

**UN MODELLO NUMERICO NON STAZIONARIO PER LO STUDIO DEI FENOMENI
TRANSITORI DURANTE IL RIEMPIMENTO DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE IDRICA:
ANALISI DELLA RESISTENZA IN MOTO NON UNIFORME**

M. De Marchis¹, G. Freni¹ & E. Napoli²

- (1) Facoltà di Ingegneria ed Architettura, Università “Kore” di Enna, Cittadella Universitaria, 94100 Enna (Italy) - e-mail: mauro.demarchis@unikore.it; gabriele.freni@unikore.it
(2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale ed Aerospaziale, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo (Italy) - e-mail: enrico.napoli@unipa.it

SOMMARIO

Per far fronte al problema primario della scarsità di risorsa idrica, gli enti gestori delle reti idriche urbane, sempre più di sovente, fanno ricorso all'erogazione turnata. Data la complessità del fenomeno fisico, la maggior parte dei modelli attualmente sviluppati fa riferimento ad alcune ipotesi semplificative che in taluni casi potrebbero risultare certamente poco rappresentative delle reali condizioni di funzionamento. Gli attuali modelli assumono che la pressione dell'aria in rete sia costantemente pari a quella atmosferica, che il fronte di avanzamento della corrente coincida con la sezione trasversale della condotta e che la resistenza in condotta sia calcolata con le formule valide per il moto uniforme, considerando quindi il moto stazionario. Sebbene le due prime ipotesi possono considerarsi realistiche, ai fini della modellazione numerica, è stato ampiamente dimostrato (Brunone et al., 2004) che l'adozione delle formule valide per il moto uniforme in fenomeni di moto vario, produce una considerevole sottostima della dissipazione di energia. Gli attuali modelli numerici trascurano i termini non stazionari nel calcolo delle perdite di carico che si generano durante le fasi di riempimento delle reti idriche in regime di erogazione turnata. Nella presente ricerca si intende analizzare la fase di riempimento di una sottorete idrica di Palermo (Italia), implementando nel modello di rete utilizzato da De Marchis et al. (2011), basato sul metodo delle caratteristiche (MOC), un modello non stazionario per il calcolo dell'effettiva resistenza in condotta durante i transitori.

1 INTRODUZIONE

Una delle principali pratiche adottate durante eventuali periodi di scarsità della risorsa idrica, nonché per ridurre le ingenti perdite idriche nei sistemi acquedottistici, dagli enti gestori delle reti idriche è quella di distribuire l'acqua all'utenza attraverso una erogazione discontinua. Nello specifico, la distribuzione viene operata solo per alcune ore della giornata, periodo nel quale le condotte si trovano in pressione, mentre nel restante arco temporale le condotte risultano pressoché vuote. Tale tecnica presenta certamente evidenti vantaggi quali ad esempio la praticità ed economicità dell'applicazione e la conseguente riduzione delle perdite derivanti da falle nella rete (Criminisi et al., 2009), in tutto il periodo in cui la rete non eroga acqua all'utenza e rimane vuota. Gli aspetti negativi sono rappresentati prevalentemente dal fatto che la rete è caratterizzata da un funzionamento idraulico differente rispetto alle specifiche secondo le quali è stata progettata e realizzata. Inoltre, l'utenza non ha di fatto modificato i consumi idrici cui era solita, riducendo quindi l'efficienza dell'erogazione discontinua operata dal gestore. La popolazione, per far fronte ai periodi in cui l'erogazione viene inibita, ha infatti fatto ricorso a locali serbatoi di accumulo d'acqua (Arregui et al., 2006; Cobacho et al., 2008), spesso sovradimensionati rispetto alle reali esigenze. Tali serbatoi si riempiono automaticamente nel momento in cui la rete idrica entra in pressione e raggiunge un cielo piezometrico sufficientemente elevato, inoltre, essendo collegati a locali sistemi di sollevamento, riescono anche a prelevare l'acqua residua sita all'interno delle condotte, nei periodi di interruzione dell'erogazione. Le misure attuate dalla popolazione, come mostrato da De Marchis et al. (2011), generano evidenti sperequazioni nell'accesso alla risorsa idrica, sfavorendo gli utenti idraulicamente più svantaggiati e aumentando notevolmente il transitorio del riempimento della rete.

Il comportamento dinamico della rete, caratterizzato da ciclici periodi di riempimento e svuotamento della rete, ha spinto la comunità scientifica a sviluppare modelli matematici in grado di riprodurre tali

fenomeni. I primi studi riscontrati in letteratura furono proposti da *Liu & Hunt* (1996) i quali presentarono un modello per simulare il riempimento delle condotte. Successivamente, *De Marchis et al.* (2010) svilupparono un modello più sofisticato per lo studio dei transitori in reti idriche complesse. Il modello tuttavia fa ricorso ad alcune ipotesi tra cui quella secondo cui le perdite di carico vengono calcolate facendo ricorso alle classiche formule valide per il moto uniforme.

Intensi studi sono stati condotti al fine di trovare formulazioni matematiche in grado di valutare correttamente le perdite di carico nel caso di fenomeni caratterizzati dalla non uniformità del moto. Tali ricerche, sebbene abbiano preso in esame quasi esclusivamente le condizioni dinamiche che si generano nei fenomeni di colpo d'ariete in singole condotte in linea, generate dall'istantanea chiusura di una valvola all'estremità della condotta, hanno chiaramente evidenziato che se si adottano le formule valide per il moto uniforme si genera una evidente sottostima delle perdite di carico (*Axworthy et al.*, 2000). Tale risultato ha quindi spinto alla ricerca di formulazioni dinamiche per il calcolo della dissipazione di energia che tenessero conto della variazione nel tempo e nello spazio della velocità. Una dettagliata analisi delle varie formulazioni è stata proposta da *Bergant et al.* (2001).

Una delle principali formulazioni si deve a *Brunone et al.* (1991), secondo cui la perdita di energia doveva essere ricavata come somma di una componente calcolata attraverso la formulazione valida per il moto uniforme e di un'altra funzione della variazione locale della velocità e di un coefficiente d'attrito da calibrare in relazione allo specifico caso di studio. Diversi studiosi hanno applicato tale formulazione confrontando i risultati numerici con quelli sperimentali e investigando sull'intervallo di validità e sui valori assunti dal coefficiente d'attrito (*Vítkovský et al.*, 2006; *Szymkiewicz & Mitosek*, 2007; *Škifić et al.* 2010). *Vítkovský et al.* (2006) proposero quindi una riformulazione della formula di Brunone.

Gli studi condotti hanno quindi confermato l'importanza di utilizzare formulazioni specifiche per il calcolo della dissipazione di energia nel caso di moti non stazionari. Tuttavia, questi si sono limitati ad analizzare il caso semplificato del fenomeno di colpo d'ariete che si può generare in una condotta idrica, mentre non si sono riscontrati studi sugli effetti di tali formulazioni nei transitori di riempimento e vuotamento delle reti idriche.

Il presente studio ha come obiettivo quello di analizzare l'effetto dell'implementazione di una formulazione dinamica non stazionaria per il calcolo delle perdite di carico all'interno del modello matematico per la simulazione dei transitori proposta recentemente da *De Marchis et al.*, (2010). Nello specifico si è scelto di implementare la formulazione presentata da *Vítkovský et al.* (2006). Il modello (di seguito indicato come modello d'attrito non stazionario o semplicemente modello non stazionario) è stato quindi applicato al distretto Oreto della rete di distribuzione idrica della città di Palermo e i risultati sono stati confrontati con il modello matematico in cui le perdite di carico vengono calcolate con la formula di *Darcy-Weisbach* (di seguito definito modello d'attrito stazionario o semplicemente modello stazionario). Infine si è analizzato l'effetto delle due formulazioni generando all'interno della rete idrica un fenomeno di colpo d'ariete.

2 IL MODELLO NUMERICO D'ATTRITO NON STAZIONARIO DI RIEMPIMENTO DELLA RETE

Il modello numerico per lo studio delle reti idriche di distribuzione proposto da *De Marchis et al.* (2010) è basato sulla risoluzione delle equazioni del moto attraverso il metodo delle caratteristiche (MOC) al quale è accoppiato un modello di domanda al nodo per simulare i consumi delle utenze. Il modello consente sia lo studio della fase di riempimento della rete, ipotizzata inizialmente vuota, sia l'analisi della condizione stazionaria. Questo è basato sulle ipotesi di *Liu & Hunt* (1996), secondo cui è plausibile ipotizzare che l'aria in condotta sia pari a quell'atmosferica, i fronti di riempimento corrispondano con l'intera sezione trasversale della condotta e la dissipazione di energia per unità di peso di fluido sia calcolata con le formule valide per il moto uniforme. Sebbene le prime due ipotesi possano considerarsi lecite, sia durante i transitori che durante la condizione stazionaria, l'ultima ipotesi sembra decadere nel caso di processi non stazionari, quali il riempimento della rete. Tale fase risulta infatti caratterizzata da elevati gradienti di pressione e velocità che certamente non soddisfano la condizione di moto permanente e/o uniforme. Al fine di tenere conto della non uniformità del moto risulta quindi necessario introdurre all'interno del modello dinamico una legge di calcolo delle perdite di carico attraverso formulazioni non stazionarie che tengano conto della variabilità nel tempo e nello spazio delle caratteristiche idrodinamiche. Un'interessante disamina sui vari modelli di attrito non stazionari, in fenomeni di colpo d'ariete, è stata condotta da *Ghidaoui et al.* (2005). Dalla suddetta analisi e dalla letteratura di riferimento si evince che, in un generico istante, la perdita di carico può essere calcolata

come somma di una componente stazionaria e una non stazionaria secondo la formulazione:

$$J = J_s + J_u \quad (1)$$

dove J_s rappresenta la perdita di carico per unità di lunghezza calcolata mediante la formula di *Darcy-Weisbach*, in cui però l'indice di resistenza e la velocità sono aggiornate dinamicamente, mentre J_u è la componente non stazionaria della perdita di carico. Una formulazione ampiamente utilizzata per il calcolo della componente J_u è quella proposta da *Brunone et al.* (1991) e successivamente modificata da *Vitkovský et al.* (2006):

$$J_u = \frac{k}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + c \Phi_A \frac{\partial V}{\partial s} \right) \quad (2)$$

dove k è un coefficiente d'attrito funzione del caso specifico di studio, che può assumere valore costante o, come si mostrerà in seguito, può essere posto in relazione al numero di Reynolds, g è l'accelerazione gravitazionale; c la celerità di propagazione delle perturbazioni; t il tempo; s l'ascissa lungo l'asse della condotta, V la velocità media della corrente e Φ_A un coefficiente che assume valore +1 se $V \geq 0$, -1 se $V < 0$. Introducendo le equazioni (1) e (2) nell'equazioni del moto e applicando il metodo MOC per la loro risoluzione, le equazioni alle derivate parziali possono essere trasformate in equazioni ordinarie. Tali equazioni, dette di compatibilità, assumono la forma:

$$(1 + k) \frac{dV}{dt} + \alpha \frac{gdh}{cdt} + gJ_s + \frac{g}{c} \alpha V \sin \theta = 0 \quad (3)$$

$$(1 + k) \frac{dV}{dt} - \beta \frac{gdh}{cdt} + gJ_s - \frac{g}{c} \beta V \sin \theta = 0 \quad (4)$$

in cui h rappresenta l'altezza piezometrica; θ è la pendenza del tratto di condotta e k il coefficiente d'attrito definito nell'equazione (2); α e β assumono la forma $(k + 2 - k\Phi_A)/2$ e $(k + 2 + k\Phi_A)/2$ rispettivamente. Nel modello numerico proposto tale coefficiente è stato calcolato dinamicamente attraverso la formulazione di *Vardy & Brown* (2003):

$$k = \frac{\sqrt{c^*}}{g} \quad (5)$$

$$c^* = \begin{cases} 0.0476 & Re < 2500 \\ \frac{7.41}{Re \log\left(\frac{14.3}{Re^{0.05}}\right)} & Re > 2500 \end{cases} \quad (6)$$

Le equazioni di compatibilità (3) e (4) risultano valide lungo le linee caratteristiche, positive e negative, definite rispettivamente:

$$C^+: \frac{ds}{dt} = + \frac{c}{\alpha} \quad (7)$$

$$C^-: \frac{ds}{dt} = - \frac{c}{\beta} \quad (8)$$

Applicando il metodo alle differenze finite, le equazioni di compatibilità (3) e (4) possono essere trasformate in equazioni algebriche, le quali risolte lungo le linee caratteristiche, assumono la forma:

$$h_j^{i,n+1} - h_{jm}^{i,n} + \frac{1+k}{\alpha} \frac{c}{g} (V_j^{i,n+1} - V_{jm}^{i,n}) + \left[\frac{c}{\alpha} J_{jm}^{i,n} + V_{jm}^{i,n} \sin \theta^i \right] \Delta t_i = 0 \quad (9)$$

$$h_j^{i,n+1} - h_{jv}^{i,n} - \frac{1+k}{\beta} \frac{c}{g} (V_j^{i,n+1} - V_{jv}^{i,n}) - \left[\frac{c}{\beta} J_{jv}^{i,n} - V_{jv}^{i,n} \sin \theta^i \right] \Delta t_i = 0 \quad (10)$$

dove V_j^{n+1} e h_j^{n+1} sono rispettivamente la velocità e l'altezza piezometrica nella j -esima sezione (di ascissa $(j-1)L_i/N_i$) della i -esima condotta risolta al passo temporale $t^n + \Delta t$; θ^i è la pendenza della i -esima condotta; jm e jv indicano rispettivamente la sezione subito a monte e quella subito a valle della sezione j . Tali pedici fanno riferimento a variabili note dal passo temporale precedente t^n , come mostrato in figura 1.

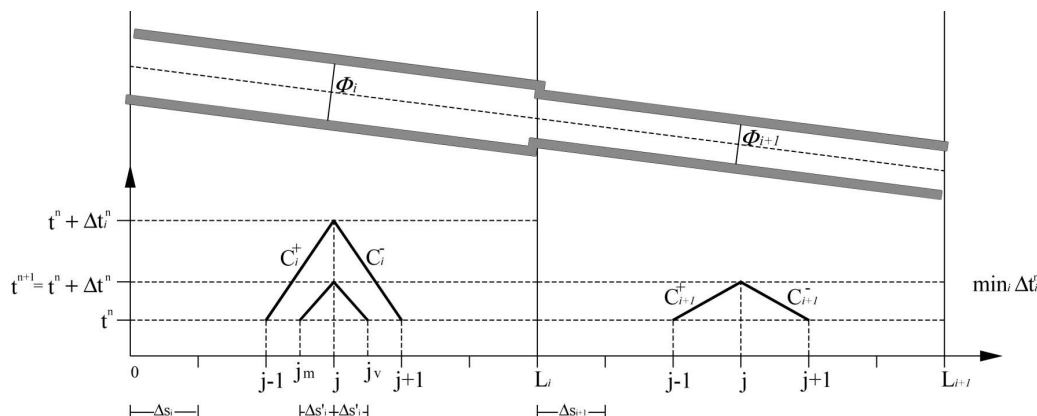


Figura 1. Schema dell'interpolazione delle variabili idrodinamiche nella griglia spazio tempo nel caso di due condotte caratterizzate da diametri differenti e differenti passi temporali Δt_i .

L'avanzamento nel tempo della soluzione si ottiene calcolando il passo temporale Δt_i attraverso l'equazione:

$$\Delta t_i = L_i^n / (c_i \cdot N_i) \quad (11)$$

in cui L_i^n è la lunghezza della i -esima condotta piena di fluido al tempo t^n ; N_i è il numero di segmenti in cui è suddivisa la generica condotta L_i^n (nel caso in esame si è scelto di adottare un numero di intervalli N_i pari a 10). Il passo temporale Δt viene calcolato per ciascuna condotta piena o parzialmente piena di fluido ed il minimo valore viene applicato per la risoluzione dell'intero sistema. Una volta calcolato il passo temporale, il sistema delle equazioni di continuità viene risolto unitamente all'equazione di continuità in ogni nodo della rete. L'equazione di continuità deve necessariamente tenere conto della legge di domanda rappresentativa dei consumi delle utenze. Nel modello in esame, in ragione del fatto che i consumi sono legati alla presenza di serbatoi privati installati localmente dalla popolazione, si è scelto di calcolare le portate erogate ai nodi attraverso una legge di domanda funzione della pressione in rete *Criminisi et al.* (2009), data dall'equazione:

$$Q_{up} = C_v \cdot a \cdot \sqrt{2g(H - H_r)} \quad (12)$$

dove $C_v=0.57$ un coefficiente specifico della valvola sita in corrispondenza dei galleggianti nei serbatoi, $a=2.8 \text{ cm}^2$ l'area della valvola (tali valori sono stati rilevati attraverso una campagna di monitoraggio condotta tra il 2007 e il 2008 nella rete oggetto di studio, *Criminisi et al.*, 2009), H rappresenta la quota piezometrica nel nodo e H_r la quota geodetica del serbatoio. Il processo di riempimento inizia quando $H - H_r > 0$ e continua fino al soddisfacimento dell'utenza che coincide con il riempimento del serbatoio.

Dopo aver risolto il sistema di equazioni sopra esposto, essendo noti i valori di velocità V_j^{n+1} e altezza piezometrica h_j^{n+1} , si procede all'avanzamento nel tempo del processo di riempimento attraverso l'equazione:

$$L_i^{n+1} = L_i^n + V_N^{i,n+1} \cdot \Delta t \quad (13)$$

in cui L_i^{n+1} è la lunghezza della i -esima condotta parzialmente piena. La risoluzione dell'equazione (13) viene protratta fintanto che tutte le condotte della rete non sono completamente piene.

3 VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO ED APPLICAZIONE ALLA RETE ORETO

3.1 Confronto tra i risultati numerici e i risultati sperimentali

Al fine di validare il modello non stazionario proposto si è proceduto a confrontare i risultati numerici con quelli sperimentali ottenuti da *Bergant et al.* (2001) nel caso test di un colpo d'ariete generato tramite la chiusura istantanea di una valvola posta all'estremità di una condotta che collega due serbatoi. Nello specifico si sono studiati tre differenti fenomeni di colpo d'ariete ottenuti considerando tre diverse velocità del fluido in condizioni stazionarie, pari rispettivamente a $V_0 = \{0.10, 0.20, 0.30\}$ m/s,

investigando sia il regime di moto laminare che quello turbolento. In tutti e tre i casi test si è imposto che il carico nel serbatoio di monte fosse pari a 32 m, un tempo di chiusura della valvola pari a $t_c = 0.009$ s e una velocità di propagazione delle perturbazioni $c = 1319$ m/s (per maggiori dettagli sull'apparato sperimentale riprodotto si rimanda a *Bergant et al.*, (2001)). In figura 2 è riportato il confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici, ottenuti sia col modello stazionario che con quello non stazionario proposto, nel caso di velocità in condizioni stazionarie pari 0,1 m/s. Come si può osservare quando si utilizza un modello in cui le perdite di carico sono calcolate attraverso un modello d'attrito non stazionario si ottiene un ottimo accordo con i risultati sperimentali. Il confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici ottenuti calcolando le perdite di carico con le formule valide per il moto uniforme mostra invece una evidente sottostima della dissipazione di energia cinetica già subito dopo il secondo ciclo di oscillazione. Tale risultato mostra che il modello numerico è in grado di simulare correttamente le oscillazioni di pressione che si generano in condizioni di moto vario. Risultati analoghi sono stati ottenuti per gli altri due casi test.

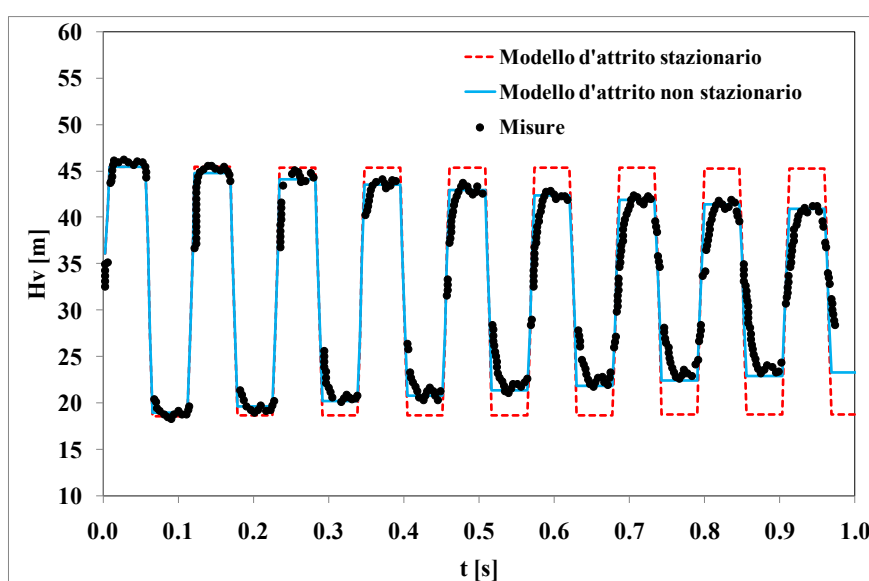


Figura 2. Oscillazione della'altezza piezometrica in corrispondenza della sezione della valvola. Confronto tra i risultati numerici e sperimentali per $V_0 = 0.1$ m/s

3.2 Applicazione del modello di riempimento non stazionario alla rete Oreto (Palermo)

Come specificato sopra, la rete analizzata nella presente ricerca è rappresentata dal distretto Oreto della città di Palermo. In figura 3 è riportata una mappa della suddetta rete, con i nodi in cui sono installati i misuratori di portata, di pressione e il punto in cui è inserita una valvola di controllo della portata. La scelta della sottorete è stata dettata dal fatto che questa è stata recentemente ricostruita e sono quindi note tutte le caratteristiche geometriche; inoltre questa risulta essere stata oggetto di campagne di misurazione di portate circolanti, portate erogate e di valori di pressione dal 2001 (*Fontanazza et al.*, 2008).

La rete è costituita da circa 40 km di condotte in polietilene, con diametri che variano da 110 a 225 mm. Negli ultimi decenni la rete è stata soventemente oggetto di fenomeni di riempimento e vuotamento indotti dall'applicazione della pratica dell'erogazione turnata. L'utenza, per far fronte ai periodi di distribuzione intermittente, ha installato serbatoi di accumulo privati posizionati all'interno delle abitazioni o in spazi condominiali. Per maggiori dettagli sulla rete si rimanda a *De Marchis et al.* (2010).

Al fine di ridurre l'onere computazionale, indotto anche dalla complessità del modello proposto, si sono rese necessarie alcune esemplificazioni. In primo luogo la rete è stata scheletrizzata attraverso 391 condotte e 261 nodi; in secondo luogo le utenze sono state aggregate e fatte coincidere con il nodo della rete più vicino. Si è ipotizzata la presenza di un solo serbatoio connesso a ciascun nodo, il quale però risulta rappresentativo degli accumuli operati da tutte le utenze connesse a tale nodo. Infine si sono trascurati i sistemi di pompaggio collegati ai serbatoi al fine di prelevare acqua anche in condizioni di bassi cieli piezometrici.

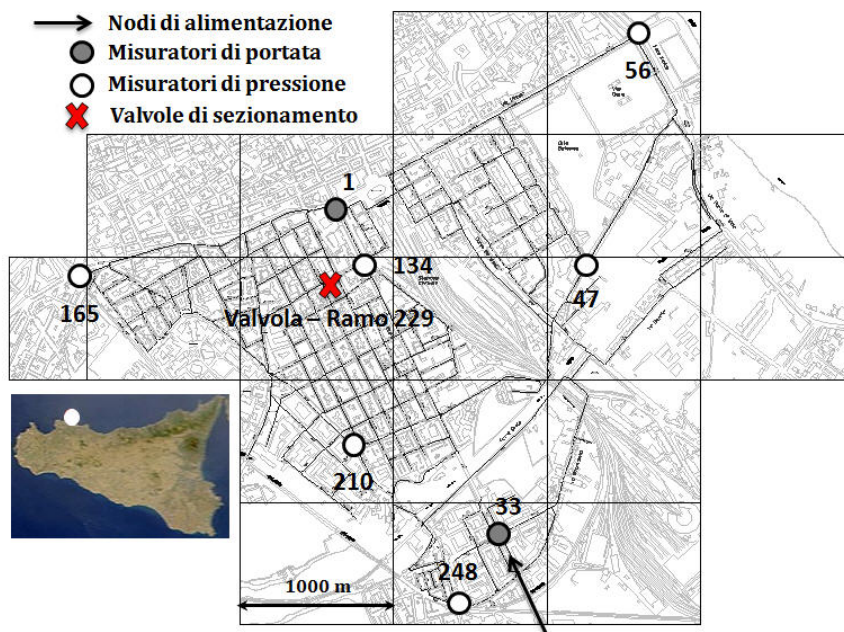


Figura 3. Mappa della rete Oreto di Palermo

Di seguito verrà riportato il confronto tra il modello di riempimento stazionario e quello non stazionario. Più precisamente, è stata confrontata l'altezza piezometrica misurata in quattro nodi della rete (47-56-165-247) con i risultati ottenuti attraverso i due modelli di riempimento. Il suddetto confronto, riportato in figura 4, mostra chiaramente come entrambi i modelli riproducano in maniera soddisfacente i dati misurati in pieno campo. Tale confronto mostra inoltre che le differenze tra i risultati ottenuti utilizzando il modello stazionario e quelli ottenuti mediante l'implementazione del modello non stazionario per il calcolo delle perdite di carico sono certamente trascurabili nella fase successiva al riempimento della condotta. Durante la fase di riempimento della condotta connessa al nodo invece si riscontra che, applicando il modello non stazionario, la condotta si riempie in un tempo leggermente maggiore (circa 10 minuti) rispetto al caso di modello stazionario. Tale risultato è coerente con il fatto che il modello stazionario sottostima la dissipazione di energia, generando quindi maggiori velocità in condotta che si riflette in un minor tempo di riempimento della condotta. Un'altra interessante differenza che si può constatare analizzando i confronti tra le altezze piezometriche consiste nel fatto che i picchi di pressione, derivanti dai piccoli fenomeni di colpo d'ariete che si instaurano a causa delle continue aperture e chiusure delle valvole dei serbatoi e dalle collisioni dei fronti d'onda all'interno della rete, nel caso di modello non stazionario risultano molto più contenuti rispetto a quelli modellati con la formulazione stazionaria.

Al fine di investigare ulteriormente su tali differenze e sull'effetto locale dell'applicazione del modello non stazionario, proposto originariamente da *Brunone et al.* (1991), si è deciso di generare numericamente un fenomeno di colpo d'ariete all'interno della rete, simulando la chiusura istantanea di una valvola di regolazione e confrontando la risposta dei due modelli di riempimento. Si è scelto di riprodurre la chiusura della valvola posta nel nodo 120, connesso alla condotta numero 229 (Figura 3), dopo 3600 secondi dalla fase di inizio di riempimento della rete. Il confronto tra i risultati numerici ottenuti attraverso le due modellazioni mostra che, quando si fa ricorso al modello d'attrito non stazionario, il transitorio delle oscillazioni di pressione risulta decisamente ridotto, coerentemente con quanto osservato in figura 2.

L'analisi condotta consente di suggerire che l'ipotesi di *Liu & Hunt*, 1996, secondo cui le perdite di carico sono calcolate con le formule valide per il moto uniforme, può essere considerata valida anche in condizioni di moto vario per analisi globali del processo di riempimento. Ciononostante, l'adozione di tale ipotesi genererebbe una errata stima di fenomeni di colpo d'ariete che possono verificarsi localmente all'interno di una rete idrica.

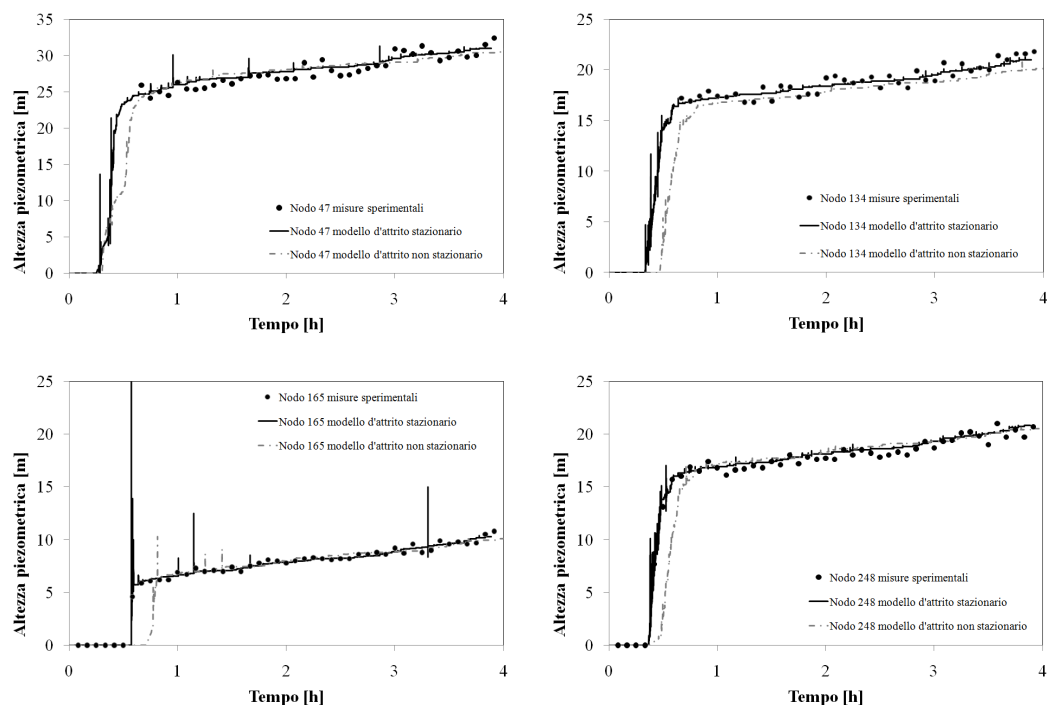


Figura 4. Confronto tra le altezze piezometriche misurate nei nodi di controllo (24/06/2002) e quelle ottenute attraverso le simulazioni numeriche condotte attraverso i modelli d'attrito stazionario e non stazionario.

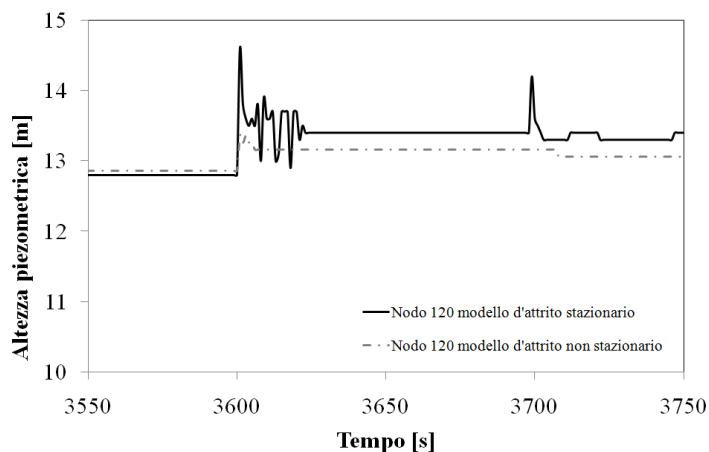


Figura 5. Confronto tra le oscillazioni dell'altezza piezometrica ottenute con il modello d'attrito stazionario e non stazionario per effetto di chiusura di una valvola.

4 CONCLUSIONI

La presente ricerca propone l'implementazione nel modello numerico per la simulazione dei processi di riempimento delle reti idriche, presentato da *De Marchis et al.* (2010), di un modello per il calcolo delle perdite di carico in condizioni di moto vario. Nello specifico, si è adottata la formulazione per il calcolo delle perdite di carico proposta da *Brunone et al.* (1991) e successivamente modificata da *Vitkovský et al.* (2006). Sono state condotte tre differenti analisi al fine di validare il modello numerico proposto, simulare il processo di riempimento di una rete idrica e la successiva fase stazionaria e verificare l'effetto di fenomeni di colpo d'ariete che si instaurano all'interno delle reti di distribuzione idrica. I risultati ottenuti applicando il modello d'attrito stazionario sono stati confrontati con quelli ottenuti attraverso il modello non stazionario.

Il modello è stato applicato alla sottorete di Palermo detta Oreto, simulando il transitorio del riempimento della rete di distribuzione. Il confronto tra i due modelli d'attrito proposti ha evidenziato che il modello d'attrito non stazionario comporta un maggior tempo di riempimento delle condotte e quindi della rete idrica, coerentemente con la maggiore dissipazione di energia. Nelle fasi successive al riempimento, tuttavia, non si sono riscontrate sostanziali differenze tra i due modelli, mostrando che l'ipotesi di validità delle formule per il moto uniforme può essere estesa anche a processi non stazionari caratterizzati tuttavia da variazioni graduali della velocità e pressione. Tuttavia, allorquando si innescano repentine variazioni delle caratteristiche idrodinamiche, come nel caso di fenomeni di colpo d'ariete generati dall'improvvisa chiusura di una valvola in rete, si è riscontrato come l'adozione di un modello di attrito stazionario sottostima la dissipazione di energia in condotta.

BIBLIOGRAFIA

- Arregui, F. Cabrera, E. Cabacho, R. & Garcia-Serra, J. Reducing Apparent Losses Caused By Meters Inaccuracies, *Water Practice & Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 1–8, Nov. 2006.
- Axworthy, D. Ghidaoui, M. & McInnis, D. Extended thermodynamics derivation of energy dissipation in unsteady pipe flow, *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, vol. 126, no. 4, pp. 276–287, 2000.
- Bergant, A. Simpson, A. & Vitkovsky, J. Developments in unsteady pipe flow friction modelling, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 39, no. 3, pp. 249–257, 2001.
- Brunone, B. Golia, U. M. & Greco, M. Some remarks on the momentum equations for fast transients. Hydraulic transients with column separation. *9th and last round table of the IAHR*, Valencia, Spain. Pp. 201-209, 1991
- Brunone, B. Ferrante M. & Cacciamani, M. Decay of pressure and energy dissipation in laminar transient flow, *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme*, vol. 126, no. 6, pp. 928–934, 2004.
- Cobacho, R. Arregui, F. Cabrera, E. & Cabrera, E. J. Private Water Storage Tanks: Evaluating Their Inefficiencies, *Water Practice & Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, May. 2008.
- Criminisi, A. Fontanazza, C. M. Freni, G. & Loggia, G. L. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply., *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 60, no. 9, pp. 2373–2382, 2009.
- De Marchis, M. Fontanazza, C. M. Freni, G. La Loggia, G. Napoli, E. & Notaro, V. A model of the filling process of an intermittent distribution network, *Urban Water Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 321–333, Dec. 2010.
- De Marchis, M. Fontanazza, C. M. Freni, G. La Loggia, G. Napoli, E. & Notaro, V. Analysis of the impact of intermittent distribution by modelling the network-filling process, *Journal of Hydroinformatics*, vol. 13, no. 3, p. 358, Jul. 2011.
- Fontanazza, C.M. Freni, G. La Loggia, G. & Notaro, V. Definition of performance indicators for urban water distribution systems in drought conditions. In Enrique Cabrera Jr. & Miguel Angel Pardo (eds), *Performance Assessment of Urban Infrastructure Service. Drinking water, wastewater and solid waste*: London: IWA Publishing 2008, pp. 35-46.
- Ghidaoui, M. S. Zhao, M. McInnis, D.A. & Axworthy, D.H. A review of water hammer theory and practice, *Applied Mechanics Review, ASME*, vol. 58, no.1, 2005, pp. 49- 76.
- Liou, C. P. & Hunt, W. A. Filling of pipelines with undulating elevation profiles, *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, vol. 122, no. 10, pp. 534–539, 1996.
- Škifić, J. Maćešić, S. & Črnjarić-Žic, N. Nonconservative formulation of unsteady pipe flow model, *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, vol. 136, no. 8, pp. 483–492, 2010.
- Szymkiewicz, R. & Mitosek, M. Numerical aspects of improvement of the unsteady pipe flow equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 55, no. 11, pp. 1039–1058, 2007.
- Vardy, A. E. & Brown, J. M. B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows. *J. Sound Vib.*, vol. 259 no. 5, 2003, pp. 1011–1036.
- Vítkovský, J. P. Bergant, A. Simpson, A. R. & Lambert, M. F. Systematic evaluation of one-dimensional unsteady friction models in simple pipelines, *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, vol. 132, no. 7, pp. 696–708, 2006.