



---

**CTG**  
Italcementi Group

**Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo**  
**DIGA DI CASSIGLIO**  
**APPESANTIMENTO CORPO DIGA**  
10 – Relazione idraulica integrativa

**Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo**  
**DIGA DI CASSIGLIO**  
**APPESANTIMENTO CORPO DIGA**  
10 – Relazione idraulica integrativa

0. Premessa

1. Profilo di tracimazione della diga

2. Vasca di dissipazione



## 0. Premessa

La diga di Cassiglio, di proprietà della Italcementi S.p.A, fa parte dell'impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, che sfrutta a fine energetico le acque dell'alta valle Brembana.

Nel settembre del 1988, su incarico dell' Italcementi S.p.A., l'Ismes di Bergamo redigeva un rapporto da cui emergeva la necessità, oltre all'esecuzione di una serie di interventi di manutenzione come il rifacimento del sistema drenante, di appesantire il corpo diga.

A seguito della presentazione di un primo progetto di appesantimento (getto di calcestruzzo con inerti baritici sul coronamento), il Servizio Nazionale Dighe (nota n°1335 del 15.04.1993) ha richiesto alcuni chiarimenti ed integrazioni, che sono stati presentati con lettera SICV-i.PEG/peg del 22.10.1993.

In seguito a questa seconda presentazione, l'UCPL ha votato favorevolmente il progetto (voto n°534/94 del 17.11.1994), subordinatamente all'osservanza delle prescrizioni contenute nei considerata, in seguito elencate:

- a. approfondimento dei fori di drenaggio in fondazione sino ad almeno 6 metri
- b. verifica delle caratteristiche del contatto roccia-calcestruzzo
- c. rideterminazione della portata di piena avente lo stesso tempo di ritorno di quella di progetto, basando il calcolo sui dati aggiornati
- d. verifica dello stato di conservazione del paramento di monte

Nel voto si prospettava la possibilità di non effettuare l'appesantimento, considerando nelle verifiche di stabilità le sottopressioni effettive e non quelle teoriche di regolamento: tuttavia l'Italcementi S.p.A., pur avendo ottemperato alle prescrizioni sopra elencate, ha scelto la strada di adeguarsi alle Leggi attualmente vigenti. Ciò ha comportato di fatto il cambiamento radicale del progetto.

Il nuovo progetto di appesantimento consistente nella previsione di un getto massiccio di calcestruzzo sul lato del paramento di monte, è stato presentato in data 24.08.2001 al SND di Roma (DSTN/SND/UPM/2072/01). Il SND di Roma ha poi trasmesso il progetto in data 04. 12.2002 alla IV<sup>a</sup> Sezione del Consiglio dei Lavori Pubblici (SDI/6795/UCCE), che ha risposto con voto 450/2002 in data 14.04.2003. Italgem ha ricevuto in data 05.05.2003 il voto della IV<sup>a</sup> Sezione del Consiglio dei Lavori Pubblici (SDI/2625/UCCE). Nel voto è presente la richiesta di effettuare studi supplementari.

Oggetto della presente relazione sono gli studi supplementari relativi agli aspetti idraulici di seguito elencati:

- √ Studio di un differente raccordo fra nuovo e vecchio getto in corrispondenza della sezione tracimabile;
- √ Verifica della vasca di dissipazione a valle della diga e del profilo di tracimazione della diga

### 1. Profilo di traccimazione della diga

Il profilo attuale, illustrato nel disegno 980-003-725, non appare del tutto idoneo ad assicurare una evacuazione idraulicamente corretta delle portate di sfioro ed in particolare di quella di massima piena, il cui valore è indicato in  $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  nella relazione idrologica del Servizio Idrografico e Mareografico di Parma. La proposta progettuale modifica tale profilo adottando, per buona parte del suo sviluppo, la definizione di Creager-Scimemi e rispettando comunque l'esigenza di contenere le modifiche strutturali al minimo indispensabile. In particolare a valle il profilo proposto si raccorda senza discontinuità a quello previsto nel progetto di base in corrispondenza della quota 620.545 (al disotto di tale quota e sino alla q. 614.00 il profilo resta quello attuale), mentre a monte il nuovo profilo si protende verso l'invaso di una quantità sufficiente a creare un soddisfacente raccordo con la pendenza del ringrosso di appesantimento (v. disegno 980-003-725). Dal punto di vista esecutivo la modifica proposta comporta nella parte a valle del ciglio una modesta scarificazione del profilo esistente tra le quote 620.545 e 626.00 (quest'ultima essendo la quota della cresta dello sfioratore, quota che non viene modificata) e la successiva realizzazione del nuovo profilo tra le stesse quote, mentre a monte del ciglio viene realizzata la nuova cresta arretrata verso l'invaso rispetto a quella originaria ed un piccolo raccordo a profilo circolare (parte integrante del profilo Creager-Scimemi) tra questa ed il nuovo paramento di monte, definito dal previsto ringrosso di appesantimento.

Le tabelle che seguono contengono i dati di tracciamento della sezione verticale del nuovo profilo a valle della cresta (TAB. 1) e la caratteristica "quota d'invaso-portata evacuata" (TAB. 2) realizzata col nuovo profilo; come si noterà, la portata massima evacuata (in corrispondenza del livello di massimo invaso 628.62) è leggermente superiore ai  $177 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , soddisfacendo così per eccesso al valore indicato nella relazione idrologica per la piena millenaria.

A monte della cresta il nuovo profilo consiste in un tratto di circonferenza di raggio  $0.40 \times 2.62 = 1.048 \text{ m}$ , di apertura angolare  $33^\circ$  circa, che va a raccordarsi col paramento di monte del previsto profilo del ringrosso di appesantimento.



**CTG - DCTI - SICV**

x=m	y=m	Quota m.s.m.
0.0	0.000	626.000
0.5	0.062	625.938
1.0	0.217	625.783
1.5	0.451	625.549
2.0	0.757	625.243
2.5	1.132	624.868
3.0	1.571	624.429
3.5	2.074	623.926
4.0	2.637	623.363
4.5	3.260	622.740
5.0	3.941	622.059
5.5	4.679	621.321
5.990	5.455	620.545
(6.0)	(5.472)	(620.528)

Tabella 1: ascisse e ordinate del profilo Creager-Scimemi

La Tabella 1 descrive le ascisse ed ordinate del profilo di Creager-Scimemi a valle del ciglio (in metri a partire dalla cresta del ciglio sfiorante avendo assunto il carico fondamentale  $h_0 = 2.62$  m)

Equazione del profilo :  $y = 0.217499 \cdot x^{1.8}$  (y, x in metri)

[Equazione in termini di variabili adimensionali:  $Y = 0.47 \cdot X^{1.80}$  ( $X = \frac{x}{h_0}$ ,  $Y = \frac{y}{h_0}$ )]

Il nuovo profilo e la traccia verticale della generatrice di monte del nuovo muro d'ala (v. oltre) sono riportati sul disegno n° 980-003-925.

Quota m.s.m.	h = m	$Q = m^3 \cdot s^{-1}$
626.00	0.00	0.000
626.20	0.20	3.743
626.40	0.40	10.586
626.60	0.60	19.448
626.80	0.80	29.942
627.00	1.00	41.845
627.20	1.20	55.007
627.40	1.40	69.316
627.60	1.60	84.688
627.80	1.80	101.054
628.00	2.00	118.356
628.20	2.20	136.546
628.40	2.40	155.582
628.60	2.60	175.430
628.62	2.62	177.456

Tabella 2: Portate sfiorate in funzione della quota

La tabella 2 descrive la portata sfiorante avendo assunto il coefficiente di efflusso  $\mu = 0.47$  indicato da Scimemi per il profilo proposto(1)

Equazione della portata:  $Q = 41.845 \cdot h^{1.5}$  (unità: metri e secondi)

Per quanto riguarda le forme in pianta, appare opportuno prevedere ai lati della luce sfiorante due muri d'ala protesi nell'invaso a monte con tracciamento tale da assicurare un buon avviamento dei filetti fluidi nei piani orizzontali. Il nuovo andamento proposto è sulla copia allegata del disegno n° 980-003-724: la sezione in pianta dei muri d'ala si compone di un arco circolare di raggio  $R = 4.282m$  e di apertura angolare  $\alpha = 42^\circ.636$ , seguito (procedendo verso monte) da un arco circolare di raggio  $r = 1.250m$  e di apertura angolare  $\beta = 137^\circ.364$  (2); a questo profilo si appoggiano le generatrici verticali che vanno a definire la superficie laterale dei muri d'ala, il cui filo estremo a monte si protende nell'invaso per  $1.250m$  più a monte rispetto al vecchio tracciato. La superficie cilindrica definita da codeste generatrici verticali prosegue verso il basso sino ad intersecare il piano

<sup>1</sup> E' noto che il coefficiente in questione assume valori leggermente inferiori a quello qui assunto per carichi inferiori a quello fondamentale, e valori leggermente superiori per carichi sulla soglia maggiori del carico fondamentale (in questo caso  $2.62 m$ ); di ciò non si è tenuto conto nella tabella, in quanto ciò che interessa è il valore della portata evacuata per carico sulla soglia uguale al carico fondamentale, valore che per quanto detto viene valutato esattamente.

<sup>2</sup> E' infatti opportuno che dall'invaso a monte i filetti vengano avviati (in pianta) verso l'apertura dello sfioratore con curvature inizialmente accentuate (raggi di curvatura piccoli) e successivamente con curvature più dolci (raggi di curvatura maggiori) per assicurare una transizione graduale all'andamento parallelo (in pianta: curvatura nulla, raggio di curvatura infinito) una volta imboccata la sezione di colmo dello sfioratore.

inclinato del paramento di monte della muratura di appesantimento, mentre verso l'alto potrà essere terminata contro un piano orizzontale da situarsi a quota opportuna e comunque non inferiore alla quota di massimo invaso aumentata di un congruo franco.

## 2. Vasca di dissipazione

Al termine di valle dello sfioratore la vena effluisce ad alta velocità, pari in prima approssimazione alla velocità torricelliana

$$v_1 \cong \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \approx 18.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

valore che subisce solo piccole variazioni al variare della portata evacuata.

Ad evitare erosioni di tale corrente veloce sul fondo dell'alveo ed i conseguenti rischi di scalzamento del piede di valle della diga, la vasca di dissipazione che segue il profilo sfiorante deve soddisfare a criteri di adeguata profondità e lunghezza. Tali caratteristiche possono essere valutate ricorrendo alla teoria del risalto idraulico (salto di Bidone), nei termini qui di seguito espressi.

Per la portata di massima piena  $Q = 177.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  la portata unitaria per metro lineare di

$$q = \frac{177.5}{14} = 12.679 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

larghezza al termine della vasca vale

La profondità della corrente in arrivo da monte alla vasca di dissipazione è quindi:

$$h_1 \approx \frac{12.679}{18.62} \cong 0.681 \text{ m}$$

La profondità della corrente a valle del risalto idraulico che porta il deflusso da veloce a lento è valutabile a mezzo del teorema delle quantità di moto (v. PUPPINI, Idraulica, Zanichelli 1947, cap. XIV) che conduce alla nota formula:

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + 2 \cdot \frac{v_1^2}{g} \cdot h_1} \cong 6.606 \text{ m}$$

nel caso in esame,

valore sostanzialmente confermato anche dalla equivalente formula di MARZOLO (Costruzioni Idrauliche, Cedam, 1948) che assegna la profondità della platea della vasca al disotto del pelo liquido a valle del risalto:

$$h_2 = 0.45 \cdot \left( \frac{q}{\sqrt{h_1}} - 1.1 \cdot h_1 \right) \cong 6.579 \text{ m}$$

nel caso in esame.

Nel seguito si assumerà il valor medio dei due precedenti:

$$h_2 = \frac{6.606 + 6.579}{2} = 6.593$$

La lunghezza da assegnare alla vasca affinché il risalto vi sia interamente contenuto (e con esso la turbolenza associata) vale circa, sempre secondo MARZOLO e purché sia rispettata la condizione precedente:

$$L \approx 2 \cdot h_{\max} + \frac{H_D}{8} \approx 5.24 + \frac{16 + h_2}{8} = 8.064m$$

essendo  $h_{\max} = 2.62$  il carico massimo sul ciglio dello sfioratore e  $H_D$  l'altezza della diga sulla platea.

Quanto sopra prescinde dalla probabile aerazione della vena trascinata nel suo tragitto lungo la superficie dello sfioratore e nella vasca stessa, fattore che dovrebbe favorire le perdite energetiche; pertanto è da ritenersi che le dimensioni così ricavate siano cautelative.

A valle della vasca viene predisposta una soglia calata ad una quota tale da accompagnare la portata uscente nell'alveo del fiume senza che il passaggio dalla vasca alla corrente defluente nell'alveo comporti eccessive accelerazioni.

Per determinare sia tale quota, sia la quota da assegnare al fondo della vasca sarebbe invero necessario conoscere la scala di deflusso del fiume a valle della diga, ma anche qualora tale scala fosse nota da misurazioni idrografiche essa ovviamente non si estenderebbe sino a coprire il valore della portata millenaria; è giocoforza pertanto rifarsi a valutazioni non basate sull'extrapolazione di valori empirici noti, bensì su leggi idrauliche di riconosciuta validità, per esempio alla valutazione delle condizioni di un ipotetico moto uniforme nell'alveo, alveo di cui sarebbe comunque necessario conoscere la quota del fondo, l'area ed il perimetro delle sezioni bagnate in funzione della quota, la pendenza di fondo e la scabrezza idraulica (3).

Il raccordo a profilo circolare tra la parte a profilo rettilineo del paramento di valle e la vasca di dissipazione viene modificato verso il basso a partire da q. 614.00 aumentando il raggio del cerchio da 9.00 m circa a 12.00 m (il centro del nuovo profilo circolare, indicato con C sul disegno 780-003-725, si situa a q. 620.222 e dista in orizzontale 10.20 m circa dal punto di transizione tra profilo rettilineo e profilo circolare del paramento di valle dello sfioratore); con questa modifica la parte piana del fondo della vasca di dissipazione, orizzontale e tangente al nuovo raccordo circolare, si porta a q. 608.222 circa. Il pelo libero della corrente a valle del risalto si situa allora a q. 614.82 circa (cosa che necessita l'innalzamento del filo superiore dei muri d'ala sino almeno a q. 615 e l'adeguamento della loro sezione trasversale per renderli atti a sopportare la spinta idrostatica), la soglia del gradino da innalzare al termine della vasca va a q. 611.07 circa, arrotondata per eccesso a 611.10 (l'altezza del gradino sul fondo dell'alveo risulta così di poco superiore al metro; il ciglio va profilato con un arco di cerchio di raggio 15 cm circa), e la corrente che stramazza dal gradino acquista una velocità di  $6.5m \cdot s^{-1}$  circa, elevata ma ancora sopportabile 'una tantum' nelle circostanze eccezionali di massima piena. Questa soluzione (v. disegno 780-

<sup>3</sup> La conoscenza di una scala delle portate nell'alveo a valle non sarebbe comunque resa superflua da queste valutazioni di natura teorica, in quanto la sua conoscenza permetterebbe utilmente di verificare il funzionamento della vasca di dissipazione e la transizione dalla vasca all'alveo al passaggio di piene aventi maggior frequenza di accadimento.



003-725 e disegno supplementare allegato) comporta una lunghezza della vasca di dissipazione, a partire dal giunto che la separa dal corpo dello sfioratore, di circa  $8+6 = 14$  m ; costruttivamente comporta una scarificazione della parte terminale dello sfioratore (al disotto di q. 614.00), per una profondità variabile da zero nel punto a q. 614 sino ad un massimo sul giunto di circa 70 cm, la demolizione del fondo attuale della platea ed infine lo scavo e i successivi getti di calcestruzzo per realizzare sia la nuova transizione curvilinea di raggio 12 m, sia il nuovo fondo della vasca a q. 608.222 ed il gradino al termine della vasca stessa (nonché per adeguare la sezione trasversale dei muri d'ala della vasca all'aumentata spinta idrostatica in condizioni di piena millenaria). Alla base del gradino va disposto (a q. 610) un tubo di piccolo diametro (ad esempio 10 – 15 cm , permanentemente aperto in quanto sprovvisto di saracinesche) che colleghi l'interno della vasca al fondo dell'alveo naturale a valle, allo scopo di svuotare almeno parzialmente la vasca una volta passata la piena.

In pianta la larghezza della vasca rimane quella attuale. A valle del gradino terminale è prevista una breve platea in calcestruzzo a protezione del fondo dell'alveo.

Traccia del procedimento seguito:

Profondità critica all'estremo di valle della vasca  $h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \cong 2.50m$  (4)

Carico totale sul ciglio del gradino  $H_f = 1.5 \cdot h_c = 3.75m$

Quota del fondo platea 608.22 (valore nuovo)

Profondità del fondo vasca sotto il fondo alveo  $6.593 - 3.75 = 2.843$  m

Quota del pelo libero a valle del risalto  $608.22 + 6.593 = 614.80$  circa

Quota del ciglio superiore del gradino a valle della platea  $614.80 - 3.75 = 611.10$  circa

Altezza del gradino sul fondo platea:  $611.10 - 608.22 = 2.85$  m circa

Velocità terminale della vena stramazzante  $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (614.85 - 612.65)} \cong 6.50m \cdot s^{-1}$

Sono comunque previste (ed è d'altra parte pratica consueta in questo genere di problemi) prove sperimentali su modello fisico in scala ridotta, prove che potrebbero sia confermare le scelte qui proposte, sia suggerire lievi modifiche migliorative, soprattutto per quanto riguarda la transizione tra vasca di dissipazione ed alveo naturale a valle.

### 3. Opere consultate

F. Contessini, "Dighe e Traverse", Ed. Politecnica, Milano 1953

U. Puppini, "Idraulica", Ed. Zanichelli, Bologna 1947

E. Scimemi, "Compendio di Idraulica", Ed. Cedam, Padova 1955

<sup>4</sup> Tale valore appare anche compatibile con una profondità di moto uniforme in un alveo naturale molto scabro (indice di Gauckler- Strickler circa 20-25) e raggio idraulico pari alla profondità, con pendenza idraulicamente elevata dell'1% circa, in cui defluisca la portata sopra calcolata per unità di larghezza.

Prot.: Lettera trasmissione Cassiglio

Scanzorosciate, 28 aprile 2005

Spettabile  
CTG Italcementi Group  
Direzione Centrale Ingegneria  
Alla c.a. Ing. Alberto Simonato  
Via Camozzi, 124  
24121 Bergamo

**Oggetto** *Diga di Cassiglio: analisi specialistiche per il progetto di appesantimento del corpo diga.*

Con riferimento all'attività in oggetto, in allegato alla presente trasmettiamo n. 1 copia originale dei seguenti documenti:

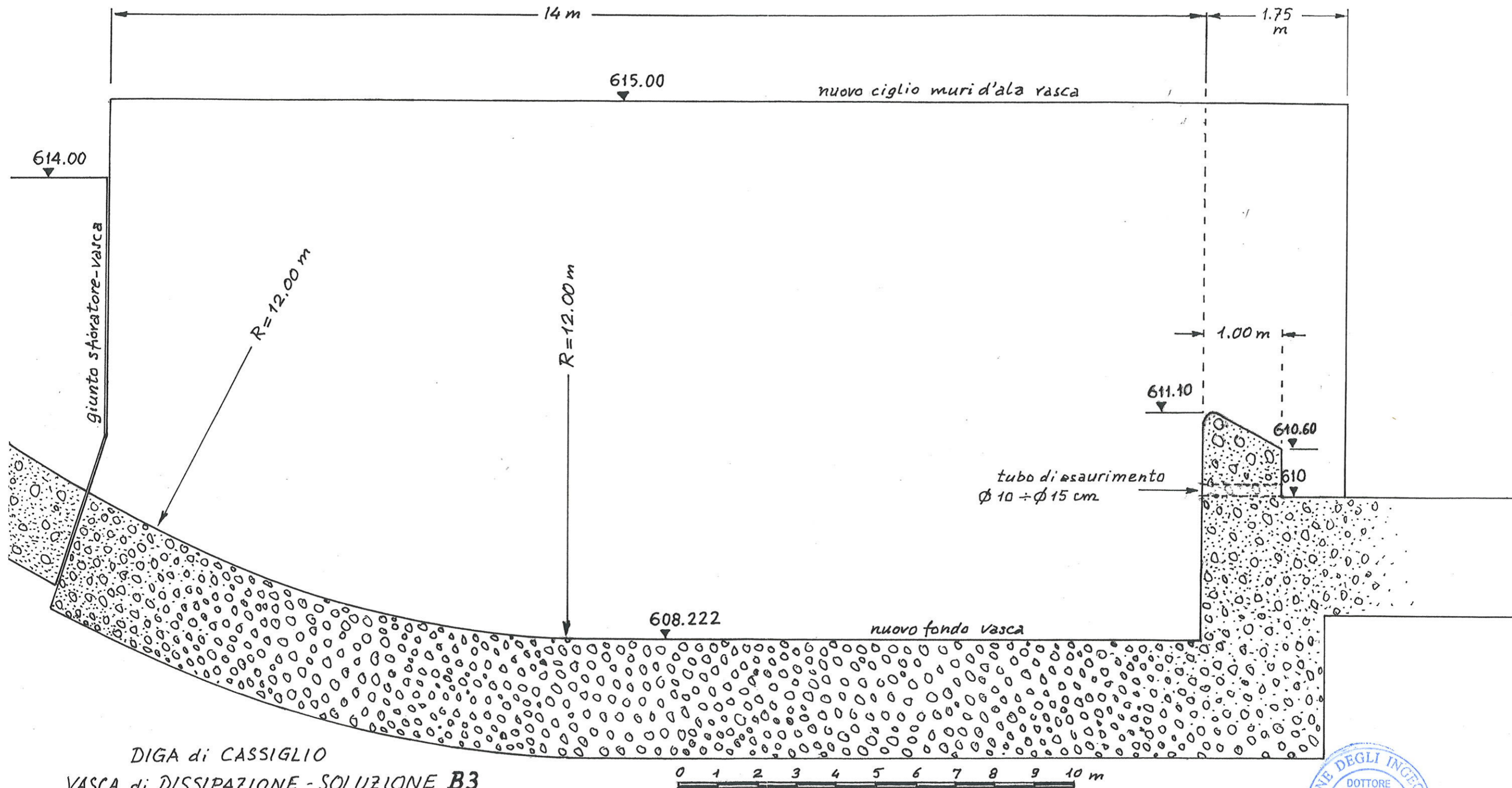
- "Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento corpo diga – Relazione di calcolo”;
- "Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento corpo diga – Relazione idraulica integrativa”;
- N° 2 Tavole grafiche Tav. 1-2 inerenti armatura di collegamento e posizione nuovi dreni/cunicoli per sezione tracimabile e sezione emergente – Scala 1:100;
- N° 3 Tavole grafiche inerenti la vasca di dissipazione, la sezione tracimabile e la planimetria della diga per il corretto dimensionamento degli aspetti idraulici (già in Vostro possesso);

Le due relazioni vengono anche fornite su supporto informatico (CD).

Restando a Vs disposizione per tutti i chiarimenti che dovessero rendersi necessari, è gradita l'occasione per porgere i migliori saluti.

Ing. Aldo Castoldi





DIGA di CASSIGLIO  
 VASCA di DISSIPAZIONE - SOLUZIONE B3  
 SEZIONE LONGITUDINALE - SCALA 1:50

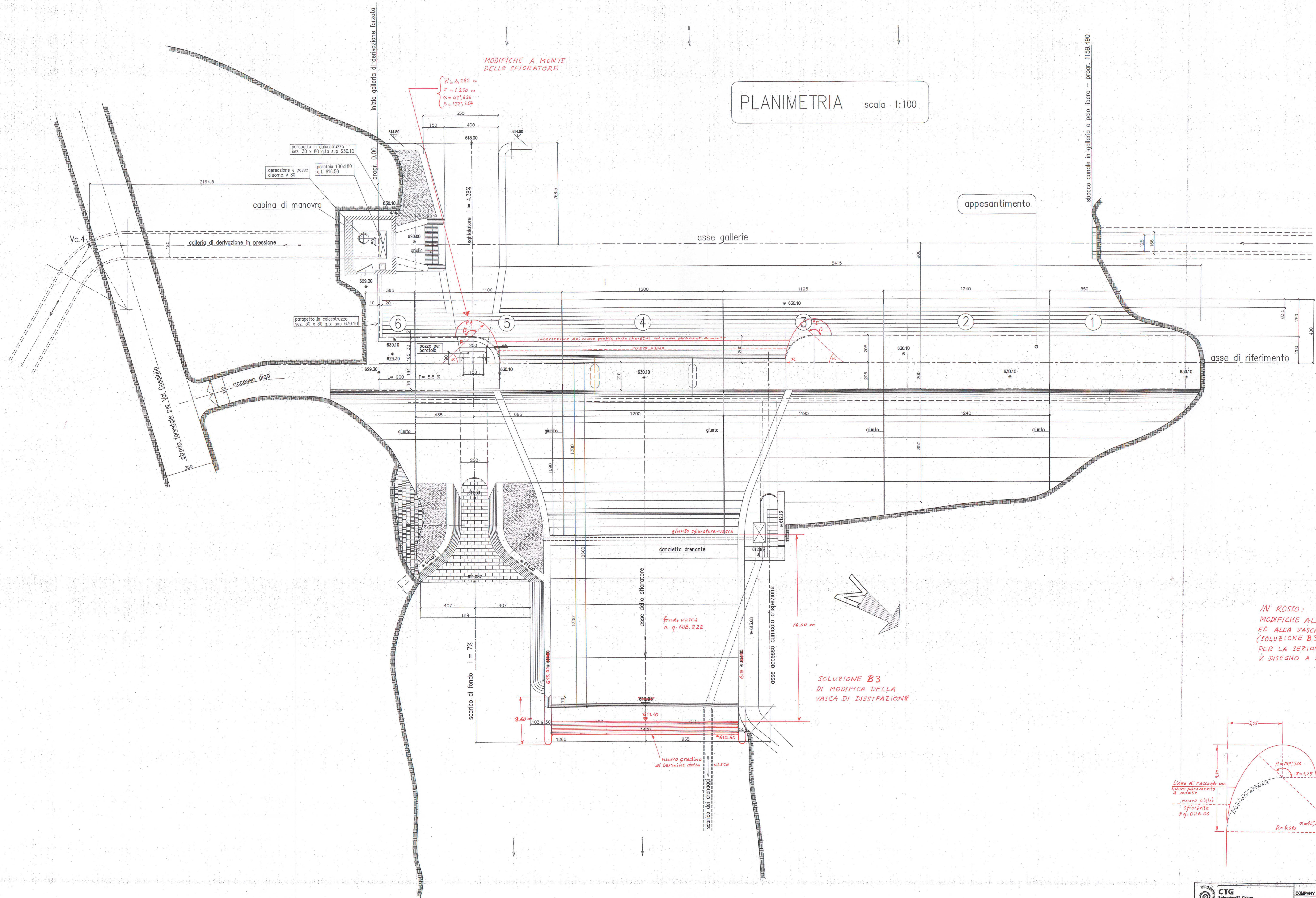
ORDINE DEGLI INGEGNERI  
 DOTTORE INGEGNERE  
 MARCO PEGORARO  
 ALBO N° 1782  
 BERGAMO

DIGA DI CASSIGLIO

VASCA DI DISSIPAZIONE - SOLUZIONE B3

SEZIONE LONGITUDINALE - SCALA 1:50





PLANIMETRIA scala 1:100

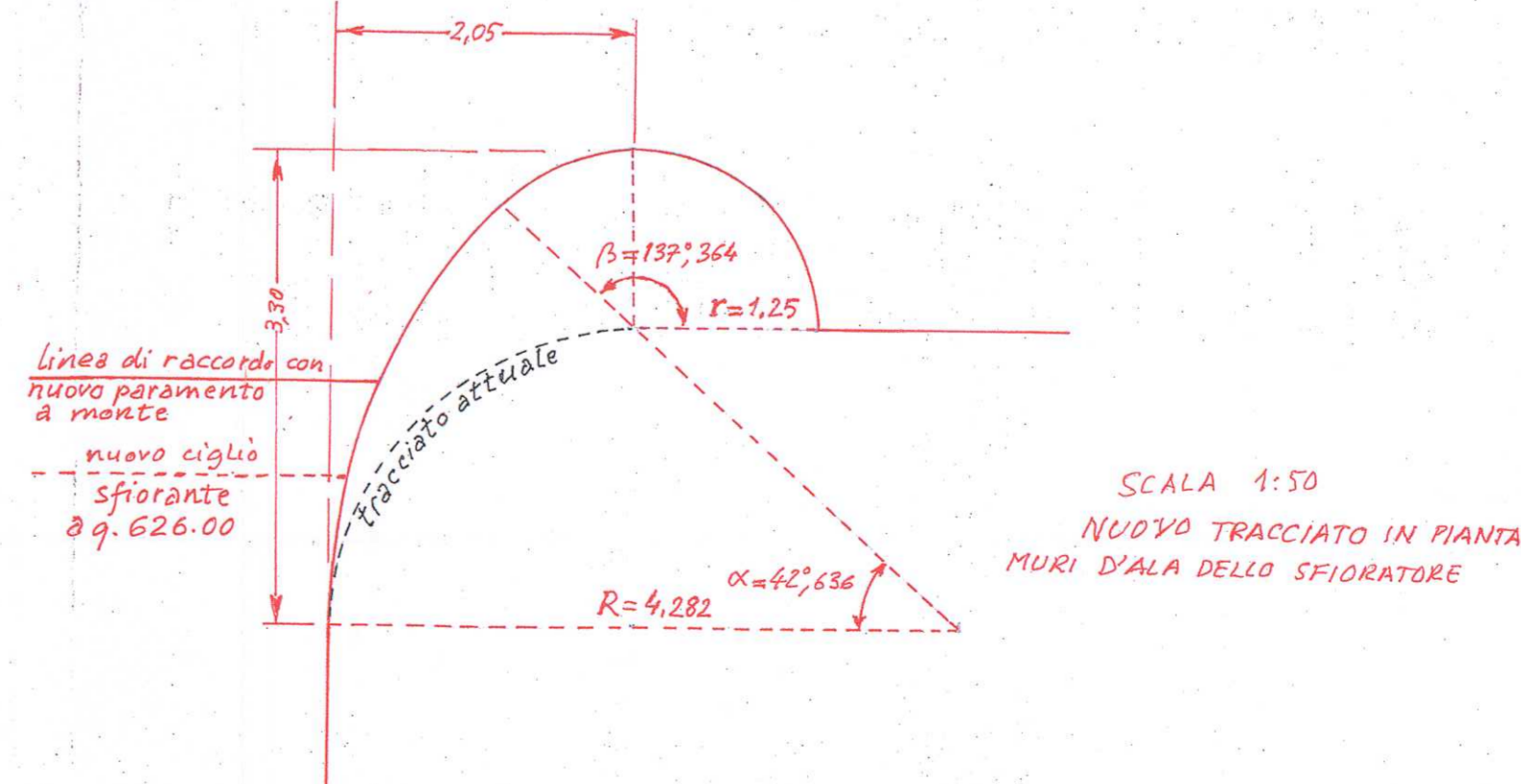
MODIFICHE A MONTE DELLO SFIORATORE

$R = 4.282 \text{ m}$   
 $\gamma = 1.250 \text{ m}$   
 $\alpha = 62.636$   
 $\beta = 139.364$

appesantimento

IN ROSSO:  
 MODIFICHE ALLO SFIORATORE  
 ED ALLA VASCA DI DISSIPAZIONE  
 (SOLUZIONE B3)  
 PER LA SEZIONE LONGITUDINALE  
 V. DISEGNO A PARTE

SOLUZIONE B3  
 DI MODIFICA DELLA  
 VASCA DI DISSIPAZIONE



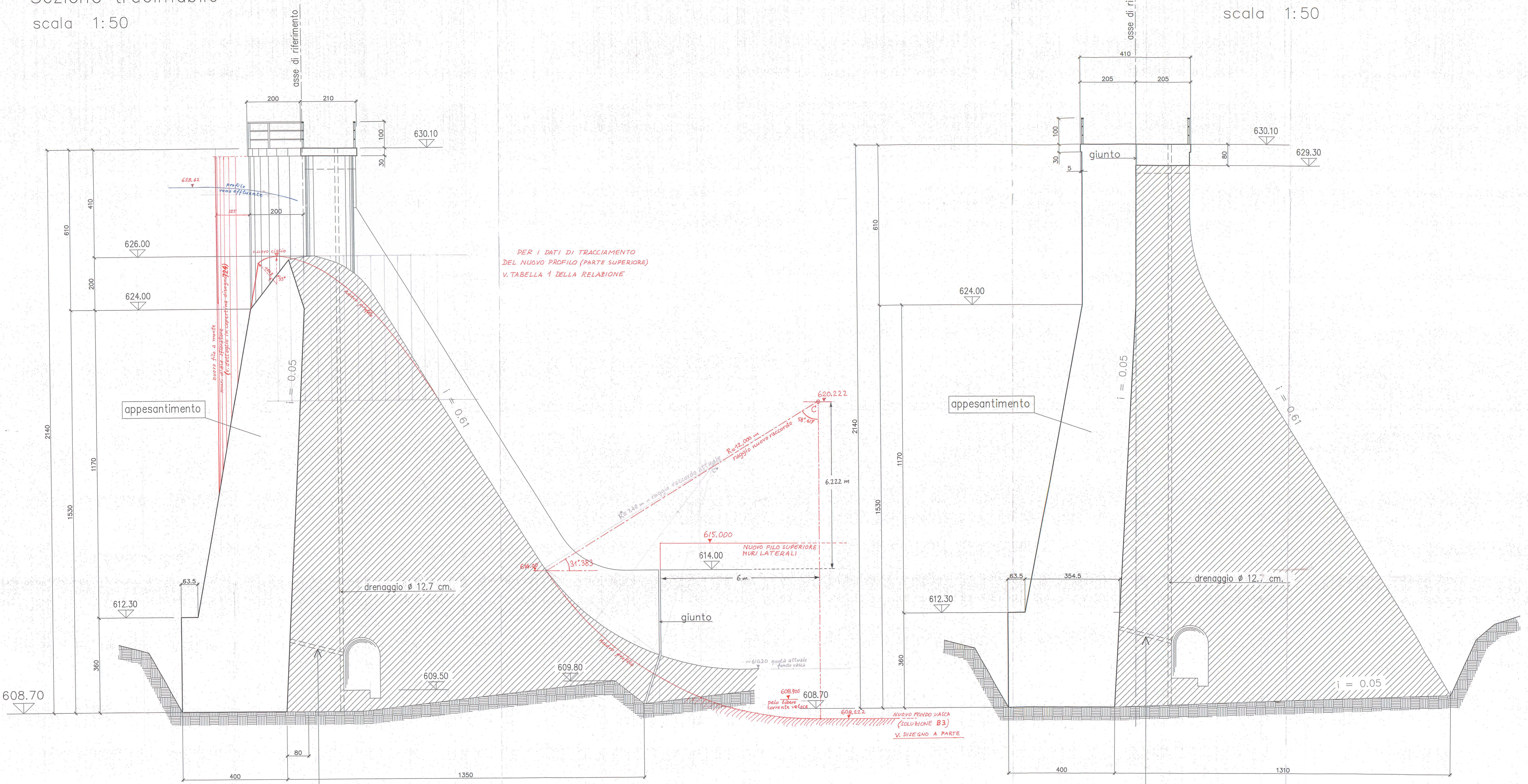
 CTG Italcementi Group Servizio Ingegneria Civile - Bergamo <small>This document is property of CTG SpA and it shall neither be copied nor reproduced nor disclosed to any third party without authorization in writing from CTG SpA.</small>	COMPANY		ITALCEMENTI	
	PLANT		DIGA DI CASSIGLIO	
DEPT.		CENTRALI IDROELETTRICHE		

03	Revisione generale	Capitania	I.Peg.	03.08.2002	APPESANTIMENTO DIGA DI CASSIGLIO			
02	Modifica quota passerella	Chiesa V.	I.Peg.	22.02.2001	PLANIMETRIA 1:100			
01	Fessura per paratoia	Chiesa V.	I.Peg.	25.10.2000	DRAWN UP BY	APP'D BY	DATE	PROJECT CODE
REV	DESCRIPTION	DRAWN UP	APP'D	DATE	Chiesa V.	I. Peg.	04.08.2000	F 980 4 001
					DWG. N.	REV.	SCALE	
					980-003-724	03	1:100	



Sezione tracimabile  
scala 1:50

Sezione emergente  
scala 1:50



PER I DATI DI TRACCIAMENTO  
DEL NUOVO PROFILO (PARTE SUPERIORE)  
V. TABELLA 1 DELLA RELAZIONE

NUOVO FONDO VASCA  
(SOLUZIONE B3)  
V. DISEGNO A PARTE

drenaggio aggiuntivo  $\varnothing$  12.7 cm./ 2.00 mt.

drenaggio aggiuntivo  $\varnothing$  12.7 cm./ 2.00 mt.

NB = per la planimetria vsd. dis. n° 980-003-724/\*

IN ROSSO : MODIFICHE ALLO SFIORATORE  
(SOLUZIONE B3 PER LA PARTE A VALLE)

<p>CTG Hobasit Group Servizio Ingegneria Civile - Bergamo</p>	COMPANY ITALCEMENTI	
	PLANT DIGA DI CASSIGLIO	
<small>This document is property of CTG S.p.A. and it shall neither be copied nor reproduced nor disclosed in any form without authorization in writing from CTG S.p.A.</small>		DEPT. CENTRALI IDROELETTRICHE

REV	DESCRIPTION	DESIGNER	APPD	DATE	PROJECT CODE	DWG. N.	REV.	SCALE
03	Revisione generale	Capitoni	LPeg	03.09.2002	APPESANTIMENTO DIGA DI CASSIGLIO			
02	Modifica quota passerella	Chiesa V.	LPeg	22.02.2001	SEZIONE TRACIMABILE E SEZIONE EMERGENTE - carpenteria			
01	Revisione	Chiesa V.	LPeg	25.10.2000				
		Chiesa V.	LPeg	04.08.2000	F 980 4 001	980-003-725	03	1:50