

1. STATO DELL'ARTE

La separazione liquido-liquido a fondo pozzo è un fenomeno che è stato largamente studiato negli ultimi anni sia dal punto di vista strettamente teorico che dal punto di vista impiantistico.

Tali studi hanno portato, da una parte, a modelli di analisi del fenomeno e dall'altra, a disporre di diverse tecnologie per ottenere la separazione olio/acqua downhole.

I problemi riguardanti la separazione dovuta a fenomeni gravitativi o a fenomeni di coalescenza, riguardano diversi settori sia dell'ambiente che dell'industria e tra questi assume una particolare importanza la separazione all'interno delle acque di prima pioggia.

1.1. MODELLI ANALITICI

Lo scopo di questi studi è di sviluppare un metodo di calcolo standard per il dimensionamento del separatore olio/acqua adattabile a diverse applicazioni al variare diⁱⁱ:

- Proprietà chimico fisiche
- Distribuzione dimensionale delle gocce
- Dimensioni del sistema di separazione
- Portata di olio e di acqua

per studiare la separazione delle due fasi è, pertanto, necessario considerare tutta una serie di fenomeni:

- formazione e stabilità delle gocce
- droplet-settling
- tempo di residenza
- fenomeni di coalescenza
- flooding

Gli studi condotti hanno portato alla definizione di un modello per la determinazione del campo di variazione dimensionale delle gocce che a sua volta, consente di ottenere la separazione tra le fasi in un sistema disperso. Sulla base di bilanci di forze esercitate dalla fase continua su quella dispersa è possibile ricavare il diametro minimo delle gocce che garantisce la separazione, mentre valutando tensione all'interfaccia ed energia di dissipazione si ricava il massimo diametro stabile, al di sopra del quale le gocce tendono a frazionarsi.

Tali risultati permettono di effettuare previsioni sull'efficienza di separazione ma non sono utili al fine di dimensionare il separatore.

A tale scopo sono state sviluppate alcune teorie confrontate ed integrate tra loro:

1. *Droplet setting*: Affinché una goccia immersa in un fluido in moto venga separata è necessario garantire che la velocità del mezzo sia inferiore alla velocità di caduta libera della goccia stessaⁱⁱⁱ. Essendo la velocità di caduta libera della goccia funzione delle dimensioni della goccia stessa, il modello è stato sviluppato tenendo conto dei fenomeni di coalescenza^{iv}.

2. *Tempo di residenza*: Attraverso misure sperimentali è possibile ricavare il tempo necessario per ottenere la separazione delle fasi, sulla base di questo dato sono state sviluppate delle correlazioni per il dimensionamento del separatore. Tale metodo tuttavia trova limitata applicazione a causa della necessità di condurre misure di tipo sperimentale^{v vi}.

3. *Flooding*: Affinché si verifichi la separazione le fasi devono muoversi in controcorrente; l'efficienza di separazione è pertanto limitata dal fenomeno del flooding, trascinarsi della fase dispersa da parte della fase continua, che impone una limitazione sulla velocità del mezzo continuo all'interno del pozzo^{vii viii ix}

1.2 SEPARAZIONE DOWS

Un problema rilevante a livello dell'estrazione del greggio è senz'altro quello del trattamento dell'acqua prodotta^x, sia da un punto di vista ambientale sia da un punto di vista economico.

L'acqua prodotta all'interno dei giacimenti di petrolio è tipicamente una salamoia pesante e presenta una salinità rilevante, parecchie volte più elevata di quella dell'acqua di mare (60000-180000 mg/l di solidi disciolti totali).

Pur avendo spesso una tossicità modesta, questa salamoia è presente in volumi decisamente rilevanti ed è quindi facilmente intuibile il problema economico legato al trattamento della stessa^{xi}.

Gli operatori devono sopportare la spesa di trattamento di questa acqua. Questi costi possono variare approssimativamente da \$0.10/barile per un trattamento in loco a \$1.00/barile, per il trasporto dell'acqua tramite autocarri, ad \$2.00/barile per i processi di trattamento industriale, quali possono essere osmosi d'inversione ed evaporazione.

Dal punto di vista ambientale il trattamento di una quantità così rilevante di acqua in superficie, con prodotti chimici presenta ovviamente dei rischi decisamente elevati e non per ultimo un ulteriore problema legato alla produzione di acqua, è quello del rischio di saturazione di questa vicino al pozzo, fattore che può interagire negativamente con il flusso di greggio nello stesso. Oltre che i costi di gestione, l'acqua prodotta rappresenta una minaccia potenziale per contaminare le risorse idriche in caso di rilasci accidentali. Le perdite dalle condutture o dai serbatoi possono avere effetto sulle grandi zone di terreno di superficie e possono migrare nelle acque di superficie o in falda freatica. Le salamoie prodotte hanno la capacità di sterilizzare il terreno e di perturbare i grandi volumi di acqua dolce variandone la salinità.

Per questi serie motivi dagli anni novanta in poi è stata studiata a livello industriale una tecnologia denominata DOWS (downhole water-oil separator), che in qualche modo potesse ovviare a questi problemi o quantomeno ridurli.

La tecnologia di DOWS dà agli operatori la possibilità di lasciare la maggior parte della salamoia in ambiente sotterraneo, e di migliorare l'efficienza del sistema^{xii}.

I primi impianti sperimentali sono nati negli Stati Uniti e in Canada, dove questa tecnologia è a tutt'oggi la più diffusa e dove parallelamente ad una applicazione sul

campo si è evoluto uno studio a livello di laboratorio accompagnato da rilevanti sforzi di modellistica.

Da un punto di vista prettamente economico, la tecnologia DOWS è rilevante in quanto



Figura 1

determina un aumento della percentuale di olio in uscita dal pozzo rispetto a quella dell'acqua (water-cut) e di conseguenza un aumento dell'efficienza dello stesso, con evidenti vantaggi anche da un punto di vista economico.

1.2.1 TECNICHE DI SEPARAZIONE DOWS

Le tecniche di separazione DOWS utilizzate a livello industriale sono due^{xiii}:

- SEPARAZIONE PER GRAVITÀ
- IDROCICLONI

L'utilizzo di una tecnica rispetto all'altra dipende dalle singole applicazioni, in quanto entrambe presentano dei vantaggi e degli svantaggi.

Qui di seguito viene riportata una breve descrizione delle due tecniche.

1.2.1.1 SEPARATORI PER GRAVITÀ

I separatori di gravità utilizzano il pozzo trivellato come alloggiamento di separazione in cui l'olio si troverà nella parte superiore e l'acqua sarà nella parte inferiore della struttura. Gli ingressi sono ampiamente separati e questo fattore aiuta l'acqua a dirigersi verso la zona inferiore, mentre l'olio è pompato alla superficie. I separatori per gravità devono permettere che il liquido prodotto rimanga nel pozzo per un tempo sufficiente a permettere la separazione delle due fasi, tali tempi di permanenza limitano la quantità di volume trattabile dei due fluidi. Lo schema di un separatore per gravità è riportato in *figura 2*. Il principio sul quale sono basati questi separatori è lo sfruttamento della diversa densità delle due componenti della miscela acqua-olio.

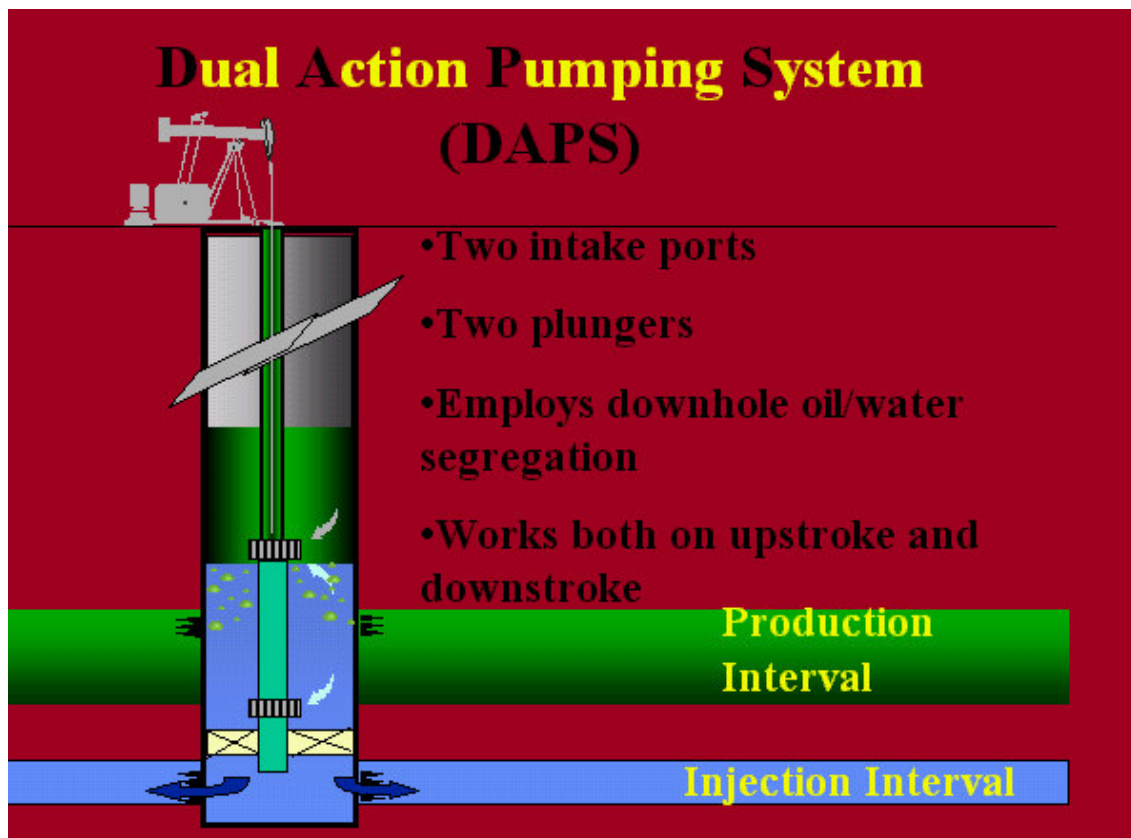


Figura 2

La separazione per gravità può aver luogo sia in pozzi verticali sia in pozzi orizzontali, in entrambi i casi vengono utilizzate delle pompe a stantuffo^{xiv xv}, le uniche utilizzabili nella tecnica di separazione per gravità. In questo tipo di separazione sono necessarie due pompe (DAPS dual action pumps system) una per l'acqua e una per l'olio.

Questa tecnica presenta un importante vantaggio quello di costi relativamente modesti rispetto agli idrocycloni, ma anche il problema di poter trattare delle quantità di fluido modeste in quanto sarebbero necessari dei volumi troppo ingombranti per permettere la separazione delle due fasi e spesso questo è un fattore limitante.

1.2.1.2 IDROCICLONI

Sono idrocycloni come dispositivi statici che usano la loro geometria per ruotare i liquidi alle alte velocità, Queste rotazioni inducono il liquido più pesante (acqua) ad andare in basso, mentre l'olio è prodotto attraverso la parte superiore. I complessivi multipli dell'idrocyclone possono essere collegati parallelamente, per trattare portate più grandi di quella realizzabile con una singola unità, o in serie per aumentare l'efficienza del separatore.

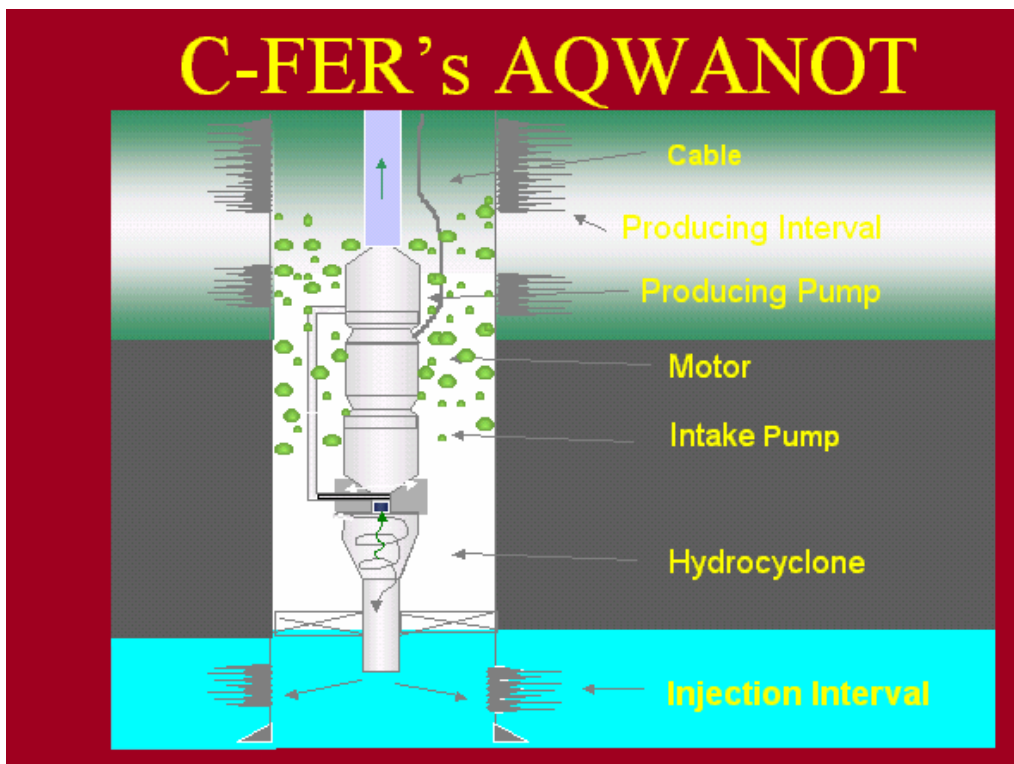


Figura 3

Questa tecnica rispetto alla separazione per gravità presenta il notevole vantaggio di poter trattare una quantità di fluido molto più elevata, come si può notare in *figura3*, la miscela acqua-olio passa in continuo attraverso l'idrocyclone, pertanto non è necessario un volume statico continuamente occupato dai due fluidi come nel caso della separazione per gravità. Allo stesso tempo, essendo una separazione meccanica, basata

cioè sulla diversa densità dei due fluidi che messi in rotazione si comportano in maniera diversa sotto l'azione della forza centrifuga, presenta l'evidente svantaggio di costi di produzione decisamente più elevati, il costo medio di un impianto di separazione per gravità può variare dai 15000\$-25000\$, mentre per quanto riguarda gli idrocycloni questo sale ad un intervallo compreso fra i 90000\$-2500000\$. In questa tecnica di separazione si possono utilizzare diversi tipi di pompe sia quelle a pistone, sia quelle a cavità, sia pompe elettriche sommerse (EPS)^{xvi xvii}. Le unità dell'idrocyclone DOWS hanno la capacità di prendere parecchie migliaia di barilotti al giorno di liquido che contiene acqua al 90% e dividere questo in due flussi - un flusso pulito dell'acqua salata è pompato in una zona di eliminazione mentre un'altra corrente di petrolio 50-50 ed acqua è pompata alla superficie. In questo modo circa 85% dell'acqua prodotta può rimanere downhole. Un ulteriore ma non meno importante, differenza che sussiste fra le due tecniche sta nel fatto che mentre con la separazione per gravità le pressioni che si possono raggiungere sono di modeste entità, per quanto riguarda il trattamento con idrocycloni queste possono raggiungere valori rilevanti e ovviamente questo fattore va a scapito dell'efficienza in impianti tipicamente gravitativi^{xviii}.

1.2.2 APPLICAZIONI DOWS

Come è già stato accennato la maggior parte degli impianti di separazione downhole sono presenti nel Nord America ed in particolare modo negli Stati Uniti e in Canada.

Cinque applicazioni del campo sono di seguito descritte^{xix}:

- ***Applicazione della Luisiana.***

In questo studio è stato preso in considerazione l'impianto di Wilcox. Il costo per il completamento di DOWS è stato di circa il 73% superiore rispetto al completamento di un pozzo convenzionale. I risultati comunque sono stati ottimi in quanto DOWS ha sorpassato i completamenti convenzionali, con un rapporto sul guadagno netto, confrontato al precedente pozzo.

- ***Applicazione Canadese.*** Un completamento di DOWS è stato studiato sfruttando un impianto in disuso. Il serbatoio in arenaria con una permeabilità di 2-9 Darcy ha una colonna di olio da 60 piedi e uno strato acquifero da 23 piedi. Il progetto di ritrattamento, ha reso necessario comprimere la maggior parte delle vecchie perforazioni che lasciano 10 piedi aperti a flusso e perforare un intervallo di 8 piedi sotto l'acqua del OWC. Una pompa di progressione della cavità è stata utilizzata per produzione di petrolio e una pompa ESP elettrica per drenaggio dell'acqua. La produzione iniziale era 250 BOPD dal completamento superiore e da 5.400 BOPD dal completamento di drenaggio dell'acqua. Con il DOWS si è visto che la produzione è aumentata di circa lo 0,1% al giorno.

- ***Applicazione Della California.*** La produzione precedente con un vecchio pozzo era 6 BOPD con un WC di 99%. Con un completamento di DOWS e una produzione di 900 BOPD, la produzione di petrolio è aumentata a 25 BOPD ad un WC di 58%.

- ***Applicazione Orientale Del Texas.*** Con un completamento di DOWS, la produzione del pozzo (che produce tutta l'acqua con le tracce di olio) è stata aumentata a 24 BOPD.

- **Applicazione Indonesiana.** Il pozzo in esame ha avuto una storia con WC fino ad un massimo di 84%. Con un completamento di DOWS e un tasso di drenaggio dell'acqua di 2.550 BWPD, il pozzo poteva produrre 298 BOPD.

Le reali prestazioni nella maggior parte delle installazioni sono state limitate dal fatto di disporre di pozzi vecchi, che hanno prodotto una elevata quantità di acqua per un certo tempo non trascurabile. In queste situazione il primo problema che si è presentato è stato quello di eliminare le zone di saturazione di acqua nei pressi dei pozzi. Di conseguenza, le prestazioni principalmente sono state calcolate in laboratorio attraverso modelli. La modellistica indica che un aumento di 30% nel fattore di recupero è realizzabile con una riduzione quintupla del tempo richiesto per raggiungere WC limite del 98%. Il vantaggio primario di tecnologia di DOWS è la flessibilità nel controllo del processo. L'ottimizzazione di tale tecnologia è possibile agendo su alcuni parametri, quali il recupero massimo, tempo minimo, o acqua cumulativa minima, ecc.^{xx}.

1.2.3 CONSIDERAZIONI SULLA TECNICA

DOWS

Le diverse esperienze e i diversi casi di studio riguardanti il DOWS hanno fornito dei risultati che evidenziano che la ricerca in questo ambito è ancora in una fase sperimentale per cui trarre delle conclusioni certe e tendenzialmente troppo pretenzioso. Già a questo livello tuttavia alcune considerazioni possono essere fatte.

I **vantaggi** legati a questa tecnologia sono molteplici e tra questi i più importanti sono senza dubbio:

- La separazione Downhole può migliorare l'economia con la generazione del reddito, la riduzione di spesa o di investimento, o una combinazione di questi.
- I pozzi multiuso che usando le tecnologie di DOWS offrono i mezzi per proteggere l'ambiente dalla manipolazione dell'acqua di superficie prodotta.
- DAPS e l'altro DOWS, che devono essere comunque migliorati rappresentano un'occasione grande per la ricerca e lo sviluppo del software.
- La separazione di gravità del petrolio, dell'acqua e del gas Downhole, si è presentata in ogni pozzo esaminato, indicando che i limiti di applicazione di questa tecnologia ancora non sono stati oltrepassati.
- DOWS può rappresentare le nuove occasioni importanti di affari per industria
- Molti pozzi in disuso in quanto ormai esauriti da un punto di vista del guadagno per una scarsa presenza di water-cut sono stati nuovamente riutilizzati.

Gli **svantaggi** invece legati a questa tecnica sono:

- Una scarsa generalizzazione delle relative applicazioni in quanto ogni pozzo presenta delle caratteristiche intrinseche
- La necessità di avere una zona di separazione e di iniezione bene separate
- I costi ad inizio processo che sono decisamente più elevati rispetto a impianti comunemente utilizzati
- Produzione spesso elevata di solidi
- Un indice di iniettività adeguato
- Costi di manutenzione dell'impianto spesso piuttosto sostenuti

Dagli studi effettuati è emerso un aumento della produttività dei pozzi che molto spesso coprirebbe l'aumento dei costi intrinseci dell'utilizzo della stessa, pertanto le aspettative legate alla tecnologia dows sono buone

Il processo di sviluppo sta procedendo parallelamente sia in ambito sperimentale-modellistico sia sul campo, utilizzando spesso pozzi in disuso. Risulta comunque evidente una non estendibilità a priori dei risultati, in quanto le caratteristiche dei singoli pozzi influenzano fortemente le relative efficienze di separazione.

1.3 APPROCCIO TEORICO

Il sistema fluido presente nel pozzo è costituito da una miscela bifase olio-acqua in cui la percentuale di acqua è variabile.

Al fine di stabilire se sia effettivamente possibile ottenere la separazione tra le fasi è necessario caratterizzare il moto del sistema fluido e l'interazione fra le fasi. Questo problema può essere affrontato seguendo due diverse strade: trascurando i fenomeni di coalescenza, il flusso bifase può essere considerato disperso, in accordo con il modello Lagrangiano; se tali fenomeni non possono essere trascurati il flusso può essere caratterizzato mediante modelli Euleriani.

1.3.1 DIAMETRO MINIMO DELLE GOCCE

Facendo riferimento al modello Lagrangiano il sistema fluido è costituito da una fase continua e da una fase dispersa sotto forma di particelle fluide di forma sferica. In generale, il moto della fase dispersa sarà influenzato da quello della fase continua, e viceversa, attraverso trasferimento di massa, quantità di moto e calore, tra le fasi.

Considerando le particelle fluide di forma sferica, fenomeno presente nella maggior parte dei casi di studio, è possibile caratterizzare il moto del fluido intorno ad una sfera effettuando un bilancio di forze sulla sfera stessa.^{xxi xxii xxiii} figura 4.

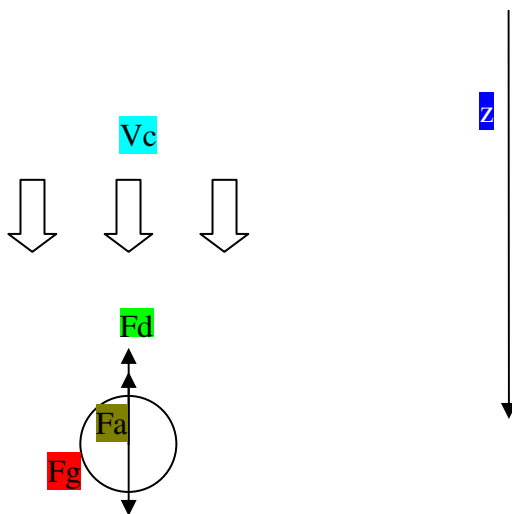


Figura 4

$$F_{tot} = F_g - F_a - F_d$$

$$F_g = (\rho_d * \pi * d^3 * g) / 6$$

$$F_a = (\rho_c * \pi * d^3 * g) / 6$$

$$F_D = 1/2 * C_D * \rho_c * \pi * d^2 / 4 * (v_c - v_d)^2$$

Dove il coefficiente di attrito C_D può essere espresso in funzione del numero di Reynolds,

$$C_D = 18 * Re^{-0.6}$$

$$Re = \rho_c * d * v_d / \mu_c$$

Affinché avvenga la separazione la forza totale agente sulla goccia deve essere minore di zero, e imponendo questa condizione si ottiene, una volta fissato il diametro delle particelle, una velocità critica delle gocce, tale da consentire la separazione:

$$v_{critica} = 4 * g * d * (\rho_d - \rho_c) / 3 * C_D * \rho_c$$

Analogamente è possibile ricavare, noto il campo di moto della fase continua, il diametro critico delle particelle, che costituisce il limite inferiore per le dimensioni delle particelle affinché avvenga la separazione:

$$D_{min} = 3 * C_D * \rho_c * v_c^2 / 4 * g * (\rho_d - \rho_c)$$

F_g = Forza Peso [N]

F_a = Forza di galleggiamento [N]

F_d = Forza di attrito [N]

ρ_d = Densità della fase dispersa [kg/m³]

ρ_c = Densità della fase continua [kg/m³]

d = Diametro delle particelle di fluido [m]

g = Accelerazione di gravità [m/s²]

C_D = Coefficiente di attrito

Re = Numero di Reynolds

v_c = Velocità della fase continua [m/s]

v_d = Velocità della fase dispersa [m/s]

D_{min} = Diametro minimo delle particelle [m]

1.3.2 MASSIMO DIAMETRO STABILE PER LE GOCCE

Lo studio del moto delle gocce all'interno di un fluido in movimento non può prescindere dal meccanismo di rottura delle gocce stesse: le gocce si frazionano quando le forze dinamiche di pressione, dovute alle fluttuazioni turbolente e di conseguenza strettamente legate alla geometria del sistema, prevalgono sulle tensioni all'interfaccia fra le due fasi.

Per stimare il massimo diametro stabile per le gocce si fa riferimento al modello di *Karabelas*^{xxiv} per la distribuzione dimensionale delle gocce in un sistema disperso in moto turbolento secondo cui la media del quadrato della velocità di fluttuazione, valutata ad una distanza pari al diametro delle gocce, fornisce una misura delle forze dinamiche di pressione:

$$\rho_c * U^2 / 2 = C^1 * 4 * \sigma / d_{max}$$

Esprimendo la media del quadrato della velocità di fluttuazione in funzione del tasso medio dell'energia di dissipazione per unità di massa si ottiene una relazione per il massimo diametro stabile delle gocce :

$$d_{max}/D \approx 0.109 * We^{-0.6} * Re^{-0.6} * (y/R)^{0.4}$$

dove $We = D * \rho_c * U^2 / \sigma$ è il numero di Weber

Ad una distanza caratteristica dalla parete della tubazione , il diametro stabile delle gocce assume il valore massimo; questa distanza può essere definita facendo

riferimento ad una teoria sulla cinematica delle gocce di grandi dimensioni e al loro tempo di residenza relativo al tempo caratteristico richiesto per la separazione:

$$y/R = 2.8/Re^{3/8}$$

si ottiene così

$$D_{max}/D = 0.165 * We^{-0.6} * Re^{0.45}$$

C^1 = Costante di proporzionalità

σ = Tensione superficiale [N/m]

d_{max} = Massimo diametro stabile delle particelle di fluido [m]

We = Numero di Weber

y = Distanza dalla parete del tubo [m]

D = Diametro del tubo [m]

U = Velocità media del flusso [m/s]

Attraverso questo modello è quindi possibile stimare il limite superiore per le dimensioni delle particelle di fluido.

I modelli, sopra descritti, consentono di definire un range di dimensioni per le particelle fluide all'interno del quale è possibile effettuare previsioni circa il comportamento della fase dispersa nel sistema, per la geometria e le portate prese in esame, sia del fluido come mezzo continuo che come percentuale di olio nell'acqua all'interno dello sparo.