

# Perù – Hydroelectric Power Plant Cerro del Aguila RCC dam and concrete casting issue

## Perù – Impianto idroelettrico di Cerro del Aguila Diga in RCC e problematiche connesse ai getti in calcestruzzo

S. Bonanni<sup>1</sup>, M. Mancini<sup>2</sup>, G. Rotundo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Responsabile Ingegneria di Sede per Opere Idrauliche*

<sup>2</sup> *Responsabile Comunicazione Tecnica di Progetto di Astaldi Spa*

<sup>3</sup> *Direttore Tecnico di Astaldi Perù*

**ABSTRACT:** The “Proyecto Hidroelectrico Cerro del Aguila” is located at a distance of approximately 270 km from the State capital Lima, in the Junin region, province of Tayacaja, department of Huancavelica.

The dam, constructed on the Mantaro river, is connected to the power house by means of a 5.74 km-long headrace; by the downstream tailrace water can flow back into the river. A tunnel network allows to overcome the problem of an underground power house.

The design of this gravity dam provided for using two kinds of concrete, the conventional vibrated concrete (CVC) and the roller compacted concrete (RCC). The total volume of the dam is of 445,000 m<sup>3</sup> of concrete, divided into 250,000 m<sup>3</sup> of RCC and 195,000 m<sup>3</sup> of CVC. One of the methods adopted to increase the efficiency and effectiveness of concrete castings was using gravity piping for unloading both CVC and RCC concrete directly on the left-hand-side abutment down to the dam's bottom. Since the concrete plant was placed on an area arranged along the slope of the hill towering above the river, it was deemed advisable to erect a pipe network in order to make the concrete flow from above, by gravity, to the dam body, while drawing a particular attention, due to the considerable difference in height (approximately 70 m), to prevent aggregate from segregating.

The figures below show the method implemented, which successfully passed the various tests and controls required by the Works Supervising Engineer and fulfilled all the requirements of the laws and regulations in force.

Moreover, the system allowed to reach a production volume exceeding daily concrete casting volumes originally provided for using only with the "cableway crane" fed by belt conveyors and concrete mixing trucks.

**KEYWORDS:** RCC (Rolled Compacted Concrete); concrete; casting; pipe network

**ABSTRACT:** Il "Progetto Idroelettrico di Cerro del Aguila" si trova ad una distanza di circa 270 km dalla capitale Lima, nella regione di Junin, provincia di Tayacaja, dipartimento di Huancavelica.

La diga costruita sul fiume Mantaro è collegata alla centrale elettrica per mezzo di una galleria di adduzione di 5,74 km; tramite la galleria di restituzione l'acqua ritorna a valle nel fiume. Un sistema di tunnel permette di superare il problema delle sovrappressioni dovute al colpo di ariete.

Il progetto di questa diga a gravità prevede l'utilizzo di due tipi di calcestruzzo, il convenzionale vibrato (CVC) e il rullato compattato (RCC). Il volume totale della diga è di 445.000 m<sup>3</sup> di calcestruzzo, diviso in 250.000 m<sup>3</sup> di RCC e 195.000 m<sup>3</sup> di CVC. Uno dei metodi adottati al fine di aumentare l'efficienza e l'efficacia dei getti di calcestruzzo è stato quello di usare tubazioni per il getto a gravità, sia per CVC che per RCC, dal lato sinistro della diga. Poiché l'impianto di calcestruzzo è stato posto su una superficie disposta lungo il pendio della collina che sovrasta il fiume, si è ritenuto opportuno erigere una rete di condotte in modo da rendere il flusso di calcestruzzo dall'alto, per gravità, sul corpo diga, facendo particolare attenzione, data la notevole differenza di quota (circa 70 m), ad evitare probabili fenomeni di segregazione.

Le figure mostrano il metodo usato, il quale ha superato con successo le varie prove ed i controlli richiesti dalla Direzione Lavori e soddisfatto tutti i requisiti delle Specifiche Tecniche e dei regolamenti vigenti.

Inoltre, il Sistema adottato ha consentito di raggiungere un volume di produzione superiore ai quotidiani volumi di getto di calcestruzzo che originariamente erano previsti con l'utilizzo del solo "blondin" alimentato da nastri trasportatori e autobetoniere.

**KEYWORDS:** RCC (Calcestruzzo Rullato Compattato); calcestruzzo; getto; rete tubazioni

1 GENERALITA' – Centrale Idroelettrica Cerro del Aguila

L'impianto idroelettrico di Cerro del Aguila è ubicato sul Rio Mantaro a circa 270 km da Lima, capitale del Perù. L'impianto è ubicato tra le quote

1600 m e 1200 m in una zona molto acclive e non collegata con strade esistenti al momento dell'inizio dei lavori.

L'area è localizzata nella Cordillera Oriental delle Ande del Perù centrale sulla linea divisoria Amazzonica.

La portata di progetto dell'impianto è di 210,5 m<sup>3</sup>/s e la potenza nominale è di 504 MW. L'impianto è provvisto di 3 turbine "Tipo Francis" da 170 MW ciascuna, più una mini-centrale al piede diga di 10 MW che turbinata le portate ecologiche rilasciate in alveo, dotata di 2 turbine "Tipo Francis" di 5 MW ciascuna.

La diga è del tipo a gravità in calcestruzzo CVC e RCC, leggermente ad arco, di 88 m di altezza e 270 m di lunghezza al coronamento; provvista di sfioratore nella parte centrale, equipaggiato con n. 4 paratoie "tipo radiali" 12\*12 m e due paratoie "tipo flap" di 12\*5 m. La portata sfiorante massima è di 7000 m<sup>3</sup>/s.

Gli scarichi di fondo sono costituiti da 6 canne equipaggiate ciascuna da due paratoie piane, una di sicurezza per le manutenzioni e l'altra per le normali operazioni. La portata massima transitabile è di 5000 m<sup>3</sup>/s. Quindi la portata massima scaricabile dalla diga raggiunge i 12.000 m<sup>3</sup>/s.

Dall'opera di presa subito a monte della diga parte la galleria di adduzione lunga circa 5,7 km che convoglia la portata fino alla centrale in caverna. La sezione della galleria di adduzione è di 96 m<sup>2</sup> e presenta nella parte finale un pozzo di pressione verticale di 8 m (netto) di diametro ed altezza 242 m che termina con un diffusore al piede rivestito in acciaio per le alte pressioni/velocità in gioco.

La centrale in caverna ha dimensioni 18\*86\*46 m.

Il sistema di restituzione è composto di una galleria in pressione con sezione uguale a quella di adduzione e lunghezza 1,9 Km. Completano il sistema idraulico due pozzi piezometrici (superiore ed inferiore), uno subito a monte del pozzo di pressione e l'altro inferiore connesso con il tratto a valle del condotto di aspirazione.

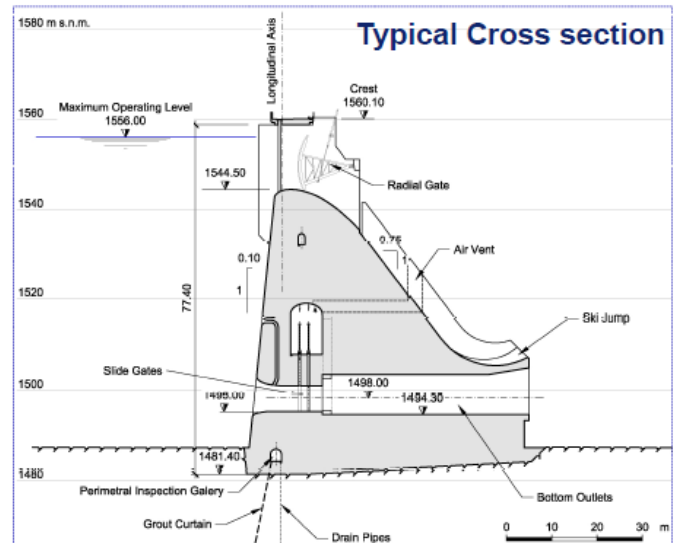
## 2 PROGETTO ORIGINARIO DELLA DIGA

### Calcestruzzo Convenzionale Vibrato (CVC)

Il progetto originario, sia durante la fase di gara che durante lo sviluppo del progetto definitivo, prevedeva una diga a gravità interamente in calcestruzzo convenzionale (CVC).

La diga era divisa in 18 conci ed i getti erano eseguiti per strati di 3,00 m a blocchi sfalsati in funzione del calore di idratazione (derivante dalle caratteristiche fisico chimiche dei materiali disponibili nella zona del progetto). Lo schema era quello classico di una diga a gravità eseguita per conci (Fig. 1 - 2). Era previsto quindi un solo tipo di calcestruzzo massivo per tutto il corpo della diga con piccoli e localizzati interventi in calcestruzzo

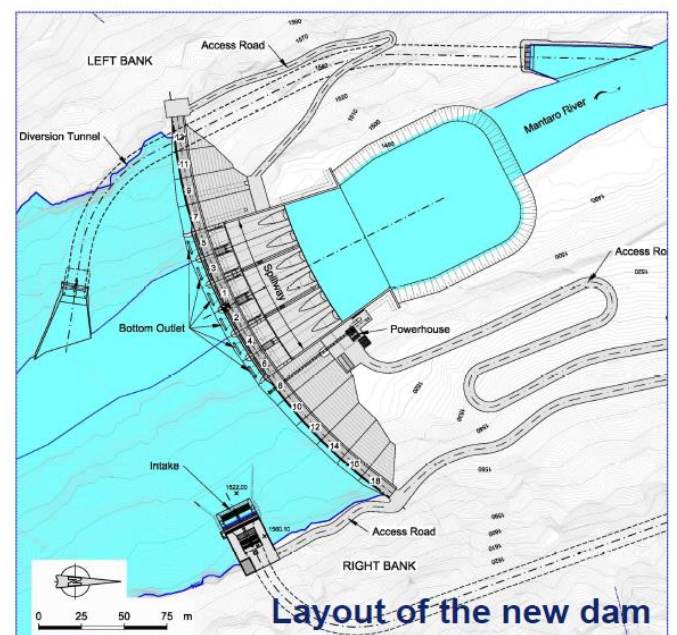
strutturale, previsto dove le sollecitazioni (nelle diverse condizioni al contorno) lo richiedevano; in particolare lungo lo scarico di fondo, la zona di presa della portata ecologica, sul profilo Creager-Scimemi dello sfioratore e lungo tutto il paramento di valle fino al salto di sci dello stesso, infine sul coronamento diga.



**Fig. 1 - Sezione tipica del progetto originario / Typical cross-section of original design**

L'impermeabilizzazione della struttura era assicurata dallo stesso calcestruzzo convenzionale che prevedeva un contenuto di cemento intorno ai 250 kg/m<sup>3</sup>. Il calcestruzzo strutturale era previsto nelle zone dove la presenza di tubazioni, di aperture e/o blindaggi e nel caso dello sfioratore dove la velocità eccessiva dell'acqua e il trasporto solido lo richiedevano.

La pendenza dei paramenti di monte e di valle erano 0.1 su 1 e 0.75 su 1.



**Fig. 2 - Planimetria tipica del progetto originario / Typical plan view of original design**

### 3 VARIAZIONE DEL PROGETTO – Calcestruzzo Rullato Compattato (RCC)

A causa dei forti ritardi accumulatesi per la costruzione delle strade di accesso, sia alla diga che alla zona della centrale e sottostazione elettrica, dovuti alle difficili condizioni geologiche della zona andina peruviana ed alla necessità di sostituire tratti previsti all'aperto con tratti in galleria in zone molto impervie, il Costruttore d'accordo con il Cliente ha espresso la necessità di recuperare del tempo cambiando ed ottimizzando il progetto originario della diga.

Insieme al Progettista Lombardi S.a., incaricato del Progetto esecutivo e dell'assistenza di cantiere, si è studiata una soluzione mista in calcestruzzo convenzionale vibrato (CVC) e calcestruzzo compattato con rullo (RCC) che continuasse a garantire le geometrie e le Specifiche Tecniche accordate in fase contrattuale. Nelle figure 3 e 4 si riportano le sezioni sfiorante e corrente della variante in oggetto con la zonizzazione della resistenza  $f_{ck}$  dei calcestruzzi ed il cambio a calcestruzzo rullato compattato (spessore cappe  $S_p = 30$  cm).

Il volume totale di calcestruzzo della diga è di  $445.000 \text{ m}^3$  così suddivisi:  $250.000 \text{ m}^3$  in RCC e  $195.000 \text{ m}^3$  in CVC.

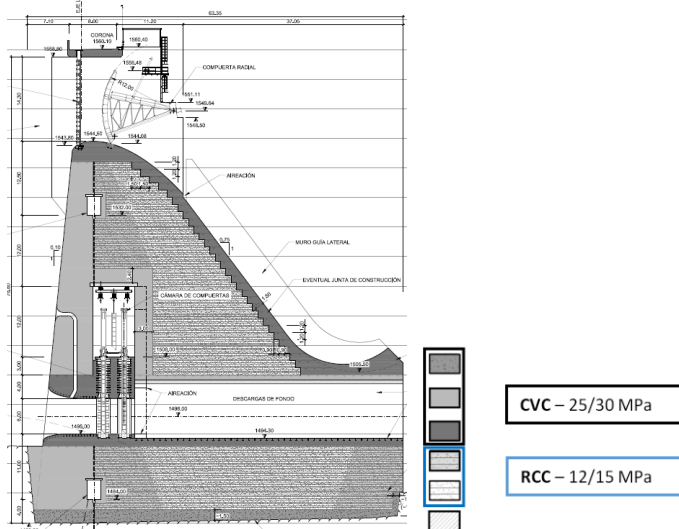


Fig. 3 - Sezione sfiorante / Cross-section of spillway region

Analizzando la sezione corrente (Fig. 4) si vede che essendo cambiata la tipologia di stesa del calcestruzzo, gettato per strati di  $S_p = 30$  cm la funzione di impermeabilizzazione nella parte di monte è attribuita ad un calcestruzzo convenzionale vibrato  $f_{ck} 25 \text{ MPa}$  con aggregato 0-25 mm.

Questo strato, di spessore circa 1 m, assicura alla diga l'impermeabilizzazione.

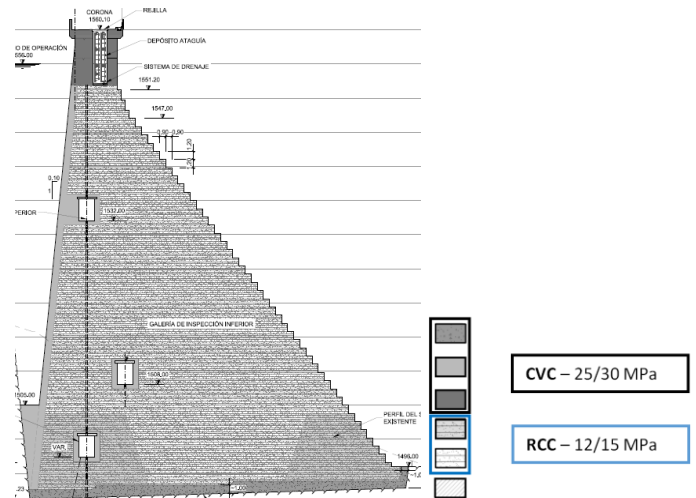


Fig. 4 - Sezione corrente / Cross-section of dam's body

Lo stesso calcestruzzo vibrato è stato collocato all'intorno dei cunicoli di ispezione e di drenaggio. Il resto della sezione è occupata da RCC che, a seguito dei risultati delle verifiche di stabilità strutturale nelle diverse combinazioni di carico, ha resistenze  $f_{ck} 15 \text{ MPa}$  e  $f_{ck} 12 \text{ MPa}$ .

Per quanto riguarda la sezione sfiorante (Fig.3) la situazione è un pò più complicata. Tutta la sezione è interessata sia dalle 6 canne dello scarico di fondo con le relative camere di manovra delle paratoie piane che dallo stesso concio sfiorante con le relative paratoie radiali.

Come si evince dalla sezione, le zone in calcestruzzo convenzionale vibrato (CVC) con  $f_{ck} 25$  e  $30 \text{ MPa}$  sono molto più ampie di quelle della sezione corrente così come la zona in RCC con  $f_{ck} 15 \text{ MPa}$ . Questo è dovuto alle evidenti zone di maggiore compressione e trazione puntuale (risultati delle diverse combinazioni di carico del calcolo strutturale) in corrispondenza degli scarichi di fondo e della zona sfiorante.

Su tutta la fondazione della diga, al contatto con la roccia di fondazione, è stato steso uno strato di circa 1 m di CVC  $f_{ck} 15 \text{ MPa}$  per migliorare l'aderenza con la roccia di fondazione e per regolarizzare la posa degli strati successivi.

Le pendenze dei paramenti di monte e di valle sono rimaste quelle della soluzione originaria.

### 4 SCHEMI ADOTTATI PER IL GETTO DEI CALCESTRUZZI

Il progetto originario prevedeva come già detto una diga in calcestruzzo convenzionale (CVC) con l'impiego del sistema a cavo "tipo blondin" per il getto dei calcestruzzi e la movimentazione in diga;

tale sistema è stato utilizzato anche dopo il cambio concettuale del progetto. Essendo però la produzione di RCC molto più veloce, rispetto a quella in CVC, c'era bisogno dunque di aumentare la capacità produttiva della posa del calcestruzzo RCC. La sezione d'imposta della diga era abbastanza acclive e l'orografia della valle aveva imposto l'ubicazione dell'impianto di calcestruzzo su un'area ricavata sulle pendici, in sinistra, della collina che sovrasta il fiume Mantaro (Fig. 5). Si è pensato dunque di usare linee di tubazioni in acciaio per confluire il calcestruzzo dall'alto verso il piano di posa del corpo diga facendo particolare attenzione ad evitare la segregazione, dato il notevole salto di quota, circa 70 m, e dunque contribuire all'aumento delle richieste di calcestruzzo di tipo RCC.

Il metodo messo in atto ha superato i controlli richiesti dalla Direzione Lavori e dalle Specifiche delle Normative Internazionali e quindi si è avviata una produzione industriale che ha permesso di aumentare il rendimento giornaliero previsto in origine utilizzando solamente il "blondin", alimentato dai nastri trasportatori, e dai camion betoniera.



**Fig. 5 – Vista generale - 1. Impianto di calcestruzzo – 2. Nastri trasportatori e tramoggia – 3. Linea tubazioni / Overall view 1. Concrete mixing plant - 2. Conveyor belts and hopper - 3. Pipeline**

Il sistema utilizzato consiste in n° 2 tubazioni parallele, così conformate:

- n. 1 linea per la sola distribuzione di CVC;
- n. 1 linea che alterna la distribuzione di RCC e CVC.

La pendenza  $p$  delle tubazioni utilizzata è di  $40^\circ$ - $45^\circ$ , il campo limite testato fisicamente per il calcestruzzo RCC è di  $35^\circ \leq p \leq 55^\circ$ ;

Le tubazioni hanno diametro  $\phi = 0,60$  m e la lunghezza di ogni elemento è di  $L = 3,00$  m.

L'alimentazione avviene dall'impianto di betonaggio attraverso un sistema di nastri ed una tramoggia per

ogni linea, oppure attraverso l'alimentazione con autobetoniere direttamente nella tramoggia; con il crescere in altezza della diga i tubi sono progressivamente rimossi (Fig. 6 – 7).



**Fig. 6 – Tuberia in acciaio installata a Cerro del Aguila / Steel pipeline at Cerro del Aguila**

In relazione a precedenti esperienze, in Italia è stato usato da Astaldi anche nell'impianto idroelettrico di Pont Ventoux per i getti di calcestruzzo per il rivestimento di un pozzo piezometrico di circa 100 metri di altezza, ed a seguito di prove eseguite



**Fig. 7 – Tubazione in acciaio, punto di scarico / Steel pipeline outlet**

direttamente in campo, si è deciso di progettare le linee con un punto di flesso nella parte superiore in quanto in fase di alimentazione il flesso induce un movimento elicoidale alla miscela garantendo il rimescolamento della stessa e la riduzione del fenomeno della segregazione.

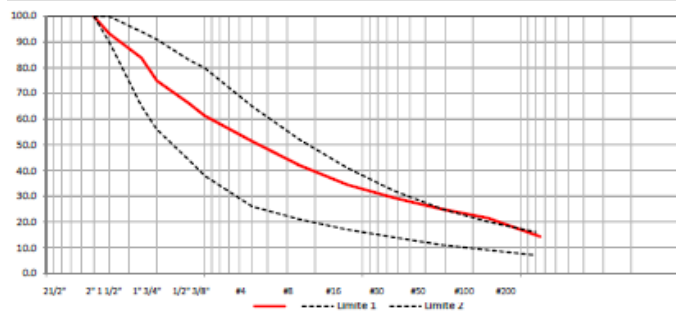
Come è noto la definizione di segregazione è: separazione dei componenti in una miscela eterogenea dovuti a errata preparazione della miscela stessa, ad errata modalità di trasporto o infine ad errato processo di vibrazione (troppo o troppo poco). Esistono due tipologie di segregazione:

- a) segregazione interna: rapporto acqua / cemento  $\geq 0,60$ , gli elementi più pesanti

dell'aggregato scendono sul fondo, mentre gli elementi più leggeri insieme all'acqua risalgono in superficie;

- b) segregazione esterna: durante il trasporto, a causa di urti, gli elementi più pesanti si depositano sul fondo.

Un esempio di controllo della segregazione, eseguito sul calcestruzzo RCC dal Laboratorio di cantiere di Cerro del Aguila, è stato l'analisi della granulometria in uscita dalla linea di tubazioni, comparata con i limiti ammissibili della curva granulometrica contrattuale mediante gli studi ufficiali eseguiti in cantiere ed approvati dalla D. L. Nelle figure 8 e 9 un esempio di controllo granulometrico eseguito sul calcestruzzo in uscita dalla tubazione, in questo caso eseguito sul calcestruzzo RCC a controllo di una produzione di 30/50 m<sup>3</sup>. Sull'asse delle ordinate il % di passante, mentre sull'asse delle ascisse i diametri  $\phi$  (in pollici) del materiale analizzato; in rosso è determinata la curva risultante dopo il controllo, mentre in nero tratteggiato i "limiti determinati 1-2 superiore ed inferiore".



**Fig. 8 e 9 – Controllo di laboratorio - Determinazione della curva granulometrica e % materiale passante / Laboratory test - Determination of granulometry curve and % of undersize/passing material**

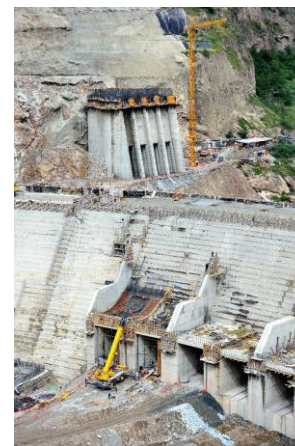
3"	-			
2 1/2"	-			
2"	-			100.0
1 1/2"	1,068.0	6.7	6.70	93.3
1"	1,520.0	9.5	16.20	83.8
3/4"	1,412.0	8.8	25.02	75.0
1/2"	1,427.0	8.9	33.93	66.1
3/8"	753.0	4.7	39.64	61.4
# 4	1,597.0	10.0	48.62	51.4
# 8	1,502.0	9.4	58.00	42.0
# 16	1,206.0	7.5	65.53	34.5
# 30	829.0	5.2	70.71	29.3
# 50	689.0	4.3	75.02	25.0
# 100	565.0	3.5	78.55	21.5
# 200	1,158.0	7.2	85.78	14.2

la % di materiale passante in funzione dei diametri  $\phi$  (in pollici) rientra all'interno delle medesime percentuali studiate e definite nei disegni delle miscele in fase di Laboratorio. Tali controlli sul calcestruzzo collocato attraverso tubazione, sono stati eseguiti con frequenza e tolleranze contenute

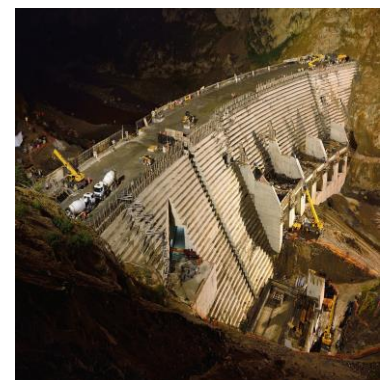
nel Piano di Controllo di Qualità e nelle Specifiche Tecniche contrattuali. Sotto alcune immagini durante la fase di costruzione.



**Fig. 10 – Vista durante la costruzione / Top view during the execution of the works**



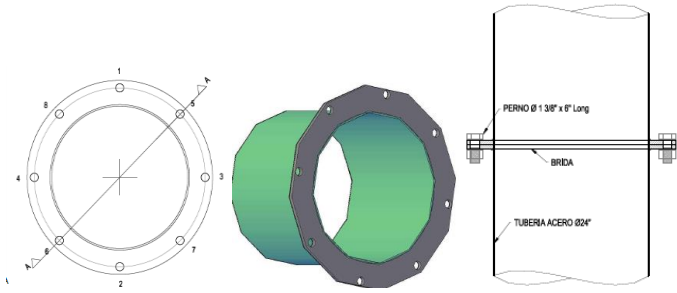
**Fig. 11 – Vista scarichi di fondo durante la costruzione / Bottom outlets during construction**



**Fig. 12 – Vista notturna durante la costruzione / Night-time view during construction**

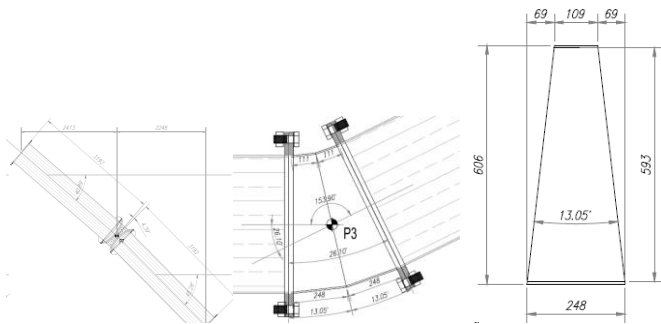
Passiamo ora a descrivere l'attrezzatura usata nel caso specifico. La tubazione è costituita da elementi in acciaio (A-36) di spessore  $s=6$  mm e diametro  $\phi=0,60$  m. La lunghezza degli elementi è di 3,00 m ciascuno, tutti flangiati e di peso sui 95 kg/m. Ogni elemento è collegato al successivo attraverso n. 8

perni in acciaio (A-325) di diametro  $\phi = 31$  mm e lunghezza 152,4 mm.



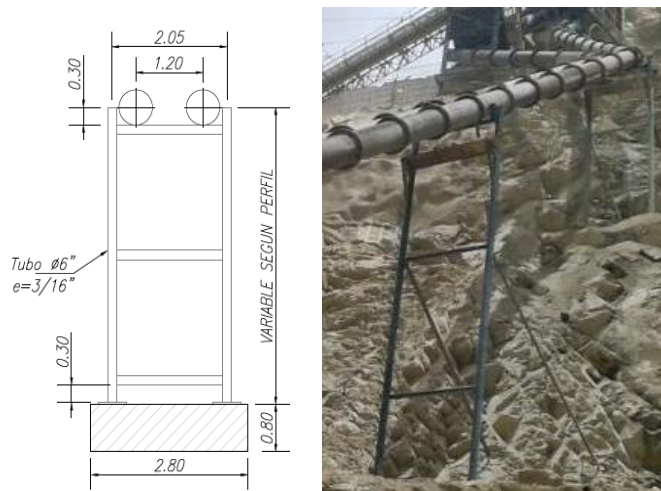
**Fig. 13 – Dettaglio sezione/unione tubazione / Detail of pipe cross-section/joint**

Nelle immagini sotto un esempio di collegamento utilizzato per due tratti di diversa pendenza.



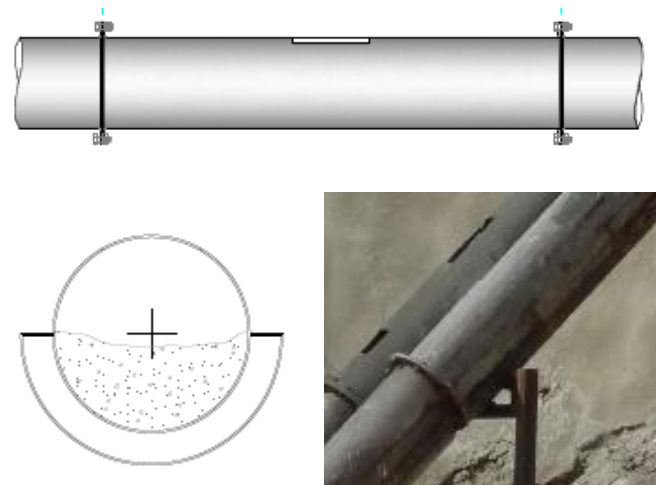
**Fig. 14 – Dettaglio flangia di raccordo / Detail of joint's flange)**

La tubazione è appoggiata a strutture in acciaio fissate a loro volta lungo il profilo di scavo mediante piccole fondazioni in calcestruzzo o perni di ancoraggio nei punti meno accessibili. Tali strutture sono costituite da tubi in acciaio (A-36) di spessore  $S_p = 5$  mm e diametro  $\phi = 15$  cm.



**Fig. 15 – Dettaglio supporto tubazione / Detail of pipeline support**

Per eliminare l'usura delle pareti dei tubi indotta dallo scivolamento e quindi dall'attrito dell'impasto ed abbattere notevolmente i tempi di manutenzione e conseguentemente migliorare l'efficienza e l'efficacia del sistema, sono stati saldati degli elementi semicircolari, distanti 10 cm, sull'intradosso di tutta la tubazione. Una volta consumato l'acciaio del tubo originale, il calcestruzzo indurito crea una superficie di scorrimento di protezione al rinforzo in acciaio saldato nella parte inferiore. In questo modo si è risolto definitivamente il problema di usura del metallo e di sostituzione dell'elemento. Inoltre sono state aperte finestre di ispezione (50 \* 35 cm) in ogni singolo elemento di 3,00 m in corrispondenza dell'asse longitudinale.



**Fig. 16 – Dettaglio tipico rinforzo tuberia e finestra di ispezione / Detail of typical reinforcement of pipeline and inspection window**

La gestione operativa del sistema è stata coordinata da due operai, il primo a monte per regolare l'apertura della tramoggia e l'invio del calcestruzzo sul piano di posa, il secondo a valle per coordinare la ricezione sui mezzi di trasporto, nel nostro caso su camion.

La capacità produttiva del sistema dipende chiaramente dalle condizioni al contorno:

- dalla capacità di alimentazione dell'impianto di calcestruzzo
- dalla capacità di ricezione e collocazione dell'impasto
- dalle aree di manovra
- dall'interferenza con le lavorazioni e l'architettura della diga.

Nel caso specifico, considerando una produzione nominale effettiva di 200 m<sup>3</sup>/h del nostro impianto di betonaggio, si è raggiunta una produzione giornaliera di picco, considerando due turni da 10

ore, di 4.000 m<sup>3</sup> dei quali il 70% sono stati gettati con il sistema delle tubazioni.

## 5 STATO DEI LAVORI A MAGGIO 2016

I lavori di costruzione della diga sono stati finalizzati ad Aprile 2016 con la conclusione del montaggio delle paratoie sullo sfioratore (“tipo radiali” e “tipo flap”).



**Fig. 17 – Paratoie radiali e flap (lato valle) / Radial gates and flap (downstream side)**



**Fig. 18 – Paratoie radiali e flap (lato monte) / Radial gates and flap (upstream side)**

Il bacino di invaso, riempito secondo le procedure definite dal Progettista eseguendo tutti i controlli prestabiliti su tutte le parti di funzionamento, (idromeccaniche, strutturali ed elettromeccaniche in centrale), ha raggiunto già la quota di 1556 m s.l.m. che è la quota di massima operazione dell’impianto.



**Fig. 19 – Viste generali bacino a quota 1556 m s.l.m. / Overall view of the basin at +1,556 m a.s.l.**



**Fig. 20 – Viste generali bacino a quota 1556 m s.l.m. / Overall view of basin at +1,556 m a.s.l.**



**Fig. 21 – Scarichi di fondo e sfioratore in funzione / Bottom outlets and spillway during operation**

Attualmente in alcuni punti delle gallerie di drenaggio ed ispezione sono presenti delle piccole zone di perdita dallo schermo di impermeabilizzazione. Si stanno facendo delle iniezioni integrative con malte a base di resina espansiva a presa lenta e/o rapida secondo le necessità. Le gallerie nella loro totalità sono ultimate al 100% dal mese di Settembre 2015.



**Fig. 22 – Vista generale bacino / Overall view of the basin**

La centrale in caverna è in fase di ultimazione. Le turbine n° 1 e 2 sono installate ed attualmente in fase di collaudo (con il processo di prove in secco ed in umido). La turbina n° 3 è prevista ultimata per il mese di luglio 2016 mentre l’impianto nella sua totalità sarà ultimato a settembre 2016.



**Foto 13 – Vista dell’invaso / View of the basin**

## 6 CONCLUSIONI

La posa in opera del calcestruzzo sia convenzionale che RCC nella diga di Cerro del Aguila è stato eseguito con soddisfazione, a gravità, attraverso l’uso di tubazioni direttamente dalla zona degli impianti fino all’area della diga.

Sono stati evitati con successo tutti i problemi legati ai fenomeni di segregazione ottenendo un notevole incremento di efficienza e di efficacia, riducendo altresì i tempi di posa in opera.

## 7 CONCLUSION

The pouring/laying of both conventional concrete and RCC in the Cerro del Aguila dam has been successfully carried out, by gravity, through the use of pipes directly from the concrete mixing plant to the dam.

All problems related to segregation have been successfully avoided resulting in a considerable increase in both efficiency and effectiveness, further reducing the pouring/laying time.

## 8 RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano le imprese di costruzione, Astaldi S.p.A. e Grana y Montero S.A., il progettista Lombardi Eng.Ltd., il Cliente e proprietario dell’impianto Kallpa Generacion S.A.