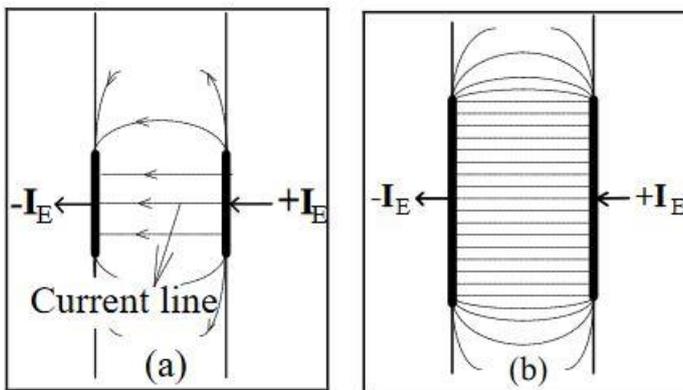


Figura 4.20 Rappresentazione delle linee di corrente tra due elettrodi, per due casi (a) e (b) al variare della dimensione degli elettrodi.

Diversamente, per confinare l'altezza di misura è possibile prevedere degli elettrodi di guardia che portano la tensione a terra, nelle zone in cui sono montati, limitando le linee di flusso.

Infatti, all'aumentare della lunghezza degli elettrodi si potrebbe migliorare la distribuzione del campo di rilevamento, ma dal bordo dei sensori ci sarà ancora divergenza delle linee di corrente; pertanto, un elettrodo di grandi dimensioni può ridurre l'errore che si commette nell'elaborare le misure di potenziale con una semplificazione bidimensionale del campo, ma continuerà ad esserci una deviazione a causa del fringe effect. Se si considerasse invece, il campo prodotto tra due sensori al passaggio della corrente provvisti di due guardie, si avrebbe che sotto l'azione delle guardie, il campo di misura effettivo resterebbe confinato in una zona in cui

la distribuzione delle linee di flusso è uniforme; se le guardie sono alte abbastanza è possibile modellare il campo tridimensionale con un'approssimazione 2D, ottenendo una buona precisione di calcolo.

Quanto detto può essere spiegato in figura 4.21, in cui si mostra la distribuzione del campo attraverso due elettrodi, in entrambi i casi in cui siano presenti o meno le guardie, attraverso un mezzo con caratteristiche elettriche non uniformi, come rappresentato in figura.

Si considera infatti, la presenza di un corpo con $\sigma = 0$ mS/m di forma sferica; in figura 4.21 (a) sebbene l'oggetto sia posizionato sul bordo degli elettrodi, esso si trova ancora nel campo di rilevamento e lo distorce, diversamente nel caso riportato il 4.21 (b), la distorsione del campo elettrico causata dal corpo non conduttivo è limitata dalle guardie, evitando la variazione del percorso delle linee di corrente eccitante iniettata dagli elettrodi di rilevamento.

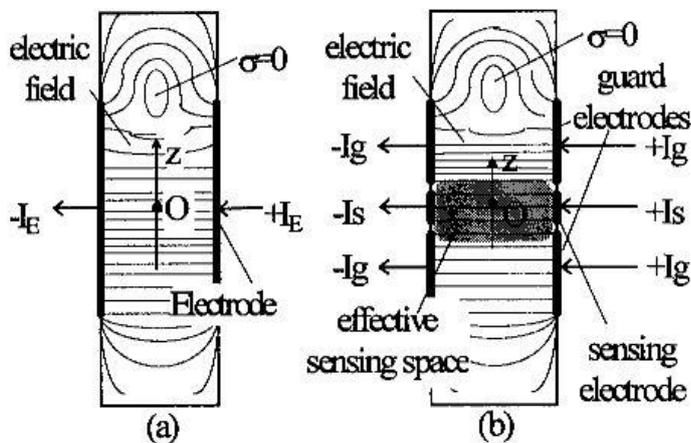


Figura 4.21 Rappresentazione delle linee di corrente tra due elettrodi, per due casi (a) e (b) in assenza ed in presenza di guardie elettriche.

Una tale situazione può essere assimilata a ciò che avviene per il caso studiato, in cui l'interfaccia di separazione tra le fasi conduttiva e non si trova sopra al piano di elettrodi; infatti, in assenza di guardie (a) poiché la regione distorta si trova nel campo di rilevamento per tutto il tempo, la tensione dovuta ad una qualche variazione aumenta poco e lentamente, inoltre se la variazione è limitata, la sensibilità di rilevamento è inferiore.

Aggiungendo le guardie, la presenza di una fase conduttiva vicino al piano non riesce a distorcere il campo di misura, perché questo è limitato in un volume minore.

Nel caso di studio riportato si è deciso di utilizzare tutti e 16 di elettrodi dei piani P2 e P4 come guardie, in modo da confinare i piani di misura P1 e P3.

Per fare ciò, gli elettrodi del piano P2 e P4 sono stati collegati in serie e successivamente, l'unico cavo risultante da questo collegamento è stato messo a terra insieme all'elettrodo di messa a terra dei piani P1 e P3, come riportato in figura 4.22.

Difatti, così facendo i sensori dei piani P2 e P4 sono impossibilitati ad andare in tensione, limitando il passaggio delle linee di corrente e quindi del campo.



Tabella 4-3 Set di acquisizioni utilizzando gli elettrodi di guardia.

	V_g	N
#1	0.5 L	0 rpm
#2		325 rpm
#3		450 rpm
#4	1.0 L	0 rpm
#5		320 rpm
#6	1.5 L	0 rpm
#7		320 rpm
#8	2.1 L	0 rpm

Figura 4.22 Serbatoio utilizzato durante le prove sperimentali, in cui i piani P2 e P4 fungono da guardie elettriche.

Per verificare che in queste condizioni il campo di misura sia effettivamente confinato in un volume minore, rispetto alle sperimentazioni condotte senza i piani di guardia, sono state effettuate delle analisi in diverse condizioni operative, scelte affinché si abbiano delle misure confrontabili con i dati di conducibilità ottenuti in assenza di guardie.

In tabella 4-3 si riportano i set-up utilizzati; in cui si è deciso di effettuare anche delle misure in cui il gasolio raggiungeva il piano di guardia P4, allagandolo parzialmente per un volume di gasolio $V_g = 1.5 L$ o completamente per $V_g = 2.1 L$.

Si riportano di seguito nelle figure 4.23 : 4.28 i risultati ottenuti, confrontandoli con quelli derivati nel caso in cui non erano presenti le guardie.

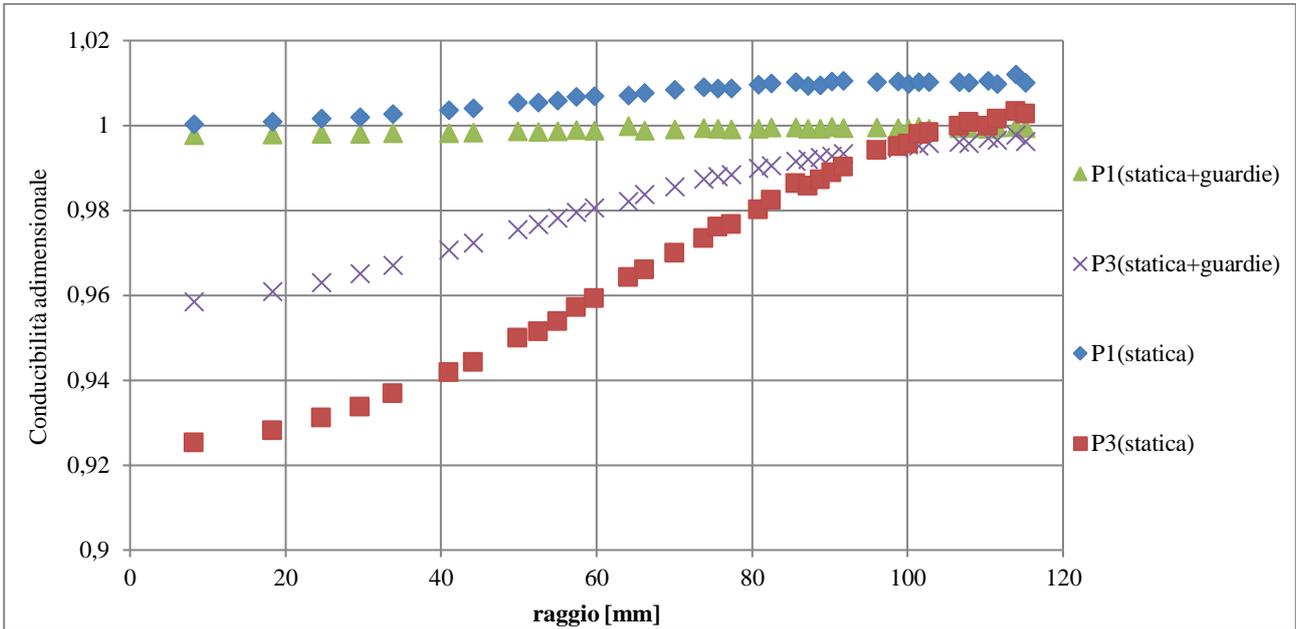


Figura 4.23 Andamento radiale della conducibilità adimensionale in condizioni statiche, $V_g=0,5L$.

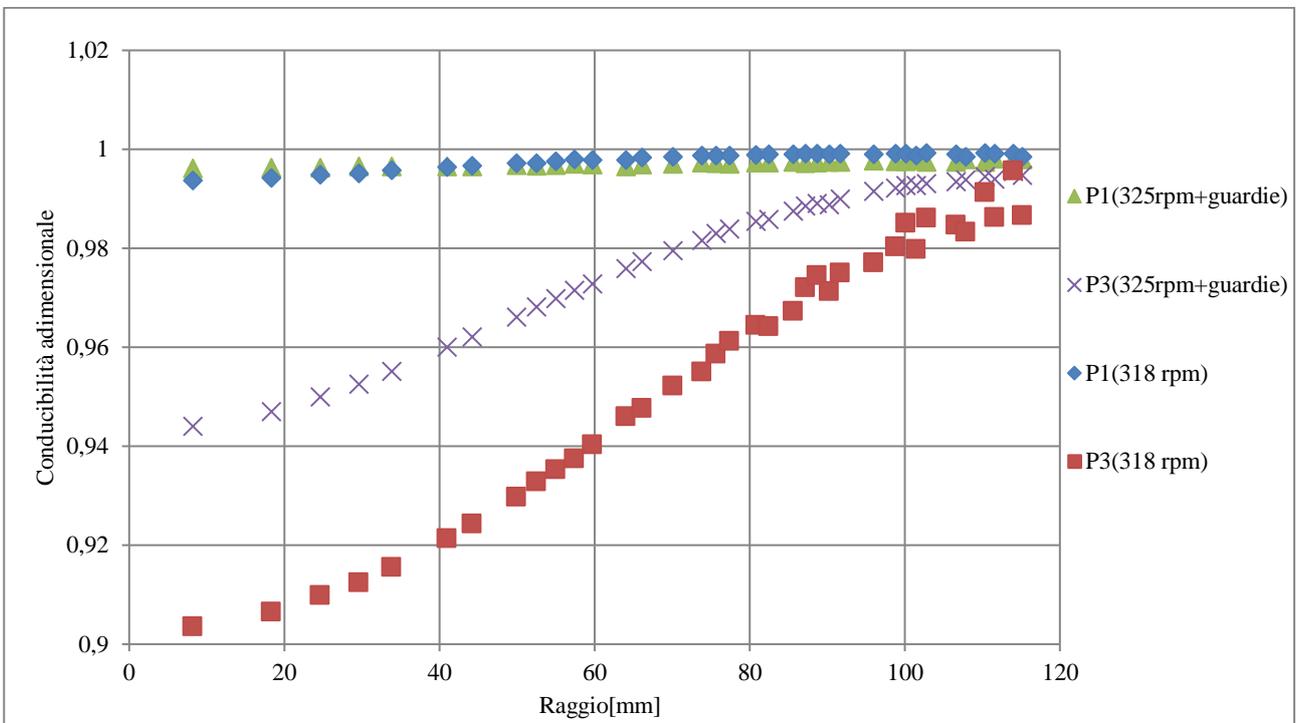


Figura 4.24 Andamento radiale della conducibilità adimensionale in condizioni di draw-down, $V_g=0,5L$.

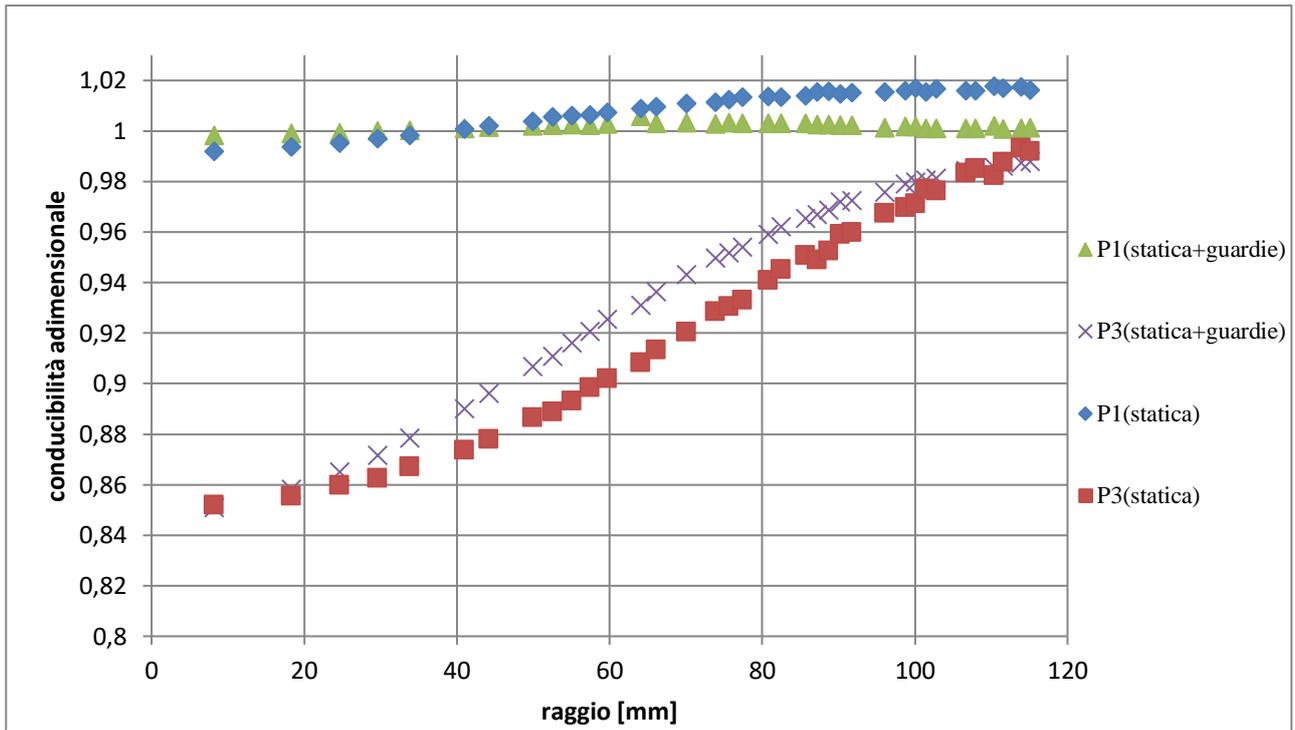


Figura 4.25 Andamento radiale della conducibilità adimensionale in condizioni statiche, $V_g=1L$.

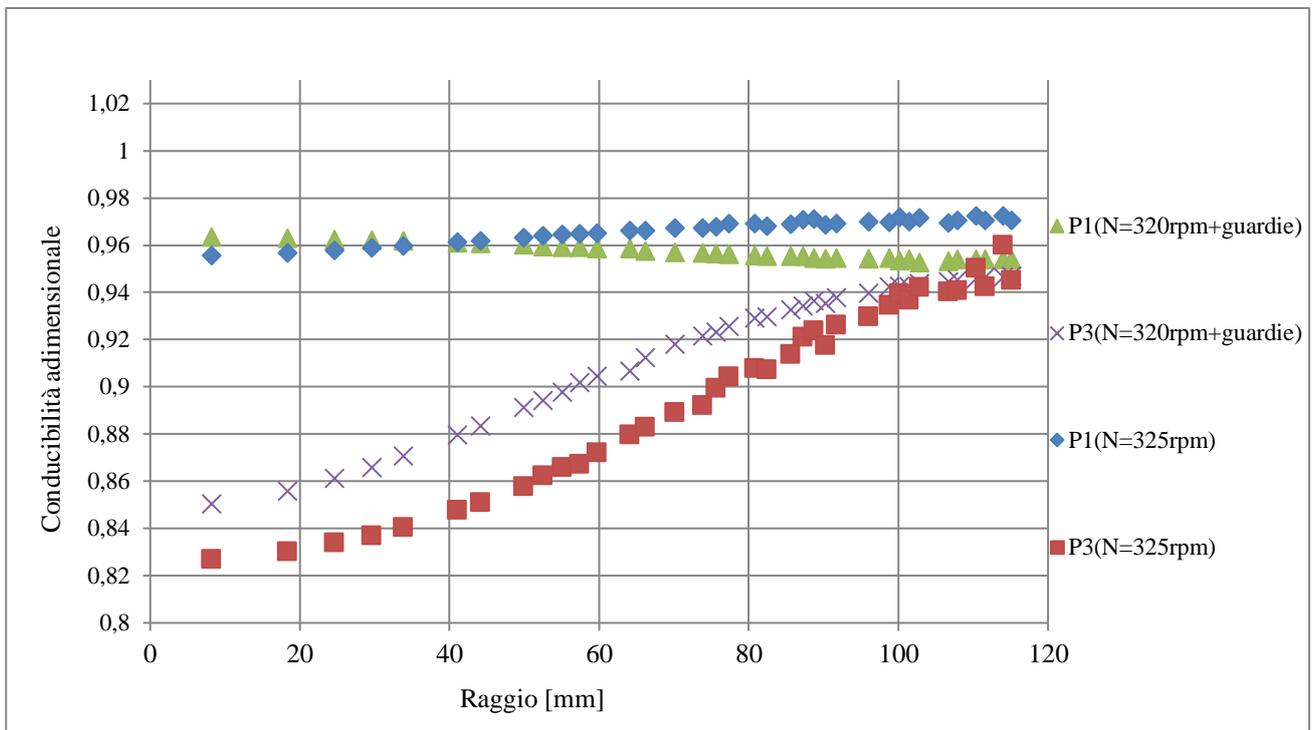


Figura 4.26 Andamento radiale della conducibilità adimensionale in condizioni di draw-down, $V_g=1L$.

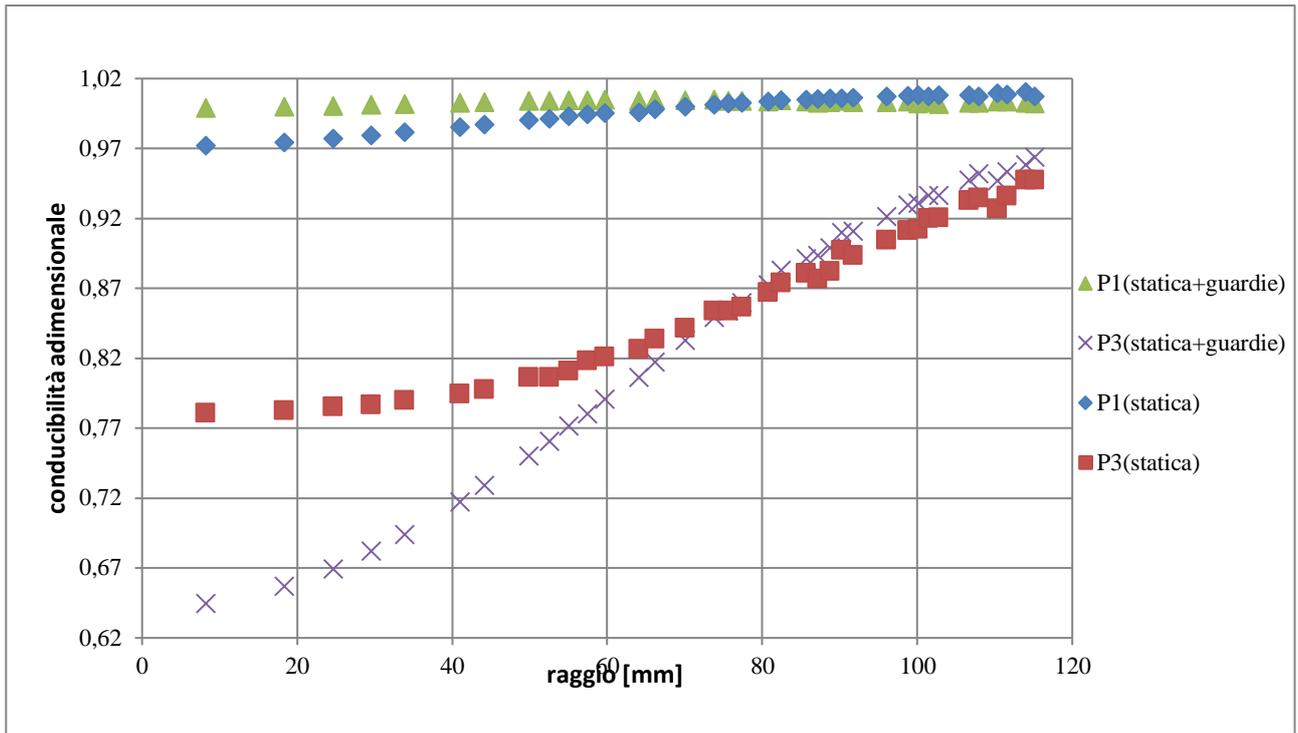


Figura 4.27 Andamento radiale della conducibilità adimensionale, $V_g=1,5L$. Per questo hold-up di gasolio il piano di sensori P4 risulta essere parzialmente allagato, la guardia P4 non funge più da schermo.

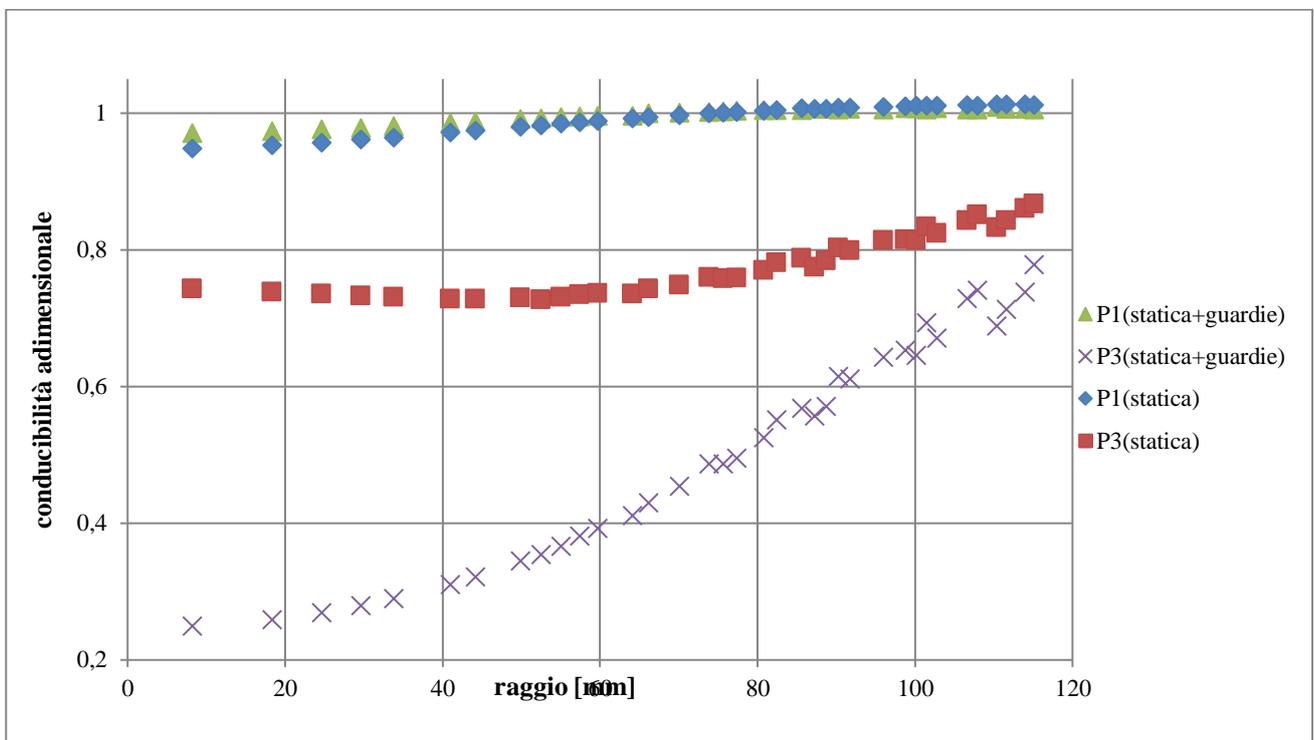


Figura 4.28 Andamento radiale di conducibilità adimensionale, $V_g=2.1 L$. Per questo hold-up di gasolio il piano di sensori P4 risulta essere completamente allagato, la guardia P4 non funge più da schermo.

Come si può notare, per gli andamenti mostrati in figura 4.27 e 4.28, qualora gli elettrodi del piano P4 entrano in contatto con il gasolio, la conducibilità adimensionale è minore rispetto alle sperimentazioni condotte senza guardie.

Un tale risultato era da aspettarsi in quanto, senza guardie il campo elettrico incontrando l'interfaccia viene distorto e probabilmente deformandosi estende il suo volume di misura nella porzione di spazio sottostante al piano P3, dove poiché si stanno valutando misure statiche si è certi che non ci sia gasolio disperso.

Diversamente, quando si utilizzano le guardie il volume di misura del campo distorto è limitato inferiormente dal piano P2 che in queste condizioni funge da guardia.

Si riportando in figura 4.29 l'andamento della conducibilità adimensionale per ogni pixel, al variare della distanza tra l'interfaccia e il centro degli elettrodi del piano P3.

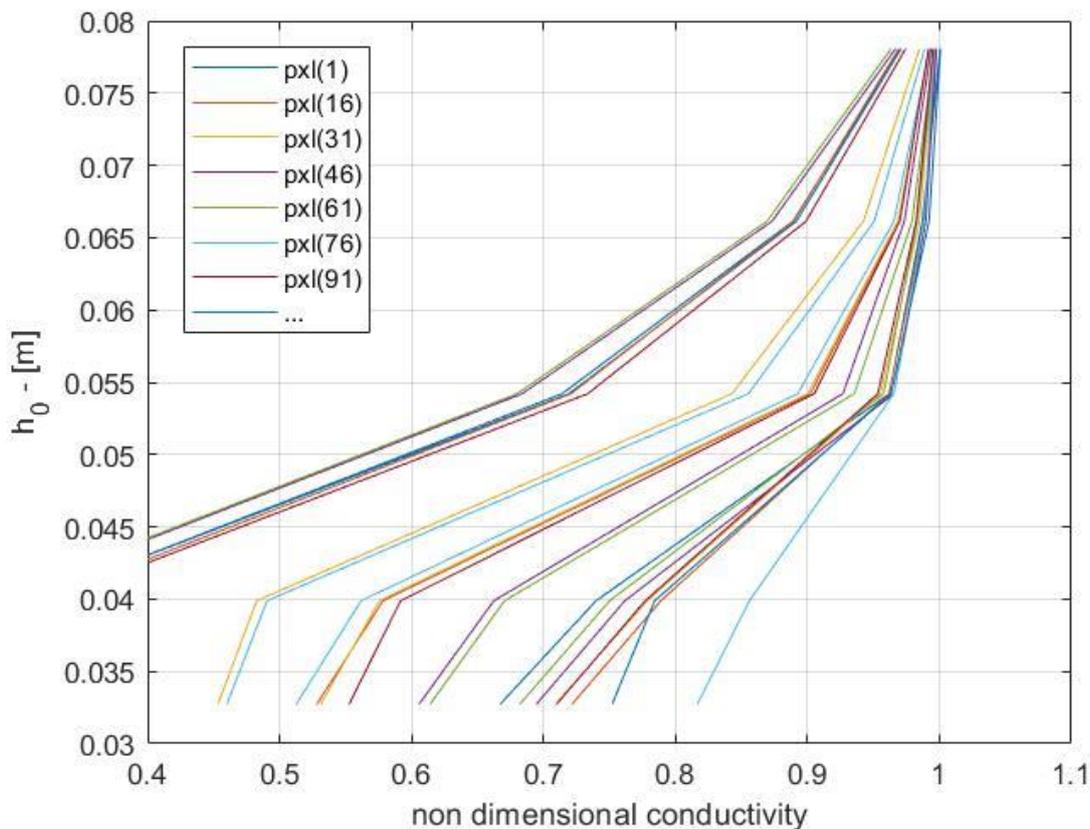


Figura 4.29 Curve rappresentative dell' andamento di conducibilità adimensionale al variare di $h_{0,3}$ riportate per un gruppo di pixel, con P2 e P4 piani di guardia.

Difatti, le misurazioni effettuate non sono sufficienti per verificare che a distanze minime tra l'interfaccia e il piano di misura P3, utilizzando il panno P2 come guardia elettrica non si abbiano effetti di distorsione, tali da fare aumentare la conducibilità adimensionale, come avviene invece in assenza di guardie (figura 4.4).

Se si osservano gli andamenti sovrapposti della conducibilità adimensionale in assenza di guardie e con le guardie, come in figura 4.30, si nota che per $Vg = 1.5 l$ o per volumi superiori, per i quali gli elettrodi della

guardia P4 risultano allagati, la conducibilità misurata con le guardie elettriche, rappresentata dalla curva tratteggiata diminuisce più velocemente, rispetto alle misure acquisite in assenza di guardie. Questo è attribuito alla limitazione del volume di misura sottostante a P3 che è schermato dalla guardia elettrica P2.

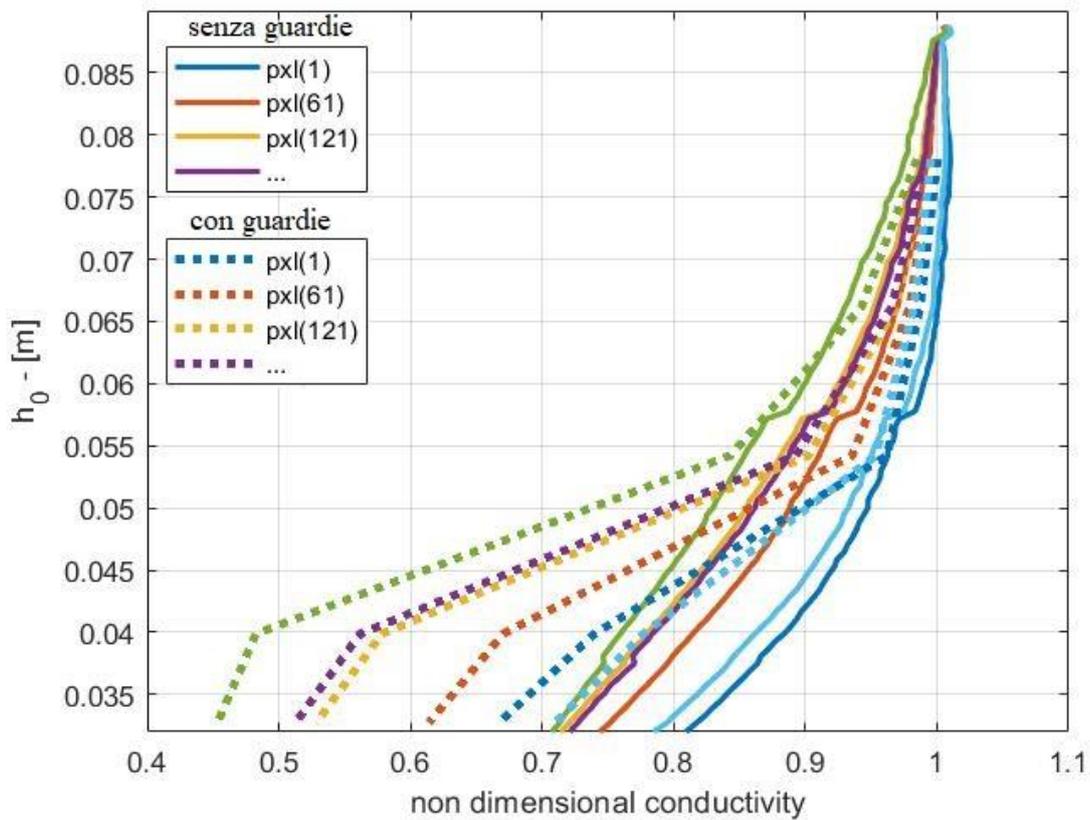


Figura 4.30 Curve rappresentative dell' andamento di conducibilità adimensionale al variare di $h_{0,3}$ riportate per un gruppo di pixel, in assenza ed in presenza di guardie elettriche.

5 Conclusioni

In questo lavoro di tesi la tomografia a resistenza elettrica è stata applicata per monitorare i regimi di flusso che si instaurano in un serbatoio agitato, contenente un sistema di due liquidi immiscibili.

L'hold-up della fase dispersa non conduttiva è stato valutato a partire da misure di conducibilità e determinato applicando l'equazione di Maxwell.

L'attività di ricerca sperimentale ha ricoperto due aspetti principali, ovvero indagare le condizioni di applicabilità della tomografia a resistenza elettrica per lo studio di tali sistemi ed effettuare un'analisi qualitativa della distribuzione spaziale delle fasi al variare del grado di miscelazione del sistema.

A causa delle caratteristiche della tecnica di misura ERT, è stato condotto uno studio approfondito sugli effetti indotti dalla distribuzione delle fasi, sulla misura effettuata dal tomografo.

Per il sistema studiato sono stati quantificati gli effetti di errori di misura, valutando fenomeni quali fringe effect e distorsione delle linee di campo, dovute ad una difformità delle caratteristiche elettriche del sistema.

Per tale motivo, è stata definita una procedura di acquisizione e trattamento dei dati che potesse condurre ad un'analisi qualitativa più accurata, qualora si trattino dispersioni concentrate di liquidi immiscibili in sistemi geometricamente simili, utilizzando l'ERT come tecnica di misura.

Difatti, avendo individuato le possibili fonti di errori si sono analizzati i risultati definendo due criteri di identificazione, per le velocità di *just draw-down*, *complete dispersion* e *perfetta miscelazione*.

Questa analisi effettuata con lo scopo di individuare una mappa di flusso, rappresentativa della dinamica di dispersione di gasolio in acqua al variare dell'hold-up della fase dispersa, così da individuare il regime al variare delle condizioni operative di miscelazione del reattore

Infine, per ridurre gli errori di misura del tomografo elettrico è stata proposta una nuova configurazione sperimentale che si basa sull'uso di elettrodi di guardia.

Infatti, in una situazione ideale, il volume di misura è racchiuso entro le dimensioni degli elettrodi di rilevamento; nello specifico è stato osservato che la zona di misura non è confinata fra gli elettrodi di rilevamento. L'uso di elettrodi di guardia consente di limitare la zona del reattore interessato dalle misure.

Si conclude che schermando il campo, non solo si potrebbe migliorare l'uniformità della distribuzione del campo di rilevamento, in modo che possa essere meglio simulato da un campo bidimensionale, ma anche diminuire l'estensione assiale dello spazio di misurazione.

Un'attenta progettazione degli elettrodi di guardia potrebbe permettere di ottenere un volume di misura limitato e all'interno di questo avere uniformità del campo elettrico.

Bibliografia

E. L. Paul & S. M. Kresta, Handbook of industrial mixing. 2004.

F. Laurenzi; M. Coroneo; G. Montante ; A. Paglianti A.; F. Magelli. “Experimental and computational analysis of immiscible liquid-liquid dispersions in stirred vessels” Chem. Eng. Res. 2009.

J.M. Church, R. Shinnar. “Stabilizing liquid-liquid dispersions by agitation”, 1961.

Zhou, G. W.; Kresta, S. M. “Evolution of drop size distribution in liquid-liquid dispersion for various impellers”. Chem. Eng. Sci. 1998, 53, 2099–2113.

Y. Zhao, X. Li, J. Cheng, C. Yang & Z. Mao, “Experimental Study on Liquid À Liquid Macromixing in a Stirred Tank”. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011.

J.O. Hinze. “Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes”, 1955.

C. Y. Wang; R. V. Calabrese. “Drop breakup in turbulent stirred tank contactors. Part II: Relative influence of viscosity and interfacial tension”. *AIChE*, 1986.

Th. N. Zwietering “Suspending of solid particles in liquid by agitators”, 1958.

Skelland A. H. P. & G. G. Ramsay. “Minimum Agitator Speeds for Complete Liquid—Liquid Dispersion.” *Ind. Eng. Chem. Res.* **26**, 77–81, 1987.

Armenante, P. M.; Huang, Y. T. “Experimental determination of the minimum agitation speed for complete liquid-liquid dispersion in mechanically agitated vessels.” *Ind. Eng. Chem. Res.* 1992, 31.

Shinji Nagata, “Mixing: Principles and Applications”, book 1975.

Armenante, P. M., Huang, Y. T. & Li, T. “Determination of the minimum agitation speed to attain the just dispersed state in solid-liquid and liquid-liquid reactors provided with multiple impellers.” *Chem. Eng. Sci.* 47, 2865–2870, 1992.

Derksen, J.J. “Multi-scale simulations of stirred liquid-liquid dispersions.” *Chem. Eng. Res.* 2007.

Colenbrander, G.W. “Experimental findings on the scale-up behaviour of the drop size distribution of liquid / liquid dispersions in stirred vessels”, 2000.

H.S. Tapp; A.J. Peyton; E.K. Kemsley; R.H. Wilson, “Chemical engineering applications of electrical process tomography”, 2002.

- R. Mann F. J. Dickin, M. Wang, T. Dyakowski, R. A. Williams, R. B. Edwards, A. E. Forrest P. J. Holden, "Application of electrical resistance tomography to interrogate mixing processes at plant scale", 1997.
- Fransolet, E., Crine, M., L'Homme, G., Toye, D. & Marchot, P. "Electrical resistance tomography sensor simulations: Comparison with experiments." *Meas. Sci. Technol.* **13**, 1239–1247, 2002.
- P. Hua, E.J. Woo, J.G. Webster, W.J. Tompkins. "Finite element modeling of electrode-skin contact impedance in electrical impedance tomography", 1993.
- Paulson et al. "Electrode Modelling in Electrical Impedance Tomography", 1992.
- D. G. Gisser, D. Isaacson, and J. C. Newell. "Electric Current Computed Tomography and Eigenvalues." *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 50, No. 6, pp. 1623-1634, 1990.
- V. L. Chechurin N. V. Korovkin M. Hayakawa, "Inverse Problems in Electric Circuits and Electromagnetics Field Theory" (pp 1-46), Part of the Mathematical and Analytical Techniques with Applications to Engineering, 2007.
- N J Avis, D C Barber, B H Brown and M. A. Kiber. "Back-projection distortions in applied potential tomography images due to non-uniform reference conductivity distributions", 1992.
- Wei K, Qiu C, Soleimani M, Primrose K. ITS "Reconstruction tool-suite: an inverse algorithm package for industrial process tomography", 2015.
- T. Dyakowski, F. C. J. Laurent, A. J. Jaworski, "Applications of electrical tomography for gas-solids and liquid-solids flows -a review" Volume 112, Issue 3, Pages 174-192, 2000.
- M. Wang, "Inverse Solutions for Electrical Impedance Tomography Based on Conjugate Gradients Methods", *Measurement Science and Technology* Vol. 13, Issue 1, pp. 101-117, 2001.
- S. Lioumbas, a Chatzidafni, and T. D. Karapantsios, "Spatial considerations on electrical resistance tomography measurements," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 5, 2014.
- Jiangtao Sun and Wuqiang Yang. "Fringe effect of electrical capacitance and resistance tomography sensors" *Meas. Sci. Technol.* 24, 2013.
- Yixin Ma, Ling-An Xu, Changzhen Jiang. "Experimental study of the guard electrodes in ERT system", 1999.
- W Q Yang and Lihui Peng, "Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography", 2003.
- Ma Y X., Wang H. "Simulation study of electrode array used in an ERT system", 1997 .

Appendice

A1. CODICE MATLAB PER IL FITTING DEL MODELLO DESCRITTIVO DEL CAMPO ELETTRICO

```
close all
clear all
clc
%%
draw3dfield = true;
%% actual calculations
sigma_1 = 1;
sigma_2 = 0;
cutoff = 0.05;
Areatt = 0.041905271;
A_cell = 132.25;%mm^2
%
planefour = true;
if planefour
    Numberplanes = 4;
else
    Numberplanes = 3;
end
V = [50:25:3775]; %3775 is the oil volume which h0 is 0
H_step = length(V); % N
dh = 25e-6/Areatt;
load('positions.mat');
N_pxl = size(positions,1);
if draw3dfield
    [Xcc, refx, Ux] = meshify(positions(:,1));
    Xcc = Xcc';
    refx = refx';
    Ux = Ux';
    [Ycc, refy, Uy] = meshify(positions(:,1));
end
%
[B,I] = sortrows([positions(:,1),positions(:,2)], [1,2]);
r(:) = sqrt((B(:,1)-116).^2 + (B(:,2)-116).^2)/1000;
%
for qq = 1:H_step
    file = ['acquisizione_' num2str(V(qq)) 'ml_cond_map.csv'];
    path = ['./V=' num2str(V(qq)) 'ml/'];
    [P1,P2,P3,P4] = import_data_ERT([path file]);
    Pm(:,1) = mean(P1,1);
    Pm(:,2) = mean(P2,1);
    Pm(:,3) = mean(P3,1);
    Pm(:,4) = mean(P4,1); %
    Pm = Pm(I,:);
    M3(:,qq) = Pm(:,3);
    save('M3.mat','M3');
    alpha = (2*sigma_1 + sigma_2 -2.*Pm-
Pm.*sigma_2./sigma_1)./(Pm+2*(sigma_1-sigma_2)-Pm.*sigma_2./sigma_1);
    profile = zeros(size(Pm,1),size(Pm,2));
    profile(abs(alpha)>=cutoff) = 1;
    prof(:, :, qq) = profile;
    num_of_ycells(qq) = sum(profile(:,3));
```

```

%
fprintf('%d \n', num_of_ycells(qq));
%
h0(qq) = (0.25 - V(qq)*(10^(-6)) / Areatt) - 0.16;
A_yellow(qq) = num_of_ycells(qq) * A_cell*1e-6;
r_yellow(qq) = sqrt(A_yellow(qq)/pi);
dV(qq) = dh*A_yellow(qq);
%
if draw3dfield
C(:, :, qq) = mesh_distribute_data(Xcc, Ycc, [alpha(:, 3) positions]);
end
%
end
if draw3dfield
t = 1;
n = 180;
figure(2)
[Xmc, Ymc, Zmc] = cylinder(t, n);
Xmc = Xmc.*0.116;
Ymc = Ymc.*0.116;
Zmc(1, :) = Zmc(1, :) - 0.16;
Zmc(2, :) = Zmc(2, :) - (1-0.09);
ss1 = surf(Xmc, Ymc, Zmc);
ss1.FaceAlpha = 0.5;
ss1.FaceColor = [0.8 0.8 0.8];
ss1.EdgeColor = 'none';
hold on
Xms = Xmc.*(1+0.01);
Yms = Ymc.*(1+0.01);
Zms(1, :) = Zmc(1, :).*0 - 0.01;
Zms(2, :) = Zmc(2, :).*0 + 0.01;
ss2 = surf(Xms, Yms, Zms);
% ss2.FaceAlpha = 0.5;
ss2.FaceColor = 'red';
ss2.EdgeColor = 'none';
[XXX, YYY, ZZZ] = meshgrid((refx-116)./1000, (refy-116)./1000, h0);
figure(2)
W = C.*Ux.*Uy;
scale_fac = 0.935;
p0 = patch(isocaps(XXX.*scale_fac, YYY.*scale_fac, ZZZ, W, cutoff), ...
'FaceColor', 'blue', 'EdgeColor', 'none');
p0.CData = [];
p1 =
patch(isosurface(XXX.*scale_fac, YYY.*scale_fac, ZZZ, W, cutoff, ZZZ), 'EdgeCol
or', 'none', 'FaceColor', 'interp');
% p2 = patch(isosurface(XXX, YYY, -ZZZ, W, cutoff, -
ZZZ), 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'interp');
colormap('jet');
caxis([0 max(h0)])
lighting gouraud
colorbar
axis equal
end
%
dx = diff(B(:, 2));
l = mode(dx);
X = [(B(:, 1)-1/2)'; (B(:, 1)-1/2)'; (B(:, 1)+1/2)'; (B(:, 1)+1/2)'];

```

```

Y = [(B(:,2)-1/2)'; (B(:,2)+1/2)'; (B(:,2)+1/2)'; (B(:,2)-1/2)'];
figure(1)
plot(r_yellow,h0);
xlabel('r - [m]')
ylabel('h_0 - [m]')
%% plot h0 vs conductivity
for i = 1:15:N_pxl
    figure(100)
    plot(M3(i,:),h0);
    hold on
    xlim([0.4,1.1])
    ylim([0,0.09])
    legend('pxl(1)', 'pxl(16)', 'pxl(31)', 'pxl(46)', 'pxl(61)',
        'pxl(76)', 'pxl(91)', '...')
end
xlabel('non dimensional conductivity')
ylabel('h_0 - [m]')
grid on
str = {'h_0 is the axial distance between the L-L interface and the
middle of the measurement plane.'};
text(.025,0.6,str)
%% "Optimization" of the model
for j = 1:H_step
    N(j) = 2*(H_step-j+1);
    % sigma_w(:,j) = ones(N_pxl,1)./(N(j)-1).*M3(:,1);
    sigma_w(:,j) = ones(N_pxl,1)./(N(j));
end
%
for k = 1:H_step %iterate on the extension of N
    % k
    % N(k)
    for j = 1:H_step % iterate on h0
        % j
        if j < H_step - (N(k)/2-1)
            sig(:,j,k) = sigma_w(:,k).*N(k);
        else
            sig(:,j,k) = sigma_w(:,k).*(N(k)-j+(H_step - (N(k)/2)));
            % fprintf('%d \n', (N(k)-j+(H_step - (N(k)/2))));
        end
    end
    err_O(:, :, k) = abs(sig(:, :, k)-M3)./M3;
    % if N(k)==148
    % k
    % end
end
LL = sum(err_O,2);
[~,idx] = min(LL, [],3);
for i =1:N_pxl
    sig_optimized(i,:) = sig(i,:,idx(i));
    N_disc(i) = N(idx(i));
end
save ('N_disc.mat', 'N_disc');
err = err_O(:, :, 1);
err_optimized = abs(sig_optimized-M3)./M3;
for j =1:10:H_step-1
    figure(j+1000)

```

```

    patch(X,Y,err(:,j));
    colorbar
    caxis([0 0.2])
    title(['h_0 = ' num2str(h0(j)*1000) ' mm, \alpha_{olio} = '
num2str(V(j)/10600*100)]);
    %
    figure(j+2000)
    patch(X,Y,err_optimized(:,j));
    colorbar
    caxis([0 0.2])
    title(['h_0 = ' num2str(h0(j)*1000) ' mm, \alpha_{olio} = '
num2str(V(j)/10600*100)]);
end
figure
patch(X,Y,N_disc);
colorbar
caxis([200 300])
save('sig_optimized.mat','sig_optimized');
%%
if draw3dfield
    Cop(:, :) = mesh_distribute_data(Xcc,Ycc,[h0(idx)' positions]);
    t = 1;
    n = 180;
    figure(14)
    [Xmcop,Ymcop,Zmcop] = cylinder(t,n);
    Xmcop = Xmcop.*0.116;
    Ymcop = Ymcop.*0.116;
    Zmcop(1,:) = Zmcop(1,:) - 0.16;
    Zmcop(2,:) = Zmcop(2,:) - (1-0.09);
    ss1op = surf(Xmcop,Ymcop,Zmcop);
    ss1op.FaceAlpha = 0.5;
    ss1op.FaceColor = [0.8 0.8 0.8];
    ss1op.EdgeColor = 'none';
    hold on
    Xmsop = Xmcop.*(1+0.01);
    Ymsop = Ymcop.*(1+0.01);
    Zmsop(1,:) = Zmcop(1,:).*0 - 0.01;
    Zmsop(2,:) = Zmcop(2,:).*0 + 0.01;
    ss2op= surf(Xmsop,Ymsop,Zmsop);
    %ss2op.FaceAlpha = 0.5;
    ss2op.FaceColor = 'red';
    ss2op.EdgeColor = 'none';
    [XXXop, YYYop, ZZZop] = meshgrid((refx-116)./1000,(refy-
116)./1000,h0);
    % figure(14)
    Wop = Cop.*Ux.*Uy;
    Wop(Wop ==0) = NaN;
    scale_facop = 0.935;
    surf(XXXop(:, :, 1).*scale_facop,YYYop(:, :, 1).*scale_facop,Wop)
    %p0op =
    patch(isocaps(XXXop.*scale_facop,YYYop.*scale_facop,ZZZop,Wop,cutoff),...
    % % 'FaceColor','blue','EdgeColor','none');
    % % p0op.CData = [];
    % p1op =
    patch(isosurface(XXXop.*scale_facop,YYYop.*scale_facop,ZZZop,Wop,cutoff,Z
ZZop),'EdgeColor','none','FaceColor','interp');

```

```

    %      % p2 = patch(isosurface(XXX,YYY,-ZZZ,W,cutoff,-
ZZZ), 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'interp');
    colormap('jet');
    lighting gouraud
    colorbar
    axis equal
    caxis([h0(50) max(h0)])
    xlabel('x - [m]');
    ylabel('y - [m]');
    zlabel('h_0 - [m]');
end

```

A2. CODICE MATLAB PER LA REGRESSIONE LINEARE DELLO SCOSTAMENTO MASSIMO DI CONDUCEBILITA'

```

clear all
clc
%%
V_diesel = 1500;
%%
COND = 0;
Leash = 0;
%%
str = ['Delta_eq_' num2str(V_diesel) 'ml.mat'];
name = ['V' num2str(V_diesel)];
st.(name) = load(str);
%
% st.(name).err = sigmf(st.(name).N, [1.8 50]);
xdata = st.(name).N(1:end);
ydata = st.(name).MAX_err(1:end);
%%
while COND == 0
    %
    close all
    figure(1)
    plot(xdata,ydata,'ro');
    hold on
    if Leash ==1
        plot(x,top_int,'--b')
        plot(x,bot_int,'--b')
    else
        ax = gca;
        Ymin = ax.YLim(1);
        Ymax = ax.YLim(2);
    end
    ylim([Ymin,Ymax])
    [X,Y] = ginput;
    if Leash ==1
        close all
        plot(xdata,ydata,'ro');
        hold on
    end
end

```

```

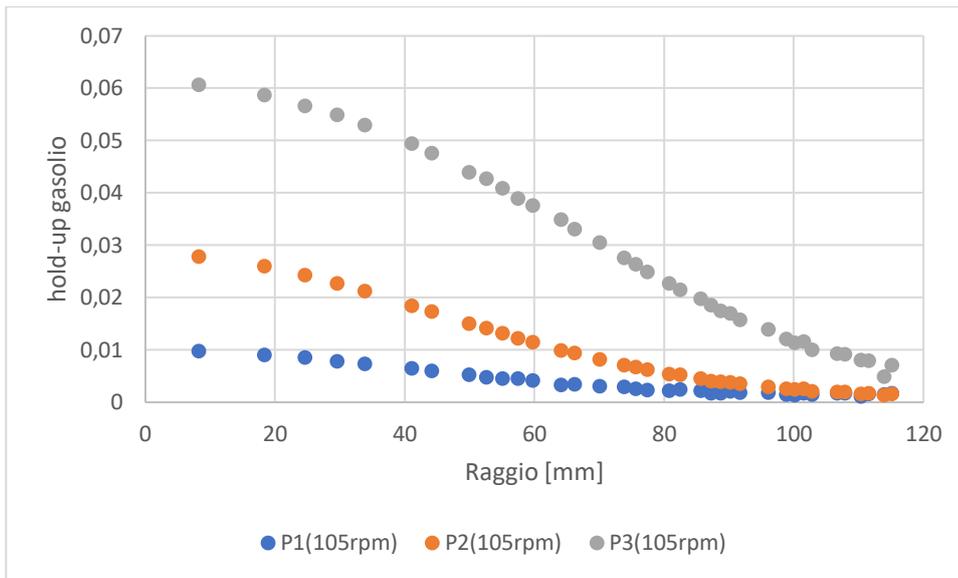
    idx = knnsearch([xdata,ydata],[X,Y]) ;
    xi = xdata(idx) ;
    yi = ydata(idx) ;
    [xi, I] = sort(xi);
    yi = yi(I);
    STATS = regstats(yi,xi,'linear','beta');
    [top_int, bot_int,x] =
regression_line_ci(0.8,STATS.beta,xi,yi,100,min(xdata),max(xdata));
    plot(x,top_int,'--b')
    plot(x,bot_int,'--b')
    ylim([Ymin,Ymax])
    plot(xi,yi,'bo');
    answer = questdlg('Is there some new point inside the interval of
acceptance?', ...
    'Acceptance...', ...
    'Yes','No','Yes');
    switch answer
        case 'Yes'
            COND = 0;
            Leash = 1;
        case 'No'
            COND = 1;
    end
end

ymin= mean(ydata(1:min(idx)-1))
x1= xdata(1:end);
y1= ones(size(x1,1)).*ymin;
retta1= [x1,y1];
plot(x1, y1, '-b');
%
y= mean(ydata(max(idx)+1:end-1));
x2= xdata(1:end);
y2= ones(size(x2,1)).*y;
retta2=[x2, y2];
plot(x2, y2, '-b');
Njd= (ymin-STATS.beta(1))/STATS.beta(2)
Ncd= (y-STATS.beta(1))/STATS.beta(2)

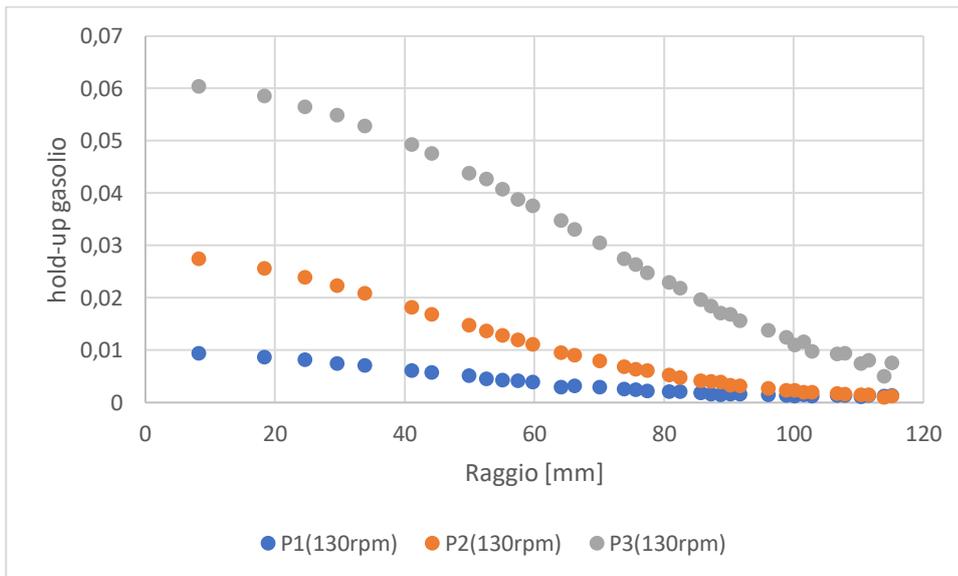
plot(Njd, ymin, '*');
plot(Ncd, y, '*').

```

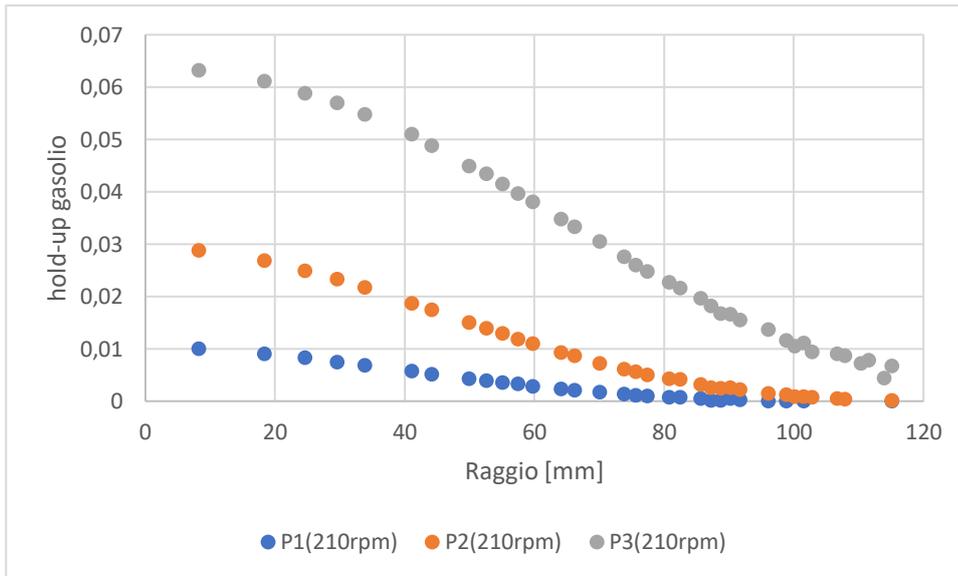
B1. ANDAMENTO RADIALE DELLA FRAZIONE DI GASOLIO PER $\varphi_g = 0.047$



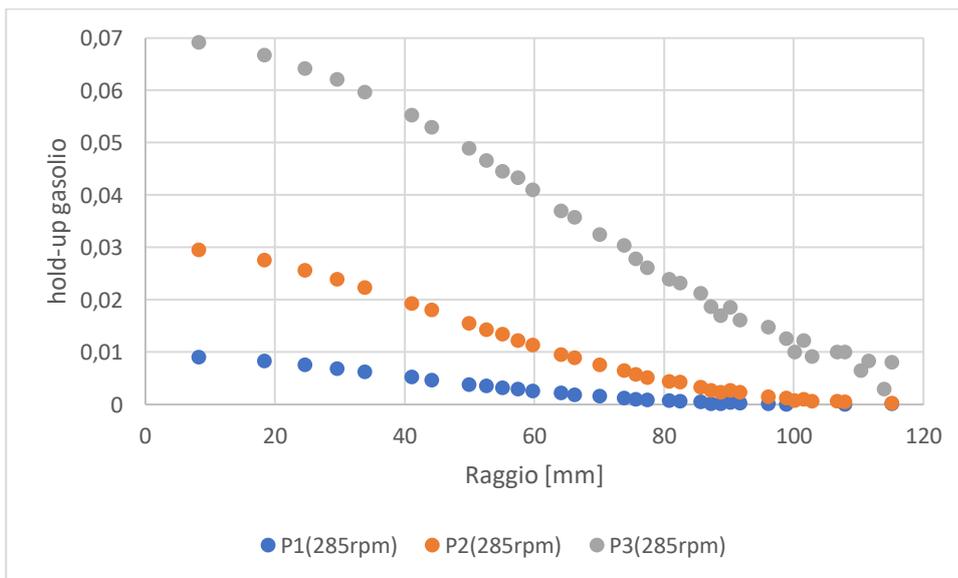
1. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=105$ rpm,



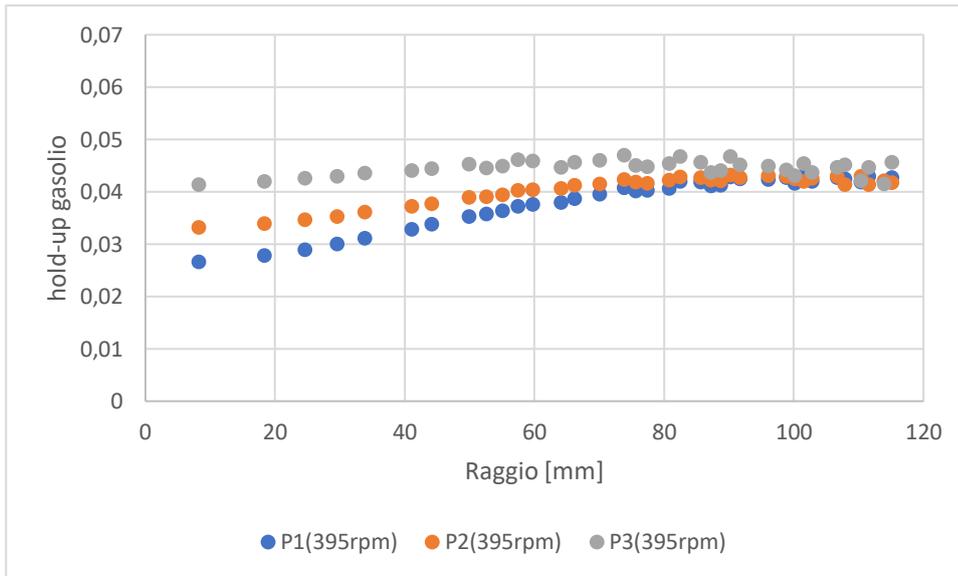
2. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=130$ rpm,



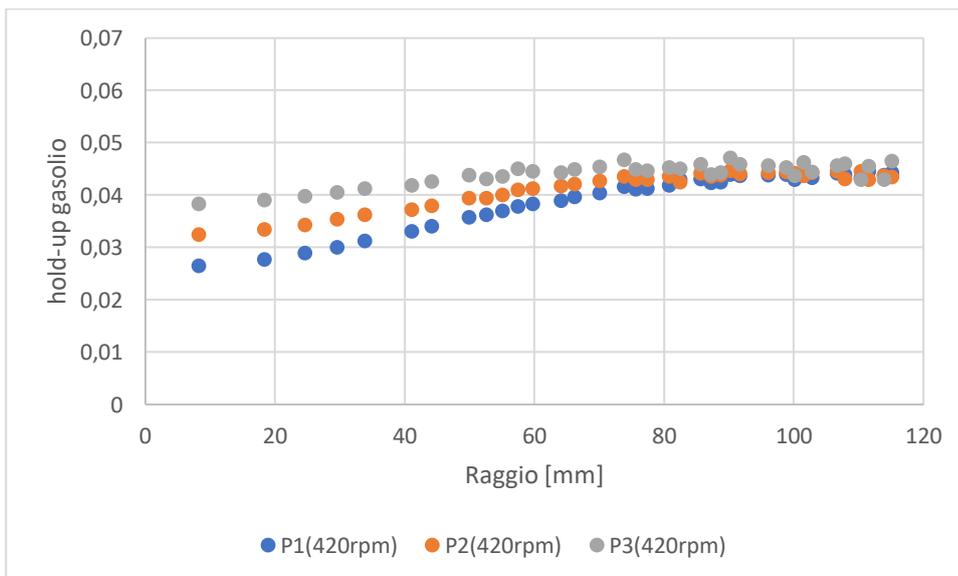
3. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=210$ rpm,



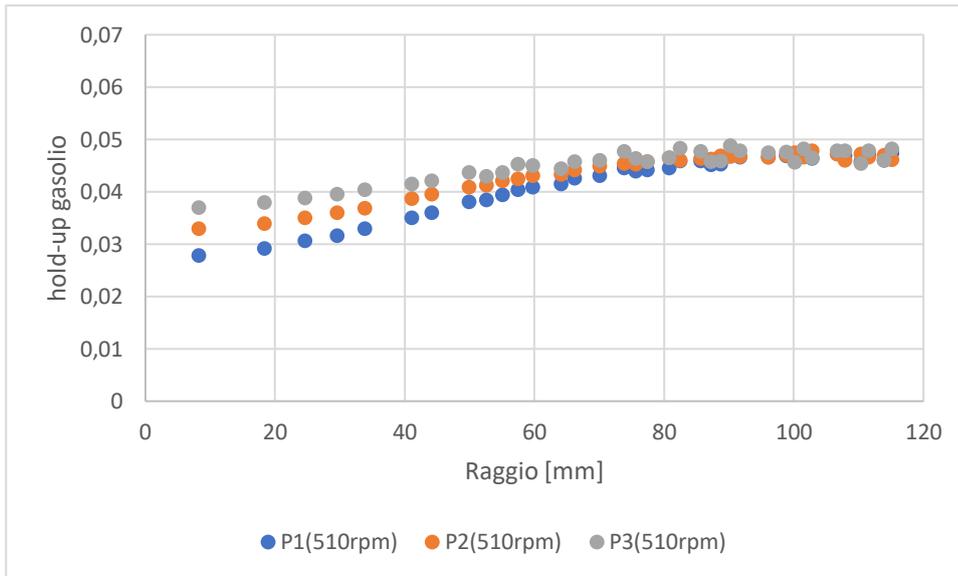
4. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=285$ rpm,



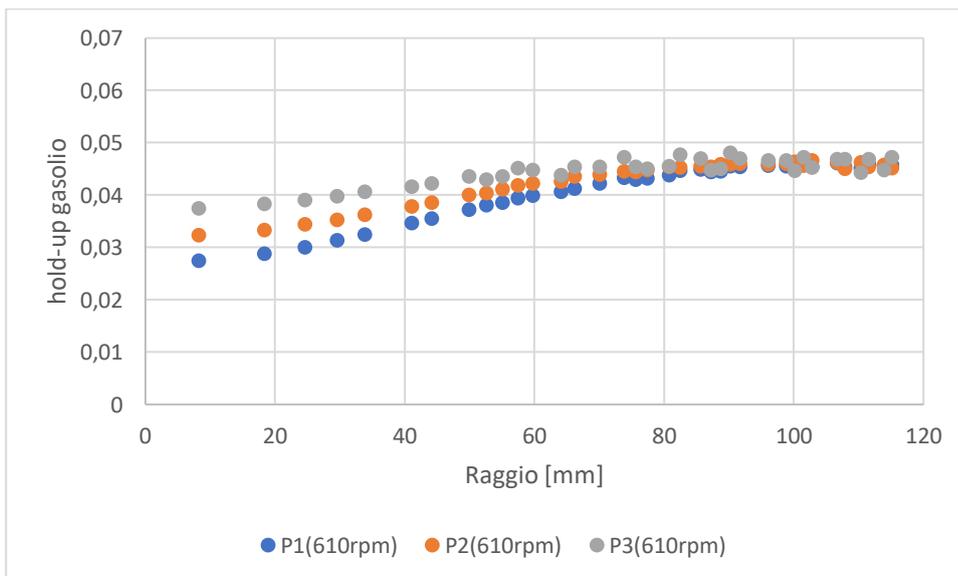
5. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=395$ rpm,



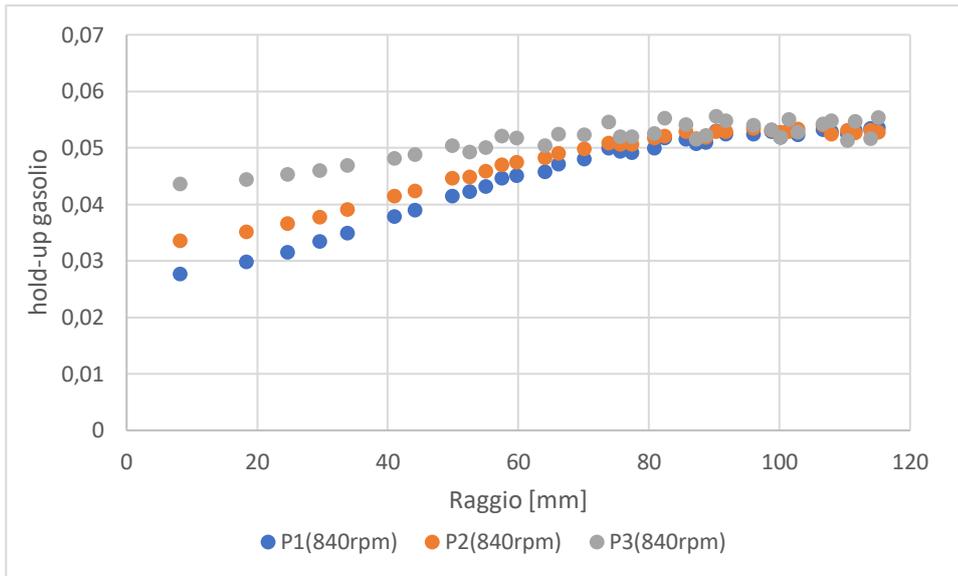
6. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=420$ rpm,



7. .Andamento radiale della frazione di gasolio, N=510 rpm,

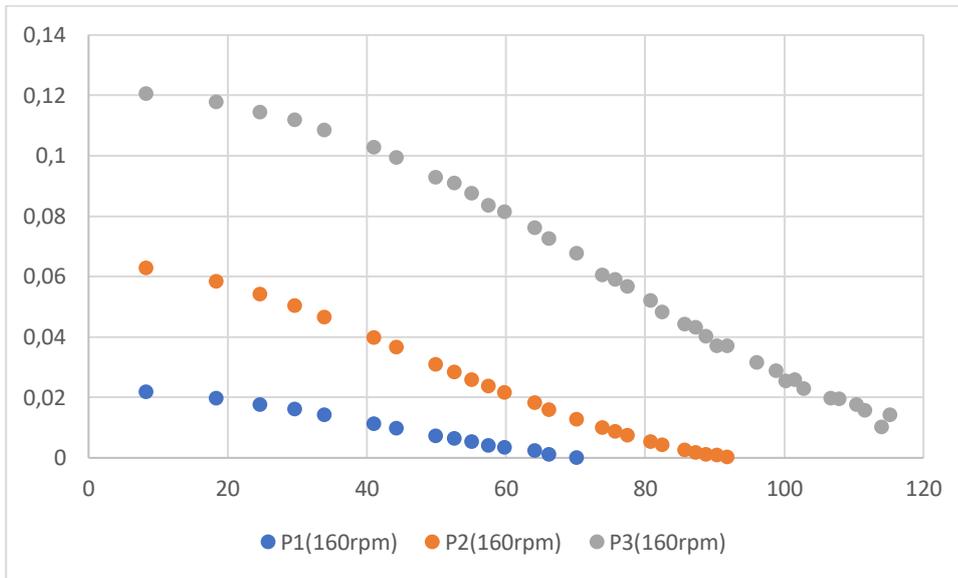


8. .Andamento radiale della frazione di gasolio, N=610 rpm,

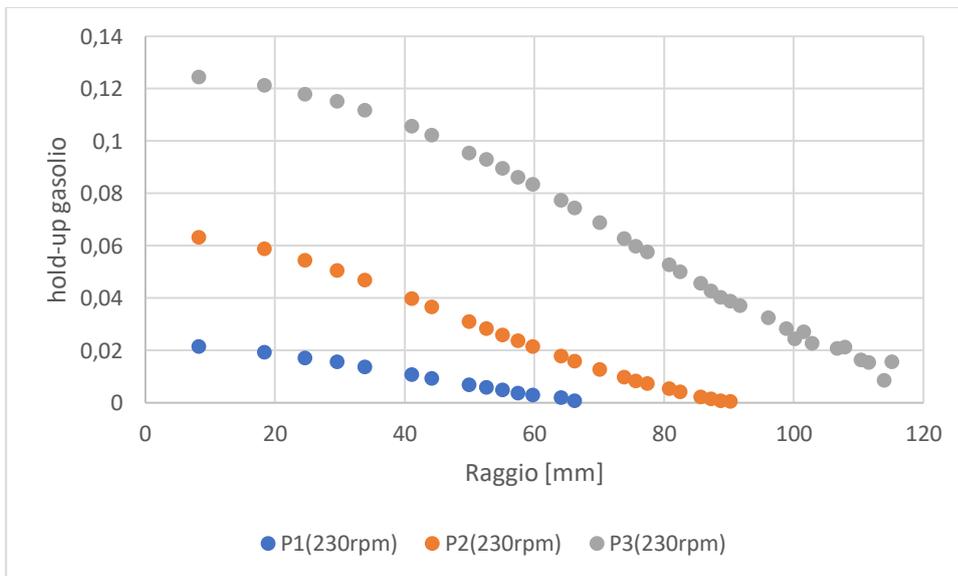


9. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=840 rpm,

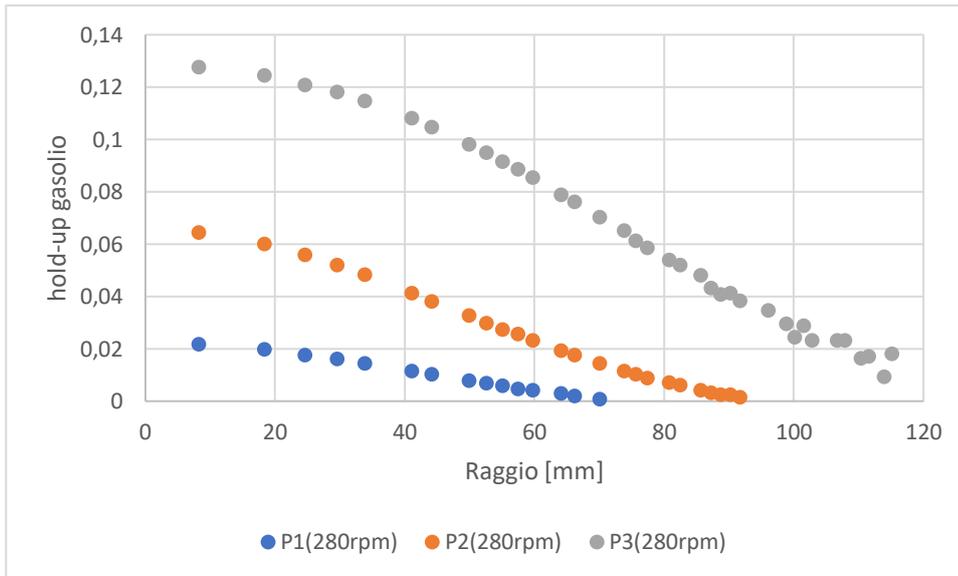
B2. ANDAMENTO RADIALE DELLA FRAZIONE DI GASOLIO PER $\varphi_g = 0.09$



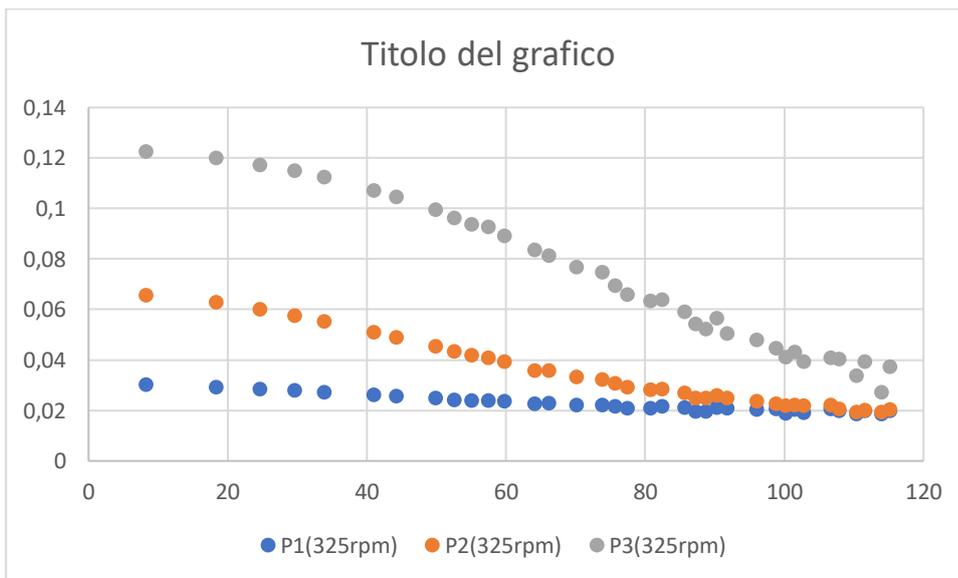
10. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=160$ rpm,



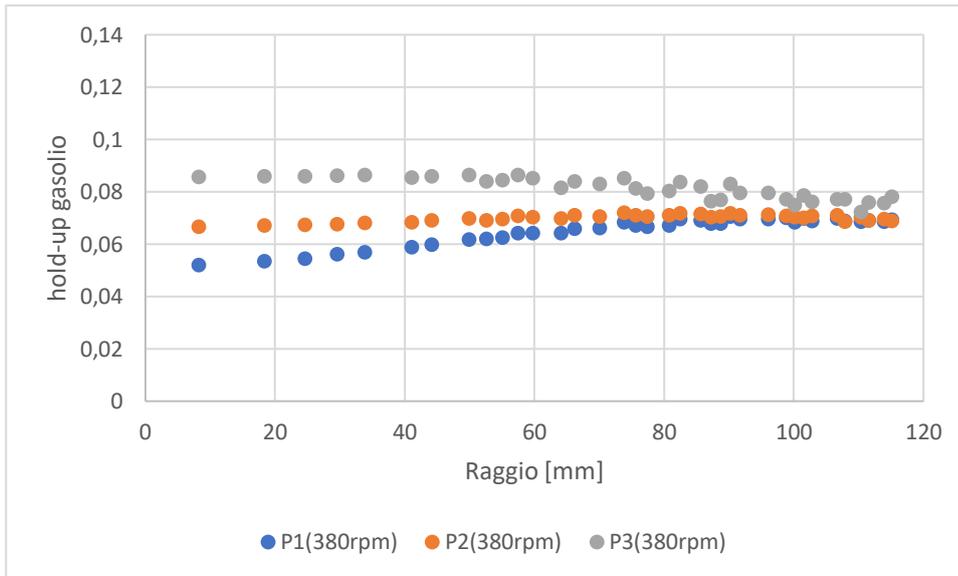
11. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=230$ rpm,



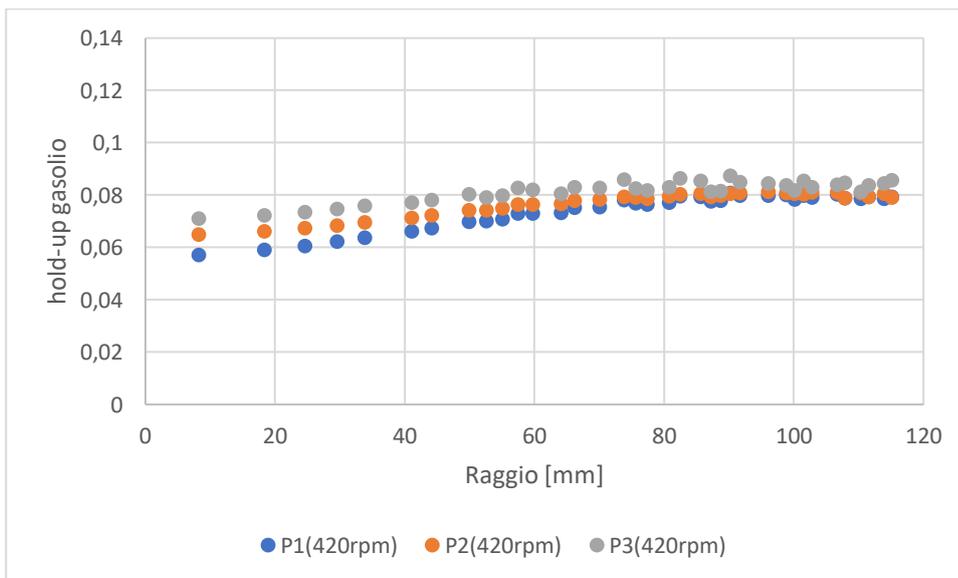
12. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=280$ rpm,



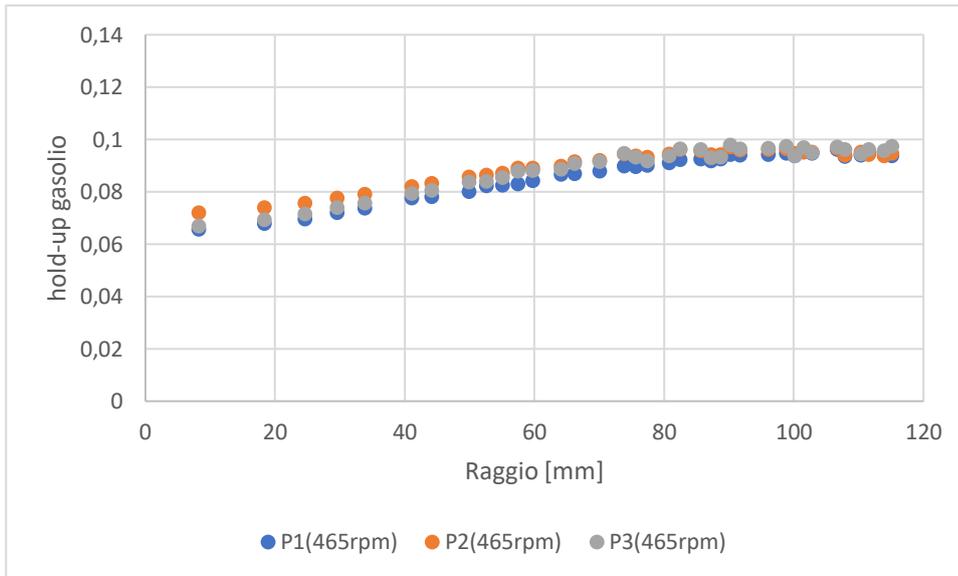
13. Andamento radiale della frazione di gasolio, $N=325$ rpm,



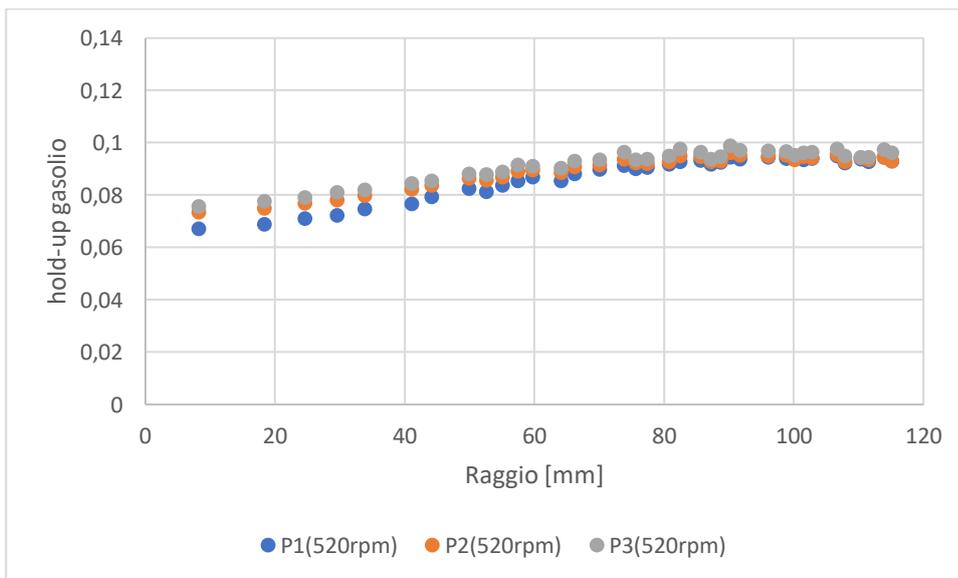
14. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=380 rpm,



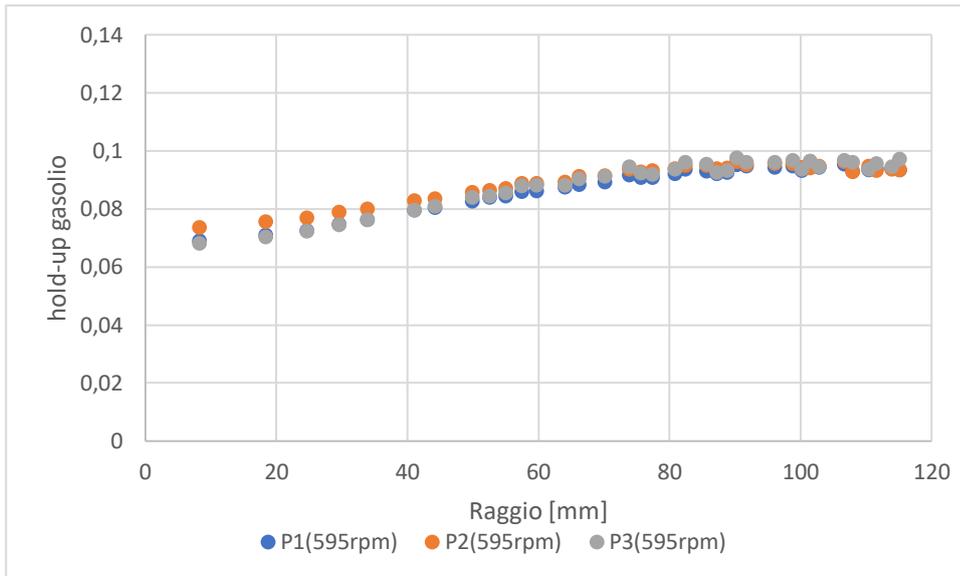
15. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=420 rpm,



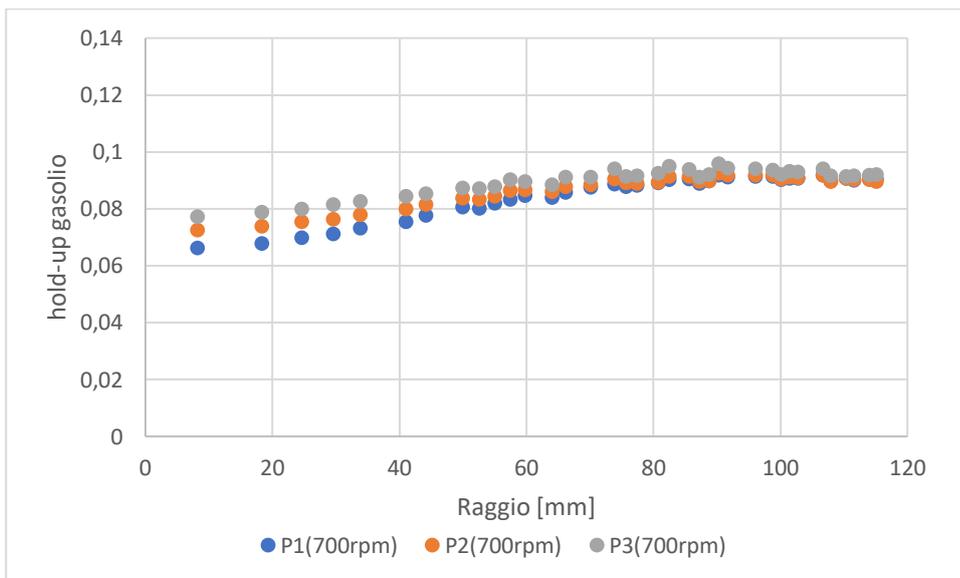
16. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=465 rpm,



17. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=520 rpm,



18. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=595 rpm,



19. Andamento radiale della frazione di gasolio, N=700 rpm,

