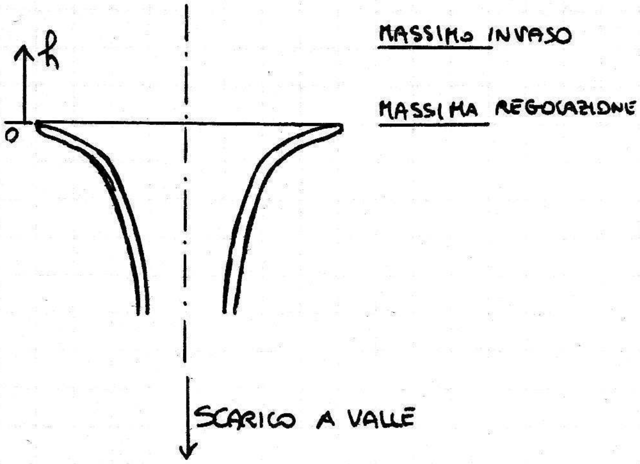
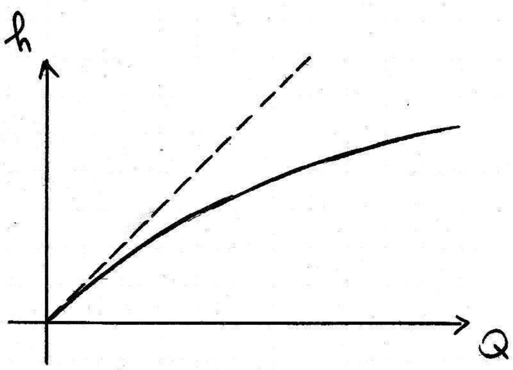


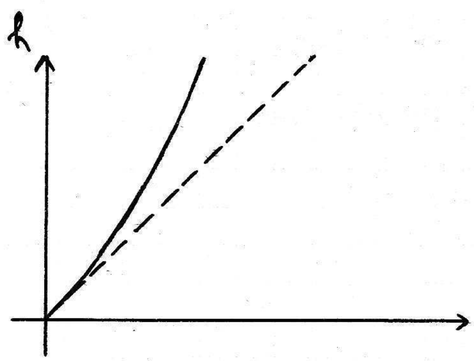
$$Q = c \cdot \pi R^2 \cdot h^{3/2}$$

dove R è il raggio dello sfioratore e h è il carico sullo sfioratore.

Lo sfioratore può funzionare sia come SFIORATORE LIBERO, sia come SFIORATORE SOTTO BATTENTE. La differenza fra questi due casi è mostrata nei grafici seguenti e risiede principalmente nella relazione tra Q e h:



SFIORATORE LIBERO

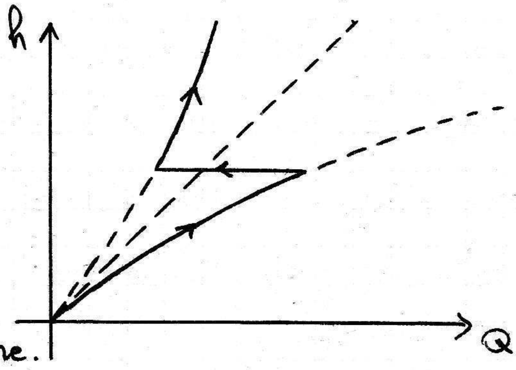


SFIORATORE SOTTO BATTENTE

Nel caso di funzionamento come sfioratore libero Q cresce più che linearmente con la h; nel caso di funzionamento sotto battente Q cresce meno che linearmente con la h. (Si ricorda che un efflusso sotto battente ha la seguente formula: $Q = c \cdot A \cdot \sqrt{2gH}$, cioè $Q \propto H^{1/2}$).

Un funzionamento pericoloso, perché risulta "stressante" per la struttura, è il seguente: lo sfioratore entra in funzione e inizia a lavorare come sfioratore libero; successivamente si tappa, cioè "butta fuori" tutta l'aria, e si porta a lavorare come sfioratore sotto battente.

Si nota come sotto battente la portata defluente sia MINORE che nel caso di sfioratore libero, a parità di carico h sullo sfioratore.

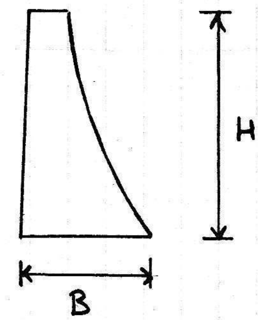


©Maxwell 2013

• DIMENSIONAMENTO DEL CORPO DIGA

→ Definizioni e considerazioni preliminari

Definiamo le seguenti grandezze geometriche:



B = larghezza della base del corpo diga;

H = altezza del corpo diga.

L'altezza H può essere espressa come somma di altezze parziali:

$$H = H_R + H_L + H_{VM} + H_O + f$$

dove

H_R = ALTEZZA DI REGOLAZIONE (calcolabile a partire dal volume di regolazione)

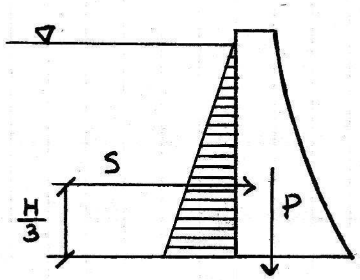
H_L = ALTEZZA DI LAMINAZIONE

H_{VM} = ALTEZZA DEL VOLUME MORTO

H_O = ALTEZZA DELLE ONDE

f = FRANCO

La classe di dighe definite DIGHE A GRAVITÀ è caratterizzata dal fatto che ogni diga che ne fa parte resiste alle sollecitazioni solamente grazie al proprio peso. La sollecitazione di gran lunga più importante è la spinta idrostatica dell'acqua contenuta nel bacino:



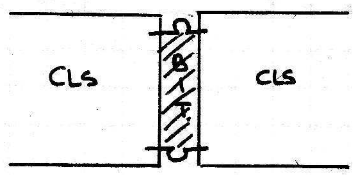
imponendo uno spessore unitario si ha

$$S = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot 1 .$$

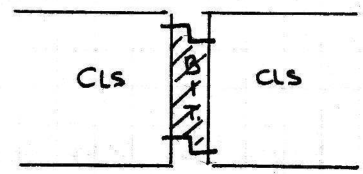
Siccome il calcestruzzo non armato non resiste a sforzi di TRAZIONE, non è possibile pensare di costruire una diga facendo un'unica gettata di cemento. Infatti, il processo di solidificazione e di presa del calcestruzzo è esotermico, quindi scalda il corpo diga, dilatandolo. Una volta terminato tale processo, il corpo diga si raffredda e si contrae, spaccandosi.

©Maxwell 2013

Per evitare che ciò accada, le dighe vengono costruite per CONCI separati da GIUNTI DI DILATAZIONE opportunamente riempiti di bitume e resi stagni mediante l'inserimento di lamierini:



LAMIERINO A Ω



LAMIERINO A L

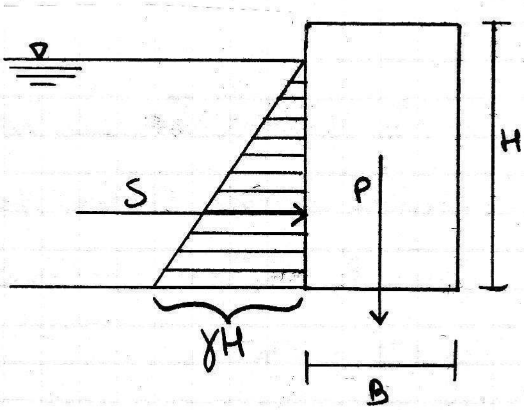
I giunti di dilatazione vengono forniti di opportune resistenze con lo scopo di scaldare il bitume per evitare che solidifichi, perdendo elasticità. Inoltre, possono essere utilizzati per far passare i DRENI, tubi verticali che hanno lo scopo di convogliare verso il basso l'acqua di filtrazione.

→ Dighe a gravità ordinaria

La forma base delle dighe a gravità ordinaria è stata definita da Rankine e ha le seguenti caratteristiche:

- il paramento di monte è pressoché verticale;
- ogni sezione deve essere sottoposta a compressione (calcestruzzo ⇒ no trazioni);
- le tensioni devono essere ammissibili, cioè devono essere compatibili con le massime tensioni sopportabili.

L'idea di partenza è costruire un muro che sorregga la massa d'acqua esclusivamente grazie al proprio peso:

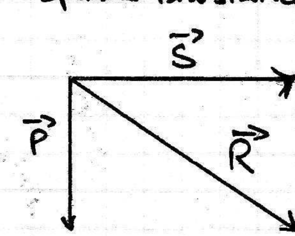


$P = \gamma_m \cdot B \cdot H \cdot 1$ forza peso

(γ_m: peso specifico del calcestruzzo)

$S = \gamma \cdot H \cdot \frac{H}{2}$ spinta idrostatica

La composizione delle due forze porta al seguente risultato:



©Maxwell 2013

La risultante $\vec{R}$ cade in un punto della base B della diga. Si possono avere i seguenti casi:

- cade nel baricentro della base

(base RIGIDA)

- cade fuori dal baricentro della base (1)

- cade fuori dal baricentro della base (2)

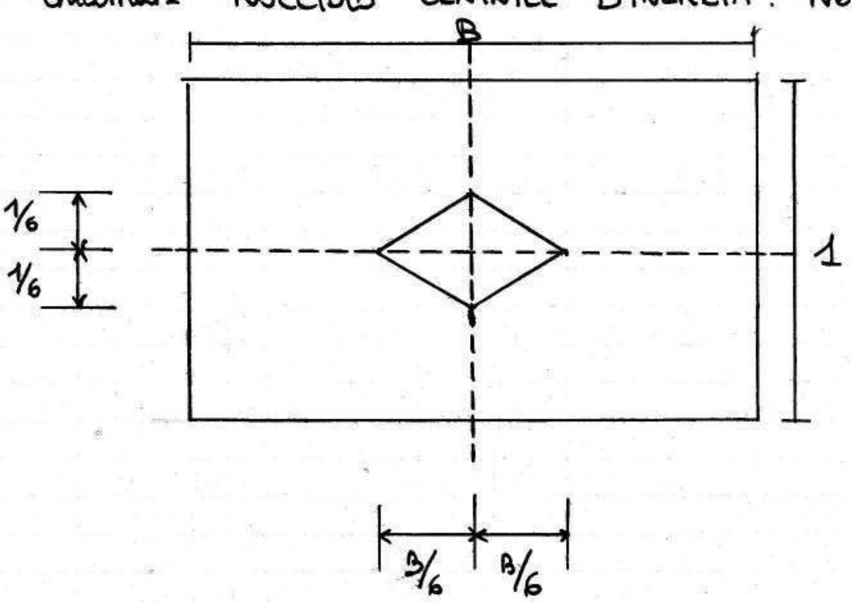
(caso limite)

- cade fuori dal baricentro della base (3)

(caso distruttivo)

dato che il calcestruzzo non sopporta le trazioni (σ^+) questo caso può causare la distruzione della diga.

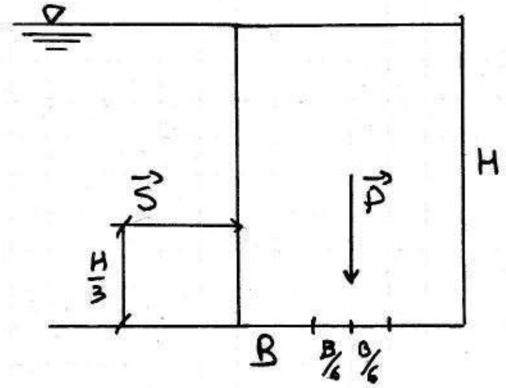
La teoria del SOLIDO DI DE SAINT-VENANT determina l'area nella quale deve cadere la risultante $\vec{R}$ affinché la base sia soggetta a sola compressione. Tale area è chiamata NOCCIOLO CENTRALE D'INERZIA. Nel caso di base rettangolare si ha:



se la risultante $\vec{R}$ cade nel nocciolo centrale d'inerzia siamo sicuri che la base non sarà soggetta a trazione.

©Maxwell 2013

In sezione:



la condizione su $\vec{R}$ (deve cadere nel nocciolo centrale d'inerzia) si traduce sul fatto che debba cadere al massimo ad una distanza pari a $\frac{B}{6}$ dal baricentro.

Questa condizione determina il valore di B, in funzione dell'altezza H (che già si conosce). Supponiamo che la risultante $\vec{R}$ cada al limite, cioè a $\frac{B}{6}$ verso destra dal baricentro. Chiamiamo M questo punto. Il momento della risultante $\vec{R}$, calcolato rispetto al punto M, deve essere nullo:

$$M) \qquad P \cdot b_p - S b_s = 0$$

b_p = braccio della forza peso

b_s = braccio della spinta

sostituendo:

$$\gamma_m \cdot B \cdot \cancel{H} \cdot \frac{B}{\cancel{6}} - \frac{1}{\cancel{2}} \gamma H^2 \frac{\cancel{H}}{\cancel{3}} = 0$$

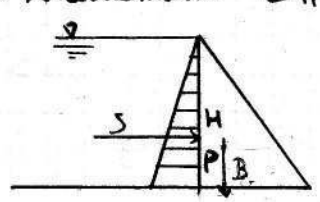
$$\gamma_m B^2 - \gamma H^2 = 0$$

$$\frac{B}{H} = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_m}}$$

con dati tipici ($\gamma = g \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}$ e $\gamma_m = g \cdot (2300 \div 2500) \frac{kg}{m^3}$) si ottiene $B \cong 0{,}7 \cdot H$, cioè una diga molto tozza.

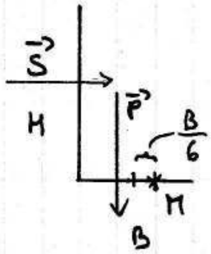
Essendo quella trovata una condizione limite, si pone: $B \geq 0{,}7 \cdot H \Leftrightarrow \frac{B}{H} \geq \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_m}}$.

Se invece di costruire un muro, si costruisce uno sbarramento con sezione a triangolo rettangolo, cambierebbe qualcosa?



©Maxwell 2013

©Maxwell 2013



$$|\vec{S}| = \frac{1}{2}\gamma H^2$$

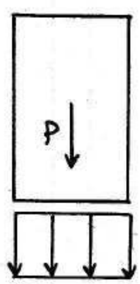
$$|\vec{P}| = \gamma_m \frac{BH}{2}$$

$$M) \quad \gamma_m \frac{BH}{2} \cdot \frac{B}{3} = \gamma \frac{H^2}{2} \frac{H}{3}$$

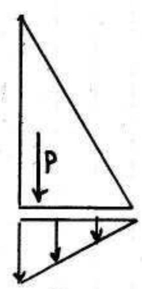
$$\gamma_m \frac{BH}{2} \frac{B}{3} - \gamma \frac{H^2}{2} \frac{H}{3} = 0$$

$$\frac{B}{H} \geq \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_m}}$$

Con la sezione triangolare abbiamo ottenuto lo stesso risultato, ma utilizzato la metà dei materiali. Inoltre si dimezzano le sollecitazioni sulle fondazioni:



$P = \gamma_m \cdot B \cdot H$



$P = \gamma_m \cdot B \cdot H \cdot \frac{1}{2}$

triangolo fondamentale di Rankine

La legge italiana stabilisce che le dighe debbano essere triangolari ed essere verificate sia a vuoto, sia alla quota di massimo invaso certificando che le tensioni in gioco siano compatibili con il materiale utilizzato e che valga la seguente condizione di verifica allo scorrimento:

$$\frac{\Sigma F_{ORIZ}}{\Sigma F_{VERT}} \leq 0{,}75$$

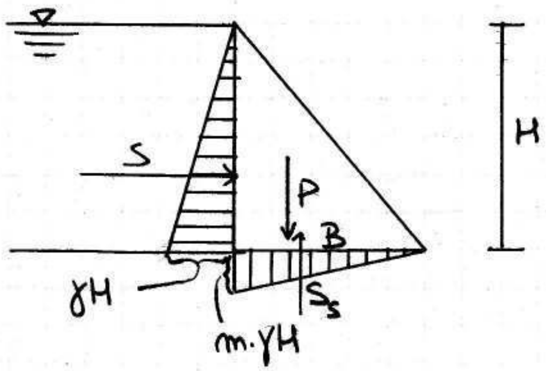
Da questa condizione si ricava una seconda relazione fra B e H:

$$\frac{\cancel{\frac{1}{2}}\gamma H^{\cancel{2}}}{\cancel{\frac{1}{2}}\gamma_m B\cancel{H}} \leq 0{,}75 \Rightarrow \frac{\gamma H}{\gamma_m B} \leq \frac{3}{4} \Rightarrow \frac{B}{H} \geq \frac{4}{3}\frac{\gamma}{\gamma_m}.$$

Tra quelle calcolate, si sceglie il valore più cautelativo di B, cioè il più elevato.

→ Sottopressioni

Sono causate dall'acqua che si infiltra nel terreno al di sotto della diga e nello stesso corpo diga (il calcestruzzo è poroso).



Nelle grandi dighe si pone $m = 1$.

$$S = \frac{1}{2} \gamma H^2$$

$$P = \gamma_m \cdot \frac{1}{2} BH$$

$$S_s = \frac{1}{2} \gamma H B$$

Verifica allo scorrimento:

$$\frac{\frac{1}{2}\gamma H^2}{\gamma_m \frac{BH}{2} - \gamma \frac{BH}{2}} \leq \frac{3}{4} \Rightarrow \frac{\gamma H}{B(\gamma_m - \gamma)} \leq \frac{3}{4} \Rightarrow \frac{B}{H} \geq \frac{4}{3}\left(\frac{\gamma}{\gamma_m - \gamma}\right)$$

quindi si ottiene una B_{min} più grande del caso precedente.

Verifica della resistenza statica:

$$-\frac{1}{2}\gamma H^2 \frac{H}{3} + \frac{1}{2} BH \frac{B}{3} \gamma_m - \frac{1}{2} \gamma H B \frac{B}{3} = 0$$

$$-\gamma H^2 + \gamma_m B^2 - \gamma B^2 = 0$$

$$-\gamma H^2 + B^2(\gamma_m - \gamma) = 0$$

$$\frac{B}{H} \geq \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_m - \gamma}}$$

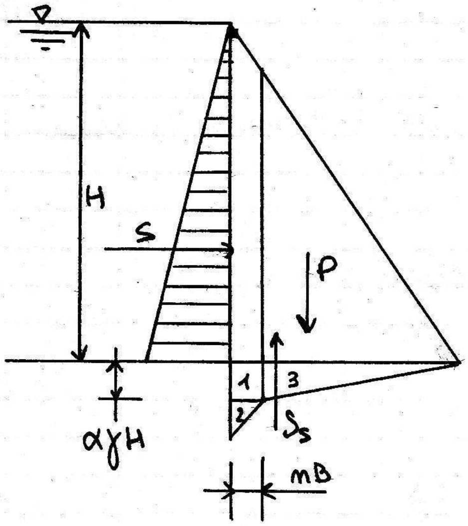
Nei casi pratici si ottiene una $B \cong H$.

Per ridurre le sottospinte si costruiscono i DRENI. Si tratta di tubi che intercettano l'acqua che si infiltra nel corpo diga e ne effettuano il drenaggio. Se i dreni hanno un diametro di almeno 120 mm nel corpo diga e almeno 200 mm nelle fondazioni e distano di 2,5 m fra di loro è possibile stimare le sottospinte nel seguente modo:

$$S = \frac{1}{2} \gamma H^2 \qquad\qquad P = \gamma_m \frac{1}{2} BH$$

©Maxwell 2013

©Maxwell 2013



$\alpha \geq 0{,}35$

$m = 0{,}03 \div 0{,}01$

$S = \frac{1}{2}\gamma H^2$

$P = \gamma_m \frac{1}{2} BH$

$S_s = S_{s,1} + S_{s,2} + S_{s,3}$

$S_{s,1} = \alpha\gamma H m B$

$S_{s,2} = mB(\gamma H - \alpha\gamma H)\frac{1}{2}$

$S_{s,3} = \alpha\gamma H (B - mB)\frac{1}{2}$

Quindi:

$$S_s = \gamma \frac{HB}{2}(\alpha + m).$$

Caso degenere: $\alpha = 1$, $m = 0$ e' il caso senza dreni.

Verifica allo scorrimento:

$$\frac{\cancel{\frac{1}{2}}\gamma H^{\cancel{2}}}{\gamma_m \frac{B\cancel{H}}{\cancel{2}} - \gamma\frac{B\cancel{H}}{\cancel{2}}(\alpha + m)} \leq \frac{3}{4} \Rightarrow \frac{\gamma H}{B(\gamma_m - \gamma(\alpha+m))} \leq \frac{3}{4} \Rightarrow \frac{B}{H} \geq \frac{4}{3}\frac{\gamma}{\gamma_m - \gamma(\alpha+m)}$$

Verifica di momenti:

$$\frac{B}{H} \geq \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_m - (m(1-\alpha) + \alpha(2-\alpha))\gamma}}$$

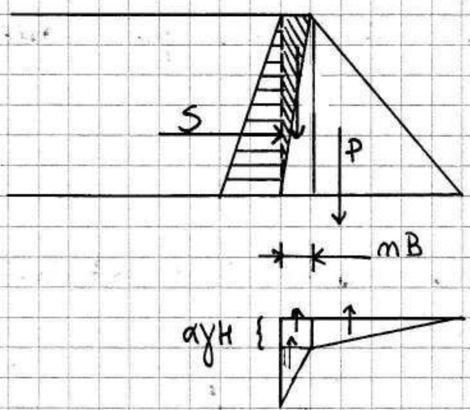
In conclusione, i dreni permettono di risparmiare sul materiale impiegato (e quindi sulle spese di costruzione della diga) garantendo comunque la stabilità della diga.

→ Schema realizzativo reale

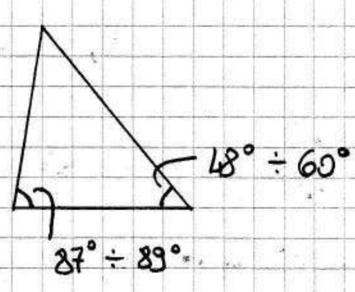
Nella realtà, il paramento di monte della diga non viene realizzato verticale, bensì inclinato.

In questo modo, infatti, l'acqua che sovrasta il paramento di monte concorre a conferire stabilità alla diga:

©Maxwell 2013



gli angoli tipici sono i seguenti:



L'equilibrio della diga è il seguente:

→ scorrimento

$$\frac{B}{H} \geq \frac{4}{3} \frac{\gamma}{\gamma_m - \gamma}$$

→ ribaltamento

$$\frac{B}{H} \geq \sqrt{\frac{\gamma}{(1-\alpha)(\gamma_m - m\gamma)}}$$

Quella che è stata finora definita è la SEZIONE FONDAMENTALE della diga, cioè quella che ne garantisce la stabilità. La normativa italiana prevede che la verifica delle condizioni di stabilità sia effettuata su tutte le sezioni della diga.

→ Forze agenti su di una diga

La diga è sottoposta all'azione delle seguenti forze:

- Spinta dell'acqua;
- Peso proprio;
- Sottospinte;
- Spinta addizionale dovuta al ghiaccio formatosi sul pelo libero dell'acqua (da considerarsi solamente se lo spessore del suddetto ghiaccio è di almeno 20 cm);
- Forze addizionali dovute ai sismi.

Sono state già discusse le azioni della spinta idrostatica, del peso proprio e delle sottospinte.

Per quanto riguarda il ghiaccio, si assume che esso contribuisca alla spinta idrostatica con un valore fisso pari a 150 kPa (da sommare alla spinta idrostatica). Tale spinta addizionale viene considerata solamente se l'acqua nell'invaso è ferma e raggiunge l'altezza di massima regolazione. Una volta calcolata la spinta di acqua alla massima regolazione e la spinta del ghiaccio, la si confronta con la spinta dell'acqua al massimo invaso, si prende quella maggiore delle due e la si usa per effettuare le verifiche di resistenza dei materiali e di stabilità.

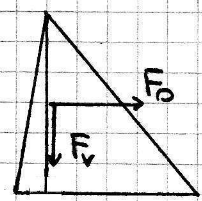
L'effetto del sisma sulla struttura viene modellizzato mediante due forze addizionali, una verticale:

$$F_v = c \cdot P$$

dove

$$c = \frac{S-2}{100}$$ con S = grado di sismicità della zona in cui si costruisce la diga

P = peso proprio della diga



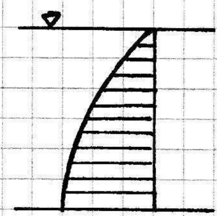
e una orizzontale:

$$F_o = m \cdot c \cdot P$$

dove c e P hanno gli stessi significati di prima e $m \geq 0{,}5$ è un coefficiente che dipende dalla zona in cui si edifica la diga.

L'effetto del sisma sull'acqua viene valutato mediante una pressione p addizionale, dovuta al sisma, che è funzione del grado di sismicità S della zona, dell'altezza y della diga e dell'inclinazione ϑ_m del paramento di monte:

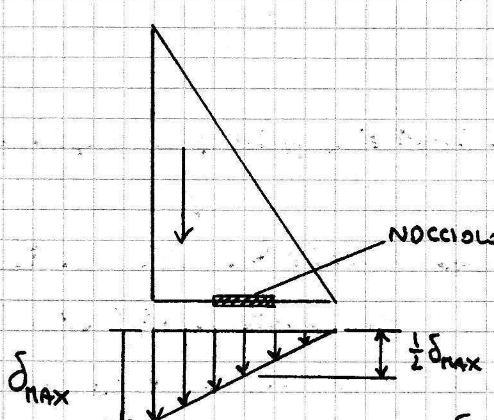
$$p = f(S, y, \vartheta_m)$$

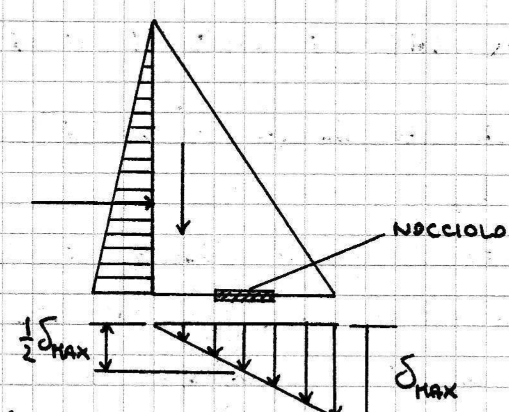


Per entrambi gli effetti (struttura e acqua) vengono effettuate le verifiche allo scorrimento e di resistenza dei materiali.

• DIGHE ALLEGGERITE

La diga massiccia che abbiamo analizzato risulta sovradimensionata:





$$\delta = \frac{P}{A(\lambda)}$$ (A variabile)

©Maxwell 2013