

Via P. F. Calvi, 9 - 25123 Brescia - ITALIA
Tel. +39-030-3702371 - Fax +39-030-396143 - info@studiofrosio.it
Codice fiscale e Partita IVA 01690560170 - www.studiofrosio.it

STUDIO FROSIO
STUDIO ASSOCIATO DI INGEGNERIA



VIS S.r.l.

Comune di CASTELNUOVO BOCCA D'ADDA

Provincia di LODI

IMPIANTO IDROELETTRICO "BUDRIESSE"

Valutazione di Impatto Ambientale

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione di predimensionamento strutturale

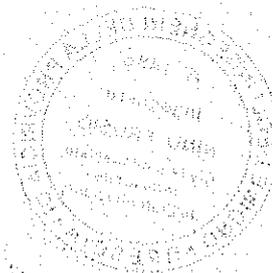


Progettista generale: *dott. ing. Nino Frosio*

Progettista delle strutture: *dott. ing. Giovanni Frosio*

INDICE

1	PREMESSA	3
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI	4
3.1	CALCESTRUZZO	4
3.2	ACCIAIO D'ARMATURA	4
4	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E IDROGEOLOGICA	5
5	VERIFICHE OPERE DI SOSTEGNO	6
5.1	DATI DI BASE	6
5.2	TAPPO DI FONDO	6
5.3	DIAFRAMMI	7
5.4	CONCLUSIONI	7
6	VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE E DEL CARICO SUL TERRENO	8
6.1	DETERMINAZIONE DELLE AZIONI IN ESERCIZIO	8
6.2	VERIFICA ALLO SCIVOLAMENTO	9
6.3	VERIFICA AL RIBALTAMENTO	9
6.4	VERIFICA DEL CARICO SUL TERRENO	9
6.5	CONCLUSIONI	9
7	CALCOLO PRELIMINARE DEGLI EQUIPAGGIAMENTI	10
7.1	GRUPPI DI PRODUZIONE	10
7.2	PARATOIE A VENTOLA DELLO SBARRAMENTO	10
7.3	ALTRI ORGANI IDRAULICI	11
7.3.1	<i>Paratoie di presa</i>	11
7.3.2	<i>Paratoia di scarico</i>	11
7.3.3	<i>Panconi di monte</i>	11
7.3.4	<i>Panconi di valle</i>	12
7.4	SISTEMA DI GRIGLIATURA A PULIZIA AUTOMATICA	12
7.4.1	<i>Griglia e accessori</i>	12
7.4.2	<i>Sgrigliatore a funzionamento automatico</i>	12



1 PREMESSA

La presente relazione illustra il dimensionamento strutturale preliminare delle principali componenti dell'impianto idroelettrico in progetto sul fiume Adda in località Budriesse, nel comune di Castelnuovo Bocca d'Adda (LO).

In particolare sono esposte le verifiche di stabilità agli Stati Limite Ultimi della centrale (blocco turbina-generatore) e delle opere di fondazione e sostegno degli scavi, cioè il tappo di fondo di jet-grouting ed i diaframmi, entrambi a carattere permanente.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il progetto preliminare delle strutture è stato eseguito in accordo alle seguenti norme.

- D.M. delle Infrastrutture e dei Trasporti 14 gennaio 2008 «Nuove norme tecniche per le costruzioni» (NTC)
- D.P.R. 6 giugno 2001 n° 380 «Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia»
- Circolare Infrastrutture e dei trasporti 2 febbraio 2009, n° 617: «Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008»
- Norma UNI EN 206-1:2006 «Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità»

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

3.1 CALCESTRUZZO

Si prevede l'utilizzo di calcestruzzo di classe minima C25/30, caratterizzato dalla seguente resistenza.

- Resistenza caratteristica a compressione

$$f_{ck} = 0,83 \times R_{ck} = 0,83 \times 30 = 24,9 \text{ N/mm}^2$$

- Resistenza di calcolo ultima di compressione

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{0,83 \times R_{ck}}{1,5} = 0,85 \times \frac{0,83 \times 30}{1,5} = 14,1 \text{ N/mm}^2$$

- Resistenza di calcolo ultima di trazione

$$f_{ctd} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} = 0,30 \times 24,9^{2/3} = 2,56 \text{ N/mm}^2$$

- Tensione tangenziale ultima di aderenza delle barre

$$f_{bd} = \frac{f_{bk}}{\gamma_c} = \frac{0,30 \cdot 0,70 \cdot 2,25 \cdot \eta \cdot f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} = \frac{0,30 \cdot 0,70 \cdot 2,25 \cdot 1 \cdot 20^{2/3}}{1,5} = 2,32 \text{ N/mm}^2$$

- Classe di esposizione ambientale

Le condizioni di esposizione ambientale previste per l'opera, secondo la classificazione UNI EN 206-1, sono quelle corrispondenti alle seguenti classi:

XC1: strutture in ambienti interni asciutti con umidità relativa <70%;

XC2: idrauliche o di fondazione permanentemente bagnate

3.2 ACCIAIO D'ARMATURA

Si prevede l'utilizzo di acciaio d'armatura B450C ad aderenza migliorata e conforme al D.M. 14/01/2008, caratterizzato dalla seguente resistenza ultima.

$$f_{sd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = \frac{450}{1,15} = 391 \text{ N/mm}^2$$

Alcune componenti di modesta importanza strutturale, quali parapetti e botole, saranno realizzate con acciaio da costruzione al grado S235, tenendo comunque conto di eventuali indicazioni e proposte dei fornitori.

4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E IDROGEOLOGICA

Sono previste indagini geologiche e geotecniche in vista della progettazione costruttiva dell'impianto; in questa sede sono stati attribuiti ai parametri geotecnici i valori minimi, quindi più cautelativi, all'interno degli intervalli individuati nella *Relazione geologica e geotecnica* del progetto per concessione.

- Tipologia: sabbia, sabbia fine, sabbia limosa poco addensata
- Peso specifico drenato: $\gamma_d =$ 18 kN/m³
- Angolo di resistenza al taglio: $\varphi =$ 27 °
- Coesione: $c =$ 0 kPa

Infine, oltre al monitoraggio di un'ampia rete di piezometri finalizzato alla costruzione di un modello idrogeologico, illustrato nell'apposita *Relazione geologica e geotecnica*, è stato effettuato il monitoraggio, (sempre tramite piezometri) del livello di falda nella zona dove sorgerà la nuova centrale, al fine di ottenere dati diretti sulla durata dei vari livelli e sulla loro correlazione con i livelli del fiume. Ciò che è emerso, in sostanza, è che in golena destra (a valle del Chiavicone) la superficie di falda si trova mediamente a un livello compreso tra quello a monte e valle della briglia esistente; è sulla base di tale monitoraggio che sono state fissate le quote dei piani di lavoro e degli scavi di cui tratta in dettaglio la *Descrizione delle attività di cantiere*.

5 VERIFICHE OPERE DI SOSTEGNO

Come accennato in premessa, preliminarmente alla progettazione strutturale di dettaglio è stata verificata la stabilità delle opere di fondazione e sostegno degli scavi, al fine di accertare l'idoneità e la percorribilità delle soluzioni tecniche prescelte.

5.1 DATI DI BASE

Di seguito si elencano i dati di base delle verifiche in argomento.

γ_w	10	kN/m ³	Peso specifico dell'acqua
γ_t	18	kN/m ³	Peso di volume naturale del terreno
γ_{jet}	20	kN/m ³	Peso di volume del terreno trattato con il jet-grouting
φ_t	27	°	Angolo di resistenza al taglio del terreno
φ_{jet}	36	°	Angolo di resistenza al taglio del terreno trattato
$z_{p.c.}$	32,50	m s.l.m.	Quota del piano campagna circostante l'area di scavo
z_t	32,00	m s.l.m.	Quota del terreno a ridosso dei diaframmi, dove verrà realizzata una rigola, cioè un fossato per lo scolo dell'acqua, profonda 50 cm
z_w	32,00	m s.l.m.	Quota della falda nell'area di scavo
$z_{f.s.}$	25,30	m s.l.m.	Quota del piano di lavoro (fondo scavo)
h_t	incognita	m	Altezza del terreno soprastante il jet-grouting
z_{sup}	$z_{f.s.} - h_t$	m s.l.m.	Quota superiore dello strato di jet-grouting
h_{jet}	incognita	m	Profondità (a partire da z_{sup}) del jet-grouting
h_d	incognita	m	Profondità (a partire da $z_{p.c.}$) dei diaframmi
z_{jet}	$z_{sup} - h_{jet}$	m s.l.m.	Quota di base dello strato di jet-grouting
z_d	$z_{p.c.} - h_d$	m s.l.m.	Quota di base dei diaframmi

5.2 TAPPO DI FONDO

In primo luogo dalle indagini e in generale dalle informazioni geologiche disponibili, che evidenziano la presenza di terreni piuttosto permeabili senza strati coesivi alle quote d'interesse, è emersa la necessità di creare un tamponé che impedisse il sollevamento del fondo scavo prima del getto del basamento di calcestruzzo della centrale.

S'è dunque deciso di realizzare un tappo di fondo di jet-grouting, iniettando dal piano di lavoro a quota 32,50 m s.l.m. una miscela di calcestruzzo ed aria ad alta pressione che disgrega le particelle di terreno e si lega ad esse in modo da creare uno strato di terreno con proprietà meccaniche (essenzialmente peso di volume e angolo d'attrito interno) migliori di quello di partenza.

Per quanto riguarda la conformazione geometrica, rimandando alle tavole grafiche di progetto per i dettagli, si precisa che sono previsti diaframmi intermedi in direzione longitudinale al flusso dell'acqua e che la realizzazione del jet-grouting sarà suddivisa in più fasi, iniettando la miscela cementizia e poi scavando il terreno tra un diaframma e quello adiacente, in modo da suddividere la luce orizzontale soggetta alla sottospinta dell'acqua (risultante delle pressioni interstiziali) e di conseguenza ridurre lo spessore del tappo di fondo necessario.

Un altro accorgimento adottato per ridurre lo spessore è quello di lasciare, tra il getto del basamento di calcestruzzo della centrale e la sommità del jet-grouting, uno spessore $h_t = 4,30$ m di terreno, il cui peso contribuisce a contrastare la sottospinta dell'acqua.

La verifica di stabilità dell'opera è stata effettuata con le seguenti ipotesi semplificative, in favore di sicurezza:

- s'è trascurato sia l'attrito tra i diaframmi e il jet-grouting sia tra essi e il terreno;
- si è assunto il peso di volume $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ del terreno soprastante, che in realtà sarà saturo e quindi avrà un peso maggiore (γ_s)

Le forze agenti (per unità di superficie) sono dunque:

- Peso proprio del tappo di fondo: $W_{jet} = \gamma_{jet} \cdot h_{jet}$
- Peso del terreno che rimane nella zona dei canali di carico e scarico: $W_t = \gamma_t \cdot h_t$

Sottospinta dell'acqua: $U_w = \gamma_w \cdot (z_w - z_{jet})$

Con uno spessore $h_{jet} = 3,50$ m si ottiene dunque:

$$W_t + W_{jet} = 77,4 + 70 = 147,4 \text{ kPa} > 145 \text{ kPa} = U_w.$$

In conclusione il tappo di fondo sarà iniettato in risalita da quota 17,50 m s.l.m. a 21,00 m s.l.m., corrispondente appunto a 4,30 m di ricoprimento di terreno.

5.3 DIAFRAMMI

La stabilità dei diaframmi è assicurata dalla loro infissione nel terreno, fissata l'altezza fuori terra (in fase di realizzazione) pari a $32,50 - 25,30 = 7,20$ m. Nel caso specifico è stato valutato l'insieme diaframma-terreno, come per le verifiche di stabilità dei pendii, implementando il metodo dell'equilibrio limite di Bishop con un software per il calcolo agli elementi finiti. Con un'infissione di 10,30 m, fino a quota 15,00 m s.l.m., cioè con un'altezza totale di 17,50 m dei diaframmi, si è ottenuto un coefficiente di sicurezza minimo di 2,8 per la stabilità globale, applicando i coefficienti parziali prescritti dalle NTC (combinazione A2-M2-R2) per questo tipo di verifica.

5.4 CONCLUSIONI

In definitiva, riassumendo gli esiti delle verifiche testé illustrate, i parametri incogniti elencati all'inizio del presente capitolo assumono i seguenti valori:

h_t	4,30	m	Altezza del terreno soprastante il jet-grouting
z_{sup}	21,00	m s.l.m.	Quota superiore dello strato di jet-grouting.
h_{jet}	3,50	m	Profondità (a partire da $z_{f.s.}$) del jet-grouting
h_d	17,50	m	Profondità (a partire da $z_{p.c.}$) dei diaframmi
z_{jet}	17,50	m s.l.m.	Quota di base dello strato di jet-grouting
z_d	15,00	m s.l.m.	Quota di base dei diaframmi

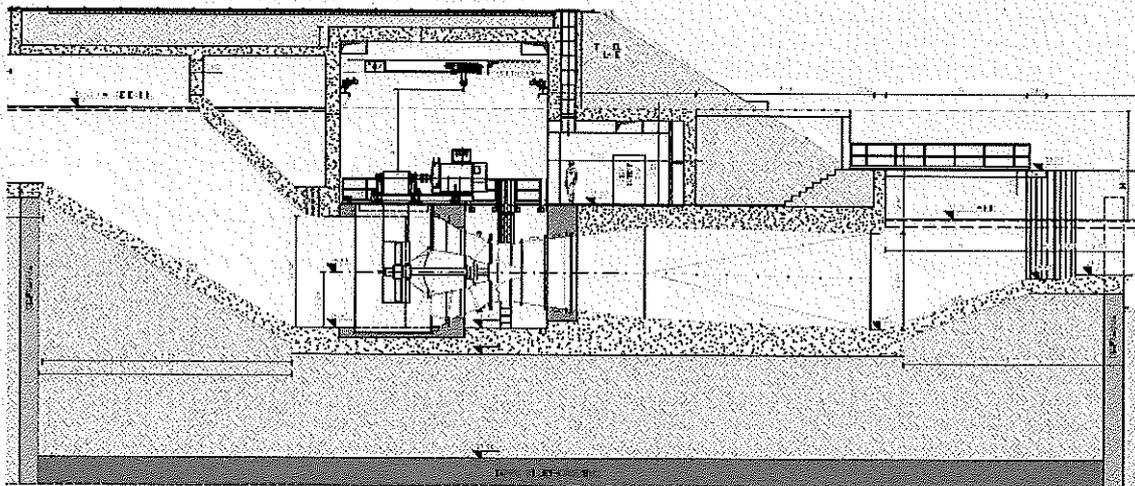
6 VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE E DEL CARICO SUL TERRENO

La configurazione di progetto della centrale è stata verificata agli Stati Limite Ultimi come di seguito illustrato.

6.1 DETERMINAZIONE DELLE AZIONI IN ESERCIZIO

In primo luogo si riportano i valori caratteristici stimati per le forze agenti sull'edificio della centrale. Si precisa che in fase preliminare sono state valutati *ad abundantiam* i carichi relativi alle forniture elettromeccaniche, sulla base dell'esperienza su impianti simili già realizzati, in quanto solo dopo la firma dei contratti i costruttori delle macchine forniranno con precisione le dimensioni, le forze e i relativi punti di applicazione.

▪ Struttura della centrale (solette e muri)	350.000 kN
▪ Carichi portati (gruppi idroelettrici)	1.200 kN
▪ Peso dell'acqua	54.000 kN
▪ Spinta (netta verso valle) dell'acqua	6.500 kN
▪ Peso del terreno soprastante la centrale	22.000 kN
▪ Sovraccarico (4 kN/m ²)	2.250 kN
▪ Componente orizzontale dell'azione sismica ¹	12.500 kN



Sezione longitudinale della centrale

¹ Calcolata con un coefficiente d'intensità sismica orizzontale $k_h = 0,029$ ricavato dalle *Mappe di pericolosità sismica del territorio nazionale* consultabili dal sito Internet dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

6.2 VERIFICA ALLO SCIVOLAMENTO

- Azione orizzontale complessiva (H) 19.000 kN
- Azione verticale complessiva, esclusi i sovraccarichi (N) 427.200 kN
- Azione verticale complessiva, inclusi i sovraccarichi (N') 429.450 kN
- Fattore di sicurezza allo scivolamento ($f=0,50$)

$$F.S. = \frac{N \cdot f}{1,5 \cdot H} \cong 3,75$$

6.3 VERIFICA AL RIBALTAMENTO

- Momento ribaltante (Mr) 114.650 kNm
- Momento equilibrante (Me) 7.914.700 kNm
- Fattore di sicurezza al ribaltamento

$$F.S. = \frac{Me}{1,5 \cdot Mr} \cong 46$$

6.4 VERIFICA DEL CARICO SUL TERRENO

$$\sigma_{t,\max} \cong \frac{1,3 \cdot N'}{B \cdot L} \cong 0,35 \text{ N/mm}^2$$

La pressione media risultante sul terreno è lontana dal valore ammissibile stimato sulla base della valutazione dei terreni effettuata in sito, che ha portato a stimare (applicando la formula di Terzaghi corretta con i fattori di capacità portante, considerando altresì il coefficiente riduttivo 1,25 per l'angolo d'attrito interno del terreno) un carico ammissibile di circa 2 N/mm² alla base del corpo della centrale.

6.5 CONCLUSIONI

Come accennato in premessa del presente capitolo, in fase di progettazione costruttiva, con i dati forniti dai costruttori delle macchine, saranno determinati i valori esatti di tutte le grandezze (dimensioni, forze e punti di applicazione) in gioco.

Ad ogni modo le verifiche preliminari sopra illustrate danno esito positivo con margine di sicurezza sufficientemente ampio.

Inoltre si fa presente che, rispetto alla schematizzazione adottata, la struttura è fondata sui diaframmi che a loro volta racchiudono il tappo di fondo di jet-grouting, pertanto lo scivolamento e il ribaltamento del corpo della centrale sono in pratica impossibili.

7 CALCOLO PRELIMINARE DEGLI EQUIPAGGIAMENTI

L'impianto idroelettrico in argomento è caratterizzato principalmente dagli impianti di seguito descritti.

7.1 GRUPPI DI PRODUZIONE

La progettazione e il calcolo delle apparecchiature elettromeccaniche vengono eseguiti dal costruttore del macchinario, individuato a seguito di gare d'appalto.

Come illustrato nella *Relazione tecnica particolareggiata*, in questa fase s'è ipotizzato di installare quattro gruppi generatori compatti ad asse orizzontale, ciascuno costituito da una turbina Kaplan "pit" (a pozzo) biregolante, con girante da 2.400 mm di diametro, accoppiata tramite cinghia piana a un generatore sincrono trifase; questo tipo di gruppo, all'interno di quelli idonei dal punto di vista tecnico, prevede i maggiori scavi e ingombri delle opere civili. In fase di appalto e trattativa con i fornitori potranno essere scelte altre tipologie, senza che ciò influenzi l'ingombro della centrale; in ogni caso il calcolo e il dimensionamento delle componenti sarà eseguito dal costruttore individuato.

Anche i quadri di bassa e media tensione, di comando e automazione dei gruppi saranno forniti e dimensionati dal costruttore dei gruppi idroelettrici o comunque da ditte ad esso collegate. Gli scriventi progettisti generali dell'impianto hanno fornito ai potenziali costruttori le seguenti informazioni necessarie al dimensionamento e alla scelta della tipologia (e del numero) di macchine

▪ Set-point di regolazione a monte:	35,50 m s.l.m.
▪ Livello minimo a valle:	31,00 m s.l.m.
▪ Livello di massima piena (uguale a monte e a valle):	44,50 m s.l.m.
▪ Portata massima totale:	120 m ³ /s
▪ Portata minima normale:	~40 m ³ /s
▪ Portata minima eccezionale:	~20 m ³ /s
▪ Salto massimo:	~4,40 m
▪ Salto nominale:	3,00 m
▪ Salto minimo:	~2,40 m
▪ Tipologia generatore:	sincrono con un numero di giri $\leq 750 \text{ min}^{-1}$.

7.2 PARATOIE A VENTOLA DELLO SBARRAMENTO

Gli scudi d'acciaio dello sbarramento mobile descritto in dettaglio nella citata *Relazione tecnica particolareggiata* saranno dimensionati dal costruttore in base ai dati di progetto relativi alle quote dell'acqua e in generale alle modalità di funzionamento previste.

▪ Numero campate:	3 uguali
▪ Larghezza d'ogni campata:	42,50 m
▪ Quota d'imposta della parte mobile:	32,50 m s.l.m.
▪ Quota del ciglio della parte mobile:	35,45 m s.l.m.
▪ Altezza parte mobile:	2,95 m
▪ Livello normale di ritenuta:	35,50 m s.l.m.

- Livello d'acqua massimo a paratoia completamente alzata: 35,80 m s.l.m.
- Modalità di funzionamento: livello idrico di *set point* (a monte) 35,50 m s.l.m., mantenuto tramite il graduale abbattimento delle tre ventole all'aumentare della portata.

7.3 ALTRI ORGANI IDRAULICI

Si tratta delle paratoie di presa e di scarico, dei relativi quadri di controllo e dei panconi; tali elementi saranno progettati dai fornitori sulla base delle specifiche e in generale dei requisiti seguenti, stabiliti dagli scriventi progettisti generali dell'impianto idroelettrico. Riguardo ai panconi, in particolare, si precisa che l'adozione dell'identico valore di 5,00 m per le luci di tutte le paratoie consente una considerevole economia di fornitura.

7.3.1 Paratoie di presa

- Numero di elementi uguali: 8
- Tipologia: piane su carrello
- Luce netta: 5,00 m
- Altezza dello scudo: 3,50 m
- Corsa: 3,50 m
- Tenuta: su quattro lati
- Movimentazione: cilindro oleodinamico a semplice effetto
- Carico d'acqua massimo rispetto alla soglia: 5,50 m
- Chiusura: a gravità sotto flusso con velocità dell'acqua di 1,2 m/s
- Apertura: con carico squilibrato di 4,00 m rispetto alla soglia

7.3.2 Paratoia di scarico

- Tipologia: piana su carrello con ventolino superiore
- Luce netta paratoia piana: 5,00 m
- Luce netta del ventolino: 4,00 m
- Altezza totale: 3,50 m
- Corsa paratoia piana: 3,00 m
- Tenuta: su tre lati
- Altezza del ventolino superiore: 0,80 m
- Movimentazione della paratoia piana: vite saliente con motore oleodinamico a lammelle
- Movimentazione del ventolino: cilindro oleodinamico a semplice effetto
- Carico massimo d'acqua rispetto alla soglia: 6,00 m
- Apertura con carico squilibrato rispetto alla soglia: 6,00 m

7.3.3 Panconi di monte

- Numero di elementi uguali: 3
- Luce netta: 5,00 m
- Altezza dello scudo: 1,25 m
- Carico massimo d'acqua di calcolo: 3,80 m

7.3.4 Panconi di valle

▪ Numero di elementi uguali:	3
▪ Luce netta:	3,80 m
▪ Altezza dello scudo:	1,25 m
▪ Carico massimo d'acqua di calcolo:	3,80 m

7.4 SISTEMA DI GRIGLIATURA A PULIZIA AUTOMATICA

Come illustrato nella *Relazione tecnica particolareggiata*, le bocche di presa saranno protette anche da 8 griglie, ciascuna larga 5,00 m e alta 4,00 m, con barre orizzontali, la cui pulizia sarà assicurata da uno sgrigliatore mobile con braccio snodato, azionato da una centralina oleodinamica; questi equipaggiamenti vengono progettati dai costruttori in base ai dati sui livelli idrici, le modalità di funzionamento e le prestazioni richieste dai progettisti generali dell'impianto, come di seguito illustrato.

7.4.1 Griglia e accessori

Griglia ferma detriti con barre orizzontali, dotata di telaio perimetrale di supporto e di paratoia posteriore per la protezione dalla sedimentazione della sabbia. Ogni elemento di griglia sarà estraibile unitamente alla paratoia posteriore. I pannelli saranno inseriti in apposite gargamature perimetrali. Paratoia posteriore realizzata con viti rotanti e non salienti poste all'interno dei gargami di guida, comandata mediante attuatore portatile a scoppio con innesto di sicurezza.

La paratoia in posizione aperta sarà alloggiata sopra il pelo libero, sfruttando anche lo spessore della soletta del manufatto.

Dati caratteristici

Griglia

▪ Numero bocche:	8
▪ Larghezza griglia:	5,40 m
▪ Altezza da fondo al piano di manovra:	4,00 m
▪ Luce libera tra le barre:	40 mm
▪ Dimensionamento delle griglie con acqua a quota 36,50 e intasamento del 50% delle luci libere	

Paratoia posteriore

▪ Numero bocche:	8
▪ Larghezza netta della paratoia:	5,00 m
▪ Altezza paratoia:	1,00 m
▪ Movimentazione:	a vite saliente non rotante

7.4.2 Sgrigliatore a funzionamento automatico

Si tratta d'un macchinario dotato d'un pettine semirostante per la pulizia delle griglie mediante traslazione orizzontale del carro. Deve essere progettato la sommersione della macchina in caso di piena del fiume con quota pari a 44,50 m s.l.m.

- Larghezza pettine: 0,450 m
- Altezza pettine: 4,50 m
- Scartamento delle vie di corsa: 1,79 m
- Lunghezza delle vie di corsa: 48 m

