

Osservazioni sul comportamento idraulico delle tubazioni adduttrici dell'acquedotto di Pisa

dott. ing. Ignazio Mantica (*)

La memoria riferisce sul coefficiente di scabrezza, ricavato dall'osservazione di diverse condizioni di moto dell'acqua, di una tubazione in ghisa, in esercizio da oltre un cinquantennio, e di una tubazione in acciaio, prefiggendosi di instaurare un confronto tra le varie formule che legano scabrezza, pressione e portata.

1. Generalità

La fonte principale dell'approvvigionamento idrico della città di Pisa è la falda subalvea del Serchio in corrispondenza della stretta di Ripafratta (tra il Monte Pisano ed i Monti d'Oltreserchio, in località Filettole).

Da qui partono due condotte prementi che adducono l'acqua al serbatoio di compenso giornaliero sito in località Orzignano; questo serbatoio, attraverso due condotte, alimenta la rete di distribuzione cittadina.

Delle citate prementi la prima è una vecchia tubazione in ghisa del diametro pari a 400 mm e della lunghezza di 6387 m progettata nel 1911 e realizzata, si presume, verso il 1920; la seconda, parallela alla prima e del diametro pari a 450 mm, è in acciaio Mannesman catramato ed è stata realizzata nel 1958. Entrambe convogliano l'acqua che dalla centrale di Filettole, la cui soglia è di m 11,962 s.l.m. ⁽¹⁾, porta al serbatoio di Orzignano, dove la quota di sbocco delle condotte è di m 67,108 s.l.m. ⁽¹⁾. Subito a valle delle pompe sono installati un

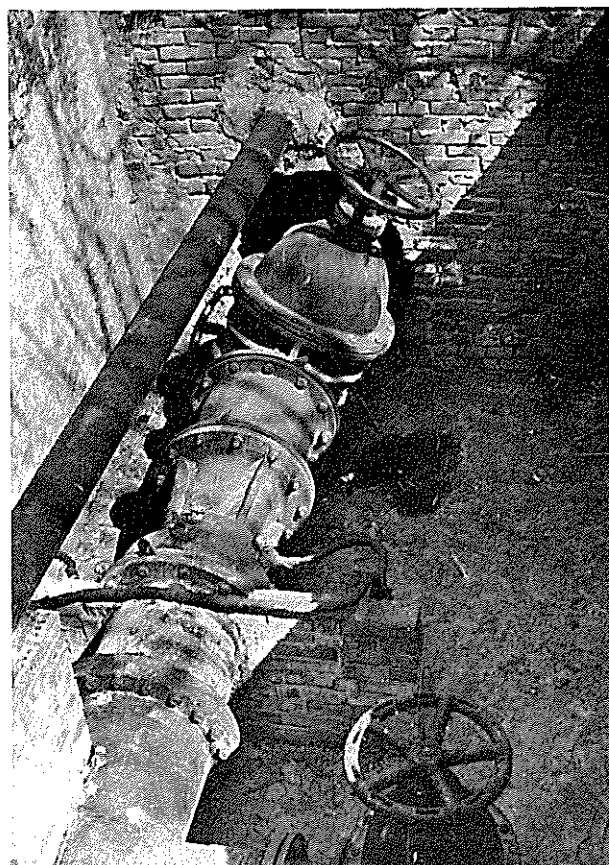
manometro ed un venturimetro (foto 1). Entrambi gli strumenti sono degni della massima fiducia in merito alle rispettive misure.

Le letture dal manometro registratore sono state confrontate con un manometro appositamente tarato con banco di taratura, per manometri idraulici, Budenberg tipo 280 H «High Ranger».

La differenza di pressione provocata dal venturimetro è stata controllata con un manometro differenziale ad olio.

Nonostante l'età avanzata la tubazione si presenta esteriormente in buono stato di conservazione.

Foto 1.



(*) Ingegnere Capo Divisione Acquedotti-Comune di Pisa. Assistente Istituto di Idraulica-Università di Pisa.

⁽¹⁾ Valori forniti dall'Istituto di Topografia e Geodesia dell'Università di Pisa.

Tabella 1 - CONDIZIONI DI MOTO ESAMINATE

N. d'ord.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Portata												
Q (mc/sec)	0,0635	0,076	0,095	0,100	0,105	0,110	0,115	0,120	0,125	0,137	0,140	0,142
Pressione (m)	71	76	82,3	85	86	90	91	95,7	97	106	108	108
Giorno	28-1-73	24-8-72	26-12-72	22-11-72	10-12-72	7-7-72	10-12-72	21-11-72	10-2-72	19-8-72	28-8-72	7-7-72

Tabella 2 - CONDIZIONI DI MOTO ESAMINATE

N. d'ord.	1	2	3	4	5
Portata (mc/sec)	148	162	180	195	205
Pressione (m)	80	86	90	94	98
Giorno	30-3-72	30-3-72	6-7-72	17-7-72	14-7-72

2. Misure effettuate e loro elaborazione

Con i dati delle registrazioni del manometro e del venturimetro si sono compilate le tabelle 1 e 2. Nel primo rigo di ciascuna tabella sono riportati alcuni valori di portata e nel secondo la pressione misurata relativa ai corrispondenti valori di portata. Questi valori corrispondono, di massima, alle normali condizioni di esercizio della tubazione.

Con riferimento alle quote suddette si sono determinate:

- le quote dell'asse del tubo di partenza da Filettole in corrispondenza della sezione di presa di pressione del manometro;
- la quota del manometro.

Si è quindi proceduto al calcolo del dislivello manometrico superato e della perdita di carico (espressa in metri di colonna di acqua). Nelle

tabelle 3 e 4 sono riportate, in corrispondenza di ciascuna condizione di moto esaminata, la velocità, la perdita di carico e la pendenza piezometrica. A fianco della colonna delle velocità è riportato il numero di Reynolds (Re)⁽²⁾. Nella colonna f sono stati riportati i valori del numero di Eulero⁽³⁾ secondo la formula

$$E = \frac{4U^2}{g \cdot D \cdot I} \quad (1)$$

Nei liquidi viscosi sussiste la relazione

$$E = K \cdot f(Re) \quad (2)$$

tra il numero di Reynolds ed il numero di Eulero.

Si può dunque asserire, osservando come per ciascuna tubazione E rimanga pressoché costante, che si tratta sempre, per entrambe le tubazioni, di moto turbolento in tubi molto scabrosi.

(²) La viscosità è stata ricavata tramite la formula

$$\mu = \frac{0,0001817}{1 + 0,0336 T + 0,000221 T^2} \text{ Kg sec/m}^2$$

dove T è la temperatura dell'acqua. Nel nostro caso essendo $T = 13,5^\circ$, avremo

$$\mu = 0,000121648311, \text{ da cui } \nu = 1,241 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

(³) Si tenga presente che

$$E = \rho \cdot \frac{U^2}{\Delta p} \quad \text{dove} \quad \Delta p = \frac{\rho D}{4} \cdot I$$

Tabella 3 - ELABORAZIONE DELLA TABELLA 1 - FORMULA DI NIKURADSE

Condizio- ne di moto	Velocità U (m/sec)	N. di Reynolds Re	Perdita di carico Y (m)	Pendenza Piezome- trica (1×10^3)	N. di Eulero E	Indice di resistenza λ	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$	$-\log_{10} \varepsilon$	ε (m)
a	b	c	d	e	f	g	h	i	l
1	0,5055	172820.5123	13.354	2.0908	124.5000	0.0642	3.9466	1.8023	0.0157652
2	0.6050	206837.6063	18.354	2.8736	129.7000	0.0616	4.0291	1.8435	0.0143384
3	0.7563	258564.1018	24.654	3.8600	150.9000	0.0530	4.3437	2.0008	0.0099816
4	0.7961	272170.9394	27.354	4.2827	150.7000	0.0530	4.3437	2.0008	0.0099816
5	0.8359	285777.7770	28.354	4.4393	160.2000	0.0499	4.4766	2.0673	0.0085645
6	0.8757	299384.6146	32.354	5.0656	154.1000	0.0519	4.3895	2.0237	0.0094689
7	0.9156	313025.6402	33.354	5.2221	163.5000	0.0489	4.5221	2.0900	0.0081283
8	0.9554	326632.4777	38.054	5.9580	156.0000	0.0512	4.4194	2.0387	0.0091474
9	0.9952	340239.3153	39.354	6.1615	163.7000	0.0488	4.5267	2.0923	0.0080854
10	1.0907	372888.8879	48.354	7.5706	160.0000	0.0500	4.4721	2.0650	0.0086099
11	1.1146	381059.8280	50.354	7.8838	160.4000	0.0498	4.4811	2.0695	0.0085212
12	1.1305	386495.7255	50.354	7.8838	165.1000	0.0484	4.5454	2.1017	0.0079122

$$\varepsilon_{\text{med.}} = 9.87358 \text{ mm.}$$

Tabella 4 - ELABORAZIONE DELLA TAB. 2 - FORMULA DI NIKURADSE

Condizio- ne di moto	Velocità U (m/sec)	N. di Reynolds Re	Perdita di carico Y (m)	Pendenza Piezome- trica (1×10^3)	N. di Eulero E	Indice di resistenza λ	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$	$-\log_{10} \varepsilon$	ε (m)
a	b	c	d	e	f	g	h	i	l
1	0.9278	336430.2976	24.46	3.6507	213.5000	0.0374	5.1708	2.3628	0.00433711
2	1.0156	368267.5256	30.46	4.5462	205.4000	0.0389	5.0701	2.3124	0.00487080
3	1.1285	409206.2846	34.46	5.1432	224.3000	0.0356	5.2999	2.4273	0.00373852
4	1.2225	443291.6995	38.46	5.7402	235.8000	0.0339	5.4312	2.4930	0.00321360
5	1.2852	466027.3965	42.46	6.3373	236.1000	0.0338	5.4392	2.4970	0.00318420

$$\varepsilon_{\text{med.}} = 0,00386945$$

Nelle colonne g delle tabelle 3 e 4 è riportato il valore di $8/E$ che viene assunto come asse delle ordinate sul diagramma di Moody.

I valori della colonna c (Re) e della colonna g hanno permesso di riportare sul diagramma di Moody i punti corrispondenti alle condizioni di moto esaminate (Fig. 1) che, si osserva, vanno a collocarsi tutte nella parte B del diagramma stesso.

Da Darcy Weisbach (1845) si ha

$$I = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (3)$$

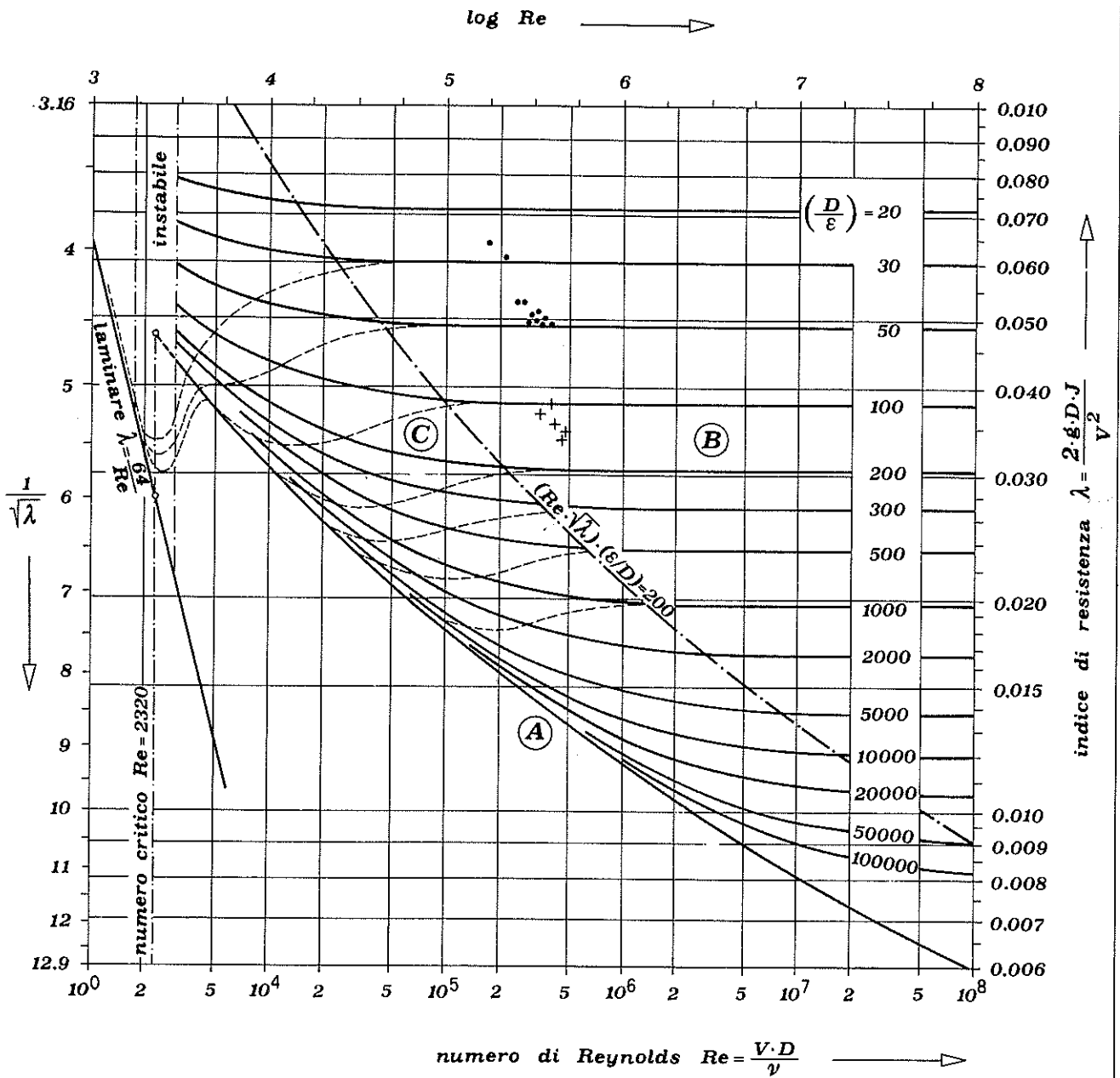
ed introducendo E nella precedente si perviene alla

$$\lambda = 8/E. \quad (4)$$

Il coefficiente λ , detto indice di resistenza, è in questo caso pressoché indipendente da Re

Osservazioni
sul comportamento idraulico
delle tubazioni adduttrici
dell'acquedotto di Pisa

DIAGRAMMA DI MOODY



CONDIZIONI DI MOTO ESAMINATE :

- tubazione in ghisa $\phi 400$
- + tubazione in acciaio $\phi 450$

Fig. 1.

ma dipenderà solo dalla scabrezza della tubazione, essendo, come si è visto precedentemente, E indipendente da Re .

La formula di Prandtl Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (5)$$

lega il coefficiente λ sia alla rugosità che al numero di Reynolds. Nel nostro caso si può adottare anziché la (5) la formula semplificata

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log_{10} \cdot \frac{3,71D}{\varepsilon} \quad (6)$$

(ricavata in base alle esperienze di Nikuradse su tubi con scabrezza artificiale), risultando praticamente inapprezzabile l'influenza del termine dipendente da Re .

La (6) è dunque valida nel campo B del diagramma di Moody e, chiaramente, da questa formula si può ricavare il coefficiente di scabrezza

$$\log_{10} \varepsilon = \log_{10} (3,71D) - \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \quad (7)$$

Le ultime colonne delle tabelle 3 e 4 riportano gli ε così calcolati per ciascuna condizione di moto. Si nota come per ciascuna tubazione i valori di ε si discostano molto poco tra di loro e gli scarti non seguono che la legge del caso. È dunque lecito prendere come coefficiente di scabrezza il valore medio dei valori della colonna I .

Detto valore medio è riportato nell'ultimo rigo delle succitate tabelle.

L'altezza equivalente ε della tubazione in ghisa così calcolata è stata inserita nella figura 2, estratta dalla versione originale del documento AWWA M 11 che fornisce i valori di ε per il calcolo idraulico delle tubazioni in ghisa col diagramma di Moody.

Si osserva come il valore da noi determinato è tra i più alti sinora rilevati⁽⁴⁾: esso si colloca, sul diagramma di figura 3, nella zona delle tubazioni che hanno subito gravi tubercolizzazioni ed incrostazioni.

(4) Schlag nel 1957 dà per tubi in ghisa $\varepsilon = 1 \div 1,5$ mm; Stratford nel 1956 indica in 3 mm il massimo valore per tubi fortemente corrosi.

COEFFICIENTI DI SCABREZZA	
RIVESTIMENTI INTERNI	
degradabili	non degradabili
12.16	
9.10	9.87
6.10	gravi tubercolizzazioni ed incrostazioni
3.00	
2.40	
1.80	tubercolizzazione diffusa (1-3 mm)
1.20	
0.90	rivestimenti di asfalto, vernici o catrame a forte spessore applicati a mano
0.60	
0.30	
0.24	leggera ruggine
0.18	
0.12	rivestimenti bituminosi applicati per immersione a caldo
0.09	rivestimenti cementizi applicati per centrifugazione
0.06	
0.03	tubi nuovi e lisci verniciati per centrifugazione
0.02	
0.018	
0.012	
0.009	
0.006	
0.00001	

Fig. 2.

L'osservazione di pezzi di tali tubi hanno confortato questa collocazione (foto 2 e 3).

Il valore medio di ε per la tubazione in acciaio è pari a 0,00375 m. Dal confronto con i valori forniti da vari autori si nota come il valore così calcolato della rugosità relativa sia tra i più alti. Infatti Schlag (1957) dà una scabrezza massima di 3 mm; Brandley e Thompson danno, «per gravi tubercolizzazioni generali», valori sino a 2,4 mm.

Simili valori sono anche citati da I.E. Idel'cik in *Memento des pertes de charge*.

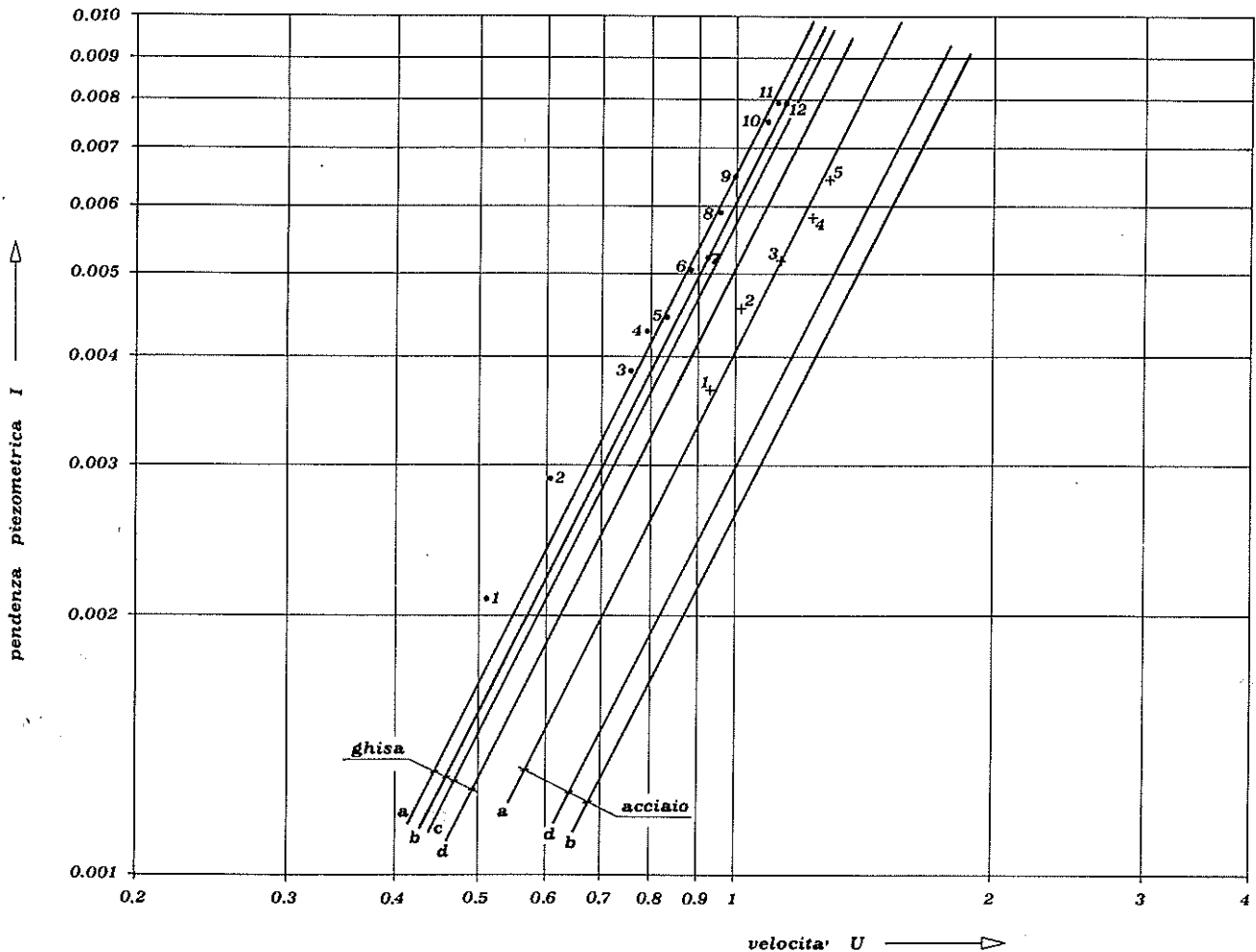
3. Confronto tra i valori della pendenza piezometrica misurati e quelli di calcolo secondo le formule di uso più corrente.

3.1. Tubazione in ghisa

Il confronto è realizzato mediante il grafico di figura 3, dove in ascisse ed in ordinate sono riportati rispettivamente la velocità e la pen-

Osservazioni
sul comportamento idraulico
delle tubazioni adduttrici
dell'acquedotto di Pisa

ABACO VELOCITA' / PENDENZA PIEZOMETRICA



- TUBAZIONE IN GHISA
- + TUBAZIONE IN ACCIAIO

- a = retta rappresentatrice della formula di Nikuradse
- b = " " " " " " Bazin
- c = " " " " " " Kutter
- d = " " " " " " Darcy

Fig. 3.

denza piezometrica in scala doppiamente logaritmica. Sul grafico sono riportati i 12 punti rappresentanti le 12 condizioni di moto esaminate e la retta da loro determinata (sono stati lasciati fuori i punti 1 e 2, per i quali probabilmente è da registrare qualche inesattezza di lettura del manometro o del venturimetro). Questa retta coincide con la rappresentazione della

$$I = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{U^2}{2g}, \quad (8)$$

dove il valore di λ è quello dedotto dalla media dei valori di λ riportati nella tabella 3 (corrisponde cioè a quello calcolato con la formula di Nikuradse una volta che si attribuisce ad ϵ il valore di 9,8 mm).

Sullo stesso grafico sono altresì riportate le rette rappresentatrici delle espressioni di Darcy e di Chezy una volta che a λ si attribuisce il valore dedotto dalle formule di Bazin e di Kutter. Si osserva che le due formule ultime citate meglio approssimano i valori di I : infatti gli scarti riscontrati risultano pari al 9,4% (Bazin)



Foto 2.

e al 12% (Kutter), contro il 17,7% che si riscontra con Darcy.

Il valore equivalente di ϵ risulta rispettivamente pari a 7,5 mm, 6,8 mm e 5,4 mm, cioè pari al 76%, 70% e 55% del valore effettivo.

3.2. Tubazione in acciaio

Sempre sullo stesso grafico di figura 3 sono riportati i 5 punti corrispondenti alle condizioni di moto esaminate per la tubazione in acciaio. Per questi punti passa una retta che, anche in questo caso, coincide con la retta rappresentatrice della formula di Darcy, quando in essa si sia adottato il coefficiente dato dalla formula di Nikuradse in corrispondenza di una scabrezza relativa pari a 3,75 mm.

Anche in questo caso sono state tracciate le rette rappresentanti le espressioni relative alla formula di Darcy (con coefficiente pari a $1,25\beta$), Bazin e Kutter.

Più sensibile è in questo caso lo scarto: infatti la formula di Darcy, che meglio approssima

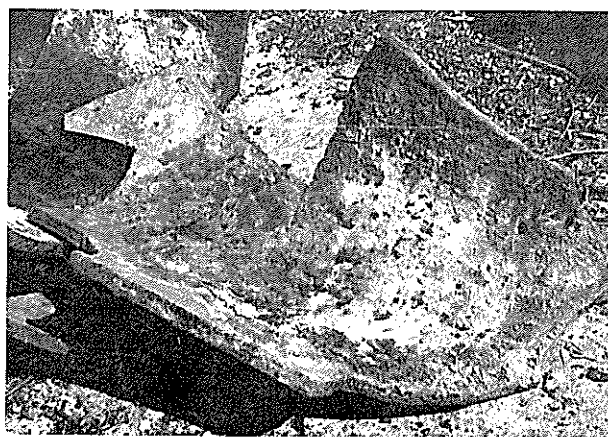


Foto 3.

i valori misurati, dà uno scarto pari al 29,7%. Il valore equivalente di ϵ risulta 1,35 mm, cioè con uno scarto percentuale del 64%.

4. Conclusioni

Dalle misure fatte sui tubi con diversi anni di esercizio ed in condizioni di uso tali da essere rappresentati da punti della zona *B* del diagramma di Moody, si nota come, con una osservazione attenta delle tubazioni, si può dedurre di massima un valore della rugosità (con l'approssimazione del millimetro) tale che, inserito nella formula di Nikuradse, le condizioni idrauliche vengono approssimate certamente meglio che con l'uso delle formule tradizionali.

5. Simboli e dimensioni usate

Q = portata	$(L^3 T^{-1})$;
Y = perdita di carico totale	(L) ;
I = pendenza piezometrica	
U = velocità media	$(L T^{-1})$;
D = diametro della tubazione	(L) ;
L = lunghezza della tubazione	(L) ;
ϵ = coefficiente di scabrezza	(L) ;
g = accelerazione di gravità	$(L T^{-2})$;
γ = peso specifico	$(M L^{-2} T^{-2})$;
ρ = densità	$(M L^{-3})$;
μ = viscosità	$(M L^{-1} T^{-1})$;
ν = viscosità cinematica	$(L^2 T^{-1})$;
β = coefficiente della formula di Darcy	$(L^{-1} T^2)$

Bibliografia

- [1] I. E. IDEL 'CIK, *Memento des pertes de charge*, Eyrolles, Paris.
- [2] E. SCIMEMI, *Compendio di Idraulica*, Cedam, Padova.
- [3] D. CITRINI, G. NOSEDA, *Lezioni di Idraulica*, Tamburini, Milano.
- [4] F. ARREDI, *Costruzioni idrauliche*, U.T.E.T., Torino.
- [5] V. MILANO, *Sulle perdite di carico in tubazioni di ferro trafilato di piccolo diametro*, L'Ingegnere, Gennaio-Febbraio-Marzo 1972.
- [6] COLOMBO, *Manuale dell'Ingegnere*, Hoepli, Milano.
- [7] HASCE, *Committee on Hydromechanics of the Hydraulics Division Task Force in Friction Factors in Open Channels*, Proceedings ASCEMY 2, Marzo 1963.
- [8] STEEL PIPE, *Design and installation*. Dalle pubblicazioni: «I coefficienti di scabrezza nella pratica di progettazione idraulica, pubblicazione tubi in ghisa».
- [9] Tabelle ed abachi per il calcolo delle condotte di amianto cemento Eternit, secondo la formula di Prandtl Colebrook (da O. Kirschmer), Pubblicazione Eternit, Genova.