



**UNIVERSITÀ
DI PARMA**

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Valutazione della sicurezza di sbarramenti di ritenuta nei confronti di onde generate da sisma

Assessment of dam safety against seismic-generated waves

Studente
Fiammetta Bertuzzi

Relatore
Prof. Andrea Maranzoni

- **Introduzione e DM 26 giugno 2014**
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni

“Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)”, paragrafo C.2:
 «In mancanza di più precise indagini possono essere assunti i valori della massima ampiezza delle onde generate nel serbatoio dal vento di velocità U (km/ora) incrementati dalla risalita contro il paramento dello sbarramento, dati nella tabella seguente»

Velocità vento [km/h]	Ampiezza d'onda [m]									
	Fetch [km]									
	1	2	4	6	8	10	11	20	40	50
100	0.27	0.38	0.53	0.65	0.75	0.84	0.88	1.18	1.67	1.87
80	0.20	0.29	0.40	0.49	0.57	0.64	0.67	0.90	1.27	1.42
60	0.14	0.20	0.29	0.35	0.41	0.45	0.48	0.64	0.90	1.01
40	0.09	0.13	0.18	0.22	0.26	0.29	0.30	0.40	0.57	0.63
	run_up [m]									
	0.033	0.063	0.12	0.17	0.223	0.273	0.298	0.518	0.973	1.188

“Si assume che il franco netto così garantito sia sempre adeguato nei confronti dell’onda generata dal sisma”

Obiettivo: creare una tabella simile a quella riportata nella Normativa, relativa alla sollecitazione sismica e basata su grandezze caratteristiche del sisma e dell’invaso

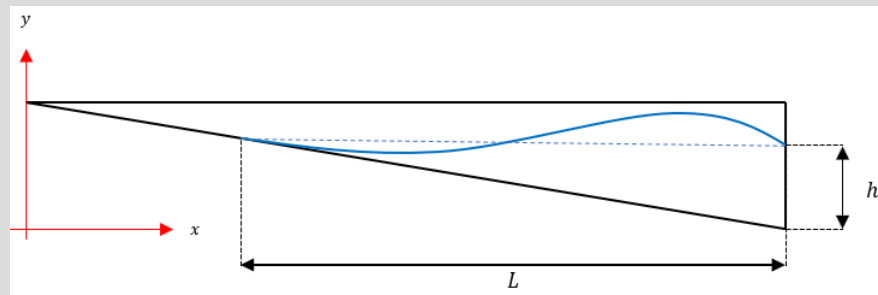
Incremento del livello alla diga

Intensità sisma	Frequenza predominante sisma				
	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5					
1					
4					
10					
25					
100					

L’analisi è stata estesa ad altre grandezze rilevanti

- $C h_{max}$: fattore di incremento del livello alla diga rispetto al livello indisturbato;
- $C F_{max}$: fattore di incremento della forza massima sulla diga rispetto alla forza statica iniziale;
- $C M_{max}$: fattore di incremento del momento massimo sulla diga rispetto al momento iniziale
- $C e_{tip}$: fattore di incremento per l'eccentricità "tipica" (rapporto tra momento massimo e forza massima) rispetto all'eccentricità iniziale $h_0/6$.

- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- **Modello matematico**
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni



Schema geometrico semplificato: Invaso bidimensionale sul piano $x - y$, con forma triangolare nella sezione longitudinale verticale.

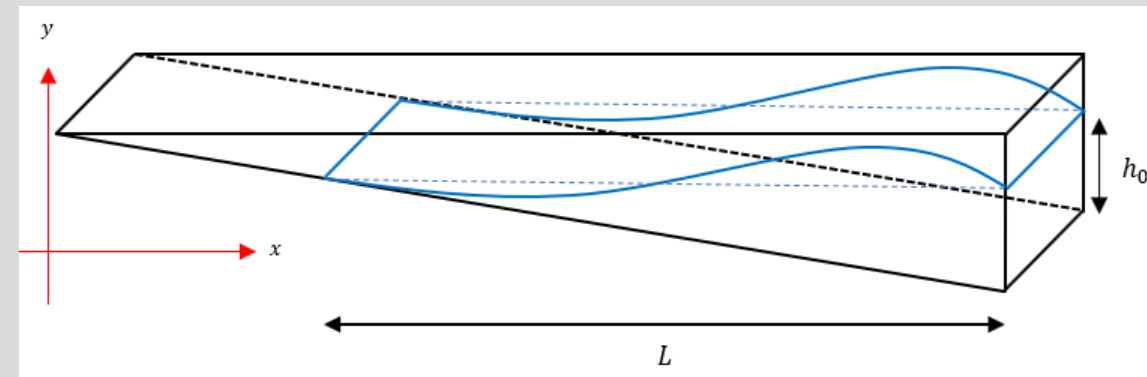
Forzante sismica (ondulatoria): schematizzata mediante **un'accelerazione** (orizzontale, quindi perpendicolare alla diga) espressa **come funzione sinusoidale del tempo**

$$a_x = \begin{cases} A_x \cdot \sin(\omega t), & t \leq D \\ 0, & t > D \end{cases}$$

Modello Matematico: modello di **fluido viscoso incompressibile** inclusa l'azione forzante.

Equazioni di continuità e di Navier

$$\begin{aligned} \text{div}(\vec{v}) &= 0; \\ \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} &= \rho(\vec{g} - \vec{a}) - \text{grad}(p) + \mu \nabla^2 \vec{v} \end{aligned}$$



L'**adimensionalizzazione** delle equazioni del modello suggerisce che vi sono **due parametri adimensionali** rilevanti per il problema (grandezze scala ρ, g, L)

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{p} = \frac{p}{\rho g h_0}, \quad \bar{t} = t \frac{\sqrt{g h_0}}{L}, \quad \bar{u} = \frac{u}{\sqrt{g h_0}}$$

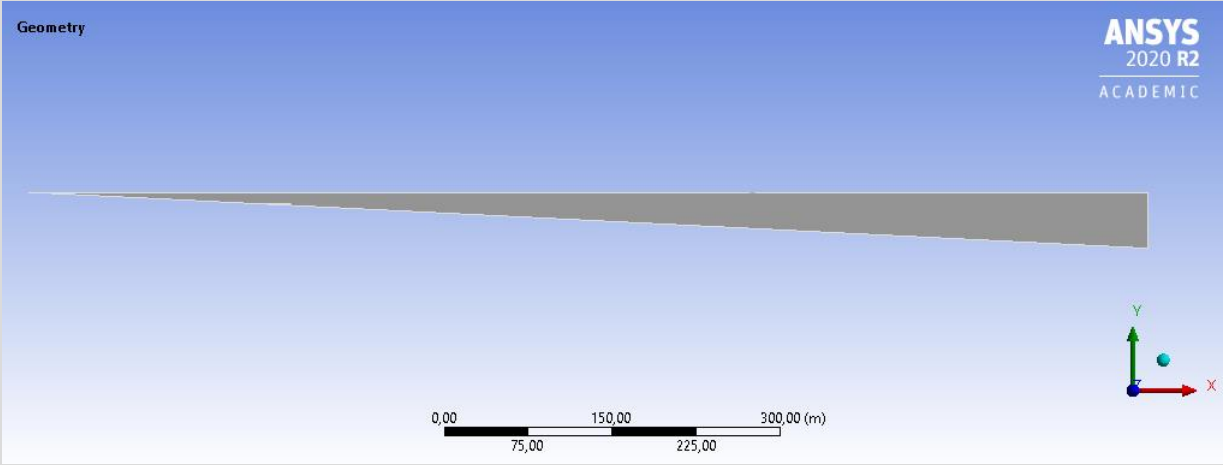
$$\frac{D\bar{u}}{D\bar{t}} = -\frac{A_x L}{g h_0} \sin\left(\frac{\omega L}{\sqrt{g h_0}} \bar{t}\right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \bar{u}$$

Trascurabile

\mathbf{F}_x
effetto dell'ampiezza
dell'accelerazione forzante
lungo la direzione x

\mathbf{S}_t
numero di Strouhal

- Introduzione e DM 26
giugno 2014
- **Modello matematico**
- Modello numerico in
ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C_{h_{max}}$
 - $C_{F_{max}}$
 - $C_{M_{max}}$ e $C_{e_{max}}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni



Fattore di incremento						
	$T [s]$	0.0102	0.0254	0.2538	1.0152	2.5379
A_x/g	$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.025	0.5					
0.05	1					
0.2	4					
0.5	10					
1.25	25					
5	100					

Sono stati definiti 30 scenari, ognuno caratterizzato da da una coppia di valori dei gruppi adimensionali F_x e S_t .

Per ottenere diversi valori di questi gruppi adimensionali, si sono mantenuti invariati i parametri geometrici del cuneo d'acqua presente nell'invaso (altezza idrica h_0 alla diga pari a **40 m** e lunghezza L dello specchio liquido pari a **800 m**), mentre sono state fatte variare le caratteristiche della forzante sismica.

Per A_x/g , che rappresenta l'ampiezza massima dell'accelerazione forzante rispetto l'accelerazione di gravità, sono stati considerati **valori compresi tra 0.025 e 2** mentre, per quanto concerne il periodo dominante T della sollecitazione sismica, sono stati considerati **valori compresi tra 0.01 s e 2.5 s**.

Conseguentemente, il parametro F_x , varia tra **0.5 e 100**, mentre S_t tra **100 e 25'000**.

➤ Introduzione e DM 26
giugno 2014

➤ Modello matematico

➤ **Modello numerico in ANSYS Fluent**

➤ Validazione

➤ Risultati

- $C h_{max}$
- $C F_{max}$
- $C M_{max}$ e $C e_{max}$

➤ Esempi di applicazione

➤ Conclusioni

- **Geometria:** suddivisione del dominio in 3 regioni *aria1*, *aria2* e *acqua*
- **Mesh:** strutturata nella regione *aria2* (zona generazione delle onde) e non strutturata a maglie quadrangolari e triangolari nelle regioni rimanenti. 374'419 celle.

- **Modello numerico VOF:** moto fluido bifase. La frazione della fase liquida nella cella computazionale è definita dal parametro α
 1. $\alpha = 0$: la cella non contiene acqua (cella piena di aria);
 2. $\alpha = 1$: la cella è riempita solo da acqua;
 3. $0 < \alpha < 1$: la cella contiene una miscela di acqua e aria. (la superficie libera può assumersi identificata dall'isolinea $\alpha = 0.5$)

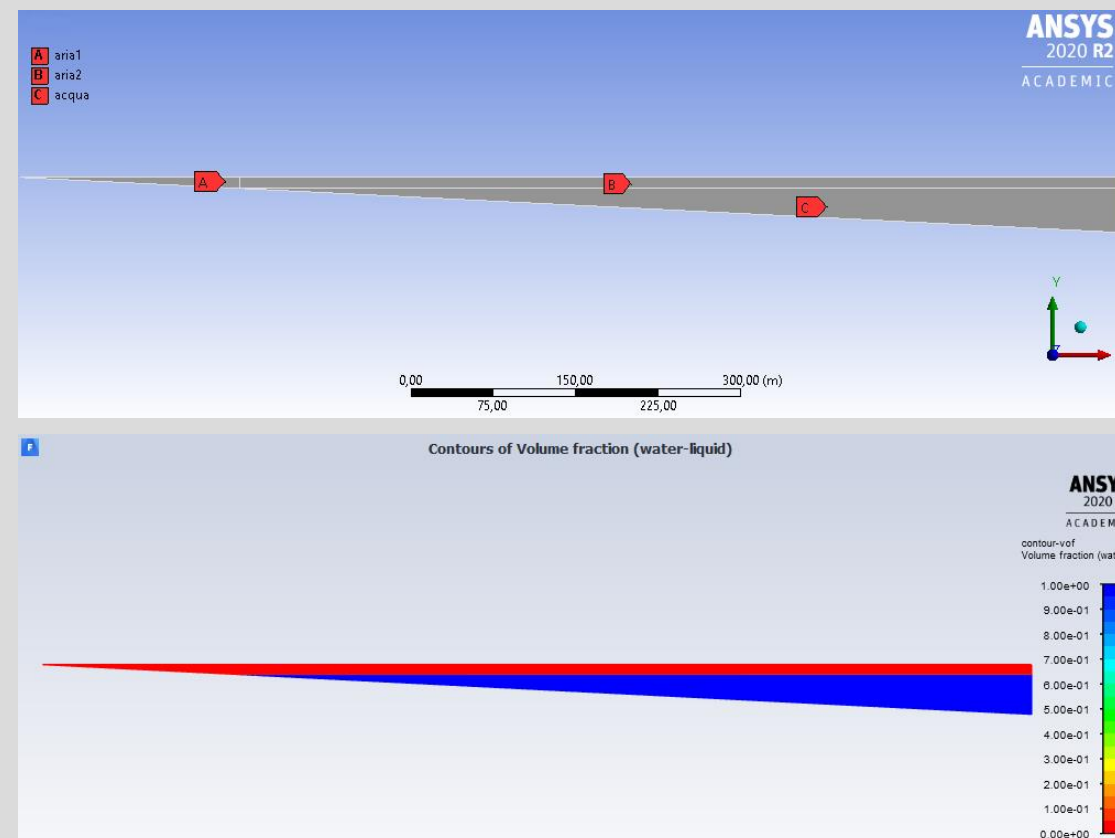
- **Condizioni al contorno**

- Condizione di aderenza alle pareti
- Pressione nulla in corrispondenza del cielo del dominio

- **Applicazione della forzante sismica** tramite apposita funzione che definisce il movimento del sistema di riferimento

- **Il passo temporale** di calcolo Δt è stato fissato in modo tale che $Nq = T/\Delta t > 20$

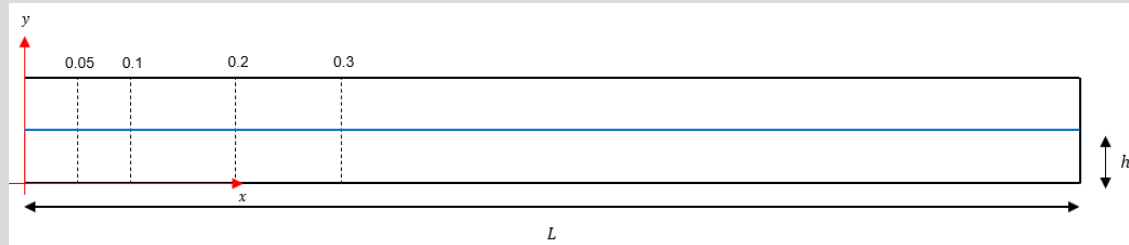
Le simulazioni numeriche sono state effettuate mediante il software commerciale ANSYS Fluent



```
DEFINE_TRANSIENT_PROFILE(forcing_velocity,time)
{
    real forcing_velocity = 0.0;
    if (time < 20.3036)
    {
        forcing_velocity = - (0.2 * 9.8065 / 6.189236) * (1.00 - cos(6.189236 * time));
    }
    else
    {
        forcing_velocity = 0.0;
    }
    return forcing_velocity;
}
```

- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- **Validazione**
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni

Campagna sperimentale di Antuono et al. (2014): fenomeno di sloshing all'interno di un serbatoio rettangolare

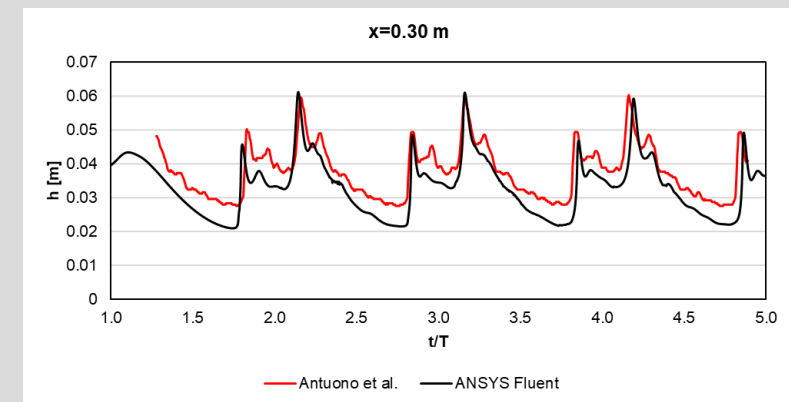
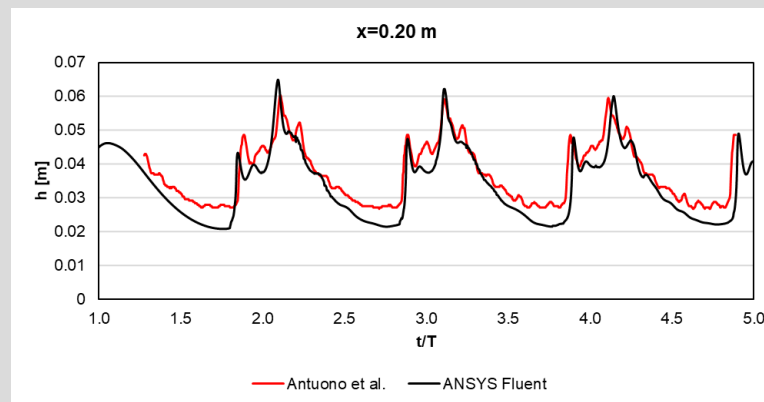
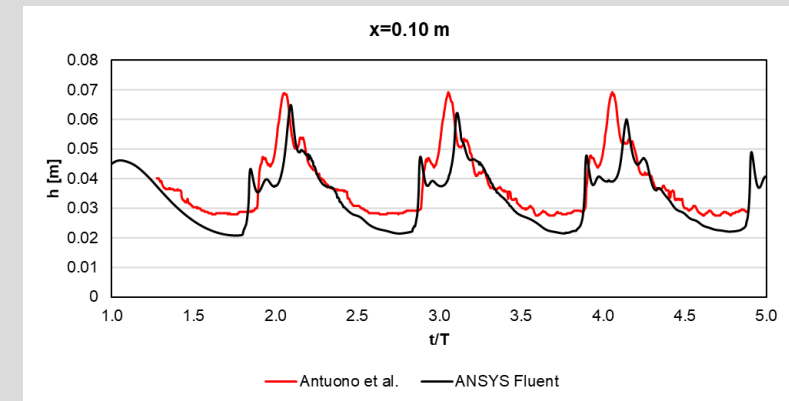
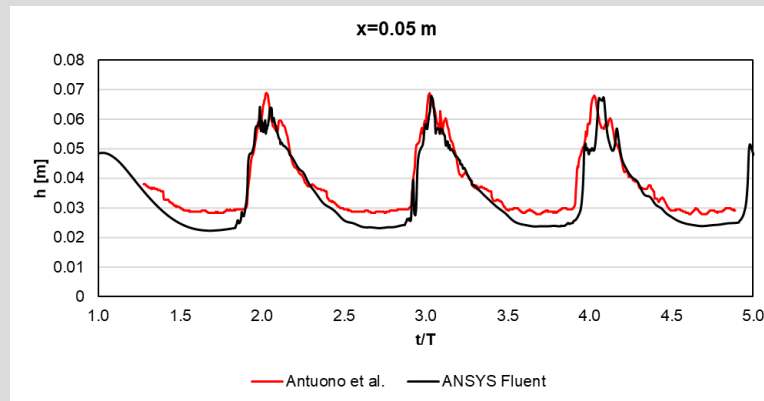


Movimento traslatorio della vasca

$$x(t) = A \sin(\omega t)$$

A/h_0	h_0/L	ω [1/s]	T [s]
1	0.034	2.272	2.765

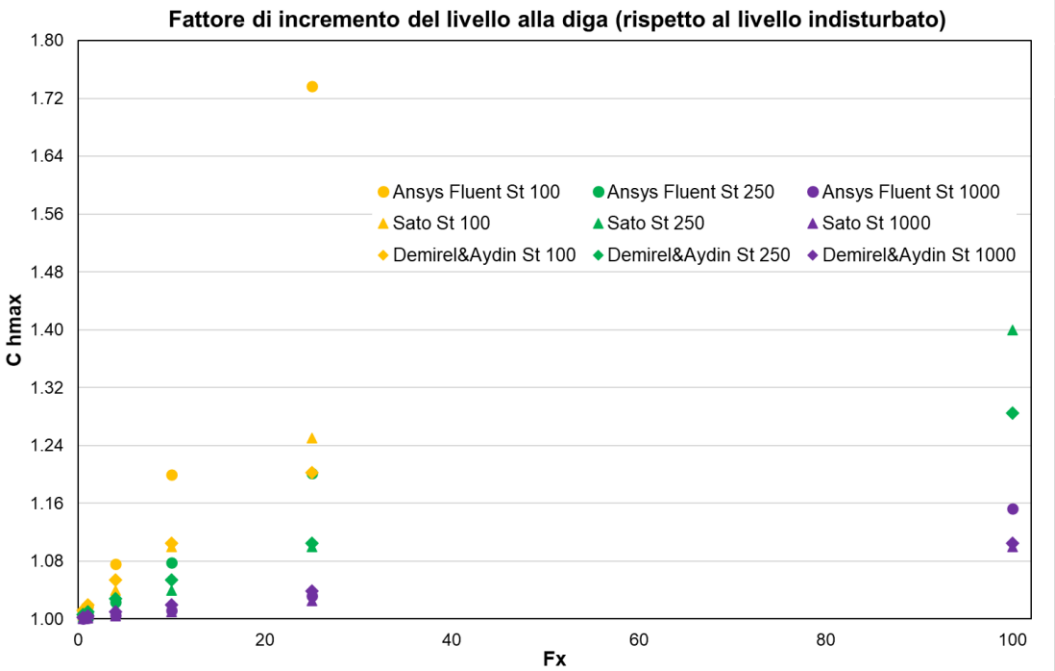
Confronto degli andamenti temporali dell'altezza idrica nelle sezioni distanti 5 cm, 10 cm, 20 cm e 30 cm dalla parete verticale di sinistra: il modello numerico riproduce bene le onde di sloshing. In particolare, i risultati del modello numerico ricostruiscono la forma delle onde, che presentano un andamento bimodale nelle sezioni $x=20$ cm e $x=30$ cm



- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni

$$C h_{max} = \frac{h_{max}}{h_0}$$

L'incremento di livello alla diga dovuto al moto ondoso **aumenta** con l'**intensità** del sisma (F_x) e con il **periodo** del sisma (cioè al diminuire di S_t). Quindi gli eventi più intensi con periodo maggiore sono quelli più pericolosi ai fini del rischio di sormonto della diga.



$C h_{max}$					
$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	1	1	1.0006	1.0028	1.0087
1	1	1	1.0012	1.0058	1.0176
4	1	1.0001	1.0048	1.0237	1.0762
10	1	1.0004	1.0122	1.0775	1.1995
25	1	1.0009	1.0320	1.2010	1.7373
100	1.0044	1.0114	1.1526	-	-

Confronto con formule di letteratura

- **Demirel e Aydin (2012)**

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0.55 \bar{F}_r^{0.72} \quad \bar{F}_r = \frac{v_{max}}{\sqrt{gh_0}}$$

v_{max} picco della velocità del sisma

- **Sato (1967)**

$$\Delta h = \frac{a_{max}}{g} \frac{\sqrt{gh_0}}{2\pi f}$$

a_{max} accelerazione massima del sisma

Per i valori di S_t pari a 25'000, 10'000 e 1'000 (ad eccezione di $S_t=1'000$ - $F_x=100$), i risultati del modello sono **compresi** tra quelli di Sato e Demirel-Aydin;
 Per i valori di S_t pari a 250 e 100, indipendentemente dal valore di F_x , i **risultati** del **modello numerico** sono più cautelativi di quelli che si ottengono applicando le formule di Sato e di Demirel e Aydin.

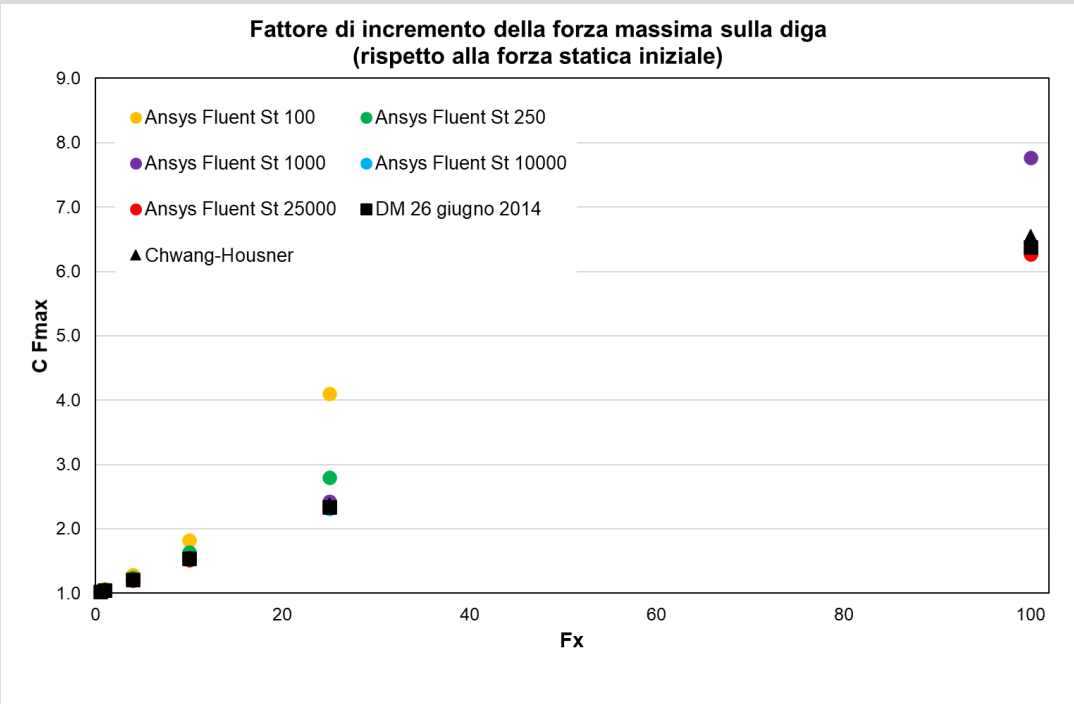
Aydin e E. Demirel, Hydrodynamic modeling of a dam-reservoir response during earthquakes; J. Eng. Mech. 138 (2) (2012) 164-174, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000322.
 Q. Sato, Seismic waves in reservoirs generated by earthquake, Civil Engineering Materials 9 (1967) 480–482;

- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- **Risultati**
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni

$$C F_{max} = \frac{F_{max}}{F_0}; \qquad F_0 = \rho g \frac{h_0^2}{2}$$

L’incremento della forza massima sulla diga **aumenta** con l’**intensità** del sisma (F_x) e con il **periodo** del sisma (cioè al diminuire di S_t).

La spinta totale massima sul paramento della diga è maggiore di quella che si può calcolare considerando il massimo sovrалzo Δh e assumendo che la distribuzione delle pressioni sia idrostatica



$C F_{max}$					
$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	1.0236	1.0235	1.0241	1.027	1.0344
1	1.0506	1.0503	1.0514	1.0568	1.0719
4	1.2063	1.2090	1.2179	1.2414	1.2847
10	1.5225	1.5261	1.5532	1.6379	1.8232
25	2.3424	2.3216	2.4256	2.7986	4.1030
100	6.2684	6.3514	7.772	-	-

Confronto con formule di letteratura

- DM 26 giugno 2014**

$$p_1 = \rho c y_0 a_{max,x}, \qquad F_1 = \frac{c_m}{2} \left(\frac{2}{3} + \frac{\pi}{4} \right) \rho h_0^2 a_{max,x}$$

$a_{max,x}$ accelerazione massima orizzontale, c coefficiente di pressione dipendente dall’affondamento $h_0 - y$

- Chwang e Housner(1977)**

$$p_2 = C_P \rho h_0 a_0, \qquad F_2 = \frac{\sqrt{2}}{8} \pi \rho h_0^2 a_0$$

a_0 accelerazione costante, C_P coefficiente di pressione dipendente dall’affondamento

I modelli proposti dal DM 26 giugno 2014 e da Chwang e Housner considerano un’accelerazione forzante costante;
Il **modello** in ANSYS Fluent risulta **cautelativo** in **tutti i casi** con S_t compreso tra **100 e 250** e nelle condizioni con S_t =**1'000** e F_x pari a **25 e 100**

- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni

$$C M_{max} = \frac{M_{max}}{M_0} \quad M_0 = S_0 \frac{h_0}{6}$$

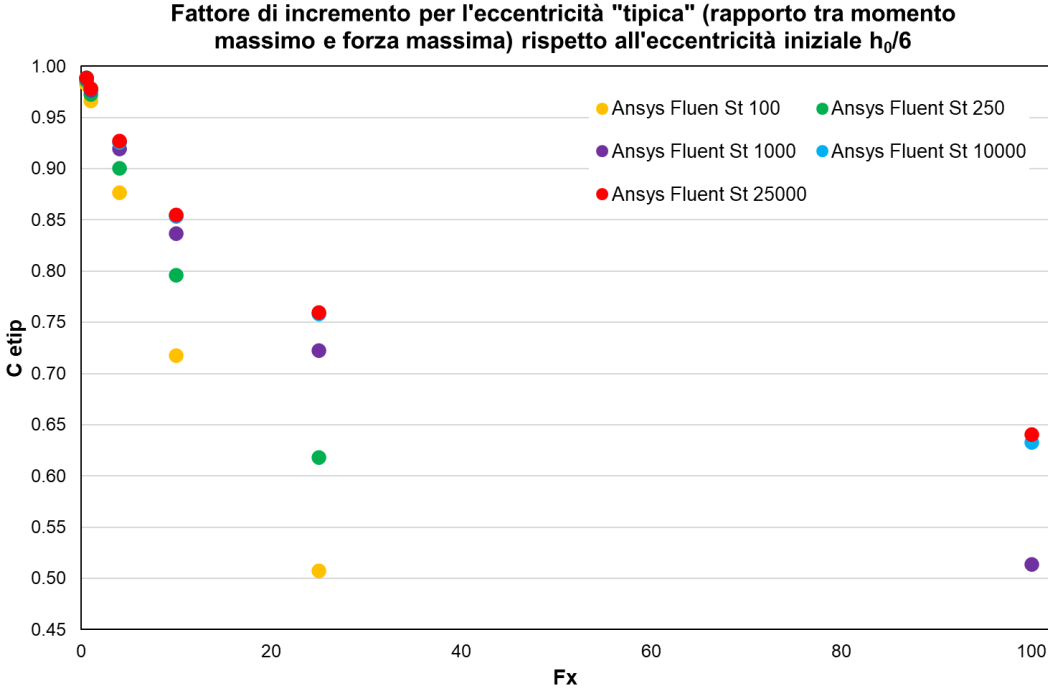
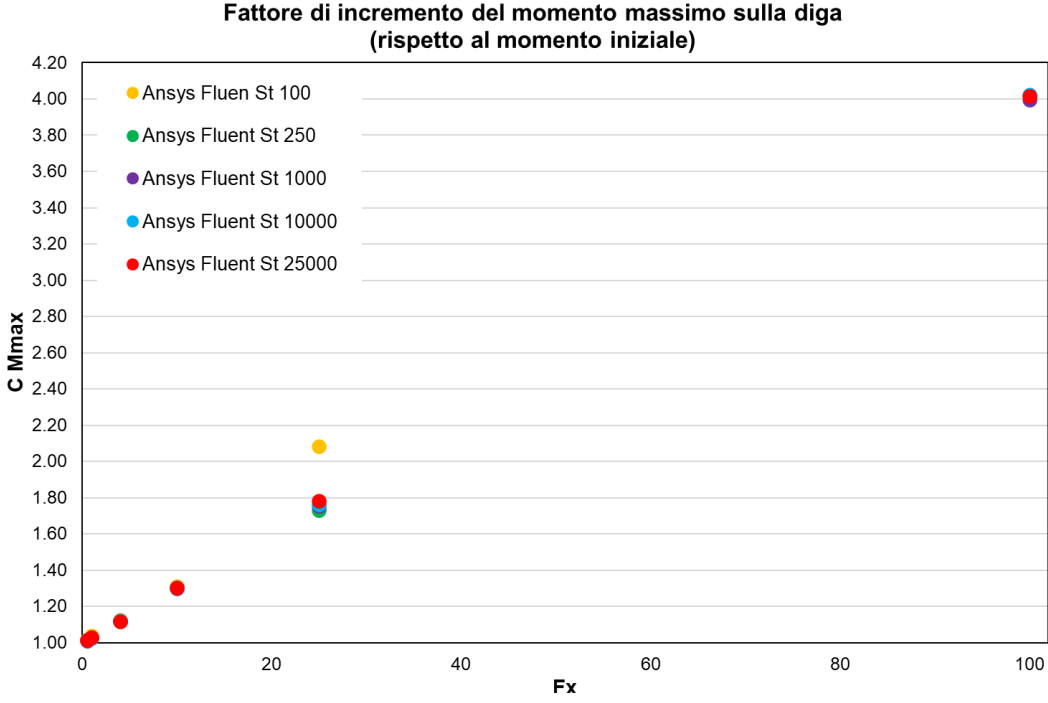
Il fattore $C M_{max}$ risulta **poco variabile** con S_t per di F_x inferiore a 25.

$C M_{max}$					
$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	1.0124	1.0123	1.0122	1.0125	1.0166
1	1.0280	1.0278	1.0274	1.0278	1.0363
4	1.1183	1.1196	1.1201	1.1177	1.1269
10	1.3019	1.3026	1.2998	1.3045	1.3094
25	1.7807	1.7611	1.7533	1.7304	2.0831
100	4.0163	4.0232	3.9969	-	-

$$C e_{tip} = \frac{M_{max}}{F_{max}}$$

$C e_{tip}$ diminuisce all'aumentare del parametro F_x e il tasso di variazione che cresce all'aumentare del parametro S_t .

$C e_{tip}$					
$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	0.9890	0.9890	0.9883	0.9859	0.9828
1	0.9785	0.9786	0.9771	0.9726	0.9667
4	0.9270	0.9260	0.9197	0.9004	0.8772
10	0.8551	0.8536	0.8368	0.7965	0.7182
25	0.7602	0.7586	0.7229	0.6183	0.5077
100	0.6407	0.6334	0.5143	-	-



- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni



Valori iniziali		Fattori di incremento		Valori massimi	
h_0	49.5 m	$C h_{max}$	1.0137	h_{max}	50.18 m
F_0	12'014 kN	$C F_{max}$	1.3346	F_{max}	16'034 kN
M_0	99'117 kN·m	$C M_{max}$	1.1782	M_{max}	17'658 kN·m
e_0	8.25 m	$C e_{max}$	0.8879	e_{max}	7.33 m

Diga di Mignano

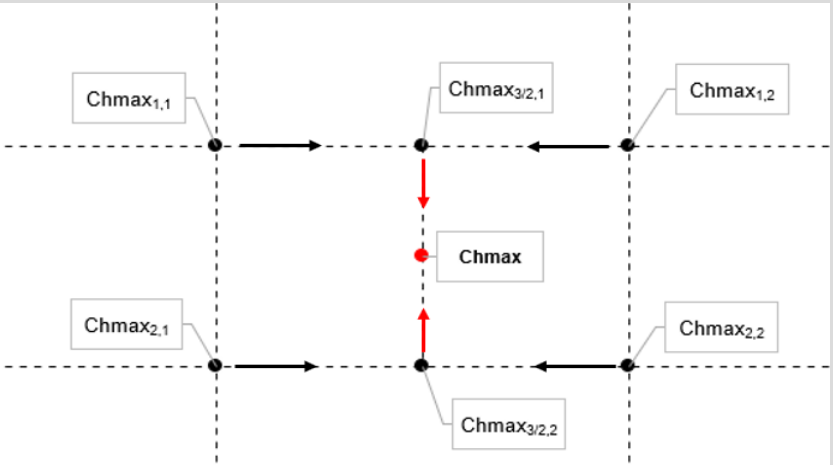
Manufatto a gravità massiccia, ubicata nell'alta valle del torrente Arda in provincia di Piacenza. Capacità di invaso complessiva $15.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

h_0	49.5 m	L_0	1500 m
h_{franco}	1.5 m	A_x/g	0.2
$C h_{max}$	1.0303	T	0.5 s
$F_x=5.94$		$S_t=855.54$	

La stima dei coefficienti di incremento per il caso di studio considerato potrà essere effettuata per interpolazione lineare nella tabella, che si configura a tutti gli effetti come un'interpolazione lineare di una funzione a due variabili.

$C h_{max}$

$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	1	1	1.0006	1.0028	1.0087
1	1	1	1.0012	1.0058	1.0176
4	1	1.0001	1.0048	1.0237	1.0762
10	1	1.0004	1.0122	1.0775	1.1995
25	1	1.0009	1.0320	1.2010	1.7373
100	1.0044	1.0114	1.1526	-	-



- Introduzione e DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni



Valori iniziali		Fattori di incremento		Valori massimi	
h_0	142 m	$C h_{max}$	1.0041	h_{max}	142.59 m
F_0	98'869 kN	$C F_{max}$	1.1893	F_{max}	117'586 kN
M_0	2'339.9 MN·m	$C M_{max}$	1.1042	M_{max}	2'583.7 MN·m
e_0	23.67 m	$C e_{max}$	0.9295	e_{max}	22 m

Diga di Place Moulin

Manufatto ad arco che sorge nella località di Place Moulin, in provincia di Aosta, sbarrando l'alto corso del torrente Buthier. Capacità di invaso complessiva $106 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

h_0	142 m	L_0	3000 m
h_{franco}	1 m	A_x/g	0.165
$C h_{max}$	1.0042	T	0.5 s
$F_x=3.49$		$S_t=1'010.25$	

$C h_{max}$

$F_x \backslash S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	1	1	1.0006	1.0028	1.0087
1	1	1	1.0012	1.0058	1.0176
4	1	1.0001	1.0048	1.0237	1.0762
10	1	1.0004	1.0122	1.0775	1.1995
25	1	1.0009	1.0320	1.2010	1.7373
100	1.0044	1.0114	1.1526	-	-

- Introduzione
- DM 26 giugno 2014
- Modello matematico
- Modello numerico in ANSYS Fluent
- Validazione
- Risultati
 - $C h_{max}$
 - $C F_{max}$
 - $C M_{max}$ e $C e_{max}$
- Esempi di applicazione
- Conclusioni

	Ampiezza d'onda [m]									
Velocità vento [km/h]	Fetch [km]									
	1	2	4	6	8	10	11	20	40	50
100	0.27	0.38	0.53	0.65	0.75	0.84	0.88	1.18	1.67	1.87
80	0.20	0.29	0.40	0.49	0.57	0.64	0.67	0.90	1.27	1.42
60	0.14	0.20	0.29	0.35	0.41	0.45	0.48	0.64	0.90	1.01
40	0.09	0.13	0.18	0.22	0.26	0.29	0.30	0.40	0.57	0.63
	run_up [m]									
	0.033	0.063	0.12	0.17	0.223	0.273	0.298	0.518	0.973	1.188

$C h_{max}$					
$F_x \setminus S_t$	25'000	10'000	1'000	250	100
0.5	1	1	1.0006	1.0028	1.0087
1	1	1	1.0012	1.0058	1.0176
4	1	1.0001	1.0048	1.0237	1.0762
10	1	1.0004	1.0122	1.0775	1.1995
25	1	1.0009	1.0320	1.2010	1.7373
100	1.0044	1.0114	1.1526	-	-

- A partire dalle simulazioni numeriche bidimensionale riguardanti un invaso di forma triangolare sul piano verticale $x - y$ con diga verticale, sono state costruite 4 tabelle relative ai fattori di incremento, in analogia alla tabella fornita dal DM 26 giugno 2014, per il calcolo del massimo incremento di livello atteso alla diga e della sollecitazione idrodinamica scaricata sullo sbarramento in occasione di un evento sismico.
- I risultati sono in funzione di due gruppi adimensionali F_x e S_t che racchiudono sia le caratteristiche geometriche dell'invaso, sia l'ampiezza e il periodo della forza sismica.
- Il modello fornisce risultati più cautelativi rispetto a quelli desumibili dalle formule di letteratura, specialmente se si considerano forzanti sismiche caratterizzate da elevata intensità del sisma e da periodi lunghi.

Grazie per l'attenzione