

UN METODO NUMERICO PER IL CALCOLO DELLE PERDITE IDRICHE NEI MODELLI DI SIMULAZIONE DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE

Alberto Campisano¹, Carlo Modica¹, Bartolomeo Rejtano¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - Università degli Studi di Catania

ASPETTI CHIAVE

- Analisi delle metodologie di letteratura per il calcolo delle perdite idriche mediante modelli di simulazione delle reti di acquedotto
- Utilizzo di un approccio adimensionale con riferimento a 1000 simulazioni ottenute da una generazione casuale dei parametri significativi per un singolo ramo
- Applicazioni anche a reti reali per verificare i risultati conseguiti

1 INTRODUZIONE

Nella memoria vengono analizzate metodologie per il calcolo delle perdite idriche nei rami di una rete di distribuzione idrica e per la ripartizione delle perdite ai nodi ai fini dell'implementazione in modelli di simulazione di reti di acquedotto. In particolare vengono analizzati tre metodi semplificati tratti dalla letteratura e viene anche proposto un nuovo metodo. I risultati ottenuti dai quattro metodi vengono confrontati con la soluzione considerata come riferimento ottenuta dall'integrazione delle equazioni differenziali di continuità e del moto applicate alle tubazioni. Ai fini di ottenere risultati di carattere generale sull'accuratezza dei metodi, il confronto è stato svolto con approccio adimensionale riferendosi a un sistema elementare costituito da una sola condotta. Per mettere meglio in evidenza i vantaggi ottenuti con il metodo proposto vengono anche mostrati i risultati dell'applicazione a una rete di distribuzione idrica reale.

2 METODI

2.1 Relazione fra le perdite idriche e la pressione in rete

Di largo uso nella pratica per il calcolo della perdita idrica Ql_k nel ramo k di una rete di distribuzione è la legge di potenza (Germanopoulos, 1985):

$$Ql_k = C_k \cdot L_k \cdot h_k^{NI} \quad (1)$$

dove L_k (m) è la lunghezza del ramo, h_k (m c.a.) è la media dei valori di pressione ai due nodi estremi e C_k ($m^2 \cdot NI/s$) è un coefficiente di perdita (Jowitt & Xu, 1990, Campisano et al., 2010, Wu et al., 2010).

L'esponente NI può variare nelle reti reali in maniera apprezzabile all'interno del campo di valori 0.5-2.5 (Al-Ghamdi, 2011; Ferrante, 2012), in funzione del materiale e della età delle tubazioni, nonché della domanda idrica (Van Zyl & Clayton, 2007). Sulla base di dati di campo Goodwin (1980) ha proposto il valore $NI=1.18$ adottato successivamente da Germanopoulos (1985).

2.2 Equazioni differenziali adimensionali

La valutazione accurata delle perdite idriche nei modelli di simulazione di reti di distribuzione richiede, in linea di principio l'adozione di procedure basate sulla soluzione di un sistema di equazioni differenziali (di continuità e dei carichi) per ciascuna condotta della rete e per ciascun istante temporale della simulazione. Tali procedure comporterebbero necessariamente la discretizzazione spaziale di ciascuna condotta e condurrebbero quindi, per i casi pratici, a una inaccettabile complessità del modello idraulico della rete (soprattutto nel caso di funzionamento "pressure-driven" della rete). Tuttavia, nella presente indagine, si è elaborato un modello di tal tipo al fine di ottenere una soluzione di riferimento (BS – "Bench Solution") da considerare per il confronto con i metodi semplificati di letteratura. Con riferimento allo schema di figura 1 e all'equazione (1), e considerando i rapporti adimensionali delle equazioni (2):

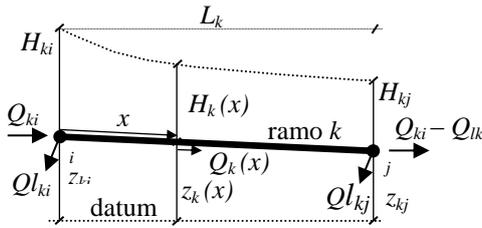


Figura 1. Schema e simboli utilizzati per l'analisi

$$\bar{Q}_k = \frac{Q_k}{Q_{ki}}; \bar{H}_k = \frac{H_k}{H_{ki}}; \bar{z}_k = \frac{z_k}{H_{ki}}; \bar{x} = \frac{x}{L_k} \quad (2)$$

le equazioni di continuità e dei carichi, per il generico ramo k della rete soggetto a perdite idriche, possono essere scritte, in termini adimensionali, nel seguente modo:

$$\frac{d\bar{Q}_k(\bar{x})}{d\bar{x}} = -P_1[\bar{H}_k(\bar{x}) - \bar{z}_k(\bar{x})]^{N_1}; \frac{d\bar{H}_k(\bar{x})}{d\bar{x}} = -P_2 \cdot [\bar{Q}_k(\bar{x})]^2 \quad (3)$$

essendo $P_1 = (C_k L_k H_{ki}^{N_1})/Q_{ki}$ e $P_2 = (J_k L_k)/H_{ki}$ due parametri adimensionali caratterizzanti rispettivamente la perdita idrica e la perdita di carico nel generico ramo. Nelle ipotesi adottate e considerando l'ulteriore ipotesi di andamento lineare delle quote dell'asse della tubazione, la soluzione del sistema delle equazioni (3) consente la valutazione rigorosa della perdita idrica in termini adimensionali. Il coefficiente α_k di ripartizione ai nodi della perdita calcolata può essere poi valutato tramite il ben noto concetto di portata equivalente $\bar{Q}e_k$ pervenendo alle seguenti equazioni:

$$\bar{Q}e_k = \left(\frac{1 - \bar{H}_{kj}}{P_1} \right)^{0.5}; \bar{Q}l_{ki} = \alpha_k \bar{Q}l_k = 1 - \bar{Q}e_k; \bar{Q}l_{kj} = (1 - \alpha_k) \bar{Q}l_k; \alpha_k = \frac{1 - \bar{Q}e_k}{\bar{Q}l_k} \quad (4)$$

Nel seguito, come già detto, la soluzione del sistema costituito dalle equazioni (3) viene adottata come riferimento di base per il confronto con i metodi semplificati.

2.3 Metodi semplificati

Tre sono i principali metodi riportati in letteratura per il calcolo della perdita idrica in ciascun ramo della rete e per la ripartizione della stessa ai nodi. Secondo il primo metodo (M1) la perdita si calcola con riferimento alla pressione media nel ramo valutata come media della pressione ai due nodi. La perdita così calcolata si ripartisce in maniera eguale ai due nodi (*Germanopoulos & Jowitt, 1989; Jowitt & Xu, 1990*):

$$\bar{Q}l_k = P_1 \cdot \left[(1 - \bar{z}_{ki} + \bar{H}_{kj} - \bar{z}_{kj}) / 2 \right]^{N_1}; \bar{Q}l_{ki} = \alpha_k \bar{Q}l_k = 0.5 \bar{Q}l_k; \bar{Q}l_{kj} = (1 - \alpha_k) \bar{Q}l_k = 0.5 \bar{Q}l_k \quad (5)$$

Con il secondo metodo (M2) la perdita totale si calcola come con il metodo M1 ripartendo però le portate perdute ai nodi in funzione dei valori di pressione ai nodi stessi (*Ainola et al., 2000*):

$$\bar{Q}l_{ki} = \alpha_k \bar{Q}l_k; \bar{Q}l_{kj} = (1 - \alpha_k) \cdot \bar{Q}l_k; \alpha_k = (1 - \bar{z}_{ki}) / (1 - \bar{z}_{ki} + \bar{H}_{kj} - \bar{z}_{kj}) \quad (6)$$

Il terzo metodo (M3) prevede che la perdita in ciascuna metà del ramo sia costante e valutabile in funzione della pressione nel relativo nodo (*Tabesh et al., 2009*):

$$\bar{Q}l_k = \bar{Q}l_{ki} + \bar{Q}l_{kj} = P_1 \cdot \left[0.5 \cdot (1 - \bar{z}_{ki})^{N_1} + 0.5 \cdot (\bar{H}_{kj} - \bar{z}_{kj})^{N_1} \right]; \alpha_k = \frac{(1 - \bar{z}_{ki})^{N_1}}{(1 - \bar{z}_{ki})^{N_1} + (\bar{H}_{kj} - \bar{z}_{kj})^{N_1}} \quad (7)$$

2.4 Metodo proposto

Il metodo proposto (M4) assume di dividere il ramo in due tronchi di eguale lunghezza e di effettuare una valutazione di primo tentativo del carico adimensionale a metà condotta $\bar{H}_{k,L_k/2}^p$ come media dei valori ai

due nodi estremi. In funzione di tale valore è possibile valutare la perdita idrica $\bar{Q}l'_k$ nella prima metà del ramo e, conseguentemente, apportare una correzione al carico adimensionale a metà condotta ottenendo il valore $\bar{H}_{k,L_k/2}^c$. Infine, sulla base di quest'ultimo valore, si procede al calcolo della perdita idrica $\bar{Q}l''_k$ nella seconda metà della condotta:

$$\bar{Q}l'_k = 0.5 \cdot P_1 \cdot \left[\frac{1 - \bar{z}_{ki} + \bar{H}_{k,L_k/2}^p - \bar{z}_{k,L_k/2}}{2} \right]^{NI} ; \bar{Q}l''_k = 0.5 \cdot P_1 \cdot \left[\frac{\bar{H}_{k,L_k/2}^c - \bar{z}_{k,L_k/2} + \bar{H}_{kj} - \bar{z}_{kj}}{2} \right]^{NI} \quad (8)$$

essendo chiaramente la perdita totale pari a $\bar{Q}l_k = \bar{Q}l'_k + \bar{Q}l''_k$. La ripartizione ai nodi è calcolata secondo la portata equivalente in accordo con le equazioni (4).

3 CONFRONTO FRA I METODI

Il confronto fra i quattro metodi e il metodo di riferimento è stato svolto con riferimento al caso di una singola condotta. Le equazioni adimensionali relative ai quattro metodi sono caratterizzate da 5 grandezze adimensionali: $\bar{z}_{k,i}$, $\bar{z}_{k,j}$, P_1 , P_2 , e NI . Ai fini del confronto sono state generate 1000 configurazioni casuali del set di valori delle prime quattro grandezze precedenti, considerate variabili con distribuzione normale entro specifici campi di valori di interesse per le pratiche applicazioni. Infine, in accordo con la letteratura, tre valori sono stati presi in conto per NI (0.5, 1.18 e 2.5).

L'applicazione dei metodi presentati richiede la conoscenza del valore del carico adimensionale \bar{H}_{kj} al nodo di valle del ramo. Per le simulazioni del singolo ramo effettuate per il confronto dei quattro metodi, tale valore è determinato valutando la perdita di carico coerentemente con ciascun metodo.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati del confronto sono mostrati con riferimento al valore $NI=2.5$ al fine di sottolineare meglio le differenze fra i metodi. I diagrammi di figura 2 mostrano la perdita idrica adimensionale $\bar{Q}l_k$ di ciascun metodo in confronto con quella calcolata con il metodo di riferimento (BS). I diagrammi mostrano che i metodi M1 e M2 forniscono risultati soddisfacenti mentre il metodo M3 conduce a una sistematica sovrastima della perdita. Come atteso il metodo proposto M4 conduce ad una eccellente stima della perdita per via della maggiore accuratezza della procedura in due passi. Il confronto fra i metodi è stato effettuato anche con riferimento al carico piezometrico adimensionale \bar{H}_{kj} al nodo j di valle del ramo (figura 3).

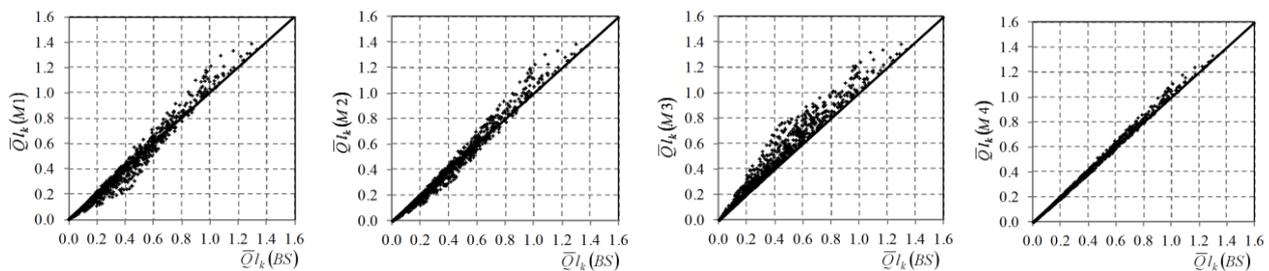


Figura 2. Confronto, in termini di perdita idrica adimensionale, fra i quattro metodi e il metodo di riferimento.

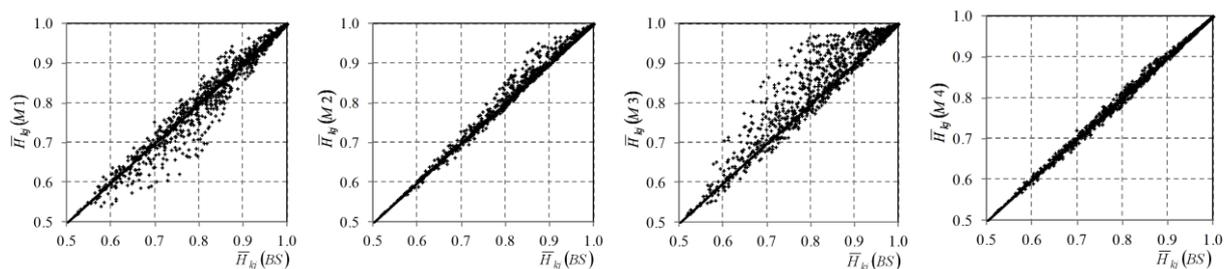


Figura 3. Confronto, in termini di carico piezometrico adimensionale al nodo j , fra i quattro metodi e il metodo di riferimento.

I diagrammi mostrano che i metodi M1 e M3 forniscono risultati sensibilmente differenti rispetto al metodo di riferimento, tendendo alla sottostima il metodo M1 e alla sovrastima il metodo M3. Valori soddisfacenti caratterizzati da una leggera sovrastima per i valori più alti di \bar{H}_{kj} sono ottenuti con il metodo M2. Il metodo proposto M4 fornisce ancora valori assai vicini a quelli del metodo di riferimento in tutto il campo esaminato. La figura (4) mostra analogo confronto con riferimento ai valori α_k del coefficiente di ripartizione. Com'è evidente i metodi M1, M2 e M3 non forniscono risultati consistenti con il metodo di riferimento. Nonostante una lieve distorsione, il metodo M4 conduce a una eccellente stima dei valori di α_k .

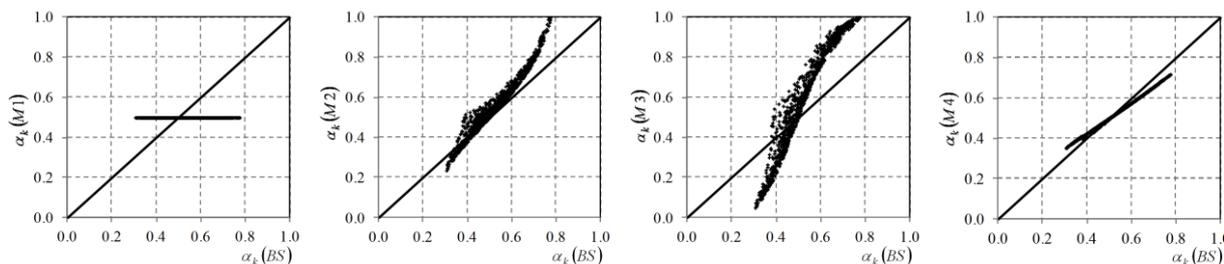


Figura 4. Confronto, in termini di coefficiente di ripartizione, fra i quattro metodi e il metodo di riferimento.

Il confronto effettuato su una rete reale (Giustolisi et al., 2008) ha confermato i risultati sopra riportati. Il metodo M3 ha determinato uno scarto medio della portata perduta rispetto al modello di riferimento pari al 14,2%. I metodi M1 e M2 hanno invece mostrato uno scarto medio di 5,9% e 4,5% rispettivamente. Il metodo M4 ha mostrato un valore dello scarto medio minore del 2%.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Ainola, L., Koppel, T., Tiiter, K., Vassiljev, A. (2000). "Water Network Model Calibration Based on Grouping Pipes with Similar Leakage and Roughness Estimates". *Proc. Joint Conf. on Water Resource Engineering and Water Resource Planning and Management (EWRI)* (CD-ROM), (<http://cedb.asce.org>). doi: 10.1061/40517(2000)197
- Al-Ghamdi, A.S. (2011). "Leakage-pressure relationship and leakage detection in intermittent water distribution systems" *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, 60(3), 178–183.
- Campisano, A., Creaco, E., Modica, C. (2010). "RTC of Valves for Leakage Reduction in Water Supply Systems". *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 136(1), 138-141.
- Ferrante, M. (2012). "Experimental investigation on the effects of pipe material on the leak head discharge relationship" *J. Hydraul. Eng.*, 138(8), 736–743.
- Germanopoulos, G., & Jowitt, P.W. (1989). Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network, *Proc. Of Institution of Civil Engineers*, U.K., part 2, vol. 87, pp. 195-214
- Goodwin, S.J. (1980). "Results of the experimental programme on leakage and leakage control". *Tech. Report T154*, W.R.C., Swindon, UK.
- Jowitt, P.W., & Xu, X. (1990). "Optimal Valve Control in Water Distribution Networks." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 116(4), 455-472.
- Tabesh, M., Asadiyani Yekta, A.H., Burrows, R. (2009). "An integrated model to evaluate losses in water distribution systems". *Wat. Resour. Manage.*, 23:477-492.
- Van Zyl, J.E., & Clayton, C.R.I. (2007). "The effect of pressure on leakage in water distribution systems" *Wat. Man.*, 160(WM2), 109-114.
- Wu, Z., Sage, P., Turtle, D. (2010). "Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System". *J. Wat. Res. Plann. Man.*, 136(1), 116–128.