IL SOPRALZO DELLA DIGA DI LEVANE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE

DICEA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI FIRENZE

Firenze, 31 maggio 2024

MODELLI FISICI NELL'INGEGNERIA IDRAULICA

Nonostante il crescente impiego di software computazionali via via più complessi nel campo dell'Ingegneria Idraulica, la modellazione fisica di laboratorio rimane insostituibile per lo studio di fenomeni e processi per i quali le simulazioni numeriche non possono offrire adeguate garanzie di affidabilità nella progettazione e verifica delle opere idrauliche:

- fenomeni dissipativi concentrati (risalti idraulici, brusche variazioni di geometria, …);
- verifica di efficienza idrodinamica (profili di sfioratori, opere di imbocco e sbocco, …);
- fenomeni concentrati di dinamica d'alveo (erosione alle pile dei ponti e relative opere di protezione, …).

MODELLI FISICI NELL'INGEGNERIA IDRAULICA

PRO E CONTRO rispetto ai MODELLI NUMERICI

PRO

- Elevata affidabilità;
- diretta comprensione dei fenomeni fisici;
- contributi alla crescita delle conoscenze tecnico-scientifiche e alle attività di divulgazione e formazione.

CONTRO

- Maggiori costi;
- maggiori oneri nel verificare ipotesi alternative (scarsa flessibilità);
- limitazioni dovute agli spazi e/o alle attrezzature disponibili.

Per quanto riguarda il Laboratorio di Idraulica Fluviale del DICEA, il costo medio per un modello fisico varia tra 5000-8000 €/m^2, in base alle prove da effettuare e alla strumentazione utilizzata.



MODELLO FISICO DEGLI SCARICHI DELLA DIGA DI LEVANE (AR)

Enio Paris, Fabio Castelli,
Lorenzo Lotti, Stefano Morozzi



IL PROGETTO DI SOPRALZO DELLA DIGA DI LEVANE

Il progetto definitivo di sopralzo della Diga di Levane, inviato da Enel nell'ottobre del 2015 alla Direzione Generale Dighe per approvazione (come previsto dall'accordo di programma siglato nel 2014 tra Regione Toscana, Enel e Provincia di Arezzo), ha come unica finalità quella della mitigazione del rischio idraulico mediante la realizzazione di un nuovo volume di laminazione ottenuto attraverso il sopralzo della diga e il conseguente aumento della quota di massimo invaso dall'attuale valore di 167.5 msm al valore di progetto di 172.0 msm.

Dal parere espresso dalla Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture Idriche ed Elettriche del 0017788.02-08-2017 sul Progetto di Sopralzo:

- La portata di 3283 m^3/s è la piena di riferimento per la progettazione definitiva del sopralzo; tale valore dovrà essere assunto per la verifica della capacità di scarico della diga;

- La portata di 2964 m^3/s è la portata di riferimento per la verifica della vasca di dissipazione;

- La verifica di assenza di rigurgiti a valle diga tali da determinare una diminuzione della portata scaricata;

- La verifica sia della vasca di dissipazione che del sistema di scarico, mediante **modellazione fisica**, secondo il D.M. 26.06.2014.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici
Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche

IL MODELLO FISICO….

- Realizzato in **similitudine di Froude con scala 1:60;**

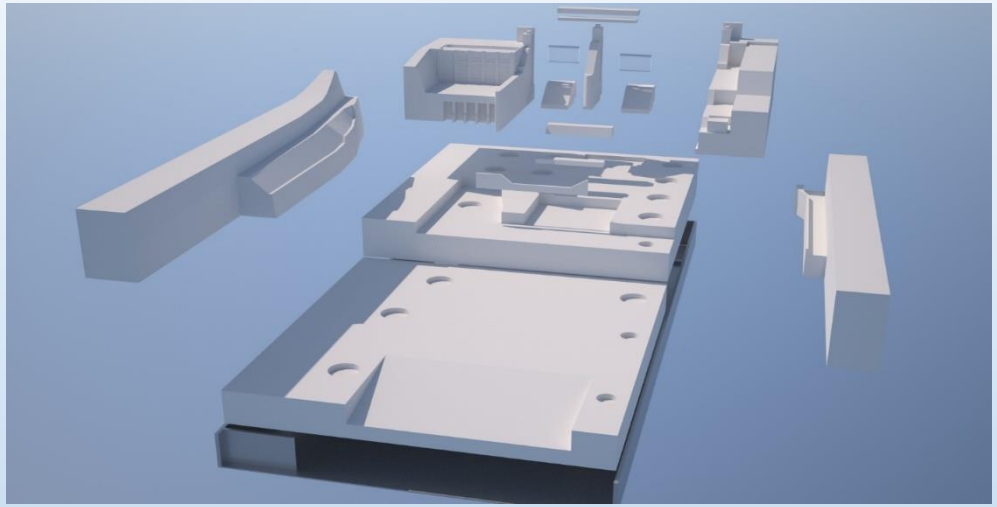
- Comprende lo sbarramento e un tratto a valle del **Fiume Arno di circa 150 metri;**

- In grado si simulare le portate di piena fino al valore della portata millenaria di circa **3300 m^3/s;**

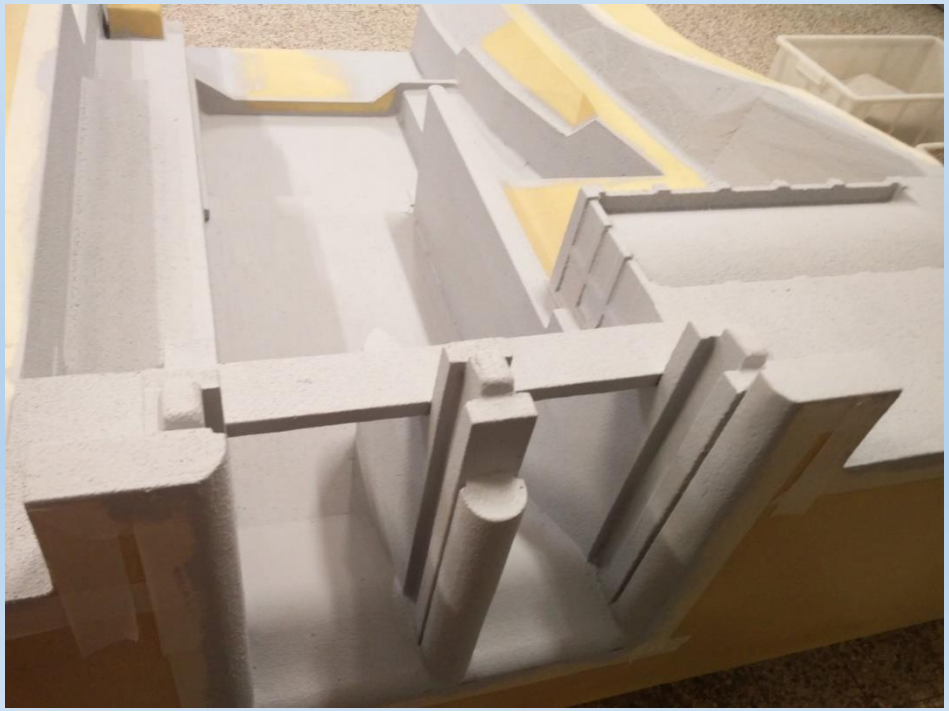
- Realizzato mediante **«scultura»** di materiale ESP-HD (polistirene espanso ad alta densità), utilizzando un braccio robotico a 7 assi di rotazione, dimensioni 4x2x1 m.



…. LA SUA REALIZZAZIONE ….







…. mediante scultura di PIÙ ELEMENTI ….

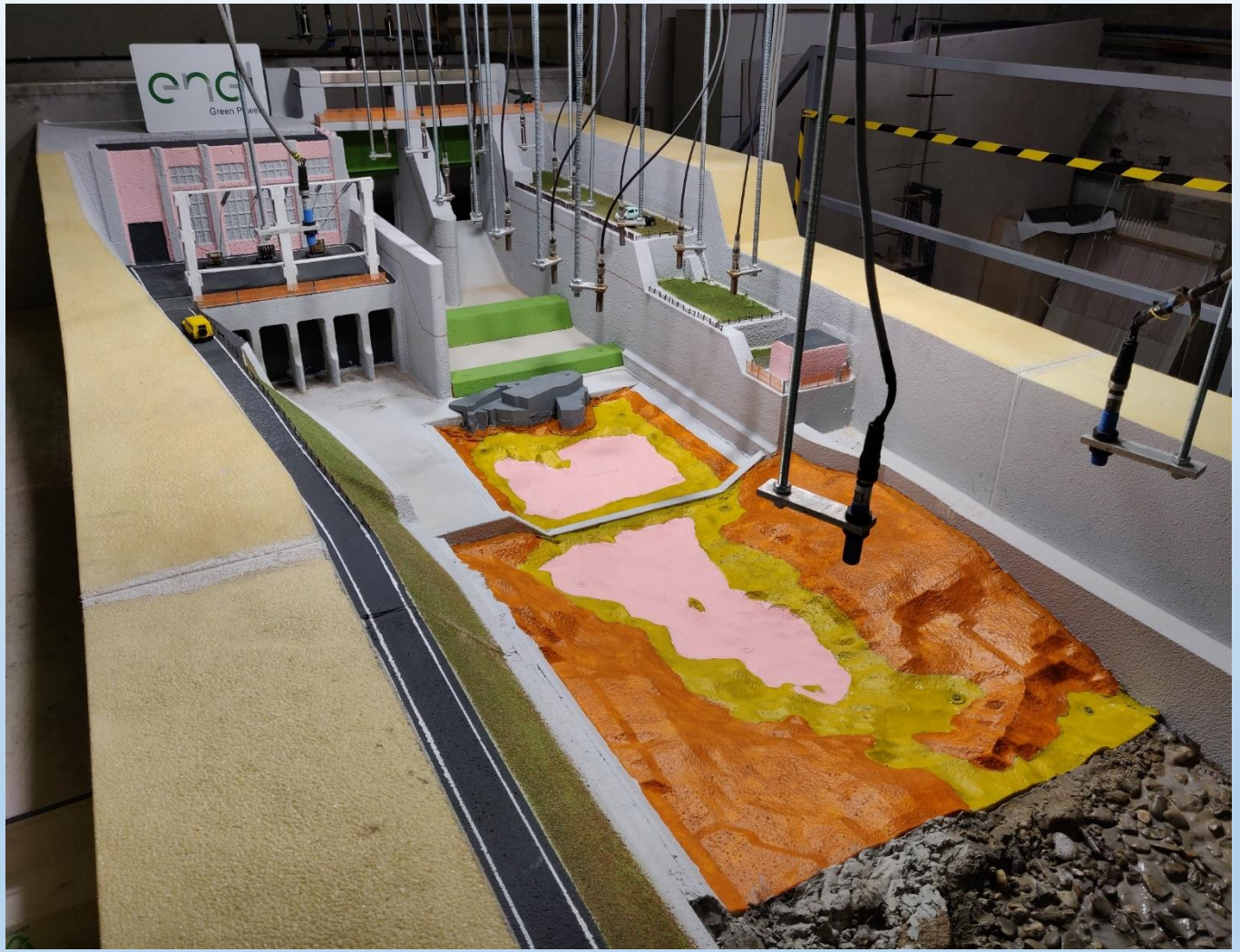
…. nelle fasi di assemblaggio e di connessione ….



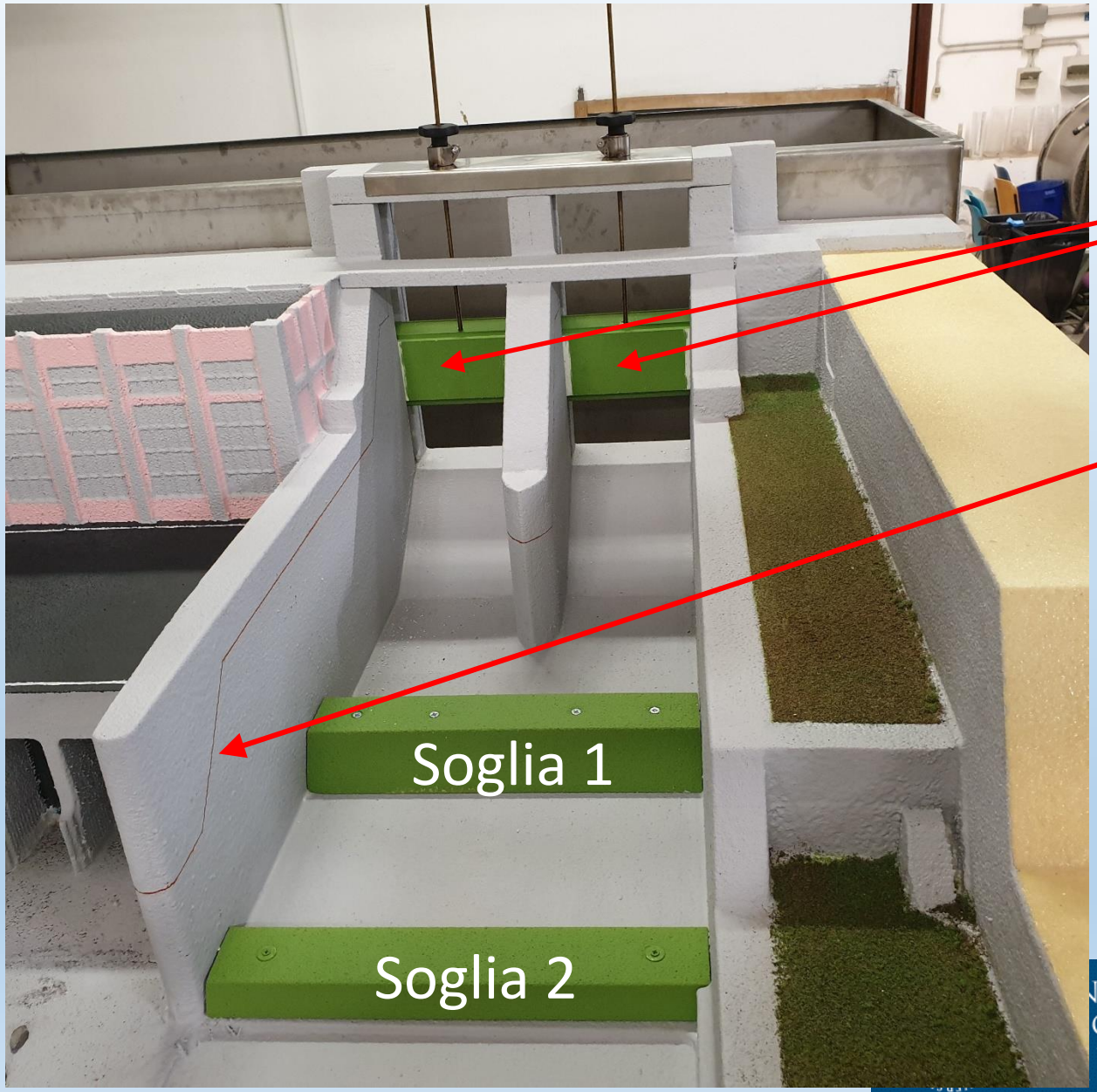


…. con impianti, serbatoi, opere accessorie e strumentazione





Particolare delle opere di scarico e di dissipazione



Paratoie

LINEA ROSSA = profilo attuale sommità muri d'ala

il prototipo ….





…. il modello fisico

LEGGI DI SIMILITUDINE E CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEL MODELLO FISICO

La **similitudine geometrica**: si realizza definendo un fattore di scala in base alle esigenze di spazio, di economia e di corretta riproducibilità dei principali fenomeni in studio:

$$\frac{L_m}{L_p} = \boldsymbol{K} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{60}}$$

L_m = dimensione nel modello L_p = dimensione nel prototipo

I fenomeni rilevanti da riprodurre sono rappresentati dalle trasformazioni energetiche (efflusso dalle luci di scarico) e dalle dissipazioni localizzate (risalti idraulici) **similitudine dinamica di Froude**, che si realizza imponendo lo stesso numero di Froude nel prototipo e nel modello:

$$Fr = \left[\frac{V}{\sqrt{gy}}\right]_m = \left[\frac{V}{\sqrt{gy}}\right]_p$$

V = velocità (m/s) g = accelerazione di gravità (m/s^2) y = altezza d'acqua (m)

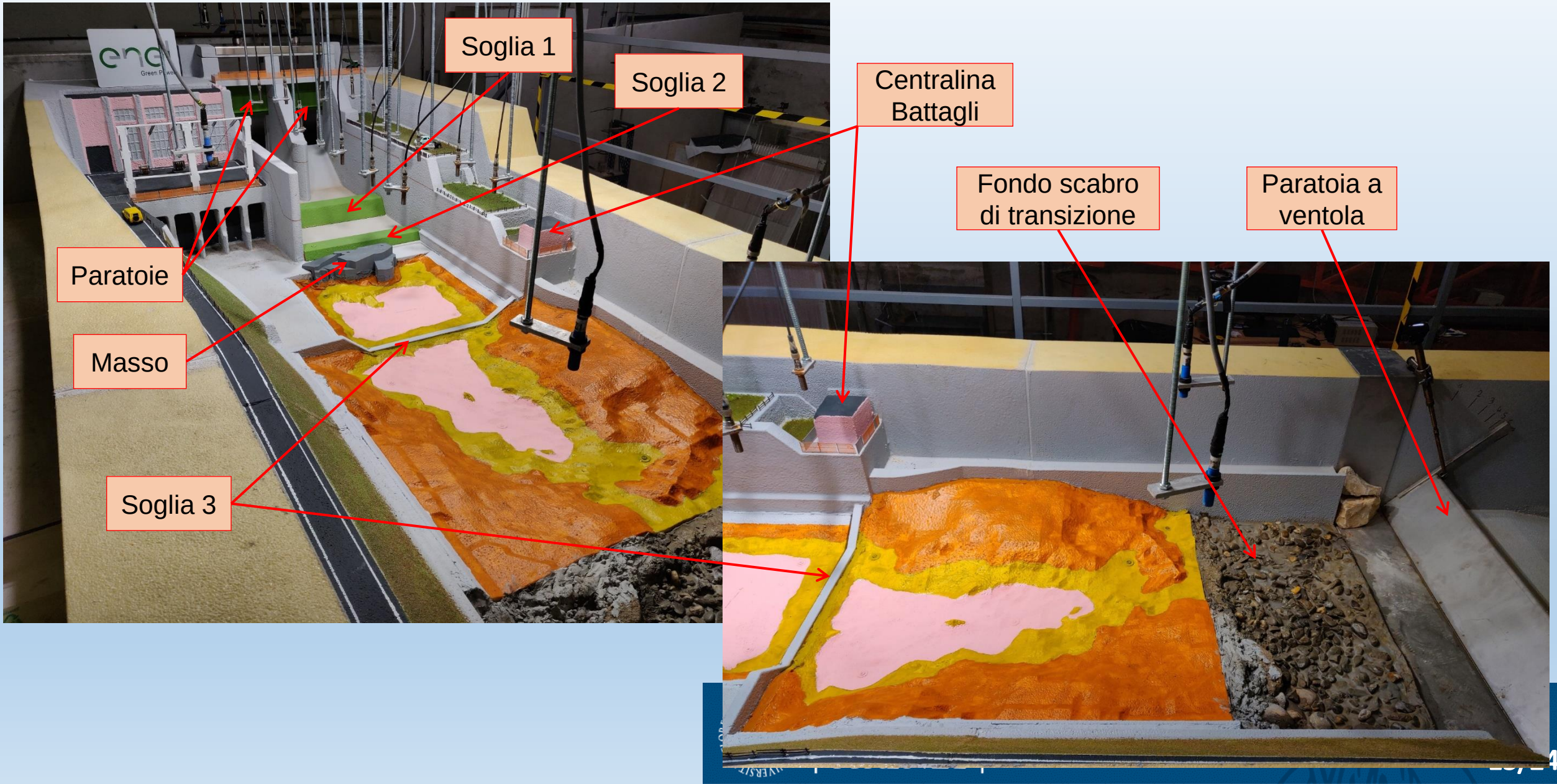
OBIETTIVI DELLA SPERIMENTAZIONE SU MODELLO FISICO

- Determinare i coefficienti di efflusso dalle paratoie ovvero la capacità esitativa degli scarichi individuando l'apertura necessaria per il transito delle portate di riferimento, fermo restando il massimo livello d'invaso di progetto (172 msm);

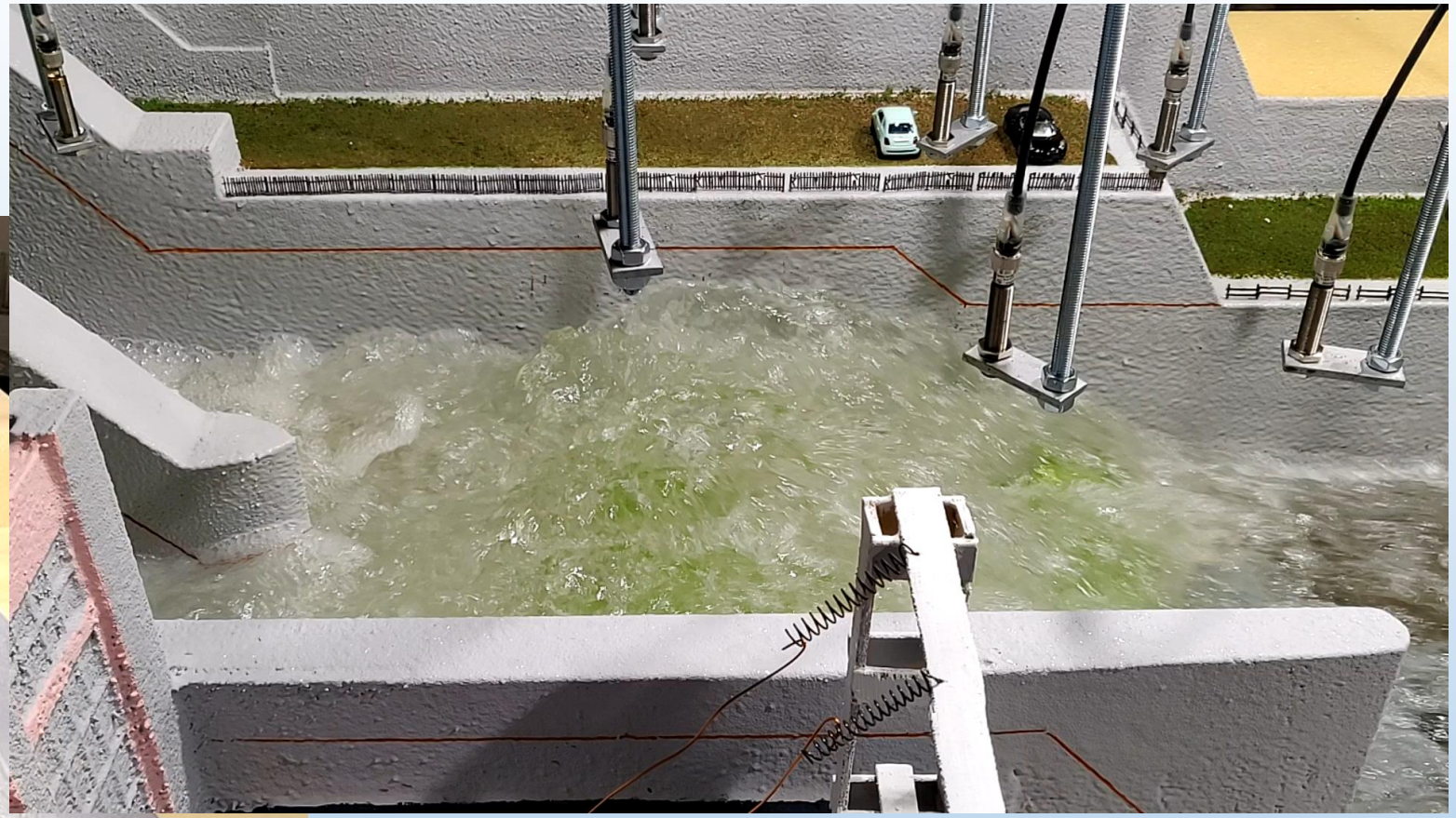
- Verificare l'adeguatezza della vasca di dissipazione (tipologia, lunghezza, altezza muri d'ala) al contenimento della corrente turbolenta;

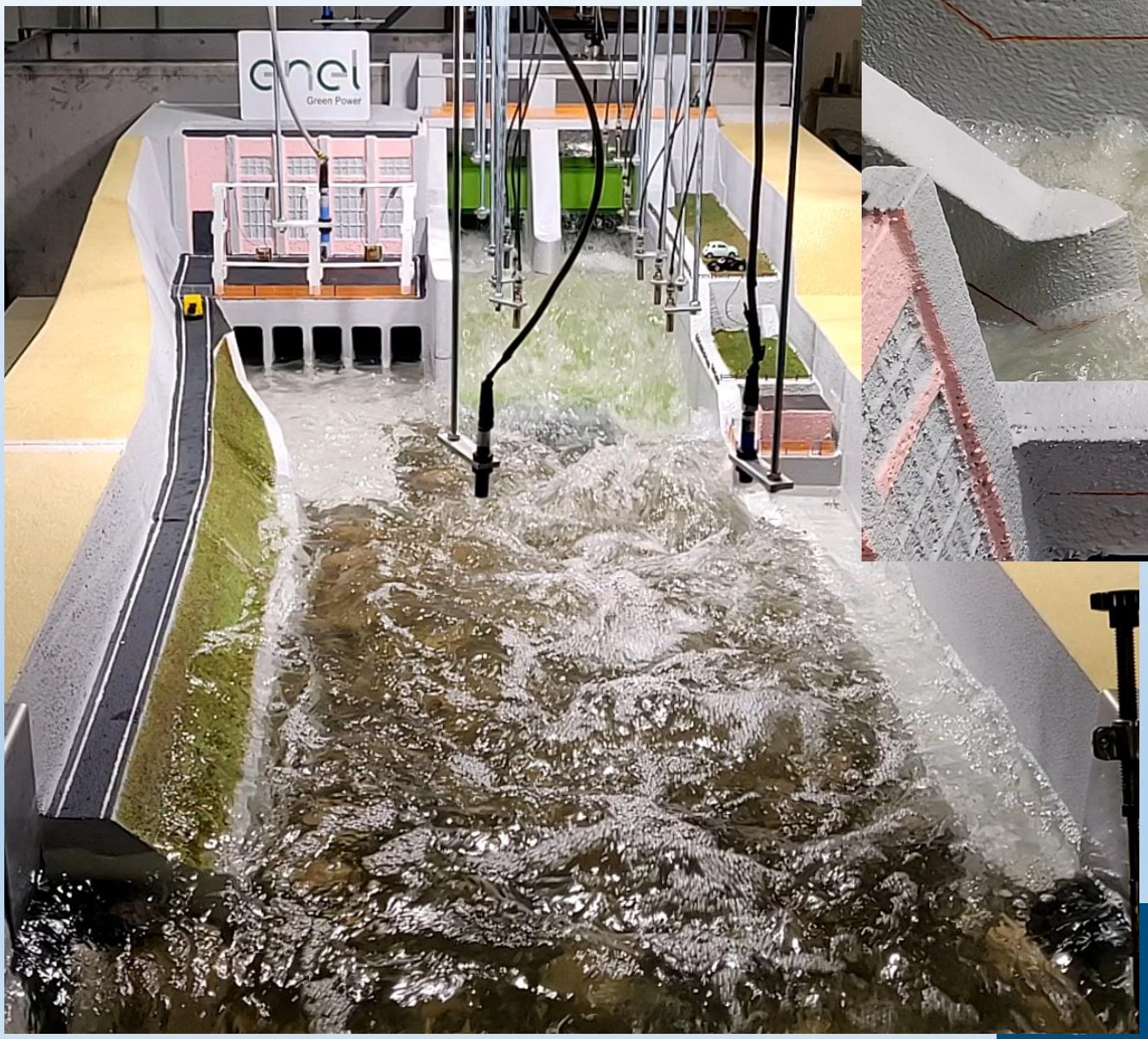
- Individuare l'altezza idrica a valle (necessaria per le verifiche di stabilità del corpo diga e valutare eventuali effetti di rigurgito).

Il modello fisico visto da valle



TEST DI VERIFICA DEL MODELLO FISICO





PROVA A1: Evento 31/10/1992, portata di 1400 m^3/s

PROVA A1 - VERIFICA CON EVENTO REALE



PROVA A1 - VERIFICA CON EVENTO REALE

DATI PROTOTIPO

Q = 1400 m^3/s

Apertura paratoie = 5.70 m

Livello invaso = 167.3 msm

Max livello vasca dissip. =157.0 msm

DATI MODELLO

Q = 1400 m^3/s

Apertura paratoie = 5.70 m

Livello invaso = 167.3 msm

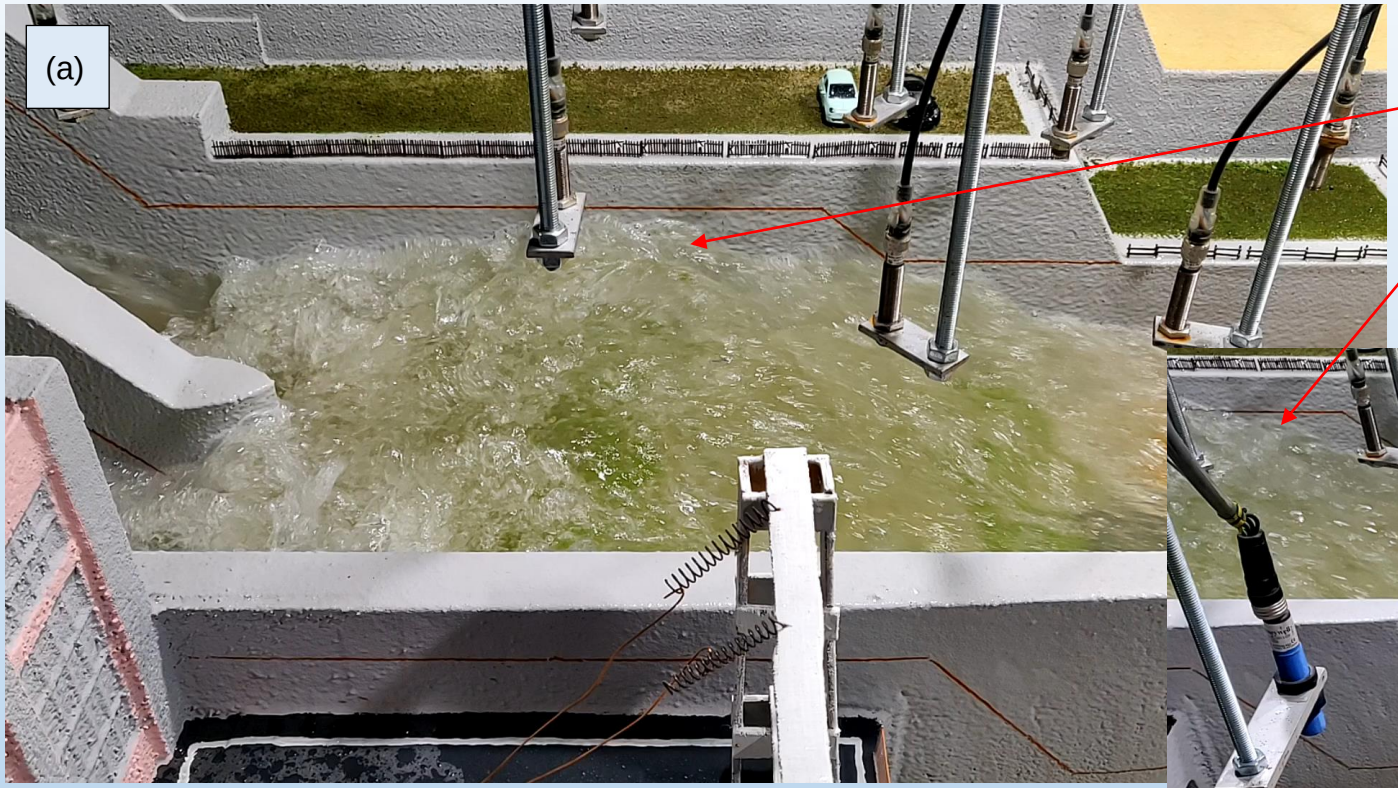
Max livello vasca dissip. =157.5 msm

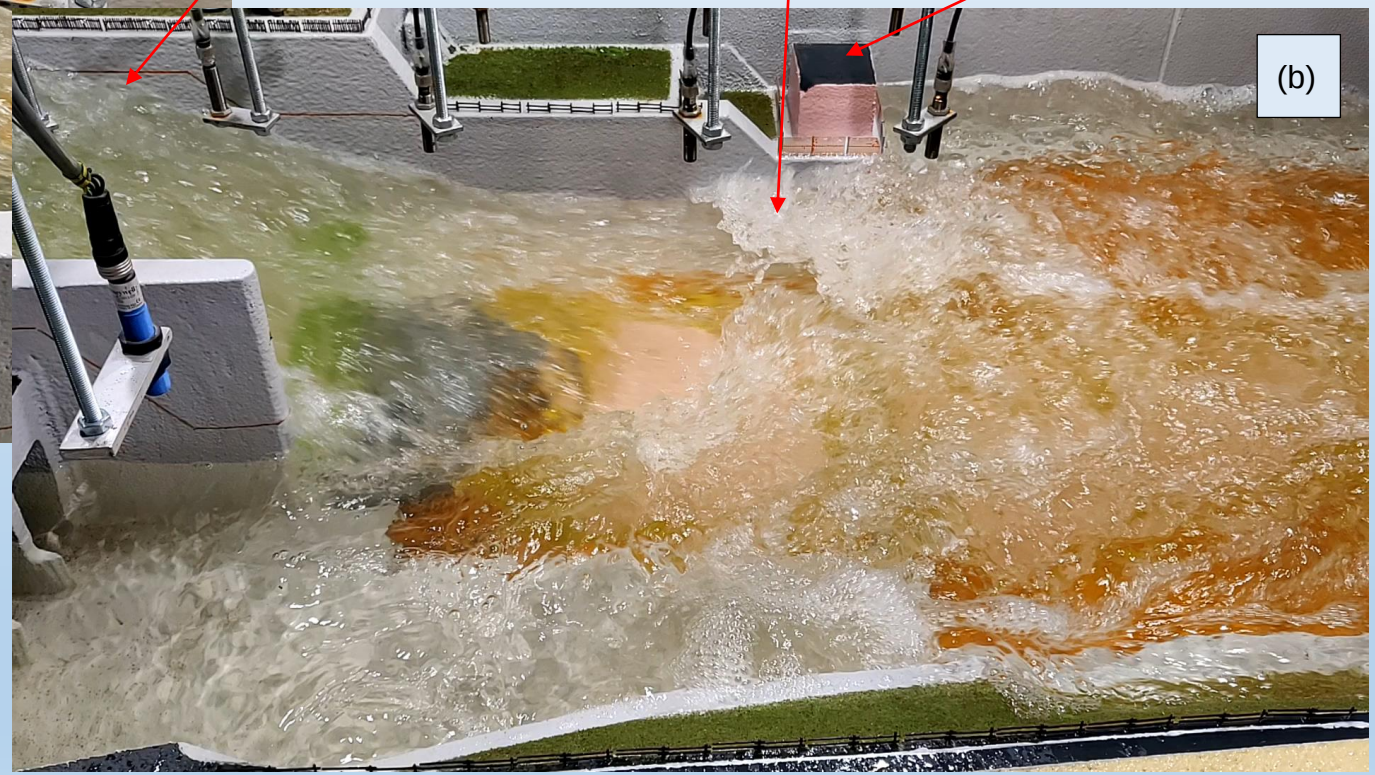


Fermo immagine tratto dal video Enel relativo all'evento 31/10/1992

PROVE SPERIMENTALI NELLO STATO ATTUALE

PROVA A3: CAPACITA' SCARICHI E VASCA DI DISSIPAZIONE

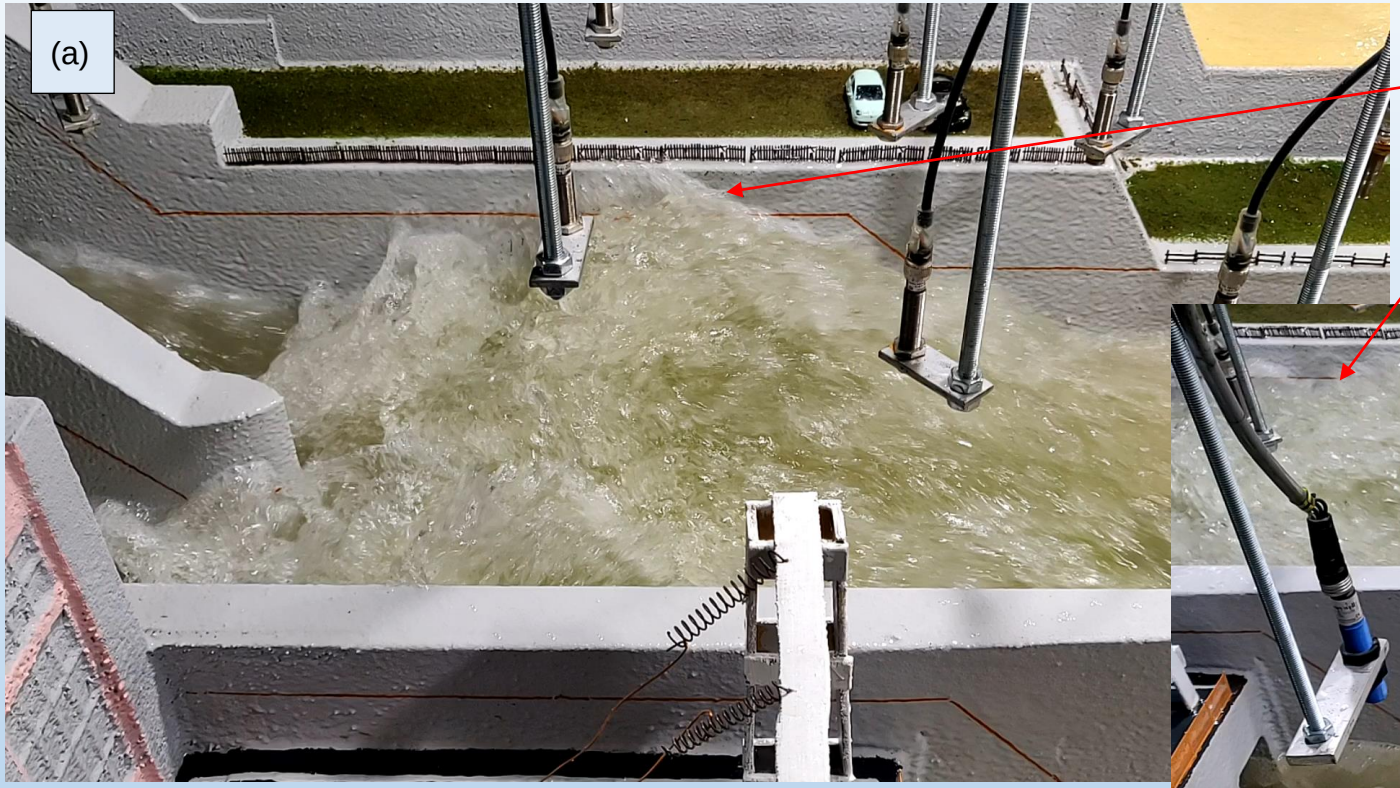




- Portata esitata con massima apertura paratoie di 11.83 m e massimo livello d'invaso di 167.5 msm, **Q=2583 m^3/s** (lo stesso risultato, Q=2610 m^3/s, è stato ottenuto con il modello 1955)
- Si osserva la presenza del **risalto principale contenuto all'interno della vasca di dissipazione** (a), seguito da un **secondo risalto a valle della soglia 2** (b)

PROVE SPERIMENTALI NELLO STATO DI PROGETTO

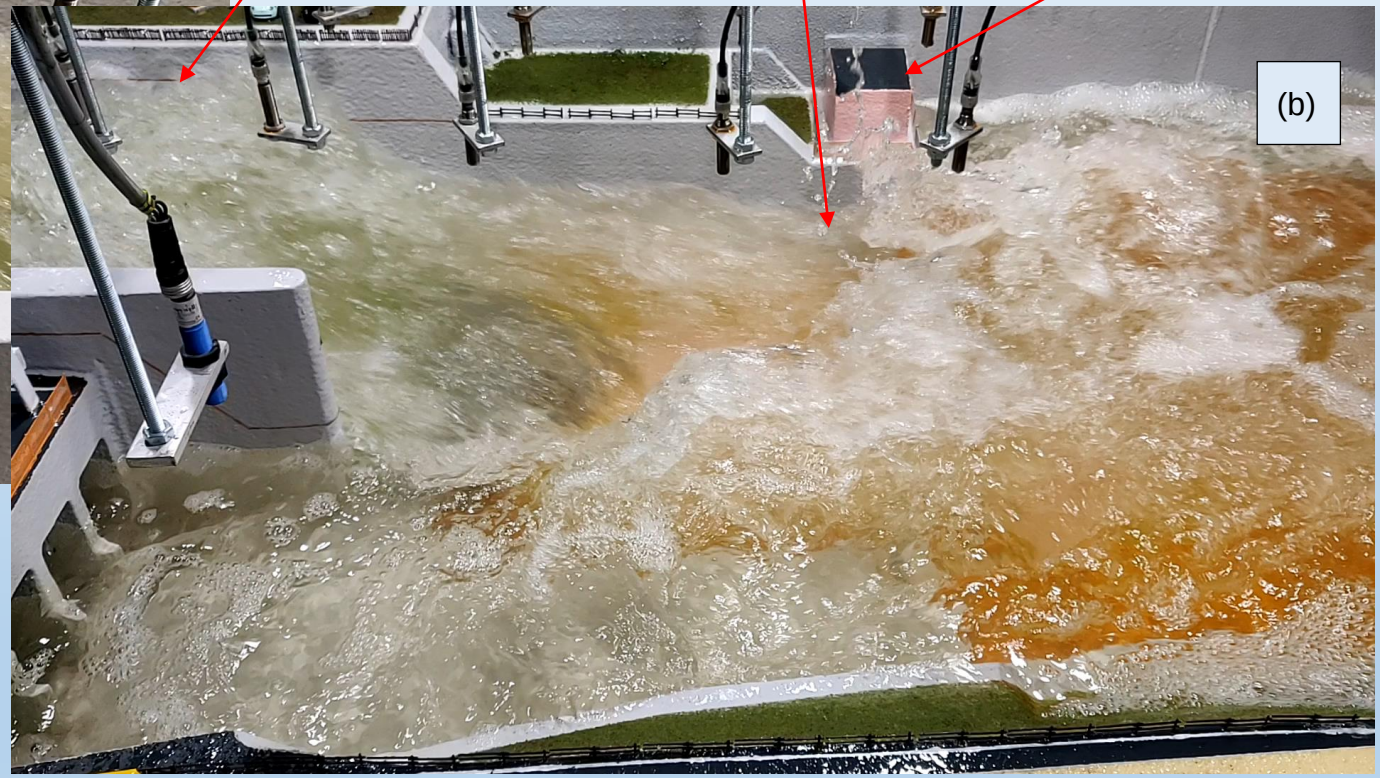
PROVA P1: VERIFICA Q=2964 m^3/s



Risalto principale

Secondo risalto

Centralina Battagli



- Adeguatezza delle luci di scarico in grado di esitare la portata di 2964 m^3/s con quota di invaso a 172 msm e apertura delle paratoie di 10.60 m;
- Adeguatezza dei muri d'ala per il contenimento del risalto principale (a);
- Presenza di un secondo risalto idraulico che appare non estendersi oltre la Centralina Battagli (b) analogamente a quanto già sperimentato nei test di verifica (A) per portate nettamente inferiori.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

CONCLUSIONI

- ✓ Correttezza degli attuali coefficienti di efflusso degli scarichi, e utilizzati nel progetto, in grado di esitare fino a 3235 m^3/s con livello invaso 172 msm e apertura max delle paratoie pari a 11.83 m.

- ✓ Nello stato attuale e nello stato di progetto, contenimento dei fenomeni dissipativi che si manifestano, nel campo delle portate simulate tra 1400 m^3/s e 3300 m^3/s, con caratteristiche sempre analoghe: presenza di un risalto principale contenuto in ampiezza e in estensione all'interno della vasca di dissipazione; presenza di un secondo risalto di modesta intensità, tra la soglia 2 e la soglia 3 (Centralina Battagli), quest'ultima posta a circa 100 m dalla diga ovvero a 40 m dalla soglia 2.

- ✓ Nello stato attuale e nello stato di progetto, muri d'ala adeguati in altezza a contenere i deflussi di piena.

- ✓ Assenza di effetti di rigurgito da valle tali da interferire con il deflusso degli scarichi della diga.

LE CONDIZIONI AL CONTORNO

- **A monte**: 2 tra le seguenti condizioni: il livello di invaso, la portata in transito, l'apertura delle paratoie;
- **A valle**: il livello imposto dal Fiume Arno nella sezione di valle del modello fisico.

La condizione di valle è stata determinata mediante simulazioni numeriche del tratto del F. Arno esteso circa 4 km a valle della diga; il modello numerico è stato verificato su dati reali per l'evento di piena del 31 ottobre 1992.
Dai risultati delle simulazioni è stata ricavata la **scala di deflusso** da applicare nella sezione di valle del modello.

LEGGI DI SIMILITUDINE E CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEL MODELLO FISICO

- La validità del modello fisico nel riprodurre i fenomeni osservati nel prototipo, cioè nel sistema reale, si basa sul rispetto delle leggi di similitudine che sono:

- di tipo **geometrico:** ogni dimensione del modello è in rapporto costante con la corrispondente dimensione del prototipo;
- di tipo **cinematico:** in punti corrispondenti, le velocità hanno stessa direzione e verso, e sono in rapporto costante nel modulo;
- di tipo **dinamico:** in punti corrispondenti, le forze hanno stessa direzione e verso. Inoltre, il rapporto tra i moduli di forze agenti nel modello deve avere lo stesso valore del corrispondente rapporto nel prototipo.

- Assicurando la similitudine **geometrica** e **dinamica**, la similitudine **cinematica** è conseguentemente realizzata.

- I fenomeni rilevanti da riprodurre sono rappresentati dalle trasformazioni energetiche (efflusso dalle luci di scarico) e dalle dissipazioni localizzate (risalti idraulici) → **similitudine dinamica di Froude**, *Fr*:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

V = velocità (m/s) g = accelerazione di gravità (m/s^2) y = altezza d'acqua (m)

La **similitudine geometrica**: si realizza definendo un fattore di scala in base alle esigenze di spazio, di economia e di corretta riproducibilità dei principali fenomeni in studio:

$$\frac{L_m}{L_p} = \boldsymbol{K} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{60}}$$

L_m = dimensione nel modello L_p = dimensione nel prototipo

La **similitudine dinamica di Froude**: si realizza imponendo lo stesso numero di Froude nel modello e nel prototipo:

$$\left[\frac{V}{\sqrt{gy}}\right]_m = \left[\frac{V}{\sqrt{gy}}\right]_p$$

poiché g=costante, il **rapporto tra le velocità** risulta:

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{y_m}{y_p}\right)^{1/2} = K^{1/2} = \left(\frac{1}{60}\right)^{1/2} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{7.75}}$$

Il **rapporto tra le portate** risulta: $\frac{V_m}{V_p}\left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 = K^{5/2} = \left(\frac{1}{60}\right)^{5/2} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2.79 \cdot 10^4}}$

Le altre similitudini dinamiche di interesse riguardano:

- la similitudine per le **Forze Viscose,** soddisfatta imponendo lo stesso numero di Reynolds;
- la similitudine per la **Tensione Superficiale**, soddisfatta imponendo lo stesso numero di Weber.

Si dimostra che non è possibile realizzare contemporaneamente la similitudine di Froude e le altre due citate.

Si ovvia a questa carenza del modello rendendo trascurabili le forze viscose e di tensione superficiale che non possono essere “in scala”.

Le forze viscose sono trascurabili per valori del numero di Reynolds > 1000.
Il minimo numero di Reynolds nel modello si ha con Q=300 m^3/s ed è pari a Re=21000.

La **tensione superficiale** ha influenza nell’efflusso a stramazzo con battenti idrici < 3 cm. Il minimo battente idraulico utilizzato nel modello è sempre superiore o uguale a 5 cm.