

Nicola Taraschi

Progettazione e calcolo di impianti di climatizzazione

- Calcolo delle reti aerauliche con il software CANALI
- Le trasformazioni dell'aria umida ed il software PSICRO
- I ventilatori
- Le batterie alettate ed il software BATTERIE
- I recuperatori di calore
- Le torri evaporative ed il software TORRI
- Il software di calcolo secondo la norma UNI 13786
- Il software COMPRESSORI secondo la norma 113500

Nicola Taraschi

PROGETTAZIONE E CALCOLO DI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE

ISBN 13 978-88-8207-456-2

EAN 9 788882 074562

Software, 60

Prima edizione, febbraio 2012

Taraschi, Nicola <1952->

Progettazione e calcolo di impianti di climatizzazione / Nicola Taraschi. – Palermo : Grafill, 2012.

(Software ; 60)

ISBN 978-88-8207-456-2

1. Impianti di condizionamento.

697 CDD-22

SBN Pal0238969

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di febbraio 2012

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

SOMMARIO

PREFAZIONE	p.	7
1. LE PERDITE DI CARICO NEI CIRCUITI AERAILICI	"	9
1.1. L'equazione dell'energia applicata all'aerailica	"	9
1.2. Le perdite di carico	"	10
1.3. Le proprietà fisiche dell'aria	"	10
1.4. Legame fra perdita e portata	"	11
1.5. L'influenza della temperatura	"	12
1.6. Influenza del diametro	"	12
1.7. Il diametro ottimale	"	14
1.8. Il coefficiente di forma	"	15
1.9. Le perdite concentrate	"	16
2. APPLICAZIONI DI AERAILICA	"	18
2.1. Il calcolo dei canali con il calcolo elettronico	"	18
2.1.1. Calcolo di progetto a perdita costante	"	19
2.1.2. Calcolo di progetto a velocità limite	"	19
2.1.3. Calcolo di progetto a recupero di statica	"	20
2.2. Il confronto fra i sistemi aerailici ed idraulici ai fini del costo del trasporto dell'energia termica	"	20
2.3. La caduta di temperatura nei condotti	"	21
2.4. Le pressioni nei condotti aerailici: pressione dinamica e pressione statica	"	22
2.5. I diffusori	"	25
2.6. I diffusori a maniche tessili	"	26
2.7. I filtri	"	27
3. LE RETI AERAILICHE	"	28
3.1. Generalità sulle reti aerailiche	"	28
3.2. Il calcolo delle portate reali	"	29
3.3. Il confronto fra il metodo di calcolo dei canali a recupero di statica e quello a perdita di carico costante	"	29
3.3.1. Il calcolo a recupero di statica	"	30
3.3.2. Il calcolo a perdita di carico costante	"	32
3.3.3. Confronto fra i due criteri	"	33

3.4.	La rete con ricircolo	p.	33
3.5.	La rete con ventilatore di ricircolo	"	35
3.6.	Gli impianti di aspirazione	"	37
4.	LA FISICA DELL'ARIA UMIDA	"	40
4.1.	Proprietà fondamentali dell'aria umida	"	40
4.1.1.	I passaggi di stato	"	40
4.1.2.	Proprietà psicrometriche.....	"	41
4.2.	Le trasformazioni dell'aria umida: la miscelazione	"	43
4.3.	Riscaldamento – raffreddamento.....	"	44
4.4.	La condensazione sulle tubazioni.....	"	45
4.5.	Raffreddamento con condensazione.....	"	46
5.	LE TRASFORMAZIONI DELL'ARIA UMIDA	"	50
5.1.	Umidificazione	"	50
5.2.	Umidificazione adiabatica.....	"	51
5.3.	Il ciclo estivo	"	51
5.4.	Il ciclo estivo con postriscaldamento	"	56
5.5.	Il ciclo invernale	"	57
6.	I VENTILATORI	"	60
6.1.	La variazione del punto di lavoro.....	"	60
6.2.	La curva caratteristica q- ΔP dei ventilatori al variare del diametro	"	62
6.3.	La curva caratteristica q-h dei ventilatori al variare del numero di giri.....	"	63
6.4.	Il punto di lavoro al variare del numero di giri	"	64
6.5.	I sistemi per la regolazione della portata nei ventilatori centrifughi.....	"	65
6.5.1.	I ventilatori a velocità variabile.....	"	65
6.5.2.	La variazione di portata mediante regolatore con pale ad inclinazione variabile.....	"	65
6.6.	I ventilatori assiali	"	66
6.7.	L'utilizzo del foglio elettronico	"	68
7.	LE BATTERIE ALETTATE NEL CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA	"	69
7.1.	Premessa	"	69
7.2.	L'aletta cilindrica.....	"	70
7.3.	Il coefficiente di scambio termico nelle batterie alettate.....	"	72
7.4.	La trasmittanza al variare del passo delle alette	"	74
7.5.	Le configurazioni delle batterie alettate	"	75
7.6.	Il progetto di una batteria alettata (senza condensazione).....	"	78
7.7.	Le batterie alettate con condensazione dell'aria.....	"	82
7.8.	Le perdite di carico delle batterie alettate	"	83

8. LE APPARECCHIATURE PER IL TRATTAMENTO DELL'ARIA	p.	86
8.1. Le torri di raffreddamento	"	86
8.2. I fancoil.....	"	95
8.3. I recuperatori di calore aria-aria	"	97
9. GUIDA ALL'INSTALLAZIONE E ALL'USO DEL SOFTWARE	"	106
9.1. Presentazione.....	"	106
9.2. Requisiti minimi hardware e software.....	"	106
9.3. Procedura per la richiesta della password utente.....	"	106
9.4. Procedura per l'installazione del software	"	107
9.5. Procedura per la registrazione del software	"	108
10. IL PROGRAMMA CANALI	"	110
10.1. Presentazione.....	"	110
10.2. Tipologie di calcolo.....	"	110
10.3. L'ambiente di lavoro.....	"	111
10.3.1. Il menu File.....	"	111
10.3.2. Il menu Viste.....	"	112
10.3.3. Il menu Archivi.....	"	113
10.3.4. Il menu Help	"	113
10.3.5. Il menu Componenti	"	114
10.3.6. Il menu Ambiente	"	114
10.3.7. Gli esempi (videata principale del programma).....	"	114
10.3.8. Elenco progetti su disco (videata principale del programma).....	"	115
10.4. Come iniziare: la produzione di un nuovo progetto.....	"	115
10.5. L'ambiente grafico di immissione dei dati	"	117
10.6. Un esempio passo-passo.....	"	122
10.7. L'immissione dei nuovi componenti	"	125
10.8. Gli esempi.....	"	127
10.8.1. Esempio rete con diffusori.....	"	127
10.8.2. Esempio rete di aspirazione.....	"	131
10.8.3. Esempio rete mista.....	"	133
10.8.4. Esempio rete con by-pass	"	134
11. IL PROGRAMMA PSICRO	"	136
11.1. Proprietà del punto	"	137
11.2. Miscelazione.....	"	138
11.3. Riscaldamento-raffreddamento sensibile	"	139
11.4. Umidificazione	"	140
11.5. Umidificazione con vapore	"	141
11.6. Raffreddamento con condensazione.....	"	141
11.7. Ciclo estivo.....	"	142

11.8. Ciclo estivo con postriscaldamento.....	p.	144
11.9. Ciclo invernale	"	146
11.10. Ciclo invernale con umidificazione a vapore	"	148
11.11. Verifica estiva	"	148
12. IL PROGRAMMA BATTERIE ALETTATE	"	149
13. IL PROGRAMMA TORRI EVAPORATIVE	"	152
14. IL PROGRAMMA COMPRESSORI	"	155
15. IL PROGRAMMA UNI 13786.....	"	158
BIBLIOGRAFIA	"	163

Prefazione

In questi ultimi anni nel campo termotecnico assistiamo a due tendenze particolari: un forte sviluppo degli impianti di condizionamento dell'aria e l'evoluzione delle norme tecniche di progettazione verso condizioni di maggiore attenzione alle condizioni effettive di funzionamento degli impianti.

Questo testo vuol dare un contributo ad entrambe queste tendenze, fornendo competenze nel campo degli impianti di climatizzazione con una metodologia di analisi di componenti ed impianti che ha come costante intento quello di trovare le condizioni reali di funzionamento.

Il software è lo strumento utilizzato nel testo per lo studio teorico e nello stesso tempo viene reso disponibile al professionista per il calcolo degli impianti e macchine per la climatizzazione.

Le tematiche trattate non possono, per le dimensioni del testo, coprire tutti gli aspetti del condizionamento dell'aria, ma trattare quelle ritenute fondamentali.

I primi cinque capitoli sviluppano gli argomenti teorici, anche se legati alla pratica di progettazione e trattano il calcolo dei canali e delle reti di canali, la fisica dell'aria umida e le trasformazioni psicrometriche.

I capitoli sesto, settimo ed ottavo analizzano le macchine per il trattamento dell'aria: i ventilatori, le batterie alettate, i fancoil, le torri evaporative.

I capitoli dal decimo al quindicesimo sono il manuale del software a corredo e rispettivamente:

- **CANALI**: programma per il calcolo delle reti di canali, versione analoga al programma **TUTTELERETI** per le reti idrauliche, che permette il calcolo reale di reti anche non comuni. Il programma permette l'immissione dei dati del progetto in un ambiente grafico in cui è possibile disegnare la geometria della rete e immettere direttamente i dati associati;
- **PSICRO**: tutti i calcoli sul trattamento dell'aria umida;
- **BATTERIE**: calcolo di batterie alettate deumidificanti;
- **TORRI**: calcolo di torri evaporative con il metodo del NTU;
- **COMPRESSORI**: calcolo dell'efficienza stagionale di uno o più compressori in parallelo secondo UNI 11135;
- **UNI 13786**: calcolo della trasmittanza termica periodica e delle grandezze correlate secondo la norma 13786.

Capitolo 1

Le perdite di carico nei circuiti aeraulici↪ **1.1. L'equazione dell'energia applicata all'aeraulica**

Se consideriamo un generico condotto (figura 1.1) in cui circola aria, l'espressione del teorema dell'energia, applicata fra l'aspirazione e la mandata può essere espresso nella forma:

$$[1] H_A + H_v - H_w = H_B \text{ dove:}$$

$$H_A = P_A / \gamma + Z_A + V_A^2 / 2g$$

$$H_B = P_B / \gamma + Z_B + V_B^2 / 2g$$

- H_A, H_B energia idraulica nei punti A e B [metri di colonna di fluido];
 - P_A, P_B pressioni relative al nodo A iniziale e B finale [Pa];
 - V_A, V_B velocità nei punti A e B [m/s];
 - H_w = perdite di carico del circuito [metri di colonna di fluido];
 - Z_A, Z_B quote geometriche dei nodi rispettivamente iniziale e finale [m];
 - H_v = prevalenza fornita dal ventilatore [metri di colonna di fluido];
 - γ = peso specifico del fluido [N/m³];
- per l'essere il condotto immerso in aria possiamo affermare, per le leggi dell'idrostatica, che:

$$P_A / \gamma + Z_A = P_B / \gamma + Z_B$$

ne consegue:

$$[2] H_p = V_B^2 / 2g + H_w$$

cioè il ventilatore deve vincere le sole perdite di carico del condotto e fornire l'energia cinetica posseduta dall'aria in uscita.

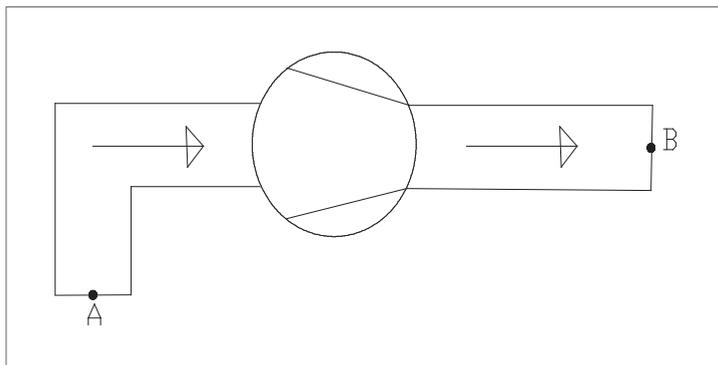


Figura 1.1.

↪ 1.2. Le perdite di carico

Il termine H_W rappresenta le perdite di carico del condotto, che possono essere suddivise in distribuite (quelle dovute all'attrito del condotto e quindi proporzionali alla lunghezza della tubazione, e concentrate dovute ai cambiamenti di direzione ed in genere agli ostacoli che il fluido incontra nel suo movimento.

Nella letteratura tecnica l'equazione universalmente accettata per il calcolo delle perdite di carico è quella di Darcy-Weisbach:

$$[3] Y_c = \frac{\lambda \cdot v^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot D}$$

dove:

- Y_c = metri di colonna di fluido;
- λ = fattore di attrito [numero puro];
- V = velocità aria;

il fattore di attrito può essere ricavato con l'espressione:

$$[4] 1 / \sqrt{\lambda} = -2 \log (RR / 3,7 + 2,51 / R \sqrt{\lambda})$$

dove:

- RR = rugosità relativa = ε / D ;
- ε = rugosità assoluta tubazione [m];
- L = lunghezza tubazione [m];
- D = diametro interno tubo [m];
- g = accelerazione di gravità [m/s²].

E passando da Y_C (metri di colonna di fluido) alla caduta di pressione DP :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot Y_C$$

- ρ = massa volumica del fluido [kg/m³].

Il fattore di attrito λ dipende dal regime di moto che è determinato dal numero di Reynolds R dove:

$$[5] R = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

dove:

μ = viscosità dinamica [N · s / m²] oppure [Pa · s].

Introducendo la viscosità cinematica ν è la relazione:

$$[6] \nu = \mu / \rho$$

- ν = viscosità cinematica [m²/s].

↪ 1.3. Le proprietà fisiche dell'aria

La viscosità: la viscosità dinamica è una misura della resistenza di attrito interna. Nell'aria, come in tutti i gas, a differenza dei liquidi, la viscosità aumenta con la temperatura.

La massa volumica: la massa volumica dell'aria diminuisce all'aumentare della temperatura e al diminuire della pressione (e quindi diminuisce con l'altitudine).

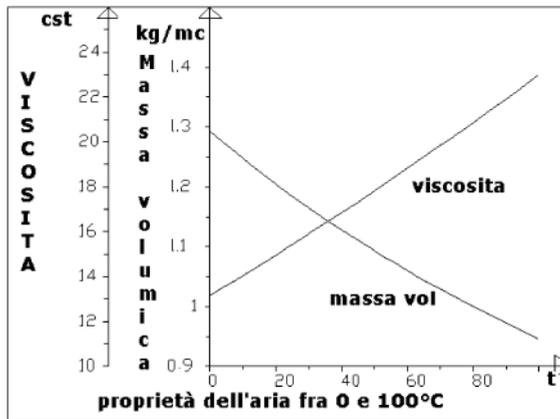


Figura 1.2.

Il grafico di figura 1.2 mostra l'andamento delle proprietà dell'aria, viscosità e massa volumica al variare della temperatura fra zero e 100 °C.

Si può quindi affermare che, in base alla [3] la perdita di carico dipende:

- dalla portata o la velocità della tubazione;
- dal diametro interno del tubo;
- dalla rugosità del tubo;
- dalla temperatura, che influenza la viscosità e la massa volumica.

1.4. Legame fra perdita e portata

Se nella [3] supponiamo costante la temperatura ed il diametro, otteniamo la relazione (vedi figura 1.3):

$$[7] Y = K \cdot q^2 \cdot L$$

$q = \text{portata}$

dove K riassume tutte le grandezze supposte costanti come il diametro, la lunghezza, il coefficiente di attrito. In realtà quest'ultimo non è del tutto costante perché varia al variare della velocità e quindi del numero di Reynolds. Il grafico di figura 1.3 è relativo al canale circolare avente $D = 250$ mm ed è costruito con il criterio:

- in ascissa viene riportato il rapporto q / q^* fra la portata e la portata di riferimento (relativa ad una velocità di 1 m/sec);
- in ordinata il rapporto fra la perdita H e la perdita H^* (quella ottenuta con la portata di riferimento). Inoltre:
 - temperatura = 15 °C;
 - altezza S.L.M. = 0 metri;

- rugosità assoluta = 250 micron.

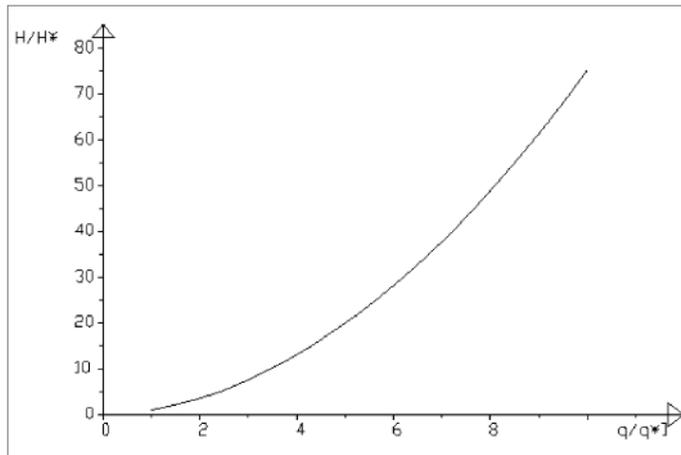


Figura 1.3.

Il grafico evidenzia un legame non lineare ma quasi quadratico fra l'ordinata e l'ascissa. Un legame quadratico significa che ad un raddoppio della portata consegue un aumento della perdita di circa quattro volte e della potenza idraulica di circa otto. Si ricorda infatti che la potenza idraulica W_h è esprimibile con la relazione:

$$W_h = \rho \cdot g \cdot q \cdot H$$

dove:

- H = prevalenza.

↪ 1.5. L'influenza della temperatura

La temperatura influisce in due modi sulle perdite di carico: al variare di questa aumenta la viscosità dell'aria mentre la massa volumica diminuisce. Nel grafico di figura 1.4 è riportato il rapporto fra la perdita di carico P , a temperatura t e quella di riferimento P_r . La perdita P_r di riferimento è considerata nelle condizioni:

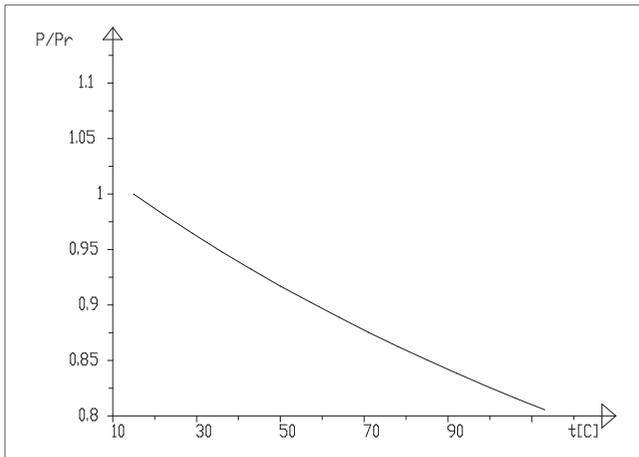
- temperatura = 15 °C, rugosità assoluta = 250 micron, velocità pari a 3 m/s.

Si può notare un abbassamento di questo rapporto all'aumentare della temperatura (circa 18% fra 15 e 100 °C).

↪ 1.6. Influenza del diametro

Se si sviluppa infine la [3] in funzione della portata anziché della velocità, si ottiene la seguente equazione:

$$[8] Y = K \cdot \frac{Q^2 \cdot L}{D^5}$$

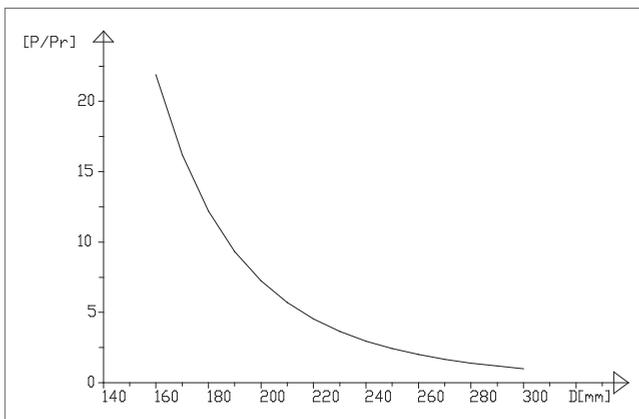
**Figura 1.4.**

Si può pertanto desumere la forte influenza del diametro, a parità di altre condizioni, sulla perdita di carico.

Nel grafico di figura 1.5 viene riportato il rapporto fra la perdita di carico in funzione del diametro, P , e quella relativa al diametro = 300 mm, P_r , nelle seguenti condizioni:

- temperatura = 15 °C, rugosità assoluta = 250 micron, portata = 5 m³/h.

È evidente la forte diminuzione di perdita all'aumentare del diametro.

**Figura 1.5.**

Se l'equazione [3] viene risolta considerando costante il rapporto V^2/D e quindi con una perdita costante, otteniamo il grafico di figura 1.6 che mostra come a diametri crescenti corrisponderanno velocità crescenti.

Bisogna quindi tener presente che una stessa velocità dell'aria può conseguire una perdita di carico completamente differente a seconda del diametro

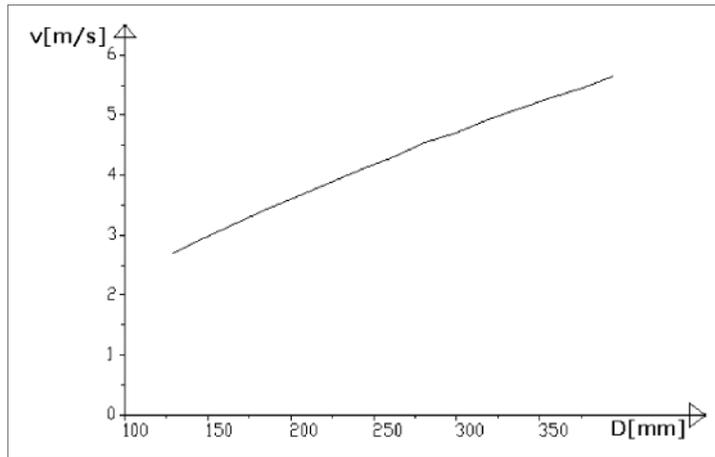


Figura 1.6.

1.7. Il diametro ottimale

Lo studio della maggiore convenienza economica di una tubazione a convogliare una data portata può essere basato sulla condizione:

- COSTO TOTALE = COSTO ENERGIA + COSTO ANNUO TUBAZIONE = MINIMO.

Si supponga che:

- la spesa di installazione sia costante per diametri vicini;
- il costo annuo della tubazione, CTA, venga calcolato con l'espressione seguente della matematica finanziaria:

$$[9] CTA = p \cdot CT$$

dove:

- p = rata annuale rappresentante l'ammortamento in n anni al tasso d'interesse i ;
- CT = costo tubazione [€/m].

$$[10] p = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$$

- il costo dell'energia venga calcolato come:

$$[11] CE = \epsilon \cdot W_h \cdot h / \eta$$

dove:

- CE = costo energia [€];
- ϵ = costo in euro del kilowattora;
- η = rendimento del sistema nei confronti dell'energia elettrica assorbita;
- W_h = potenza idraulica persa per attrito da 1 metro di canale;
- h = ore annue di funzionamento.

Il grafico di figura 1.7 riporta l'andamento del costo totale in funzione della portata per i canali rispettivamente $D = 200, 250, 300$ mm nelle condizioni:

- ore annue di funzionamento 3.650, costo del KWH = € 0,15, anni 5 di ammortamento, temperatura aria = 15 °C. Si può osservare che:
 - le curve partono tutte (anche se il grafico non rappresenta questa parte), per una portata pari a zero, da un costo uguale al costo del canale;
 - l'incremento del costo totale (la pendenza delle curve) è maggiore per i canali di diametro più piccolo (maggiori perdite), minore per quelli di diametro maggiore: questo è dovuto al fatto che i diametri minori hanno perdite maggiori;
 - la maggiore convenienza si verifica per ogni diametro in un certo campo di portate.

In questo caso:

- la tubazione D = 200 è più conveniente, ha cioè il costo totale più basso, per una portata inferiore a quella del punto A (530 m³/h);
- la tubazione D = 250 è più conveniente nel campo di portate fra i punti A e B (fra 530 e 775 m³/h);
- la tubazione D = 300 è più conveniente per portate superiori a quella del punto B (maggiore di 775 m³/h).

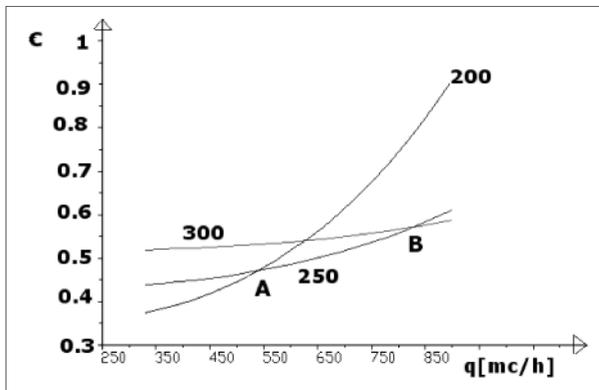


Figura 1.7.

1.8. Il coefficiente di forma

Il canale rettangolare di lati a e b può essere considerato ai fini del calcolo della perdita di carico distribuita come un canale circolare avente diametro equivalente:

$$D_{eq} = 1,3 \cdot \frac{(a \cdot b)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}}$$

Questa espressione conduce alla seguente osservazione:

- il canale rettangolare, a parità di area e quindi sia di velocità che di portata ha perdite maggiori di quello circolare, questa perdita inoltre aumenta all'aumentare del rapporto a/b fra i due lati.

Supponiamo che sia:

$$S = a \cdot b = \text{area sezione, } k = a / b$$