

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale



**Una tecnica sperimentale per la misura di correnti bifase
aria-acqua a valle di uno sfioratore**

Relatori:
Prof. Davide Poggi

Candidato:
Nicola Nioi

Anno Accademico

2017/2018

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
2. DESCRIZIONE OPERE ESISTENTI	3
2.1. Opere di scarico: stato attuale	4
2.2. Opere di scarico: configurazione di progetto	8
3. DESCRIZIONE MODELLO IDRAULICO	13
3.1. Realizzazione del corpo diga e dei tratti vallivi	15
3.2. Posizionamento dello sfioratore laterale	19
3.3. Posizionamento dello sfioratore centrale in corpo diga	21
3.4. Vasca di carico e sistema di pompaggio	22
3.5. Strumentazione di misura	25
4. LEGGI TEORICHE	27
4.1. Sfioratori superficiali	27
4.2. Curva di deflusso	31
4.3. Modelli fisici.....	33
4.3.1. Introduzione.....	33
4.3.2. Modelli a Reynolds costante.....	35
4.3.3. Modelli a Froude costante	36
4.4. Correnti bifase aria-acqua.....	37
4.4.1. Introduzione.....	37
4.4.2. Aspetti teorici per la descrizione delle correnti aerate.....	38
4.4.3. Evidenze sperimentali	39
4.4.4. Metrologia	41
5. PROVE SPERIMENTALI	43
5.1. Modello 1:30 (1970)	43
5.2. Modello 1:40 (2016)	47
5.2.1. Studio dello sfioratore laterale.....	48
5.2.2. Studio dello scarico di superficie in corpo diga.....	51
5.2.3. Studio della situazione di progetto	60
6. METOLOGIA INNOVATIVA LASER.....	63
6.1. Strumentazione di misura	64
6.1.1. Fotocamera digitale reflex	64
6.1.2. Laser a stato solido	65

6.2.	Profili della lama d'acqua sfiorante in corrispondenza dello sfioratore laterale	66
6.2.1.	Posizionamento e calibrazione degli strumenti	66
6.2.2.	Esecuzione delle prove	68
6.2.3.	Elaborazione dati	70
6.2.4.	Risultati ottenuti	72
6.3.	Profili di correnti bifase aria-acqua a valle dello sfioratore	75
6.3.1.	Posizionamento e calibrazione degli strumenti	75
6.3.2.	Esecuzione delle prove	77
6.3.3.	Elaborazione dati	80
6.3.4.	Risultati ottenuti	83
7.	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	91
	Bibliografia.....	93
	Codici MATLAB.....	95

Indice delle figure

<i>Figura 1: lago di Gurzia</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2: schema sfioratore superficiale</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3: planimetria diga di Gurzia (configurazione esistente).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4: planimetria diga di Gurzia (configurazione di progetto).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5: prospetto laterale diga</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6: prospetto sfioratore centrale e scarico di fondo</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7: prototipo Oroville Dam</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8: modello fisico Oroville Dam</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9: serbatoio metallico.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 10: lamiere sagomate di valle</i>	<i>16</i>
<i>Figura 11: fase di riempimento delle pareti di valle</i>	<i>17</i>
<i>Figura 12: posa del calcestruzzo.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 13: posa delle lamiere del secondo tratto di valle.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 14: completamento della valle.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 15: vista frontale sfioratore laterale</i>	<i>20</i>
<i>Figura 16: funzionamento sfioratore laterale</i>	<i>20</i>
<i>Figura 17: vista frontale scarico di superficie</i>	<i>21</i>
<i>Figura 18: funzionamento degli sfioratori</i>	<i>22</i>
<i>Figura 19: schema alimentazione della vasca di carico</i>	<i>24</i>
<i>Figura 20: tipologia soglie.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21: profilo Creager.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 22: esempio curva delle portate</i>	<i>31</i>
<i>Figura 23: esempio di aerazione a valle di uno sfioratore</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24: schema del flusso aerato a valle di una presa di fondo</i>	<i>39</i>
<i>Figura 25: relazioni auto-simili</i>	<i>41</i>
<i>Figura 26: funzionamento dell'ago a doppia punta</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27: curva di deflusso 1970 serie 1.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 28: curva di deflusso 1970 serie 2.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 29: curva di deflusso 1970 serie 3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 30: curve di deflusso 1970.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 31: curva di deflusso sfioratore laterale</i>	<i>50</i>
<i>Figura 32: confronto curva di deflusso e curva profilo Creager</i>	<i>50</i>
<i>Figura 33: curva di deflusso sfioratore centrale.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 34: curva di deflusso ENEL.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 35: curva di deflusso formula empirica.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36: coefficiente di contrazione delle pile in funzione del tirante adimensionalizzato</i>	<i>57</i>
<i>Figura 37: curva di deflusso formula empirica di "Hydraulic Design of spillway 1990.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 38: confronto curve di deflusso</i>	<i>59</i>
<i>Figura 39: curva di deflusso combinazione dei due sfioratori.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 40: Canon EOS 550D.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 41: laser "MIL 532"</i>	<i>65</i>
<i>Figura 42: sezioni dello sfioratore laterale.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 43: posizionamento della griglia in corrispondenza della sezione 5</i>	<i>68</i>
<i>Figura 44: profili fotografici sezione 5</i>	<i>69</i>
<i>Figura 45: profili della corrente sezione 5.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 46: profilo sezione 3</i>	<i>72</i>

<i>Figura 47: profilo sezione 4</i>	<i>72</i>
<i>Figura 48: profilo sezione 5</i>	<i>73</i>
<i>Figura 49: profilo sezione 6</i>	<i>73</i>
<i>Figura 50: profilo sezione 7</i>	<i>74</i>
<i>Figura 51: posizionamento delle griglie lungo le sezioni di valle.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 52: profili delle sezioni in assenza di moto</i>	<i>78</i>
<i>Figura 53: profili fotografici sezione 9</i>	<i>79</i>
<i>Figura 54: profili fotografici sezione 11</i>	<i>79</i>
<i>Figura 55: profili fotografici sezione 12</i>	<i>79</i>
<i>Figura 56: profili fotografici sezione 16</i>	<i>80</i>
<i>Figura 57: profili della corrente sezione 16.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 58: sovrapposizione tra griglia e profilo.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 59: profili combinati sezione 9</i>	<i>83</i>
<i>Figura 60: profili combinati sezione 11</i>	<i>83</i>
<i>Figura 61: profili combinati sezione 12</i>	<i>84</i>
<i>Figura 62: profili di corrente sezione 16</i>	<i>84</i>
<i>Figura 63: tracciamento funzione interpolante.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 64: calcolo dell'area tramite MATLAB</i>	<i>86</i>
<i>Figura 65: Distribuzione normale.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 66: Profilo con deviazioni standard</i>	<i>89</i>
<i>Figura 67: Arco a 7 laser</i>	<i>91</i>

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1: capacità organi di scarico</i>	<i>4</i>
<i>Tabella 2: capacità complessiva organi di scarico</i>	<i>5</i>
<i>Tabella 3: dati tecnici della diga di Gurzia.....</i>	<i>5</i>
<i>Tabella 4: dati tecnici dell'invaso.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabella 5: caratteristiche sfioratore laterale</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 6: caratteristiche sfioratore centrale.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 7: valori coefficiente d'efflusso</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 8: Similitudine di Reynolds: scala delle principali grandezze</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 9: Similitudine di Froude: scala delle principali grandezze</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 10: valori curva di deflusso sfioratore laterale.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 11: valori curva di deflusso sfioratore centrale</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 12: valori curva di deflusso ENEL</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 13: valori curva di deflusso formula empirica</i>	<i>55</i>
<i>Tabella 14: valori curva di deflusso formula empirica di “Hydraulic Design of spillway 1990 “.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabella 15: valori curva di deflusso combinazione dei due sfioratori</i>	<i>61</i>
<i>Tabella 16: risultati ottenuti sezioni 9.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 17: risultati ottenuti sezione 11</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 18: risultati ottenuti sezione 12</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 19: risultati ottenuti sezione 16.....</i>	<i>88</i>

1. INTRODUZIONE

La tesi si propone di studiare il modello fisico della diga di Gurzia presente all'interno del laboratorio "G. Bidone" del Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino.

La costruzione del modello è stata commissionata dal gestore dell'invaso, ENEL Green Power, al dipartimento stesso, area idraulica, al fine di attuare alcune modifiche progettuali e verificarne il corretto funzionamento: tali indagini sono state portate avanti successivamente alla stima di una nuova portata millenaria, valutata tramite opportune analisi idrologiche, differente da quella stimata in fase di realizzazione della diga (1922).

Per garantire un corretto funzionamento dell'invaso è stato progettato un nuovo sfioratore in grado di sopperire all'aumento di portata millenaria, ed in presenza di tale opera accessoria aggiuntiva sono state eseguite una serie di lavorazioni commissionate da ENEL Green Power con l'obiettivo di studiare il comportamento idraulico del corso d'acqua e delle sue opere accessorie.

Nella prima fase lavorativa sono state effettuate delle misurazioni del tirante idrico per differenti valori di portata in maniera tale da ricavare i coefficienti della curva di deflusso, procedere al tracciamento della stessa, e valutare l'opportuna geometria e posizionamento dello sfioratore centrale.

Nella seconda fase del lavoro sono stati ottenuti i profili della lama d'acqua sfiorante in corrispondenza di differenti sezioni dello sfioratore laterale al variare dei valori di portata defluente sfruttando una nuova metodologia sperimentale basata sull'utilizzo di fasci laser e successiva rielaborazione fotografica.

Nella terza ed ultima fase lavorativa, mediante utilizzo della medesima tecnica innovativa, è stato possibile determinare il profilo di alcune sezioni in corrispondenza dell'area valliva al variare delle portate defluenti al fine di ottenere i valori medi di velocità e consolidando l'efficacia di tale metodologia.

2. DESCRIZIONE OPERE ESISTENTI

La diga di Gurzia, meglio conosciuta come “lago di Vidracco” o “lago di Vistrorio” per la vicinanza ai due comuni, entrambi situati in provincia di Torino, è un bacino artificiale lacustre originato dallo sbarramento del torrente Chiusella a valle della confluenza con il Savenca, il suo principale affluente; l’invaso, distante circa 40 km dal centro del capoluogo Piemontese, risulta essere caratterizzato da una forma prevalentemente romboidale, confinante con il centro comunale di Vidracco lungo la destra idrografica, e fiancheggiata dalla SP 64 della Valchiusella lungo la sponda opposta.



Figura 1: lago di Gurzia

La struttura, costruita nel 1922 e successivamente data in concessione ad ENEL produzione S.p.A. per uso idroelettrico, risulta essere costituita da una diga ad arco semplice in calcestruzzo armato: la forma ed i rapporti dimensionali di questa configurazione strutturale garantiscono la resistenza alla spinta dell’acqua, del ghiaccio, alle perturbazioni varie ed alle azioni sismiche, prevalentemente per mezzo dell’effetto della curvatura longitudinale che produce l’effetto arco; questa tipologia risulta essere ottimale considerata la conformazione morfologica della val Chiusella, caratterizzata da gole rocciose strette, agevolando la distribuzione dei carichi lungo la direzione delle pareti laterali della valle.

Lo scopo dell'opera è prevalentemente idroelettrico, per cui essa include un importante condotta di collegamento interrata in grado di erogare una portata pari a $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$, la quale funge da alimentazione all'impianto idroelettrico di Ponte Preti, comune di Strambinello, situato a 132,00 m a valle dello sbarramento.

2.1.Opere di scarico: stato attuale

La diga dispone di uno scarico di fondo e di due scarichi di superficie tra loro indipendenti:

- Lo scarico di fondo, collocato in corrispondenza della spalla sinistra della diga, è caratterizzato da una sezione circolare con asse a monte situato ad una quota pari a 405,25 m s.l.m.;
- Lo sfioratore laterale, situato in centro diga, è contraddistinto da un profilo Creager a quota 427,50 m s.l.m. e una lunghezza pari a 44,80 m;
- Lo sfioratore centrale è collocato ad una quota pari a 429,55 m s.l.m.

Lo scarico di fondo è un'opera accessoria della diga posta in prossimità del fondo dell'invaso: esso è costituito da una o più paratie e viene utilizzato prevalentemente per lo svuotamento della diga in caso di interventi di manutenzione sulla stessa o quando viene stimata una portata in entrata superiore a quella di progetto.

Lo sfioratore laterale, o stramazzo longitudinale, è un dispositivo idraulico, nel nostro caso praticato su una sola sponda, atto a smaltire l'eccesso di portata in arrivo da monte rispetto ad un livello prestabilito.

Nella seguente tabella si elencano i massimi valori di portata derivabili da ciascun organo di scarico:

Organo di scarico	Portata
Scarico di superficie in centro diga	$32,0 \text{ m}^3/\text{s}$
Scarico di superficie in sinistra diga	$923,0 \text{ m}^3/\text{s}$
Scarico di fondo	$41,0 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabella 1: capacità organi di scarico

I valori relativi alla capacità totale di scarico superficiale, ottenibile mediante utilizzo combinato dello scarico di superficie in centro diga e scarico di superficie in sinistra diga, ed alla capacità totale di scarico, conseguentemente all'utilizzo contemporaneo di tutti gli organi di scarico, sono riportati nella tabella successiva:

	Portata
Capacità totale di scarico superficiale	955,0 m ³ /s
Capacità totale di scarico	996,0 m ³ /s

Tabella 2: capacità complessiva organi di scarico

Il coronamento della diga (parte terminale superiore dello sbarramento) è collocato ad una quota pari a 432,50 m s.l.m., la quota di massimo invaso (quota massima a cui può giungere il livello dell'acqua ove si verifichi il più gravoso evento di piena previsto) è pari a 430,00 m s.l.m., la quota di massima regolazione (quota del livello dell'acqua che comporta lo sfioro degli appositi dispositivi) è situata ad una quota pari a 427,50 m s.l.m., mentre il battente corrispondente alla portata millenaria è pari a 4,5 m.

Tutti i dati caratteristici della diga e dell'invaso sono riportati nelle seguenti tabelle:

Dati caratteristici della diga di Gurzia	
Quota coronamento	432,50 m s.l.m.
Sviluppo coronamento	163,70 m
Larghezza coronamento	2 m
Altezza della diga:	
- ai sensi del D.M. 24/03/82	50 m
- ai sensi della L. 584/94	50 m
Altezza di massima ritenuta	47,5 m
Franco	2,5 m
Franco netto	1,97 m
Volume diga	8000 m ³

Tabella 3: dati tecnici della diga di Gurzia

Si rimarcano alcuni concetti citati nell'ultima tabella: l'altezza della diga, prima del 1994 rappresentava il dislivello tra la quota del piano di coronamento (esclusi parapetti ed eventuali muri frangi onde) e quella del punto più basso della superficie di fondazione (escluse eventuali sottostrutture di tenuta) ma successivamente all'entrata in vigore del nuovo decreto (1994) essa assume come quota limite inferiore quella del punto più depresso dei paramenti, mentre l'altezza di massima ritenuta è il dislivello tra la quota di massimo invaso e quella del punto più depresso dell'alveo naturale in corrispondenza del paramento di monte.

Il franco è invece il dislivello tra la quota del piano di coronamento e quella di massimo invaso, ma la normativa ci impone l'utilizzo del franco netto, ovvero il dislivello tra la quota del piano di coronamento e la somma della quota di massimo invaso e la semi-ampiezza della massima onda prevedibile nel serbatoio, ricavabile in funzione della velocità media del vento e del fetch (distanza di mare libero che colpisce una generica porzione di territorio).

Dati caratteristici dell'invaso	
Quota di massimo invaso	430,00 m s.l.m.
Quota di massima regolazione	427,50 m s.l.m.
Quota di minima regolazione	412,85 m s.l.m.
Superficie dello specchio liquido:	
- alla quota di massimo invaso	0,14 km ²
- alla quota di massima regolazione	0,10 km ²
- alla quota di minima regolazione	0,005 km ²
Volume totale di invaso:	
- ai sensi del D.M. 24/03/82	1,76x10 ⁶ m ³
- ai sensi della L. 584/94	1,259x10 ⁶ m ³
Volume utile di regolazione	1,059x10 ⁶ m ³
Volume di laminazione	0,501x10 ⁶ m ³
Superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso	140 km ²
Superficie del bacino imbrifero allacciato	0 km ²

Tabella 4: dati tecnici dell'invaso

È fondamentale approfondire i concetti relativi ai volumi immagazzinabili nell'invaso: il volume totale di invaso rappresenta la capacità del serbatoio compresa tra la quota di massimo invaso e la quota minima di fondazione, il volume utile di regolazione è quello compreso fra la quota massima di regolazione e la quota minima del livello d'acqua alla quale può essere derivata, infine il volume di laminazione è quello compreso fra la quota di massimo invaso e la quota massima di regolazione.

Nella seguente immagine è approfondita una rappresentazione grafica delle terminologie appena descritte di un tipico sfioratore superficiale:

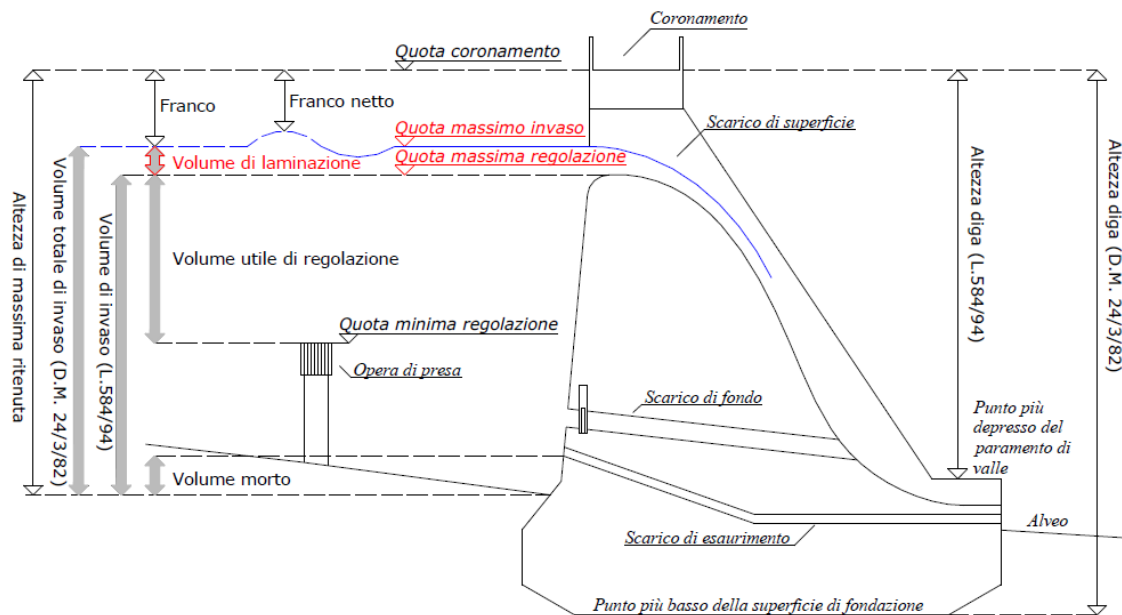


Figura 2: schema sfioratore superficiale

Segue nella figura 3 la vista planimetrica della diga di Gurzia:

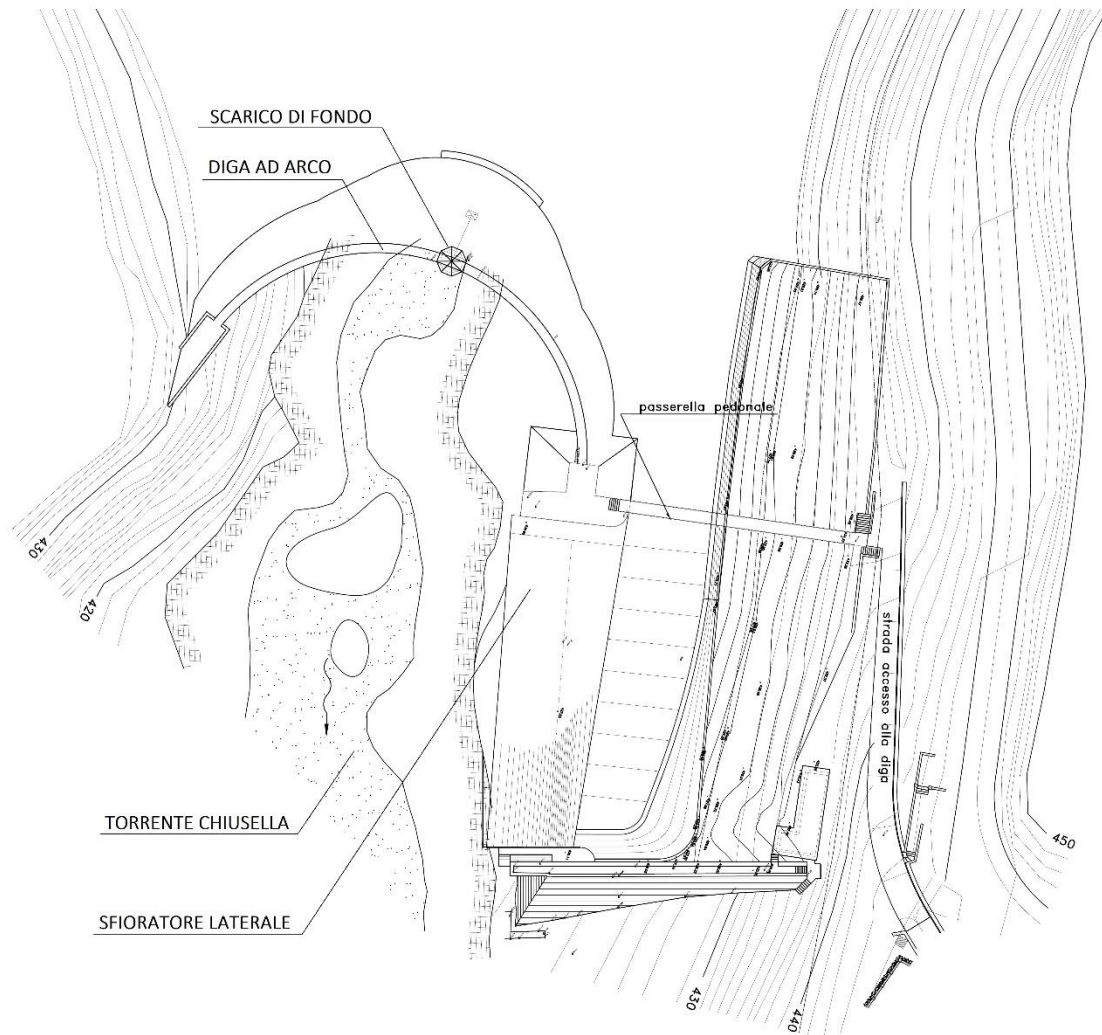


Figura 3: planimetria diga di Gurzia (configurazione esistente)

2.2. Opere di scarico: configurazione di progetto

L'intervento in progetto, successivamente alla rivalutazione della portata millenaria, ha lo scopo di adeguare l'attuale portata degli scarichi presenti sul corpo diga, pari a $966 \text{ m}^3/\text{s}$, al valore di $1400 \text{ m}^3/\text{s}$, mediante ampliamento dello scarico di superficie in centro diga fino alla realizzazione di uno sfioratore superficiale a soglia libera che integrerà la capacità di scarico attuale e garantirà almeno la portata di progetto richiesta mantenendo inalterati sia il livello di massimo invaso, pari a 432,00 m s.l.m., che quello di massima regolazione, pari a 427,50 m s.l.m.

Nella successiva immagine è illustrata la planimetria della diga di Gurzia con l'inserimento del nuovo scarico di superficie:



Figura 4: planimetria diga di Gurzia (configurazione di progetto)

La nuova soglia, come indicato nella figura 5, verrà ricavata a quota 428,00 m s.l.m. operando un taglio sulla sommità del corpo diga ed andando così a realizzare una luce caratterizzata da uno sviluppo lordo di 30,50 m in corrispondenza del punto di tangenza orizzontale del profilo sfiorante a quota 428,00 m s.l.m.

Tale operazione provoca l'interruzione della continuità del coronamento, ragion per cui è stata inserita una nuova passerella metallica poggiante sul coronamento in corrispondenza delle due mensole laterali della volta esistente (cretesi successivamente allo scasso) ed in mezzzeria su una nuova pila in calcestruzzo armato da realizzare sulla soglia, ripristinando così la transitabilità sul coronamento; la pila sarà anche utilizzata per alloggiare gli organi di manovra e comando della paratoia dello scarico di fondo.

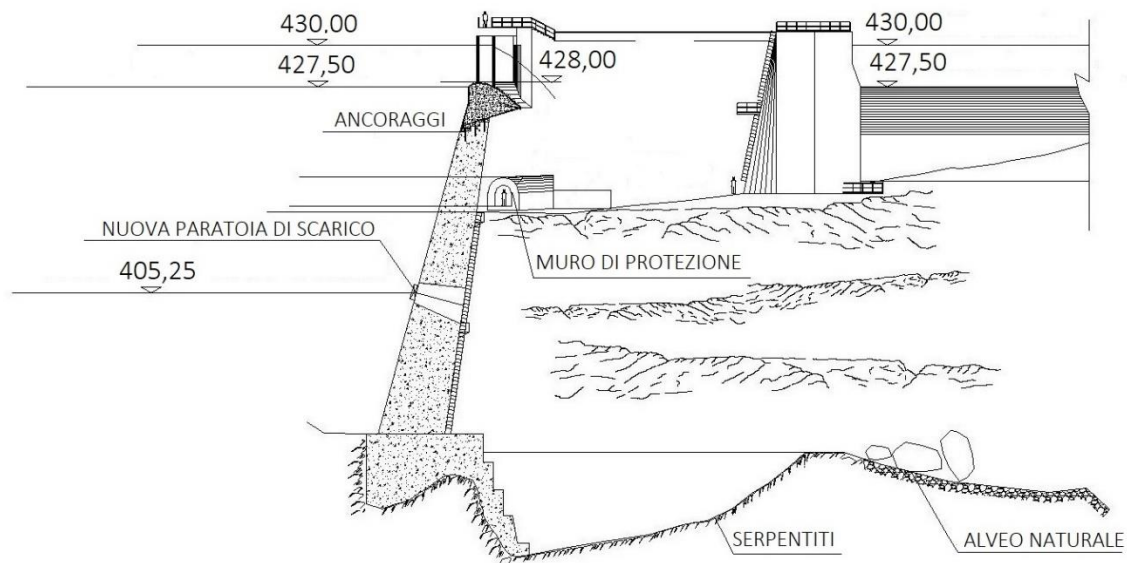


Figura 5: prospetto laterale diga

La luce netta del nuovo scarico di superficie, depurato dall'ingombro della pila intermedia, sarà pari a 29,00 m, suddiviso in due parti aventi sviluppo lievemente differente tra loro: tali lunghezze, derivanti dall'ottimizzazione della posizione radiale del nuovo scarico, saranno rispettivamente pari a 15,17 m per la soglia a destra dell'asse dello scarico di fondo e 12,88 m per quella a sinistra.

La soglia sarà realizzata adottando un profilo di sfioro di tipo Creager, sagomato verso monte in modo tale da ridurre quanto più possibile sia le contrazioni di soglia che quelle laterali; verso valle la soglia profilata proseguirà per una distanza di 5,00 m al fine di allontanare quanto più possibile la lama sfiorante dal paramento di valle, mantenendo allo stesso tempo il lembo inferiore della lama sfiorante sempre areata.

Cautelativamente si è arrivati alla conclusione di adottare un profilo lievemente più aperto al fine di evitare eventuali depressioni in corrispondenza dello scivolo, utilizzando pertanto un coefficiente di deflusso massimo pari a 0,44, lievemente ridotto rispetto ai valori teorici; per quanto riguarda le pareti ai lati delle soglie di sfioro, saranno anch'esse profilate in modo tale da contenere quanto più possibile le contrazioni laterali: questo aspetto è stato tenuto in considerazione adottando dei coefficienti di contrazione ridotti pari a 0,05.

Nella seguente figura è riportato un prospetto rappresentante lo sfioratore centrale e lo scarico di fondo:

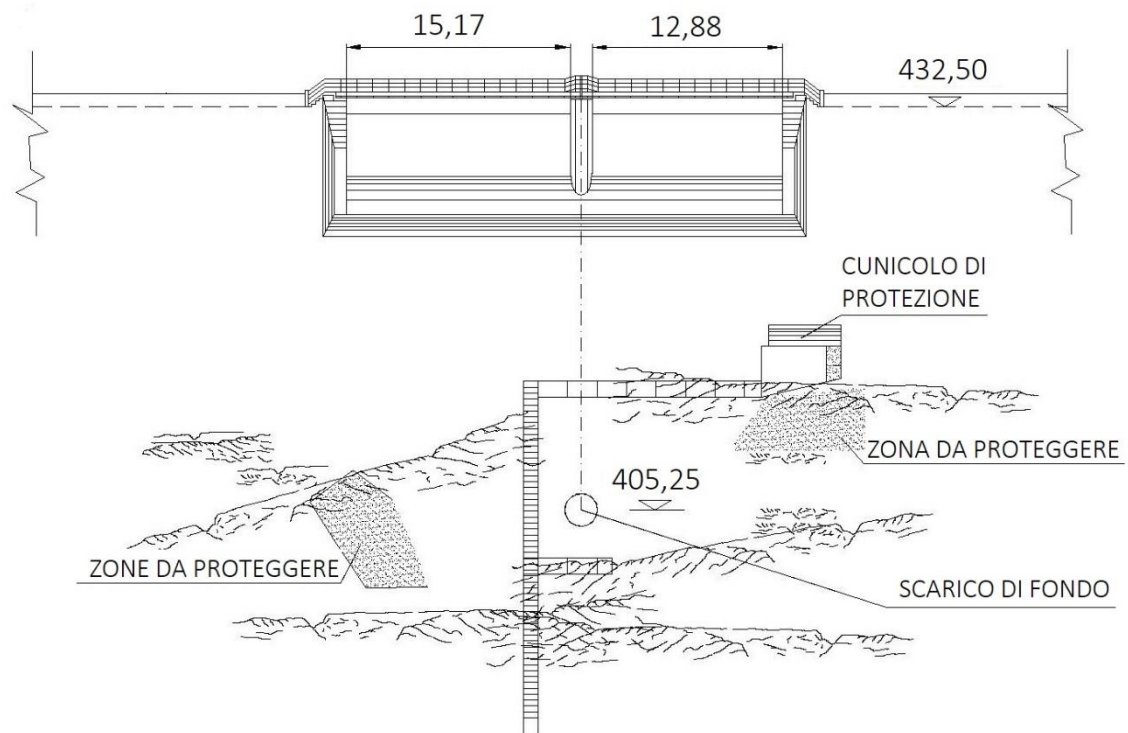


Figura 6: prospetto sfioratore centrale e scarico di fondo

3. DESCRIZIONE MODELLO IDRAULICO

I modelli idraulici in scala ridotta hanno una lunga storia di applicazione nel campo dell'ingegneria idraulica: il loro utilizzo risulta essere utile quando non è consigliabile formulare o risolvere numericamente un sistema di equazioni atto a descrivere i processi che hanno luogo nel sistema reale; tale condizione si verifica, ad esempio, quando occorre analizzare fenomeni per i quali le leggi che ne regolano la dinamica evolutiva non siano soddisfacentemente note, oppure quando la definizione dei contorni del campo di moto in termini numerici risulti problematica, oppure quando le ipotesi che condizionano la modellistica numerica si rivelino poco attendibili.

I modelli fisici, o “modelli in scala ridotta”, sono dunque oggi uno strumento indispensabile nello studio di determinati fenomeni idraulici che avvengono negli alvei fluviali o negli invasi, al fine di analizzare, come nel nostro caso, l'interazione fra la corrente d'acqua ed infrastrutture dalla geometria particolarmente complessa; la loro realizzazione è tuttavia complessa e vincolata alla disponibilità di idonee strumentazioni ed attrezzature di laboratorio.

Seguono due immagini rappresentanti prototipo e modello fisico della “Oroville Dam”, la più alta diga degli Stati Uniti d'America (oltre 230 m), dove i due canali (principale e secondario) sono stati oggetto di numerosissimi studi successivamente alla loro crisi nel febbraio 2017.



Figura 7: prototipo Oroville Dam



Figura 8: modello fisico Oroville Dam

Enel Green Power, ente gestore dell'invaso, ha commissionato al Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino la realizzazione del modello in scala 1:40 della diga di Gurzia: quest'ultimo è stato costruito all'interno del laboratorio "G.Bidone" del Dipartimento di Idraulica del Politecnico di Torino.

La costruzione fisica del modello è stata suddivisa in una serie di fasi lavorative: inizialmente è stato costruito il corpo diga, mentre successivamente i lavori si sono concentrati in primo luogo sulla realizzazione del primo tratto vallivo, e secondariamente sulla costruzione del secondo tratto vallivo: si è deciso di suddividere in due parti il tratto di valle così da attribuire al primo tratto, di maggior importanza rispetto al secondo in quanto principale responsabile della dissipazione del flusso idrico, una precisione maggiore.

In fase conclusiva sono stati creati e posizionati lo sfioratore laterale esistente ed il nuovo scarico di superficie.

Tali fasi costruttive sono descritte nel dettaglio nei seguenti paragrafi nel dettaglio.

3.1. Realizzazione del corpo diga e dei tratti vallivi

La realizzazione di tali tratti è stata resa possibile grazie ai dati morfologici della zona forniti da ENEL agli ingegneri del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI): tali misurazioni sono state effettuate tramite un rilievo dell'area d'interesse realizzato mediante apposita strumentazione (laser scanner) le quali, mediante successiva elaborazione dei dati effettuata dall'ing. Andrea Cagninei, hanno permesso di ottenere un modello digitale del terreno che ha permesso la ricostruzione delle isoipse.

Il modello è stato costruito in posizione adiacente ad una vasca di carico metallica così da ricostruire in maniera dettagliata l'invaso a monte della diga: il serbatoio, di forma rettangolare, è caratterizzato da dimensioni in pianta pari a 270x520 cm, e da un'altezza pari a 185 cm.



Figura 9: serbatoio metallico

La prima fase costruttiva, come illustrato nella seguente immagine rappresentante lo scheletro della prima porzione del tratto di valle, è stata incentrata sul posizionamento di 11 lamiere opportunamente sagomate secondo l'andamento del terreno, ognuna delle quali rappresenta una linea isoipsa, luogo dei punti aventi la medesima quota misurata sul livello del mare.

Tra una linea e l'altra è stato adottato un passo di 10 cm, corrispondente a 4 m nella realtà.



Figura 10: lamiere sagomate di valle

Successivamente al posizionamento di tali lamiere, nella parte più esterna tra una lamiera e l'altra sono stati inseriti blocchi di calcestruzzo cellulare, apparentemente simili al polistirolo, al fine di migliorare la stabilizzazione della struttura rendendola maggiormente rigida: la scelta di utilizzare questa tipologia di materiale può essere giustificata in quanto i blocchi di calcestruzzo cellulare garantiscono innumerevoli vantaggi tra cui l'isolamento (non è necessario ricorrere ad ulteriori soluzioni isolanti), una buona permeabilità al vapore, ed una notevole leggerezza derivante dalla sua struttura alveolare.

Nella parte più interna della valle ed in corrispondenza dei vuoti è stato inserito un mix di schiuma e fil di ferro in maniera tale da ridurre l'indice dei vuoti delle pareti vallive, ed incrementare la stabilità delle stesse preparandole al successivo rivestimento con calcestruzzo.

Nelle due figure successive sono illustrate la fase di riempimento appena descritta e la successiva fase di posa del cemento, effettuata dall'ing. Riccardo Vesipa.



Figura 11: fase di riempimento delle pareti di valle



Figura 12: posa del calcestruzzo

Una volta terminata la realizzazione del primo tratto vallivo si è passati al completamento delle sezioni immediatamente successive le quali, come già detto in precedenza, risultano essere caratterizzate da una precisione minore: in tal caso, la costruzione del secondo tratto vallivo è stata condotta mediante realizzazione di 21 sezioni perpendicolari all'asse del torrente adottando un passo di 20 cm tra una lamiera e la successiva, distanza corrispondente a 8 m nella realtà.

Sfruttando i disegni Autocad rappresentanti le varie sezioni di valle, forniti da ENEL al DIATI, è stato possibile ricostruire i profili metallici con altissima precisione: l'accuratezza di tali profili è stata ottenuta mediante apposita procedura di taglio al plasma con pistola dove quest'ultimo è fondamentale nel conferire calore al materiale metallico fino a portarlo alla temperatura di fusione rompendo così la continuità della lamiera. Al fine di incrementare la resistenza e la compattezza strutturale del modello sono stati inseriti dei blocchi di calcestruzzo forato tra una sezione e l'altra, e del materiale di riempimento al fine di ridurre il più possibile la percentuale di vuoti.



Figura 13: posa delle lamiere del secondo tratto di valle

Come nella precedente fase, anche in questa porzione di modello è stata curata la fase di ricoprimento dello stesso mediante uno strato di calcestruzzo, rivestendolo con una membrana elastomerica per rendere il fondo impermeabile all'acqua così da impedire eventuali infiltrazioni della stessa nelle porosità del calcestruzzo.

Ultimata la costruzione del modello fisico, sono state eseguite le ultime rifiniture in maniera tale da rendere efficace e funzionale lo stesso: nella successiva immagine è rappresentato il completamento della valle, in cui è possibile notare il rivestimento delle parti di lamiera esposte all'acqua mediante apposita vernice antiruggine di color rosso.



Figura 14: completamento della valle

3.2.Posizionamento dello sfioratore laterale

Una volta terminata l'intera valle si è passati all'installazione dello sfioratore laterale, principale organo di scarico della diga, in corrispondenza del versante orografico sinistro: esso risulta essere caratterizzato da un profilo Creager e da una lunghezza della soglia sfiorante pari a 112 cm, mentre per la sua realizzazione è stato scelto un materiale polimerico, diversamente da quello scelto nel prototipo, il calcestruzzo.

Si riportano nella successiva tabella le caratteristiche dello sfioratore nel prototipo:

Portata massima evacuabile	923,00 m ³ /s
Quota portata millenaria	432,00 m s.l.m.
Quota di massimo invaso	430,00 m s.l.m.
Quota di massima regolazione	427,50 m s.l.m.
Lunghezza reale	44,80 m

Tabella 5: caratteristiche sfioratore laterale

Nelle successive immagini è possibile ammirare una vista frontale dello sfioratore laterale, ed il funzionamento dello stesso:

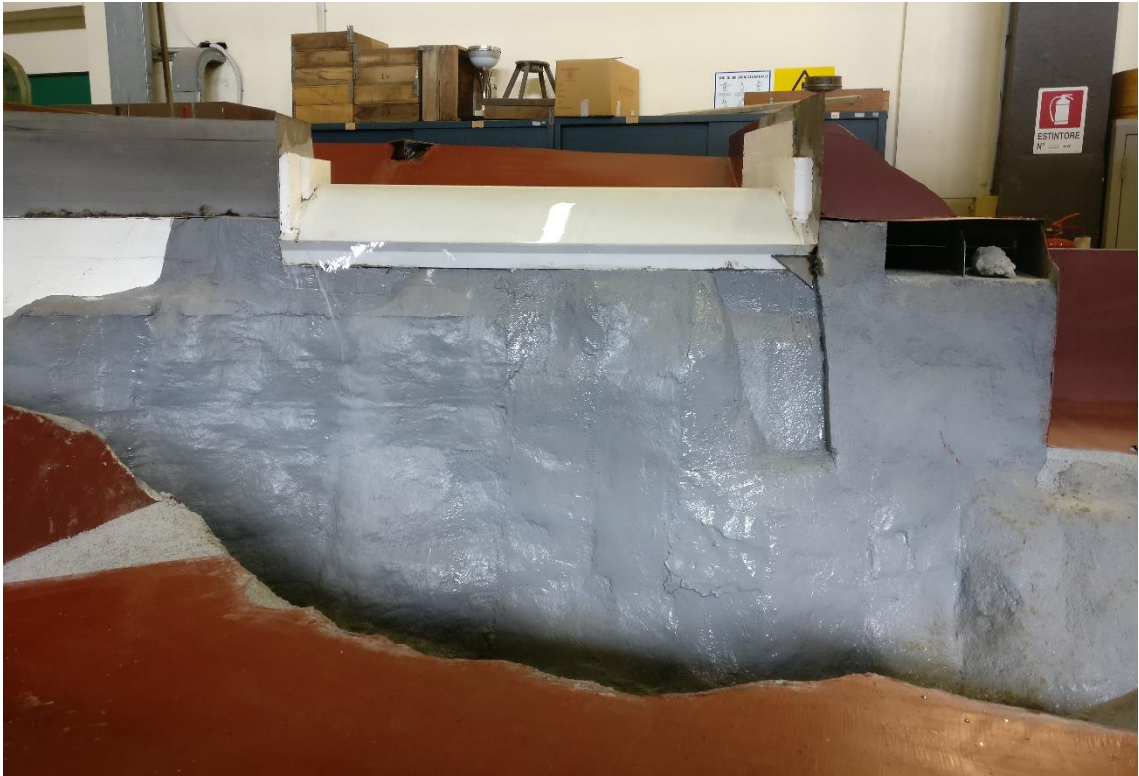


Figura 15: vista frontale sfioratore laterale



Figura 16: funzionamento sfioratore laterale

3.3.Posizionamento dello sfioratore centrale in corpo diga

Lo scarico di superficie, è stato posizionato in corrispondenza del corpo diga in un secondo momento, in maniera tale da consentire inizialmente lo studio della lama d'acqua sfiorante dallo sfioratore laterale (configurazione attuale).

Successivamente, al fine analizzare la configurazione progettuale, è stato creato mediante tecnologia di stampa 3D lo scarico di superficie, comprendente anche le 3 pile così da riprodurre in modo dettagliato la vena liquida defluente da tale organo: esso è stato progettato in modo tale da adottare un profilo Creager cautelativo, con i pilastri che sono stati opportunamente sagomati così da contenere quanto più possibile le contrazioni laterali; anche in questo caso, l'opera è stata realizzata in materiale polimerico ed è caratterizzata da una luce netta depurata dall'ingombro della pila intermedia pari a 72,5 cm.

Si riportano nella seguente tabella le caratteristiche dello sfioratore nel prototipo:

Portata massima evacuabile	436,00 m ³ /s
Soglia di progetto	428,00 m s.l.m.
Lunghezza reale	29,00 m

Tabella 6: caratteristiche sfioratore centrale

Nella figura 17 è rappresentato lo sfioratore centrale in corrispondenza del corpo diga.



Figura 17: vista frontale scarico di superficie

Una volta installato lo sfioratore di progetto, in un primo momento è stato limitato l'utilizzo dello sfioratore laterale evitando l'ingresso del flusso al suo interno mediante opportune pareti di lamiera così da soffermarsi sullo studio del solo scarico di superficie isolandolo dal restante contesto idraulico, ed in un secondo momento è stata studiata la configurazione di progetto, la quale prevede l'utilizzo combinato dei due.

Nella successiva immagine è rappresentato il funzionamento combinato dei due organi di scarico:



Figura 18: funzionamento degli sfioratori

3.4. Vasca di carico e sistema di pompaggio

Come già accennato all'inizio del capitolo, l'invaso è stato ricostruito realizzando una vasca di carico a monte della diga: il serbatoio, di forma rettangolare, su tre lati è costituito da pannelli metallici, mentre il quarto, a contatto col paramento ad arco della diga, è stato opportunamente sagomato in maniera tale da ottenere un collegamento tra vasca e sfioratori così da consentire l'ingresso della corrente in corrispondenza di quest'ultimi. L'intera vasca è dunque costituita da lamiere saldate, con i punti di discontinuità tra una lamiera e l'altra che sono stati sigillati col mastice, colla liquida che fa presa sul materiale su cui è applicata riducendo il più possibile le perdite verso l'esterno della vasca.

L'intero laboratorio di idraulica include un canale posto al di sotto del piano di calpestio alimentato da una serie di pompe presenti al suo interno le quali, ricevendo energia meccanica prodotta da un qualsiasi organo meccanico in movimento, sfruttano tale energia per sollevare differenti quantitativi d'acqua da un livello inferiore ad uno superiore e conferendo all'acqua una spinta.

Tale principio viene sfruttato per alimentare la vasca di carico, dove tale processo è reso possibile grazie alla presenza di due pompe che sollevano l'acqua presente nel canale e la convogliano al serbatoio stesso mediante opportune condotte; terminata la fase di riempimento della vasca, coincidente col raggiungimento di un livello pari a quello di massima regolazione, l'acqua inizia a stramazzare dagli sfioratori percorrendo il tratto a valle dello sbarramento e terminando il suo percorso in corrispondenza di un imbocco metallico costruito per convogliare la portata defluente nel canale di ricircolo presente al di sotto del piano di calpestio del laboratorio.

La potenza di tali pompe è pari a 20 KW e 40 KW, ed entrambe sono dotate di inverter, un dispositivo che permette di gestire la variazione di velocità del motore incidendo dunque sulla variazione di frequenza: tale apparecchio, consente dunque la regolazione di velocità con la portata può essere facilmente regolata aumentando o diminuendo la frequenza all'interno del range 35/50 hertz, ottenendo inoltre significativi risparmi energetici in quanto la pompa stessa viene utilizzata per le effettive richieste del sistema idraulico; tuttavia non sempre vengono adoperati gli inverter nei sistemi di pompaggio visto l'elevato costo di tale apparecchiatura.

Ritornando alla potenza delle pompe occorre precisare che la prima è stata utilizzata nella prima fase di lavoro dove sono stati studiati singolarmente gli sfioratori, e per il quale non occorre raggiungere portate al di sopra di 90 l/s; la seconda, caratterizzata dal doppio della potenza rispetto alla prima, è stata utilizzata secondariamente nello studio della diga nella sua configurazione di progetto, dunque con l'utilizzo combinato dei due sfioratori dove è stato necessario raggiungere una portata pari a 135 l/s. Ciascuna pompa è dotata di misuratore di portata ad ultrasuoni che permette di conoscere con buona precisione il valore di portata defluente, leggibile tramite display: mediante tali dispositivi è possibile misurare la portata volumetrica di gas e liquidi indipendentemente da parametri quali la conducibilità elettrica, la pressione, la temperatura o la viscosità, con la sezione del tubo che non presenta ostruzioni o variazioni sezionali così da annullare le perdite di carico; tale metodologia si avvale di due sensori, posti frontalmente nel tubo di misura, dove ciascuno dei due è in grado di trasmettere e ricevere segnali ad ultrasuoni in maniera alternata, misurando contemporaneamente il tempo di transito del segnale, il quale risulta essere direttamente proporzionale alla portata.

Nella seguente immagine è rappresentata la pianta dello schema di alimentazione della vasca di carico:

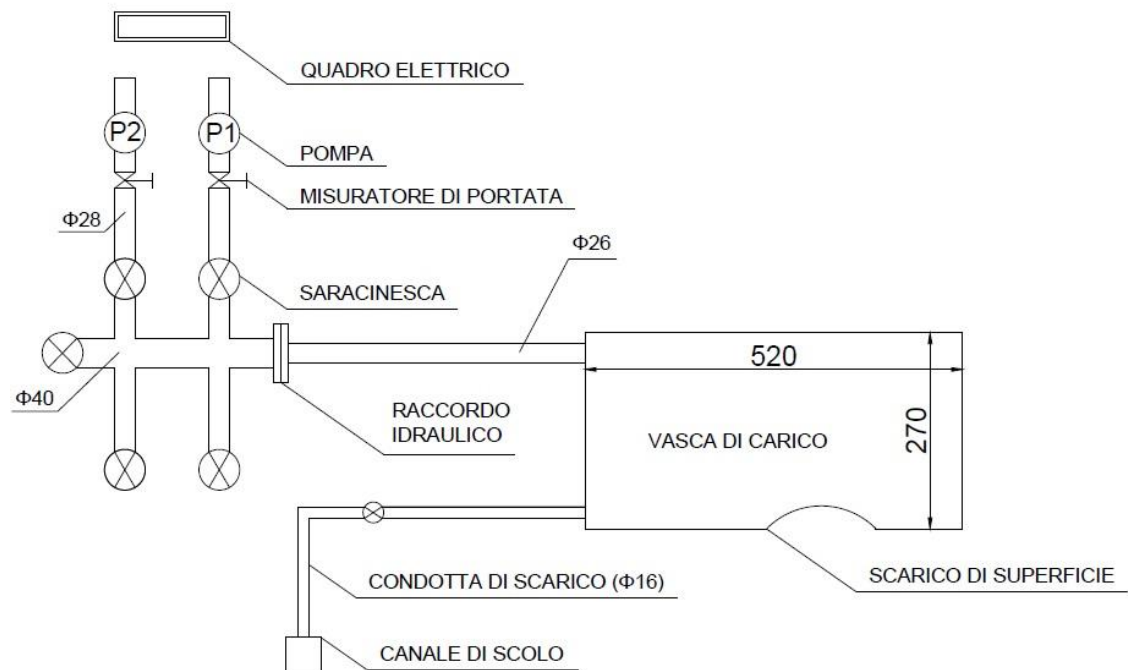


Figura 19: schema alimentazione della vasca di carico

Una volta stabilito quale pompa occorre utilizzare, nel disegno indicate con P1 e P2, rispettivamente caratterizzate da potenze pari a 20 KW e 40 KW, è possibile innescare il pompaggio mediante l'accensione di una delle due direttamente dal quadro elettrico, con l'acqua pompata che viene convogliata verso la vasca di carico mediante una serie di condotte in acciaio; per svuotare la vasca di carico, occorre ruotare in senso antiorario la saracinesca posta in corrispondenza del canale di scolo indicata in figura.

3.5.Strumentazione di misura

Per una misurazione precisa del battente idrico durante le varie configurazioni di prove al variare della portata defluente, procedura necessaria per il tracciamento delle curve di deflusso, le quali verranno approfondite nei successivi capitoli, sono stati posizionati due misuratori nonio: essi sono dei dispositivi dotati di una scala graduata che serve per valutare le frazioni dell'unità di misura, fornendo valori con una precisione del decimo di millimetro se la superficie è indisturbata.

I due sono stati posizionati in corrispondenza della vasca di carico, un primo all'interno di quest'ultima in una zona il più indisturbata possibile, ed un secondo all'esterno della vasca, all'interno di un piezometro: la scelta di posizionare due strumenti si traduce nel fatto di avere una duplice lettura dei battenti, favorendo così individuazione di eventuali errori grossolani, e sfruttando la maggior attendibilità dei risultati estrapolati dal nonio indisturbato, al contrario di quelli relativi al nonio posto internamente alla vasca le cui misurazioni risultano essere notevolmente influenzate dalla turbolenza prodotta dalle condotte di alimentazione della vasca di carico.

Il nonio risulta essere costituito da un'asta graduata e da un corsoio mobile, con la parte terminale dell'asta includente una punta metallica che nella misurazioni deve essere posta a contatto con il pelo libero della vasca: per effettuare una corretta valutazione della lettura, il valore del centimetro (segnato numericamente) e del millimetro (determinabile valutando la numerazione delle tacche successive al valore centimetrico letto) possono essere letti in corrispondenza dell'asta graduata, mentre la seconda cifra decimale può essere ricavata contando il numero delle tacche che intercorrono tra lo zero del corsoio e la tacca dello stesso coincidente con quella dell'asta graduata.

4. LEGGI TEORICHE

Di seguito verranno approfondite le leggi teoriche alla base delle varie fasi trattate nel suddetto elaborato.

4.1. Sforatori superficiali

Gli sfioratori superficiali, o scarichi di superficie, sono delle importanti opere accessorie presenti nelle dighe le quali devono essere progettate in maniera tale da provvedere ad una serie di funzionalità, tra cui:

- Garantire lo svuotamento del serbatoio d'acqua creato a monte della diga;
- Mantenere il livello d'acqua prefissato nel serbatoio;
- Includere la possibilità di incanalare parte dell'acqua per destinarla all'uso idroelettrico o per fini di irrigazione.

La loro realizzazione è sede di particolare attenzione da parte dei progettisti poiché assicurano il corretto funzionamento dell'opera: come nel nostro caso, risultano spesso affiancati da scarichi di fondo o scarichi di esaurimento.

In questo paragrafo verrà approfondito il funzionamento teorico dello sfioratore laterale, denominato anche stramazzo longitudinale, il quale è caratterizzato da una soglia sfiorante orizzontale dalla quale la corrente cade libera nell'aria o è derivata da un canale a pelo libero sviluppato lungo la stessa direzione; esso può essere praticato su una o entrambe le sponde di un canale con lo scopo di sfiorare l'eccesso di portata in arrivo da monte rispetto ad un valore prestabilito senza causare danni alle opere o tracimazioni del coronamento diga.

Gli scarichi superficiali possono essere a soglia fissa, come nel nostro caso, oppure a soglia variabile, con questa ultima condizione realizzabile mediante adozione di paratoie al di sopra della soglia sfiorante consentendo in questo modo la riduzione delle dimensioni dello scarico a parità di portata, con un conseguente incremento del livello di ritenuta e quindi del volume di invaso disponibile: tale soluzione non sempre appare consigliabile vista l'onerosità degli interventi manutentivi indispensabili alla sicurezza del funzionamento, ma in determinate situazioni il suo utilizzo è necessario, con la possibilità di adottare delle tipologie "gonfiabili", ovvero grosse condotte in materiale plastico (PVC) poste in corrispondenza della soglia di tracimazione che vengono gonfiate con aria o acqua in pressione in relazione all'andamento dei livelli di invaso.

Per determinare le leggi utilizzabili per gli organi di scarico presenti nel modello è necessario collegarsi al concetto di foronomia, parte dell'idraulica che si occupa di studiare l'efflusso di una vena liquida attraverso una luce presente in una parete, dove quest'ultima non è altro che un'apertura dalla quale fuoriesce una corrente liquida detta "vena liquida"; in base alle loro caratteristiche, le luci si dividono in:

- "a battente", se tutto il suo contorno si trova ad una quota inferiore alla superficie libera del serbatoio;
- "a stramazzo", se invece solo il bordo inferiore della luce si trova ad una quota inferiore alla superficie libera del serbatoio;
- "luci libere", se il livello idrico a valle non influenza la luce.

Nel nostro caso si parlerà di sfioratori in cui l'efflusso avviene a superficie libera: l'unica differenza tra i due organi di scarico sta nel fatto che nello studio dello sfioratore centrale posto in corpo diga occorrerà tenere conto di ulteriori effetti di contrazione della vena liquida legati alla presenza sul corpo diga stesso di due pile di estremità e di una pila centrale.

Le leggi di deflusso vengono ricavate mediante l'utilizzo del "Teorema di Bernoulli", la cui equazione è data da:

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} = h_2 + \frac{U_2^2}{2g}$$

Dove:

- h_1 e h_2 rappresentano le quote piezometriche relative alle due sezioni considerate;
- U_1 e U_2 sono le velocità della corrente in corrispondenza delle due sezioni;
- g è l'accelerazione di gravità.

Nel nostro caso si ottiene una formulazione del tipo:

$$Q = L \cdot c \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2g}$$

In cui:

- Q è la portata;
- c rappresenta il coefficiente di efflusso sperimentale dipendente dal tipo di luce e di soglia, dal valore del carico, dalle condizioni della lama stramazzone e dalle modalità di alimentazione;
- L è la lunghezza della soglia;
- h è l'altezza della lama d'acqua sul ciglio sfiorante;
- g è l'accelerazione di gravità.

Per quanto riguarda il coefficiente “c”, esso può essere estrapolato da tabelle i cui valori più comuni sono rappresentati nella seguente tabella:

Tipologia di soglia	c [-]
Larga soglia	0.385
Soglia in parete sottile	0.4
Soglia con profilo Creager	0.48 - 0.55

Tabella 7: valori coefficiente d'efflusso

Nella seguente immagine sono illustrati i profili a larga soglia e di soglia in parete sottile:

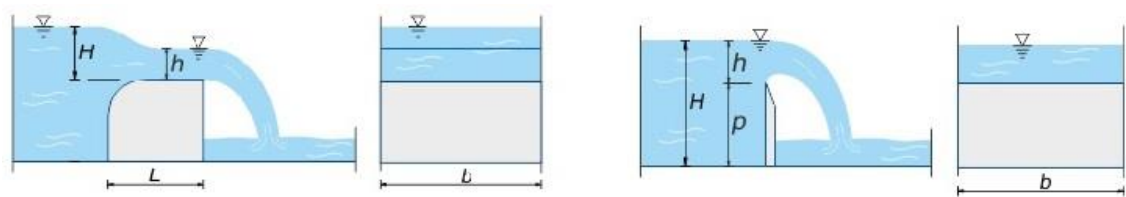


Figura 20: tipologia soglie

Il terzo profilo citato, quello Creager, lo stesso utilizzato per il progetto dello sfioratore laterale, ha lo scopo di evitare il verificarsi di depressioni al di sotto della vena effluente; tale profilo è definito dalla seguente equazione:

$$\frac{y}{h} = 0.48 \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^{1.80}$$

Segue uno schema del profilo appena descritto inquadrato all'interno di un sistema di riferimento dove h ed y rappresentano rispettivamente il battente e l'ordinata del profilo rispetto alla sommità, fondamentale per il suo tracciamento con l'espressione appena descritta:

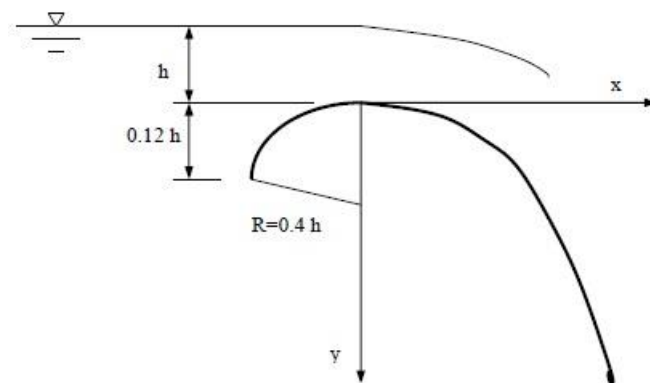


Figura 21: profilo Creager

Delle tre soglie citate si può constatare come quella relativa al profilo Creager sia caratterizzata da un coefficiente superiore agli altri due, dove ciò è dovuto al fatto che quest'ultimo non ha vena contratta ma solo portante; in generale il coefficiente d'efflusso può essere ricavato per un qualsiasi profilo tramite la seguente relazione in funzione del coefficiente χ , rapporto tra il carico h ed il carico idraulico di progetto:

$$c = \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \left[1 + \frac{4 \cdot \chi}{9 + 5 \cdot \chi} \right]$$

Tenere conto che tale espressione è valida fin quando χ è inferiore all'unità; inoltre dall'espressione scritta si può osservare come c assuma un valore massimo quando il carico è pari a quello di progetto, ed un valore minimo simile al valore di larga soglia quando h è nettamente inferiore al carico di progetto.

Come detto in precedenza, lo sfioratore centrale include una serie di pile il cui contributo deve essere preso in considerazione nel calcolo della lunghezza della soglia: si farà riferimento, infatti, ad una larghezza efficace L_e inferiore alla larghezza complessiva (lorda) dello sfioratore L dipendente dalle contrazioni che la vena liquida effluente subisce per effetto delle spalle della luce e delle suddette pile.

Il calcolo di tale lunghezza avviene tramite la seguente relazione:

$$L_e = L - N \cdot L_p - 2 \cdot (K_s + N \cdot K_p) \cdot h$$

Dove:

- K_s e K_p sono coefficienti dipendenti dalla forma delle spalle e delle pile; indicativamente si può assumere per entrambi un valore pari a 0.1 nel caso di superfici a spigolo vivo, a 0.05 per superfici arrotondate, a 0 per superfici a ogiva;
- L è la larghezza complessiva dello sfioratore;
- L_p rappresenta la larghezza del singolo pilastro;
- N è invece il numero dei pilastri.

È possibile utilizzare anche un'altra relazione in cui la lunghezza di calcolo tiene conto delle riduzioni dovute ai muri laterali ed ai pilastri centrali:

$$L' = L - N \cdot k \cdot h$$

Dove:

- L è la lunghezza effettiva;
- k è il coefficiente di forma dei pilastri;
- N rappresenta il numero delle contrazioni.

4.2. Curva di deflusso

Come è stato già accennato nell'introduzione dell'elaborato, la curva di deflusso, denominata anche “curva delle portate” o “curva battente-portata”, assumerà grande importanza nell'analisi degli sfioratori successivamente: essa esplicita il legame crescente che, in una generica sezione, ad esempio, si istituisce tra portata e tirante idrico; indicando con Q la portata e con δ il corrispondente tirante idrico, tale legame è espresso tramite la seguente relazione:

$$Q = f(\delta)$$

La portata di un corso d'acqua è definita come il volume che defluisce nell'unità di tempo attraverso una sezione data, dove la misura di tale grandezza fisica generalmente è affrontata indirettamente andando a misurare una o più grandezze fisiche ad essa legata; per quanto riguarda il tirante, si fa riferimento alla misura dell'altezza idrica nella sezione, effettuata rispetto ad un prefissato livello geometrico, ovvero lo “zero idrometrico”. Nel nostro caso il tracciamento della curva risulta essere facilitata in quanto la portata viene ricavata leggendo il generico valore in corrispondenza del misuratore di portata, mentre il tirante è misurato mediante apposita strumentazione descritta nel capitolo precedente.

Nella seguente figura è riportato l'esempio di curva delle portate: la curva rossa è stata tracciata adottando un coefficiente di efflusso costante pari a 0.48, mentre la curva blu è stata ricavata valutando tale coefficiente in base al valore del tirante con la formula precedentemente descritta.

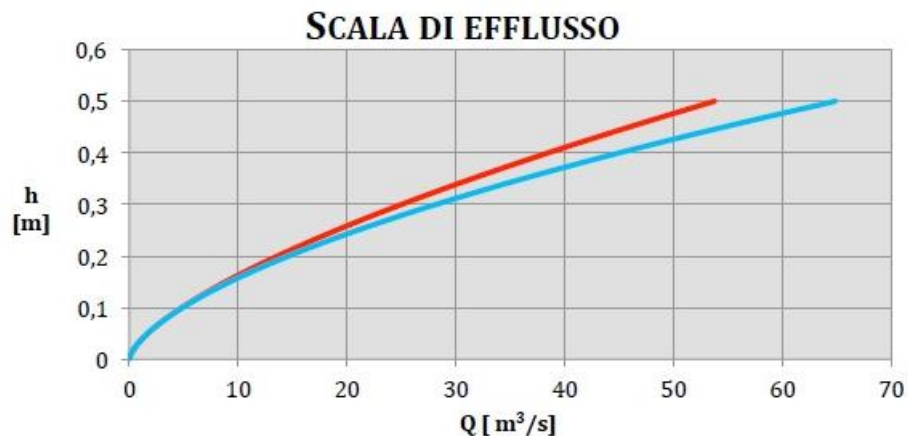


Figura 22: esempio curva delle portate

In un caso più generico come quello riguardante un corso d'acqua, il tracciamento della curva risulta essere maggiormente complicato.

Tuttavia, tenendo conto che il deflusso della corrente in un corso d'acqua avviene generalmente in condizione di moto permanente, con le condizioni idrodinamiche che sono costanti nel tempo ma variabili da sezione a sezione, ipotizzando un moto della corrente uniforme a tratti, mediante utilizzo dell'equazione di Chezy è possibile legare portata per unità di lunghezza e raggio idraulico, con quest'ultima funzione appunto del tirante idrico δ :

$$q = A \cdot \chi \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

Dove:

- $A(\delta)$ è l'area della sezione idrica;
- $R(\delta)$ è il raggio idraulico;
- i è la pendenza dell'alveo;
- χ è un coefficiente di scabrezza calcolabile, ad esempio, tramite la seguente relazione di Strickler in funzione dell'indice di scabrezza K_S e del raggio idraulico R :

$$\chi = k_s \cdot R^{\frac{1}{6}}$$

Si nota come operando le corrette sostituzioni si arriva ad un'espressione dove la portata defluente nella sezione sia proporzionale al tirante idrico secondo un prefissato esponente:

$$q \propto \delta^{\frac{3}{2}} \quad \text{(Chezy)}$$

$$q \propto \delta^{\frac{5}{2}} \quad \text{(Gauckler – Strickler)}$$

Quando al posto del tirante idrico δ si adopera il livello idrico h sopra lo zero idrometrico, la relazione tra portata e lo stesso tirante viene determinata sperimentalmente attraverso l'esecuzione di misure di portata e altezza idrometrica contemporanee in corrispondenza delle sezioni di interesse.

È tuttavia fondamentale che ai fini di una valutazione corretta di tale dato, la scala di deflusso abbia le proprietà di essere univoca ed abbia inoltre la caratteristica di essere stabile nel tempo, dove la prima è sempre assicurata dalle leggi dell'idraulica ad eccezione dei periodi transitori di moto vario, mentre per quel che attiene la stabilità della scala di deflusso nel tempo il discorso è più complesso in quanto intervengono vari fattori, di origine sia naturale che antropica, ad indurre modificazioni alla morfologia dell'asta fluviale, e quindi al regime idrometrico che in essa si instaura in occasione di eventi naturali estremi.

Per sopperire alla variabilità temporale, la quale può essere legata anche alla variazione dell'ubicazione dello strumento di misura o alla realizzazione di manufatti lungo l'alveo tali da modificare il regime dei deflussi, comportando dunque la variazione dello zero idrometrico, per rappresentare tale variabilità è possibile definire la scala di deflusso tramite la relazione proposta da Herschy (1985):

$$q = a \cdot (h - h_0)^b$$

Dove:

- a e b sono due parametri da stimare;
- h_0 esprime una stima dell'altezza dello zero idrometrico.

4.3. Modelli fisici

Nel campo dell'idraulica vengono spesso utilizzati dei “modelli matematici” per lo studio e la risoluzione dei problemi inerenti alla meccanica dei fluidi, dove essi includono un insieme di equazioni differenziali la cui integrazione dà luogo al modello numerico: si utilizzano tali modelli, ad esempio, per lo studio della propagazione delle onde di piena, l'analisi dei deflussi fluviali, la valutazione delle risorse idriche superficiali presenti sul territorio, la stima delle portate di piena, lo studio degli organi attenuatori del colpo d'ariete (casce, valvole d'aria, pozzi piezometrici, ecc.), l'analisi dei moti idrodinamici fluviali 1D o 2D a fondo fisso o mobile, ecc.

4.3.1. Introduzione

Quando vi è l'impossibilità di applicazione dei modelli matematici per la risoluzione di problemi di tipo idraulico, ad esempio per la forte irregolarità geometrica in gioco, o più in generale per l'estrema difficoltà nello scrivere equazioni in grado di descrivere un determinato fenomeno, si ricorre all'utilizzo di modelli fisici: essi indicano la riproduzione di un prototipo (nel nostro caso rappresentato da una diga, con invaso a monte ed opere accessorie a valle dello sbarramento) che può essere utilizzato per predire il comportamento del sistema in relazione ad alcune sue caratteristiche, ovvero effettuarne un vero e proprio studio idraulico; spesso risulta essere necessario costruire tali modelli, soprattutto quando i prototipi hanno dimensioni e costi elevati.

Alla base di tale metodologia vi è il concetto di rapporto di similitudine: i due fenomeni, reale e modello, devono essere governati dalle stesse leggi e devono essere definiti a priori i rapporti tra i valori delle stesse grandezze, dove questi ultimi non sono altro che le scale del modello; note le scale del modello è possibile effettuare dei confronti tra valori reali e valori ottenuti sul modello di grandezze quali spazio, tempo, portata e velocità, con il modello che diventa un vero e proprio mezzo di calcolo, oltre che di sperimentazione, in quelle particolari situazioni che renderebbero poco affidabili i risultati ottenuti per via analitica o numerica.

In idraulica tali modelli hanno trovato vasta applicazione nella ricerca sui moti ondosi e su alcuni aspetti dell'idraulica fluviale, soprattutto per quanto riguarda lo studio di fenomeni localizzati in presenza di turbolenza e condizioni orografiche particolari: oggi, l'attuale legislazione prevede che il funzionamento di alcune opere idrauliche sia verificato mediante la realizzazione di un modello fisico.

Spesso la modellazione fisica può essere affiancata e completata mediante la modellazione matematica, impiegando in maniera congiunta i due mezzi di indagine, ognuno su piani diversi e con differenti finalità: è preferibile adottare la modellazione matematica nella fase di progetto preliminare, mentre la modellazione fisica viene utilizzata in fase di progetto definitivo in maniera tale da ottenere uno studio dettagliato dell'opera.

I modelli fisici possono essere classificati in tre gruppi:

- modelli fisici simili, caratterizzati da similitudine geometrica e meccanica;
- modelli fisici distorti, in cui la distorsione applicata lungo una particolare direzione è differente da quella lungo un'altra, ovvero non persiste più lo stesso rapporto di similitudine lungo tutte le direzioni;
- modelli analogici, caratterizzati dalle stesse equazioni che reggono il fenomeno nel prototipo.

Tra i principali gruppi adimensionali utilizzati in idraulica vi sono il numero di Reynolds ed il numero di Froude.

Il primo rappresenta fisicamente il rapporto tra le forze d'inerzia e quelle viscosi agenti su una particella fluida che si muove con una certa velocità all'interno dello stesso fluido, e dev'essere considerato in quei fenomeni in cui le forze di tipo viscoso non possono essere trascurate di fronte ad altre forze in gioco nel fenomeno idrodinamico: in relazione al suo valore è possibile valutare se il flusso di scorrimento di un fluido è in regime laminare ($Re < 2000$), in regime di transizione ($2000 < Re < 4000$) o in un regime turbolento ($Re > 4000$).

Il valore del numero di Reynolds è determinabile mediante la seguente relazione:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu}$$

Dove:

- ρ è la massa volumica del fluido;
- v è la velocità di riferimento;
- μ è la viscosità dinamica;
- l è una lunghezza caratteristica del fenomeno considerato (nel caso del moto di un fluido all'interno di una tubazione, tale lunghezza caratteristica fa riferimento al diametro del condotto).

Il secondo è definito come la radice quadrata del rapporto tra la forza d'inerzia e la forza peso, e viene utilizzato nello studio delle correnti fluviali (moti a superficie libera) in particolar modo in quei fenomeni in cui predominano le trasformazioni da energia potenziale a energia cinetica: in base al valore assunto da quest'ultimo, si può capire se la corrente in una determinata sezione sia lenta ($Fr < 1$), critica ($Fr = 1$), o veloce ($Fr > 1$). Il numero di Froude è ricavabile mediante la seguente equazione:

$$Fr = \sqrt{\frac{v^2}{g \cdot l}}$$

Dove:

- g è l'accelerazione di gravità;
- v è la velocità di riferimento;
- l è la lunghezza caratteristica.

4.3.2. Modelli a Reynolds costante

Nel caso di studio delle correnti in pressione vengono adottati i modelli a Reynolds costante, per cui vale la seguente relazione:

$$\lambda_{Re} = 1, \text{ ovvero: } Re_m = Re_p$$

Ovvero il numero di Reynolds del modello è pari a quello del prototipo; trascurando gli effetti di comprimibilità, con il fluido che dunque risulta essere lo stesso nel modello e nel prototipo, ponendo dunque $\lambda_p = 1$, si ottiene:

$$\frac{v_m \cdot l_m}{\nu_m} = \frac{v_p \cdot l_p}{\nu_p}$$

Fissando con λ la scala geometrica, da questa relazione si ottengono le scale di tutte le altre principali grandezze, rappresentate nella seguente tabella:

Scala geometrica	$\lambda_L = \lambda$
Scala delle velocità	$\lambda_V = \lambda^{-1}$
Scala delle scabrezze	$\lambda_\tau = \lambda$
Scala delle accelerazioni	$\lambda_a = \lambda^{-3}$
Scala delle portate	$\lambda_Q = \lambda$
Scala dei tempi	$\lambda_t = \lambda^2$

Tabella 8: Similitudine di Reynolds: scala delle principali grandezze

4.3.3. Modelli a Froude costante

Nello studio delle correnti a peli libero, dove i problemi maggiormente affrontati mediante modellazione fisica sono l'analisi di fenomeni bidimensionali o tridimensionali, lo studio inerente alla propagazione delle onde, o indagini di effetti localizzati dovuti alla presenza di opere idrauliche, si fa riferimento ai modelli a Froude costante.

Gli effetti di comprimibilità sono costantemente trascurabili, mentre gli effetti legati alla tensione superficiale devono essere presi in considerazione in alcune circostanze; vi è inoltre l'impossibilità di eliminare la gravità dalla lista dei parametri di controllo.

In questi modelli, è valida la seguente espressione:

$$\lambda_{Fr} = 1, \text{ ovvero: } Fr_m = Fr_p$$

Ovvero il numero di Froude del modello è pari a quello del prototipo; dunque si ha:

$$\sqrt{\frac{v_m^2}{g \cdot l_m}} = \sqrt{\frac{v_p^2}{g \cdot l_p}}$$

Fissando con λ la scala geometrica e mantenuto invariato il fluido, da questa relazione si ottengono le scale di tutte le altre principali grandezze, elencate nella seguente tabella:

Scala geometrica	$\lambda_L = \lambda$
Scala delle velocità	$\lambda_V = \lambda^{1/2}$
Scala delle scabrezze	$\lambda_r = \lambda$
Scala delle accelerazioni	$\lambda_a = 1$
Scala delle portate	$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$
Scala dei tempi	$\lambda_t = \lambda^{1/2}$

Tabella 9: Similitudine di Froude: scala delle principali grandezze

Il modello fisico oggetto di tale elaborato è un modello a Froude=cost, con $\rho=\mu=\text{cost}$, dove la scala del modello λ , dalla quale saranno ricavabili tutte le altre relazioni, è espressa dalla seguente relazione:

$$\lambda = \frac{1}{40}$$

4.4. Correnti bifase aria-acqua

Nella meccanica dei fluidi, una corrente bifase è un flusso costituito da un gas e da un liquido, nel nostro caso aria ed acqua: esso può verificarsi in varie forme, come i flussi che passano dalla fase liquida alla fase costituita da vapore successivamente ad un riscaldamento esterno, oppure flussi bifase separati in cui è presente una fase portante continua (gas o liquido) ed una seconda fase sotto forma di goccioline o bolle.

4.4.1. Introduzione

Nei flussi a superficie libera caratterizzati da alta velocità sono presenti grandi quantità d'aria scambiati in corrispondenza di tale superficie, con l'introduzione di un flusso bifase comprimibile la cui densità complessiva dipende dalle densità di aria ed acqua, e dalla frazione di vuoto.

Nell'ingegneria idraulica, il fenomeno di addentramento dell'aria all'interno di un flusso inizialmente costituito da sola acqua, il quale prende il nome di "areazione del flusso", ha come diretta conseguenza quella di provocare un rigonfiamento del flusso ed una modulazione della turbolenza, oltreché prevenire o ridurre il danno causato dalla cavitazione, portando ad una riduzione della resistenza stessa o al potenziamento del tasso di dissipazione di energia cinetica turbolenta.

Tali aspetti risultano essere fondamentali all'interno della progettazione idraulica, infatti i costruttori devono tenere conto degli effetti dell'aerazione del flusso, fondamentale per un corretto funzionamento dell'infrastruttura stessa e quindi per la sua stabilità; tale fenomeno è inoltre osservabile sia nelle piccole sia nelle grandi strutture idrauliche, come i corsi d'acqua piovana, i condotti sotterranei, i pozzi, gli scivoli di scarico, gli sfioratori, ecc.

È noto come nella maggior parte delle applicazioni inerenti al campo dell'ingegneria idraulica, i flussi turbolenti siano caratterizzati da un comportamento quasi imprevedibile, con un ampio scettro di fluttuazioni di velocità: alla superficie libera, infatti, lo scambio di aria ed acqua è guidato dalla turbolenza presente all'interfaccia aria-acqua, con la rottura della superficie che si verifica quando le sollecitazioni turbolente di taglio sono maggiori della tensione superficiale inducendo così il trascinamento dell'aria all'interno della corrente stessa.

L'intrattenimento dell'aria può verificarsi sia in correnti discontinue che continue in corrispondenza della superficie libera: queste due prendono rispettivamente il nome di "aerazione singolare" e "aerazione interfacciale": la prima tipologia si verifica ad esempio nei salti idraulici che avvengono negli sfioratori e nei fiumi in piena, la seconda è presente ad esempio a valle degli sfioratori.

La seguente immagine mostra un esempio del fenomeno di aerazione interfacciale a valle dello sfioratore della diga di Wivenhoe (Queensland):



Figura 23: esempio di aerazione a valle di uno sfioratore

4.4.2. Aspetti teorici per la descrizione delle correnti aerate

Quando c'è una netta interfaccia tra fluidi immiscibili, le equazioni che governano i flussi multifase gas-liquido alla micro-scala possono essere derivate per ciascuna fase, con le equazioni della conservazione per acqua ed aria che sono date da:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial (\rho_w \cdot v_{wi})}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial (\rho_a \cdot v_{ai})}{\partial x_i} = 0$$

dove gli indici a e w si riferiscono rispettivamente alle proprietà di aria ed acqua, v rappresenta la componente di velocità istantanea, p è la pressione istantanea; tali equazioni possono essere poi sviluppate in maniera tale da introdurre un tensore istantaneo degli sforzi τ_{ij} .

Un approccio alternativo si basa sulla media delle due precedenti equazioni:

$$\frac{\partial ((1-C)\rho_w \cdot V_{wi})}{\partial t} + \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial ((1-C)\rho_w \cdot V_{wi} \cdot V_{wj})}{\partial x_j} = -(1-C) \frac{\partial P}{\partial x_i} + (1-C) \frac{\partial P}{\partial x_j} +$$

$$+ (1-C)\rho_w \cdot g + \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial ((1-C)(T_{wij} + T_{wij}^{(EA)}))}{\partial x_j} + M_{wi}$$

$$\frac{\partial (C\rho_a \cdot V_{ai})}{\partial t} + \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial (C\rho_a \cdot V_{ai} \cdot V_{aj})}{\partial x_j} = -C \frac{\partial P}{\partial x_i} + C \rho_a \cdot g + \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial (C(T_{aij} + T_{aij}^{(EA)}))}{\partial x_j} +$$

$$+ M_{ai}$$

Dove C rappresenta la frazione di vuoto mediata, V e P sono rispettivamente velocità media e pressione, T_{ij}^{EA} rappresenta il tensore degli sforzi mediato, mentre M è la forza risultante delle interazioni tra le fasi.

Le equazioni scritte non sono altro che la Legge di Navier Stokes nel caso di correnti bifase: operando un confronto tra le due è possibile constatare come le prime due equazioni sono delle espressioni più semplici rispetto alla terza e quarta equazione che introducono termini aggiuntivi rispetto alle precedenti, tanto che per ottenere una chiusura matematica è necessario introdurre nuove equazioni.

4.4.3. Evidenze sperimentali

Gli studi analitici e numerici dei flussi aerati nell'ingegneria idraulica hanno rilevato la complessità del fenomeno considerando il gran numero di equazioni rilevanti e parametri in gioco: la conoscenza attuale di tale parte dell'idraulica dipende in gran parte dalle indagini di laboratorio in condizioni di flusso controllato (Wood 1991, Chanson 1997), fondamentale per gli sviluppi odierni dei modelli numerici e la loro validazione.

Occorre approfondire il discorso legato all'analisi dimensionale ed alla modellizzazione fisica dei flussi aerati: quest'ultima può ovviamente fornire informazioni sul movimento della corrente se effettivamente esiste una similitudine dinamica adeguata; considerando un getto circolare e verticale caratterizzato da un certo spessore d , lunghezza di getto libero L e la velocità V_0 , un'analisi dimensionale semplificata produce in prima approssimazione una dipendenza del fenomeno dai seguenti parametri:

- frazione di vuoto C ;
- velocità interfacciale V ;
- velocità turbolenta caratteristica v ;
- tasso di conteggio delle bolle F , definito come il numero di bolle rilevate al secondo in un piccolo volume di controllo;
- dimensione caratteristica della generica bolla d_{ab} ;
- scale di tempo e lunghezze turbolente, rispettivamente T_{int} e L_{int} ;
- viscosità dinamica μ_w ;
- tensione superficiale tra aria ed acqua σ

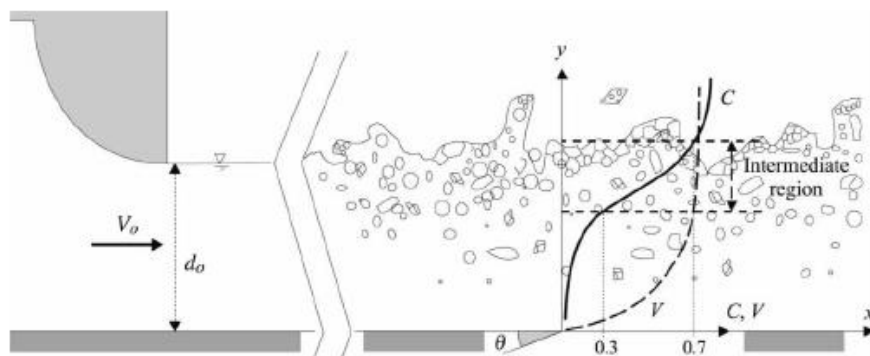


Figura 24: schema del flusso aerato a valle di una presa di fondo

È importante sottolineare che i flussi a superficie libera, ma anche i flussi di corrente derivanti da sfioratori a scivolo, ad esempio, sono studiati sulla base della similitudine di Froude: tuttavia, tenendo conto che i flussi turbolenti di taglio sono dominati da effetti viscosi, mentre i meccanismi di rottura delle bolle d'aria sono governati dalla tensione superficiale, affinché venga raggiunta una somiglianza dinamica nello studio del flusso aerato occorre che numero di Froude, numero di Reynolds, e numero di Morton (funzione di g , μ_w , σ e ρ_w) siano identici nel modello e nel prototipo.

Si riporta la relazione per il calcolo del numero di Morton:

$$Mo = \frac{g \cdot \mu_w^2}{\rho_w \cdot \sigma^4}$$

Chiaramente è impossibile ottenere questa similitudine in un modello fisico simile come quello studiato in questo elaborato, in quanto tale condizione è verificata solo per il numero di Froude, viste le proprietà del modello della diga di Gurzia, e per il numero di Morton, costante nella maggior parte dei sistemi idraulici vista la sua dipendenza dalle sole caratteristiche dei due fluidi, ma non lo è per il numero di Reynolds, nettamente inferiore nel modello rispetto ai valori assunti nel prototipo.

Alcuni studi hanno studiato le condizioni di flusso aerato considerando dei modelli geometrici simili che rispettassero le similitudini di Froude e Morton in condizioni di flusso controllato così da valutare gli effetti di scala associati: un esempio di questa trattazione riguarda lo studio di getti verticali, salti idraulici, sfioratori, ecc. I risultati ottenuti hanno confermato delle limitazioni per quanto riguarda la similitudine dinamica e la conseguente modellizzazione fisica del flusso bifase: infatti non possono essere trascurati effetti quali la distribuzione della frazione di vuoto e la turbolenza, tenendo conto che alcuni parametri, ad esempio la dimensione caratteristica delle bolle, vengono influenzate dagli effetti di scala anche in modelli caratterizzate da piccole scale (1:2, 1:3, ecc.)

Se le distribuzioni spaziali delle proprietà del flusso in vari istanti temporali o in determinate posizioni spaziali possono essere ottenute tramite trasformazioni di similitudine si parla di “auto-similitudine” intesa come proprietà di un particolare processo (Barenblatt 1996): essa è stata testata nello studio delle distribuzioni delle proprietà di flusso bifase aria-acqua in corrispondenza degli sfioratori a gradini dove, nonostante l'impossibilità di ottenere nel modello una dinamica rappresentativa del prototipo per via dell'elevato numero di parametri adimensionali coinvolti, sono state ottenute varie relazioni auto-simili che rimangono invariate indipendentemente dalla scala del modello.

I risultati di tali studi hanno messo in risalto come alcune proprietà del flusso aerato sono più influenzate dagli effetti di scala rispetto ad altre; nella seguente figura sono mostrati due esempi relativi a delle relazioni auto-simili determinate.

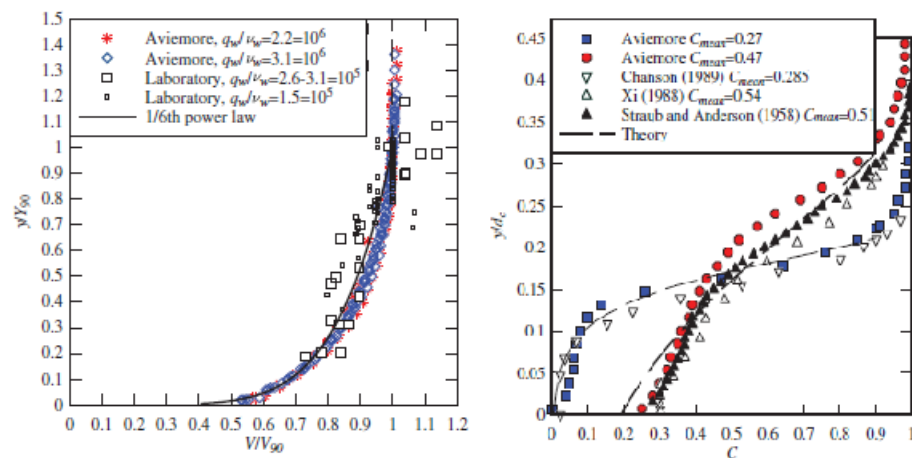


Figura 25: relazioni auto-simili

Si nota dal primo grafico la determinazione di una relazione, espressa tramite legge di potenza, relativa alla distribuzione della velocità interfacciale di un flusso bifase in corrispondenza dello scivolo di uno sfioratore, dove V_{90} rappresenta la velocità caratteristica per il tirante Y_{90} , quello in corrispondenza del quale si ha un valore della frazione dei vuoti C pari a 0,90.

Il valore di C può essere ricavato dal secondo grafico, cui l'andamento rappresenta la distribuzione adimensionale delle frazioni di vuoti in corrispondenza di canali di scarico.

4.4.4. Metrologia

In un flusso a superficie libera, la frazione dei vuoti può assumere percentuali variabili comprese tra 0 e 100%: una serie di analisi hanno dimostrato che per valori di C inferiori al 95% i flussi gas-liquido ad alta velocità si comportano come una miscela quasi omogenea con le due fasi che viaggiano a velocità molto simili tra loro, con la velocità di scorrimento dunque trascurabile.

Tuttavia, essendo tale fenomeno caratterizzato da un certo numero di parametri coinvolti significativamente più grande rispetto a quelli per un flusso monofase, alcuni di questi non possono essere facilmente misurati: quanto il coefficiente C è inferiore al 5%, alcuni di questi parametri, ad esempio la velocità istantanea, possono essere misurati tramite strumenti fotografia, tubo di Pitot o tramite tecnica anemometria laser doppler (LDA).

Negli ultimi 40 anni, gli esperimenti di maggior successo sono stati condotti tramite l'utilizzo degli "aghi-sonda", uno strumento che permette di investigare sulle caratteristiche in termine di rilevamento di fase e sull'evoluzione spaziale di una corrente bifase, progettata a forma di ago in maniera tale da forare le bolle e le goccioline.

Inizialmente questi erano costituiti da sensori di resistività, prestando particolare attenzione alla dimensione del sensore, da cui dipendeva la qualità del segnale in uscita, con diametri dell'ago variabili in funzione della velocità di flusso: nel caso di studio di un flusso ad alta velocità, dove queste ultime variano da 1 m/s fino a 20 m/s, il diametro è dell'ordine di 0,1/0,5 mm, mentre per velocità più basse possono essere utilizzati aghi di spessore inferiore a 0,1 mm.

Successivamente è stata introdotta la “sonda a doppia punta”, dispositivo che fornisce informazioni sulla velocità interfacciale e sulla turbolenza, dove le due caratteristiche principali sono la distanza di separazione longitudinale e trasversale dei sensori: nella prima parte della figura è illustrato il funzionamento della sonda a doppia punta e la conseguente intercettazione della bolla; nella seconda parte si nota l'andamento del segnale, con una forte caduta di quest'ultimo in corrispondenza della generica bolla trafitta dalla punta stessa.

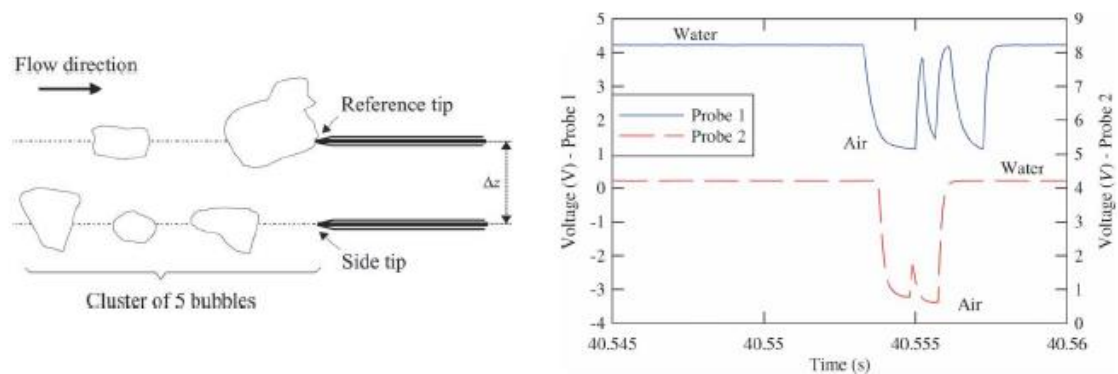


Figura 26: funzionamento dell'ago a doppia punta

Il segnale captato viene trasformato poi in una serie temporali di frazioni di vuoto istantanee con valore nullo in presenza di acqua e valore unitario in presenza di aria, con la conseguente media aritmetica di queste ultime per il calcolo della frazione di vuoto mediata nel tempo C .

Per quanto riguarda la velocità media, essa può essere calcolata come rapporto della distanza longitudinale tra le punte ed il tempo medio di viaggio interfacciale tra i sensori corrispondenti al ritardo della massima funzione di correlazione $R_{xy,max}$, ricavabile in funzione della tipologia di funzione adottata, ad esempio Gaussiana.

Si analizzerà di seguito un metodo alternativa per il calcolo della velocità media nel caso di correnti bifase.

5. PROVE SPERIMENTALI

Come detto in precedenza, nella prima fase lavorativa sono state effettuate delle misurazioni del tirante idrico per differenti valori di portata mediante apposita strumentazione descritta nel capitolo 3 in maniera tale da procedere al tracciamento della curva di deflusso nelle varie configurazioni di progetto.

Il tracciamento della curva di deflusso risulta essere fondamentale per verificare una corretta similitudine dal punto di vista idraulico tra modello e prototipo, e per valutare se l'inserimento di una nuova opera accessoria, nel nostro caso lo scarico in superficie in corpo diga, risulta essere funzionale e compatibile col sistema circostante.

5.1. Modello 1:30 (1970)

Al fine di effettuare un confronto in termini di andamento della curva di deflusso tra modello risalente al 1970 e quello oggetto di tale elaborato, è opportuno descrivere il precedente modello.

Il modello della Diga di Gurzia del 1970, realizzato quasi interamente in cemento, eccezion fatta per lo sfioratore laterale in legno, fu costruito in scala 1:30 e comprendeva inizialmente solamente uno sfioratore (prima una tipologia a gradoni, successivamente quello Creager) ed il canale laterale alla diga fondamentale per la sua alimentazione; successivamente la configurazione fisica del modello variò in quanto nacque l'esigenza di garantire delle condizioni idrauliche il più possibile simili alla realtà: essendo lo sfioratore nella realtà alimentato da un lago artificiale caratterizzato da acqua praticamente indisturbata, al contrario del modello in cui la canaletta laterale produceva intensa turbolenza in corrispondenza della soglia sfiorante senza riprodurre dunque la situazione idraulica persistente nel prototipo, è stata costruita una vasca di calma tra sfioratore e canaletta in maniera tale da garantire la dissipazione dell'energia cinetica in arrivo dal canale stesso.

La misura della portata è stata resa possibile per mezzo dei venturimetri tarati inserite sulle condotte di alimentazione del modello, mentre quella del carico sullo sfioratore è stata fatta mediante piezometro dotato di nonio a lettura decimale.

Entrambi i modelli rispettano la similitudine di Froude con il carico massimo previsto nel prototipo per il corretto funzionamento dello sfioratore è $H_P = 4.5$ m, che si traduce in un carico nel modello H_m pari a 150 mm: inizialmente, facendo riferimento ad un coefficiente di deflusso pari a $\mu = 0.42$, è stato valutato come affinché tale carico fosse raggiungibile occorresse alimentare il modello con una portata pari a circa 200 l/s.

Sperimentalmente è stato notato come al raggiungimento di un valore del carico pari ad $H_m = 137.5 \text{ mm}$, corrispondente ad un carico nel prototipo pari ad $H_P = 4.12 \text{ m}$, la superficie libera lambisce la passerella e tale fenomeno origina un rigurgito responsabile della non correttezza delle misurazioni: per tale motivo la passerella è stata asportata.

Altro fenomeno oggetto di particolari analisi in passato fu la formazione di un vortice ad asse verticale che manifestatosi immediatamente a valle della spalla in calcestruzzo, dove essa rappresentava contemporaneamente l'appoggio della diga e l'inizio dello sfioratore: la dimensione di questo vortice cresceva sempre più al di sopra di un'altezza pari ad $H_m = 55 \text{ mm}$ ($H_P = 1.65 \text{ m}$) disturbando notevolmente il regolare deflusso della vena dello sfioratore coinvolgendo una zona sempre più ampia all'aumentare del carico, fino a comportare un decremento del coefficiente di deflusso per valori del carico al di sopra di $H_m = 110 \text{ mm}$ ($H_P = 3.3 \text{ m}$); sotto tale condizione, per un valore del carico pari a quello massimo, la portata massima raggiungibile era pari a $Q_m = 148 \text{ l/s}$, ovvero $Q_P = 729 \text{ m}^3/\text{s}$.

La scala di deflusso ottenuta, contenente sull'asse delle ordinate di sinistra i valori del tirante in scala 1:30, su quella di destra i corrispondenti valori del tirante nel prototipo, ed in ascissa i valori di portata del modello, è riportata nella seguente figura:

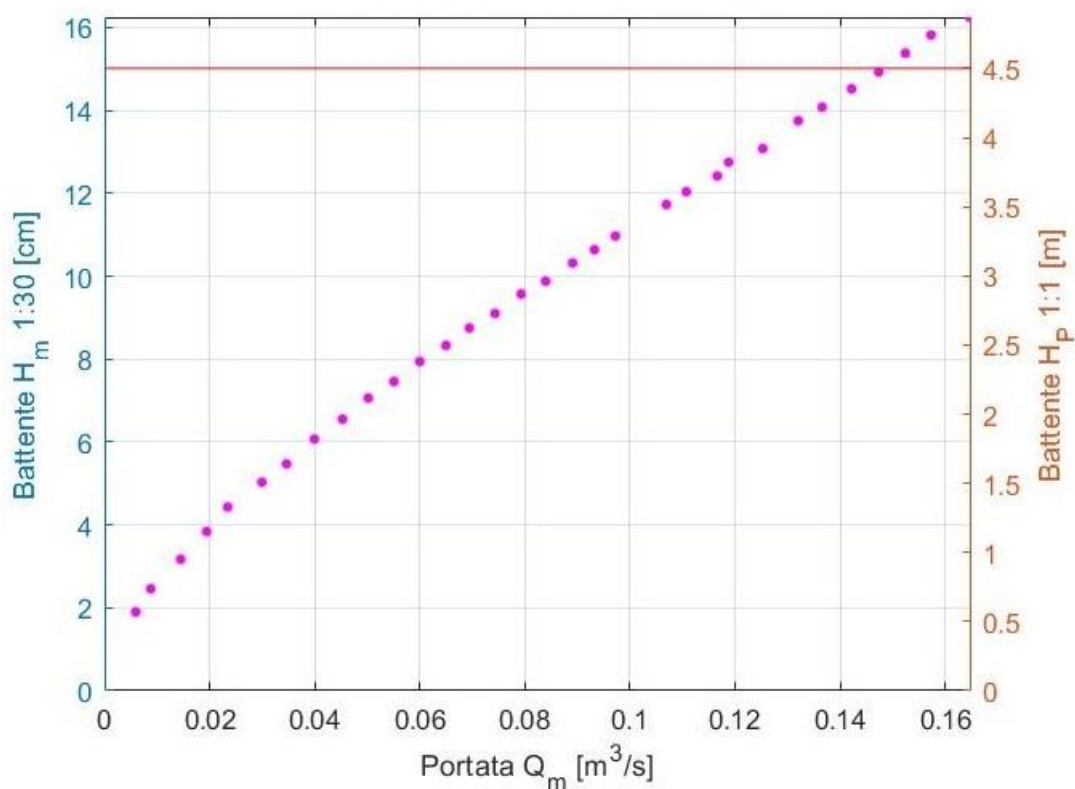


Figura 27: curva di deflusso 1970 serie 1

Affinché fosse possibile raggiungere in corrispondenza del carico massimo una portata defluente pari a quella di progetto, pari a $Q_P = 900 \text{ m}^3/\text{s}$, è stato eseguito un raccordo curvilineo fra la spalla e la diga: tale soluzione, per quanto efficace, non portò al raggiungimento della portata richiesta con un incremento di portata nel modello di appena $\Delta Q_m = 4 \text{ l/s}$, corrispondente nel prototipo a $\Delta Q_P = 20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Enel si occupò della modifica della configurazione dello sfioratore, passando da una tipologia a gradoni ad una di tipo Creager, prestando particolare cura nello spianamento del fondo del canale adduttore per tutta la sua lunghezza alla quota di 420.50 m s.l.m.: questa nuova configurazione garantiva il deflusso di una portata nel modello pari a $Q_m = 170 \text{ l/s}$ ($Q_P = 838 \text{ m}^3/\text{s}$) per il carico di progetto.

Segue la curva di deflusso relativa a tale configurazione sperimentale:

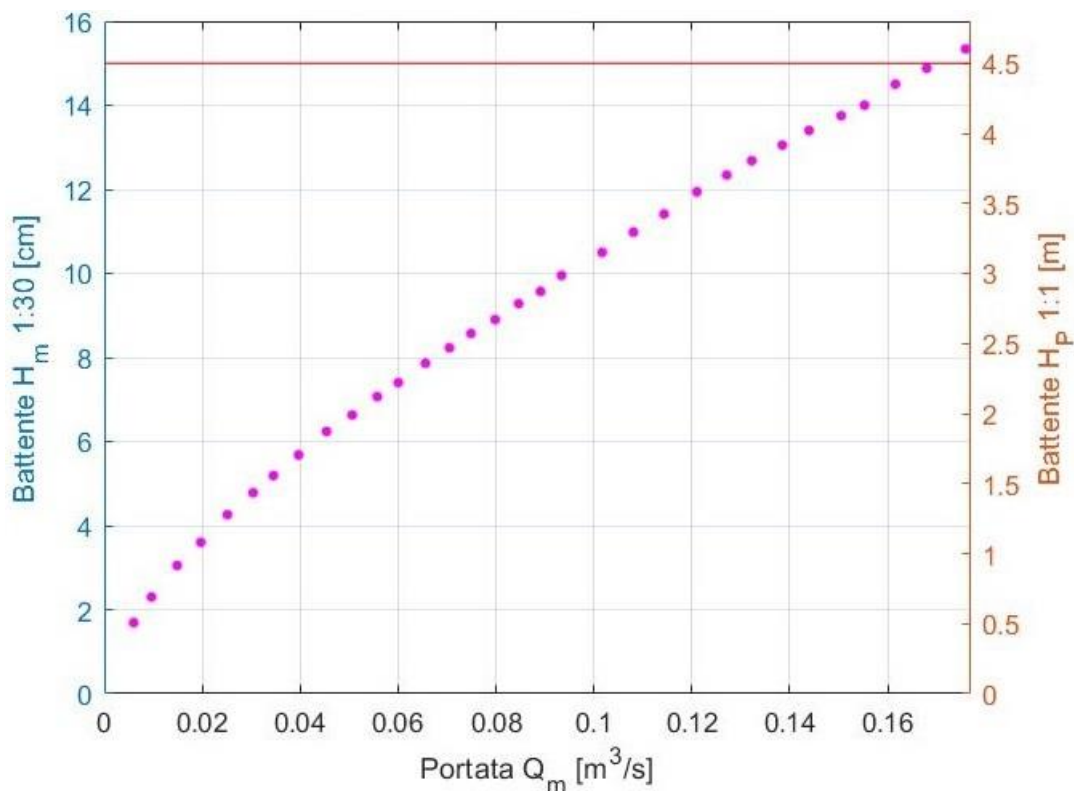


Figura 28: curva di deflusso 1970 serie 2

Anche in questo caso è stato eseguito un raccordo tra diga e spalla di appoggio per ridurre l'entità del vortice fino ad una portata massima defluente pari a $Q_m = 180 \text{ l/s}$ ($Q_P = 887 \text{ m}^3/\text{s}$).

L'ultima analisi mise in luce un altro problema, ovvero il disturbo della vena effluente nella parte dello sfioratore in corrispondenza della zona terminale del canale adduttore per via dell'urto tra corrente di fondo del canale e muro terminale del medesimo con una conseguente deviazione della corrente stessa.

Per rendere trascurabile tale fenomeno è stato costruito prima di tutto un fondo gradatamente acclive nel senso del modo, ed in secondo luogo un altro raccordo fra lo sfioratore ed il fondo del canale: in questa ultima fase di analisi è stata raggiunta una portata pari ad $Q_m = 189 \text{ l/s}$ ($Q_P = 931 \text{ m}^3/\text{s}$) per un valore del carico pari a quello di progetto, evidenziando dunque l'efficacia progettuale del nuovo sfioratore con profilo Creager e con le opportune modifiche citate.

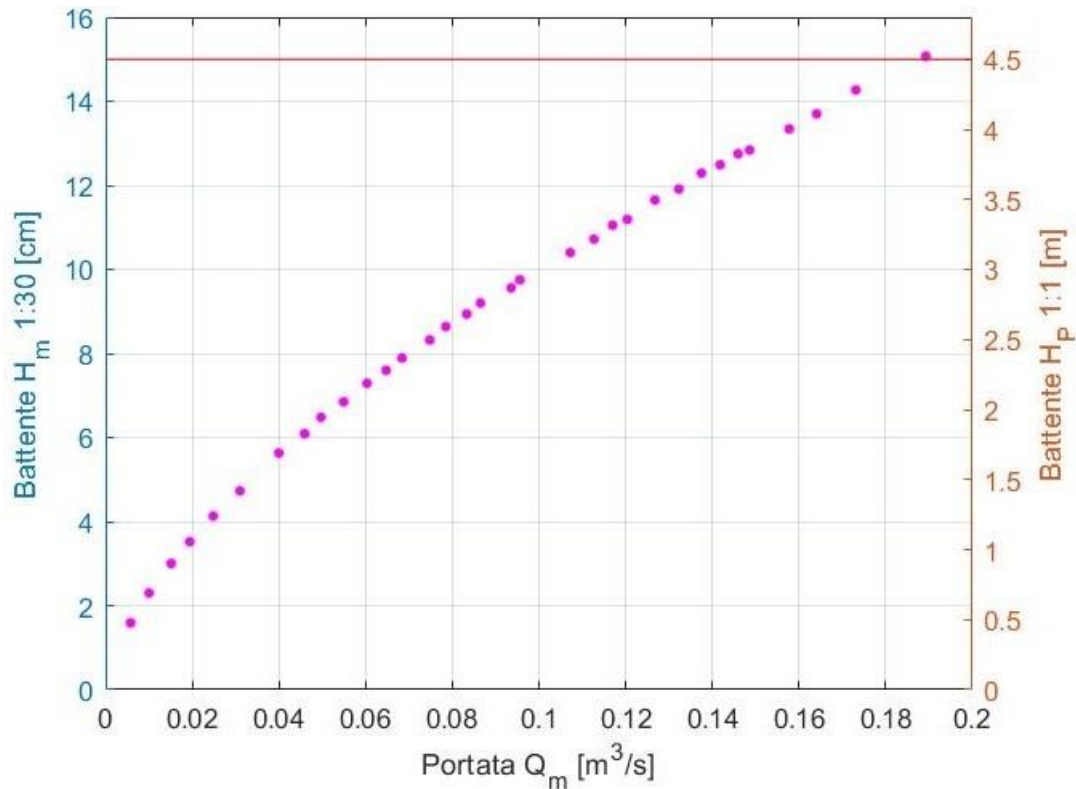


Figura 29: curva di deflusso 1970 serie 3

Dalle curve di deflusso rappresentate si può constatare l'importanza della definizione geometrica dello sfioratore e del canale adduttore, con la necessità di realizzare in opera le stesse caratteristiche geometriche indispensabili per il raggiungimento di una determinata portata di progetto.

Nella seguente immagine è rappresentato il confronto tra le tre serie precedentemente descritte:

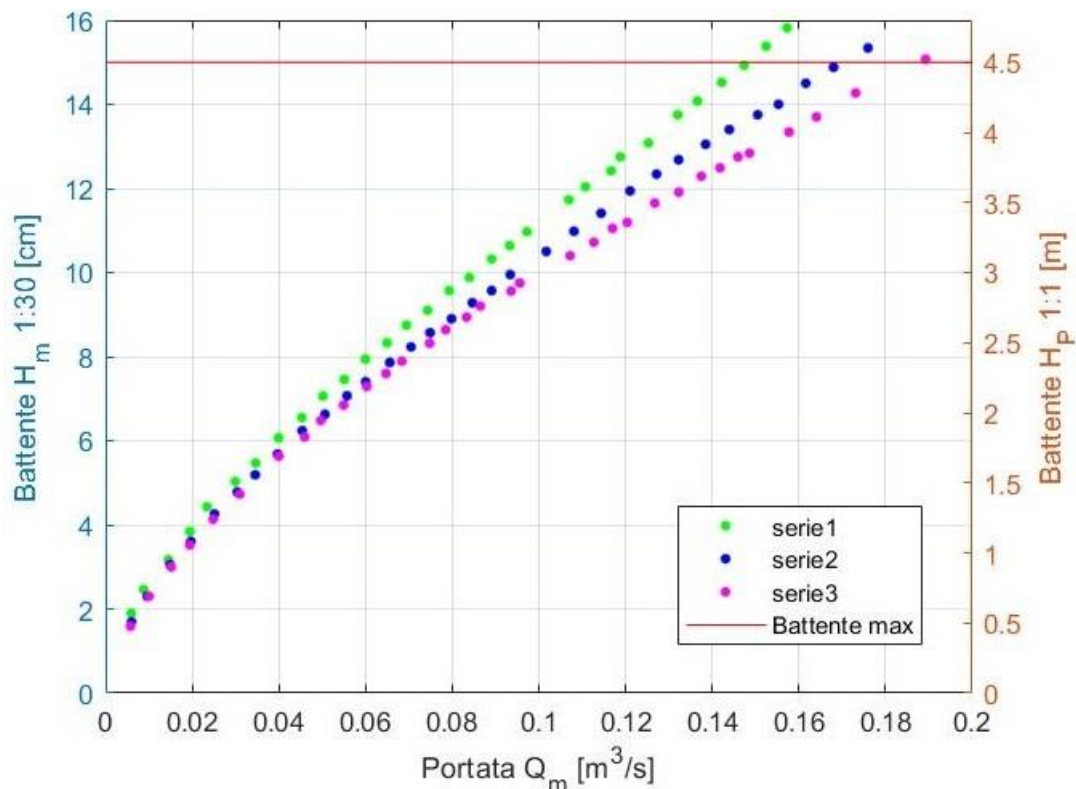


Figura 30: curve di deflusso 1970

5.2. Modello 1:40 (2016)

Come accennato in precedenza, nel 2016 è stato costruito un nuovo modello della diga di Gurzia in maniera tale da introdurre alcune opere accessorie, successivamente alla stima di una nuova portata millenaria, e verificarne il completo funzionamento.

Il modello è stato realizzato rispettando la similitudine di Froude (numero di Froude del modello coincidente col numero di Froude del prototipo) ed utilizzando un fattore di scala λ pari a 0.025 per quando riguarda la geometria dell'opera, ed un fattore $\lambda = 0.025^{5/2}$ per le portate defluenti.

Per uno studio approfondito del modello, si è preferito suddividere le prove sperimentali per il tracciamento della curva di deflusso in tre parti:

- Studio dello sfioratore laterale, separato dal restante contenuto idraulico;
- Studio dello scarico di superficie in corpo diga, separato dal restante contesto idraulico;
- Studio del funzionamento combinato dei due sfioratori (configurazione di progetto).

Di seguito si approfondiscono tali analisi sperimentali.

5.2.1. Studio dello sfioratore laterale

Nella realizzazione dello sfioratore laterale all'interno del seguente modello si è tenuto conto di tutti gli accorgimenti attuati, in precedenza, nel modello in scala 1:30 in maniera tale da rendere minime le dissipazioni energetiche ed ottenere, a parità di portata, un battente il più vicino possibile a quello di progetto.

Una serie di misurazioni eseguite nel precedente elaborato di tesi, avevano evidenziato l'insorgere di un vortice ad asse verticale a valle del blocco di collegamento tra diga e sfioratore: tale fenomeno, evidenziabile al di sopra di una portata pari a 40 l/s, è dovuto alla geometria troncoconica della spalla su cui si scontra il flusso d'acqua proveniente dalla vasca di carico; la presenza di tale vortice provoca un disturbo del regolare deflusso della vena dello sfioratore aumentando la presenza di perdite energetiche e comportando dunque una diminuzione della portata a parità di battente.

Le fasi progettuali, eseguite nel precedente elaborato per eliminare le criticità di tale fenomeno, sono riassunte di seguito: innanzitutto è stato modificato l'andamento del fondo del canale rendendolo acclive nel senso del moto; successivamente è stata ampliata l'apertura in prossimità del collegamento vasca-sfioratore tagliando una parte della lamiera metallica che impediva l'ingresso della corrente e sagomandola al fine di diminuire la presenza di ostacoli nei confronti della corrente stessa. Una volta effettuate tali modifiche, controllando via via l'andamento delle curve di deflusso relative ad ogni configurazione idraulica, notando una portata ancora troppo bassa per un battente pari a quello di progetto, si è deciso di progettare un raccordo curvilineo tra spalla e diga utilizzando una lamiera in acciaio con spessore pari ad 1,5 mm, saldato alla lamiera costituente il coronamento della diga da una parte, e bloccandola tramite morsetti al blocco spalla esistente.

Notando un netto miglioramento della vena effluente in termini di uniformità del flusso, si è deciso di rendere definitiva tale configurazione geometrica-strutturale dello sfioratore laterale: nel presente elaborato, infatti, sono state tracciate le curve di deflusso dello sfioratore laterale relative a questa corretta e modificata configurazione.

Tornando al presente elaborato, la curva è stata tracciata eseguendo diciannove misurazioni portata-battente partendo dal valore massimo di portata, nel nostro caso pari a 90 l/s, corrispondente nel prototipo ad una portata pari a 910,74 m³/s, e decrescendo fino all'annullamento del flusso idrico con intervalli di portata caratterizzati da un passo pari a 5 l/s: la precisione con la quale sono stati rispettati gli step di portata è dovuta all'utilizzo combinato di inverter e saracinesca, sottolineando la presenza di un'oscillazione di tale valore leggibile dall'apposito misuratore di portate dell'ordine di ± 1 l/s; si è deciso tuttavia di non tenere conto di tale aspetto.

Ad ogni valore di portata è stato associato un determinato valore del battente, frutto della media delle due misurazioni leggibili in corrispondenza delle aste graduate presenti nel serbatoio; l'ultima misurazione risulta essere fondamentale per individuare lo zero di riferimento, coincidente con la quota sfioratore laterale.

Tale procedura è stata eseguita tre volte, in maniera tale da evitare che le grandezze in gioco potessero essere affette da errori grossolani, considerando come valore del battente definitivo la media delle tre misurazioni disponibili.

Indicando con λ la scala del modello, si ricordano le relazioni utili per convertire i valori geometrici del battente H e quelli di portata Q da modello a prototipo e viceversa:

$$H_P = H_m / \lambda$$

$$Q_P = Q_m / \lambda^{5/2}$$

Nella seguente tabella sono riportati i valori ottenuti nello studio del modello e quelli corrispondenti nel prototipo:

Modello scala 1:40		Prototipo		
Battente	Portata	Battente	Quota s.l.m.	Portata
[cm]	[l/s]	[m]	[m]	[m ³ /s]
0,00	0,00	0,00	427,50	0,00
1,96	5,00	0,79	428,29	50,60
2,97	10,00	1,19	428,69	101,19
3,87	15,00	1,55	429,05	151,79
4,60	20,00	1,84	429,34	202,39
5,22	25,00	2,09	429,59	252,98
5,92	30,00	2,37	429,87	303,58
6,52	35,00	2,61	430,11	354,18
7,11	40,00	2,84	430,34	404,77
7,73	45,00	3,09	430,59	455,37
8,34	50,00	3,33	430,83	505,96
8,86	55,00	3,55	431,05	556,56
9,35	60,00	3,74	431,24	607,16
9,79	65,00	3,92	431,42	657,75
10,45	70,00	4,18	431,68	708,35
10,91	75,00	4,36	431,86	758,95
11,44	80,00	4,58	432,05	809,54
11,93	85,00	4,77	432,27	860,14
12,32	90,00	4,93	432,43	910,74

Tabella 10: valori curva di deflusso sfioratore laterale

Nelle due immagini sono rappresentate la curva di deflusso dello sfioratore laterale ed un confronto tra la stessa ed una curva teorica relativa ad uno sfioratore Creager.

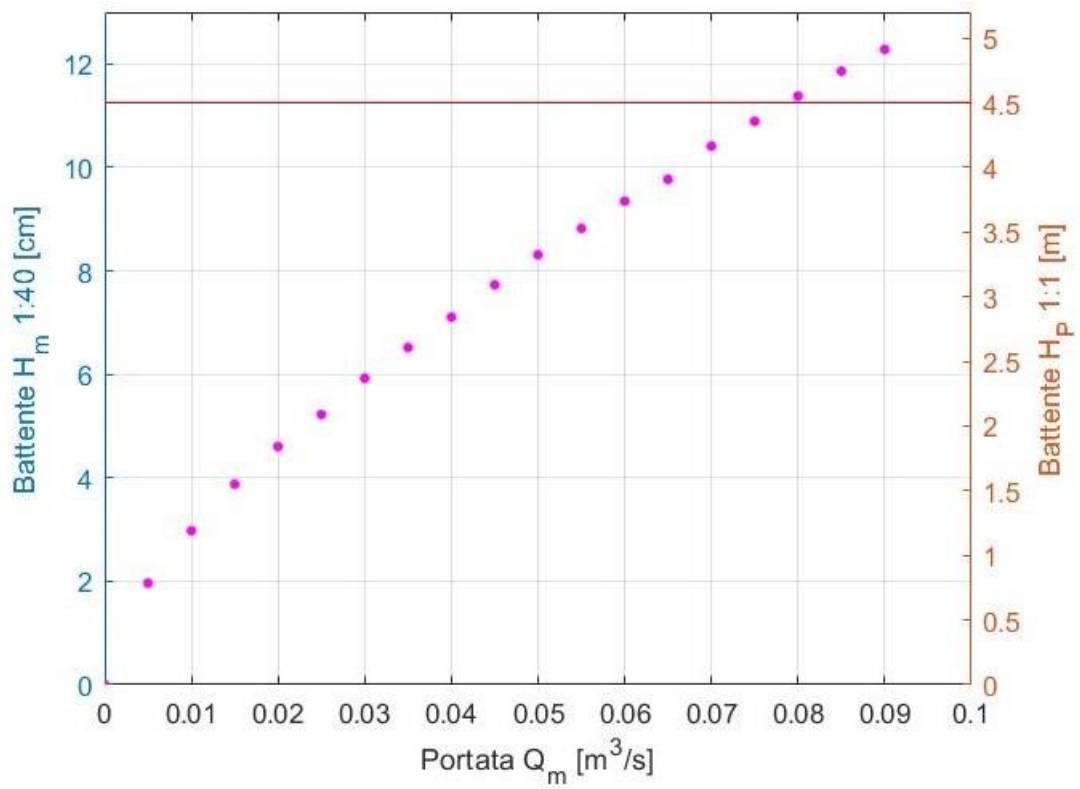


Figura 31: curva di deflusso sfioratore laterale

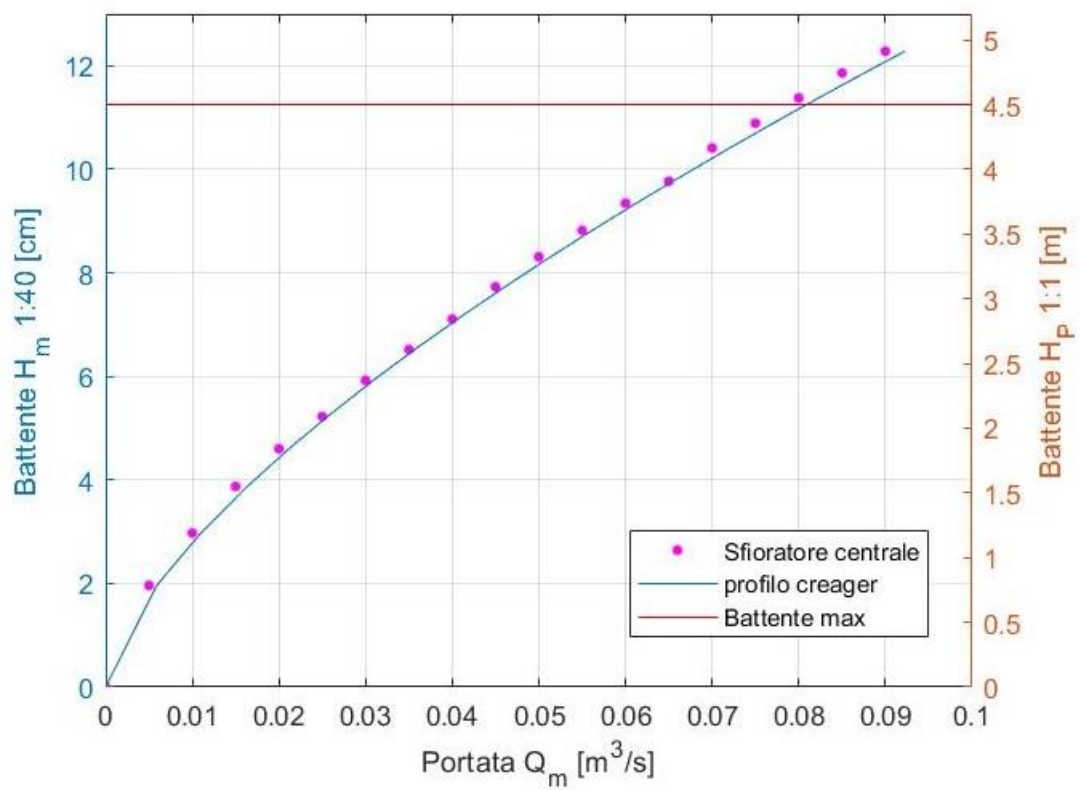


Figura 32: confronto curva di deflusso e curva profilo Creager

Come mostrato nei grafici precedenti, i risultati ottenuti sono altamente soddisfacenti con il raggiungimento di una portata sfiorante corrispondente al battente di progetto pari a $Q_m = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_P = 809,54 \text{ m}^3/\text{s}$); confrontando tale profilo col profilo teorico Creager, determinato applicando la legge di efflusso con coefficiente $c = 0,44$, emerge come i punti sperimentali appartenenti ad entrambe le curve risultano essere molto vicini tra loro, con il valore massimo di portata per il battente limite della curva Creager che risulta essere pari a $Q_m = 0,081 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_P = 819,66 \text{ m}^3/\text{s}$).

5.2.2. Studio dello scarico di superficie in corpo diga

Nell'intenzione di voler studiare la curva di deflusso relativa al funzionamento idraulico del solo scarico di superficie posto in corpo diga, si è preveduto all'installazione di una lamiera in corrispondenza del canale adduttore a monte dello sfioratore laterale in maniera tale che quest'ultima potesse permettere l'avanzamento della corrente verso lo sfioratore laterale stesso impedendone lo sfioro.

Per il tracciamento della curva sono state effettuate quattro prove, ognuna delle quali caratterizzata da un duplice valore del battente per via della presenza di due aste all'interno della vasca di carico.

Anche in questo caso è stata fatta variare la portata partendo da un valore massimo pari a $Q_m = 60 \text{ l/s}$ e decrescendo fino all'annullamento della stessa con intervalli di passo costante pari a $\Delta Q_m = 5 \text{ l/s}$ e valutando il corrispondente valore di battente dalle aste graduate.

La seguente tabella include la media dei dati portata-battente ricavati:

Modello scala 1:40		Prototipo		
Battente	Portata	Battente	Quota s.l.m.	Portata
[cm]	[l/s]	[m]	[m]	[m ³ /s]
0,00	0,00	0,00	428,00	0,00
3,97	10,00	1,59	429,59	101,19
5,03	15,00	2,01	430,01	151,79
6,00	20,00	2,40	430,40	202,39
6,84	25,00	2,74	430,74	252,98
7,63	30,00	3,05	431,05	303,58
8,40	35,00	3,36	431,36	354,18
9,10	40,00	3,64	431,64	404,77
9,78	45,00	3,91	431,91	455,37
10,48	50,00	4,19	432,19	505,96
11,06	55,00	4,42	432,42	556,56
11,66	60,00	4,66	432,66	607,16

Tabella 11: valori curva di deflusso sfioratore centrale

Rappresentando tali punti in un grafico Q/H è possibile ricavare la curva di deflusso dello sfioratore centrale, illustrata nella successiva figura:

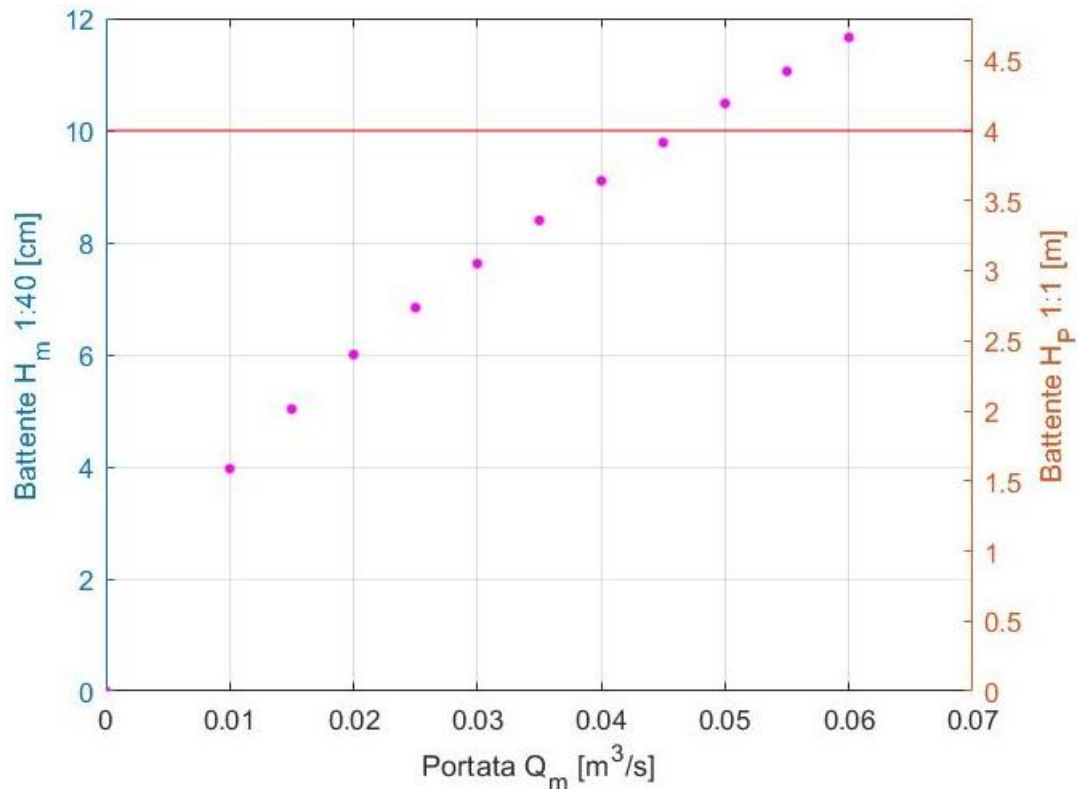


Figura 33: curva di deflusso sfioratore centrale

Ricordando che lo sfioratore centrale è caratterizzato da una quota di massima regolazione pari ad 428 m s.l.m., dunque superiore di mezzo metro rispetto a quella dello sfioratore laterale, ragion per cui i due sfioratori si attivino in tempi leggermente diversi tra loro, i risultati ottenuti evidenziano come in prossimità del battente di progetto del prototipo, pari ad $H_P = 4$ m, corrispondente ad un battente nel modello pari a $H_m = 10$ cm, la portata massima defluente del prototipo sia pari a $Q_P = 471,63$ m³/s, ovvero $Q_m = 46,6$ l/s.

Al fine di constatare se il valore ottenuto risulti essere attendibile o meno, occorre confrontare la serie ottenuta con altre serie ottenibili mediante relazioni di tipo sperimentale.

Una seconda serie analizzata, fondamentale per un primo confronto con i precedenti dati ottenuti, risulta essere quella estrapolata dalla “relazione idraulica” fornita da ENEL in cui sono stati calcolati i valori di portata massima defluente in funzione di un prefissato valore del battente idrico, partendo dal tirante corrispondente alla quota di massima regolazione e procedendo per intervalli con passo costante fino al valore del tirante di progetto.

La portata è stata calcolata mediante la seguente relazione:

$$Q = \mu \cdot L' \cdot h^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$$

Dove:

- μ rappresenta il coefficiente di deflusso;
- L' è la lunghezza di calcolo della soglia;
- H è il battente sul ciglio sfiorante;
- g è l'accelerazione di gravità.

Di seguito è riportata la curva di deflusso ottenuta:

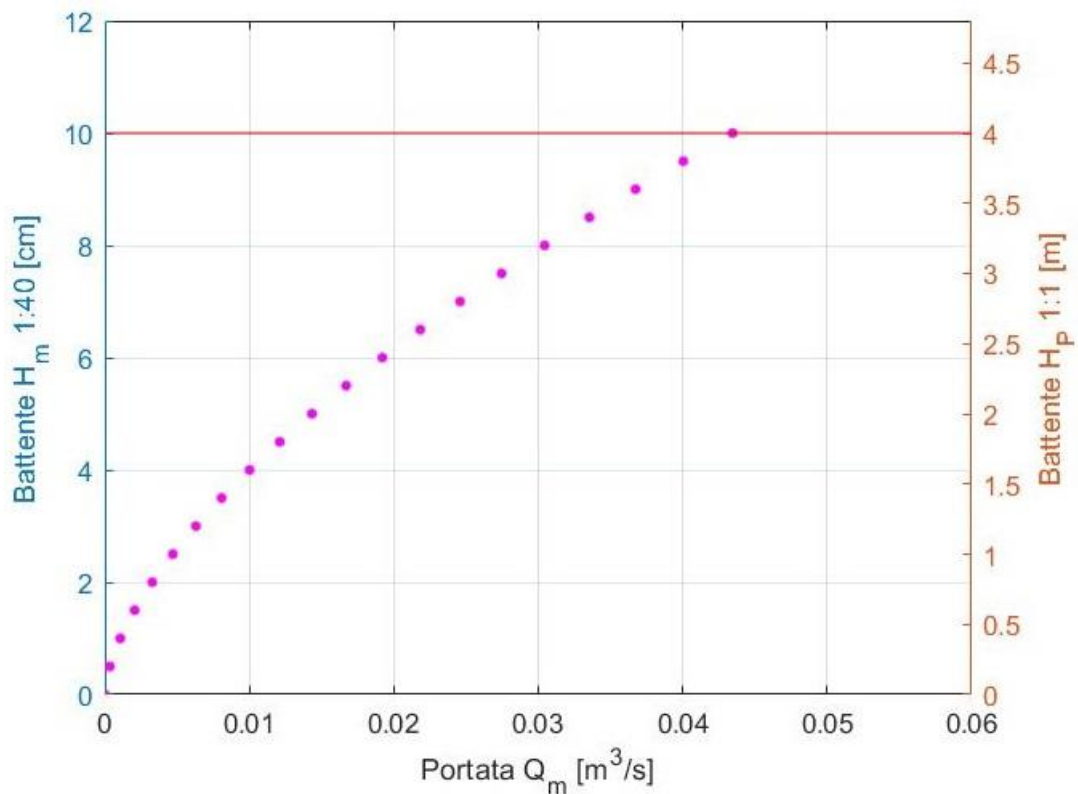


Figura 34: curva di deflusso ENEL

Tornando ai coefficienti precedentemente citati, occorre sottolineare che il coefficiente di deflusso μ è stato calcolato mediante la seguente relazione fornita da ENEL stesso in funzione di un coefficiente di deflusso massimo μ_{MAX} , assunto convenzionalmente pari ad 0,44, del battente H , e del battente massimo H_{MAX} :

$$\mu = \mu_{MAX} \cdot \left(\frac{H}{H_{MAX}} \right)^{0.12}$$

Per quanto riguarda la lunghezza di calcolo della soglia L' , la quale tiene conto delle riduzioni dovute ai muri laterali ed ai pilastri centrali, è stata calcolata mediante la seguente relazione:

$$L' = L - N \cdot H \cdot K$$

Dove:

- L rappresenta la lunghezza lorda della soglia sfiorante, in cui si tiene conto anche della presenza dei pilastri in corrispondenza della soglia: tale valore è pari a 29 m;
- N è il numero delle contrazioni, nel nostro caso pari a 4;
- H è il battente sul ciglio sfiorante;
- K è il coefficiente di forma, pari a 0,05.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori di tutti i coefficienti citati:

Modello scala 1:40			Prototipo			
Battente	Portata	Battente	Quota s.l.m.	Portata	L	μ
[cm]	[l/s]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[-]
0,00	0,00	0,00	428,00	0,00	29,00	0,000
0,50	0,35	0,20	428,20	3,52	28,96	0,307
1,00	1,07	0,40	428,40	10,82	28,92	0,334
1,50	2,06	0,60	428,60	20,83	28,88	0,350
2,00	3,28	0,80	428,80	33,16	28,84	0,363
2,50	4,70	1,00	429,00	47,53	28,80	0,373
3,00	6,30	1,20	429,20	63,77	28,76	0,381
3,50	8,08	1,40	429,40	81,75	28,72	0,388
4,00	10,02	1,60	429,60	101,35	28,68	0,394
4,50	12,10	1,80	429,80	122,48	28,64	0,400
5,00	14,34	2,00	430,00	145,07	28,60	0,405
5,50	16,71	2,20	430,20	169,06	28,56	0,410
6,00	19,21	2,40	430,40	194,38	28,52	0,414
6,50	21,84	2,60	430,60	220,98	28,48	0,418
7,00	24,59	2,80	430,80	248,82	28,44	0,422
7,50	27,46	3,00	431,00	277,85	28,40	0,425
8,00	30,44	3,20	431,20	308,04	28,36	0,428
8,50	33,53	3,40	431,40	339,35	28,32	0,432
9,00	36,74	3,60	431,60	371,74	28,28	0,434
9,50	40,04	3,80	431,80	405,20	28,24	0,437
10,00	43,45	4,00	432,00	439,68	28,20	0,440

Tabella 12: valori curva di deflusso ENEL

I risultati ottenuti partendo dai dati forniti da ENEL non risultano essere soddisfacenti: infatti, in corrispondenza del battente di progetto, la portata massima defluente risulta essere pari a $Q_P = 439,68 \text{ m}^3/\text{s}$, ovvero $Q_m = 43,45 \text{ l/s}$, valori inferiori rispetto a quelli determinati sperimentalmente, con delle variazioni di portata rispettivamente pari a $\Delta Q_P = 31,95 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\Delta Q_m = 3,15 \text{ l/s}$.

Tale differenza risulta essere tuttavia giustificata in quanto i valori ottenibili mediante dati forniti da ENEL risultano essere a favore di sicurezza.

Si analizza ora una terza serie, con coefficiente di deflusso μ calcolato mediante relazione empirica in funzione del parametro χ , rapporto tra il generico battente idraulico H ed il battente di progetto H_P :

$$\mu = \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \left[1 + \frac{4 \cdot \chi}{9 + 5 \cdot \chi} \right]$$

Nella seguente tabella sono rappresentati i valori di portata ottenuti a partire da un valore prefissato del battente idraulico:

Modello scala 1:40			Prototipo			
Battente	Portata	Battente	Quota s.l.m.	Portata	L	μ
[cm]	[l/s]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[-]
0,00	0,00	0,00	428,00	0,00	29,00	0,385
0,50	0,45	0,20	428,20	4,51	28,96	0,393
1,00	1,28	0,40	428,40	13,00	28,92	0,401
1,50	2,40	0,60	428,60	24,29	28,88	0,409
2,00	3,75	0,80	428,80	38,00	28,84	0,416
2,50	5,33	1,00	429,00	53,89	28,80	0,422
3,00	7,10	1,20	429,20	71,82	28,76	0,429
3,50	9,06	1,40	429,40	91,67	28,72	0,435
4,00	11,20	1,60	429,60	113,35	28,68	0,441
4,50	13,52	1,80	429,80	136,78	28,64	0,446
5,00	16,00	2,00	430,00	161,90	28,60	0,452
5,50	18,64	2,20	430,20	188,64	28,56	0,457
6,00	21,44	2,40	430,40	216,94	28,52	0,462
6,50	24,39	2,60	430,60	246,77	28,48	0,467
7,00	27,48	2,80	430,80	278,06	28,44	0,471
7,50	30,71	3,00	431,00	310,79	28,40	0,475
8,00	34,08	3,20	431,20	344,91	28,36	0,480
8,50	37,59	3,40	431,40	380,37	28,32	0,484
9,00	41,22	3,60	431,60	417,15	28,28	0,488
9,50	44,98	3,80	431,80	455,21	28,24	0,491
10,00	48,87	4,00	432,00	494,52	28,20	0,495

Tabella 13: valori curva di deflusso formula empirica

Segue il tracciamento della curva di deflusso:

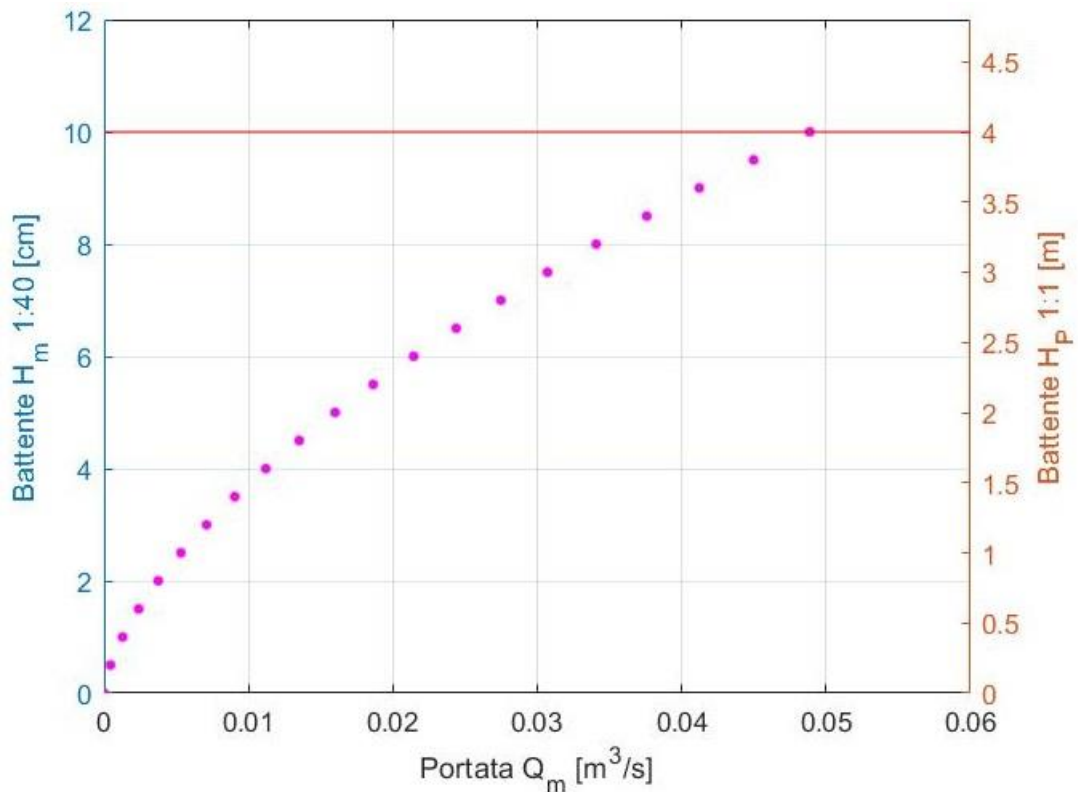


Figura 35: curva di deflusso formula empirica

Analizzando i risultati ottenuti è possibile constatare come questi siano positivi: la portata massima defluente risulta essere pari a $Q_P = 494,52 \text{ m}^3/\text{s}$, ovvero $Q_m = 48,87 \text{ l/s}$, valori nettamente superiori rispetto alle precedenti due serie analizzate con un incremento della portata rispetto alla curva sperimentale pari a $\Delta Q_P = 21,89 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\Delta Q_m = 2,27 \text{ l/s}$.

È stata infine analizzata una quarta serie in cui il coefficiente di deflusso è stato determinato in funzione del rapporto battente-battente di progetto come nella precedente serie, mentre al posto della larghezza della soglia si è tenuto conto di una larghezza effettiva L_e ricavabile mediante la formula empirica di “Hydraulic Design of spillway 1990 (US army corp)”:

$$L_e = L - 2 \cdot (K_a + n \cdot K_P) \cdot H$$

Dove:

- L è la larghezza netta della soglia sfiorante, depurata dall’ingombro della larghezza delle pile, nel nostro caso pari a 29 m;
- n è il numero di pilastri: nel nostro caso è presente un pilastro centrale;
- K_a e K_P sono coefficienti dipendenti dalla forma delle spalle e delle pile;
- H è il battente.

Per il calcolo dei coefficienti K_a e K_p si fa riferimento alla seguente tabella: in ascissa è presente il valore del coefficiente K , mentre in ordinata è riportato il valore del tirante adimensionalizzato; nel grafico sono illustrate una serie di curve, ognuna corrispondente ad una prefissata forma del pilastro o della spalla.

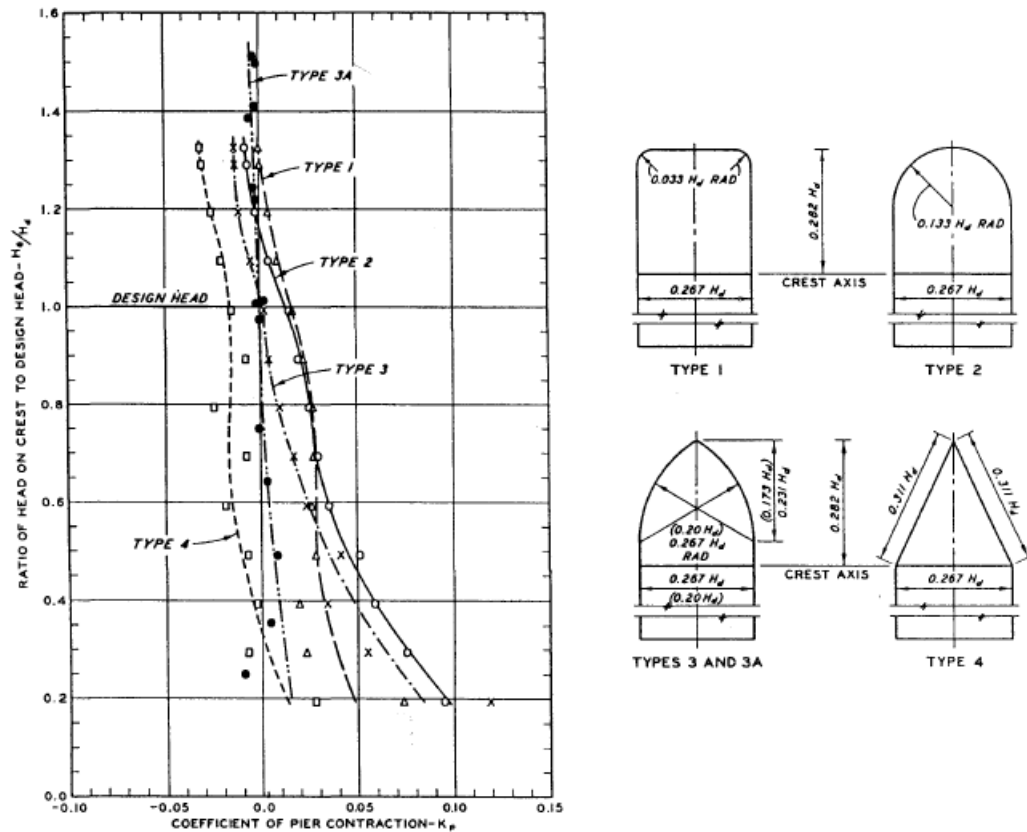


Figura 36: coefficiente di contrazione delle pile in funzione del tirante adimensionalizzato

Nel nostro caso sono state considerate due curve, una prima corrispondente alla sezione “type 3”, in quanto il pilastro centrale risulta essere caratterizzata dalla medesima forma, ed una seconda curva denominata “type 2”, utilizzata in quando i pilastri laterali, chiamate anche spalle, hanno quella particolare forma.

Le curve interpolanti sono state ricostruite tramite software excel a partire dalle coordinate note di alcuni punti in maniera tale da determinare i valori delle ascisse corrispondenti ai vari tiranti adimensionalizzati con maggior accuratezza.

Si riportano le equazioni delle curve “type 3” e “type 2”:

$$y = -1953,2x^4 - 803,08x^3 + 214,3x^2 - 20,801x + 0,9988$$

$$y = 25621x^4 + 4801,1x^3 - 181,78x^2 - 14,449x + 1,1944$$

Si riportano nella seguente tabella i risultati ottenuti:

Modello scala 1:40			Prototipo			
Battente	Portata	Battente	Quota s.l.m.	Portata	L_e	μ
[cm]	[l/s]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[-]
0,00	0,00	0,00	428,00	0,00	28,71	0,385
0,50	0,44	0,20	428,20	4,47	28,71	0,393
1,00	1,28	0,40	428,40	12,91	28,71	0,401
1,50	2,39	0,60	428,60	24,15	28,71	0,409
2,00	3,74	0,80	428,80	37,83	28,71	0,416
2,50	5,30	1,00	429,00	53,66	28,68	0,422
3,00	7,07	1,20	429,20	71,58	28,66	0,429
3,50	9,04	1,40	429,40	91,49	28,66	0,435
4,00	11,20	1,60	429,60	113,30	28,67	0,441
4,50	13,53	1,80	429,80	136,93	28,67	0,446
5,00	16,04	2,00	430,00	162,34	28,68	0,452
5,50	18,72	2,20	430,20	189,48	28,69	0,457
6,00	21,57	2,40	430,40	218,31	28,70	0,462
6,50	24,59	2,60	430,60	248,81	28,72	0,467
7,00	27,76	2,80	430,80	280,93	28,73	0,471
7,50	31,10	3,00	431,00	314,67	28,75	0,475
8,00	34,59	3,20	431,20	349,99	28,78	0,480
8,50	38,23	3,40	431,40	386,88	28,80	0,484
9,00	42,02	3,60	431,60	425,24	28,83	0,488
9,50	45,97	3,80	431,80	465,21	28,86	0,491
10,00	50,09	4,00	432,00	506,87	28,90	0,495

Tabella 14: valori curva di deflusso formula empirica di "Hydraulic Design of spillway 1990 "

Occorre precisare che il precedente grafico risulta essere definito per valori adimensionalizzati del tirante superiori a 0,2, per cui i valori del coefficiente K corrispondenti ad un valore del tirante adimensionalizzato compreso all'interno dell'intervallo [0 ; 0,2] sono stati valutati facendo riferimento ad un valore di H/H_p proprio pari a 0,2.

L'analisi della quarta serie può ritenersi altamente positiva visto il valore di portata defluente corrispondente al battente di progetto superiore a quello ottenuto nelle precedenti serie: è stato infatti ottenuto un valore di $Q_p = 506,87 \text{ m}^3/\text{s}$, ovvero $Q_m = 50,09 \text{ l/s}$, evidenziando un netto incremento della portata rispetto alla curva sperimentale pari a $\Delta Q_p = 35,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\Delta Q_m = 3,49 \text{ l/s}$.

Si riportano di seguito la curva di deflusso ottenuta dall'ultima serie ed il confronto fra le quattro serie analizzate.

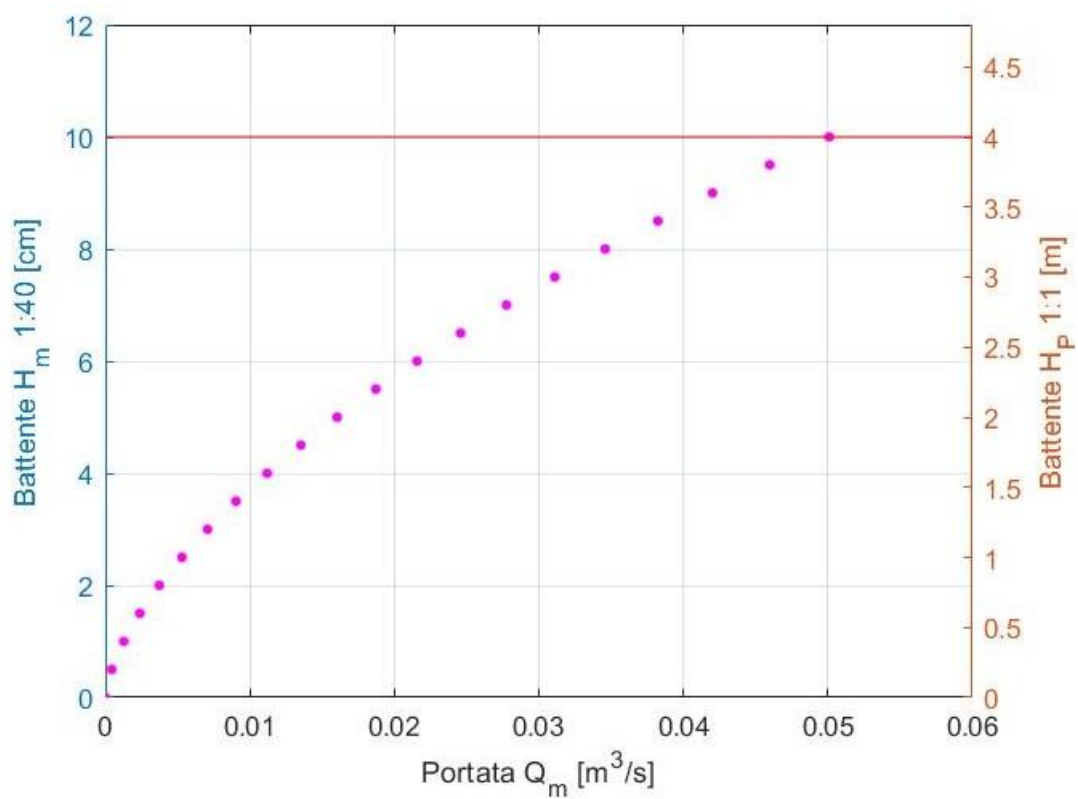


Figura 37: curva di deflusso formula empirica di "Hydraulic Design of spillway 1990

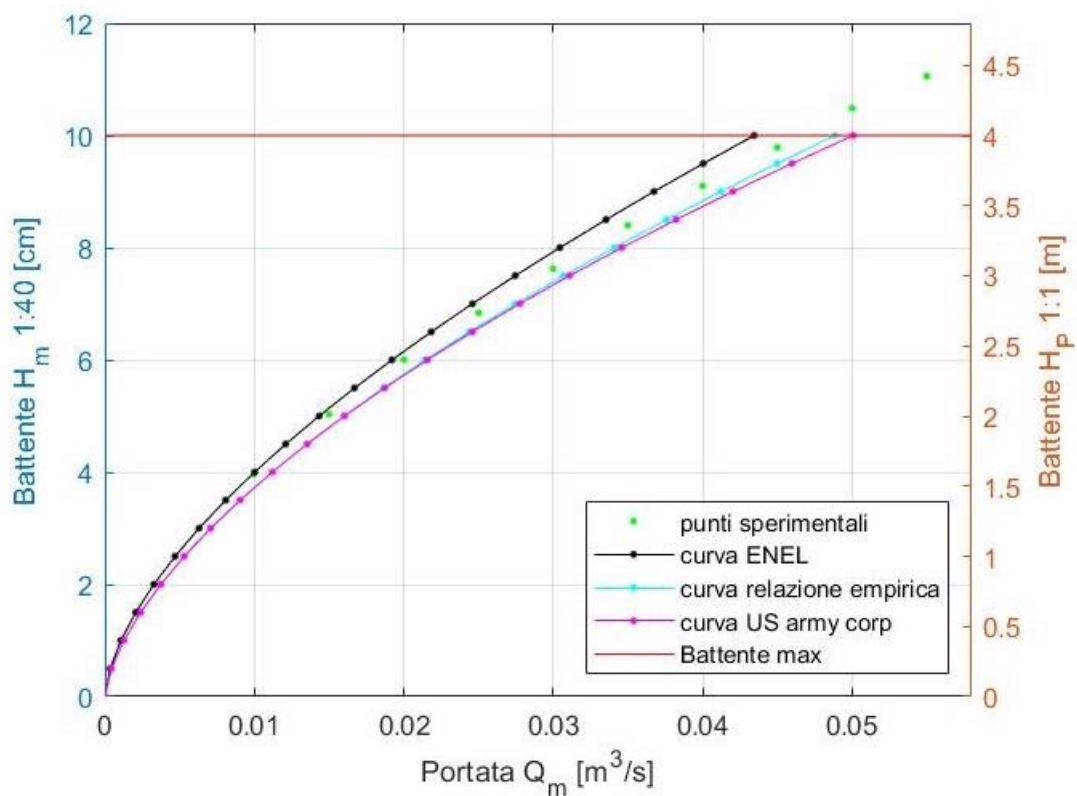


Figura 38: confronto curve di deflusso

Dal precedente grafico è possibile constatare come i “punti sperimentali” ottenuti mediante prove in laboratorio si trovino all’interno delle due curve limite rappresentate dalla “curva ENEL” e dalla “curva US army corp”, confermando dunque un efficace funzionamento dello sfioratore stesso.

5.2.3. Studio della situazione di progetto

Per concludere la parte legata alle prove sperimentali si è deciso di studiare la configurazione di progetto, con il deflusso garantito dall’azione combinata dei due sfioratori.

Prima di procedere con le prove è stato rimosso lo sbarramento di lamiera che ostruiva il passaggio della corrente in corrispondenza del canale adduttore collegato allo sfioratore laterale, così che il deflusso potesse essere garantito da entrambi gli scarichi in superficie.

Successivamente sono state condotte le analisi sperimentali come descritto negli altri paragrafi, facendo variare il valore di portata a partire da un valore massimo pari a $Q_m = 135$ l/s e procedendo per intervalli di passo costante pari a $\Delta Q_m = 5$ l/s fino all’annullamento della corrente.

Nello specifico sono state eseguite tre prove, e considerati successivamente i valori medi delle varie misurazioni per tracciare la curva di deflusso riportata sotto:

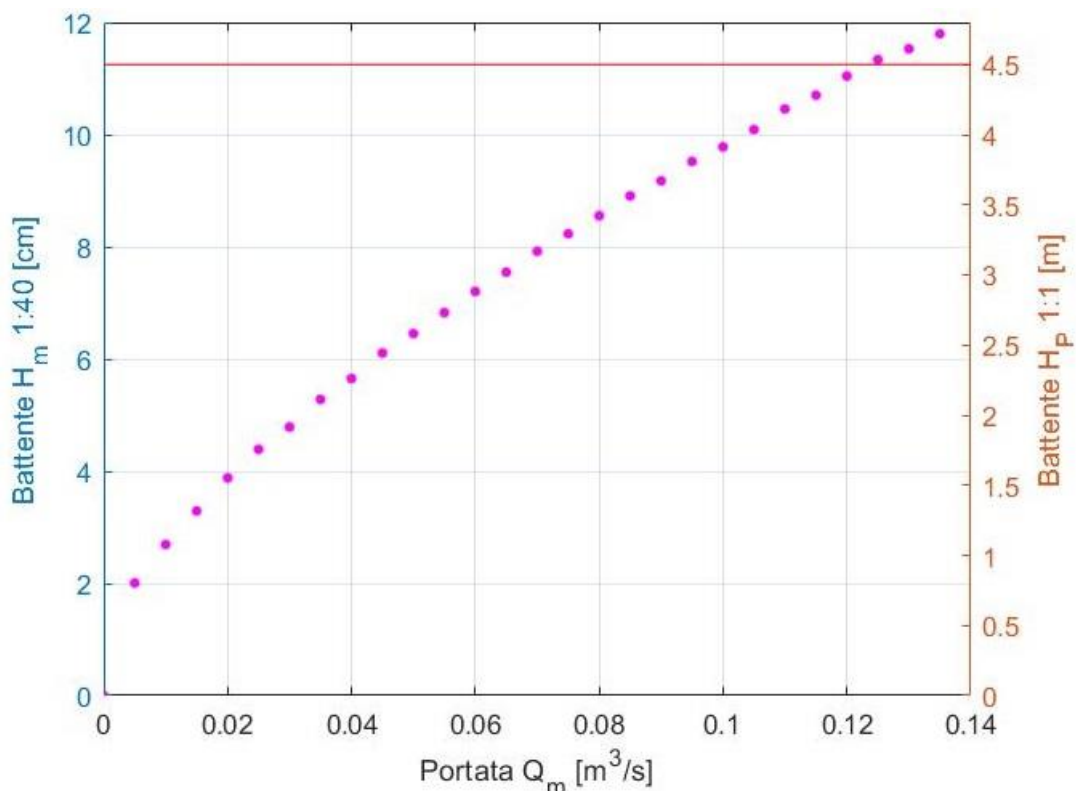


Figura 39: curva di deflusso combinazione dei due sfioratori

Nella tabella sotto sono riportati i valori ottenuti in termini di portata-tirante nel modello ed i corrispondenti valori nel prototipo:

Modello scala 1:40		Prototipo		
Battente	Portata	Battente	Quota s.l.m.	Portata
[cm]	[l/s]	[m]	[m]	[m ³ /s]
0,00	0,00	0,00	427,50	0,00
2,01	5,00	0,80	428,30	50,60
2,69	10,00	1,08	428,58	101,19
3,29	15,00	1,32	428,82	151,79
3,88	20,00	1,55	429,05	202,39
4,39	25,00	1,76	429,26	252,98
4,79	30,00	1,91	429,41	303,58
5,28	35,00	2,11	429,61	354,18
5,65	40,00	2,26	429,76	404,77
6,11	45,00	2,44	429,94	455,37
6,45	50,00	2,58	430,08	505,96
6,83	55,00	2,73	430,23	556,56
7,20	60,00	2,88	430,38	607,16
7,55	65,00	3,02	430,52	657,75
7,92	70,00	3,17	430,67	708,35
8,23	75,00	3,29	430,79	758,95
8,55	80,00	3,42	430,92	809,54
8,91	85,00	3,56	431,06	860,14
9,18	90,00	3,67	431,17	910,74
9,52	95,00	3,81	431,31	961,33
9,78	100,00	3,91	431,41	1011,93
10,09	105,00	4,04	431,54	1062,53
10,46	110,00	4,18	431,68	1113,12
10,70	115,00	4,28	431,78	1163,72
11,04	120,00	4,42	431,92	1214,31
11,34	125,00	4,53	432,03	1264,91
11,53	130,00	4,61	432,11	1315,51
11,80	135,00	4,72	432,22	1366,10

Tabella 15: valori curva di deflusso combinazione dei due sfioratori

Si può osservare come venga raggiunta una portata defluente corrispondente al battente di progetto pari a $Q_P = 1251,41 \text{ m}^3/\text{s}$, ovvero $Q_m = 123,66 \text{ l/s}$: dall'analisi di questi risultati è possibile constatare come il valore di portata ottenuto risulta essere inferiore al valore di portata riportato nella relazione idraulica ENEL.

Infatti, quest'ultima precisa che con il nuovo sfioratore in progetto le capacità di scarico della diga dovranno risultare modificate in maniera tale da avere una capacità di deflusso complessiva pari a $Q_P = 1400,00 \text{ m}^3/\text{s}$ con il contributo dello scarico di fondo, e $Q_P = 1359,00 \text{ m}^3/\text{s}$ senza considerare il contributo dello scarico di fondo.

Avendo deciso di non includere all'interno del modello idraulico lo scarico di fondo, emerge una differenza di portata da recuperare pari a $\Delta Q_p = 107,59 \text{ m}^3/\text{s}$ affinché possano essere rispettate le prescrizioni citate nella relazione idraulica.

Non potendo modificare la configurazione geometrica dello sfioratore laterale già esistente, per incrementare la portata defluente complessiva occorre apportare delle modifiche progettuali al nuovo scarico di superficie posto in corpo diga in maniera tale che quest'ultimo venga dimensionato in maniera tale da erogare un quantitativo aggiuntivo di portata pari a ΔQ_p .

6. METODOLOGIA INNOVATIVA LASER

Una volta terminato lo studio del comportamento idraulico in termini di scala di deflusso della configurazione esistente e di quella di progetto relativa al modello ed al prototipo della diga di Gurzia, seconda e terza parte dell'elaborato si sono concentrate sullo studio e conseguente applicazione di una metodologia innovativa basata sull'utilizzo di fasci di laser per ricavare i profili della lama d'acqua sfiorante in corrispondenza di varie sezioni dello sfioratore laterale, e per la determinazione dei profili di corrente bifase aria-acqua a valle dello sfioratore stesso.

Prima di approfondire le fasi di tale sperimentazione, è opportuno sottolineare l'efficacia di tale metodologia oltreché un grosso passo in avanti rispetto alle precedenti tecniche adottate per la ricostruzione di profili idrici, ormai obsolete e non più utilizzabili.

Il metodo tradizionale per il rilevamento dei profili, utilizzato fino a poco tempo fa, consisteva in una sorta di verifica visiva dove, posizionando una scacchiera posteriormente al profilo che si intende studiare, in maniera tale che essa possa essere utilizzata come sistema di riferimento per l'individuazione del profilo stesso, una volta scattata la foto era possibile ricostruire il profilo d'acqua individuando i punti d'interesse e calcolandone le rispettive coordinate all'interno del sistema di riferimento costituito dalla griglia stessa.

Tale metodologia, tuttavia, è affetta da una serie di problematiche riassunte di seguito:

- L'applicazione richiede parecchio tempo, sia per l'esecuzione della prova, sia per quanto riguarda la successiva fase di elaborazione dei dati;
- La precisione nell'individuazione delle coordinate dei punti di interesse ottenibile da tale metodologia non è soddisfacente, con un grado di precisione mai superiore all'ordine del millimetro;
- Campo di applicazione limitato: il posizionamento della griglia, infatti, ed il conseguente studio di una particolare sezione, risulta essere circoscritto a determinate situazioni, in quanto occorre prestare particolare attenzione ad esso in maniera tale da non interferire col flusso di corrente adiacente; risulta chiaro come tale metodologia risulta essere applicabile solo per alcune sezioni dello sfioratore laterale, ed inapplicabile nel caso dei profili di valle.

Per tali motivazioni si è deciso di sviluppare una nuova ed accurata tecnica che consentisse il superamento di tali aspetti negativi.

Di seguito sarà descritta la strumentazione utilizzata ed elencati tutti gli step di tale metodologia così da garantirne una corretta ed efficace applicazione.

6.1.Strumentazione di misura

Gli strumenti utilizzati sono prevalentemente due: una macchina fotografica ed un apparecchio laser.

6.1.1. Fotocamera digitale reflex

La fotocamera digitale reflex utilizzata è una “Canon EOS 550D”, la cui immagine è riportata sotto.



Figura 40: Canon EOS 550D

Essa è caratterizzata da un sensore da 18 megapixel, ed affida al processore DIGIC 4 la gestione delle immagini 14-bit che possono essere scattate a raffica a 3,7 fps, con sensibilità variabile da 100 a 6400 ISO.

Nelle sessioni fotografiche sono stati fatti variare alcuni parametri della fotocamera, al fine di ottenere una visualizzazione ottimale delle foto.

I parametri in gioco sono elencati di seguito:

- ISO: indica la sensibilità alla luce necessaria al sensore della fotocamera per scattare la medesima fotografia;
- Tempo di scatto: rappresenta l'ampiezza dell'intervallo di tempo durante il quale l'otturatore della macchina fotografica rimane aperto;
- Apertura del diaframma: permette di regolare la quantità di flusso luminoso che passa all'interno dell'obiettivo.

6.1.2. Laser a stato solido

La tipologia di laser utilizzato è un DPSSL (“Diode pumped solid state laser”), ovvero un laser a stato solido con pompaggio a diodo il cui mezzo attivo è un cristallo Ittrio-Alluminio Granato (YAG, cristallo isotropo) attivato nella maggior parte dei casi con ioni di Neodimio.

Il cristallo, il quale si presenta sotto forma di barre responsabili della potenza disponibile mediante una disposizione in serie di quest’ultime (lunghezza di 50 mm e diametro di 9 mm), una volta attivato, viene eccitato tramite due lampade al Krypton o Xenon inserite in un involucro ad alto potere riflettivo a forma di doppio cilindro ellittico. Le lampade possono emettere intensi flash in grado di far passare elettroni a livelli energetici più elevati ma instabili: questa operazione è detta “pompaggio”, e nel ritornare a livello originale, la restituzione di energia avviene sotto forma di energia elettromagnetica monocromatica caratterizzata da una certa lunghezza d’onda. Questi laser necessitano di un sistema di raffreddamento che asporti il calore in eccesso dalle barre di mezzo attivato, dalle lampade e dai sistemi elettronici di servizio, in quanto un eccessivo riscaldamento potrebbe portare ad una distorsione del materiale attivo fino ad una perdita di funzionalità dello strumento.

Il modello utilizzato è un puntatore laser verde “MIL 532”, caratterizzato da una potenza d’impulso pari a 200 mW, da una potenza di picco inferiore ai 500 mW e da una lunghezza d’onda pari a 532 nm: esso rappresenta uno dei laser più impiegati in campo industriale; segue un’immagine del laser utilizzato.



Figura 41: laser "MIL 532"

I DPSSL, operando ad esempio un confronto tra essi ed i laser a diodi, hanno vantaggi in termini di compattezza ed efficienza, sono caratterizzati da una qualità del raggio più alta, con la possibilità di raggiungere potenze molto alte mantenendo una qualità del fascio relativamente buona.

Tuttavia, questi ultimi risultano essere maggiormente sensibili alla temperatura, meno economici ed efficienti dal punto di vista energetico rispetto ai laser a diodi, con un'efficienza dell'ordine del 20/30 %.

6.2. Profili della lama d'acqua sfiorante in corrispondenza dello sfioratore laterale

Inizialmente tale metodologia è stata applicata per la ricostruzione dei profili della lama d'acqua sfiorante dallo sfioratore laterale.

Si descrivono le varie fasi nei seguenti paragrafi.

6.2.1. Posizionamento e calibrazione degli strumenti

Il primo passo di questa tecnica innovativa è stato il posizionamento del laser: si è deciso di posizionare tale strumento ad un'altezza di circa 3 m in corrispondenza di una barra metallica di lunghezza pari allo sviluppo della soglia sfiorante incernierata alla struttura reticolare in acciaio che circonda l'intera diga e tutte le sue parti: il collegamento tra barra e laser è stato realizzato mediante l'utilizzo di un carrellino in acciaio, così che quest'ultimo, e dunque il laser, potessero scorrere liberamente lungo tutta l'asta emettendo un fascio in grado di colpire perpendicolarmente tutte le sezioni dello sfioratore con un angolo di apertura pari a 30°.



Figura 42: sezioni dello sfioratore laterale

Come mostrato nella seguente immagine, sono state tracciate delle linee nere in corrispondenza delle sezioni dello sfioratore da analizzare, così da facilitare l'indirizzamento del laser e risolvere gli eventuali problemi di rifrazione luminosa dovuti al colore chiaro dell'opera stessa: la vernice nera, infatti, garantisce un maggior assorbimento del fascio luminoso del laser azzerando dunque i disturbi dovuti alla riflessione.

Sono state successivamente preparate delle griglie, fondamentali per la successiva fase di elaborazione dei dati: esse sono state costruite incollando una griglia, costituita da un'alternanza di quadrati bianchi e neri di lato pari a 5 cm, su un pannello in plastica opportunamente sagomato su un lato in maniera tale da adagiarsi in maniera il più fedele possibile sullo scivolo dello sfioratore; il pannello è stato inoltre attaccato ad un supporto in legno, poggiante sullo sfioratore lungo la sinistra orografica, e sulla lamiera ricoprente le sponde di valle lungo la destra orografica, così che il suo posizionamento fosse stabile e non si verificassero movimenti della griglia stessa.

Per garantire una corretta applicazione di tale tecnica, assume particolare importanza il posizionamento delle griglie e l'accuratezza della sua sagomatura: essendo la valle sottostante lo sfioratore caratterizzata da un andamento fortemente irregolare e differente da sezione a sezione, si è deciso di costruire tre differenti griglie, una prima da utilizzare per la calibrazione della sezione 3, un'altra utilizzabile per l'analisi delle sezioni 4 e 5, ed infine una terza griglia specifica per la calibrazione delle sezioni 6 e 7, così che in corrispondenza di ciascuna sezione la griglia potesse contemporaneamente poggiare sullo sfioratore laterale e non creare disturbo alla valle sottostante.

Una volta posizionato correttamente il supporto contenente la griglia è stata verificata l'orizzontalità della griglia mediante una livella.

Prima di procedere con l'esecuzione delle prove, è stato scelto il corretto posizionamento della fotocamera in modo tale che il piano contenente la fotocamera fosse il più possibile parallelo al piano contenente la griglia così da rendere minime le distorsioni geometriche; per ottenere inoltre una visibilità completa del profilo a partire dal ciglio sfiorante in corrispondenza dello sfioratore fino all'incontro della corrente con la valle sottostante, si è deciso di posizionare la fotocamera in posizione intermedia rispetto alle due sponde, incernierando la camera lungo un supporto posto in corrispondenza di una barra lunga diversi metri e poggiante su entrambe le sponde superiori della valle.

6.2.2. Esecuzione delle prove

Il primo step delle prove è stato quello di scattare varie foto alla griglia, prima dalla posizione scelta per il posizionamento della camera, e successivamente facendo variare la posizione di quest'ultima in maniera tale da poter effettuare in seguito una corretta calibrazione dei parametri della camera: ovviamente prima di ogni sessione fotografica occorre ricordarsi di effettuare la messa a fuoco della camera per evitare la comparsa di effetti di nitidezza nelle foto.



Figura 43: posizionamento della griglia in corrispondenza della sezione 5

Una volta fotografate tutte le griglie poste in corrispondenza delle varie sezioni da studiare, è stato acceso il sistema di pompaggio e si è passati allo studio dei profili.

Per migliorare l'individuazione del profilo, si è deciso di modificare il colore dell'acqua del canale mediante inserimento di pastiglie di rodamina al suo interno: esso è un particolare colorante in grado di riemettere luce di color giallo intenso se eccitato con luce di tonalità verde.

Le prove, eseguite in modalità notturna al fine di estrapolare il miglior profilo della lama d'acqua intesa come intersezione tra fascio laser e ciglio sfiorante, sono state eseguite in corrispondenza di cinque sezioni dello sfioratore laterale (sezione 3, sezione 4, sezione 5, sezione 6, sezione 7) e per quattro differenti valori di portata ($Q = 45 \text{ l/s}$, $Q = 60 \text{ l/s}$, $Q = 75 \text{ l/s}$, $Q = 90 \text{ l/s}$).

Occorre precisare che durante le fasi di variazione della portata, occorre attendere cinque minuti prima di procedere alle foto del profilo con la successiva portata, in maniera tale che quest'ultima possa stabilizzarsi rendendo minime le oscillazioni.

Per ciascuna prova, caratterizzata dunque da un certo valore di portata relativa ad una particolare sezione considerata, sono state scattate 200 foto facendo variare i parametri della camera in gioco al fine dell'ottenimento del miglior profilo; nello specifico, ciascuna sessione è stata ripetuta in maniera tale da far variare l'ISO (sono stati adottati due valori di ISO, 200 e 400) ed il tempo di scatto (varia in relazione alla portata considerata, partendo da un valore minimo pari ad 1 s fino ad un valore massimo pari a 2 s), mentre è stata mantenuta costante l'apertura del diaframma (f/3.5): la modalità adottata è dunque una regolazione manuale, chiamata "priorità otturatore tv" dove risultano essere regolabili i due precedenti parametri citati, e risulta essere costante un terzo parametro scelto in autom

atico dalla camera stessa per ottenere la giusta esposizione alla luce.

Sono state dunque eseguite complessivamente circa 120 sessioni fotografiche caratterizzate da 200 foto cadauna.

Segue una rappresentazione grafica dei profili relativi alla sezione 5 al variare delle portate in gioco:

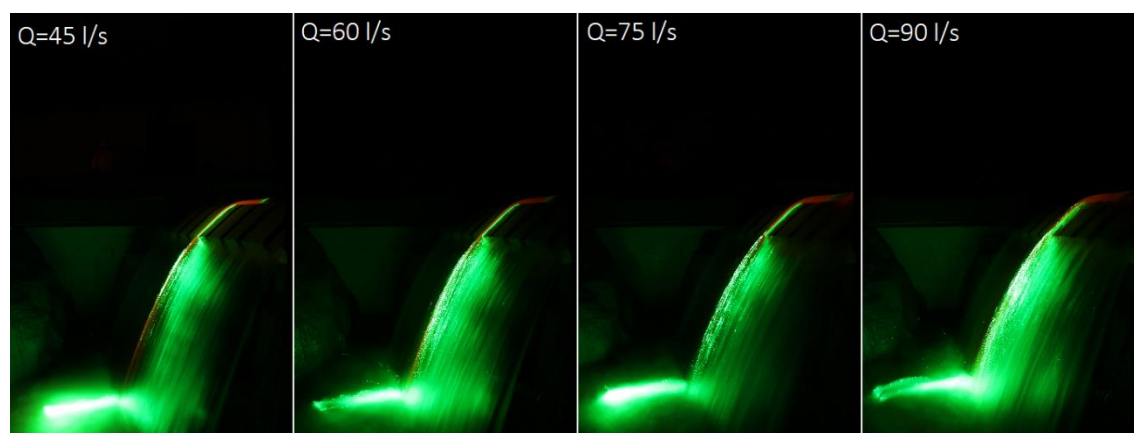


Figura 44: profili fotografici sezione 5

Dalle foto si può ben constatare come all'aumentare della portata, il profilo in corrispondenza dello sfioratore, rappresentato dal fascio rosso come intersezione tra acqua colorata e fascio laser, risulti essere via via meno visibile: anche per questo motivo è stata adottata questa nuova metodologia sperimentale, così che mediante la successiva elaborazione dei dati i vari profili risultino essere precisi.

6.2.3. Elaborazione dati

Una volta terminata la fase di esecuzione delle prove, si è passati a quella successiva, ovvero l'elaborazione delle immagini acquisite mediante software MATLAB.

Questa fase è articolata in vari step, i quali verranno analizzati in maniera approfondita di seguito.

Per garantire una corretta riuscita della calibrazione, è stato sfruttato un tool di MATLAB, "CameraCalibrator", il quale permette di generare una struttura contenente i parametri della camera (matrice di traslazione, matrice di rotazione, ecc.) a seguito dell'importazione all'interno di tale codice stesso delle foto della griglia eseguite da differenti angolazioni: la struttura, inoltre, tiene conto del non perfetto parallelismo tra piano della griglia e piano della camera, tanto che i quadratini del bordo della griglia risulteranno essere maggiormente deformati rispetto a quelli centrali e della leggera convessità dell'obiettivo.

Il primo passo dell'elaborazione è stato l'identificazione della griglia mediante il software stesso: una volta caricati i parametri della camera e la foto rappresentante la griglia con MATLAB, mediante apposito codice "detectCheckerboardPoints" è stato possibile individuare i vertici della griglia, ovvero quei punti in corrispondenza del quale si verifica un netto gradiente di colore nel passaggio da quadrato bianco a nero o viceversa: questi punti prendono il nome di "imagePoint", dei quali risultano essere note le coordinate pixel.

È importante sottolineare come questo tool imposti in maniera predefinita l'origine del sistema di riferimento in coordinate pixel in corrispondenza del primo vertice in alto a sinistra.

Successivamente, essendo note le dimensioni dei quadranti componenti la griglia, è stata impostata tale distanza pari a 5 cm all'interno del codice MATLAB creato, così che si potesse effettuare una trasformazione di coordinate da pixel a metriche tramite la generazione dei "newWorldPoint", coordinate metriche dei vertici della griglia.

A questo punto, è stato creato un nuovo codice per il riconoscimento del profilo della corrente sul ciglio sfiorante: sfruttando il fatto che tutte le immagini siano caratterizzate da un codice RGB, acronimo di Red, Green, Blue, ogni pixel della foto è caratterizzato da tre valori di coordinate, ciascuno dei quali indica l'intensità di questi tre colori partendo da un valore minimo pari a 0 fino ad un valore massimo pari a 255.

Dunque, sono stati impostati dei valori soglia alle coordinate pixel in maniera tale da evidenziare all'interno della foto stessa solo le parti di interesse, ovvero il profilo della corrente.

La seguente immagine rappresenta la fase di identificazione del profilo appena descritta nel caso di una generica foto estrapolata dalla generica sessione per differenti valori di portata nel caso della sezione 5:

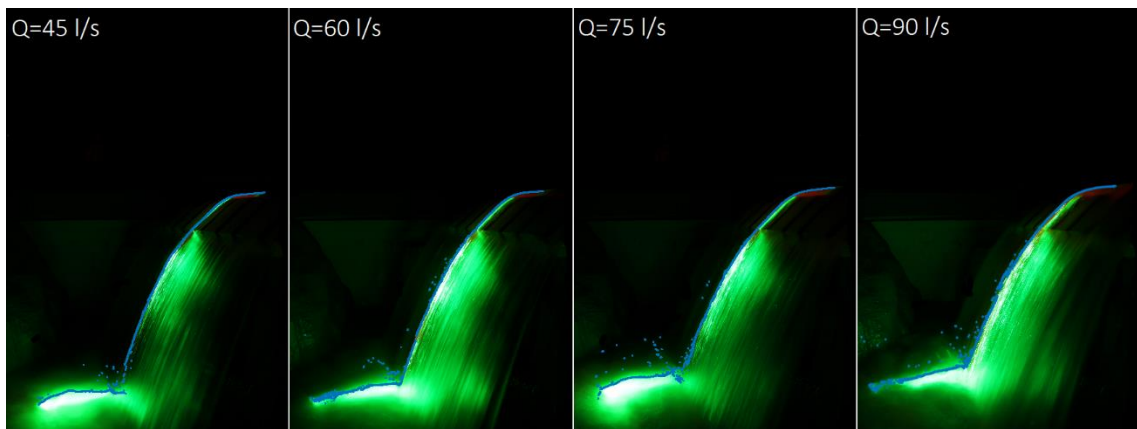


Figura 45: profili della corrente sezione 5

Chiaramente per ogni sessione fotografica, si andrà a considerare come profilo rappresentativo quello ottenibile dalla media dei 200 profili: come nel caso della griglia, anche la foto del è stata ritagliata in modo tale da escludere le parti non interessate, con il ritaglio che ovviamente dev'essere uguale in entrambi i casi in modo tale che le foto possano ancora combaciare.

Nel caso del profilo è stato utilizzato un apposita funzione denominata “hampel”, fondamentale per la rimozione degli outliers: avendo impostato una soglia costante per l'intera foto, è ammissibile che vengano intercettati dei punti all'interno della foto non corrispondenti però al profilo sfiorante per via dell'intensa turbolenza presente a valle dello sfioratore stesso; tale funzione agisce in maniera tale che per ogni punto si vadano a considerare un certo numero di punti n prima e dopo quello considerato, valutando se il punto risulta essere coerente con la traiettoria descritta, o se questo risulta essere fuori traiettoria rispetto alla media degli altri punti, dove, se viene verificata quest'ultima condizione, allora il punto viene eliminato dal profilo.

Una volta ottenuti i profili relativi ad una determinata sezione, si è proceduto con la trasformazione delle coordinate pixel del profilo in coordinate metriche con la funzione “pointsToWorld”, dipendente dalle coordinate pixel del profilo, dai parametri della camera, e dalla matrice di rotazione e traslazione del profilo, in maniera tale da poter sovrapporre profilo metrico e griglia grazie alla dimensione identica delle due foto.

I risultati ottenuti, in termini di rappresentazione del profilo della corrente in corrispondenza dello sfioratore in coordinate metriche con origine del sistema di riferimento fissato lungo lo sfioratore stesso, sono riportati nel seguente paragrafo.

6.2.4. Risultati ottenuti

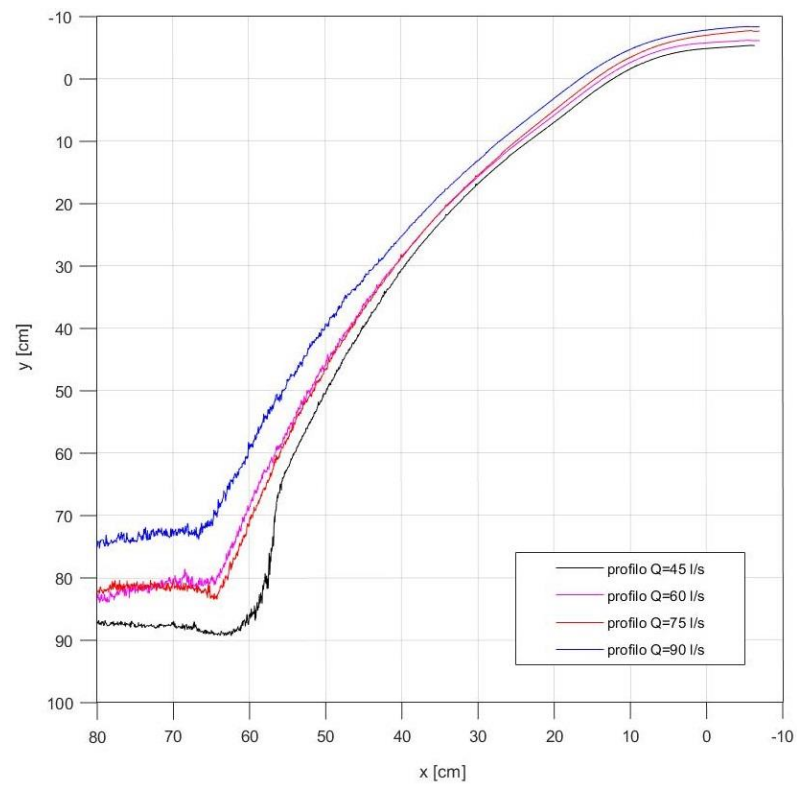


Figura 46: profilo sezione 3

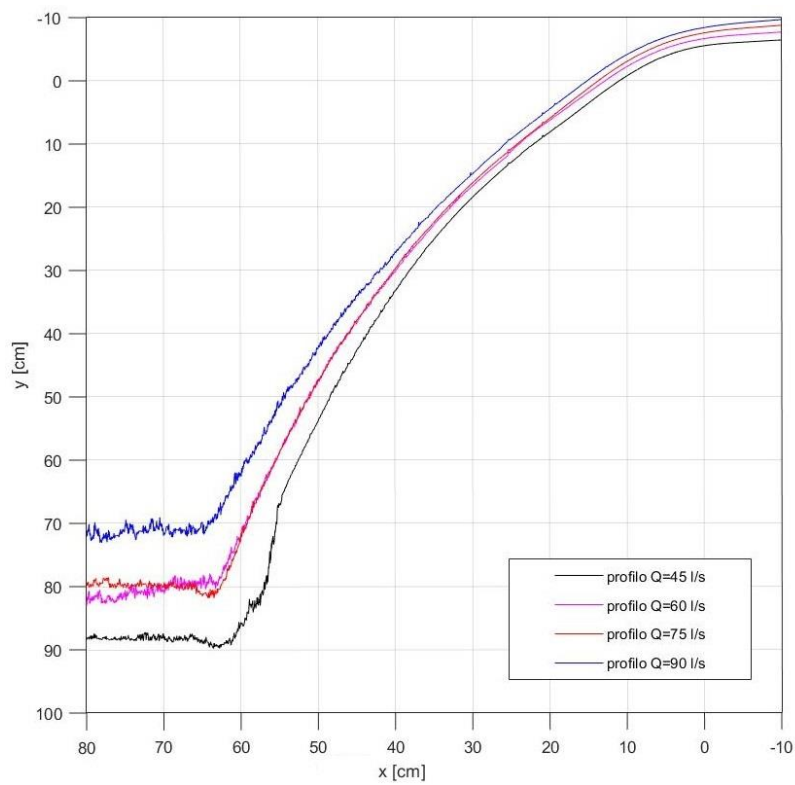


Figura 47: profilo sezione 4

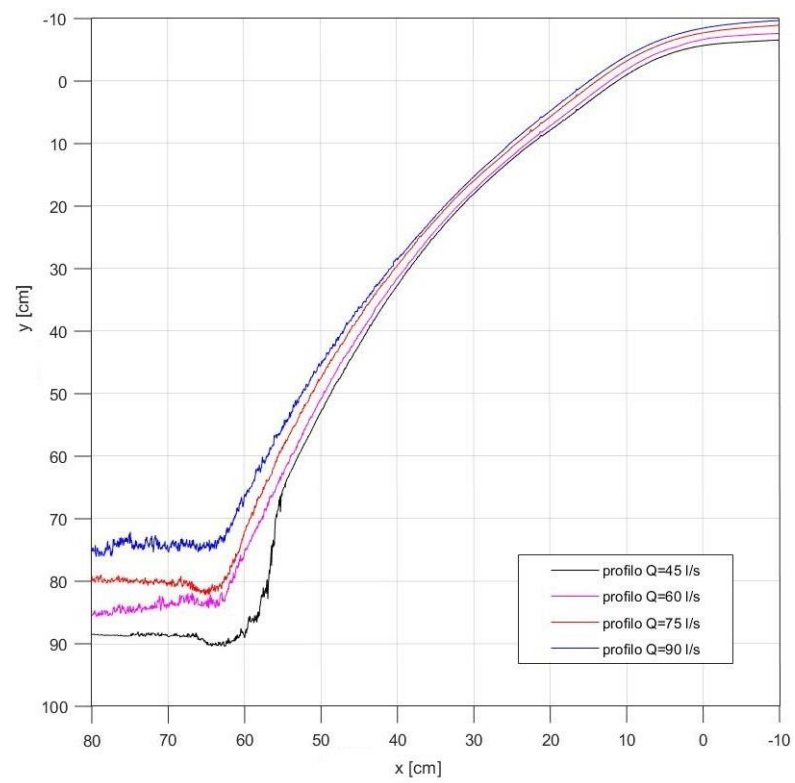


Figura 48: profilo sezione 5

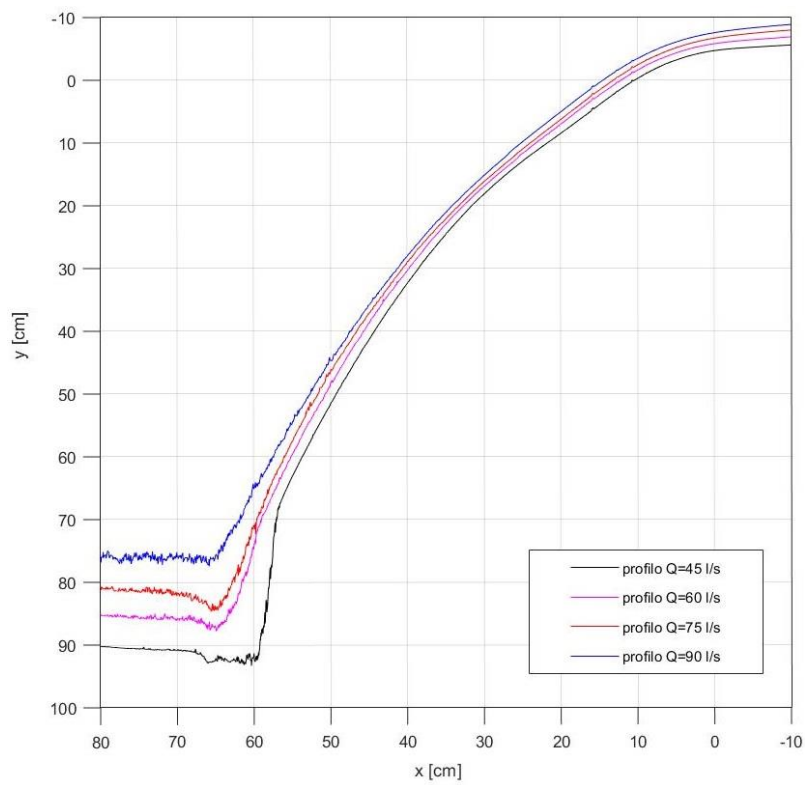


Figura 49: profilo sezione 6

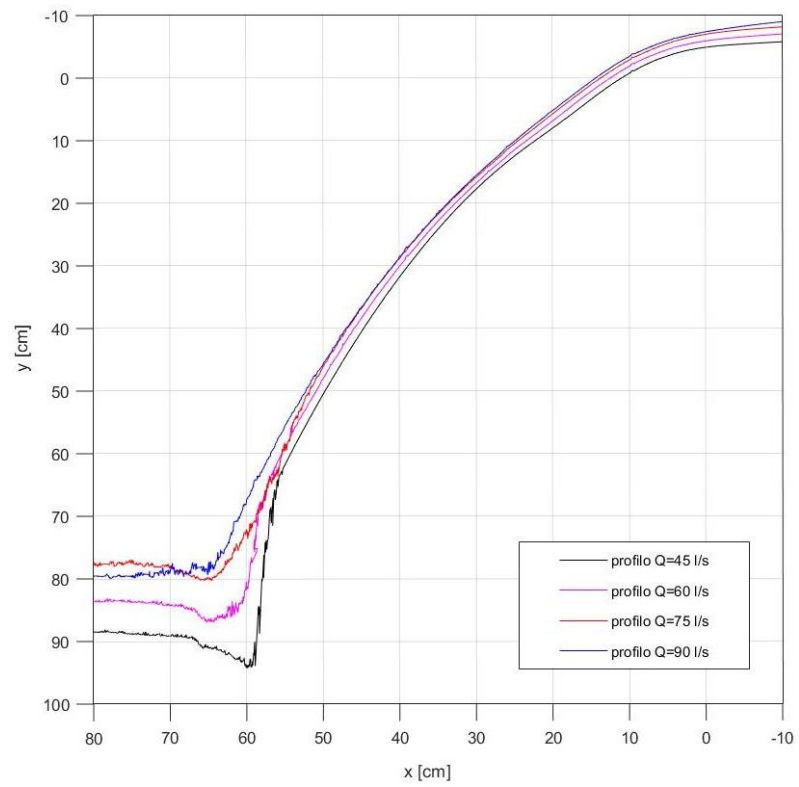


Figura 50: profilo sezione 7

6.3. Profili di correnti bifase aria-acqua a valle dello sfioratore

Sfruttando la medesima tecnica adoperata per la ricostruzione dei profili della lama sfiorante in corrispondenza dello sfioratore laterale, sono stati studiati i profili di alcune sezioni collocate nel secondo tratto vallivo del modello.

La strumentazione utilizzata risulta essere identica a quella precedentemente descritta.

Si descrivono gli step seguiti nei seguenti paragrafi.

6.3.1. Posizionamento e calibrazione degli strumenti

Prima di tutto sono state tracciate delle linee nere tramite utilizzo di vernice impermeabile in corrispondenza delle quattro sezioni da studiare: tale procedura è stata semplificata grazie alla presenza delle lamiere sottostanti costituenti le sezioni stesse, leggermente visibili, in maniera tale da poter tracciare queste linee con estrema precisione.

Successivamente ci si è soffermati sulla ricerca della posizione ottimale del laser, in maniera tale che quest'ultimo potesse illuminare con un angolo di apertura di circa 30° l'intera sezione: visto l'andamento fortemente irregolare della valle, la conformazione del modello non ha consentito l'individuazione di un'unica zona dove posizionare il laser per illuminare il maniera completa tutte le sezioni; per tale motivo, il laser è stato posizionato in posizioni differenti tra loro al variare della sezione considerata, in maniera tale da rilevare l'intera sezione ed evitare l'insorgere di problematiche legate alla presenza di ombra tra un tratto e l'altro.

A seconda della sezione considerata, il laser è stato posizionato in posizione adiacente ad essa stessa, montato sulla sommità di un treppiede ad un'altezza di quest'ultimo di circa 1,5 m, in corrispondenza di una delle due sponde della valle. Per garantire la stabilità del treppiede, viste le vibrazioni del corpo diga conseguenti all'utilizzo di intense portate, si è deciso di agganciare alla parte inferiore terminale del treppiede un peso di 15 kg.

Una volta posizionato il laser, sono state costruite quattro griglie a scacchiera costituite da fogli rettangolari di dimensioni variabili in relazione alla sezione considerata incollati su dei supporti plastici; il pannello è stato a sua volta incollato su una asta in legno di dimensioni variabili in maniera tale da permetterne l'appoggio lungo le sponde. Al contrario delle precedenti sperimentazioni, in questo caso è stata utilizzata una griglia costituita da un'alternanza di quadrati bianchi e neri di lato pari a 5 mm, dunque dieci volte più piccoli rispetto a quelli utilizzati per le griglie dello sfioratore. Una volta posizionato correttamente il supporto contenente la griglia è stata verificata l'orizzontalità della griglia mediante una livella.

Nella seguente immagine sono rappresentate le griglie posizionate in corrispondenza delle quattro sezioni analizzate, partendo dalla sezione 9 (in alto a sinistra), proseguendo con la sezione 11 (in alto a destra) e sezione 12 (in basso a sinistra), e concludendo con la sezione 16 (in basso a destra).

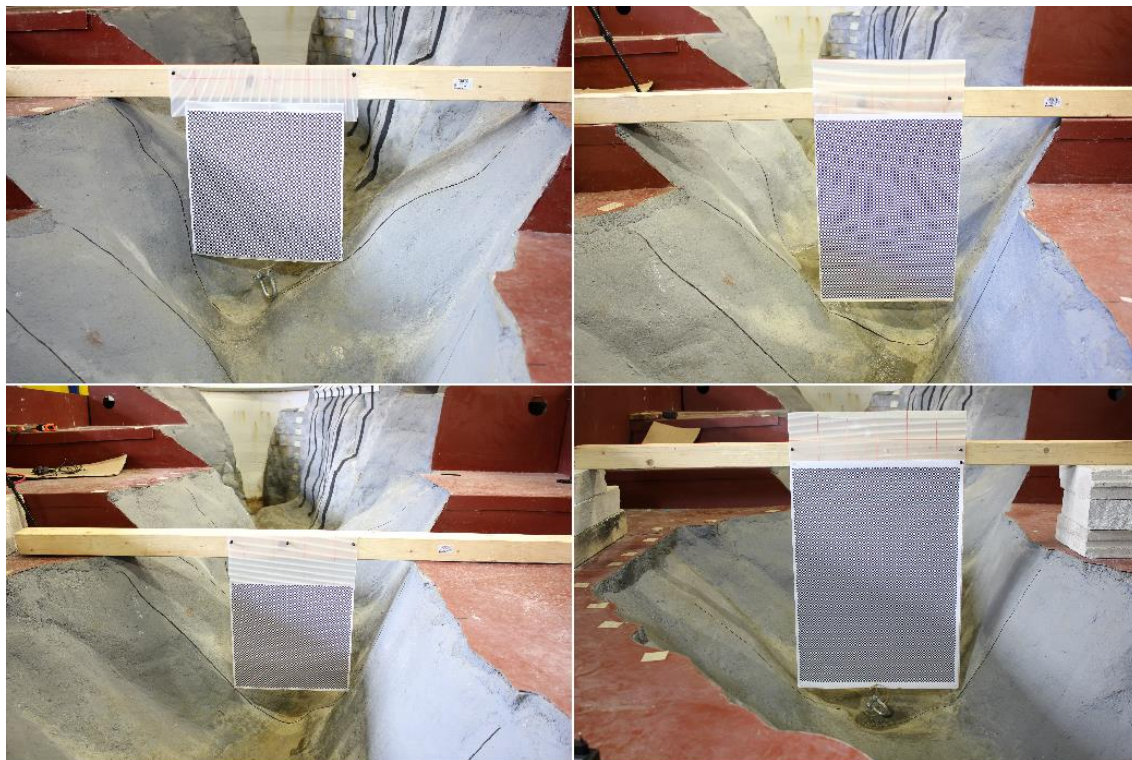


Figura 51: posizionamento delle griglie lungo le sezioni di valle

Come si può notare dalle foto, alla parte inferiore della griglia è stato legato un piccolo peso in maniera tale da stabilizzarne il posizionamento evitando eventuali oscillazioni della stessa.

Prima di procedere con l'esecuzione delle prove, è stato scelto il corretto posizionamento della fotocamera in modo tale che il piano contenente la fotocamera fosse il più possibile parallelo al piano contenente la griglia così da rendere minime le distorsioni geometriche; per ottenere inoltre una visibilità completa del profilo lungo l'intera sezione si è deciso di posizionare la fotocamera in posizione intermedia rispetto alle due sponde, incernierando la camera lungo un supporto posto in corrispondenza di una barra lunga diversi metri e poggiante su entrambe le sponde superiori della valle; solo nel caso della sezione 16, quella maggiormente situata a valle rispetto alle altre, la fotocamera è stata posizionata su un treppiede in corrispondenza del piano del laboratorio. Occorre sottolineare come la posizione della fotocamera sia stata fatta variare in relazione alle sezioni analizzate, al fine di ottenere la vista migliore del generico profilo.

6.3.2. Esecuzione delle prove

Il primo passo relativo all'esecuzione delle prove è stato quello di scattare delle foto alla griglia facendo variare una serie di parametri in gioco tra cui l'ISO, in maniera tale da ottenere una foto rappresentativa della griglia luminosa così da agevolare la lettura dei vertici successiva tramite software MATLAB.

Effettuata la procedura obbligatoria di messa a fuoco della camera, è stato constatato come utilizzando un valore dell'ISO pari a 200 è stato possibile ottenere delle foto luminose senza compromettere la qualità della foto.

Questa fase è stata applicata per tutte le sezioni considerate: anche in questo caso, sono state scattate delle foto alla griglia da varie posizioni in maniera tale da poter effettuare successivamente tramite software la calibrazione dei parametri della camera.

Lo step successivo è stato quello di fotografare i profili: una volta acceso il sistema di pompaggio, ricorrendo all'utilizzo della pompa da 40 kW in quanto in questa sessione è stato necessario raggiungere portate pari a quella di progetto della diga, si è passati all'esecuzione delle prove, anche in questo caso eseguite in modalità notturna in maniera tale da ottenere un profilo della corrente caratterizzato da un'accurata precisione.

Le prove sono state eseguite in corrispondenza di quattro sezioni di valle (sezione 9, sezione 11, sezione 12, sezione 16) e per cinque differenti valori di portata ($Q = 50$ l/s, $Q = 70$ l/s, $Q = 90$ l/s, $Q = 110$ l/s, $Q = 135$ l/s).

Le varie sezioni, essendo le tempistiche associate a tale metodologia sufficientemente lunghe, sono state studiate in giorni differenti.

Durante la fase fotografica relativa ad una generica sezione, è stata fatta variare la portata partendo dal valore massimo pari a $Q = 135$ l/s fino al valore minimo pari a $Q = 50$ l/s, attendendo circa cinque minuti durante la fase di variazione della portata in maniera tale che quest'ultima si stabilizzasse prima di procedere con l'analisi della sezione con la portata successiva.

Per ciascuna sessione relativa ad una determinata sezione e portata, sono state scattate 200 foto, dove questa è caratterizzata da determinati valori di ISO e tempo di scatto scelti: sono state eseguite delle sessioni con valori dell'ISO pari a 100 e 200, mentre il tempo di scatto è stato scelto in relazione alla portata considerata in maniera tale da migliorare la visualizzazione del profilo; è stato constatato come per portate alte ($Q = 110$ l/s, $Q = 135$ l/s) i tempi di scatto che permettessero l'individuazione del miglior profilo erano dell'ordine di 0,05/0,1 s, mentre per portate medio-basse ($Q = 50$ l/s, $Q = 70$ l/s, $Q = 90$ l/s) il miglior profilo si presenta per valori del tempo di scatto pari a 0,1/0,5 s.

Anche in questo caso è stata lasciato costante il valore dell'apertura del diaframma, pari appunto a $f/3.5$.

Approfondendo il discorso legato alle sessioni, occorre notare come prima di tutto siano stati fotografati i profili delle sezioni dell'alveo senza corrente, i quali successivamente saranno fondamentali per il calcolo della sezione del contorno bagnato.

I profili delle quattro sezioni considerate in condizione di assenza del moto ($Q_m = 0$ l/s) sono rappresentati nella seguente immagine:

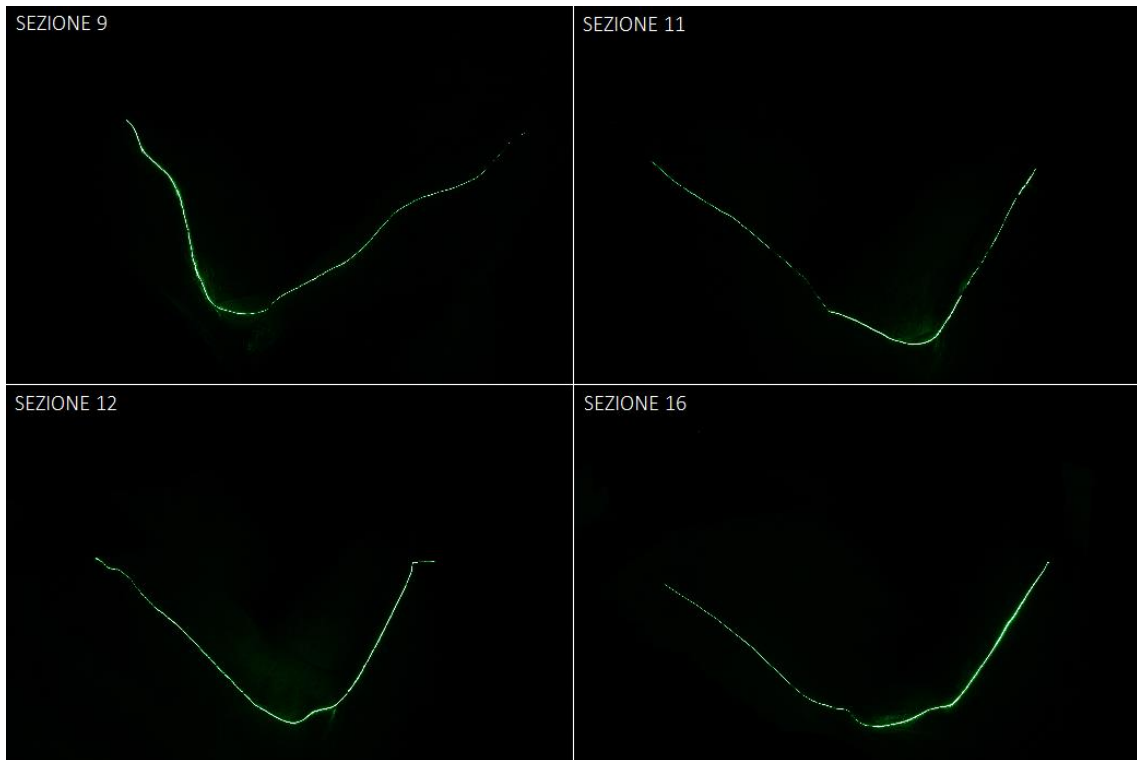


Figura 52: profili delle sezioni in assenza di moto

In questa fase le foto migliori sono state ottenute con un valore dell'ISO pari a 100 ed un tempo di scatto pari a 0,2 s.

Terminata tale fase, è stata accesa la pompa scelta e sono iniziate le sessioni fotografiche.

Sono state dunque eseguite complessivamente circa 30 sessioni fotografiche caratterizzate da 200 foto cadauna per ciascuna sezione.

Segue una rappresentazione grafica dei profili delle varie sezioni al variare della portata:

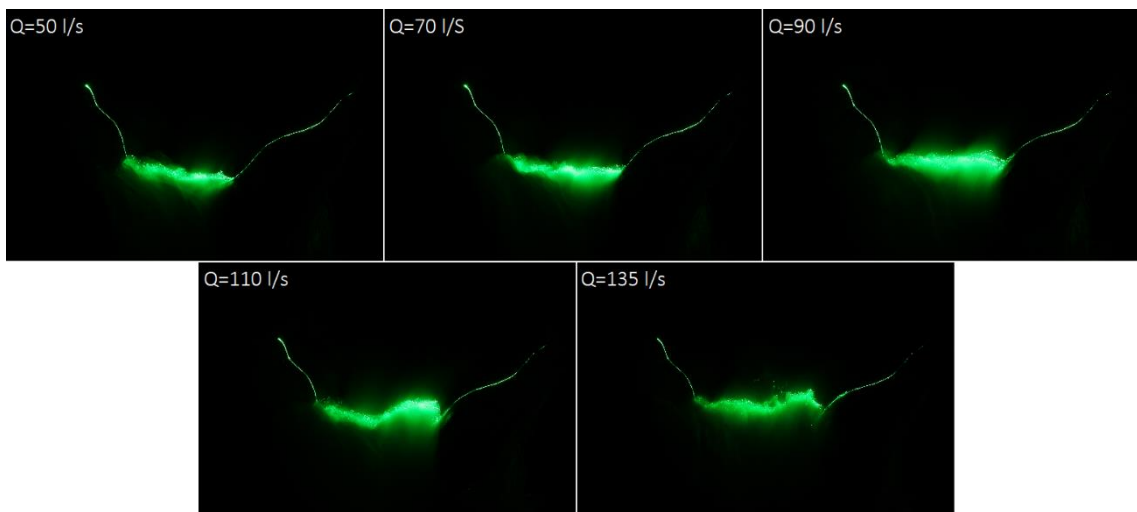


Figura 53: profili fotografici sezione 9

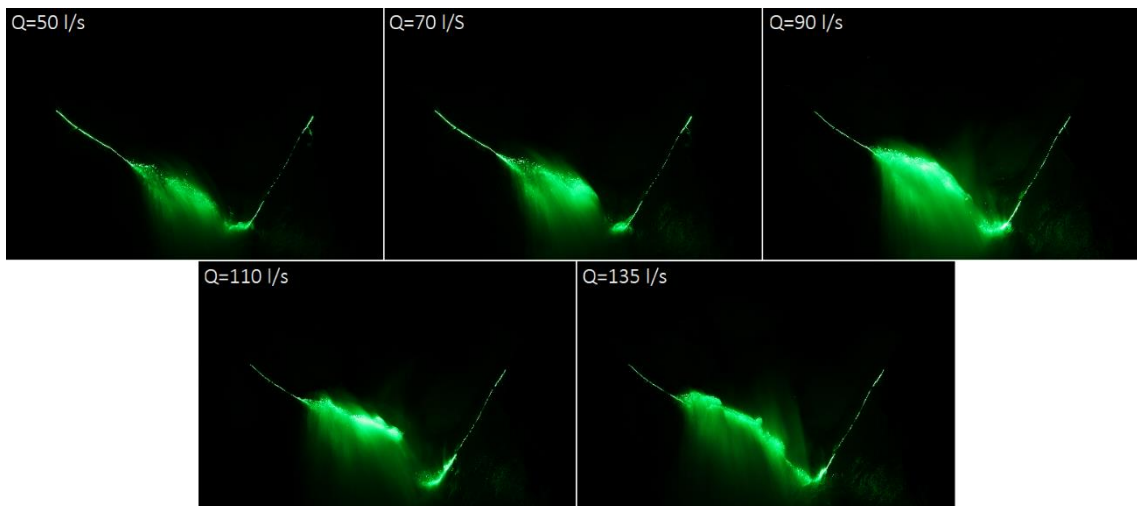


Figura 54: profili fotografici sezione 11

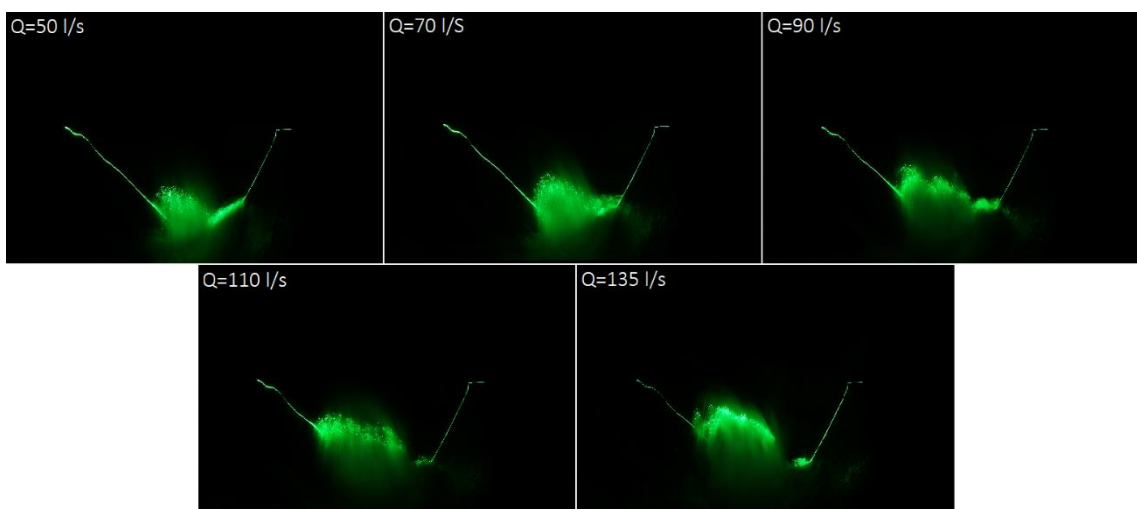


Figura 55: profili fotografici sezione 12

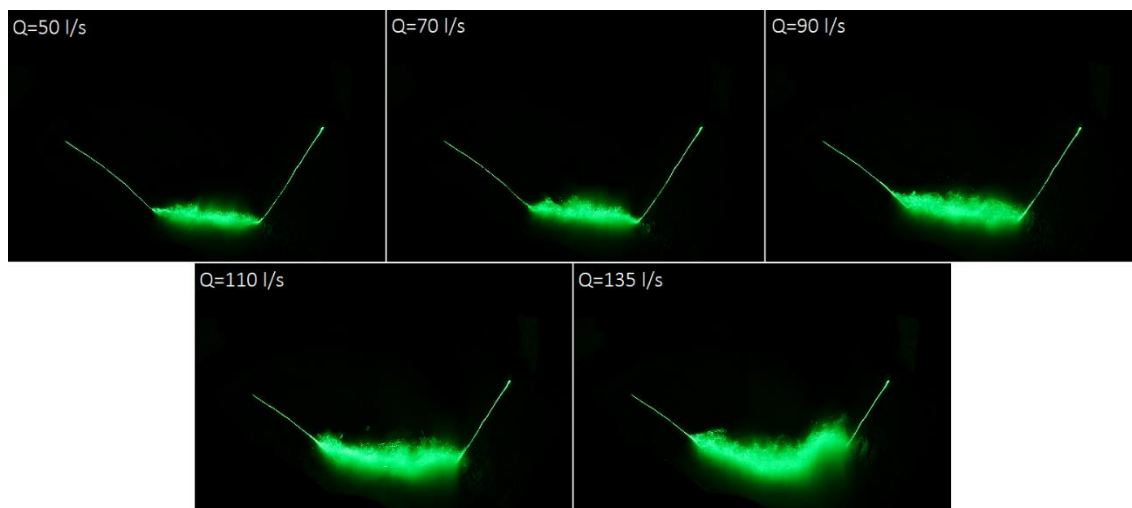


Figura 56: profili fotografici sezione 16

Dalle foto si può inizialmente notare come i profili relativi alle sezioni 9 e 16 siano caratterizzati da una maggior regolarità rispetto a quelli relativi alle sezioni 11 e 12: infatti le sezioni a monte di queste ultime sono caratterizzate da intensa irregolarità nella morfologia della valle con la presenza di salti di quota e bruschi cambi di direzione che si traducono in una forte irregolarità di quest'ultimo.

Il profilo 16, ad esempio, risulta essere sufficientemente regolare: di fatto esso risulta essere confinato a monte da una sezione abbastanza regolare senza la presenza di eventuali cambi di direzione o salti idraulici.

Dunque, ancora prima di analizzare i profili in termini numerici mediante software MATLAB, è possibile individuare quali sezioni risultino essere caratterizzate da intensa o debole turbolenza, dove quest'ultima dipende dalla morfologia ma anche dalla portata defluente nell'alveo.

6.3.3. Elaborazione dati

Una volta terminata la fase di esecuzione delle prove, si è passati a quella successiva, ovvero l'elaborazione delle immagini acquisite mediante software MATLAB i cui step verranno analizzati di seguito nel dettaglio.

La fase di elaborazione dei dati risulta essere molto simile a quella seguita per l'identificazione dei profili della lama d'acqua lungo lo sfioratore laterale: anche in questo caso tramite l'apposito tool di MATLAB, "CameraCalibrator" è stata generata una struttura contenente i parametri della camera in termine di matrice di traslazione e matrice di rotazione, per tenere dunque conto delle eventuali distorsioni angolari della griglia causate dal non perfetto parallelismo tra piano della macchina fotografica e quello della griglia: questa procedura è stata possibile successivamente ad una sessione di 15/20 foto della griglia da posizioni differenti.

Anche qui, il primo passo di tale fase consiste nell'identificazione dei vertici della griglia tramite il software di calcolo MATLAB: occorre tenere presente che, nonostante sia stato utilizzato lo stesso codice delle precedenti elaborazioni dei dati in cui i vertici sono individuati in base al netto gradiente di colore nel passaggio tra quadrati bianchi e neri, questa fase risulta essere molto più lenta per il maggior numero dei vertici della griglia da individuare se paragonati a quelli della griglia utilizzata nel caso dello sfioratore laterale.

Individuati questi punti, i quali prendono il nome di “imagePoint”, coordinate pixel dei vertici, e fissato automaticamente il sistema di riferimento in alto a sinistra in base al codice di identificazione della griglia, è stata impostata la distanza tra i vertici pari a 5 mm, in maniera tale che MATLAB possa effettuare una trasformazione di coordinate da pixel metriche, ottenendo così i cosiddetti “newWorldPoint”, coordinate metriche dei vertici della griglia.

Successivamente, mediante utilizzo del codice per il riconoscimento del profilo in relazione ad una soglia prefissata, sono state determinate le coordinate pixel del profilo in condizioni di assenza del moto (coordinate della valle) e del profilo relativo alle varie portate considerate impostando un valore limite della soglia del colore verde compreso in un range 220/250.

La seguente immagine rappresenta la fase di identificazione del profilo appena descritta nel caso di una generica foto estrapolata dalla generica sessione per differenti valori di portata nel caso della sezione 16:

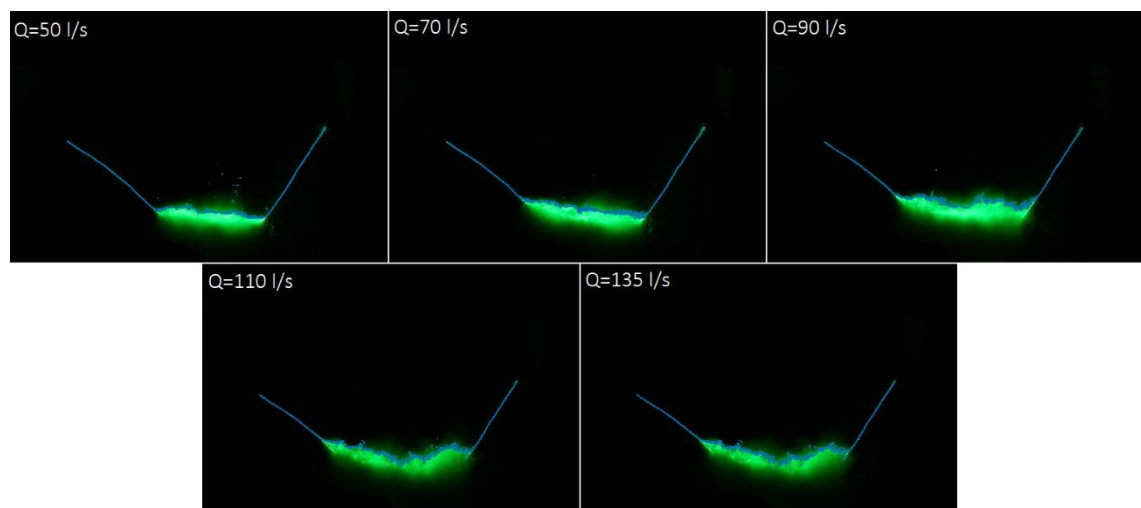


Figura 57: profili della corrente sezione 16

Chiaramente per ogni sessione fotografica, si andrà a considerare come profilo rappresentativo in termini di coordinate pixel quello ottenibile dalla media dei 200 profili.

Tale profilo è stato ritagliato in maniera identica alla procedura di taglio eseguita per la griglia, in maniera tale che le due foto rappresentati griglia e profilo identificato potessero combaciare.

Di seguito è rappresentato un esempio di sovrapposizione di tali immagini relative alla sezione 12 con una portata di 90 l/s:

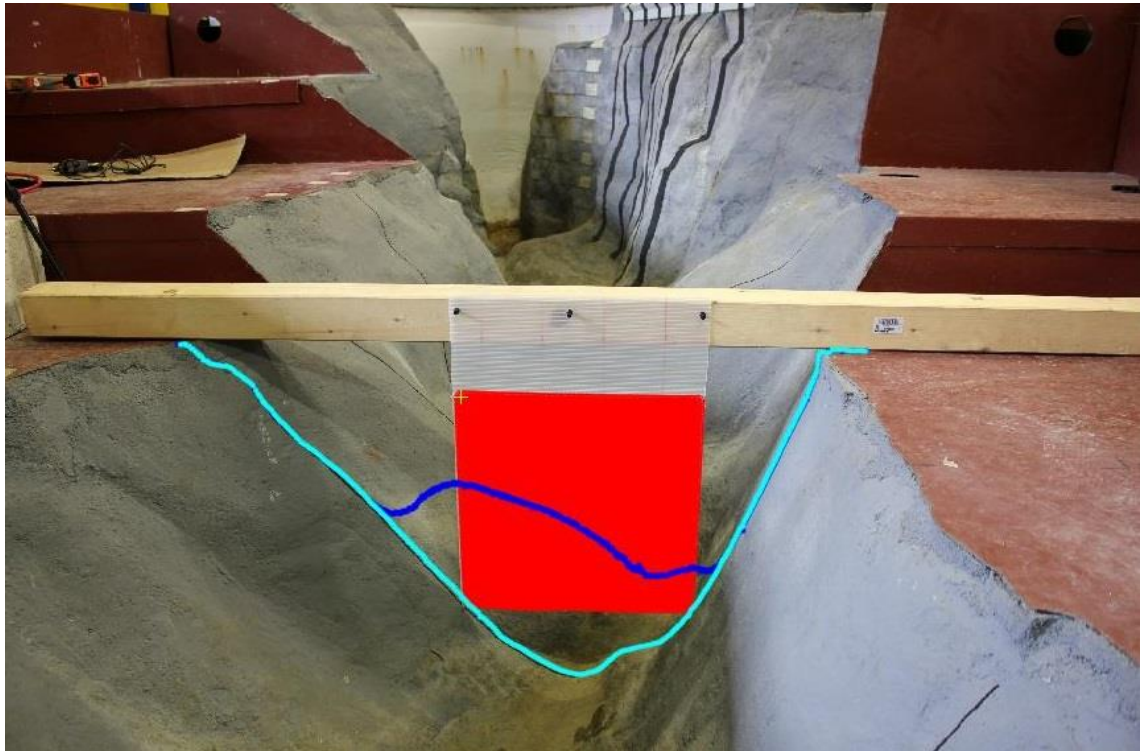


Figura 58: sovrapposizione tra griglia e profilo

È stata utilizzata anche in questo caso la funzione “hampel”, fondamentale per la rimozione di alcuni outliers, così da evitare che alcuni punti rappresentanti schizzi derivanti dall’incontro tra corrente e parete rocciosa venissero considerati come punti appartenenti in termine di coordinate al medesimo profilo.

Una volta ottenuti i profili relativi ad una determinata sezione e portata, si è proceduto alla fase di trasformazione di coordinate pixel dei profili (valle e corrente) in coordinate metriche tramite l’utilizzo della funzione “pointsToWorld”, dipendente dalle coordinate pixel del profilo, dai parametri della camera, e dalla matrice di rotazione e traslazione del profilo, in maniera tale da poter sovrapporre profilo della corrente metrico, profilo della valle metrico e griglia grazie alla dimensione identica delle foto.

6.3.4. Risultati ottenuti

Una prima parte dei risultati ottenuti consiste nella rappresentazione grafica dei profili della corrente in coordinate metriche relative alle sezioni analizzate al variare della portata defluente; questi risultati sono rappresentati nelle successive immagini:

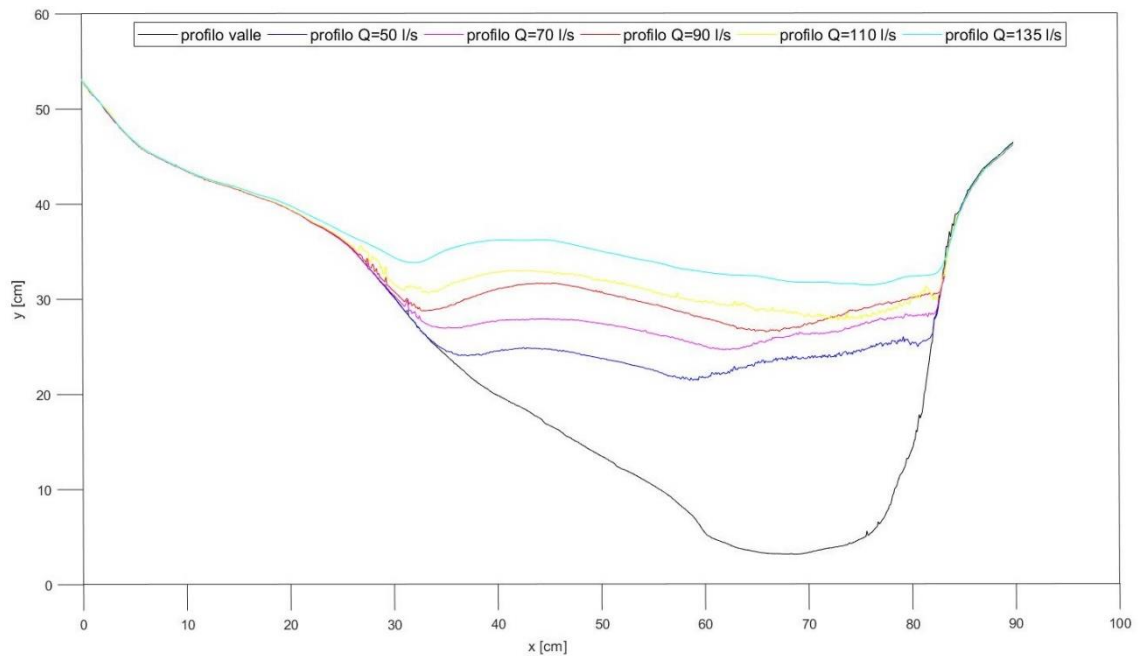


Figura 59: profili combinati sezione 9

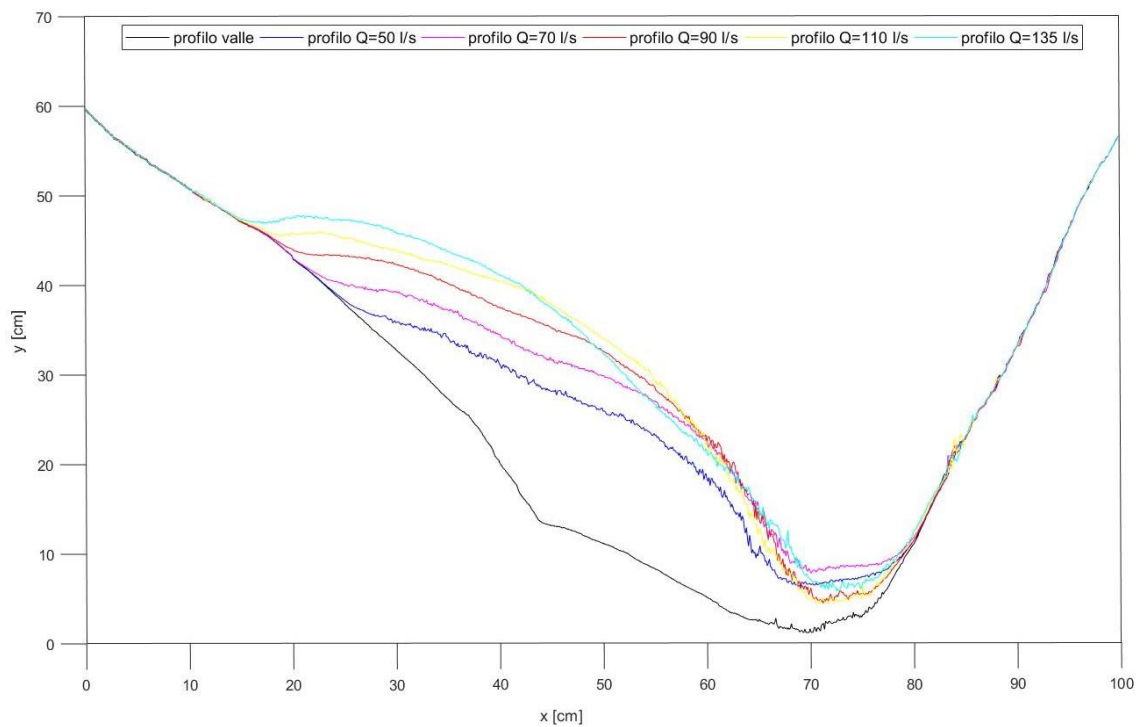


Figura 60: profili combinati sezione 11

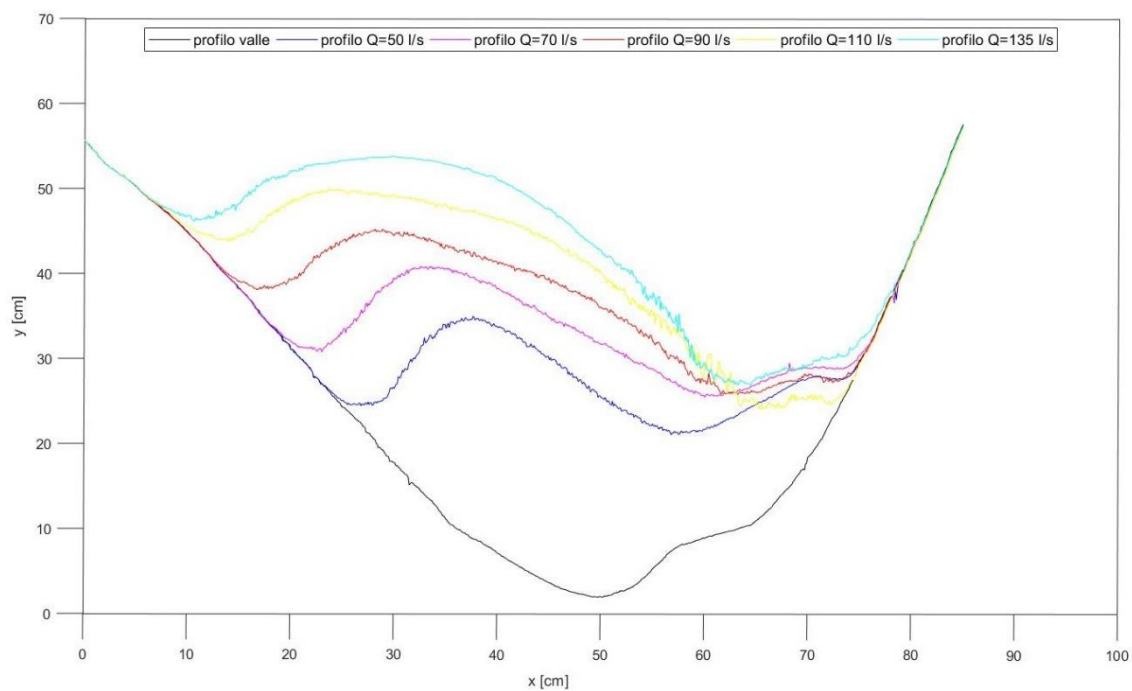


Figura 61: profili combinati sezione 12

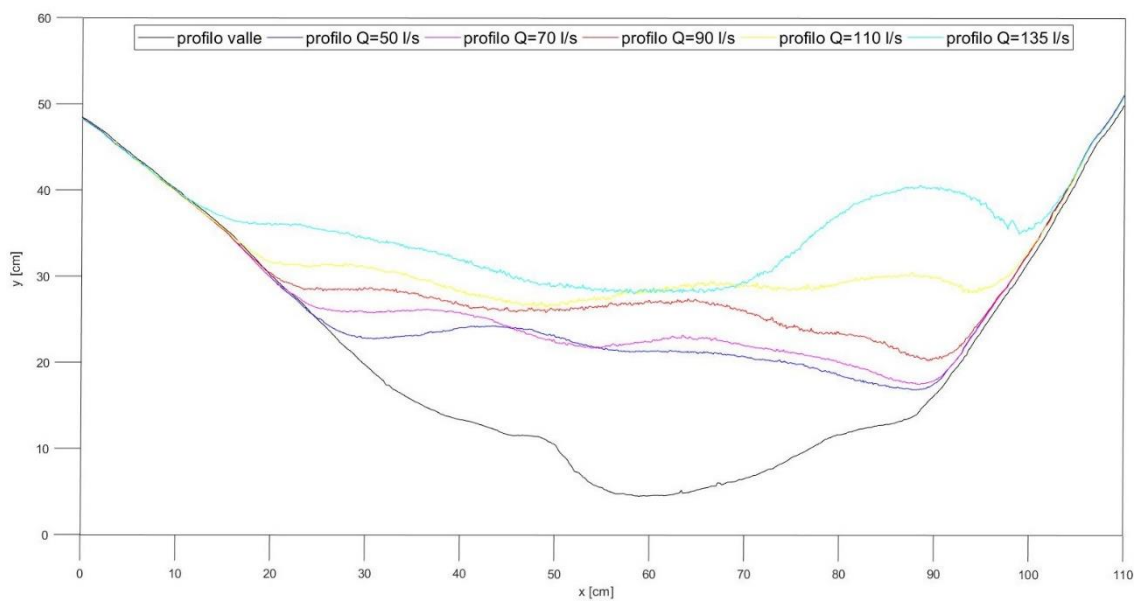


Figura 62: profili di corrente sezione 16

Una volta determinati tutti i profili metrici, si è deciso di calcolare l'area occupata dalla corrente all'interno delle varie sezioni al variare della portata defluente, in maniera tale da poter calcolare successivamente la velocità media della corrente in una determinata sezione.

Per fare ciò è stata utilizzata l'apposita app di MATLAB “curve fitting” applicando i seguenti passaggi: sono state importate all'interno dell'app le coordinate metriche del profilo, e selezionando la tipologia di funzione interpolante (“smoothing spline”) e gli intervalli in cui si desidera applicare tale interpolazione, è stata ricostruita la curva interpolante i punti caratterizzata da elevata precisione: nella seguente immagine sono rappresentati i punti del profilo e la curva interpolante, da cui si può notare che la funzione determinata approssima molto bene i punti del profilo.

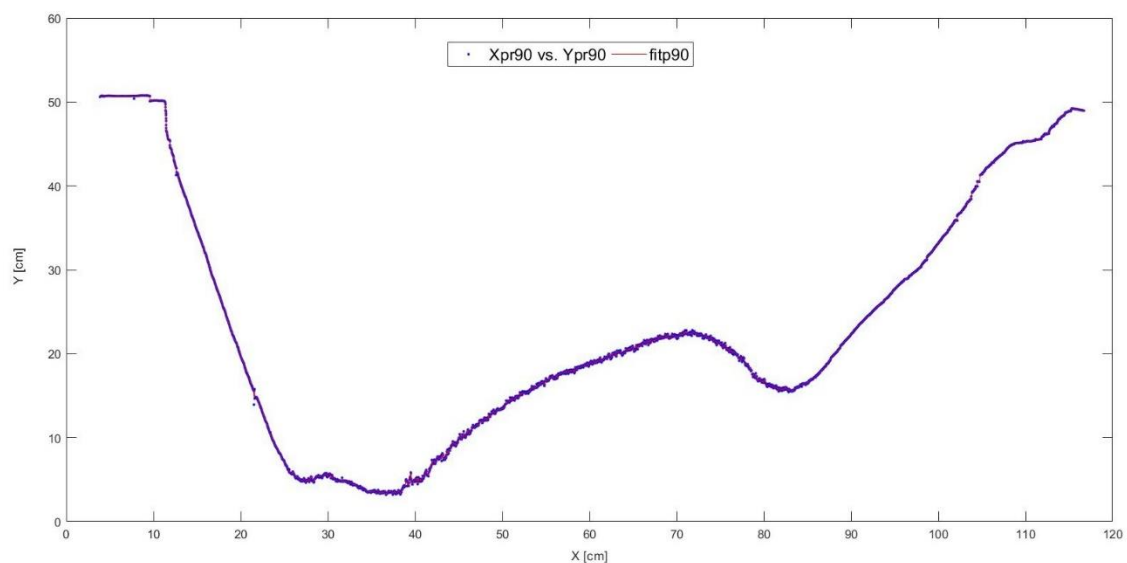


Figura 63: tracciamento funzione interpolante

Ottenuto la funzione interpolata denominata “fitp”, è stato creato un vettore contenente circa 120 punti con passo circa pari ad 1 cm rappresentanti le ascisse del nostro profilo, e sfruttando la precedente funzione interpolante sono state ricavate le ordinate corrispondenti alle ascisse del profilo; la medesima procedura è stata applicata anche per il profilo della valle.

Tramite questa procedura è stato ottenuto un profilo lineare sia della corrente sia della valle, in maniera tale che l'intersezione tra queste due curve generasse un'area delimitata della quale fosse possibile calcolarne la superficie.

Utilizzando il comando “trapz” è stata calcolata facilmente l'area occupata dalla corrente in tutte le sezioni e per tutti i valori di portata defluente.

Nella seguente immagine è rappresentato il calcolo dell'area della corrente tramite MATLAB, dove quest'ultima è rappresentata dalla superficie blu.

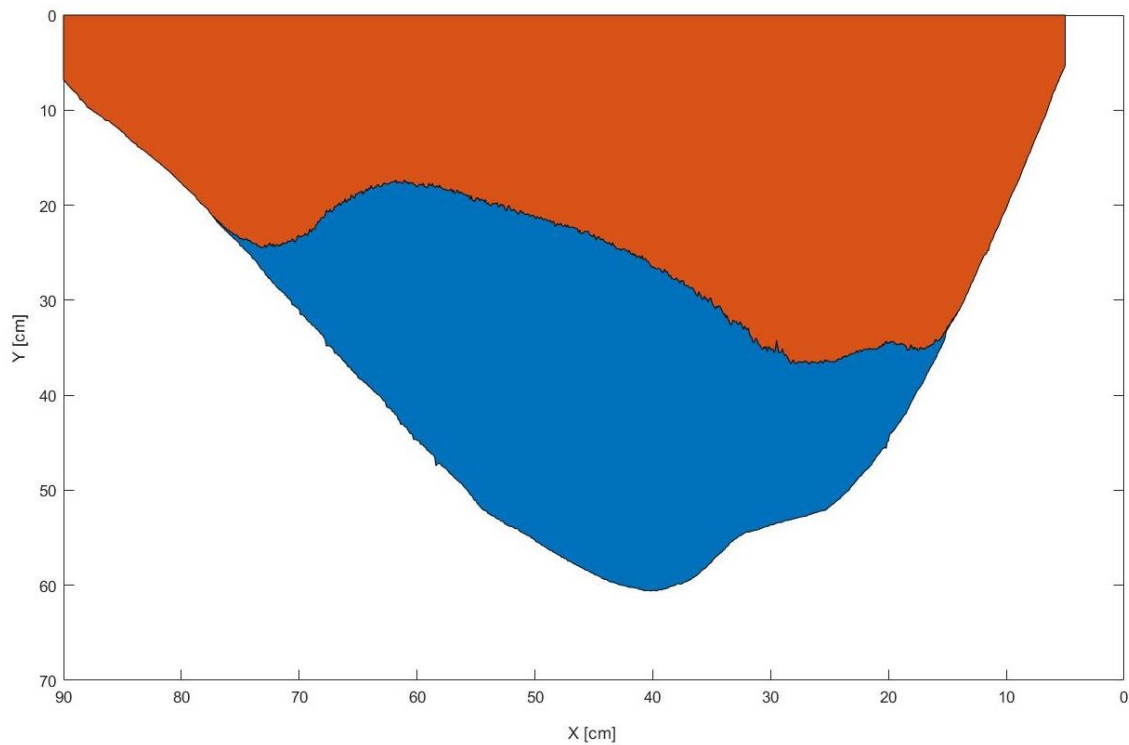


Figura 64: calcolo dell'area tramite MATLAB

Una volta calcolata l'area risulta essere immediato il calcolo della velocità media della corrente bifase aria-acqua tramite la seguente relazione in funzione della portata defluente e dell'area della sezione:

$$\bar{U} = \frac{Q}{A}$$

Quindi è stata calcolata prima di tutto la velocità media nel modello U_m , e successivamente questa è stata convertita in funzione della scala del modello nella velocità media nel prototipo U_p tramite le seguenti relazioni:

$$U_m = \frac{Q_m}{A_m}$$

$$U_p = \frac{U_m}{\lambda^{0.5}}$$

Dove:

- Q_m è la portata nel modello;
- A_m è la superficie della sezione nel modello.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

SEZIONE 9

Modello scala 1:40			Prototipo	
Portata	Area	Velocità	Portata	Velocità
[l/s]	[m ²]	[m/s]	[m ³ /s]	[m/s]
50,00	0,061	0,83	505,00	5,22
70,00	0,075	0,93	708,00	5,88
90,00	0,087	1,02	910,00	6,48
110,00	0,095	1,16	1113,00	7,36
135,00	0,113	1,20	1366,00	7,59

Tabella 16: risultati ottenuti sezioni 9

SEZIONE 11

Modello scala 1:40			Prototipo	
Portata	Area	Velocità	Portata	Velocità
[l/s]	[m ²]	[m/s]	[m ³ /s]	[m/s]
50,00	0,048	1,03	505,00	6,54
70,00	0,065	1,07	708,00	6,79
90,00	0,073	1,23	910,00	7,79
110,00	0,079	1,38	1113,00	8,74
135,00	0,083	1,61	1366,00	10,17

Tabella 17: risultati ottenuti sezione 11

SEZIONE 12

Modello scala 1:40			Prototipo	
Portata	Area	Velocità	Portata	Velocità
[l/s]	[m ²]	[m/s]	[m ³ /s]	[m/s]
50,00	0,081	0,62	505,00	3,90
70,00	0,11	0,64	708,00	4,02
90,00	0,13	0,69	910,00	4,36
110,00	0,149	0,74	1113,00	4,66
135,00	0,169	0,80	1366,00	5,04

Tabella 18: risultati ottenuti sezione 12

SEZIONE 16

Modello scala 1:40			Prototipo	
Portata	Area	Velocità	Portata	Velocità
[l/s]	[m ²]	[m/s]	[m ³ /s]	[m/s]
50,00	0,066	0,74	505,00	4,70
70,00	0,075	0,92	708,00	5,80
90,00	0,097	0,92	910,00	5,80
110,00	0,123	0,89	1113,00	5,65
135,00	0,159	0,85	1366,00	5,37

Tabella 19: risultati ottenuti sezione 16

I risultati ottenuti risultano essere altamente soddisfacenti per quanto riguarda le sezioni 9, 12 e 16 in cui sono stati ottenuti valori attendibili delle velocità compresi tra 4 m/s e 7,5 m/s; risultano essere dubbi i risultati ottenuti in corrispondenza della sezione 11, con valori eccessivamente alti delle velocità dovuti alla sottostima della superficie della corrente nella stessa sezione: questo fenomeno risulta tuttavia essere giustificato considerata la forte irregolarità morfologica presente a monte di tale sezione che provoca una forte deviazione del getto stesso contro il versante orografico destro con una conseguente individuazione errata del profilo della sezione 11.

Questa irregolarità era evidente già prima del calcolo delle velocità, considerata la forma totalmente irregolare del profilo di corrente stesso.

Infine, è stata calcolata la deviazione standard in tutti i profili al variare della portata defluente: essa, detta anche “scarto quadratico medio”, è un indice di dispersione statistico che fornisce informazioni riguardo la variabilità di una popolazione di dati rispetto ad un indice di posizione rappresentato nella maggior parte dei casi dalla media.

Nella seguente immagine è rappresentata la distribuzione normale con i vari indici di posizione:

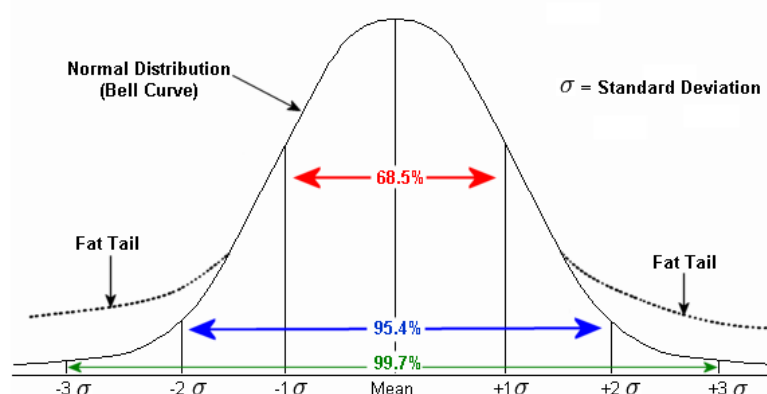


Figura 65: Distribuzione normale

La distribuzione normale o di Gauss, è una distribuzione di probabilità continua che è spesso utilizzata per descrivere variabili casuali a valori reali che tendono a concentrarsi attorno ad un valore, dove quest'ultimo è rappresentato proprio dalla media aritmetica di tali valori. Essa dipende da due valori, dalla media e dalla varianza σ^2 :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}$$

La deviazione standard è la radice quadrata della varianza, dove nell'ipotesi che i dati misurati si distribuiscano seguendo una curva Gaussiana è possibile dare un carattere predittivo alla deviazione standard tale per cui una generica misura ha il 68% della probabilità di ricadere all'interno dell'intervallo $[\mu - \sigma ; \mu + \sigma]$, il 95% della probabilità di ricadere all'interno dell'intervallo $[\mu - 2\sigma ; \mu + 2\sigma]$, ed il 99,7% della probabilità di ricadere all'interno dell'intervallo $[\mu - 3\sigma ; \mu + 3\sigma]$.

Considerando una popolazione rappresentata dai 200 profili ottenuti per ciascuna sezione caratterizzata da una certa portata, noto il profilo medio di ciascuno di essi, una volta creata una matrice contenente le coordinate metriche dei 200 profili, è stata calcolata la deviazione standard in ciascuna ascissa del profilo mediante l'apposita funzione “std” di MATLAB.

Nella seguente figura sono rappresentati i 200 profili relativi alla sezione 16 con una portata defluente pari a $Q_m = 90$ l/s, il profilo medio, e le deviazioni standard:

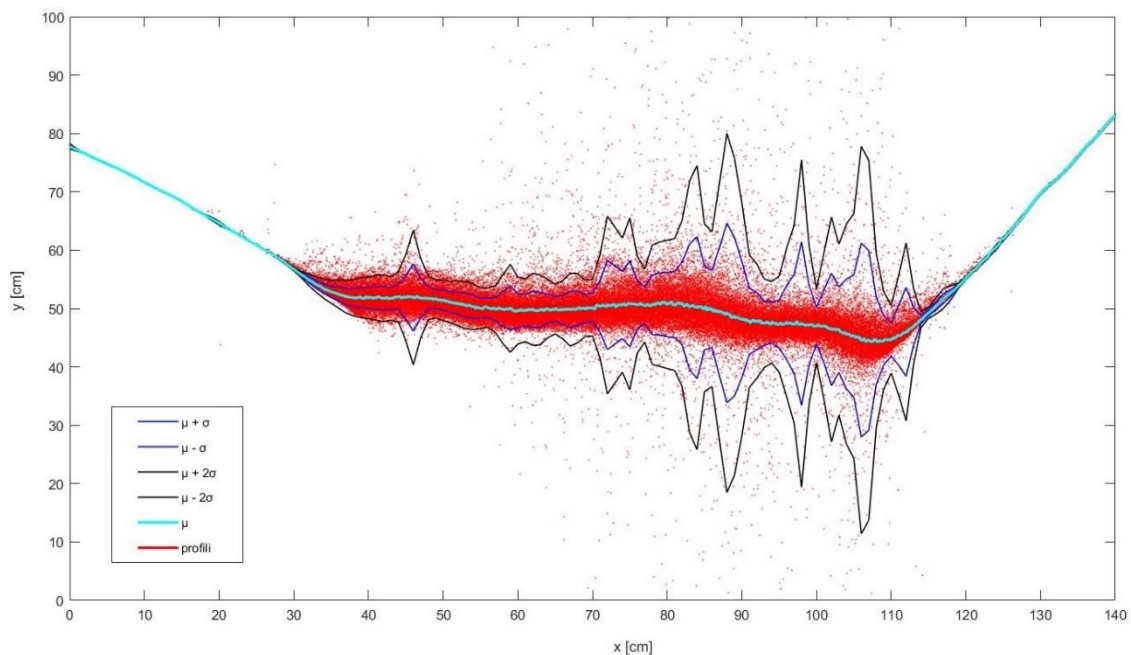


Figura 66: Profilo con deviazioni standard

7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

I risultati ottenuti hanno permesso di verificare la validità di tale metodologia innovativa, con netti miglioramenti in termini di velocità per quanto riguarda l'esecuzione delle prove e la successiva fase di elaborazione dei dati, ma soprattutto per quanto riguarda il campo di applicazione non più limitato e la precisione del metodo nettamente superiore a quella riscontrata con le precedenti metodologie, qualora fossero applicabili.

In futuro sarà fondamentale inserire lo scarico di fondo in corrispondenza del corpo diga e valutarne il comportamento globale, e studiare delle modifiche progettuali da apportare al nuovo scarico di superficie in corpo diga in maniera tale da raggiungere una portata defluente complessiva almeno pari a quella millenaria.

Sarà altrettanto fondamentale approfondire lo studio delle correnti bifase aria-acqua, studiando delle correlazioni teoriche tra modello e prototipo e valutando eventuali modifiche da apportare alla metodologia al fine di migliorare l'identificazione delle particelle dei due fluidi coinvolti, ad esempio mediante l'inserimento di laser aggiuntivi e caratterizzati da una maggior qualità.

La seguente figura propone una modifica alla metodologia laser per risolvere le problematiche legate agli effetti ombra che si possono generare in una valle caratterizzata da un andamento fortemente irregolare:



Figura 67: Arco a 7 laser

Il supporto in legno ad arco include 7 laser distribuiti uniformemente lungo l'arco di circonferenza di ampiezza pari ad 160° circa, ognuno dei quali è in grado di illuminare da posizione ravvicinata una porzione del profilo con un angolo di apertura dello stesso pari a 30° : la presenza di molteplici laser, garantisce la sovrapposizione dei singoli fasci in corrispondenza di alcune porzioni della sezione analizzata, evitando così la non individuazione di alcuni punti del profilo.

Bibliografia

- Nota tecnica-integrazione al progetto definitivo, ‘interventi di adeguamento scarichi alla portata di piena di 1400 m³/s’.
- Relazione idraulica-Allegato 4, ‘interventi di adeguamento scarichi alla portata di piena di 1400 m³/s’.
- Rubatta, E. Marchi, ‘Meccanica dei fluidi. Principi ed applicazioni’, UTET, 1981.
- F. Arredi, ‘Costruzioni Idrauliche’, UTET, 1981.
- D. Valero, D. B. Tung, ‘Reformulating self-aeration in hydraulic structures: Turbulent growth of free surface perturbations leading to air entrainment’, 2017.
- P. Micheal, C. Hubert, ‘Two-phase air-water flows: scale effect in physical modeling’, 2014.
- S. Felder, ‘Two-Phase flow measurements in Un-stationary free surface flows: a New signal Decomposition Technique’, 2013.
- H. Chanson, ‘Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects’, 2008.
- H. Chanson, ‘Hydraulics of aerated flows: qui quo pro?’, 2013.

Codici MATLAB

- Script per l'identificazione del profilo

```
% riconoscimento del primo pixel verde per ogni colonna in
cui il valore supera la soglia imposta
clc;
clear all
close all
d=dir('DSC_*.jpg');          % importo tutte le foto che
iniziano con p
F=zeros(numel(d),2592);      % inizializzo F
u=100;
Y0T=[];X0T=[];
for ifoto=1:numel(d)
% for ifoto=1:200
A=imread((d(ifoto).name));  %importo foto profilo
% figure
% image(A);
% hold on
C=imrotate(A,0);
% imshow(C);
% H=C(2000:4700,500:3456,:);
H=C;
Soglia=200;
B=H(:, :, 2);
B=sign(B-Soglia);
[X,Y]=find(B>0);
[Y0,PY,hh] = unique(Y,'stable');X0=[];
for g=2:length(PY);
    X0(i)=[X0;min(X(PY(g-1):PY(g)-1))];
end

X0=[X0;min(X(PY(g):length(Y)))];

ax = gca;
ax.XDir = 'reverse';        %per invertire asse delle x
ax.YDir = 'reverse';        %per invertire asse delle y

figure(ifoto)
imshow(H);
hold on
plot(Y0,X0, '.')
Y0T=[Y0T;Y0];X0T=[X0T;X0];
pause
end
```

```

[Y_R,DD]=sort(Y0T);X_R=X0T(DD);
[Y1,P1,hh] = unique(Y_R,'stable');X1=[];

for g=2:length(P1);
    X1=[X1;mean(X_R(P1(g-1):P1(g)-1))];
end
X1=[X1;mean(X_R(P1(g):length(Y_R)))];

figure
imshow(H)
hold on
plot(Y1,X1,'.b')
X90=X1;
Y90=Y1;
save X90_0.1s_sez12.mat X90;
save Y90_0.21_sez12.mat Y90;

```

- Script per le trasformazioni di coordinate ed il calcolo delle aree

```

clear all
clc
close all

%% Fase 1 - Caricare i Parametri della Calibrazione
load('calibrationprova12.mat')
% file matlab contenente tutti i parametri della camera
I=imread('grigliamodificata.jpg');

%% Fase 2 - Convertire Profilo da Pixel a Centimetri

%carico vettori valle
load('Yv.mat')
load('Xv.mat')
%matrice sez di valle
blaposvalle=[Y X]';
mvalle = (blaposvalle)';
newvalle = pointsToWorld(cameraParamsvalle,R,t,mvalle);
% profilo da pixel a matrico della valle
Xpv=newvalle(:,1); Ypv=newvalle(:,2);
save Xpv.mat Xpv
save Ypv.mat Ypv

%carico vettori profilo
load X90_0.1s_sez12.mat;
load Y90_0.1s_sez12.mat;
blapos=[Y90 X90]';
matr = (blapos)';
newmatrice = pointsToWorld(cameraParamsvalle,R,t,matr);
% profilo da pixel a matrico del profilo
matrix = [newmatrice(:,1),newmatrice(:,2)];
Yp90=matrix(:,1);
Xp90=matrix(:,2);
save Yp90.mat Yp90
save Xp90.mat Xp90

figure
ax = gca;
%ax.XDir = 'reverse'; %per invertire asse delle x
ax.YDir = 'reverse'; %per invertire asse delle y
hold on
plot(Yp90,Xp90,'r.')
hold on
plot(Xpv,Ypv,'b.')
title('Profilo metrico')

```

```

% plot figura in pixel: profilo + scacchiera + valle
figure
imshow(I)
hold on
plot(imagePoints(:,1),imagePoints(:,2),'ro')
plot(imagePoints(1,1),imagePoints(1,2),'y+');
hold on
plot(Y90,X90,'.b')
hold on
plot(Y,X,'.c')
title('Profilo pixel')

%Calcolo aree

% APRIRE L'APP SPECIFICA "CURVE FITTING" (FUNZIONE
INTERPOLANTE)
% scegliere la funzione "smoothing plot", impostare limiti
X e generare
% codice, F9 da 'fitp50' e me lo salva

% fitp90=fitresult1;
% save fitp90.mat
% fitv=fitresult2;
% save fitv.mat

load fitp90.mat
load fitv.mat

%aree con funzione di interpolazione
Xbase=[-300:1:550];
Ybasep= fitp90(Xbase);
Ybasev=fitv(Xbase);
Yarea=Ybasev-Ybasep;

figure
area(Xbase,Yarea)

Yareal=Yarea;

Yareal=[zeros(1,175),Yarea(176:end)'];

for i=1:length(Yareal)
    if Yareal(i)<0
        Yareal(i)=0;
    else
        Yareal(i)=Yareal(i);
    end
end
end

```

```

figure
ax = gca;
ax.XDir = 'reverse'; %per invertire asse delle x
ax.YDir = 'reverse'; %per invertire asse delle y
hold on
plot(Xbase,Ybasep,'r-')
hold on
plot(Xbase,Ybasev,'y-')
% hold on %plot del profilo vettoriale senza curva
fittante
% plot(Xp50,Yp50,'b*')
% hold on
% plot(Ypv,Xpv,'m+')
% title('Profilo metrico')

```

```

figure
ax = gca;
ax.XDir = 'reverse'; %per invertire asse delle x
ax.YDir = 'reverse'; %per invertire asse delle y
hold on
area(Xbase/10,Ybasev/10)
hold on
area(Xbase/10,Ybasep/10)

```

```

Area90=trapz(Yarea1)/1000^2 %area in metri^2
Q90=90/1000 % portata in m3/s
Qr90=Q90/0.025^(5/2)
V90=Q90/Area90% velocità in m/s
Vr90=V90/0.025^0.5

```

```

figure
subplot(1,2,1)
area(Yarea)
subplot(1,2,2)
area(Yareal)

```

```

%plot profilo e sezione di valle

```

```

figure
ax = gca;
%ax.XDir = 'reverse'; %per invertire asse delle x
ax.YDir = 'reverse'; %per invertire asse delle y
hold on
area(Xbase,Ybasev)
hold on
area(Xbase,Ybasep)
hold on
text('FontSize',12,...
      'String',{'Q= 910 m^3/s','V= 4.36 m/s','A= 0.13
m^2'},...

```

```

        'Position',[150 150 0]);
ylabel('y (mm)')
xlabel('x (mm)')
title('Portata 90 l/s','FontSize',12)

figure
ax = gca;
%ax.XDir = 'reverse'; %per invertire asse delle x
ax.YDir = 'reverse'; %per invertire asse delle y
hold on
plot(Xbase,Ybasev,'-k')
hold on
plot(Xbase,Ybasep,'-m')
ylabel('y (mm)')
xlabel('x (mm)')
title('Portata 90 l/s','FontSize',10)
legend('profilo valle','profilo Q=90 l/s')

Ybasep90=Ybasep;
save Ybasep90.mat Ybasep90

```

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare innanzitutto il prof. Davide Poggi, relatore della tesi, per avermi dato la possibilità di svolgere una tesi sperimentale e contribuire all'attività di ricerca nel campo dell'ingegneria idraulica in questi 9 mesi, nonché per aver permesso la conoscenza e l'approfondimento dell'ingegneria nella sua forma pratica.

Ringrazio Pino e Rossana, la mia piccola ma speciale famiglia, per avermi sostenuto ed incoraggiato ogni giorno della mia vita, per aver sempre creduto in me anche quando in terza superiore le circostanze lo proibivano, e per avermi dato la possibilità di vivere questa bellissima ed indimenticabile esperienza.

Ringrazio Francesca, per aver dato una svolta incredibile alla mia vita ed avermi fatto scoprire il significato più profondo dei sentimenti: un grazie non sarà mai abbastanza per quantificare tutto l'amore, la dolcezza, la fiducia, la stima che mi dimostri ogni giorno. Questa laurea è anche tua, e non sarà mai paragonabile a quello che il nostro futuro insieme potrà riservarci.

Sei unica.

Ringrazio la "Turin's family", per tutto il tempo trascorso insieme in questi anni: senza di voi e le nostre serate assieme la vita a Torino non sarebbe stata così piacevole e divertente.

Ringrazio Laura e Matteo, per la loro profonda e sincera amicizia mostrata in questi due anni e mezzo di lontananza, e per le loro infinite telefonate in cui sembrava di essere l'uno accanto all'altro.

Ringrazio infine Pietro e tutti i ragazzi del laboratorio, per aver garantito un ottimo ambientamento all'interno del laboratorio, per la loro disponibilità nei momenti di totale confusione e per i loro preziosi consigli in questo lungo periodo.

