



Università degli Studi di Genova
Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale



Corso di Laurea in Chimica e Tecnologie Chimiche

FONDAMENTI DI TECNOLOGIE CHIMICHE PER L'INDUSTRIA E PER L'AMBIENTE
(modulo II)

MOTO DI UN FLUIDO E DI UNA PARTICELLA

Aldo Bottino

e-mail : bottino@chimica.unige.it

Tel. : 010 3538724 - 3538719

Resistenza del mezzo

Su ogni superficie a contatto con un fluido e in moto relativo rispetto ad esso, si ha sempre un attrito superficiale.

In aggiunta a questo, però, possono aversi anche delle resistenze passive, dovute alle accelerazioni e decelerazioni del fluido.

Tali effetti sorgono ad esempio quando il fluido è costretto a cambiare la direzione di moto per passare intorno a corpi solidi, posti sul suo cammino.

La somma di tutte le forze che sollecitano il corpo a causa delle accelerazioni e decelerazioni costituisce la resistenza del mezzo.

Strato limite e linee di flusso attorno ad una particella

Nel corpo rappresentato nella Figura sospeso in un condotto di dimensioni infinite e soggetto a una velocità di flusso libero, le linee di flusso (continue) indicano il percorso seguito dal fluido intorno al corpo mentre la curva chiusa tratteggiata mostra lo strato limite.

Il fluido che si avvicina al centro della superficie frontale di un corpo simmetrico, urta contro il corpo stesso e si divide in due parti, che continuano a muoversi ai due lati.



(a) Forma accordata con le linee di flusso: non si ha il distacco dello strato limite.

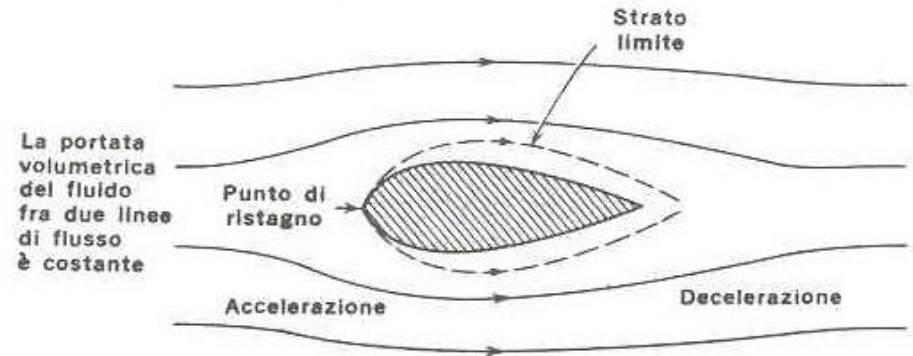
In corrispondenza del punto centrale della superficie frontale, detto punto di ristagno, il fluido ha velocità nulla.

L'accrescimento dello strato limite ha inizio nel punto di ristagno e continua per l'intera superficie.

Dietro la parte posteriore del corpo, lo strato limite si confonde nuovamente con il flusso libero.

Il fluido che si trova all'esterno dello strato limite è soggetto ad accelerazioni e decelerazioni, dovute in parte alla variazione delle linee di flusso e in parte alla variazione della velocità.

La somma di tutte le forze che sollecitano il corpo a causa delle accelerazioni e decelerazioni costituisce la resistenza del mezzo.



(a) Forma accordata con le linee di flusso: non si ha il distacco dello strato limite.

Nella Figura seguente è rappresentato un corpo di forma diversa, che presenta una discontinuità nella sua parte posteriore.

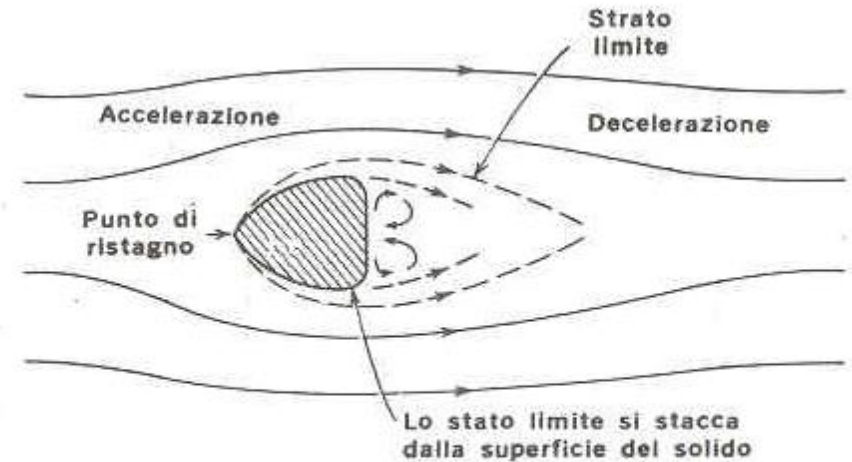
Anche per questa nuova forma geometrica è rappresentato lo strato limite, a partire dal punto di ristagno.

L'accelerazione che subisce il fluido in corrispondenza della superficie anteriore del corpo è analoga a quella descritta nella Figura precedente.

Dopo il punto in cui la sezione è più larga, il comportamento dello strato limite è però molto diverso in quanto esso tende a staccarsi dalla superficie.

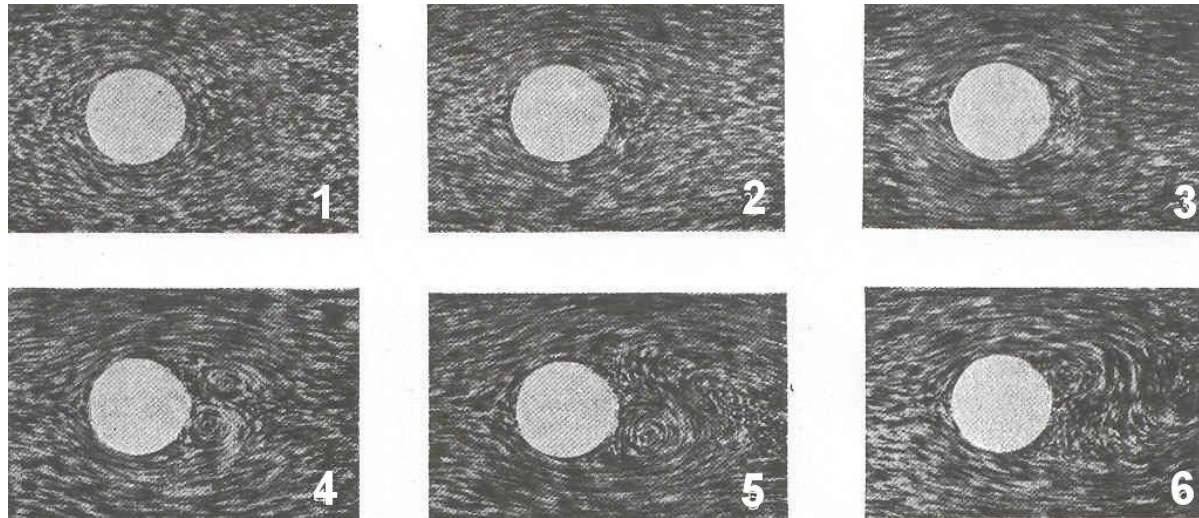
Dalla Figura si osserva come il distacco dello strato limite crea dietro al corpo una turbolenza che dà origine a una forza contro il corpo.

La geometria del sistema è un fattore determinante per quanto riguarda la forza esercitata sul corpo.



(b) Forma non accordata con le linee di flusso: si ha il distacco dello strato limite.

Le linee di flusso del fluido attorno ad un corpo (cilindrico) sono meglio rappresentate nelle fotografie della Figura seguente



La fotografia n.1 mostra le linee di flusso del moto laminare, col fluido che si muove in strati attorno al corpo cilindrico.

Nella foto n.2 si osserva la formazione di un piccolo vortice immediatamente a valle del cilindro (a destra), ma, il moto è ancora prevalentemente laminare.

Al crescere della velocità il vortice diviene sempre più grande e più complesso, mano a mano che il moto diviene turbolento, come si vede dalle fotografie n.3, 4, 5 e 6.

L'andamento delle linee di flusso intorno ad una particella che cade in un fluido sono simili a quelle riportate nel caso del corpo.

Se la particella è piccola è più probabile che il moto sia laminare e la viscosità del fluido rappresenta un fattore controllante nel determinare l'effetto resistente.

Se la particella è grande è probabile che il moto sia turbolento ed accompagnato dalla formazione di turbini e di vortici nel fluido alle spalle della particella in movimento.

Questi vortici oppongono notevole resistenza al moto e la viscosità del fluido perde d'importanza, diventando dirottura un fattore trascurabile nel determinare la resistenza quando il moto diviene di tipo completamente turbolento.

Coefficiente di attrito

Le correlazioni delle caratteristiche di moto e geometriche del sistema studiato, impiegano dei gruppi adimensionali che sono concettualmente simili al fattore di attrito (di Darcy o di Fanning) e al numero di Reynolds.

In questo caso si introduce un coefficiente di attrito, f :

$$f = \frac{2 \cdot F_R}{A \cdot \rho_l \cdot u^2}$$

dove:

- F_R è la forza resistente dovuta all'attrito, cioè necessaria a mettere in moto il fluido da spostare;
- A è la sezione resistente del corpo immerso nel fluido, cioè la massima superficie proiettata in senso normale al flusso;
- u è la velocità relativa del corpo rispetto al fluido;
- ρ_l è la densità del fluido.

Se il moto è laminare il coefficiente di attrito diventa inversamente proporzionale al numero di Reynolds, Re , attraverso la relazione:

$$f = \frac{24}{Re}$$

Dove Re è rappresentato da:

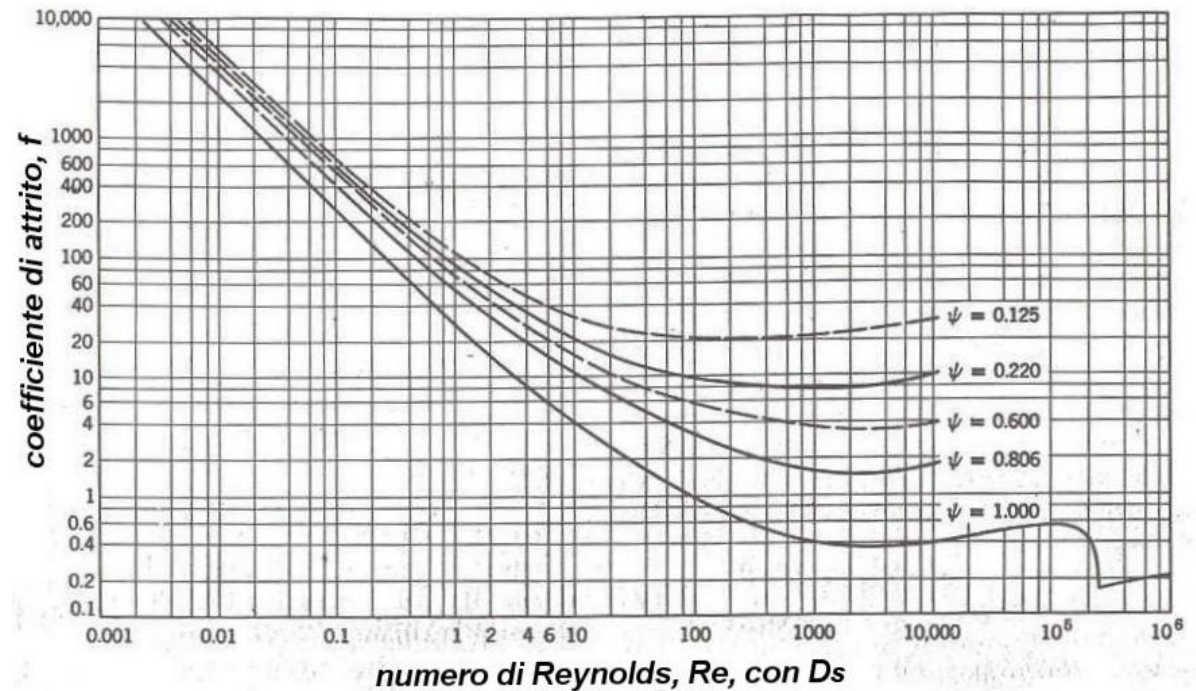
$$Re = \frac{D \cdot u \cdot \rho_l}{\eta}$$

Dove

- D è una lunghezza che caratterizza la forma geometrica del corpo;
- η è la viscosità del fluido.

Le correlazioni tra f e Re vengono in genere presentate graficamente, mediante diagrammi logaritmici tipo quello mostrato in Figura.

Questi diagrammi sono per certi aspetti simili a quelli (diagramma di Moody) che danno il fattore di attrito (Darcy o Fanning) in funzione del numero di Reynolds per i tubi, ma vi sono parecchie differenze sostanziali.

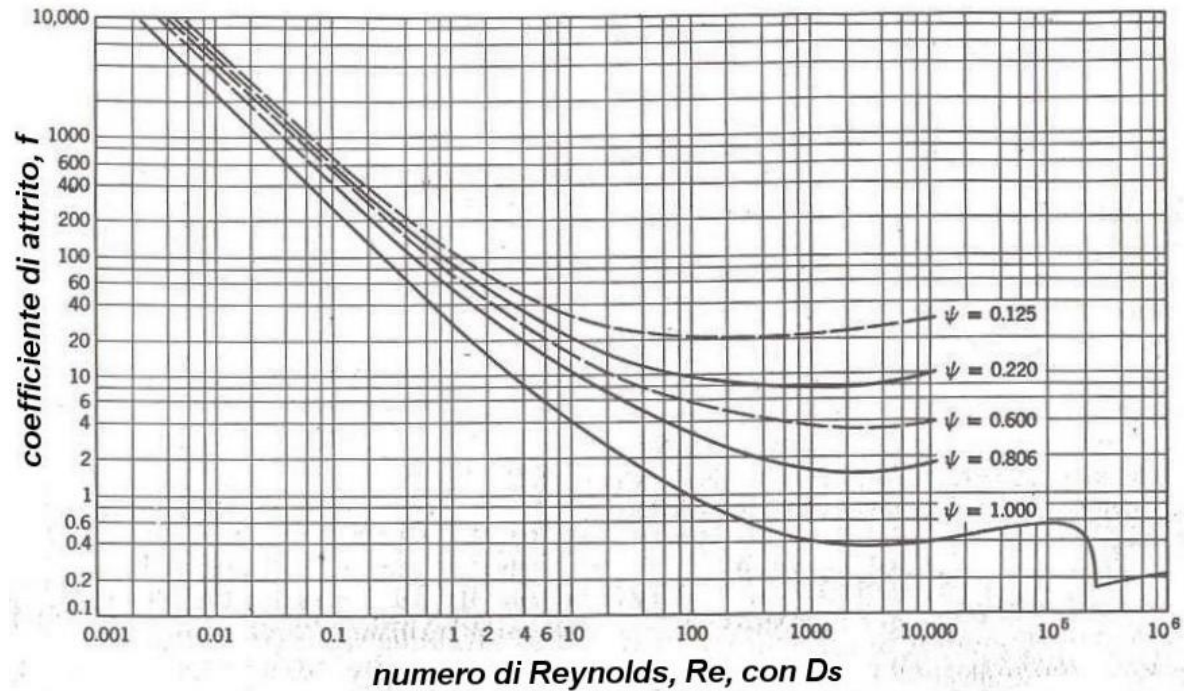


Il diagramma tiene conto di un parametro, la sfericità ψ , per definire la forma delle particelle ($\psi = 1$ per una particella sferica).

Il valore di D che compare nelle espressioni di Re è, come accennato, una grandezza che caratterizza la forma geometrica del corpo e, nel caso particolare, rappresenta il diametro della sfera avente lo stesso volume della particella solida (per una particella sferica $D_s = D$).

Al disotto di $Re = 0,1$ tutti i diagrammi coincidono in un'unica retta di equazione $f = 24/Re$.

In questa regione lo strato limite è laminare e l'effetto dovuto alle accelerazioni è molto piccolo e può essere trascurato.



Al di sopra di $Re \approx 3$ i vortici o la turbolenza cominciano a far sentire qualche effetto, che poi aumenta al crescere di Re .

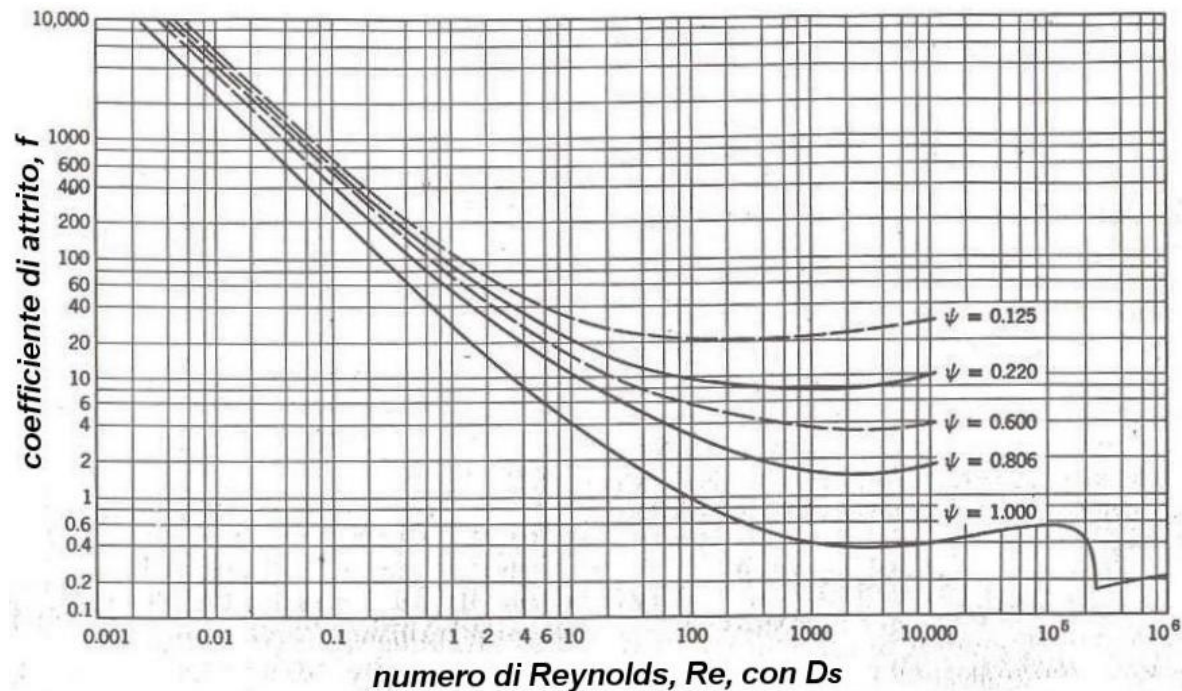
Per Re maggiore di circa 300 o 400 (regione del moto turbolento), il valore del coefficiente di attrito, diviene quasi costante, indipendente dal numero di Reynolds, come è indicato dal tratto orizzontale delle linee in Figura.

Il passaggio del moto laminare a quello turbolento non è ben definito.

Non c'è infatti nessuna brusca variazione dalla retta inclinata, di equazione $f = 24/Re$, che rappresenta il moto laminare, alla parte orizzontale corrispondente al moto completamente turbolento per il quale il coefficiente di attrito tende a mantenersi costante.

In corrispondenza di $Re \approx 200000$ il coefficiente di attrito diminuisce bruscamente.

Ciò si spiega col fatto che, immediatamente alle spalle della particella si forma un vortice che si muove insieme alla particella.



In questo modo il vortice e la sfera vengono a formare un unico insieme dal punto di vista fluidodinamico.

Se il fluido è l'acqua e i granuli sono sferici, per la maggior parte dei minerali si ha:

- moto laminare purché il diametro dei granuli sia minore di 50 μm ;
- moto turbolento con granuli di diametro di 1 mm (1000 μm) o più.

Per particelle di forma diversa da quella sferica (caso più frequente nella pratica industriale) il coefficiente d'attrito f si può calcolare come funzione del numero di Reynolds usando come parametro la sfericità ψ per definire la forma delle particelle.

La sfericità ψ viene definita come

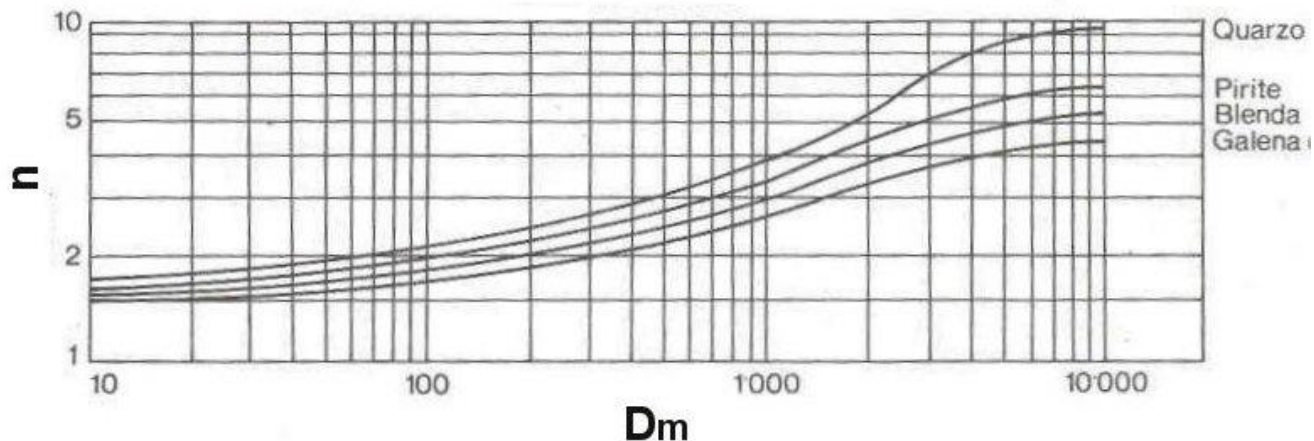
$$\psi = \frac{\text{area superficiale della sfera avente lo stesso volume della particella}}{\text{area superficiale della particella}}$$

La sfericità ψ può essere calcolata attraverso l'equazione:

$$\psi = \frac{D_m}{D_s} \cdot \frac{1}{n}$$

dove:

- D_m è l'apertura media del setaccio (cioè la media dei due setacci tra cui la particella solida in esame viene trattenuta);
- D_s è il diametro della sfera avente lo stesso volume della particella (per una particella sferica $D_s = D$);
- n è un fattore di forma delle superfici specifiche, ricavabile dalla Figura seguente.



Il valore da scegliere per la sfericità ψ e per D_s si può determinare rapidamente dai dati della Tabella seguente, nel caso che le particelle corrispondano ad una delle forme regolari elencate.

<i>Forma</i>	<i>Sfericità</i>	D_s/D_m	<i>Forma</i>	<i>Sfericità</i>	D_s/D_m		
Sfere	1	1	Cilindri	$h = 3 \cdot r \dots$	0,860	1,310	
Ottaedri	0,847	0,965		$h = 10 \cdot r \dots$	0,691	1,960	
Cubi	0,806	1,240		$h = 20 \cdot r \dots$	0,580	2,592	
Prismi	$l \times l \times 2 \cdot l \dots$	0,767	1,564	Dischi	$h = r \dots$	0,827	0,909
	$l \times 2 \cdot l \times 3 \cdot l$	0,761	0,985		$h = r/3 \dots$	0,594	0,630
	$l \times 3 \cdot l \times 3 \cdot l$	0,725	1,127		$h = r/10 \dots$	0,323	0,422