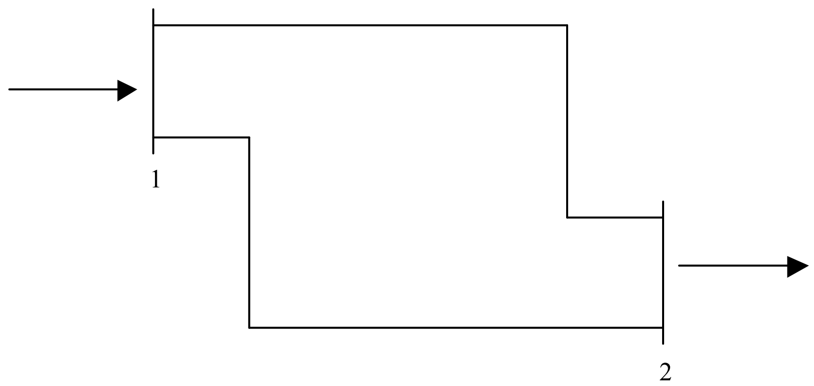
RICHIAMI DI FLUIDODINAMICA

L'equazione di continuità:

Iniziamo il ripasso dei concetti fondamentali di fluidodinamica considerando un sistema aperto. Esaminiamo il moto di un fluido in un condotto, in cui individuiamo la sezione 1 come la sezione di ingresso del fluido e la sezione 2 come la sezione di uscita.



Una delle grandezze fisiche importanti da studiare è la portata in massa indicata con $M^\bullet$, cioè quanto fluido passa nel condotto nell'unità di tempo. Poiché consideriamo una massa nell'unità di tempo, l'unità di misura sarà:

$$Kg/s$$

Facciamo anzitutto l'ipotesi che il moto del fluido sia stazionario. In tal caso la massa di fluido che si trova tra le due sezioni considerate del condotto rimane costante: non abbiamo cioè né accumuli né fughe di fluido, ma la quantità di fluido che entra è uguale a quella che esce.

All'interno del condotto il fluido scorre sempre nella stessa direzione.

Per il principio detto di conservazione della massa:

$$M^\bullet_1 = M^\bullet_2$$

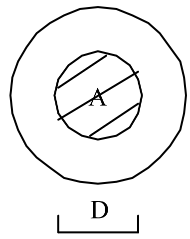
dove $M^\bullet_1$ è la portata in massa nella sezione 1 e $M^\bullet_2$ è la portata in massa nella sezione 2. $M^\bullet_1$ e $M^\bullet_2$, poiché equivalenti, possono essere sostituite da una generica portata in massa $M^\bullet$:

$$M^\bullet = \rho\ A\ w$$

dove ρ è la densità del fluido espressa in Kg/m^3 (massa per unità di volume);

A è l’area della sezione espressa in m^2; w è la velocità media del fluido espressa in m/s.

L’area della sezione del condotto risulta essere:



$$A = \pi D^2 / 4$$

dove D indica il diametro interno del tubo, poiché l’area dove passa il fluido è quella interna.

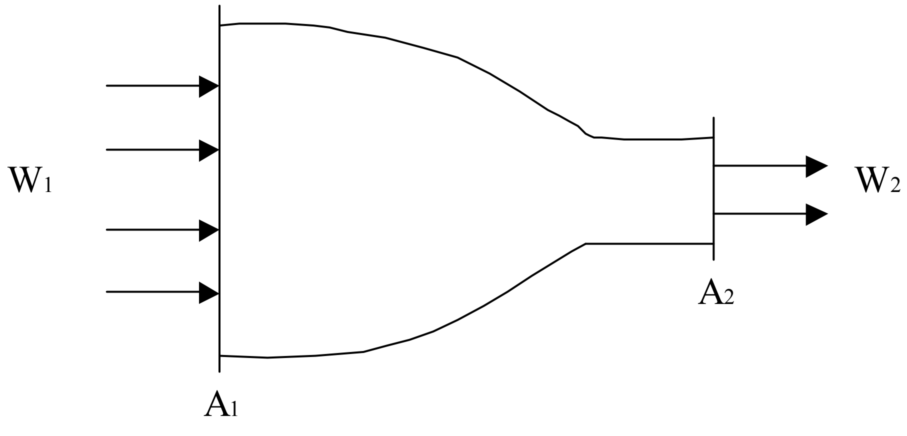
La densità ρ può, a seconda dei casi, essere variabile o invariabile. Per l’acqua la densità è praticamente invariabile, perché cambia di molto poco nelle diverse condizioni fisiche. Può, perciò, essere considerata:

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

La densità dell’aria è, al contrario, molto variabile.

Essendo costante, nelle due sezioni, la portata in massa, le due quantità che possono variare sono la densità ρ e la velocità w.

La prima equazione importante da considerare è quella chiamata equazione di continuità, che è più comunemente conosciuta con il nome di equazione di conservazione della massa.



Poiché la portata in massa resta costante, abbiamo:

$$\rho_1 A_1 w_1 = \rho_2 A_2 w_2$$

per l'acqua la densità ρ può essere considerata costante, quindi otteniamo:

$$w_2 = w_1 A_1 / A_2$$

Dove w_2 è la velocità media nella sezione 2 espressa in m/s, w_1 è la velocità media nella sezione 1 espressa in m/s, A_1 è l'area della sezione 1 espressa in m^2 e A_2 è l'area della sezione 2 espressa in m^2.

Possiamo osservare che questo sistema è effettivamente aperto poiché scambia massa con l'esterno; se questo scambio fosse uguale a zero il sistema sarebbe chiuso. Altro fatto importante è sottolineare l'importanza del "puntino" ("•"): esso indica che le grandezze così contrassegnate sono riferite all'unità di tempo.

Possiamo considerare un regime stazionario, perché facciamo l'ipotesi che la variazione delle condizioni di sistema sia sufficientemente lenta da potere essere accettabile questa ipotesi.

Si parla altrimenti di regime transitorio. Nella condizione di regime transitorio risulta essere difficile calcolare le grandezze fisiche in gioco. Inoltre queste condizioni sono molto sgradevoli per il corpo umano, perché il nostro organismo fa fatica ad adattarsi a condizioni così variabili.

Riuscire a valutare tutto ciò che avviene in un secondo permette di fare considerazioni su un tempo molto più lungo.

L'equazione del bilancio energetico in forma termica:

Facciamo ora l'analisi delle energie in gioco.

Per convenzione consideriamo il lavoro positivo se è compiuto dal sistema verso l'esterno, negativo se è compiuto dall'esterno sul sistema. Invece, sempre per convenzione, consideriamo il calore positivo se è acquistato dal sistema, negativo se è ceduto dal sistema. Indichiamo poi con $Q^\bullet$ la potenza termica e con $L^\bullet$ la potenza meccanica.

Abbiamo perciò l'equazione:

$$E^\bullet{}_2 - E^\bullet{}_1 = Q^\bullet - L^\bullet$$

dove $E^\bullet{}_2$ è l'energia nella sezione 2 nell'unità di tempo, $E^\bullet{}_1$ è l'energia nella sezione 1 nell'unità di tempo, $Q^\bullet$ è la potenza termica e $L^\bullet$ è la potenza meccanica. Tutte queste grandezze sono misurate in J/s.

L'energia E nella sezione 1 e nella sezione 2 è presente sotto tre forme diverse:

- energia cinetica: data dal fatto che il fluido si muove con una certa velocità w;

- energia potenziale: data dal fatto che il fluido si trova ad un'altezza z rispetto al livello del mare;

- entalpia: tipo di energia direttamente proporzionale alla temperatura del fluido.

Sappiamo così scrivere queste tre forme di energia come grandezze specifiche, cioè per unità di massa:

- energia cinetica specifica:

$$e_c = \frac{1}{2} w^2 \alpha \qquad \text{(J/Kg)}$$

dove w è la velocità media espressa in m/s ed α è un numero puro che dipende dal tipo di moto del fluido.

- energia potenziale specifica:

$$e_{pot} = g\, z \qquad \text{(J/Kg)}$$

dove g è l'accelerazione di gravità espressa in m/s^2 e z è l'altezza del fluido rispetto al livello del mare espressa in m.

- entalpia specifica:

$$h = c_p\, T \qquad \text{(J/Kg)}$$

dove c_p è il calore specifico misurato in J/KgK e T è la temperatura misurata in K.

Queste grandezze vanno poi moltiplicate per la portata in massa. Otteniamo così:

$$\frac{1}{2} w^2 \alpha\, M^\bullet$$

$$g\, z\, M^\bullet$$

$$M^\bullet h = c_p\, T\, M^\bullet$$

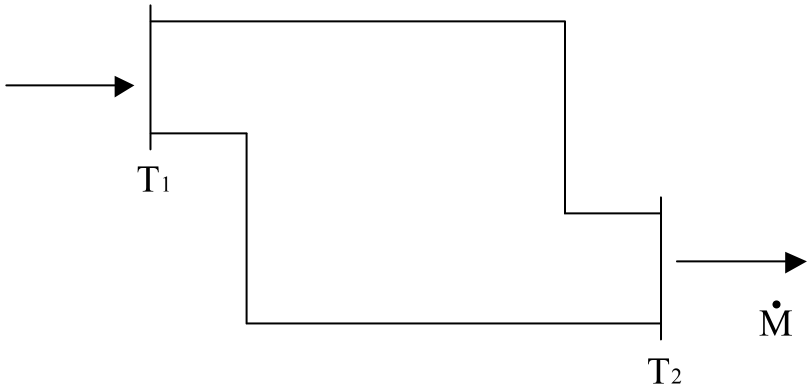
L'equazione del bilancio energetico diventa così:

$$M^\bullet \left[1/2\, w_2^2\, \alpha_2 + g\, z_2 + c_p\, T_2 - 1/2\, w_1^2\, \alpha_1 - g\, z_1 - c_p\, T_1 \right] = Q^\bullet - L^\bullet$$

dove sono presenti tutti i tipi di energia.

Facciamo un esempio considerando un corpo scaldante.

(N.B. Il "termosifone" è un impianto con corpi scaldanti dove la circolazione del fluido è naturale. Perciò è improprio utilizzare questo termine per i nostri impianti dove sono presenti delle pompe).



Dati:

$\dot{M} = 0,1$ Kg/s

$T_1 = 80°$ C

$T_2 = 60°$ C

Dobbiamo calcolare la potenza termica scambiata $\dot{Q}$.
Impostiamo l'equazione del bilancio energetico:

$$\dot{M} \left[(w_2^2 - w_1^2) / 2 + g (z_2 - z_1) + c_p (T_2 - T_1) \right] = \dot{Q} - \dot{L}$$

Qui il moto dell'acqua all'interno del corpo scaldante è turbolento e quindi

$$\alpha = 1$$

Se il moto fosse laminare dovremmo considerare $\alpha = 2$.
Poiché il tubo ha lo stesso diametro nella sezione 1 e nella sezione 2:

$$w_2 = w_1$$

da cui:

$$(w_2^2 - w_1^2) / 2 = 0$$

Di solito z_1 è diverso rispetto a z_2 perché è maggiore ($z_2 > z_1$), ma il secondo termine $g (z_2 - z_1)$ può essere trascurato perché ha un valore piccolo rispetto agli altri termini.

L'intero circuito è in realtà un anello chiuso e quindi globalmente il termine $(z_2 - z_1)$ sarebbe uguale a 0.

Inoltre:

$$\dot{L} = 0$$

perché non si compie né si riceve lavoro.
L'equazione iniziale diventerà così:

$$M^{\bullet} \, [\, c_p \, (T_2 - T_1) \,] = Q^{\bullet}$$

da cui, sostituendo i valori conosciuti e sapendo che per l'acqua:

$$c_p = 4187 \text{ J/KgK}$$

$$Q^{\bullet} = 0{,}1 * 4187 * 20 \text{ (W)} = 8374 \text{ (W)}$$

Abbiamo così ottenuto la potenza termica valutando solamente gli effetti del passaggio del fluido all'interno del corpo scaldante e non tutto il processo che è avvenuto all'interno del corpo scaldante. Se non avessimo conosciuto T_2 avremmo dovuto considerare anche l'equazione dello scambio termico.

L'equazione generale dello scambio termico:

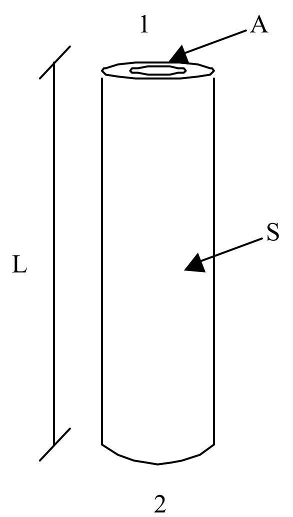
L'equazione generale dello scambio termico è:

$$Q^{\bullet} = k \, S \, \Delta T_m$$

dove k è definito coefficiente globale di scambio termico, anche se non è un numero puro ma si misura in W/m^2K. Esso non è una costante ma dipende dalla potenza scambiata e quindi dallo stesso salto di temperatura.

S è la superficie di scambio termico e ΔT_m è definito variazione di temperatura media logaritmica.

Se il corpo scaldante è semplicemente un tubo abbiamo:



$$A = \pi D_1^2 / 4$$

dove D_1 è il diametro interno del tubo e l'area A è espressa da questa formula perché il fluido scorre all'interno del tubo.

$$S = \pi D L$$

dove L è la lunghezza del tubo e D è il diametro del tubo. Il diametro sarà quello esterno se la superficie di scambio S considerata è quella esterna; interno se la superficie S considerata è quella interna.

Possiamo indifferentemente considerare la superficie esterna o quella interna e abbiamo:

$$S_1 = \pi D_1 L \qquad (m^2)$$

e

$$S_2 = \pi D_2 L \qquad (m^2)$$

dove S_1 è la superficie esterna del tubo e quindi D_1 è il diametro esterno del tubo; S_2 è la superficie interna del tubo e quindi D_2 è il diametro interno del tubo.

Il coefficiente k dipende dalla superficie di scambio termico che scegliamo. Abbiamo perciò:

$$Q^{\bullet}_1 = k_1 S_1 \Delta T_m$$

oppure

$$Q^{\bullet}_2 = k_2 S_2 \Delta T_m$$

k dipende dalla geometria del tubo: se introduciamo il diametro esterno D_1 otteniamo k_1, se introduciamo il diametro interno D_2 otteniamo k_2.

Abbiamo, perciò, due formule diverse che utilizzano due valori diversi di k, ma una volta inseriti nelle formule il valore della potenza termica che troviamo è lo stesso.

Se utilizzando il bilancio energetico riusciamo a trovare la potenza termica, possiamo trovare poi k:

$$k = Q^{\bullet} / (S \Delta T_m)$$

Nell'esempio precedente:

$$Q^{\bullet} = 8374 \text{ W}$$

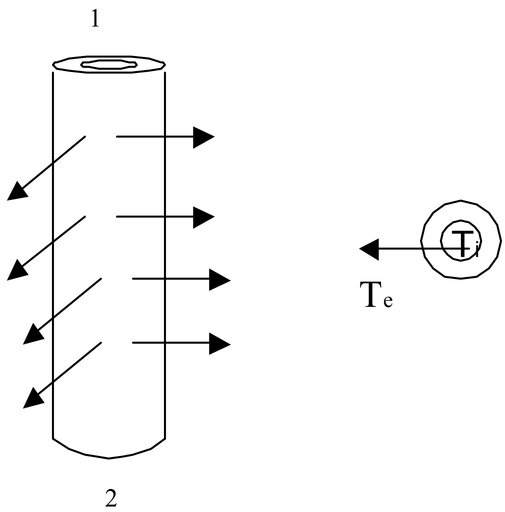
Quindi possiamo scrivere:

$$Q^{\bullet} = 8374 \text{ W} = k S \Delta T_m$$

dove ΔT_m non è 20° C come avevamo prima.

Dal principio “zero” della termodinamica sappiamo che il calore va da un corpo più caldo a un corpo più freddo.

In questo esempio il calore sta uscendo dal tubo in senso radiale.



Il flusso termico è ortogonale al flusso del fluido: i due fenomeni sono ortogonali. Questo perché se il calore va nella direzione del fluido la resistenza che gli si oppone è maggiore di quella che si oppone se va verso l’esterno. In definitiva il vettore del flusso termico può essere considerato ortogonale al tubo dal punto di vista geometrico e non matematico.

ΔT_m è la differenza tra la temperatura dell’acqua nel tubo e la temperatura dell’ambiente esterno.

Possiamo considerare.

$$T_{amb} = 20° \text{ C}$$

La differenza di temperatura varia perché la temperatura del fluido non è costante nel tubo.

Se consideriamo:

$T_1 = 80°$ C la temperatura nella sezione 1;
$T_2 = 60°$ C la temperatura nella sezione 2.

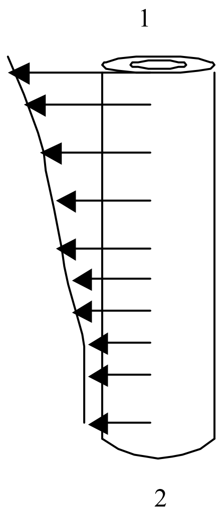
Otteniamo:

$$\Delta T_1 = 60° \text{ C}$$

e

$$\Delta T_2 = 40° \text{ C}$$

Possiamo dividere il tubo in tanti pezzettini in modo che in essi il ΔT sia costante. Il vettore dello scambio termico nel tubo ha l'andamento rappresentato dalla seguente figura:



Possiamo così fare un calcolo infinitesimale su tutto il tubo e calcolare un integrale. Il risultato ottenuto è:

$$\Delta T_m = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

ma possiamo dire che in prima approssimazione:

$$\Delta T_m = (\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2$$

Calcoliamo il ΔT medio tra 40° C e 60° C usando le due formule:

$$(\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2 = 50° \text{ C}$$

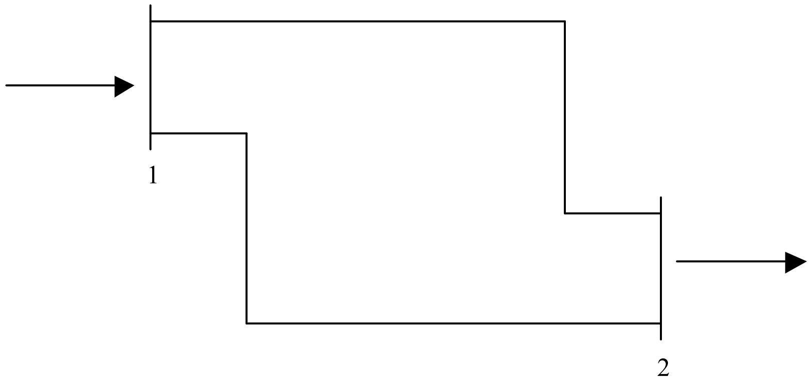
$$\Delta T_m = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2) = 49{,}32° \text{ C}$$

L'equazione del bilancio energetico in forma meccanica:

Prima abbiamo scritto il bilancio dell'energia nella sua forma termica, mentre nel corso di fisica tecnica I abbiamo utilizzato la forma meccanica.

Nella forma meccanica si considera solo l'energia meccanica; in essa compare la perdita di carico, cioè i fenomeni dissipativi dovuti al fatto che il fluido è di carattere viscoso.

Consideriamo allora anche le perdite di carico.



Abbiamo:

$$M^{\bullet} \, [(w_2^2 - w_1^2) / 2 + g (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) / \rho] = - L^{\bullet} - R \, M^{\bullet} \qquad \text{(W)}$$

dove $M^{\bullet}$ è la portata in massa misurata in Kg/s, w_2 è la velocità media del fluido nella sezione 2 misurata in m/s, w_1 è la velocità media del fluido nella sezione 1 misurata in m/s, g è l'accelerazione di gravità misurata in m/s^2, z_2 è l'altezza del fluido nella sezione 2 rispetto al livello del mare misurata in m, z_1 è l'altezza del fluido nella sezione 1 rispetto al livello del mare misurata in m, p_2 è la pressione del fluido nella sezione 2 misurata in Pa, p_1 è la pressione del fluido nella sezione 1 misurata in Pa, ρ è la densità del fluido misurata in Kg/m^3, $L^{\bullet}$ è la potenza meccanica misurata in J/s, R è l'energia che si dissipa misurata in J.

Inoltre:

$(w_2^2 - w_1^2) / 2$ rappresenta la variazione di energia cinetica;

$g (z_2 - z_1)$ rappresenta la variazione di energia potenziale;

$(p_2 - p_1) / \rho$ rappresenta la variazione dell'energia di pressione.

La potenza termica $Q^{\bullet}$ è scomparsa; mentre il salto di entalpia è stato sostituito da $(p_2 - p_1) / \rho$. Questo termine in realtà era già presente nel salto di entalpia:

$$H = U + p \, V$$

dove U è l'energia interna del sistema, p è la pressione e V è il volume.

Se consideriamo le grandezze specifiche abbiamo:

$$h = u + p \, v = u + p / \rho$$

dove u è l'energia interna specifica, p è la pressione, v il volume specifico e ρ è la densità del fluido. È dal termine p / ρ che si ricava poi $(p_2 - p_1) / \rho$.

In presenza di fluido viscoso una parte di energia meccanica si dissipa in calore. Poiché dobbiamo considerare anche questo calore, aggiungiamo – R che indica, appunto, l'energia che si dissipa. R è chiamata "perdita di carico".

Il carico è una grandezza fisica espressa in metri che rappresenta il battente idraulico.

Se dividiamo tutti i termini dell'equazione del bilancio energetico per g, otteniamo:

$$[(w_2^2 - w_1^2) / 2 g + (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) / \rho g] = - L^\bullet / M^\bullet g - C_R \qquad (m)$$

Il significato fisico è che tutti i termini dell'equazione hanno come unità di misura i metri.

La quantità $w^2 / 2 g$ è chiamata carico cinetico e rappresenta la quota massima raggiunta dal fluido lanciato verticalmente verso l'alto con velocità di modulo w. "Carico" non è inteso come peso, ma come altezza in metri.

Il termine z è chiamato carico geodetico e rappresenta l'altezza del fluido rispetto al livello del mare.

La quantità $p / \rho g$ è chiamata carico piezometrico. Essa rappresenta l'altezza che deve avere una colonna del fluido in questione per esercitare alla base la pressione p.

$- L^\bullet / M^\bullet g$ è il carico della pompa.

Se compero una caldaia, essa è caratterizzata da una prevalenza $(p_2 - p_1)$ calcolata non in Pascal, ma in metri. Questo perché non è veramente indicata la prevalenza, ma il carico che la prevalenza vince.

Ad esempio:

$$1 \text{ bar} = 10 \text{ m} = 100000 \text{ Pa}$$

Anche il termine R può essere espresso in metri. Questo giustifica l'utilizzo della definizione "perdita di carico". C_R è qui definito carico perso.

Nella prima equazione abbiamo dovuto scrivere $R M^\bullet$, perché in realtà R non è riferito né all'unità di massa né all'unità di tempo.

Al posto di $L^\bullet$ dobbiamo scrivere:

$$\Delta p \, M^\bullet / \rho$$

perché ,appunto, una caldaia è caratterizzata dalla sua prevalenza, cioè da una differenza di pressione, Δp. Essa, perciò, dipende dalla pompa utilizzata.

Scriveremo, quindi, correttamente la seguente equazione:

$$M^\bullet [(w_2^2 - w_1^2) / 2 + g (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) / \rho + R] = \Delta p \, M^\bullet / \rho \qquad (W)$$

La difficoltà nel calcolo di questa equazione è data dalla presenza di R. Se non possiamo ricavare la perdita di carico subito dai dati dobbiamo fare i seguenti passaggi:

- dall'equazione generale dello scambio termico troviamo:

$$Q^\bullet = k \, S \, \Delta T_m$$

- dall'equazione meccanica troviamo:

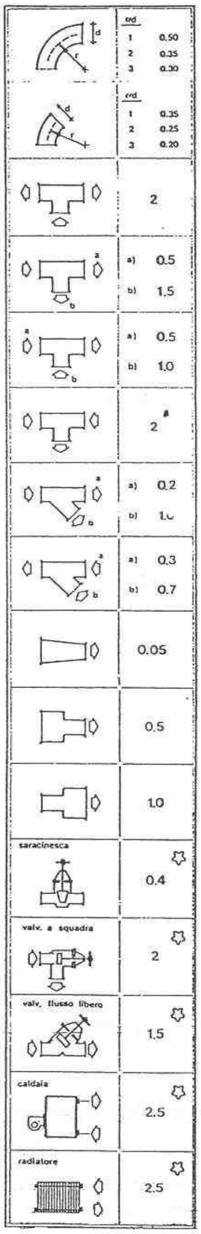
$$R = (\Sigma \beta_i + \xi L / D) w^2 / 2$$

dove $\Sigma \beta_i$ rappresentano le perdite di carico concentrate e $\xi L / D$ le perdite di carico distribuite.

β e ξ sono i coefficienti adimensionali che determinano le perdite di carico concentrate e distribuite.

Le perdite di carico concentrate medie si trovano nella seguente tabella:

COEFF. β PER ALCUNE ACCIDENTALITA' PRESENTI IN UN CIRCUITO IDRAULICO.



SEZIONE	$c = f \cdot Re$ (flusso laminare)		$D_{eq} = 4A/P$
circolare	64		D
quadrangolare	h/b		
	0.1	85	1.82 h
	0.2	76	1.67 h
	0.5	62	1.33 h
	1.0	57	1.00 h
triang. equilatera	53		0.58 h
anulare	96		2 h

SIMBOLOGIA

A	area della sezione, m^2
D	diametro interno (sez. circolare), m
D_{eq}	" " equivalente, m
f	fattore di attrito (Δp distribuite),
L	lunghezza del condotto, m
P	perimetro bagnato, m
Re	numero di Reynolds,
w	velocita' media, m/s
β	fattore di attrito (Δp accidentali = $\beta \rho w^2/2$),
Δp	perdite di pressione, Pa
ϵ	scabrosita', m
ν	viscosita' cinematica, m^2/s
ρ	densita', kg/m^3

Questo è un elenco dei casi geometrici più frequenti.
Per quanto riguarda le perdite di carico distribuite, il valore di ξ è funzione di due numeri puri:

1) la scabrezza relativa:

$$\varepsilon / D$$

dove ε è la scabrezza del condotto, cioè l'altezza media della rugosità del tubo e D è il diametro del condotto;

2) il numero di Reynolds:

$$Re = w\ D / \nu = \rho\ w\ D / \mu$$

dove ν rappresenta la viscosità cinematica dei fluidi e μ rappresenta la viscosità dinamica.
Perciò:

$$\xi = f_{(Re, \varepsilon / D)}$$

Esistono tabelle, come le seguenti, che elencano alcuni valori della viscosità dinamica e cinematica dell'acqua e dell'aria al variare della temperatura.

Proprietà dell'acqua a pressione atmosferica:

Temperatura	Viscosità dinamica	Viscosità cinematica
t	μ	ν
°C	Ns/m^2	m^2/s
0	$17,887 * 10^{-4}$	$1,794 * 10^{-6}$
5	$15,155 * 10^{-4}$	$1,519 * 10^{-6}$
10	$13,061 * 10^{-4}$	$1,310 * 10^{-6}$
15	$11,406 * 10^{-4}$	$1,146 * 10^{-6}$
20	$10,046 * 10^{-4}$	$1,011 * 10^{-6}$
30	$8,019 * 10^{-4}$	$0,803 * 10^{-6}$
40	$6,533 * 10^{-4}$	$0,659 * 10^{-6}$
50	$5,497 * 10^{-4}$	$0,556 * 10^{-6}$
60	$4,701 * 10^{-4}$	$0,478 * 10^{-6}$
70	$4,062 * 10^{-4}$	$0,416 * 10^{-6}$
80	$3,556 * 10^{-4}$	$0,367 * 10^{-6}$
90	$3,146 * 10^{-4}$	$0,328 * 10^{-6}$
100	$2,821 * 10^{-4}$	$0,296 * 10^{-6}$

Proprietà dell'aria a pressione atmosferica:

Temperatura	Viscosità dinamica	Viscosità cinematica
t	μ	ν
°C	Ns/m^2	m^2/s
– 180	$6{,}472 * 10^{-6}$	$1{,}750 * 10^{-6}$
– 150	$8{,}591 * 10^{-6}$	$3{,}140 * 10^{-6}$
– 100	$11{,}866 * 10^{-6}$	$5{,}960 * 10^{-6}$
– 50	$14{,}808 * 10^{-6}$	$9{,}650 * 10^{-6}$
– 20	$16{,}279 * 10^{-6}$	$12{,}000 * 10^{-6}$
0	$17{,}456 * 10^{-6}$	$13{,}900 * 10^{-6}$
10	$17848 * 10^{-6}$	$14{,}660 * 10^{-6}$
20	$18{,}240 * 10^{-6}$	$15{,}700 * 10^{-6}$
30	$18{,}682 * 10^{-6}$	$16{,}580 * 10^{-6}$
40	$19{,}123 * 10^{-6}$	$17{,}600 * 10^{-6}$
50	$19{,}515 * 10^{-6}$	$18{,}580 * 10^{-6}$
60	$19{,}907 * 10^{-6}$	$19{,}400 * 10^{-6}$
70	$20{,}398 * 10^{-6}$	$20{,}650 * 10^{-6}$
80	$20{,}790 * 10^{-6}$	$21{,}500 * 10^{-6}$
90	$21{,}231 * 10^{-6}$	$22{,}820 * 10^{-6}$
100	$21{,}673 * 10^{-6}$	$23{,}600 * 10^{-6}$
120	$22{,}555 * 10^{-6}$	$25{,}900 * 10^{-6}$
140	$23{,}340 * 10^{-6}$	$28{,}200 * 10^{-6}$
150	$23{,}732 * 10^{-6}$	$29{,}400 * 10^{-6}$
160	$24{,}124 * 10^{-6}$	$30{,}600 * 10^{-6}$
180	$24{,}909 * 10^{-6}$	$33{,}000 * 10^{-6}$
200	$25{,}693 * 10^{-6}$	$35{,}500 * 10^{-6}$
250	$27{,}557 * 10^{-6}$	$42{,}200 * 10^{-6}$
300	$29{,}322 * 10^{-6}$	$49{,}200 * 10^{-6}$

Una volta calcolato il numero di Reynolds si presentano due casi:

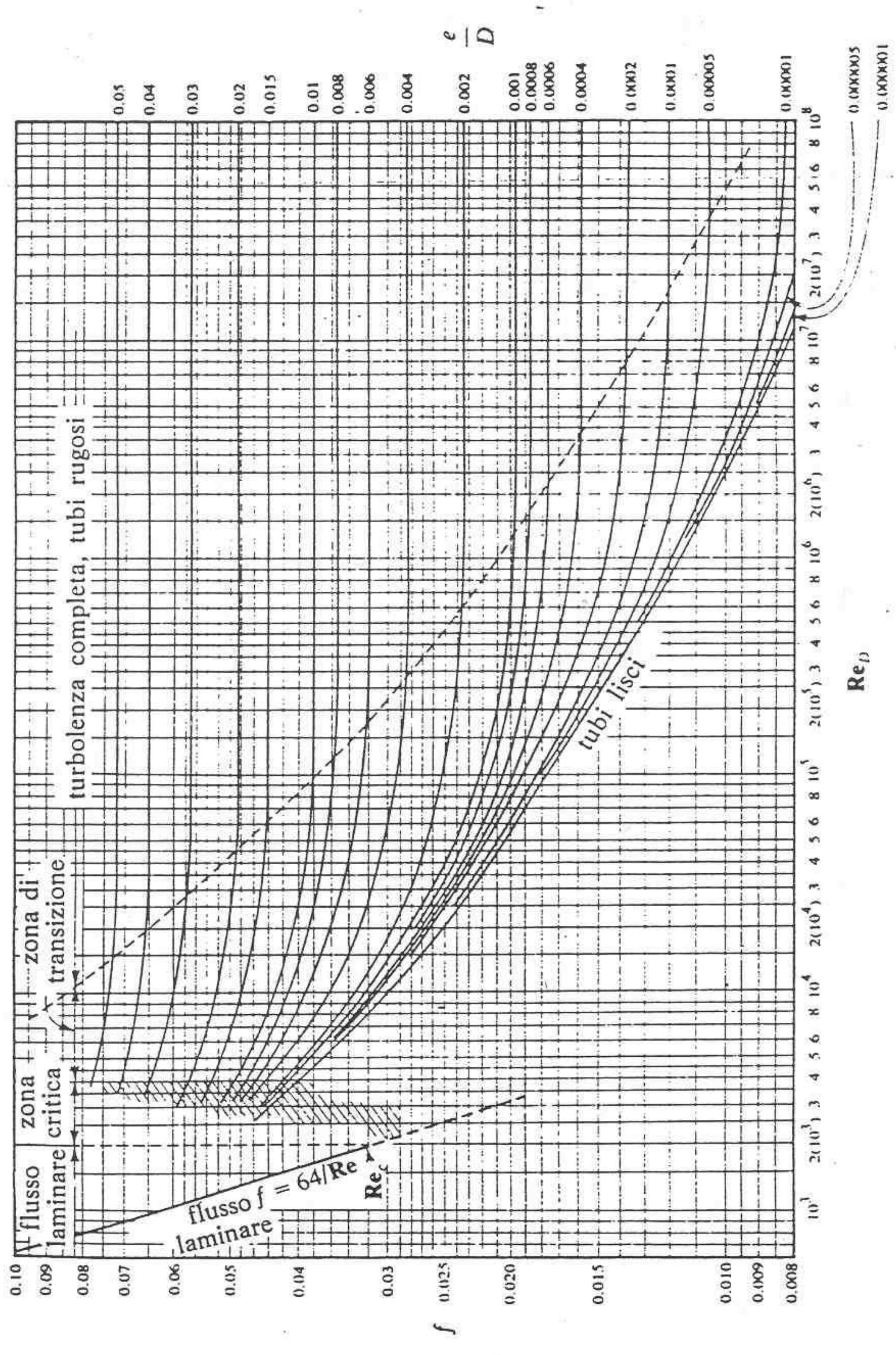
1) $Re < 2100$

Il moto del fluido è di tipo laminare e quindi:

$$\xi = 64 / Re$$

2) $Re > 4300$

Il moto del fluido è turbolento e quindi per calcolare ξ si utilizza il diagramma di Moody.



Questo è un diagramma di tipo sperimentale: è stato, cioè, creato in laboratorio tramite un numero elevato di esperimenti.

Il diagramma di Moody è strutturato nel seguente modo:
- in ascissa presenta il numero di Reynolds, Re;
- sul lato sinistro presenta il coefficiente di attrito, ξ;
- sul lato destro presenta la scabrezza relativa, ε / D.

Inoltre questo grafico è diviso in tre fasce verticali:

- per $Re < 2100$ il fluido si muove di moto laminare e perciò:

$$\xi = 64 / Re$$

quindi non è necessario utilizzare il grafico;

- per $2100 < Re < 4300$ troviamo una fascia verticale chiamata zona di transizione, in cui il moto del fluido non è ben definito;

- per $Re > 4300$ il moto del fluido è turbolento e il valore di ξ sulla sinistra si ricava dal grafico conoscendo il valore di Re e ε / D.

Per valori di Reynolds elevati ξ può essere considerata dipendente solo dal valore della scabrezza relativa, ε / D. È quindi possibile ricavare il valore di ξ conoscendo semplicemente il valore di ε / D.

Il numero di Nusselt e la sua importanza:

Riconsideriamo ora l'equazione generale dello scambio termico:

$$Q^{\bullet} = k\ S\ \Delta T_m$$

Esiste un metodo per trasformare k, coefficiente globale di scambio termico, in una forma adimensionale. Per fare ciò dobbiamo conoscere il coefficiente di scambio adimensionale chiamato numero di Nusselt (Nu):

$$Nu = k\ D / \lambda$$

dove k è il coefficiente globale di scambio termico, D è il diametro del tubo considerato e λ rappresenta la conducibilità termica.

Il numero di Nusselt è funzione di quattro altre grandezze. La ricerca di questo valore è dovuta all'importanza che può avere l'utilizzo di coefficienti adimensionali. I principali vantaggi sono due:

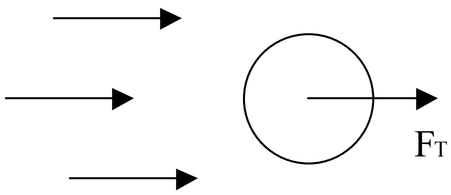
1) Se, per esempio, il numero di Reynolds dipendesse da una grandezza dimensionata, in laboratorio dovremmo considerare infiniti casi. Se, invece, questa grandezza è adimensionata, in laboratorio possiamo esaminare molti meno casi.

2) Prima dell'utilizzo del sistema internazionale (SI), era utilizzato il sistema tecnico che non era sempre lo stesso, ma ne esistevano diversi tipi. Se, infatti, osserviamo i libri, possiamo trovare diversi dati scritti in unità di misura non convenzionali. Adimensionando l'equazione, qualunque sistema unitario utilizziamo, i fenomeni fisici assumono gli stessi valori caratteristici.

Il moto esterno di un fluido:

L'equazione fondamentale relativa al moto esterno di un fluido è quella che ci permette di calcolare la forza di trascinamento, F_T, che è impressa ad un corpo immerso nel fluido.

Consideriamo, ad esempio, un corpo che si trovi nel vento ed abbia una velocità w.



La forza di trascinamento è espressa dalla seguente equazione:

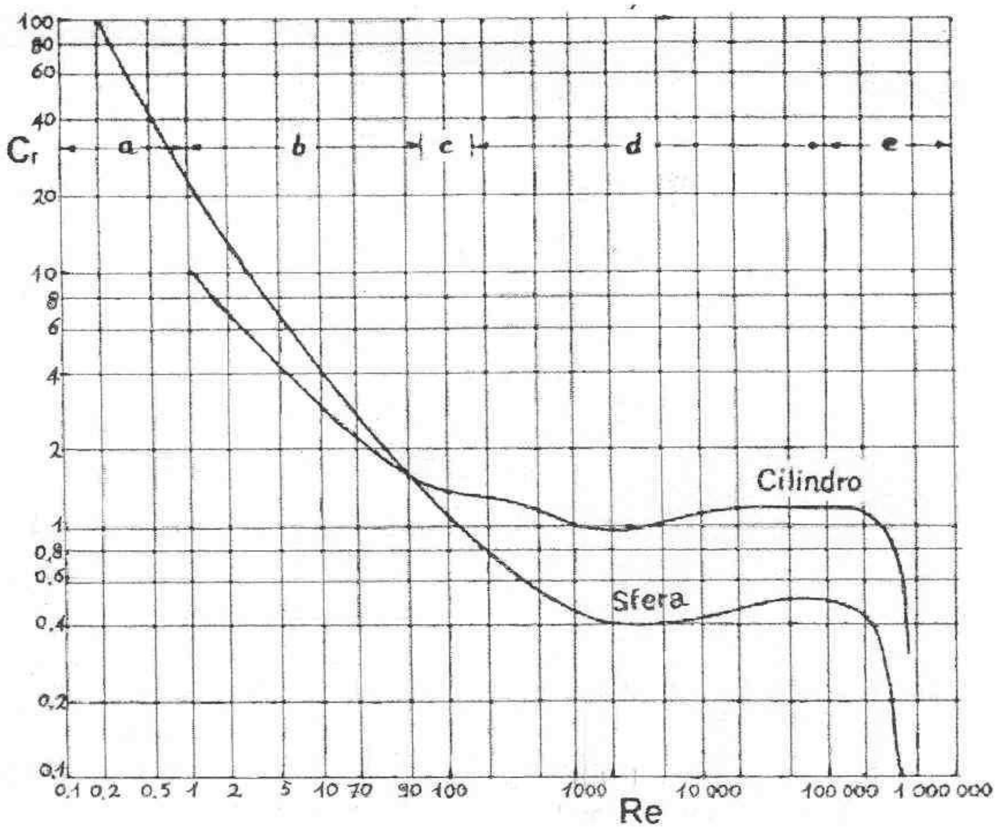
$$F_T = C_R \, A_f \, \rho_{fluido} \, w^2 / 2$$

dove C_R è il coefficiente di trascinamento, A_f è l'area frontale del corpo, ρ_{fluido} è la densità del fluido e w la sua velocità.

Il coefficiente di trascinamento C_R è un numero puro che dipende dal valore del numero di Reynolds del fluido. Anche questo valore si può ricavare da un diagramma dove compare in ascissa il numero di Reynolds, Re, e in ordinata il coefficiente di trascinamento, C_R. Conoscendo il valore di Re possiamo ricavare direttamente dal grafico il valore di C_R.

Un esempio è il diagramma riportato nella pagina seguente in cui sono rappresentati i valori relativi ad un corpo cilindrico e quelli relativi ad un corpo sferico.

Sulle ascisse troviamo il numero di Reynolds relativo al fluido che investe il corpo cilindrico o sferico; sulle ordinate troviamo il valore del coefficiente di trascinamento, C_R, relativo al corpo cilindrico o sferico.



Anche dal punto di vista termico abbiamo trovato una relazione tra il numero di Nusselt, Nu, e il coefficiente globale di scambio termico, k.

Concludendo, possiamo osservare che lo scambio termico e lo scambio fluidodinamico sono fenomeni che presentano una certa analogia.