

Tralasciando tutta la teoria scriviamo direttamente la formula che fornisce la caduta di pressione in una tubazione orizzontale senza variazioni di sezione, in cui scorre un fluido incomprimibile in moto stazionario e isoterma.

$$\Delta p = f \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (1-1)$$

dove:

$\Delta p$  è la variazione di pressione tra la sezione d'uscita del fluido e quella d'ingresso.

$f$  è il fattore d'attrito.

$l$  è la lunghezza della tubazione.

$d$  è il diametro della tubazione.

$\rho$  è la massa volumica del fluido.

$w$  è la velocità media del fluido.

Se la tubazione non è cilindrica al posto del diametro si utilizza il diametro idraulico definito come:

$$D_H = 4 \frac{A}{P} \quad (1-2)$$

dove:

$A$  è la sezione della tubazione

$P$  è il perimetro bagnato della tubazione

Il fattore di attrito è funzione del numero di Reynolds e della rugosità relativa,  $s$ , definita come:

$$s = \frac{\varepsilon}{d} \quad (1-3)$$

dove:

$\varepsilon$  è la rugosità media della tubazione.

La rugosità si trova tabellata in funzione del tipo di tubazione e del tempo di utilizzo.

In letteratura si trovano molte formule o diagrammi per valutare il fattore di attrito. Tra i più utilizzati è il diagramma di Moody visibile in Figura 1-1.

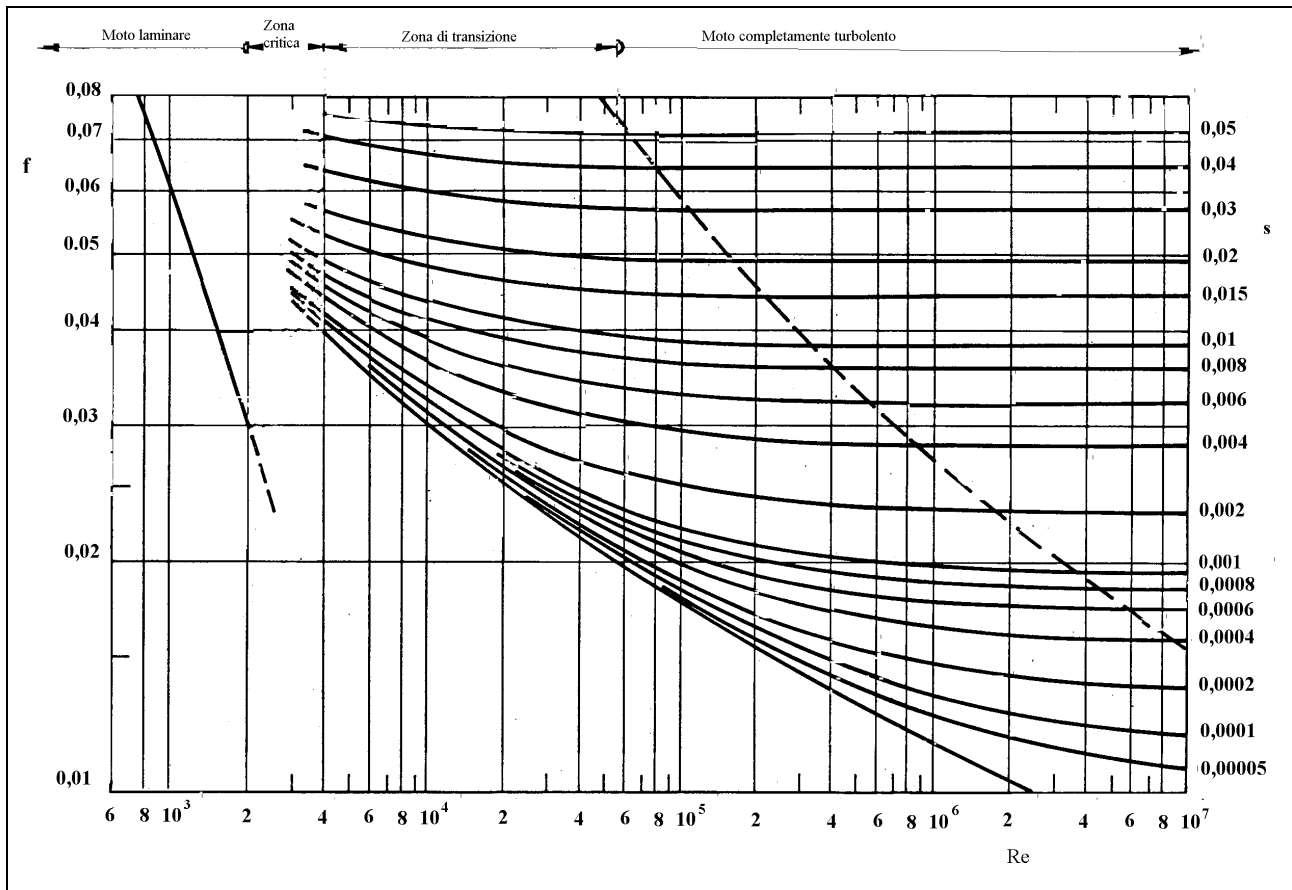


Figura 1-1: Diagramma di Moody

Analizzando il diagramma si vede che è divisibile in 3 zone:

- ◆ zona laminare
- ◆ zona critica
- ◆ zona turbolenta

La zona laminare si estende fino a numeri di Reynolds dell'ordine di 2300. Si vede che nella zona laminare non vi è alcuna dipendenza dalla rugosità in quanto lo strato limite laminare è più spesso della rugosità.

Il fattore di attrito vale:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (1-4)$$

La zona critica esiste nel campo di numeri di Reynolds compresi circa tra  $2300 < Re < 4000$ . In questa zona abbiamo il passaggio tra laminare e turbolento e sperimentalmente non è stato possibile determinare in modo univoco il valore del fattore di attrito.

Nella terza zona il moto è turbolento. Può essere divisa in due sottozone. Nella prima il fattore d'attrito dipende sia da Reynolds, sia dalla rugosità relativa; nella seconda zona dipende solo dalla rugosità relativa.

In tabella 1-1 sono riportati i valori medi della rugosità assoluta in funzione della tubazione e dell'invecchiamento.

Esistono anche delle formule che permettono il calcolo per via analitica del fattore di attrito.

Fra le più utilizzate sono la formula di Swamee e Jain e quella di Moody.

La formula di Swamee e Jain vale

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{s}{3,7} + 5,74 \operatorname{Re}^{-0,9} \right) \right]^2} \quad (1-5)$$

il cui campo di applicabilità è

$$5000 < \operatorname{Re} < 10^8 \text{ e } 10^{-6} < s < 10^{-2} .$$

Moody ricavò invece la seguente formula:

$$f = 5,5 \cdot 10^{-3} \left[ 1 + \left( 200s + \frac{10^6}{\operatorname{Re}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (1-6)$$

valida, con una precisione del  $\pm 5\%$  ,per

$$4000 < \operatorname{Re} < 10^7 \text{ e } s < 10^{-2}$$

Tipo di tubazione	Stato dei tubi	$\varepsilon$ [mm]
Tubi Trafilati e stampati in Al, Cu, plastica, vetro	Nuovi	0,001 – 0,0015
Tubo in ghisa	nuovo	0,25 – 0,5
	incrostato	1,5 – 5,0
Tubo acciaio senza saldatura	Decapato nuovo	0,03 – 0,04
Tubo acciaio saldato	Nuovo	0,04 – 0,1
Tubi in acciaio rivestiti nuovi	Metallizzati a spruzzo	0,08 – 0,09
	Zincati commerciali	0,1 – 0,16
	Bitumato	0,05
Tubi in acciaio usati	Ruggine uniforme	0,15
	Incrostazione leggera	0,15 – 0,4
	Incrostazione media	1,5
	Incrostazione pesante	2,0 – 4,0
Tubi in cemento amianto	Nuovi	0,03 – 0,1
Tubi in calcestruzzo	Nuovi, commerciali	2,0 – 3,0
	Vecchi con acqua	0,2 – 0,3

Tabella 1-1: Valori medi della rugosità

In un qualunque impianto non troveremo mai solo un tubo di diametro fissato, ma la tubazione presenterà delle curve, dei cambiamenti di diametro, attraverserà valvole, corpi scaldanti, scambiatori di calore, caldaie ed altre apparecchiature.

Ognuno di questi eventi provocherà delle irreversibilità le quali dipenderanno poco dal numero di Reynolds. Queste perdite di pressione sono definite perdite di carico localizzate.

Per valutarle si utilizza una formula del tipo

$$\Delta p = k \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (1-7)$$

dove

k è una costante che dipende dal tipo di perdita localizzata. È tabulata in Tabella 1-2.

Perdita localizzata	k
Sbocchi	1
Imbocchi	0,5
Saracinesca aperta 1/1	0,15
Saracinesca aperta ½	4,5
Caldaie	2,5
Radiatori	2,5
Curva a 90° R/d = 0,5	1
Curva a 90° R/d = 1,0	0,6
Curva a 90° R/d = 1,5	0,47
Curva a 90° R/d = 2,0	0,4
Curva a 90° R/d = 4 - 10	0,3

Tabella 1-2: Perdite di carico localizzate

La perdita di carico totale sarà pari a:

$$\Delta p_{tot} = \sum \Delta p_{cont} + \sum \Delta p_{loc} \quad (1-8)$$

dove:

$\Delta p_{cont}$  sono le perdite di carico continue valutate tramite la (1-1) per ogni tratto di tubo a diametro costante.

$\Delta p_{loc}$  sono le perdite di carico localizzate valutate con la (1-6)