

STABILITÀ UMANA NELLE CORRENTI DI PIENA: SENSITIVITÀ E ASPETTI DI GENERE

Chiara Arrighi ^{1*} & Fabio Castelli ¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze

*email: chiara.arrighi@dicea.unifi.it

ASPETTI CHIAVE

- Scarsa percezione di un'alluvione come minaccia 'personale'
- Definizione della vulnerabilità di una persona su base adimensionale
- Analisi idrodinamica dell'interazione corpo umano corrente di piena
- Differenze di genere e sensitività della vulnerabilità alle alluvioni

1 PREMESSA

Una scarsa percezione del rischio e dei potenziali effetti avversi di un'alluvione sono tra le cause dei danni alle persone. In particolare il tentativo di spostarsi a piedi o di guidare veicoli in strade allagate sono tra le cause più frequenti di decesso nel nostro paese (Salvati et al., 2018). Nella cittadinanza è poco diffusa la sensazione che il rischio idraulico possa rappresentare una minaccia a livello personale in cui la vulnerabilità di ciascun soggetto entri in gioco. Il rischio idraulico è principalmente vissuto come un problema riguardante le opere idrauliche, ad esempio gli argini, e, nel migliore dei casi, come una zonazione cartografica (PGRA) spesso sconosciuta alla popolazione.

Lo scopo del lavoro è di riportare al centro del rischio idraulico la vulnerabilità del singolo cittadino, studiando la stabilità del corpo umano in una corrente di piena, la sua interazione idrodinamica e i principali elementi di sensitività, in modo da evidenziare differenze di genere, età o etnia.

2 MATERIALI E METODI

Un parametro adimensionale θ_p che definisce la soglia di stabilità del corpo umano in una corrente di piena è stato definito da Arrighi et al. (2017). Il parametro descrive i due principali meccanismi fisici in cui si verifica l'instabilità di una persona (scivolamento e ribaltamento) attraverso pochi semplici parametri, l'altezza del soggetto H_p , la lunghezza del piede d l'altezza d'acqua H

$$\theta_p = \frac{2d}{H_p} \cdot \frac{H_p - H}{H} \quad (1)$$

Nell'ipotesi di corpo rigido, la lunghezza del piede d in prima approssimazione è assunta uguale al braccio del momento resistente. In condizioni reali l'aggiustamento della posizione per contrastare la spinta della corrente fa sì che tale lunghezza possa variare.

Il parametro θ_p risulta funzione dei coefficienti di spinta e del numero di Froude al quadrato della corrente come nell'equazione (2)

$$\frac{U^2}{gH} \cdot \left(\frac{H}{2d} \cdot C_D - C_l \right) = \frac{2d}{H_p} \cdot \frac{H_p - H}{H} \quad (2)$$

Dove U è la velocità media della corrente, g l'accelerazione di gravità, C_D e C_l i coefficienti di trascinamento e sollevamento.

Come dimostrato dalle analisi sperimentali di letteratura (Foster & Cox, 1973; Karvonen et al., 2000; Jonkman & Penning-Rowsell, 2008; Xia et al., 2014) e dalla valutazione delle spinte idrodinamiche ottenute

da simulazioni 3D (Arrighi et al., 2017) ciascun soggetto possiede una propria resistenza che dipende da fattori fisici e psicologici. Per comprendere meglio quali fattori fisici possano influenzare la stabilità umana in una corrente di piena si ricorre ad una analisi di sensitività del parametro adimensionale θ_P .

La sensitività rispetto all'altezza del soggetto è data dalla derivata di θ_P rispetto a H_P

$$\frac{\partial \theta_P}{\partial H_P} = \frac{2d}{H_P^2} \quad (3)$$

rappresentata nel pannello (a) di Figura 1. Come si deduce dal grafico in figura, la sensitività del parametro di mobilità diminuisce fortemente all'aumentare dell'altezza del soggetto, per cui a parità di variazione di H_P la condizione di stabilità cambia molto di più per un bambino (altezza di circa 1-1.2 m) che per un adulto.

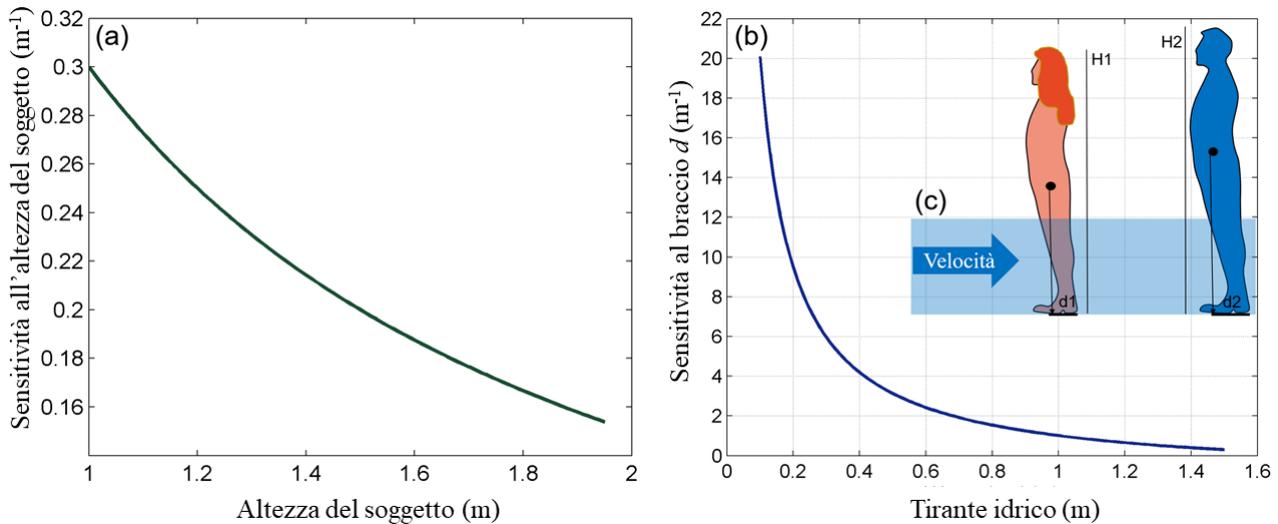


Figura 1. Nel pannello (a) è riportata la sensitività del parametro di mobilità rispetto all'altezza del soggetto, nel pannello (b) la sensitività rispetto alla lunghezza del piede, nel pannello (c) uno schema della differenza di genere.

La sensitività rispetto alla lunghezza del piede del soggetto è data dalla derivata di θ_P rispetto a d

$$\frac{\partial \theta_P}{\partial d} = \frac{2}{H} - \frac{2}{H_P} \quad (4)$$

Dove d rappresenta il braccio della forza resistente al ribaltamento e in quanto tale, anche una misura dell'attitudine del soggetto ad adeguare la sua postura per resistere alla corrente. La sensitività rispetto a d è rappresentata nel pannello (b) di Figura 1, da cui si evince che all'aumentare dell'altezza d'acqua la rilevanza di d diminuisce. Questo conferma come il momento resistente del soggetto diventi trascurabile per alti battenti che raggiungano cioè il tronco dove le forze di galleggiamento e sollevamento diventano dominanti.

Dalle simulazioni numeriche 3D (Arrighi et al., 2017) sono stati calcolati i coefficienti di spinta C_D e C_l utilizzando rispettivamente le eqn. 5 e 6

$$C_D = \frac{\text{Drag force}}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_{ref}} \quad (5)$$

$$C_l = \frac{\text{Lift force}}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_{ref}} \quad (6)$$

Dove ρ è la densità dell'acqua e A_{ref} l'area di riferimento uguale al prodotto tra larghezza e altezza H_P del soggetto. Con queste relazioni i valori dei coefficienti di spinta variano con la sommergenza e il numero di

Froude, alcuni valori sono rappresentati in Tabella 1, per approfondimenti riferirsi a Arrighi et al. (2017).

Sommergenza relativa	Numero di Froude	C_D	C_L
0.62	0.30	0.95	0.24
0.51	0.38	0.67	-0.12
0.41	0.47	0.51	-0.13
0.30	0.82	0.31	-0.07
0.20	1.3	0.15	-0.04
0.1	3.1	0.07	-0.03

Tabella 1. Alcuni valori dei coefficienti di spinta ottenuti da simulazioni numeriche 3D

I valori del coefficiente di drag in tabella variano tra 0.07 per condizioni supercritiche e bassissima sommergenza relativa e 0.95 per condizioni subcritiche e sommergenza relativa pari a 0.62 (parte inferiore del tronco immersa).

I valori del coefficiente di lift, che utilizzano la stessa area di riferimento del coefficiente di drag, risultano essere negativi per basse sommergenze. Questo avviene perché il corpo umano nella simulazione 3D risulta appoggiato con i piedi al fondo nel canale numerico, non consentendo quindi il passaggio di fluido sotto la pianta del piede, si ha quindi una spinta verticale che spinge il piede verso il basso (coefficiente negativo per convenzione di segno). Invece nel momento in cui il tronco inizia a bagnarsi si ha un cambio di segno ($C_L=0.24$) che indica una spinta verso l'alto che contribuisce alla perdita di stabilità e identifica una discontinuità di comportamento che può essere utilizzata a scopo educativo.

Ovviamente il modello numerico non risulta essere rappresentativo di una situazione reale in cui un soggetto può muoversi, in questo caso lo spostamento di gambe e piedi altera anche i coefficienti di spinta che quindi sono da considerarsi solo come riferimento al caso rigido.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

L'analisi della stabilità delle persone attraverso il parametro adimensionale (Arrighi et al., 2017) aiuta a comprendere come a parità di tirante idrico e velocità siano più stabili i soggetti più alti perché soggetti ad una minore sommergenza. In linea generale quindi bambini e donne sono più vulnerabili perché la loro altezza media risulta inferiore a quella degli uomini. Inoltre risulta minore la lunghezza del piede, ovvero il braccio della forza resistente. Tra uomini e donne in particolare, a parità di altezza le donne risultano più svantaggiate dalla posizione del loro baricentro, più basso, con una conseguente riduzione del braccio resistente.

Dall'analisi di sensitività emerge che per gli adulti, le differenze di lunghezza del piede (o posizione del baricentro) dovute al genere tendono ad annullarsi per elevati tiranti, maggiori dell'altezza del bacino, in cui le forze di galleggiamento e di sollevamento prevalgono. Essendo poi la lunghezza del piede un proxy per la capacità di aggiustamento della postura, possiamo immaginare come un soggetto anziano sia più vulnerabile rispetto ad un giovane di pari altezza a causa di una diminuzione dei riflessi e della massa muscolare.

In conclusione, data la variabilità dei soggetti, al fine di migliorare l'educazione dei cittadini risulta opportuno spiegare la vulnerabilità della persona sulla base di parametri adimensionali come la sommergenza. In altre parole può risultare più efficace dire non "altezza d'acqua pari a 0.5 m" ma "altezza d'acqua sotto il ginocchio" come schematizzato dalla Figura 2. Inoltre molto importante è trasferire il concetto di numero di Froude attraverso immagini in grado di fornire una spiegazione di tipo visuale. Nella Fig. 2 un potenziale messaggio in favore di sicurezza per il cittadino potrebbe essere "se l'acqua è sopra le ginocchia puoi spostarti senza rischi solo in caso l'acqua sia ferma" che corrisponde alla traduzione del diagramma in cui si può avere instabilità per velocità superiori o uguali a 0.8 m/s per sommergenza superiore a 0.25.

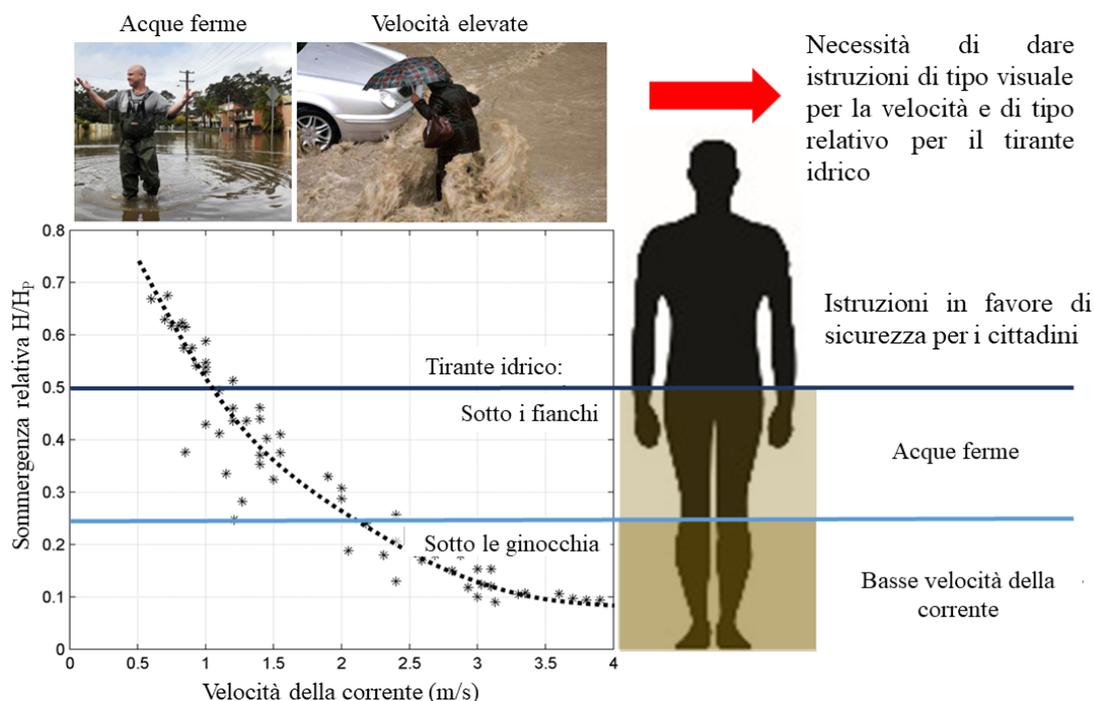


Figura 2. Esempio di possibili istruzioni cautelative per cittadini basate sul concetto di sommergenza relativa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Arrighi, C., Oumeraci, H. & F. Castelli. Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 515-531, 2017.
- Arrighi, C., Gabellani, S., Dolia, D., Oumeraci, H., & F. Castelli. Pedoni, veicoli e rischio idraulico. XXXV Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bologna, 14-16 Settembre 2016.
- Jonkman, S.N. & E. Penning-Rowse. Human instability in flood flows. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), pp.1208–1218, 2008.
- Karvonen, R.A., Hepojoki, H.K., Huhta, H.K. & A. Louhio. The use of physical models in dam-break analysis. RESCDAM Final Report, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2000.
- Foster, D.N., & R.J. Cox. Stability of children on roads used as floodways. Technical Report No.73/13, Water Research Laboratory of the University of New South Wales, Manly Vale, Australia, 1973.
- Xia, J., Falconer, R.A., Wang, Y. & Xiao, X. New criterion for the stability of a human body in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), pp.93–104, 2014.
- Salvati P., Petrucci, O., Rossi, M., Bianchi, C., Pasqua, A., & F. Guzzetti. Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in Italy, In *Science of The Total Environment*, Volumes 610–611, 2018, Pages 867-879, 2018