

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE

Collegio di Ingegneria Energetica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



**FLUIDODINAMICA NELLA REGIONE BERSAGLIO
DEL REATTORE PROTOTIPO ADS**

Relatori

Prof. Massimo Zucchetti

Correlatori

Prof. Bruno Panella

Prof. Mario De Salve

Candidato

Patrizio Maruccia

Luglio 2019

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio i professori Bruno Panella, Massimo Zucchetti, Mario De Salve e Mario Malandrone.

Grazie ai miei genitori.

E grazie anche ad Angela.

INDICE

PREMESSA.....	5
1. INTRODUZIONE	7
2. ENERGY AMPLIFIER.....	9
2.1. INTRODUZIONE ALL'ENERGY AMPLIFIER.....	9
2.2. REAZIONI DI SPALLAZIONE.....	9
2.3. DESCRIZIONE DELL'EA.....	10
3. PROGETTO ANSALDO.....	18
3.1. EUTETTICO PIOMBO-BISMUTO.....	18
3.2. CIRCOLAZIONE ASSISTITA.....	20
3.3. WINDOWLESS TARGET CONFIGURATION.....	22
4. PRECEDENTI ATTIVITA' SPERIMENTALI	26
4.1. PRIMA SEZIONE DI PROVA.....	27
4.2. CIRCUITO SPERIMENTALE	28
4.3. COMPORTAMENTO DELLA SEZIONE DI PROVA ASSIAL-SIMMETRICA.....	31
5. NUOVO TARGET	34
5.1. NUOVA CONFIGURAZIONE IMPIANTO.....	34
5.2. TARGET A "CANALE"	36
5.3. COLLEGAMENTO CON IL CIRCUITO	46
6. STRUMENTAZIONE DI MISURA DELLE VELOCITA'	49
6.1. L'EFFETTO DOPPLER ED IL MISURATORE BISTATICO DI CORRENTE	49
6.2. GEOMETRIA DEL FASCIO E DEFINIZIONE DEL VOLUME DI MISURA	51
6.3. ELABORAZIONE COERENTE DI IMPULSI.....	52
6.4. DATI DELL'ADV	53
6.5. VELOCITÀ DEL SUONO.....	56
6.6. MISURE IN PROSSIMITÀ DEL CONTORNO.....	57

6.7.	STRATEGIE DI CAMPIONAMENTO	58
6.8.	DATI ACQUISITI E LORO QUALITÀ	59
7.	QUALITA' DELLE MISURAZIONI SUL NUOVO TARGET	61
8.	SPERIMENTAZIONE SUL TARGET A "CANALE"	70
8.1.	CAMPI DI VELOCITA' TARGET CON SINGOLO INSERTO	73
8.2.	CAMPI DI VELOCITA' TARGET CON DOPPIO INSERTO E PARETI LATERALI	104
8.3.	CARATTERIZZAZIONE PROFILO D'INTERFACCIA	138
8.4.	CONCLUSIONI.....	144
9.	PROGETTI EUROPEI PER L'ADS	146
9.1.	PROGETTO MYRRHA	146
9.2.	TRASMUTAZIONE E FUTURO DEL NUCLEARE	158
10.	BIBLIOGRAFIA	161

PREMESSA

Uno dei principali problemi degli impianti nucleari a fissione, utilizzati per la produzione di energia, è legato alla produzione di scorie radioattive con lunghi tempi di decadimento.

Nell'ottica di ridurre tali scorie si inquadrano i progetti e gli studi che mirano ad utilizzare un fascio protonico, accoppiato ad un impianto sottocritico, per la produzione di energia a partire da combustibile nucleare esausto.

Questo tipo di impianti, denominati ADS (Accelerator Driven System), sono sistemi "ibridi", costituiti da un core sottocritico, immerso in un metallo liquido (generalmente Piombo fuso o un eutettico Piombo-Bismuto), e da un acceleratore di particelle che con il suo fascio protonico colpisce il metallo liquido provocando l'emissione di neutroni a media ed alta energia derivanti da reazioni di spallazione, che colpendo a loro volta il core permettono di produrre materiale fissile, incenerire parte delle scorie a lunga vita e di produrre inoltre energia elettrica netta.

Uno dei primi ADS di cui si propose la realizzazione è stato l'Energy Amplifier (EA), un reattore ibrido sottocritico ideato, nel 1993, da Carlo Rubbia e da alcuni ricercatori del CERN di Ginevra [1].

L'EA è un reattore concepito per operare a ciclo "chiuso", ovvero raggiunte le condizioni di equilibrio fra gli attinidi ed i fissili prodotti e quelli inceneriti durante le reazioni nucleari, non necessita più di essere arricchito con il Torio per compensare il bruciamento.

L'Energy Amplifier consente di conseguire i seguenti vantaggi:

- La produzione di fissile (ad esempio U-233 a partire da Th-232).
- La produzione di energia elettrica netta.
- L'incenerimento di attinidi minori e la trasmutazione di scorie radioattive a lunga vita.

Così all'inizio del 1998 ENEA, INFN e ANSALDO formarono un gruppo, coordinato da ANSALDO, per studiare e tentare di risolvere le problematiche legate alla progettazione e costruzione di un reattore dimostrativo. In questo quadro vennero assegnati al Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino svariati incarichi, che andavano dallo studio neutronico agli aspetti riguardanti la termoidraulica e l'impiantistica del reattore dimostrativo. Ed all'interno di queste attività si inserisce la presente tesi, finalizzata allo studio

fluidodinamico della regione bersaglio del fascio protonico dell'ADS (Accelerator Driven System) nella configurazione "windowless".

Lo studio di natura sperimentale è stato effettuato su una sezione di prova realizzata presso i laboratori del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino.

Nella prima parte della presente tesi si riportano i principali risultati delle esperienze e valutazioni condotte negli anni precedenti, su configurazioni differenti del target, che hanno permesso di valutare pro e contro delle scelte adottate e di indicare le strade da percorrere.

Nella seconda parte si riportano invece i risultati delle misurazioni effettuate sulla sezione di prova nella configurazione a "canale", con l'intento di caratterizzare i campi di velocità ed il profilo d'interfaccia del fluido nel target.

Infine si illustra un altro progetto europeo di ADS, il MYRRHA, proposto dal consorzio belga SCK-CEN, e si rimarca l'importanza della trasmutazione per il futuro del nucleare.

1. INTRODUZIONE

Nel 1993 Carlo Rubbia ed alcuni ricercatori del CERN di Ginevra [1] proposero la realizzazione di un reattore ibrido sottocritico denominato Energy Amplifier (EA).

E nel 1998 ENEA, INFN e ANSALDO formarono un gruppo, coordinato da ANSALDO, per studiare e tentare di risolvere le problematiche legate alla progettazione e costruzione di un reattore dimostrativo.

L'idea iniziale dell'Energy Amplifier (EA), così come concepita da Rubbia e dai ricercatori del CERN di Ginevra nel 1993, ha subito e continua a subire continue modifiche, dovute ai problemi realizzativi che si manifestano con la prosecuzione delle sperimentazioni.

Il progetto di Rubbia del 1993 [1], prevedeva una configurazione del reattore del tipo a piscina, con il nocciolo e gli scambiatori di calore posti all'interno di una tanca sotto battente di piombo liquido. Il fascio protonico raggiungeva la regione di spallazione attraverso un condotto centrale sottovuoto. Il piombo fuso circolava nel nocciolo esclusivamente per circolazione naturale dovuta alla differenza di densità tra ingresso ed uscita dal nocciolo stesso.

Nel progetto ANSALDO si sostituisce il piombo fuso con un eutettico piombo-bismuto, e la circolazione naturale con la circolazione assistita, prima mediante iniezione di gas inerte al di sopra del core e poi con pompe ad elica. Questa soluzione permette di ridurre l'altezza dell'impianto e le difficoltà legate alla costruzione e gestione dello stesso.

Per quanto riguarda la regione di spallazione, per ovviare alla necessità di frequenti sostituzioni della parte terminale del condotto centrale, in cui è convogliato il fascio protonico, la cosiddetta "finestra", l'ANSALDO ha avviato uno studio per l'adozione della configurazione "windowless", in cui il confine della regione di spallazione non è delimitato da una superficie solida, ma da un'interfaccia tra la fase liquida e la regione sottovuoto, caratterizzata in realtà dalla presenza di vapore del metallo liquido.

La presente tesi ha per oggetto lo studio fluidodinamico della regione bersaglio del prototipo ANSALDO dell'Energy Amplifier, nella configurazione "windowless". La sezione di prova sperimentale, realizzata presso i laboratori del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, ha permesso di simulare il deflusso dell'eutettico piombo-bismuto nella configurazione "windowless", utilizzando acqua a temperatura e pressione ambiente.

Tale attività fa seguito a precedenti studi a carattere sperimentale svolti su una sezione di prova a doppio tubo coassiale assial simmetrico, simulante la prima versione del progetto “windowless” ANSALDO.

Nei lavori precedenti, era stata studiata la termoidraulica del target simmetrico, sia analizzando il profilo dell’interfaccia aria-acqua, sia misurando pressione e velocità in alcune regioni del deflusso.

Con la presente tesi si è analizzata la fluidodinamica del target nella nuova configurazione dell’impianto proposta da ANSALDO, del tipo a “canale”, sia con singolo inserto, che con doppio inserto e pareti laterali, al fine di caratterizzare le modalità del deflusso, di definire i campi di velocità della fase liquida nel target, e di caratterizzare il profilo d’interfaccia.

Di seguito si riporta una sintesi del lavoro svolto nella presente tesi:

- Descrizione dell’EA nella configurazione iniziale concepita da Rubbia e dai ricercatori del CERN.
- Descrizione del progetto ANSALDO, e delle modifiche introdotte al progetto originario dell’EA.
- Illustrazione degli studi effettuati sulla precedente configurazione dell’apparecchiatura sperimentate, con doppio tubo coassiale assial simmetrico.
- Descrizione del nuovo target a “canale”, sia con singolo inserto, che con doppio inserto e pareti laterali.
- Descrizione della strumentazione utilizzata per la misurazione delle velocità.
- Determinazione del numero di campionamenti necessari a caratterizzare la velocità del liquido nel target.
- Illustrazione dei campi di velocità, rilevati con la sonda, nel target a “canale” con singolo inserto sulla mandata, con luce di 120 mm.
- Illustrazione dei campi di velocità, rilevati con la sonda, nel target a “canale” con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali.
- Caratterizzazione del profilo d’interfaccia dell’acqua all’interno del target a “canale” con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali.

A conclusione si riporta una descrizione del progetto proposto dal gruppo belga SCK-CEN, denominato MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications), e si rimarca l’importanza della trasmutazione delle scorie ad alta attività per il futuro del nucleare.

2. ENERGY AMPLIFIER

2.1. INTRODUZIONE ALL'ENERGY AMPLIFIER

L'Energy Amplifier (EA), pensato da Rubbia [1], è un sistema ibrido, costituito da un acceleratore di particelle accoppiato ad un reattore sottocritico, in grado di produrre energia elettrica netta, materiale fissile (U-233 a partire dal Th-232), nonché di incenerire gli attinidi a lunga vita.

2.2. REAZIONI DI SPALLAZIONE

Poiché il reattore è sottocritico, occorre una sorgente neutronica, che in questo tipo di sistema è un target di metallo pesante, posto al centro del core per assicurare il massimo angolo solido utile, dal quale diffondono una grande quantità di neutroni, a seguito della spallazione di protoni altamente energetici iniettati dall'acceleratore nel target. Nell'EA il metallo pesante del target è il piombo o il piombo-bismuto, che colpito dal fascio di protoni, ha una resa di circa 45 neutroni per protone incidente da 1.5 GeV.

La spallazione è una reazione nucleare che porta alla distruzione del nucleo, quando questo viene penetrato da particelle ad alta energia (ad esempio protoni da 1 GeV). Dal nucleo colpito deriva una "cascata internucleare", ovvero una catena di interazioni nucleone-nucleone che porta quelli più energetici ad abbandonare il nucleo e ad innescare altre cascate nell'urto con altri nuclei.

Il nucleo restante, rimasto in uno stato eccitato, ricade in uno stato stabile rilasciando altri nucleoni, secondo il processo detto di evaporazione.

Si possono così distinguere due fasi nel processo di spallazione:

- 1) Cascata internucleare con produzione di particelle ad alta e bassa energia. I nucleoni più energetici proseguono poi la spallazione.
- 2) Evaporazione di particelle a bassa energia.

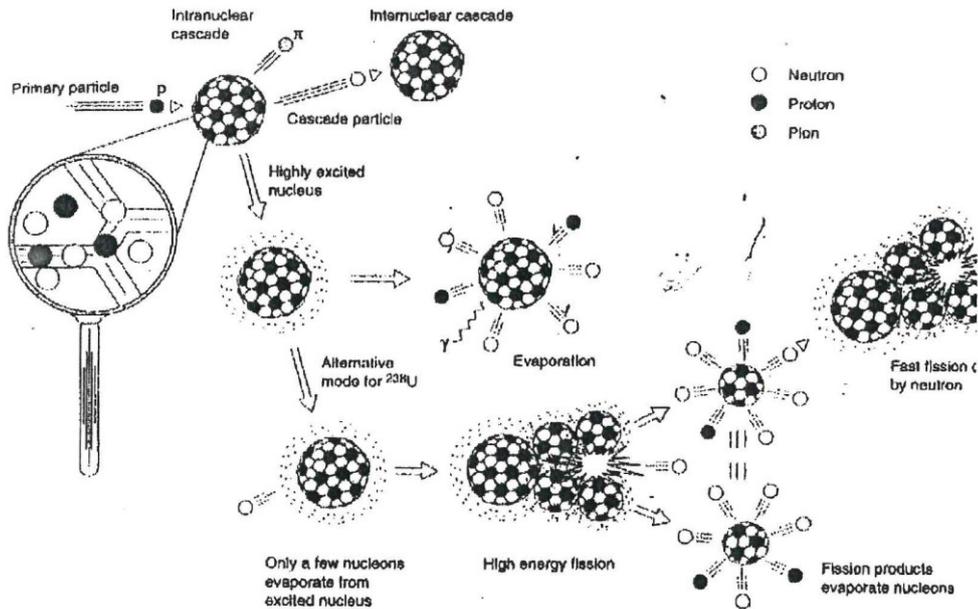


Figura 2.2.1

2.3. DESCRIZIONE DELL'EA

L'EA è un sistema operante a ciclo chiuso, in cui il combustibile a fine ciclo è arricchito con Th-232, in modo da compensare il fissile bruciato, sicché dopo alcuni cicli si raggiunge l'equilibrio tra gli attinidi prodotti e quelli inceneriti durante le reazioni nucleari.

Il consumo di combustibile è molto più efficiente che nei reattori termici, si pensi che in termini energetici 78 kg di Torio nell'EA equivalgono a 20 tonnellate di uranio naturale necessari a un PWR, e ad oltre un milione di barili di petrolio in una centrale termoelettrica convenzionale. L'EA sarebbe quindi 250 volte più efficiente di un reattore termico, e potrebbe operare con una varietà di combustibili.

Si può infatti ipotizzare la possibilità di una strategia combinata con i tradizionali PWR, al fine di minimizzare l'impatto ambientale derivante dalle scorie, ed aumentare di conseguenza l'accettabilità da parte delle popolazioni. Infatti un apposito EA potrebbe utilizzare le scorie prodotte dagli LWR (Light Water Reactor), ricavandone U-233 e riducendo al contempo il quantitativo di scorie a lunga vita da stoccare in siti geologici.

Il carico iniziale potrebbe essere una miscela di Attinidi e di Torio naturale nel rapporto in peso di circa 0.16 a 0.84. Il core risulterebbe sottocritico con un $k = 0.96 \div 0.98$.

Durante l'attività, gli attinidi indesiderati vengono bruciati, mentre viene continuamente prodotto U-233, che compensa la caduta di k conseguente alla diminuzione ed al deterioramento degli attinidi da una parte, ed alla generazione di prodotti di fissione dall'altra. Il bilancio sembra tale da permettere una attività continuativa per $5 \div 10$ anni, senza interventi esterni.

Alla fine del ciclo, il combustibile subisce un riprocessamento in cui viene estratto l'U-233 per ulteriori utilizzi, mentre il Pu e gli altri attinidi possono essere stoccati in siti geologici, oppure essere ancora riutilizzati nell'EA.

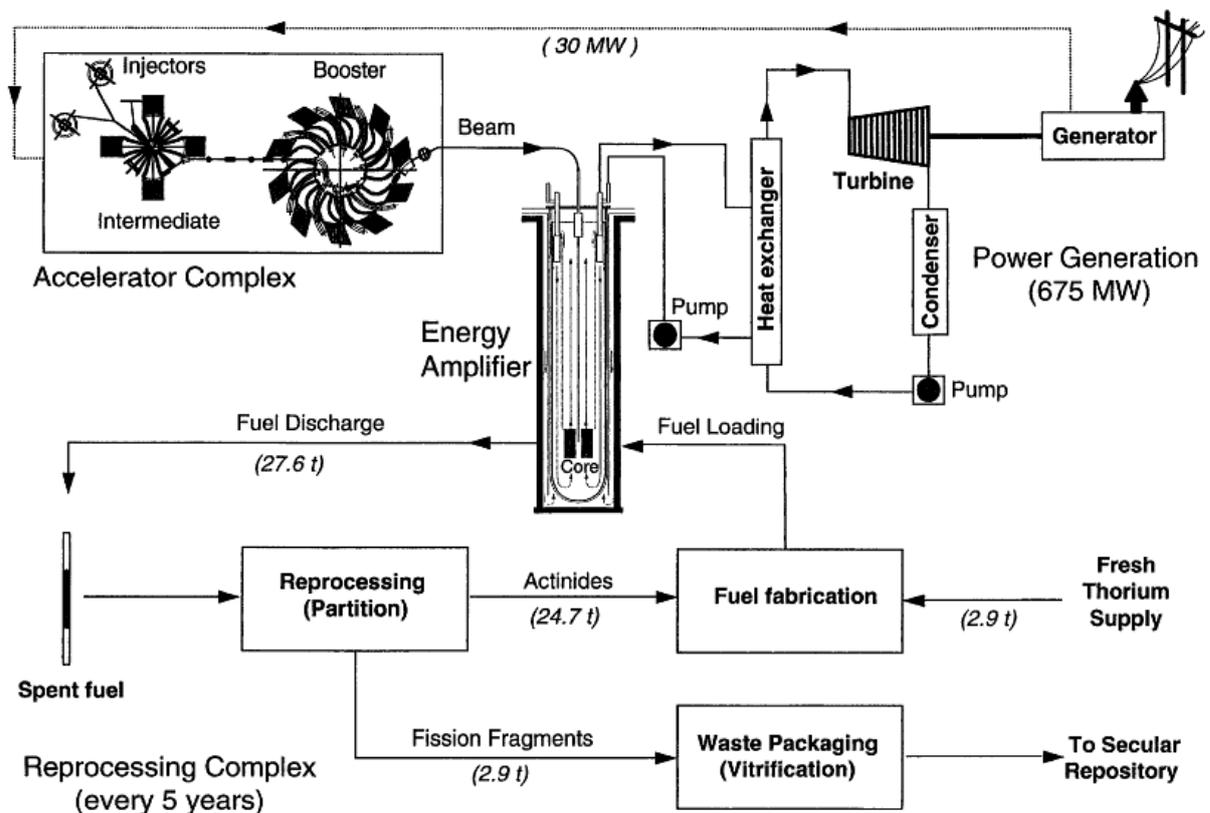


Figura 2.3.1

La combinazione LWR-EA presenta dunque importanti possibili vantaggi:

- 1) Eliminazione definitiva degli attinidi prodotti dagli LWR e riduzione della quantità da stoccare nei siti geologici.
- 2) Produzione di energia addizionale.
- 3) Elevata produzione di U fissile (circa l'80% del Pu incenerito). Tale Uranio può essere usato per far ripartire l'EA, oppure mischiato ad Uranio depleto, per produrre nuovo combustibile per gli LWR (l'U-233 è un sostituto quasi perfetto dell'U-235).

Il layout del reattore dell'EA, nella versione originaria di Rubbia, è riportato nelle figure 2.3.2 e 2.3.3, in cui si ha un vessel alto 30 m, diametro circa 6 m, riempito con Pb liquido. Nella parte alta si possono notare gli scambiatori di calore per il raffreddamento del metallo liquido ed il condotto centrale per il passaggio del fascio protonico.

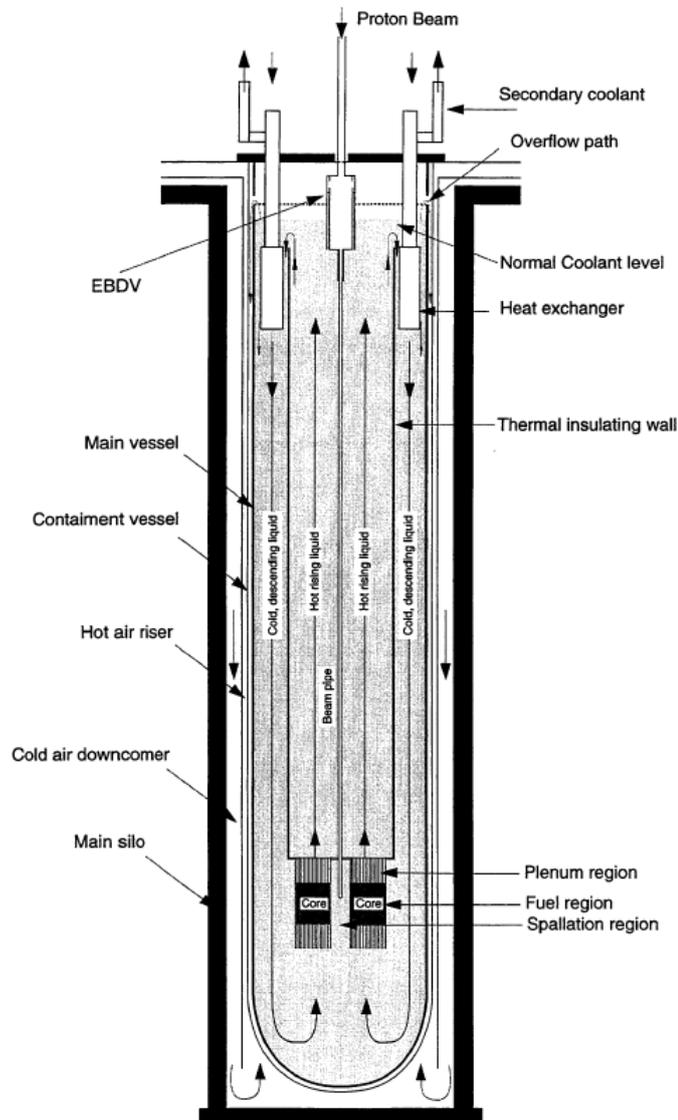


Figura 2.3.3

Il calore prodotto sia nella regione di spallazione che nel core, viene asportato dalla circolazione naturale del Pb fuso, promossa dalla differenza di quota tra gli scambiatori di calore (pozzo freddo) ed il core (pozzo caldo), e quindi trasferito ad un circuito di raffreddamento secondario. Il flusso caldo ascendente e quello freddo discendente, di metallo liquido, sono separati da un setto termicamente isolante.

Il gradiente di temperatura richiesto nell'attraversamento del core, perché si instauri la circolazione naturale, è dell'ordine di 250 °C, con una potenza di 1500 MWth.

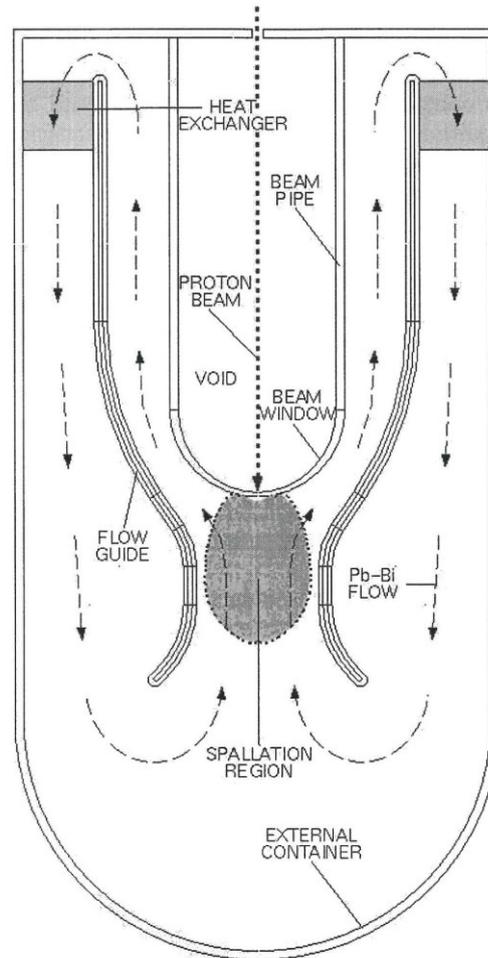


Figura 2.3.4

Per questa tipologia di impianti si può anche ipotizzare una soluzione “sigillata”, infatti il sistema, durante il funzionamento, non richiede interventi ed accessi all’interno della regione ad alto flusso neutronico, in quanto: il guadagno energetico si mantiene costante, l’autogenerazione continua di fissili mantiene costante la criticità, non essendo presenti pompe, valvole, ed altri componenti attivi all’interno del vessel, non sono necessarie azioni o manutenzioni sugli stessi.

La potenza prodotta dal reattore viene controllata attraverso un sistema di feedback che regola la corrente dell’acceleratore in funzione della temperatura all’uscita dal core. Tale sistema ha una risposta dell’ordine di 1 ms, decisamente minore delle costanti di tempo legate all’inerzia termica del reattore. Tuttavia, per maggiore sicurezza, è previsto un sistema di scram con barre di CB4, che cadono per gravità nel nocciolo.

A protezione del reattore si prevede inoltre un sistema di protezione passiva contro eventuali escursioni di temperatura, infatti visto l’elevato coefficiente di espansione termica del metallo

liquido, una escursione termica nel core determina un innalzamento del livello di liquido nel vessel di circa 27 cm ogni 100 °C.

Si sono pertanto adottati due sistemi passivi:

1. Riempire con il Pb fuso, attraverso un percorso a sifone, il canale del fascio protonico, ad una quota di 25 m sopra il core, così da assorbire completamente il fascio e smaltirne la potenza mediante la circolazione naturale.
2. Riempire con il Pb fuso il gap esistente tra il liner del vessel e la parete del contenitore, normalmente riempite di He. Ciò provoca un notevole aumento della conducibilità termica, consentendo lo smaltimento del calore, per convezione con l'aria esterna, e per irraggiamento, viste le elevate temperature in gioco.

L'unico sistema di sicurezza attivo è rappresentato dallo spegnimento dell'acceleratore di protoni, che provoca l'istantanea interruzione delle reazioni di fissione nel nocciolo.

Il fascio protonico, dopo essere stato accelerato, viene deviato all'interno dell'EA attraverso opportuni magneti. Il fascio focalizzato attraversa l'intero tubo sottovuoto penetrando nel target, dopo aver attraversato l'estremità emisferica del tubo stesso denominata finestra, realizzata in Tungsteno con spessore di circa 3 mm, figura 2.3.5. Il materiale in questione presenta un'elevata temperatura di fusione (3410 °C), un'ottima conducibilità termica, buona resistenza meccanica, moderate caratteristiche di attivazione, buona resistenza alla corrosione da parte del Pb.

L'ampiezza del fascio nel punto di incisione dipende dalla distanza dal fuoco del fascio. Sulla finestra, che è refrigerata per convenzione dal target stesso, la densità di corrente ha un profilo parabolico, e grazie a calcoli eseguiti con tecniche Montecarlo si è evidenziato che il fascio deposita, essenzialmente per ionizzazione, circa l'1% della sua energia cinetica nell'attraversare la finestra (ovvero circa 95 kW), con un picco di densità di potenza al centro pari a 113 W/cm². Metodi Montecarlo congiunti a codici CFD sono inoltre stati impiegati per effettuare delle previsioni sulla temperatura e sul campo di velocità del fluido sulla finestra e sulle condizioni della finestra stessa. Il massimo innalzamento di temperatura sulla finestra è di 137 °C, mentre nel piombo è pari a 107 °C. Gli stress termici, indotti dalla variazione dell'intensità del fascio sulla finestra, risultano decisamente entro i limiti di resistenza meccanica del materiale. Tuttavia si è pensato di ridurre ulteriormente le tensioni, riducendo lo spessore della finestra da 3 mm in periferia, a 1.5 mm al centro, dove è massimo il rilascio di energia del fascio.

Nonostante ciò, la finestra richiede di essere sostituita con cadenza circa annuale, a causa del radiation damage.

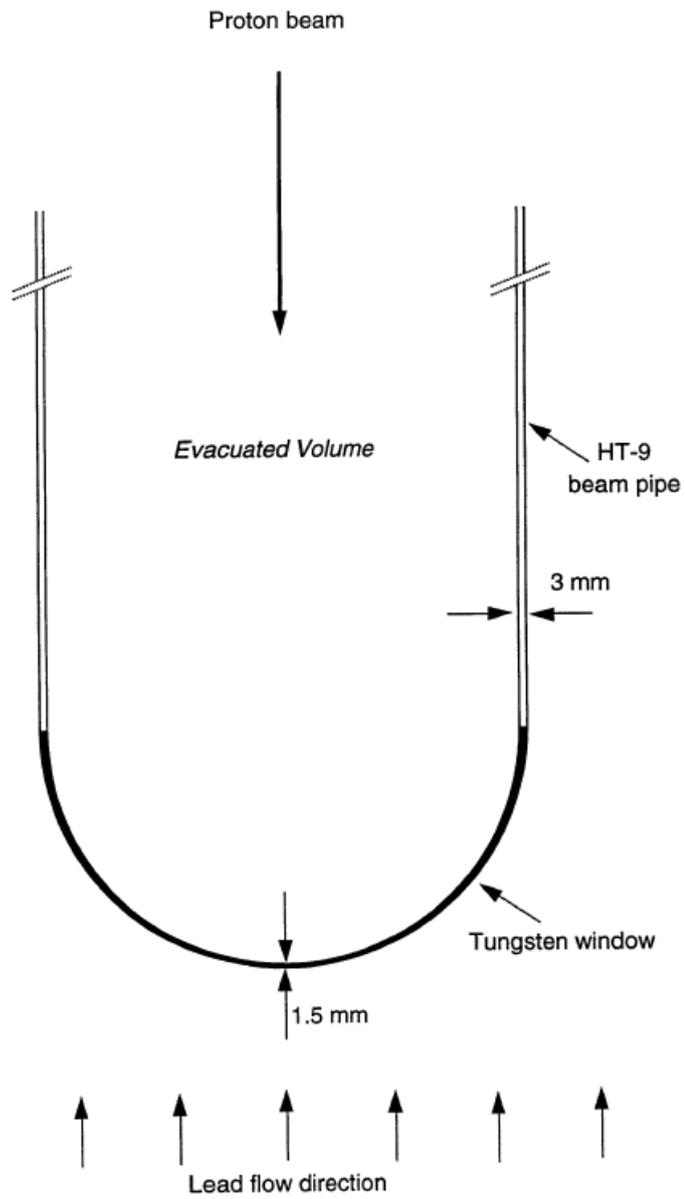


Figura 2.3.5

Nella tabella 2.3.1 sono riportate le principali caratteristiche dell'EA.

Principali caratteristiche dell'EA	
Potenza termica/unità	1500 MW
Potenza elettrica	625 MW
Tipo di impianto	piscina
Refrigerante	Pb fuso
Fattore di sotto-criticità k	0.98
Coefficiente di reattività Doppler	-1.4E-05
Coefficiente dei vuoti	0.01
Guadagno energetico nominale	120
Potenza ricircolata all'acceleratore	30 MW
Frazione della potenza ric. all'acc.	0.0465
Barre di controllo	assenti
sistema di scram	barre CB-4
piattaforma antisismica	presente
<i>Vessel</i>	
Altezza	30 m
Diametro	6 m
Materiale	HT-9
Spessore di parete	70 mm
Peso (escluso il tappo)	2000 t
Doppio liner	presente
<i>Fuel core</i>	
Miscela iniziale di combustibile	ThO ₂ + 0.1U(233)O ₂
Massa iniziale di combustibile	28.41 t
Materiale d'incamiciatura	HT-9
Potenza specifica	52.8 W/g
Densità di potenza	523 W/cm ³
Temperatura media nel combustibile	908 °C
Massima temperatura dell'incamiciatura	707 °C
Ricambio del combustibile	5 anni
Burn-up medio	100 GW d/t
<i>Breeder core</i>	
Miscela iniziale di combustibile	ThO ₂
Massa iniziale di combustibile	5.6 t
Materiale di incamiciatura	HT-9
Massa di U-233 allo scarico	242.7 kg
Densità di potenza a fine ciclo	3 W/g
<i>Sistema di refrigerazione primario</i>	
Peso del refrigerante	10000 t
Circolazione	convezione naturale
Altezza promotrice	25 m
Δp	0.637 bar
Scambiatori di calore	4x375 MW
Sistema rimozione calore decadimento	RVACS
Temperatura ingresso core	400 °C
Temperatura uscita core	600 °C
Portata refrigerante ingresso core	53.6 t/s
Velocità media refrigerante in core	1.5 m/s

Tabella 2.3.1

3. PROGETTO ANSALDO

Molti centri di ricerca in Europa hanno recepito l'idea di un amplificatore di energia, e sono a tutt'oggi impegnati nello sviluppo di un reattore dimostrativo per l'EA.

Accanto allo studio dei materiali e dei problemi di corrosione, legati all'uso di un metallo liquido come refrigerante e come target, si pone lo sviluppo di una nuova tecnologia per l'ADS (Accelerator Driven System) che richiede la progettazione e la verifica sperimentale dei componenti, al fine anche di validare i codici di calcolo strutturali e termofluidodinamici.

All'inizio del 1998 l'idea di un amplificatore di energia venne recepita pure in Italia, dove ENEA, INFN, CRS4 e ANSALDO costituirono un gruppo, guidato dall'Ansaldo, per lo studio e la progettazione di un reattore dimostrativo DF (Demonstration Facility) di 80 MWth, con molti aspetti interessanti ed innovativi:

- Utilizzazione di un eutettico Piombo-Bismuto come refrigerante primario e come bersaglio del fascio protonico per la spallazione.
- Circolazione assistita, mediante iniezione di gas inerte (Argon) nel refrigerante primario, per migliorare la circolazione dello stesso sia nel core che nel target.
- Eliminazione della finestra del tubo del fascio, così da far incidere i protoni direttamente sul pelo libero del metallo liquido (windowless target configuration).

3.1. EUTETTICO PIOMBO-BISMUTO

La scelta del fluido termovettore deve tener conto del fatto che i refrigeranti convenzionali presentano problematiche che ne impediscono l'impiego nel sistema in esame.

L'acqua, o l'acqua pesante, sono da scartare, come avviene negli FBR, per l'incompatibilità con uno spettro neutronico veloce; Il Na non è adatto per la spallazione; un gas (He o CO₂) non sarebbe compatibile con l'alta densità del core.

Uno dei problemi principali relativi alla scelta del refrigerante, era la trasparenza ai neutroni prodotti, da qui l'esigenza di una sezione di cattura per neutroni termici ed epitermici piccola, peculiarità che hanno sia il Piombo ed il Bismuto puri, sia l'eutettico Pb-Bi.

Il progetto si indirizzò quindi verso l'uso di un fluido che fungesse sia da termovettore che da bersaglio per la spallazione, e si pensò al Piombo, al Bismuto e ad una miscela eutettica Pb-Bi.

	Pb	Bi
Punto di fusione	600	544 K
Punto di ebollizione	2010	1750 K
Calore specifico	147.3	148.1 J/kg/K
Densità al punto di fusione	10700	10000 kg/m ³
Conducibilità termica a 673 K	15.1088	15.5737 W/m/K
Sezione di cattura neutronica per neutroni termici	0.17	0.034 barns

Tabella – Proprietà Pb e Bi

Il Pb ha eccellenti caratteristiche, sia come refrigerante che come target per la spallazione:

- È trasparente ai neutroni di energia inferiore a 1 MeV.
- È un moltiplicatore neutronico.
- Ha alta densità e grande coefficiente di espansione termica.
- È un ottimo schermante delle radiazioni.
- Ha buone proprietà termodinamiche.
- Il punto di ebollizione è elevato (1743 °C).
- La tensione di vapore ed il tasso di evaporazione sotto vuoto sono molto bassi.

Ma ha anche aspetti negativi:

- Il Pb esposto agli intensi flussi neutronici si attiva, senza però portare a radionuclidi particolarmente fastidiosi. Il Pb naturale è composto da diversi isotopi: Pb-208 (52.4%), Pb-206 (24.1%), Pb-207 (22.1%) e Pb-204 (1.4%). Il Pb-207 ha una elevata sezione di cattura per i neutroni termici. Le reazioni di cattura neutronica che interessano il Pb-208 portano ad isotopi stabili che continuano ad essere buoni elementi per il target. Per cattura neutronica del Pb-204, si ha la formazione di Pb-205 che non desta molta preoccupazione.
- Il Pb è altamente corrosivo nei confronti dei materiali strutturali.

Il Bi si presenta in natura come un unico isotopo puro, il Bi-209, ed è anche migliore del Pb per quanto riguarda la trasparenza ai neutroni, e condivide con questo tutte le buone proprietà di cui sopra.

Tuttavia presenta non pochi aspetti negativi:

- Il Bi-209 a seguito di cattura neutronica conduce al Bi-210 che decade in qualche giorno nel Po-210, volatile ed altamente tossico.
- Il Bi è altamente corrosivo.

La miscela eutettica Pb-Bi (44.5 % Pb e 55.5 % Bi), invece, presenta i seguenti vantaggi:

- Bassa temperatura di fusione, pari a 125 °C, più bassa rispetto a quella del Pb (327 °C) e del Bi (271 °C) puri.
- È compatibile con l'acqua del secondario.

Le proprietà fisiche e termofisiche dell'eutettico sono vicine a quelle dei due metalli, eccezion fatta per la conducibilità termica.

Ma bisogna anche tener conto dei seguenti aspetti poco graditi:

- Alta densità, quindi elevate forze di galleggiamento sulle strutture e sul combustibile.
- Opacità.
- Possibilità di variazione della composizione dell'eutettico, con formazione di residui caratterizzati da elevata temperatura di fusione.
- La già citata attivazione del Pb e del Bi.

Il confronto tra pregi e difetti, dei vari metalli liquidi esaminati, ha confermato la bontà della scelta dell'eutettico Pb-Bi come refrigerante del core e target per la spallazione.

3.2. CIRCOLAZIONE ASSISTITA

Come nel progetto originario del CERN, anche ANSALDO per il reattore dimostrativo, ha scelto una configurazione a piscina, piuttosto che a loop, accettando quindi di avere un grande inventario di metallo liquido e rendendo più difficoltoso l'accesso ai componenti.

I benefici che derivano da tale scelta sono veramente rilevanti:

- Grande inerzia termica.
- Eliminazione della possibilità di LOCA nell'analisi di sicurezza.
- Minore attivazione e radiation damage delle pareti del vessel.
- Contenimento del refrigerante primario e del Polonio altamente radioattivo in un unico vessel.
- Nella configurazione a loop l'eutettico dovrebbe essere pompato a basse velocità per limitare l'erosione delle pareti, e questo significherebbe maggiori diametri dei tubi e quindi un elevato peso, con conseguenti maggiori costi per i supporti sismici.

- La circolazione naturale elimina le pompe e con esse il problema della manutenzione e del radiation damage, estremamente gravosi all'interno di una configurazione a piscina.

Tuttavia al crescere della potenza dell'impianto cresce l'altezza promotrice della circolazione naturale, rendendo proibitiva la realizzazione dell'impianto stesso.

Inoltre la possibilità di controllo della portata, in assenza di pompe, è molto ridotta, mentre bisogna evitare una separazione di fase solida per stratificazione sul fondo del vessel.

Pertanto va assolutamente evitata la possibilità che, durante un transitorio di temperatura, diminuisca la differenza di densità tra il ramo freddo e quello caldo, e di conseguenza la portata circolante.

Per superare queste difficoltà l'ANSALDO ha adottato, sia per il primario che per il target, una circolazione dell'eutettico promossa dall'iniezione di un gas inerte (Argon), detta circolazione assistita.

Il gas, iniettato nei canali ascendenti sopra il core, trascina il refrigerante per bouyancy fino all'ingresso degli scambiatori, dove si libera sul pelo libero della piscina, per poi essere raffreddato, compresso e rinviato agli iniettori.

La circolazione dell'eutettico risulta molto sensibile all'iniezione di gas a causa della grande differenza di densità fra le due sostanze. E' così possibile un buon controllo di portata.

La figura seguente illustra, in maniera molto schematica, la circolazione assistita in configurazione windowless.

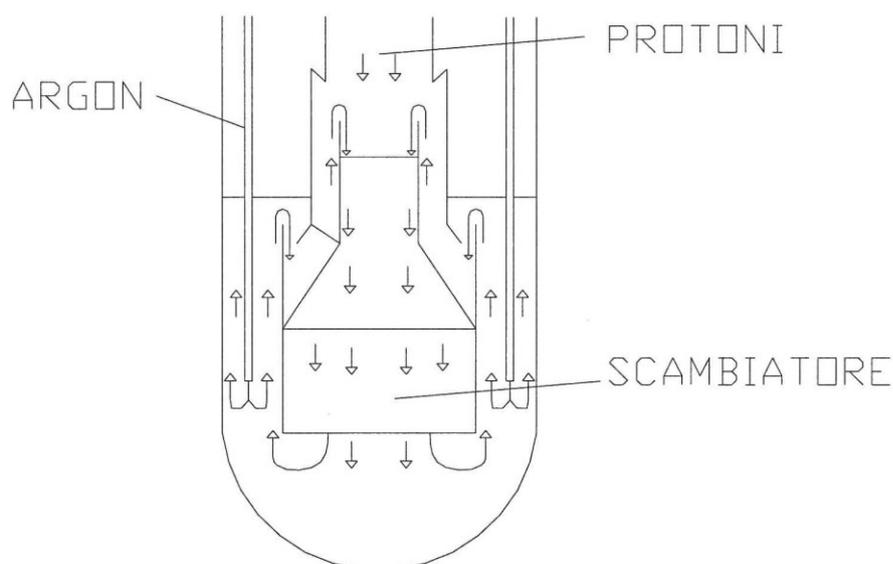


Figura 3.2.1

3.3. WINDOWLESS TARGET CONFIGURATION

L'uso di una finestra che separi fisicamente l'ambiente sotto vuoto del tubo del fascio protonico dalla regione bersaglio, assicura che i protoni non vengano disturbati durante il loro tragitto, ma pone il problema di una continua sostituzione, a causa dell'elevato carico termico e del radiation damage, con conseguenti costi anche in termini di fermata del reattore.

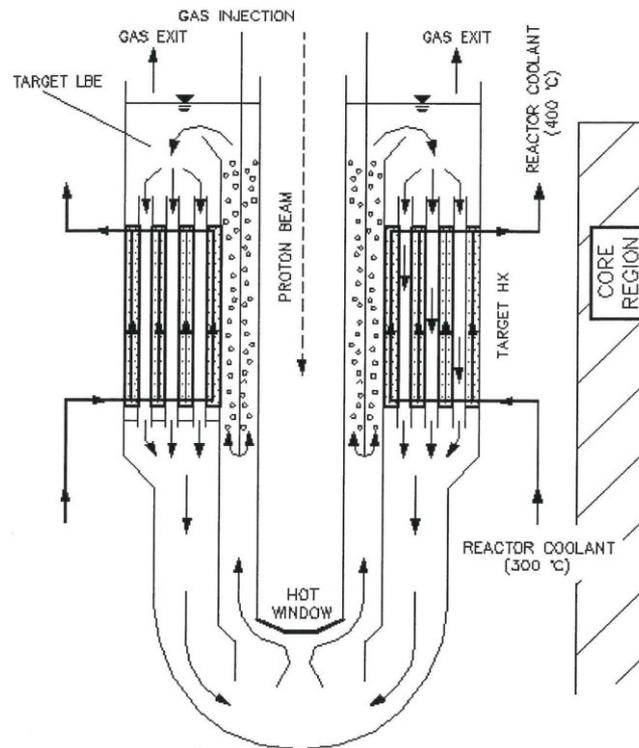


Figura 3.3.1 – Window Configuration

L'ANSALDO ha così ritenuto opportuno prendere in considerazione la fattibilità di una soluzione senza finestra (windowless target configuration), dato che la tensione di vapore dell'eutettico è molto bassa.

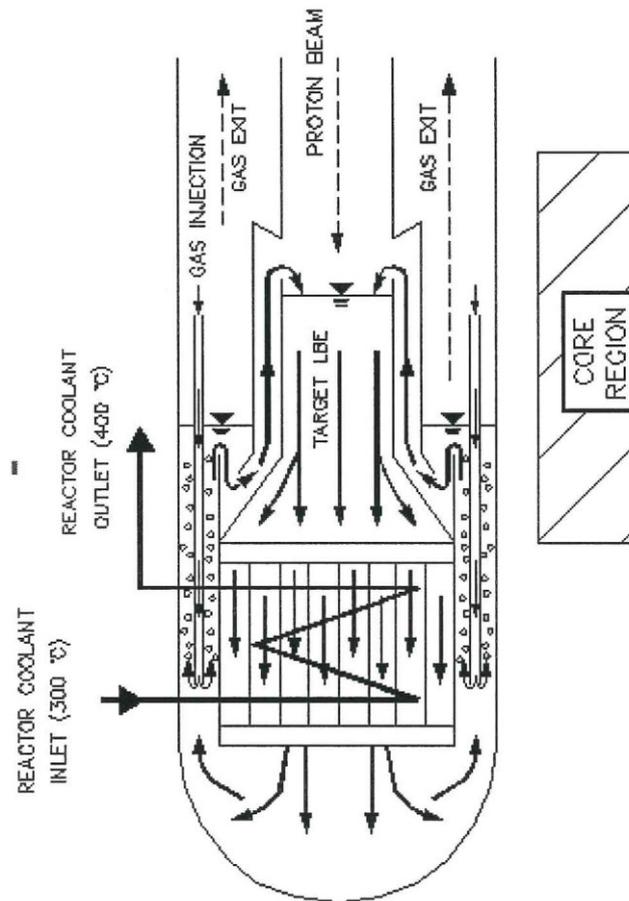


Figura 3.3.2 – Windowless Configuration

In questa configurazione, l'interfaccia dell'eutettico col tubo guida del fascio protonico, è costituita da una superficie libera, continuamente rinnovata e a pressione praticamente nulla, che funge da bersaglio ai protoni.

Se la circolazione del fluido viene a mancare, anche solo per ristagno locale della superficie libera, l'eutettico bersaglio è soggetto ad ebollizione, con conseguente perdita del vuoto nel condotto del fascio protonico. Infatti nella regione di spallazione viene a depositarsi non solo l'energia del fascio protonico, ma anche quella rilasciata dalle spallazioni stesse.

Per calcolare la portata di metallo liquido necessaria al funzionamento del reattore dimostrativo, si assume conservativamente che occorra asportare 0.5 kW/cc, con una temperatura media dell'eutettico di 450 °C, il che comporta una portata di Pb-Bi di 150 ÷ 200 kg/s, in corrispondenza della condizione di funzionamento a piena potenza. Tale portata è assicurata dal sistema di circolazione assistita.

Tuttavia anche la configurazione windowless presenta una serie di condizioni che, se non rispettate, rischiano di compromettere il funzionamento dell'intero sistema. Per citarne alcune:

- Il gas inerte utilizzato per la circolazione assistita deve completamente liberarsi sul pelo libero, senza arrivare all'interfaccia col tubo guida del fascio protonico, nel qual caso vanificherebbe il vuoto.
- La circolazione dell'eutettico nella regione d'interfaccia deve essere assicurata, cioè vanno evitati ricircoli o stagnazioni del fluido, pena l'evaporazione e la perdita del vuoto.
- L'interfaccia deve essere stabile e non deve frammentarsi in goccioline destinate poi ad evaporare dalle pareti su cui ricadono.
- Le dimensioni del modulo target devono essere compatibili con una buona efficienza neutronica.
- La portata deve essere facilmente regolabile.

Con riferimento allo studio della configurazione windowless, il presente lavoro si inserisce nell'ambito di una ricerca sulla fluidodinamica della regione di interazione tra il fascio di protoni accelerati e la miscela eutettica Pb-Bi, in prossimità dell'interfaccia.

In particolare lo studio è dedicato alla configurazione dell'interfaccia, ed all'andamento delle velocità nel refrigerante, sia in prossimità dell'interfaccia stessa, sia nel liquido sottostante, dove è rilevante il rilascio di energia da parte del fascio.

Lo scopo dello studio è quello di verificare eventuali fenomeni di instabilità del deflusso, la presenza di regioni di ricircolo e/o stagnazione, ed i valori della velocità del refrigerante in relazione alle potenze da asportare.

Si vuole evitare che il liquido raggiunga la temperatura di saturazione, ma anche limitare la temperatura all'interfaccia, a valori tali da mantenere la tensione di vapore entro valori accettabili.

Nel presente studio sono presi in esame i soli aspetti fluidodinamici, analizzati considerando costante la densità, non si prendono pertanto in esame eventuali influenze delle forze di bouyancy, dovute alle differenze di densità causate, nelle condizioni operative reali, dalle differenze di temperatura.

Si è ritenuto che la simulazione degli aspetti fluidodinamici possa essere effettuata con acqua in condizioni ambiente, che presenta una densità di circa 10 volte inferiore a quella del Pb-Bi, realizzando l'uguaglianza del campo di velocità. Questo tipo di simulazione non consente la completa rappresentazione di tutti i fenomeni, in particolare della fluidodinamica dell'interfaccia, ma permette tuttavia di rappresentare in modo significativo il campo del moto.

Allo scopo di realizzare un deflusso ed un'interfaccia in accordo con i requisiti sopra elencati, l'ANSALDO ha sviluppato successive versioni della configurazione geometrica del windowless target, che sono illustrate nel seguito.

4. PRECEDENTI ATTIVITA' SPERIMENTALI

Nell'ambito della collaborazione italiana per la realizzazione del DF, l'ANSALDO incaricò il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino di effettuare ricerche nel settore neutronico e termoidraulico.

Per ciò che concerneva gli aspetti termoidraulici, fu proposto uno studio sperimentale del modulo del target, utilizzando un modello idraulico ad acqua, che portasse a definire la configurazione geometrica della zona bersaglio.

Fu quindi realizzato presso il laboratorio del Dipartimento di Energetica, un circuito idraulico che riproduceva fedelmente in scala 1:1 la geometria assial-simmetrica del target, in configurazione windowless, proposto dall'ANSALDO, come risulta dalla figura seguente (messa a disposizione dalla Divisione Nucleare di ANSALDO).

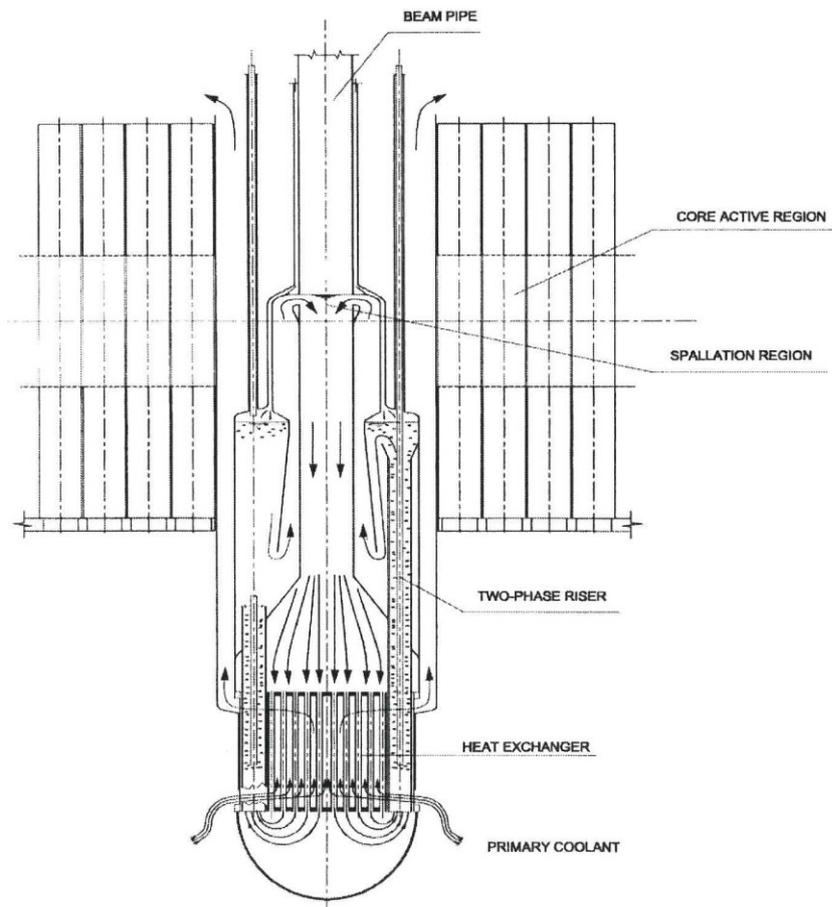


Figura 4.1

Ma lo studio di tale configurazione ha mostrato notevoli difficoltà nella realizzazione di un deflusso privo di ricircoli e dotato di velocità sufficienti in prossimità dell'interfaccia, per cui è stata successivamente sviluppata una seconda configurazione, non più assial-simmetrica, ma basata su un deflusso trasversale, perpendicolare cioè alla direzione del fascio protonico.

Nel seguito si riporta la descrizione della prima sezione di prova, i risultati ottenuti, i problemi incontrati ([3], [4] e [5]), e le motivazioni che hanno portato alla realizzazione di una seconda sezione di prova, non più assial-simmetrica [6].

4.1. PRIMA SEZIONE DI PROVA

La prima sezione di prova, realizzata in plexiglas, rispondeva ai requisiti geometrici e fisici forniti dal progetto originario dell'ANSALDO, ed era costituita da due cilindri concentrici verticali, alti circa 1.5 m, fissati su una piastra di sostegno. Il condotto interno aveva un diametro di 200 mm, e quello esterno di 290 mm, lo spessore del condotto in plexiglas era di 5 mm.

Un circuito esterno, munito di elettropompa, mandava l'acqua in moto ascendente nell'intercapedine anulare tra il cilindro esterno e quello interno. Giunta all'estremità superiore di quest'ultimo, l'acqua tracimava nel cilindro interno, invertendo il senso del moto e dando origine ad una superficie a pelo libero, che costituirebbe nell'ADS l'interfaccia col fascio protonico. L'acqua discendeva quindi nel cilindro interno e passava attraverso un serbatoio per la separazione dell'aria trascinata, una pompa, una valvola di regolazione, un venturimetro, un contatore, uno scambiatore di calore, per poi essere reimpressa di nuovo nell'annulo.

Le principali differenze della sezione di prova con il target del DF erano le seguenti:

- La circolazione forzata della elettropompa, anziché quella assistita con iniezione di gas.
- Un ambiente a pressione atmosferica sulla superficie libera dell'interfaccia, anziché il vuoto.
- Il fluido operativo è acqua, anziché l'eutettico Pb-Bi.

Usare dell'acqua, e quindi un liquido diverso da quello di progetto, impone di operare in condizioni di similitudine fluidodinamica.

Trascurare le forze viscosse rispetto a quelle di inerzia riduce le equazioni di Navier-Stokes a quelle di Eulero, in cui non compare il numero di Reynolds (Re), ma solo quello di Froude (Fr).

Si impone così un'uguaglianza tra i valori di Fr nel caso di acqua e di eutettico. Per tener conto anche dei fenomeni che si verificano all'interfaccia (eutettico-vuoto e acqua-aria) si impone l'uguaglianza dei numeri di Weber (We).

Da queste due equazioni si derivano dei fattori di scala circa unitari sia per le dimensioni geometriche sia per le velocità.

Più precisamente avendo realizzato la sezione di prova in scala 1:1 con il target del DF, si otterrà, alla massima portata, l'eguaglianza dei numeri di Fr , con numeri di Weber diversi ma comunque dello stesso ordine di grandezza (1:1.74), mentre i numeri di Reynolds sono nel rapporto di 1:68 circa.

A causa dell'identità geometrica e di Fr , la velocità dell'acqua e quella dell'eutettico sono le stesse; poiché quest'ultimo ha densità circa 10 volte superiore a quella dell'acqua, la portata di questa nella sezione di prova sarà 10 volte minore, cioè $15 \div 20$ kg/s.

4.2. CIRCUITO SPERIMENTALE

Il circuito sperimentale, adottato nella prima configurazione del target (assial-simmetrico), era composto da:

- Elettropompa centrifuga.
- Valvola di regolazione della portata.
- Tubo di Venturi.
- Trasduttore di pressione collegato al tubo di Venturi.
- Contatore volumetrico.
- Scambiatore di calore.
- Target assial-simmetrico.
- Separatore d'aria.

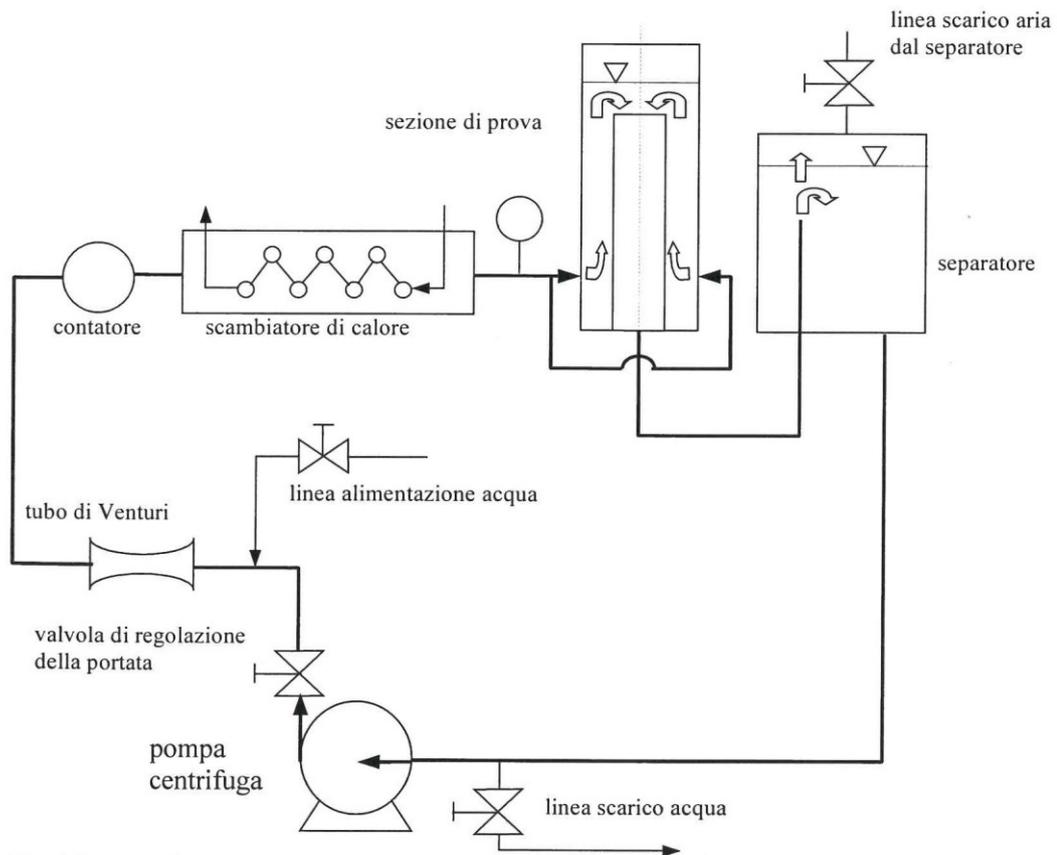


Figura 4.2.1

La sezione di prova del circuito, cioè il target, era costituito da due cilindri concentrici, uno esterno da 290 mm di diametro, e l'altro interno da 200 mm. I parametri geometrici di questa configurazione, a due cilindri coassiali, corrispondevano in scala 1:1 al modello del target del primo progetto ANSALDO. In particolare i diametri dei cilindri erano molto prossimi a quelli di progetto, entro la disponibilità di tubi trasparenti commerciali, mentre la lunghezza era quella in cui era localizzata la regione di spallazione. L'altezza complessiva era di 1750 mm (dal tubo di scarico del cilindro interno fino alla sommità di quello esterno), l'alimentazione dell'acqua era garantita da due bocchelli laterali posti nella zona bassa del cilindro esterno. La sezione di prova era formata da 6 elementi smontabili, per eventuali manutenzioni. Nella zona di salita del fluido era posta una piastra forata, che aveva lo scopo di raddrizzare i filetti liquidi.

Le tubazioni del circuito sperimentale erano realizzate in parte in acciaio ed in parte in PVC, con diametro nominale DN 80, ed i raccordi erano di tipo flangiato.

La strumentazione a corredo della sezione di prova era finalizzata alla misura della portata e della velocità.

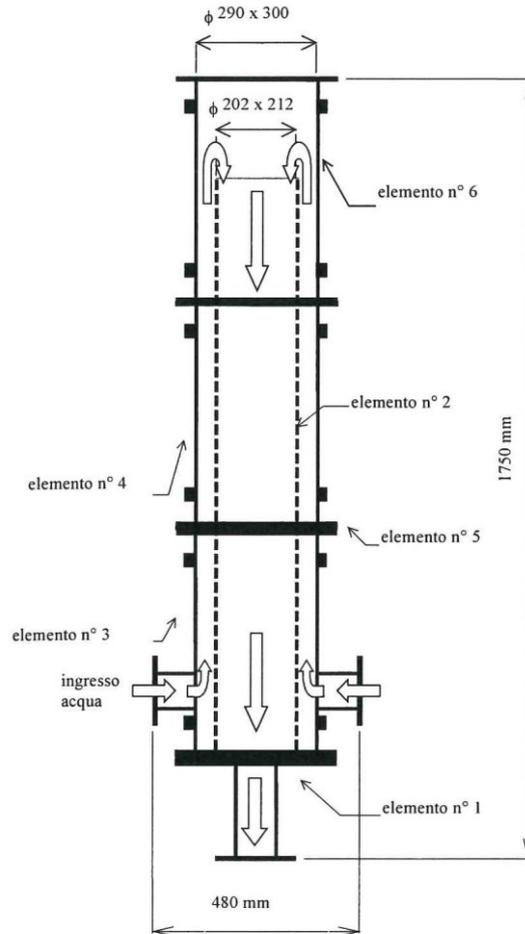


Figura 4.2.2

La regolazione della portata avveniva, a flusso avviato, mediante una valvola manuale con otturatore a profilo parabolico. Per la misura della portata, si optò per il tubo di Venturi, in quanto rispetto ad altri sistemi simili a strozzamento (tipo il diaframma) ha minori perdite di carico. Ai capi del tubo di Venturi era inserito un trasduttore di pressione differenziale, di tipo elettronico con cella capacitiva, per la misura della caduta di pressione. Come seconda misura della portata, per la validazione delle misure effettuate dal sistema Venturi – trasduttore di pressione, fu inserito un contatore volumetrico.

La sezione di prova inoltre era stata predisposta per l'inserimento dall'alto di una sonda ad ultrasuoni per le misure di velocità. Tale strumento era ancorato, al di sopra dei tubi coassiali di plexiglas, ad una struttura esterna formata da profilati di alluminio. Mediante dei binari era possibile posizionare la sonda in vari punti, spostandosi sia verticalmente che orizzontalmente, in modo da poter scandagliare più punti del target.

Lo scambiatore di calore, inserito nel circuito sperimentale, serviva a mantenere la temperatura dell'acqua a valori prossimi a quelli ambiente, in considerazione della potenza

termica ceduta al fluido dalla pompa di circolazione. Fu realizzato quindi uno scambiatore di calore in controcorrente, con mantello in plexiglas e serpentina in rame, percorsa da acqua prelevata dalla rete.

In un secondo momento della sperimentazione fu aggiunto un separatore d'aria, posto tra l'uscita del target e l'aspirazione della pompa. La sua presenza si rese necessaria perché, superata una certa portata, l'acqua trascinava con sé l'aria, andando a sfalsare le misurazioni e mettendo a rischio il buon funzionamento della pompa. Il separatore era costituito da un cilindro verticale di plexiglas alto 800 mm, con diametro esterno di 520 mm. La miscela aria-acqua entrava attraverso un tubo verticale che penetrava fino a metà altezza del cilindro, mentre l'acqua veniva aspirata da un bocchello sul fondo. Il separatore era connesso con l'atmosfera tramite un tubo verticale posto sulla sommità che scaricava l'aria all'esterno.

Per misurare la pressione furono realizzate delle prese di pressione in vari punti del circuito. Quelle più utilizzate e di maggior interesse, erano quattro, di cui tre poste a diverse quote del target, ed una alla base del separatore.

4.3. COMPORTAMENTO DELLA SEZIONE DI PROVA ASSIAL-SIMMETRICA

La sperimentazione effettuata sulla sezione di prova assial-simmetrica, descritta nel paragrafo precedente, portò ad interessanti risultati, accuratamente descritti nei lavori passati ([3], [4] e [5]).

Si notò innanzitutto che vi era una importante correlazione tra la massa iniziale presente nel circuito ed il comportamento nella zona di trascinamento dell'acqua, dall'annulo compreso tra i due cilindri concentrici.

Fondamentalmente, se il livello del battente era basso, perché vi era una massa d'acqua ridotta in tutto il circuito, veniva a formarsi uno strozzamento a forma di imbuto nelle immediate vicinanze del bordo del cilindro interno, mentre se il livello del battente era inizialmente alto, si otteneva un deflusso ad interfaccia piana.

Si riscontrò anche che la configurazione dell'interfaccia dipendeva dal valore della portata d'acqua che attraversava il target.

Per i risultati completi ed esaustivi, sia per ciò che riguarda l'andamento del profilo dell'interfaccia nella zona ove vi era inversione del flusso (stramazzo) dall'annulo esterno al tubo interno, sia per ciò che riguarda l'andamento delle velocità in tutta la sezione di prova, si rimanda ai lavori già citati.

In questo paragrafo, si vuole solo riportare una sintesi dei risultati di maggiore interesse, che hanno portato ad accantonare la geometria cilindrica assial-simmetrica, per passare ad una nuova forma del target.

Furono svolti essenzialmente due tipologie di esperimenti, uno che andava a valutare i fenomeni idrodinamici nella regione dell'interfaccia, e l'altro rivolto all'analisi dei campi di velocità nel target.

Le prove per lo studio dell'interfaccia furono realizzate fissando un livello iniziale all'interno del target, con liquido fermo, e misurando poi l'altezza dell'acqua al variare della portata (ricordando che la quota veniva misurata a partire dall'estremità superiore del cilindro interno).

In un primo set di prove fu misurata l'altezza a cui si doveva portare il fluido per ottenere una superficie d'interfaccia piana variando la portata, mentre in una seconda serie di prove si misurò l'altezza a cui si portava il fluido una volta imposto un battente iniziale variando la portata.

Si notò che se il battente iniziale era nullo o negativo, si aveva distacco della vena fluida dal cilindro interno. Con battente positivo, ma inferiore ad un dato valore h^* si aveva ancora la forma ad imbuto, ma la separazione della vena fluida dalla parete del cilindro interno tendeva a sparire.

Ricordiamo che h^* (formula di Cascone [4]), nel caso di interfaccia ad imbuto o comunque non piana, rende il punto massimo del livello dell'interfaccia, ed è data dalla seguente formula:

$$h^* = \left(\frac{W}{2\pi r_i \rho C \sqrt{g}} \right)^{(2/3)}$$

dove:

W = portata di fluido,

ρ = densità del liquido,

r_i = raggio cilindro interno,

$C = 0.561$ (costante adimensionale).

Se il battente iniziale era posto al di sopra del valore h^* si otteneva, a parità di portata, un'interfaccia praticamente piana, con piccole onde e qualche vortice.

Sulle modalità di deflusso interveniva anche la portata, infatti per portate al sotto di circa 8 kg/s non si aveva alcun trascinarsi d'aria, per portate comprese tra 8 e 15 kg/s l'aria

trascinata veniva separata nel degasatore e rilasciata nell'atmosfera, mentre per portate superiori a 15 kg/s l'aria trascinata non riusciva più ad essere eliminata dal circuito. Questi effetti dovevano essere valutati considerando anche il battente iniziale a cui si era deciso di lavorare, si notò infatti che con battenti maggiori di h^* e quindi con interfaccia piana, non si aveva praticamente trascinamento di aria se non superando i 15 kg/s.

Per livelli di riempimento inferiori alla quota $z = 0$, si osservò la formazione di uno stramazzo e di una tipica interfaccia a forma di imbuto. Si osservarono anche fenomeni di distacco della vena fluida dalle pareti, e notevoli fenomeni di trascinamento d'aria all'interfaccia, con intrappolamento della stessa all'interno dell'acqua.

In corrispondenza di tali livelli si osservò uno stramazzo per portate sino a circa 17.5 kg/s, mentre per portate superiori scompariva la configurazione a stramazzo e la vena fluente risultava annegata in un bulk liquido animato da intensi moti vorticosi.

Il passaggio dalla configurazione a stramazzo a quella piana avveniva per un dato livello all'aumentare della portata.

Per livelli di riempimento iniziali maggiori ($z > 5$ cm) si assisteva invece alla formazione di un'interfaccia piana caratterizzata da notevoli fenomeni di ricircolo, con fenomeni di turbolenza interna e di instabilità dell'interfaccia, con trascinamento d'aria in presenza di portate elevate.

L'analisi del deflusso della sezione di prova aveva messo in evidenza la non idoneità della geometria assial-simmetrica, in quanto non consentiva di escludere l'esistenza di una regione centrale a bassa velocità o quasi stagnante, il che avrebbe portato all'immediata ebollizione dell'eutettico in quella zona, con conseguente perdita del vuoto nel tubo protonico.

5. NUOVO TARGET

Nello sviluppo del progetto ANSALDO si capì come la strada intrapresa fosse irta di difficoltà, visti gli esiti poco confortanti dei codici di calcolo numerici e delle simulazioni sperimentali, svolte sulla sezione di prova, presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico.

Così nel novembre del 2002, in una riunione svoltasi presso la sede dell'ANSALDO di Genova, fu proposta una nuova configurazione del progetto, completamente mutata rispetto alla precedente, sia nel concepimento dell'intero sistema, sia nella configurazione del target, non più assial-simmetrico, ma del tipo a "canale", su cui far incidere il fascio protonico perpendicolarmente, sempre in configurazione windowless [6].

5.1. NUOVA CONFIGURAZIONE IMPIANTO

La prima grande variazione apportata riguardava l'impiantistica dell'intero sistema, infatti mentre la soluzione iniziale prevedeva un impianto a piscina, con circolazione assistita dell'eutettico Pb-Bi mediante iniezione di gas inerte (Argon), si proponeva ora la circolazione del metallo liquido nel target mediante due pompe ad elica.

Questa variazione era legata alla più sostanziale delle modifiche apportate, cioè il cambiamento della geometria del target da simmetrica ad asimmetrica.

Nella figura 5.1.1 è rappresentata schematicamente la nuova configurazione dell'impianto proposta da ANSALDO, in cui si può vedere il percorso dell'eutettico Pb-Bi, gli scambiatori di calore, l'inserto per la canalizzazione del metallo liquido, e le

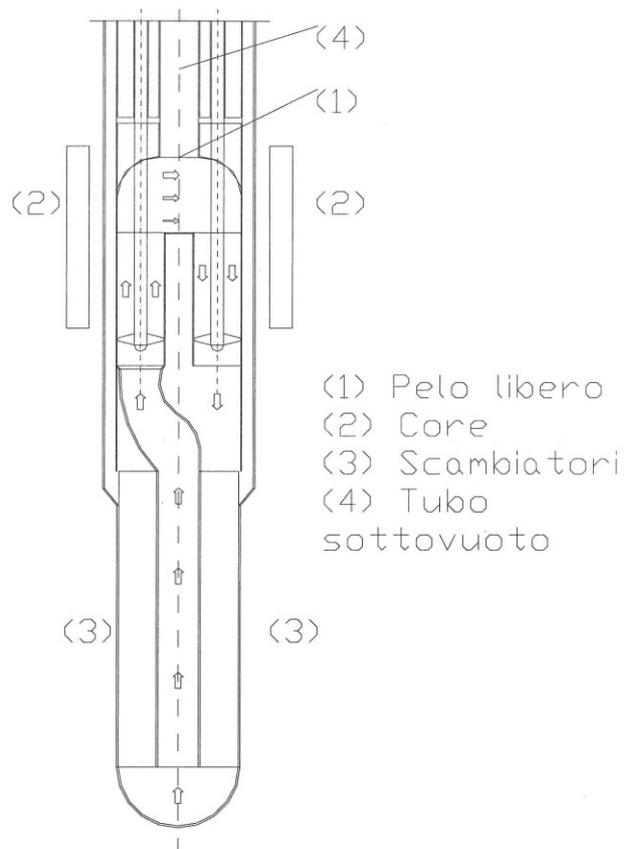


Figura 5.1.1

pompe ad elica per la circolazione dell'eutettico nella regione di spallazione.

La regione efficace ai fini della spallazione, larga circa 30 cm (range dei protoni), è posta nella parte superiore dell'impianto, al centro del core, mentre in basso vi sono i componenti dedicati alla circolazione dell'eutettico nel target ed alla rimozione della potenza termica depositata nel metallo liquido.

La nuova forma del target presenta un tratto orizzontale compreso tra due tubazioni, in particolare il fluido sale in una di esse, percorre il tratto orizzontale, per poi defluire dalla seconda tubazione. Con estrema semplificazione il moto del liquido può essere assimilato ad una U rovescia. In questo modo il fascio di protoni accelerati andrà ad incidere sul metallo liquido perpendicolarmente rispetto alla direzione orizzontale del deflusso orizzontale. Con questa nuova geometria del target si crede che sia più facile imporre all'interfaccia una velocità non nulla, in quanto il moto è simile a quello di un canale a pelo libero.

Lungo gli assi delle tubazioni che arrivano alla zona orizzontale, sono posti gli assi delle due pompe ad elica, che forniscono la forza promotrice della circolazione del liquido. I motori delle pompe sono posti a circa 7 ÷ 8 metri al di sopra delle eliche, all'esterno del vessel, che ingloba il tutto. Nello studio più dettagliato, della fluidodinamica del bersaglio, bisognerà considerare anche questi elementi, la cui presenza può alterare l'andamento del deflusso del liquido nella zona del target.

Ponendo la quota zero a livello dei motori delle pompe, la struttura che contiene il target, gli scambiatori e le pompe ad elica sarà alta circa 12 m, e sarà contenuta in un vessel di 1100 mm di diametro. All'incirca a metà, vi sarà il pelo libero dell'eutettico Pb-Bi, mentre gli scambiatori di calore saranno posti nella zona inferiore.

Il metallo liquido passa attraverso gli scambiatori, cedendo calore al circuito primario di raffreddamento, risale attraverso una apertura centrale larga 190 mm, compie una curva, e si immette nel condotto verticale (diametro esterno 211.5 mm), lungo circa 585 mm, che lo porta nella zona del target.

La risalita dell'eutettico Pb-Bi è garantita sia dalla pompa che è posta lungo l'asse della tubatura stessa, sia da quella posizionata lungo l'asse del condotto che fa defluire il liquido verso gli scambiatori di calore. Entrambe le eliche sono poste a 800 mm al di sotto della quota del pelo libero.

Pertanto il moto dell'eutettico, nella zona del target, risulta essere più lineare rispetto alla soluzione a cilindri concentrici. E proprio su questa nuova configurazione a canale si concentra lo studio sperimentale conferito dall'ANSALDO al Dipartimento di Energetica.

Nel progetto di massima fornito dall'ANSALDO stessa, una volta terminato il tratto di condotto rettilineo verticale, sono posti due direzionatori di flusso, che hanno il compito di indirizzare il fluido nella parte orizzontale del target.

Sono inoltre state formulate alcune ipotesi su come progettare la regione di imbocco alla finestra, basate sull'impiego di una paratia con fori di dimensioni differenti, mediante i quali indirizzare il flusso, secondo le modalità richieste dalle limitazioni del target.

5.2. TARGET A "CANALE"

I vincoli imposti al deflusso del liquido nel target a "canale" sono i seguenti:

- Assenza di rilevanti fenomeni di ebollizione locale.
- Velocità superiori ad un certo valore (circa 1.5 m/s), tali da non comportare un eccessivo incremento del salto di temperatura del liquido, nella regione di deposito della potenza (ΔT massimo 200 °C).
- Dimensioni di ingombro del prototipo fisse.
- Assenza di fenomeni di ricircolazione tali da portare ad evaporazione.
- Temperatura di interfaccia tali da non comportare eccessivi ratei di evaporazione.

Si può notare come, per la fase realizzativa, non ci siano grandi limitazioni, se non quella di contenere l'ingombro, al fine di inserire l'intero sistema (tubazione ascendente e discendente, e target stesso) all'interno di un cilindro di diametro pari a 544 mm, dimensione questa che non può essere variata.

Le altre imposizioni riguardano il deflusso del Pb-Bi nel tratto orizzontale, e sono legate a studi di tipo termico. Infatti anche se le sperimentazioni vengono svolte con acqua a temperatura e pressione ambiente, non bisogna dimenticare che nel reattore sperimentale si avrà a che fare con una situazione di vuoto spinto, temperature d'esercizio dell'ordine delle centinaia di gradi, e con delle potenze termiche dovute al flusso dei protoni accelerati ed all'effetto delle spallazioni, che produrranno alcuni MWth da smaltire.

Da calcoli ANSALDO è risultato che il battente di eutettico Pb-Bi nel target dovrà essere di 300 mm, e che la velocità all'interfaccia, o nelle immediate vicinanze, dovrà essere dell'ordine di 1.5 m/s. Per ottenere un efficace smaltimento del calore, l'ideale sarebbe avere un andamento della velocità di tipo lineare in funzione dell'altezza, ma in realtà non è richiesto tale andamento, infatti è sufficiente che la velocità abbia il valore di 1.5 m/s all'interfaccia, perché si possa considerare soddisfacente il risultato ottenuto.

La limitazione riguardante l'assenza di vortici e di ricircoli nella zona di interazione tra fascio protonico e miscela eutettica, è dovuta alla configurazione windowless del target, cioè senza una barriera fisica tra il fascio ed il fluido, che in presenza di vortici, o comunque di sacche di calore, porterebbe all'evaporazione del Pb-Bi ed alla perdita del vuoto.

Alla luce del nuovo progetto di massima fornito da ANSALDO, venne realizzata, presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, una seconda sezione di prova, del tipo a "canale", che riutilizzava il circuito sperimentale già disponibile per la prima sezione di prova, in geometria assial-simmetrica.

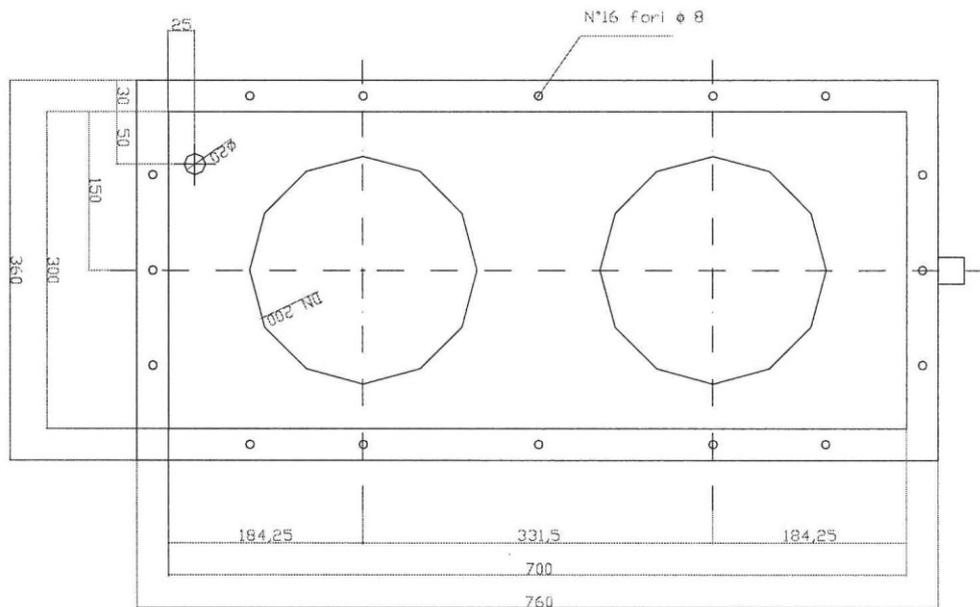


Figura 5.2.1

La soluzione realizzata, per lo studio preliminare del deflusso dell'acqua, si prestava ad essere implementata a step successivi, con l'inserimento di inserti che permettessero di avvicinarsi alla configurazione di deflusso richiesta da ANSALDO.

In sintesi si trattava di una vasca rettangolare in acciaio, munita di una finestra di PVC trasparente posta all'incirca a metà della parete, con una tubazione verticale di immissione nella vasca, ed a breve distanza, un condotto di scarico delle stesse dimensioni della mandata.

Nelle figure 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 sono riportate la vista in pianta e quella laterale della nuova sezione di prova. L'altezza della vasca era di 500 mm, la lunghezza di 760 mm, e la

larghezza di 360 mm. Al netto della nervatura di irrigidimento superiore, larga 30 mm, munita di fori filettati per il sostegno degli strumenti di misura, la lunghezza interna era pari a 700 mm e la larghezza interna a 300 mm.

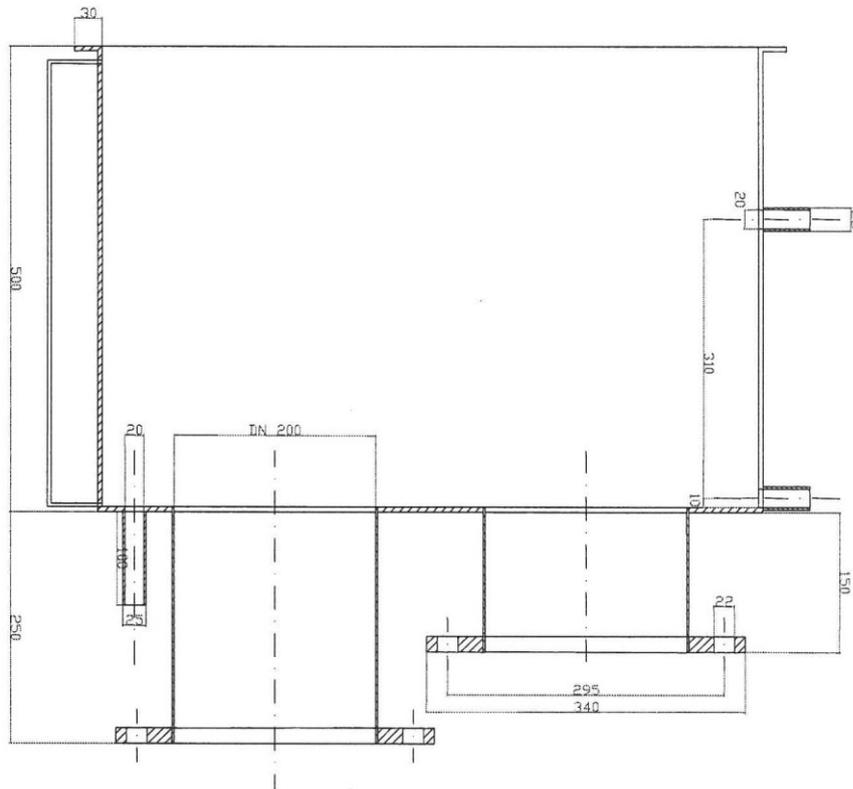


Figura 5.2.2

Nella realizzazione della sezione di prova a “canale”, presso il Dipartimento di Energetica, si cercò di attenersi il più possibile alle specifiche fornite da ANSALDO, e per questo i due fori alla base della vasca per l'immissione ed il deflusso dell'acqua sono distanziati l'un l'altro di 331.5 mm, proprio come nel progetto iniziale.

Mentre per un discorso legato ai costi ed ai tempi di realizzazione, i fori non hanno il diametro fornito dall'ANSALDO ($\phi_{\text{int}} = 202.7$ mm e $\phi_{\text{est}} = 211.5$ mm), ma sono stati realizzati con le dimensioni delle tubazioni che si trovano in commercio, quindi con diametro nominale DN 200 ($\phi_{\text{int}} = 214$ mm e $\phi_{\text{est}} = 219$ mm).

Partendo dal basso vi sono i due tronchi di tubo flangiati DN 200 per il collegamento con il circuito. Si può notare che questi tratti di tubazione hanno altezza diversa, in quanto le flange commerciali hanno dimensioni tali da impedire di lavorare vicino alle tubazioni, per il collegamento o eventuali manutenzioni delle stesse. Le flange di collegamento col circuito sono quelle reperibili in commercio, con diametro esterno di 340 mm.

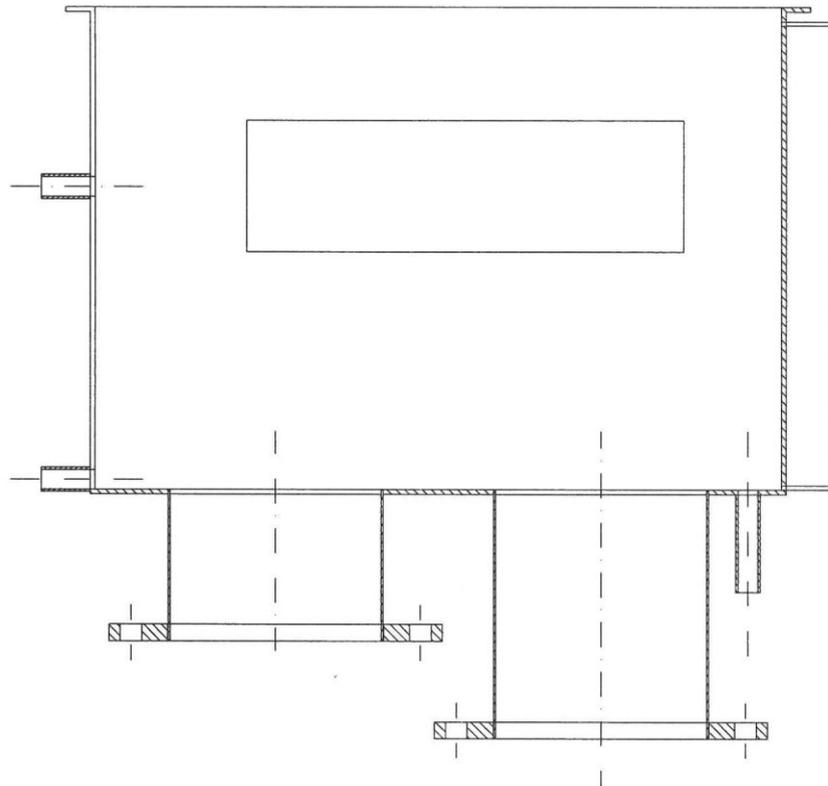


Figura 5.2.3

I tratti di tubo sono in acciaio inox, con diametro nominale DN 200 e spessore di 3 mm, e sono saldati alla piastra di base, anch'essa in acciaio inox dello spessore di 3 mm, come pure tutto il resto della vasca.

Sulla base, oltre ai due fori per l'ingresso e l'uscita dell'acqua, è stato realizzato uno scarico, ottenuto con un foro da 1 pollice di diametro, posto in un angolo della piastra di base. Lo scarico è munito di una valvola di intercettazione per lo svuotamento completo della vasca, al fine di evitare che al suo interno rimanga acqua stagnante per lunghi periodi.

La vista laterale rende evidenti altre peculiarità della sezione di prova. La presenza di un indicatore di livello posto lateralmente, dalla parte dell'ingresso dell'acqua nella vasca. Tale indicatore è formato da un tratto di circa 225 mm di PVC trasparente, bloccato su due supporti in PVC grigio.

Su uno dei lati corti sono stati realizzati due fori da 1 pollice saldati ad un tratto di tubo in acciaio. La peculiarità del foro più alto, è quella di avere lo sfioro a 300 mm dalla base della vasca, cioè proprio all'altezza del canale indicata dall'ANSALDO, e può essere utilizzata come indicatore di livello. Mentre il foro più basso è stato realizzato in prossimità della base,

per poter essere utilizzato come presa di pressione, o come semplice valvola di regolazione del livello d'acqua nella vasca.

Su uno dei lati lunghi della vasca, è inoltre presente una finestra in PVC trasparente, che permette di osservare il deflusso all'interno della vasca stessa. Tale finestra, lunga 500 mm ed alta 115 mm, è posizionata in modo tale da avere il centro ad una quota di 300 mm, ovvero nella zona di maggiore interesse. La parete interna della finestra è stata realizzata quanto più contigua possibile alla parete della vasca, al fine di influire il meno possibile sul deflusso dell'acqua.

Come già detto in precedenza, la configurazione della nuova sezione di prova non era esattamente uguale alle specifiche fornite dall'ANSALDO. Questa scelta era stata compiuta in un'ottica di sperimentazione a step successivi, che partendo da una semplice configurazione iniziale a vasca, mediante lo studio sperimentale dei campi di velocità e della conformazione dell'interfaccia nel target, avrebbe condotto, con l'aggiunta di successivi setti, ad una sezione di prova più simile al target dell'ADS.

Il primo inserto ad essere aggiunto, è stato un tubo in plexiglas trasparente innestato sul foro di immissione nella vasca, con apertura laterale di 120 mm, che si estende per tutto il tratto di tubo verticale (500 mm, fino al bordo superiore della vasca stessa), in modo da ottenere, in questa regione del target, una configurazione più simile a quella prevista dall'ANSALDO, ovvero una finestra larga 120 mm, vedasi figura 5.2.4.

Il tubo in plexiglas è stato inserito all'interno della condotta di mandata per una profondità di circa 50 mm, il che ha comportato anche un restringimento del condotto di mandata, avvicinandolo ulteriormente alle dimensioni geometriche delle specifiche ANSALDO, infatti la tubazione in acciaio DN 200 ha diametro interno di 215 mm, mentre il tubo inserito in plexiglas ha diametro interno di 210 mm, più vicino ai 202.7 mm

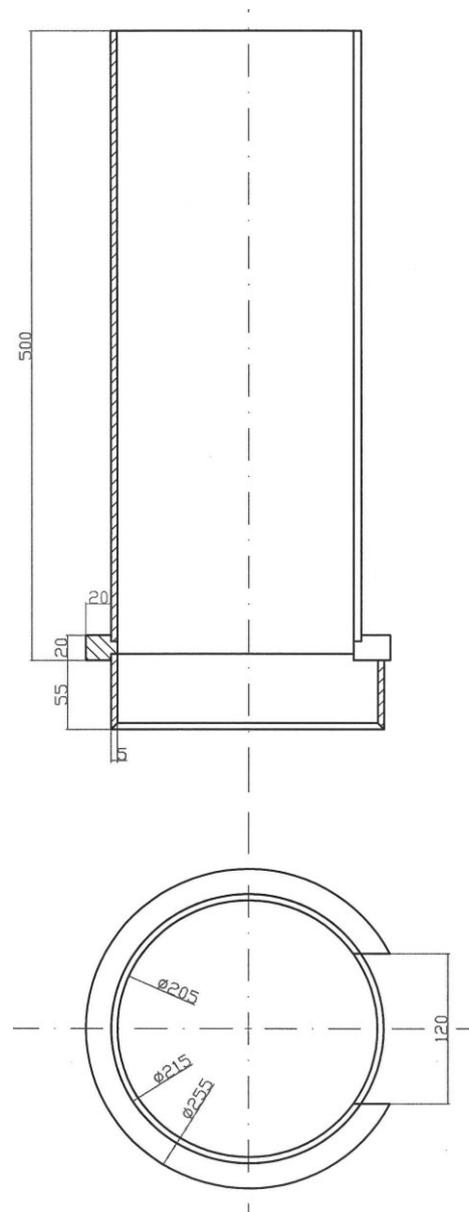


Figura 5.2.4

delle specifiche.

Nelle figure successive si riportano la vista in pianta ed in sezione, nonché una vista tridimensionale della vasca, con il primo inserto già innestato sulla mandata.

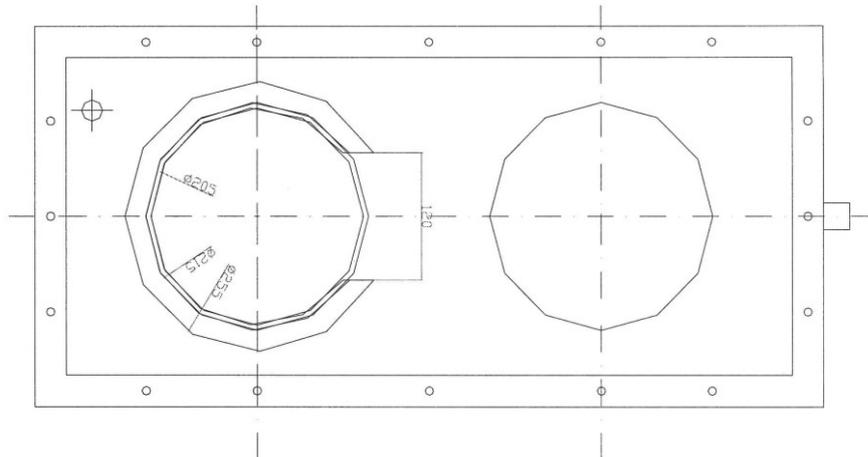


Figura 5.2.5

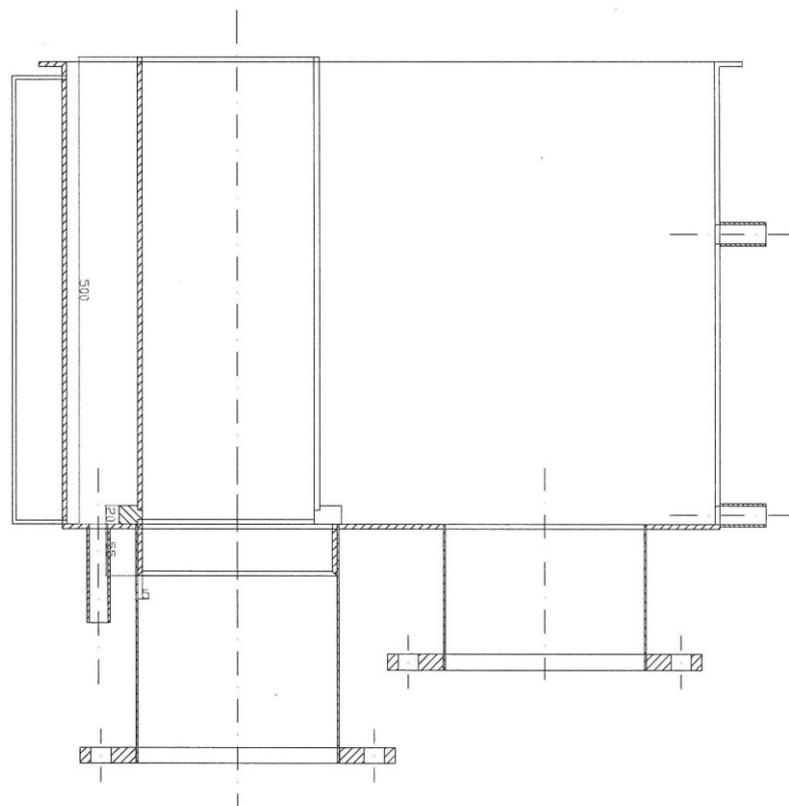


Figura 5.2.6

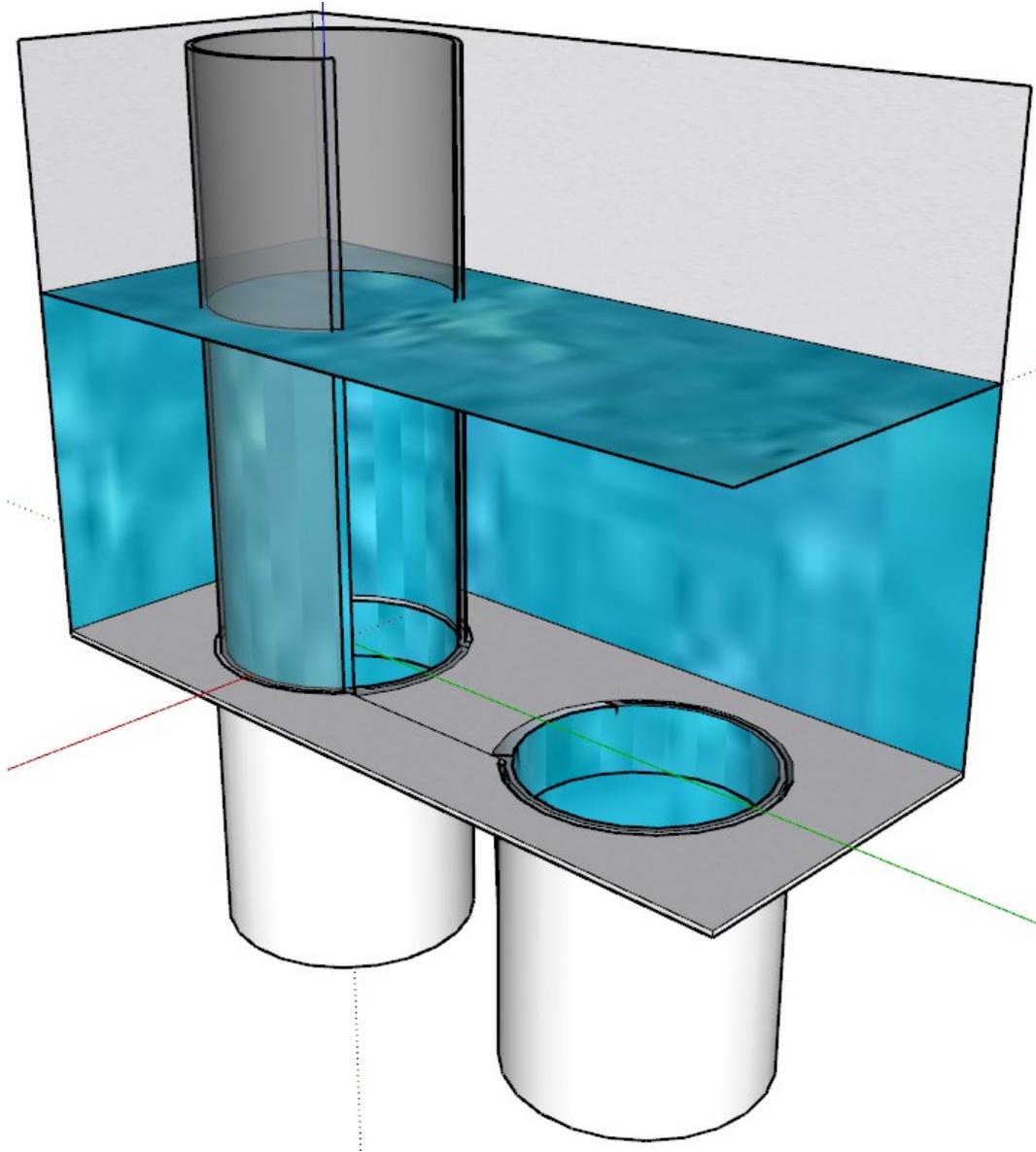


Figura 5.2.7

Nell'ottica di una configurazione a step, dopo il primo, è stato aggiunto un secondo inserto, stavolta sulla tubazione di aspirazione della vasca, sempre con luce di 120 mm, ma dotato anche di pareti laterali.

Anche il nuovo inserto era costituito da un tubo in plexiglas trasparente, innestato questa volta sul foro di ripresa, con apertura laterale di 120 mm, che si estende per tutto il tratto di tubo verticale (500 mm, fino al bordo superiore della vasca stessa).

Insieme all'inserto sono state inoltre montate delle pareti in plexiglas trasparente, spesse 10 mm, ed alte 500 mm come la vasca, in modo da contenere il deflusso dell'acqua nella vasca all'interno di una finestra larga 120 mm, ottenendo così, nella regione del target, una configurazione più simile a quella prevista dall'ANSALDO, vedasi figura 5.2.8.

Riguardo alle pareti, dopo accurate valutazioni, si decise di incollarle, mediante rinforzi in plexiglas, al secondo inserto, quello sull'aspirazione, e di lasciarle semplicemente accostate al primo inserto, quello sulla mandata.

Nelle figure successive si riportano la vista in pianta ed in sezione, nonché una vista tridimensionale della vasca, con il secondo inserto e le pareti già innestate sul condotto di aspirazione.

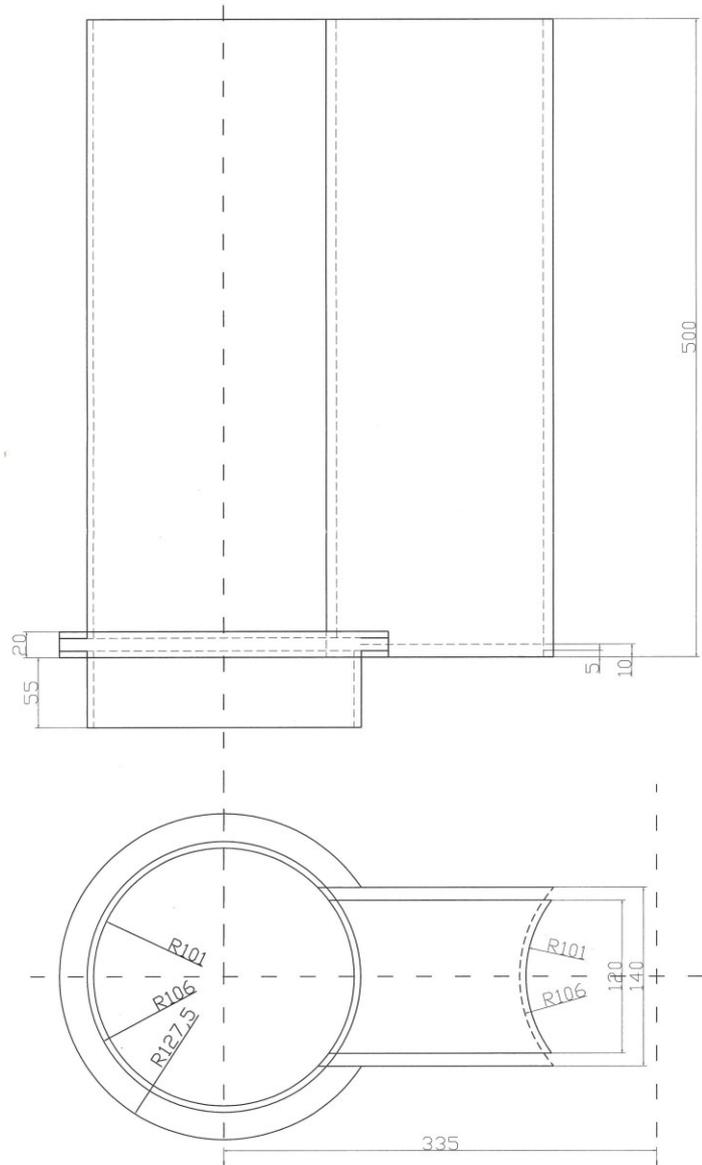
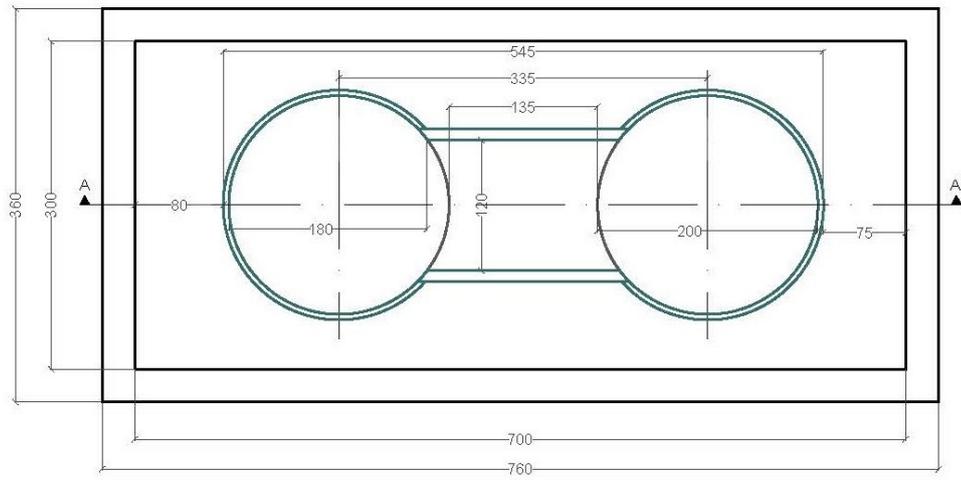


Figura 5.2.8

Vista in Pianta



Vista in Sezione

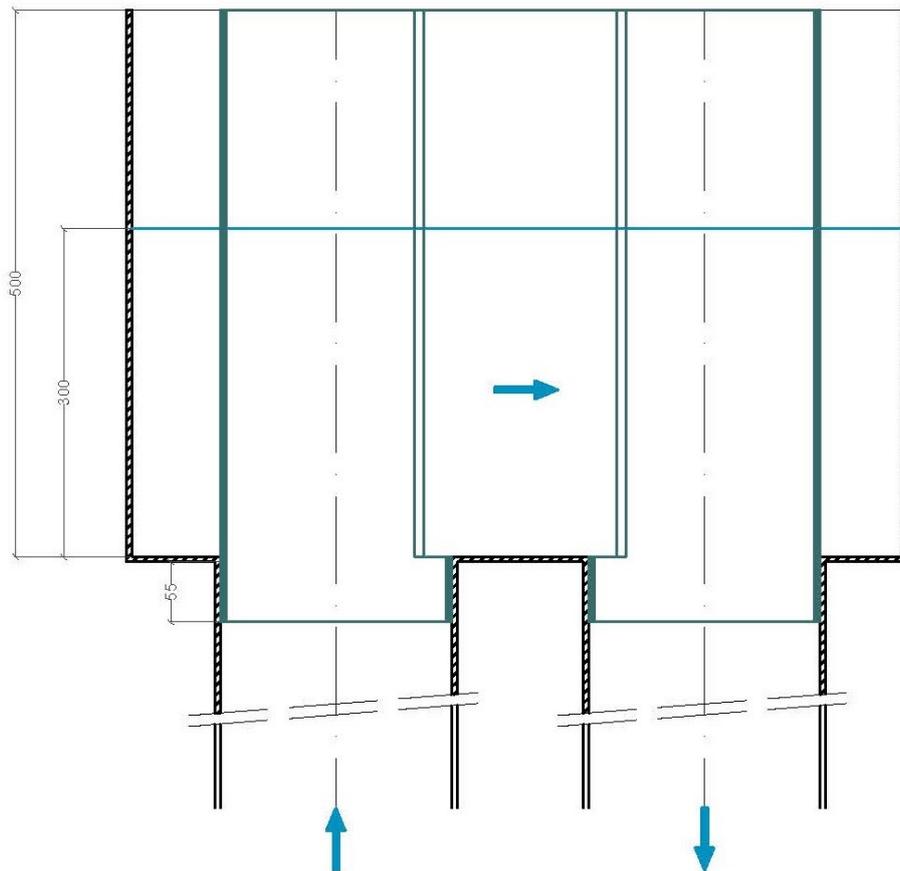


Figura 5.2.9

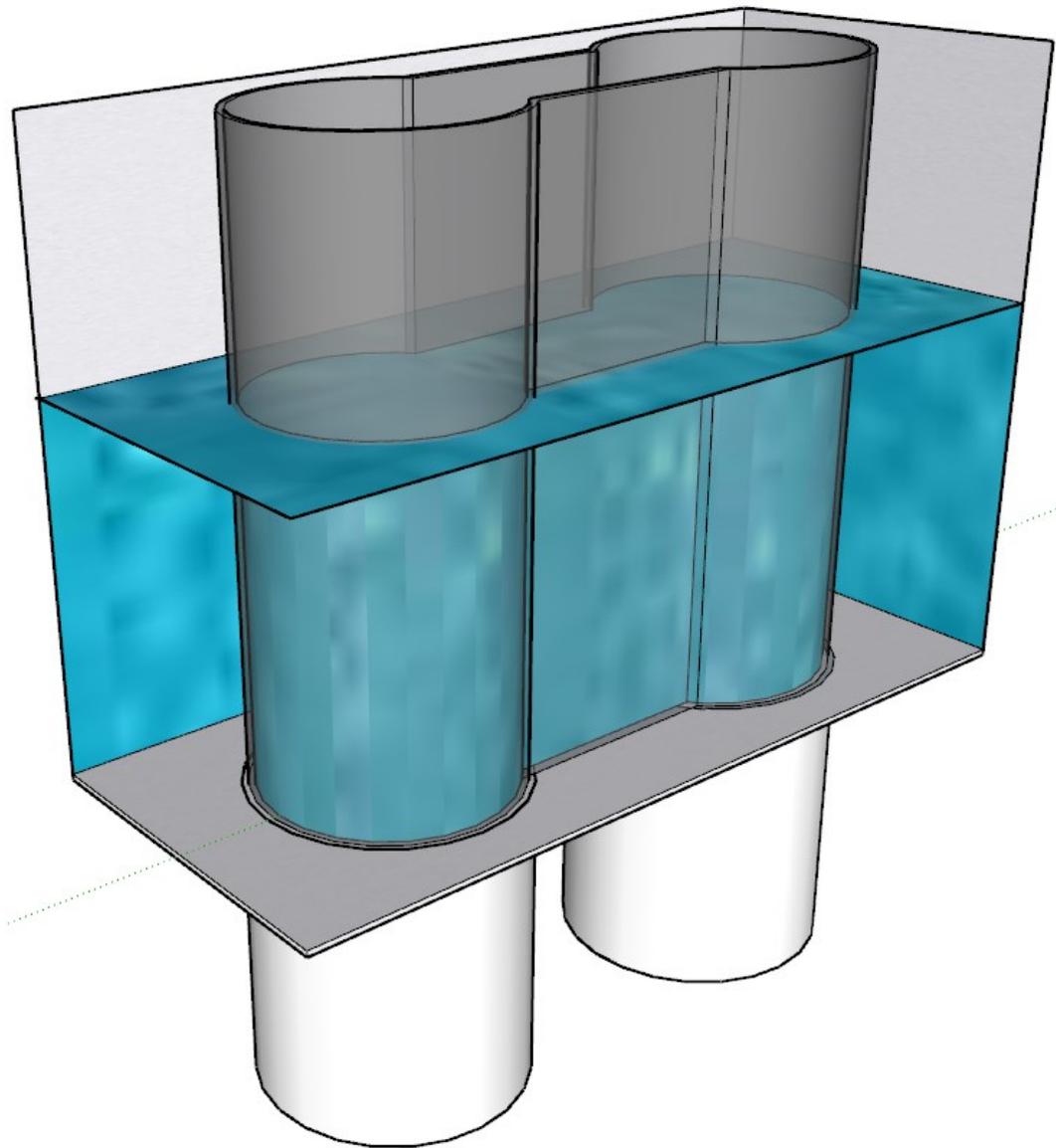


Figura 5.2.10

5.3. COLLEGAMENTO CON IL CIRCUITO

La nuova sezione di prova, del tipo a “canale”, riutilizzava per quanto possibile il circuito sperimentale già disponibile per la prima sezione di prova, in geometria assial-simmetrica.

La parte del circuito che va dall’aspirazione della pompa, fino allo scambiatore di calore in controcorrente, è stata infatti mantenuta inalterata rispetto al precedente impianto sperimentale.

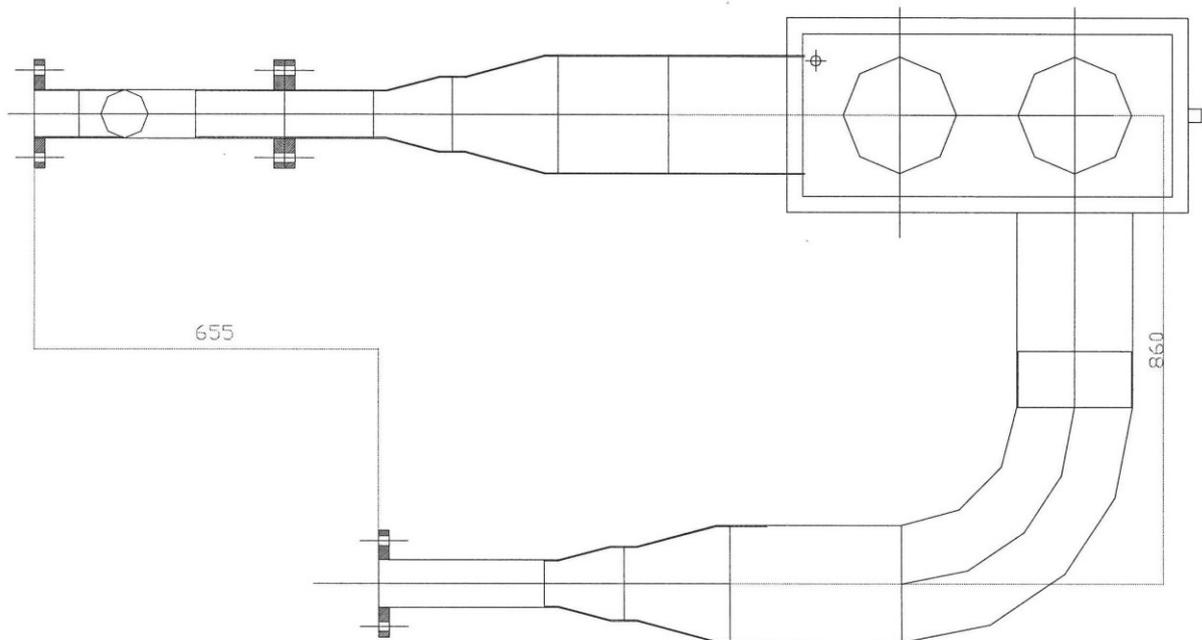


Figura 5.3.1

Il circuito si sviluppava in maniera orizzontale, ad un’altezza di circa 800 mm dal suolo. In uscita dalla pompa era installato il venturimetro, e dopo un’inversione ad “U”, mediante due curve a 90° ed un tratto orizzontale leggermente inclinato verso il basso, si giungeva al contatore e poi allo scambiatore di calore in controcorrente.

L’esigenza di poter osservare il deflusso dell’acqua attraverso il target, ha fatto sì che sorgesse la necessità di non elevare troppo lo stesso, cercando di rimanere ad un’altezza che permettesse di esaminare il tutto senza dover salire su un’impalcatura laterale o su una scala. Per questo motivo, dopo lo scambiatore di calore, il circuito scende a livello del pavimento, mediante due curve a 90°, per poi collegarsi alla tubazione verticale di immissione nella vasca.

Lo sviluppo orizzontale del circuito sperimentale è completamente realizzato in acciaio inox DN 80, mentre i tratti verticali di collegamento alla vasca hanno diametro nominale DN 200. Il passaggio di sezione è stato realizzato mediante riduttori in acciaio, saldati ai tratti di tubazione sopra riportati. Le tubazioni verticali DN 200 sono state collegate, con delle flange, alle tubazioni in acciaio DN 200 saldate alla vasca del target.

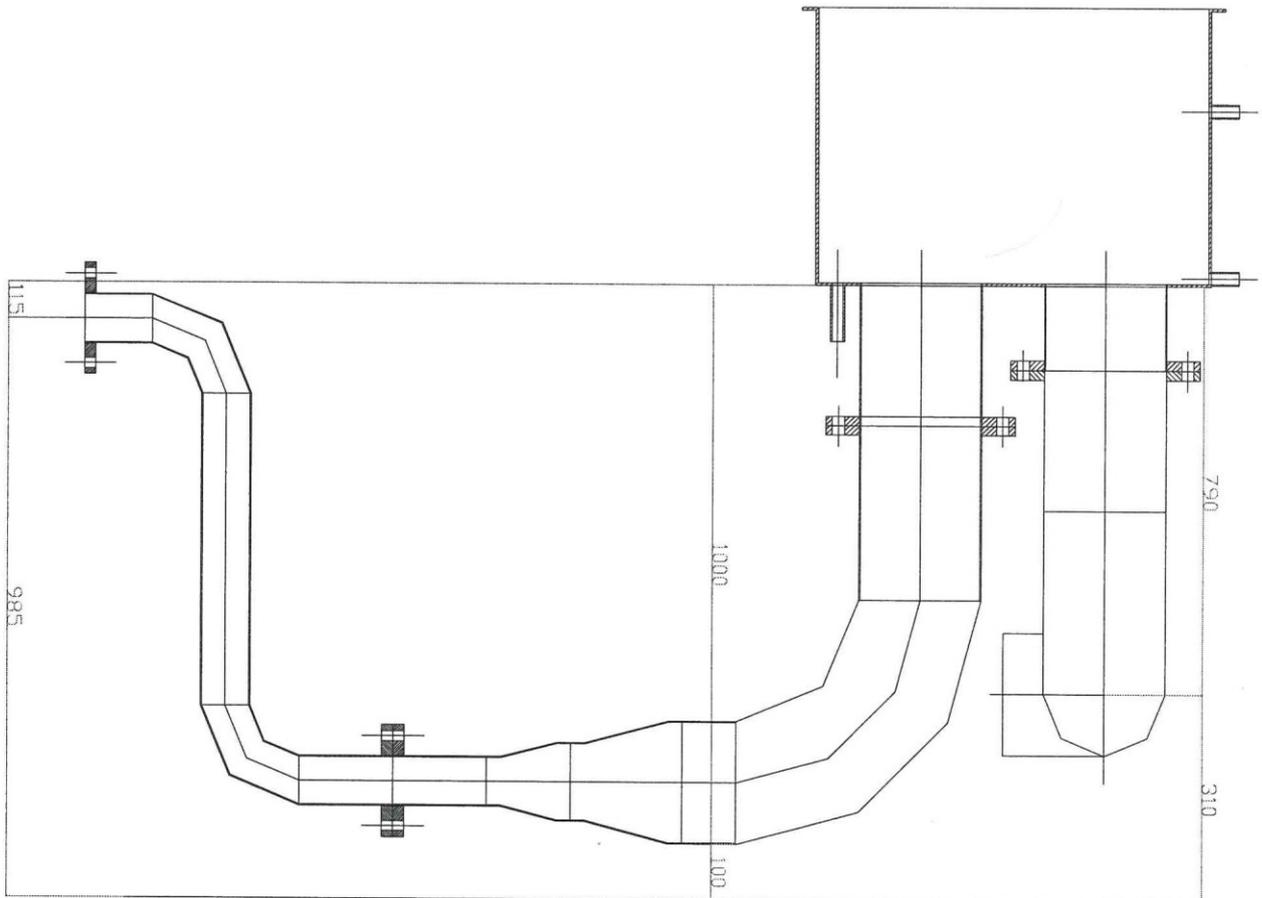


Figura 5.3.2

Per agevolare la sperimentazione, le dimensioni e la posizione dei vari collegamenti, sono state concepite in modo da avere la base della vasca ad una quota di circa 1000 mm dal pavimento, e quindi la finestra a circa 1300 mm dal pavimento. La struttura di sostegno della vasca e del circuito è stata realizzata con tubi Dalmine.

Per lo spurgo dell'aria dal circuito si utilizzavano due prese di pressione presenti sullo scambiatore di calore controcorrente.

Le foto seguenti riportano due viste della sezione di prova, dove si può notare il collegamento con il circuito esistente, la struttura di sostegno della sonda per la misura dei campi di velocità, realizzata con profilati di alluminio, e la finestra per le osservazioni visuali.



Figura 5.3.3



Figura 5.3.4

6. STRUMENTAZIONE DI MISURA DELLE VELOCITA'

La determinazione delle caratteristiche idrauliche all'interno della sezione di prova passa anche per una stima delle velocità nel suddetto corpo fluido.

A tal fine si è utilizzata una sonda che basa il suo funzionamento sulla velocimetria acustica Doppler (ADV: Acoustic Doppler Velocimetry), consentendo di rilevare la velocità puntuale del liquido e di fornire le componenti della medesima lungo tre direzioni tra loro ortogonali.

In questo capitolo, vi è la descrizione dello strumento di misura utilizzato per l'esecuzione degli esperimenti, utilizzato anche in precedenti lavori svolti su diverse configurazioni della sezione di prova.

Lo strumento usato in questa applicazione è stato realizzato dalla SonTek (6837 Nancy Ridge Drive, Suite A, San Diego, CA 92121, USA), si tratta del modello 10 MHz ADVLab illustrato nella figura seguente [7].

Lo strumento consta di tre elementi base: la sonda (o probe), il modulo di condizionamento del segnale, ed il processore. La sonda è costituita da una sorgente di ultrasuoni o trasmettitore T con una frequenza di 10 MHz, e da tre ricevitori (R1, R2 ed R3) disposti a 120° lungo una circonferenza di 77 mm di diametro.



Figura 6.1

Lo strumento misura le componenti tridimensionali della velocità in un piccolo volume di controllo localizzato a 50 mm dal trasmettitore.

6.1. L'EFFETTO DOPPLER ED IL MISURATORE BISTATICO DI CORRENTE

La misurazione della velocità di un liquido, mediante la velocimetria acustica Doppler (ADV, Acoustic Doppler Velocimetry), si basa su una tecnica introdotta nel 1993 [8].

Questa metodologia permette di determinare la velocità, o le componenti di velocità, in un liquido, in un punto dello spazio, ed anche un profilo di velocità lungo una linea di misura [9], sulla base della variazione di frequenza dovuta all'effetto Doppler (Doppler shift).

Secondo tale variazione, se una sorgente di onde sonore si muove rispetto ad un ricevitore, l'onda riflessa da quest'ultimo subisce uno sfasamento rispetto all'onda trasmessa:

$$F_{Doppler} = -2 \cdot F_{Sorgente} \cdot \left(\frac{V}{C} \right)$$

dove:

V è la velocità relativa tra sorgente e riflettore,

C è la velocità del suono nel mezzo considerato,

$F_{Sorgente}$ è la frequenza di trasmissione dell'onda acustica,

$F_{Doppler}$ è il cambiamento di frequenza al ricevitore.

Il moto perpendicolare alla congiungente sorgente ricevitore non introduce l'effetto Doppler, che si manifesta invece se la distanza tra i due oggetti varia; ed in particolare: se la distanza diminuisce, la frequenza cresce, mentre se la distanza aumenta, la frequenza diminuisce.

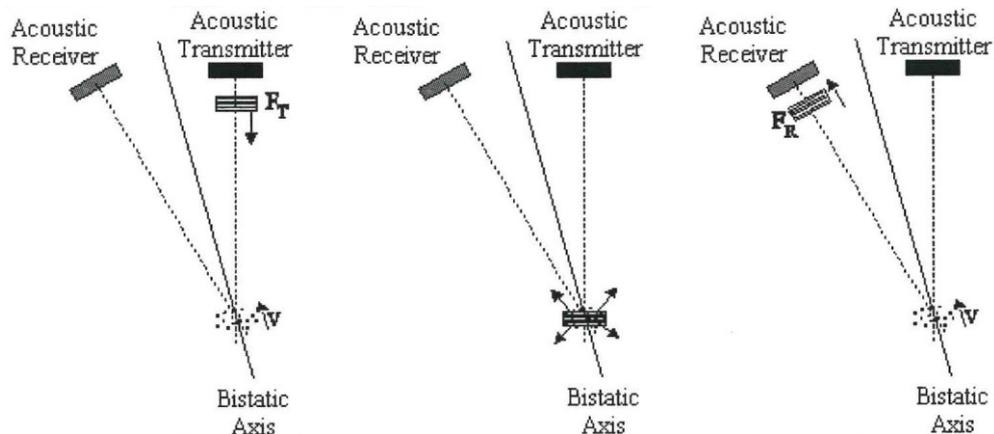


Figura 6.1.1

La figura, sopra riportata, illustra le operazioni della sonda Doppler di tipo bistatico, cioè con trasduttori diversi per le operazioni di invio e ricezione del segnale [10]. Sia il trasmettitore che il ricevitore sono costruiti per generare/ricevere un fascio piuttosto piccolo. Il trasmettitore genera l'onda con la maggior parte dell'energia concentrata in un cilindro ristretto, i ricevitori sono sensibili ai segnali sonori che provengono da un ristretto range angolare. L'intersezione tra il fascio trasmesso e quello ricevuto, dà luogo al volume di misura.

Il trasmettitore genera un breve impulso sonoro ad una frequenza conosciuta, che si propaga nell'acqua lungo l'asse del fascio. Come l'impulso passa attraverso il volume di misura, l'energia acustica è riflessa in tutte le direzioni dal particolato (sedimenti, piccoli organismi, bolle, ecc.). Ma una parte dell'energia riflessa torna indietro lungo l'asse del ricevitore, e qui è campionata dall'ADV, e poi elaborata sino a restituire una misura del cambio in frequenza. L'effetto Doppler misurato da un ricevitore è proporzionale alla velocità delle particelle lungo l'asse bistatico di ricevitore e trasmettitore. L'asse bistatico è localizzato nel mezzo, tra gli assi dei fasci del trasmettitore e del ricevitore.

Quando l'impulso trasmesso viaggia nell'acqua, una parte della sua energia è riflessa in tutte le direzioni. Immediatamente dopo l'emissione dell'onda, giunge dunque al ricevitore un segnale che è al di fuori del range di sensibilità: il livello di rumore ambientale. Ma quando l'impulso passa attraverso il volume di misura, il segnale di ritorno muove lungo la direzione per cui si ha il picco di sensibilità, ed il ricevitore vede quindi un aumento di intensità del segnale. L'ampiezza di questo raggiunge un massimo quando l'impulso incrocia il centro del fascio del ricevitore, per poi decadere quando la riflessione muove fuori dal volume di controllo.

6.2. GEOMETRIA DEL FASCIO E DEFINIZIONE DEL VOLUME DI MISURA

Una sola coppia trasmettitore/ricevitore misura la proiezione della velocità dell'acqua sull'asse bistatico. La sonda ADV usa un trasmettitore e tre ricevitori, questi ultimi allineati per intersecarsi con il fascio trasmesso in un volume di misura comune. Combinando le velocità misurate da ciascun ricevitore, e conoscendo le orientazioni relative dei tre assi bistatici, si calcola la velocità dell'acqua 3D nel volume di misura.

La dimensione del volume di misura è determinata da quattro fattori: il fascio trasmesso, quello ricevuto, la lunghezza dell'impulso, e la finestra di ricezione (ossia il periodo di tempo in cui il segnale di ritorno è campionato). La Figura seguente illustra gli effetti di ciascuno di questi fattori.

Definita la direzione verticale della sonda come quella dell'asse del trasmettitore, e la direzione orizzontale come la perpendicolare a questo asse, risulta evidente come il volume di misura non sia

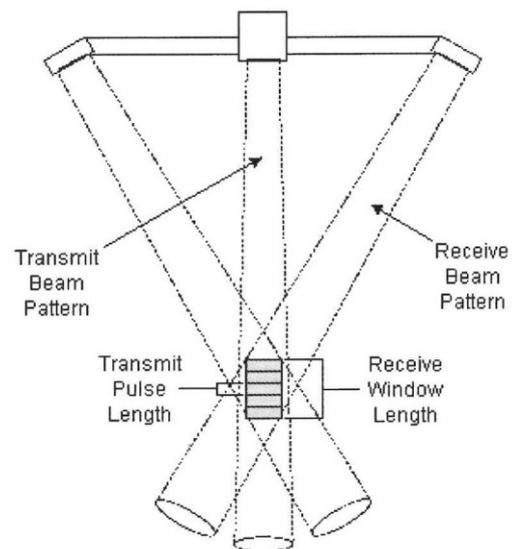


Figura 6.2.1

chiaramente definito nel suo contorno orizzontale, se non che dall'intersezione dei fasci di

trasmissione e ricezione. Indicativamente è dato da un cilindro d'acqua di base pari alle dimensioni del trasmettitore ceramico (6 mm di diametro per la sonda ADV a 10 MHz). E' importante sottolineare che non essendo noto con precisione il contorno orizzontale del volume di misura, l'eventuale presenza di oggetti vicino allo stesso può interferire con le misure di velocità.

L'estensione verticale del volume di misura è invece definita dalla convoluzione della lunghezza dell'impulso acustico con la finestra di ricezione in cui il segnale di ritorno è campionato. Entrambi i parametri sono controllati con precisione dal software dell'ADV. L'altezza totale del cilindro d'acqua in cui si misura la velocità è di 9 mm per la sonda a 10 MHz, e può essere ridotta intervenendo sul software d'acquisizione dati. Bisogna poi ancora notare che la locazione del volume di misura si riferisce al centro dello stesso, lungo l'asse verticale.

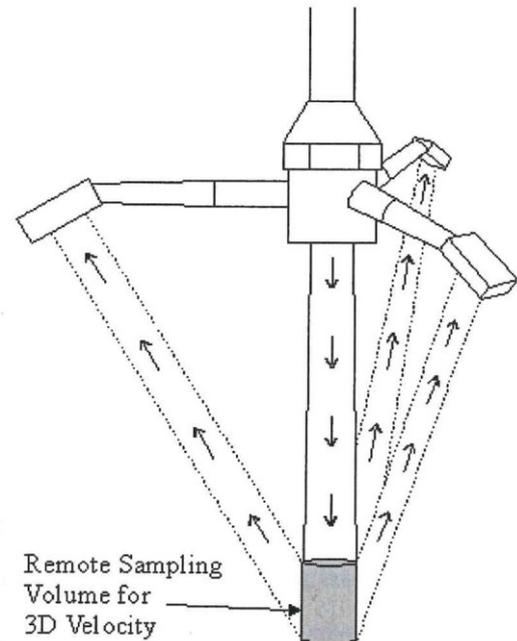


Figura 6.2.2

6.3. ELABORAZIONE COERENTE DI IMPULSI

La descrizione, data sopra, delle operazioni eseguite dalla sonda è una semplificazione della via effettivamente seguita per la misura delle velocità. Vi si descrive infatti l'elaborazione incoerente di impulsi: il trasduttore invia un solo impulso acustico e misura il cambio in frequenza del segnale ritornato. In realtà, la sonda ADV usa una tecnica chiamata elaborazione coerente di impulsi: lo strumento invia due impulsi sonori separati da un intervallo di tempo definito, per poi misurare la fase del segnale di ritorno da ciascuno degli impulsi. Il cambio in fase diviso per il tempo d'attesa tra gli impulsi è direttamente proporzionale alla velocità delle particelle nell'acqua. L'elaborazione coerente di impulsi è utilizzata perché fornisce una migliore risoluzione spaziale e temporale.

Vi sono però importanti aspetti di questo tipo d'elaborazione che influenzano le operazioni della sonda. Il primo è inerente alla limitazione sulla velocità massima che può essere misurata. L'elaborazione coerente di impulsi misura la differenza di fase dei segnali ritornati; tale differenza di fase è valutata nell'intervallo $[-\pi, \pi]$. Se la fase eccede questi limiti, essa si avvolge su se stessa (wrap around), ed il fenomeno è detto di "aliasing" o distorsione: se ad

esempio la fase cresce fino a superare π , l'ADV misura una fase pari a $-\pi$, ed in uscita si ha una velocità negativa in luogo di una fortemente positiva.

La massima velocità non ambigua risulta essere una funzione del tempo d'attesa tra i due impulsi. L'ADV permette all'utilizzatore di scegliere tra un certo numero di range di velocità preimpostati, ciascuno dei quali corrisponde ad un particolare intervallo d'impulso. L'operatore è tenuto ad impostare il range di velocità più basso, compatibile coi risultati attesi nell'esperimento, poiché il livello del rumore di fondo aumenta con i range di velocità più elevate.

6.4. DATI DELL'ADV

La sonda ADV registra nove valori per ciascun campionamento: tre valori di velocità (uno per ogni componente), tre intensità di segnale (una per ricevitore), e tre valori di correlazione (uno per ricevitore).

VELOCITÀ

Uno dei parametri più importanti che l'operatore è tenuto ad impostare è il range di velocità. Questo determina la massima velocità che può essere misurata dalla sonda. I range di velocità preimpostati per la l'ADV a 10 MHz sono ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , e ± 250 cm/s. Come già detto l'utilizzatore deve impostare il range di velocità più basso entro cui ci si aspetta che ricadano i risultati dell'esperimento. Infatti il rumore generato dalla strumentazione aumenta col range di velocità settato.

In realtà la massima velocità misurabile dipende dalla direzione del flusso rispetto al posizionamento del probe della sonda. L'ADV misura le velocità lungo l'asse bistatico di ciascun ricevitore, per cui le limitazioni imposte si riferiscono alle velocità bistatiche. Poiché poi tali assi si discostano di soli 15° dall'asse verticale del probe, l'ADV è più sensibile al deflusso lungo questa direzione, ed il limite sulla massima velocità per flusso verticale è più basso.

La tabella mostra le velocità massime che possono essere rilevate per ciascun range di velocità con deflusso verticale ed orizzontale.

ADV Velocity Range cm/s	Max Horizontal Velocity cm/s	Max Vertical Velocity cm/s
±3	±30	±8
±10	±60	±15
±30	±120	±30
±100	±300	±75
±250	±360	±90

Tabella 6.4.1

Quando si opera in condizioni fortemente turbolente, l'ADV può misurare bassi valori di correlazione che indicano una crescita del rumore nella stima delle velocità. In queste condizioni, per ridurre il livello di rumore si aumenta il range di velocità. L'ampiezza delle fluttuazioni turbolente può essere stimata mediante la deviazione standard delle velocità, mostrata sullo schermo dal software d'acquisizione dati dell'ADV. Se la deviazione standard è più del 5% del range di velocità settato (per esempio più di 5 cm/s quando s'utilizza il range ±100 cm/s) le performance dovrebbero migliorare impostando un range di velocità più elevato. Questo cambio porterebbe ad un aumento del fattore di correlazione ed a una riduzione del rumore nei dati di velocità.

CAMPIONAMENTO DEI DATI

La singola misura di velocità tridimensionale effettuata dall'ADV si riferisce ad un impulso detto "ping". La sonda in questione emette 150÷250 ping al secondo (il rateo varia con il range di velocità settato). Questa frequenza è anche detta Pulse Repetition Frequency. Poiché il rumore in un solo ping è troppo elevato ai fini dell'uso pratico, l'ADV media un certo numero di pings per ridurre il livello di rumore in ciascuna delle velocità campionate in uscita. Il numero di pings mediati, per venire incontro alle esigenze di campionamento specificate dall'operatore, può variare nell'intervallo di frequenza che va da 0.1 a 25 Hz. Per esempio, campionando a 25 Hz l'ADV colleziona tanti pings quanti ne vanno in un intervallo di 40 ms, ne fa la media, e questo è il valore in uscita di un solo campionamento; dunque considerando la frequenza massima dei pings (250 Hz) segue che la velocità media riportata dal processo di campionamento a 25 Hz è la media di al massimo 10 pings.

Un importante risultato dello schema d'elaborazione adottato dall'ADV è che riducendo la frequenza di campionamento, diminuisce anche il rumore presente in ciascuna misura, poiché aumentano il numero di pings mediati per ottenerla. Il rumore generato dalla strumentazione è casuale, per cui mediando più punti si converge al valore esatto senza

introdurre errori sistematici. Il livello di rumore decresce con la radice quadrata del numero di campionamenti mediati.

RUMORE

Tutti i sistemi che utilizzano l'effetto Doppler misurano un rumore dovuto al processo fisico per cui le onde acustiche sono riflesse dalle particelle nell'acqua. Questo rumore, detto anche "Doppler noise", è puramente casuale e si può assumere che segua una distribuzione Gaussiana.

Sotto buone condizioni operazionali (segnale/rumore: $SNR > 15$ dB, e valore di correlazione maggiore del 70%), il rumore nella velocità orizzontale è stimato come l'1% del range di velocità operando con una frequenza di campionamento di 25 Hz. Per esempio, sotto tali condizioni, si ha un rumore nella velocità orizzontale di circa ± 1 cm/s avendo settato la velocità nel range ± 100 cm/s.

Bisogna notare che il rumore sopra stimato si riferisce alle velocità orizzontali, infatti discostandosi gli assi bistatici dei ricevitori di soli 15° rispetto all'asse verticale, il rumore nelle misure di velocità orizzontale è maggiore di quello rilevato in misure di velocità verticale di circa un fattore quattro.

INTENSITÀ DEL SEGNALE

L'intensità del segnale, registrata per ciascun ricevitore dell'ADV, è una misura dell'intensità di riflessione dell'impulso acustico. Con il software dell'ADV la si può visualizzare come ampiezza in "counts" o come rapporto segnale/rumore (SNR) in dB. L'SNR lo si deriva dal segnale di ampiezza a cui si sottrae il livello di rumore ambientale e convertendo in dB.

La principale funzione di questo segnale è quella di verificare che vi sia una sufficiente quantità di particolato disciolta nell'acqua. Se l'acqua è troppo limpida il segnale di ritorno non è più forte del livello di rumore dovuto alla presenza dei sistemi elettronici nell'ambiente. Senza una sufficiente intensità di segnale l'ADV non è in grado di dare accurate misure di velocità. Per misurazioni ad elevata risoluzione (campionamento a 25 Hz), si raccomanda di mantenere l'SNR al di sopra dei 15 dB. In generale dunque l'ADV richiede un minimo di materiale disciolto in acqua (tipicamente 10 mg/l) per lavorare in condizioni ottimali. Siccome dunque il segnale di ritorno è funzione del particolato disciolto nell'acqua, il valore dell'intensità di segnale può anche essere usato come indicatore della concentrazione dei sedimenti.

COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE

Il coefficiente di correlazione è un parametro che ci indica la qualità dei dati forniti dai calcoli sulla velocità Doppler. I coefficienti valutati sono tre, cioè uno per ogni ricevitore. La correlazione è espressa come percentuale: una perfetta correlazione del 100% indica che le misure sono certe con un basso livello di rumore; una correlazione dello 0% indica che le velocità restituite in uscita sono dominate da disturbi di contorno (segnale non coerente). Idealmente la correlazione dovrebbe essere compresa tra il 70 e il 100% perché i dati siano affidabili. Valori minori del 70% stanno a significare che l'ADV sta operando in un regime di misura difficoltoso, la sonda è fuori dall'acqua, il rapporto tra segnale e rumore (SNR) è troppo basso o qualcosa non sta ben funzionando nella sonda. In certe condizioni di deflusso (flusso altamente turbolento, eccessiva presenza d'aria nell'acqua) non è possibile ottenere alti valori di correlazione. Bassi valori del coefficiente di correlazione interessano le misure di velocità fatte per brevi intervalli di tempo, cioè quasi istantanee, ma se si è interessati ai valori di velocità medi, calcolati in intervalli di tempo relativamente lunghi, allora possono andare bene anche valori di correlazione del 40%.

6.5. VELOCITÀ DEL SUONO

La velocità misurata dall'ADV è legata alla velocità del suono nel mezzo, tipicamente circa 1500 m/s. Variazioni di temperatura o di salinità dell'acqua influenzano tale velocità.

La variazione della velocità del suono nel mezzo inficia i dati in uscita dall'ADV in due modi: la conversione dell'effetto Doppler nella velocità del fluido risulta falsata, come pure il posizionamento del volume di misura. La variazione geometrica è dovuta all'intervallo di campionamento dell'ADV, che a sua volta dipende dalla velocità del suono specificata; se questa non è corretta, la locazione reale del volume di misura sarà diversa da quella assunta nel file di calibrazione del probe.

Per correggere la velocità misurata dalla sonda, si utilizza un best fit d'approssimazione della variazione geometrica. Questa correzione, mostrata sotto, è accurata di circa lo 0.5% per un errore della velocità del suono nel mezzo del 5%.

Correzione della velocità orizzontale (V_x e V_y):

$$V_{true} = V_{orig} \cdot \left[1 + 1.93 \cdot \left(\frac{C_{true}}{C_{orig}} - 1 \right) \right]$$

Correzione della velocità verticale (V_z):

$$V_{true} = V_{orig} \cdot \left[1 + 0.94 \cdot \left(\frac{C_{true}}{C_{orig}} - 1 \right) \right]$$

dove:

V_{true} = velocità corretta;

V_{orig} = velocità valutata dallo strumento, non esatta;

C_{true} = velocità del suono nel mezzo effettiva;

C_{orig} = velocità del suono utilizzata nelle elaborazioni originarie.

6.6. MISURE IN PROSSIMITÀ DEL CONTORNO

La più evidente interferenza con le misure dell'ADV si presenta quando il volume di misura include il contorno del sistema in cui si opera. In questo caso la sonda potrebbe misurare l'effetto Doppler non già dovuto alla riflessione delle particelle nell'acqua, ma a quella della superficie di contorno. In questo caso le velocità dovrebbero tendere a zero (tipicamente la superficie di contorno è stazionaria), e tuttavia ciò non è detto (in particolare se si opera con contorni non stazionari o non uniformi).

In buone condizioni di prova, il margine più esterno del volume di misura può essere posto sino a circa 1 mm dal contorno del sistema (lungo l'asse verticale). Come precedentemente detto, l'estensione verticale del volume di campionamento è definita con precisione, per cui il margine più esterno di questo può essere posto anche molto vicino al bordo del sistema. Quando si lavora in prossimità del contorno, è importante che la distanza tra questo ed il probe rimanga costante. Se si effettuano misurazioni vicino alla superficie, o ad un letto mobile, dove la distanza dal contorno può variare nel tempo, si è costretti a limitare lo spazio di investigazione alla zona in cui le condizioni operazionali sono soddisfacenti.

Sebbene la riflessione dal contorno del sistema provenga da una direzione che è al di fuori del picco di sensibilità del ricevitore, l'intensità della riflessione è così elevata che il segnale di ritorno dal bordo può essere tanto forte quanto quello proveniente dal volume di misura. La distanza tra il picco del volume di campionamento ed il fondo del picco di riflessione dal contorno, è utilizzata dall'ADV per misurare la distanza tra il centro del volume di misura ed il bordo del sistema. Questa misura è accurata di circa ± 1 mm per la sonda a 10 MHz, ma solo se il centro del volume di misura è a più di 2 cm dal contorno.

C'è poi una seconda, meno evidente, causa di interferenza: l'ADV invia due impulsi per ogni misura di velocità, è dunque possibile che la riflessione del primo impulso dal contorno possa arrivare contemporaneamente a quella del secondo impulso dal volume di campionamento. Questa contaminazione appare come un elevato livello di rumore, che tipicamente rende impossibile interpretare i dati di velocità.

L'ADV è stato progettato per rilevare, ed eventualmente correggere, questo tipo di interferenza. Prima di partire con l'acquisizione dei dati, la strumentazione monitora l'acqua alla ricerca del contorno e, se presente, misura la distanza di questo (tipicamente rileva il contorno fino a 25 cm di distanza). Se questa distanza uguaglia l'intervallo d'impulso (determinato dal range di velocità settato), l'ADV lo aggiusta automaticamente onde evitare interferenza. Quando possibile, l'adattamento dell'intervallo d'impulso avviene spostandosi nei range di velocità più elevate; tuttavia, se si opera in prossimità del bordo non è possibile utilizzare tali range, e l'ADV forza dei range a velocità più piccole. La limitazione più significativa si verifica con misure di flusso elevato (> 1 m/s), ed estremamente vicine al contorno del sistema. In questo caso occorre un continuo aggiustamento e monitoraggio.

Lo spostamento del probe durante l'acquisizione dei dati può dunque causare notevoli problemi, in quanto l'ADV monitora l'interferenza del bordo solo prima di iniziare l'acquisizione stessa. Se si muove il probe, nel rispetto del contorno (per produrre ad esempio un profilo), bisogna per ciascun punto far ripartire l'acquisizione dall'inizio. La stessa attenzione bisogna avere quando si opera vicino alla superficie, o a letti mobili.

6.7. STRATEGIE DI CAMPIONAMENTO

L'ADV consente di studiare, nel volume di controllo, le componenti di velocità del campo di moto con riferimento alla corrente media, allo studio di un eventuale comportamento ondoso ed infine allo studio della turbolenza. Ciò dipende dalla strategia utilizzata nel campionamento e nella elaborazione dei dati acquisiti.

In relazione all'obiettivo dello studio, al tipo di moto da studiare ed alla geometria di riferimento, possono essere seguite diverse strategie di campionamento:

campionamento continuo con frequenza di campionamento tra 0.1 e 25 Hz;

campionamento quasi-continuo;

campionamento discontinuo.

La scelta di una di queste strategie è finalizzata alla minimizzazione dei dati da elaborare senza perdita di informazione. Il ciclo di acquisizione prende il nome di burst; la Sontek

consiglia il numero di campionamenti per burst e la frequenza di campionamento, in relazione allo studio da svolgere.

6.8. DATI ACQUISITI E LORO QUALITÀ

Il software d'acquisizione dati dell'ADV genera un efficiente file binario con estensione "adv", esso contiene le condizioni di prova in termini di set up dello strumento (modello sonda, temperatura, range di velocità, informazioni riguardanti la posizione e/o commenti sulle condizioni operazionali), tempi d'acquisizione, componenti di velocità misurate, coefficienti di correlazione, rapporti segnale-rumore. Sono presenti anche un insieme di programmi (GETVEL, GETCOR, ecc.) che consentono di estrarre i risultati delle misure in file ASCII per successive elaborazioni.

Il programma WinADV permette di estrarre i dati acquisiti durante la sperimentazione con la sonda ADV della Sontek, e di effettuare un'analisi statistica dei dati acquisiti, fornendo:

- Coefficienti di correlazione dei tre fasci.
- Rapporto segnale/rumore.
- Valori medi per le tre componenti di velocità e la velocità media nel volume di misura.
- Parametri di turbolenza per le tre componenti di velocità, valutati sulla base della deviazione standard presentata da ogni componente di velocità nel corso di una sequenza di misura.
- Covarianza delle componenti di velocità, da utilizzare nella determinazione degli stress di Reynolds.
- Momento statico del terzo ordine o "skewness". Si tratta di un indicatore della distribuzione della velocità rispetto alla media. Il valore pari a zero significa che la distribuzione è simmetrica rispetto al valore medio.
- Momento statico del quarto ordine (Kurtosis), usato come indicatore, della maggiore o minore prossimità, della distribuzione della velocità rispetto alla media. Un valore negativo indica una distribuzione piatta, mentre un valore positivo indica che la distribuzione è concentrata attorno ad un valore definito.

I dati acquisiti e processati dal programma WinADV sono stati utilizzati in una prima fase della sperimentazione, mentre in una seconda fase si è utilizzata la sola acquisizione dei dati sperimentali, per poi elaborarli con altri software che permettevano meglio di caratterizzare il deflusso nel target.

Il primo problema che si pone è quello di definire il minimo numero di misure (quasi istantanee) delle componenti di velocità, il cui valore medio sia rappresentativo del comportamento del moto del fluido.

Per questo scopo sono state effettuate, in geometria assial-simmetrica, una serie di prove atte a caratterizzare le variazioni del valore medio, delle componenti di velocità, con il numero di punti sperimentali. Si osservò che il numero di punti necessari aumentava con la portata, e che dipendeva dalla componente di velocità, in particolare occorrevano almeno 500 punti, e talvolta anche 1000 punti sperimentali, per ottenere una media stabilizzata delle velocità.

Pertanto si decise di operare in modo sistematico con 1024 punti. La scelta di 1024 (ovvero 2^{10}) è stata effettuata in quanto segnali con un numero di punti multipli di 2^n permettono di analizzare le informazioni in termini di analisi di Fourier con la FFT (Fast Fourier Transform).

7. QUALITA' DELLE MISURAZIONI SUL NUOVO TARGET

L'analisi delle misurazioni effettuate sul nuovo target non può prescindere dall'osservare come le componenti delle velocità misurate si distribuiscano rispetto al valore medio delle stesse.

Pertanto, con il presente studio, nella configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata, stabilito il punto di misura all'interno del target e la portata, si sono svolte alcune prove col fine di stabilire il numero di punti da acquisire, necessari ad avere convergenza, tra il valore medio della velocità misurata fino a quel punto, e la velocità media su tutti i campionamenti effettuati.

Nella figura 7.1 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui è indicato il punto di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

Il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $x = 100$ mm, $y = 60$ mm e $z = 250$ mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nei file P011003 (.dat, .adv, .vel) e P011003A (.adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P011003.xls, di cui, nella seguente tabella, si riporta una sintesi dei dati analizzati.

File P011003 e P011003A									
Run	Portata	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Portata (kg/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	1,873907	100	60	250	-0,3056641	3,71128906	5,0296875	5,52441875	8,788793879
1	1,873363	100	60	250	-0,1297559	3,38139648	3,8887207	5,52101875	9,25906004
2	1,872298	100	60	250	-1,1385254	3,74177734	2,38447266	5,5143625	7,99048945
3	1,870011	100	60	250	-0,1833887	4,1184082	2,93080078	5,50006875	8,845734036
20	1,872617	100	60	250	-0,1164613	3,20160667	3,06803467	5,51635625	8,436935798
21	1,868857	100	60	250	0,022536	3,43346	3,00517067	5,49285625	8,533237321

Tabella 7.1

Le righe con Run da 1 a 3 si riferiscono alle prove effettuate con 1024 campionamenti e frequenza di campionamento di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 50 ms), mentre quelle con Run 20 e 21 si riferiscono alle prove effettuate con 7500 campionamenti e frequenza di campionamento di 25 Hz (durata del singolo campionamento di 40 ms). Si fa

notare come il Run 0 non viene elaborato, in quanto utilizzato, all'inizio di ogni acquisizione, per settare gli strumenti di misura.

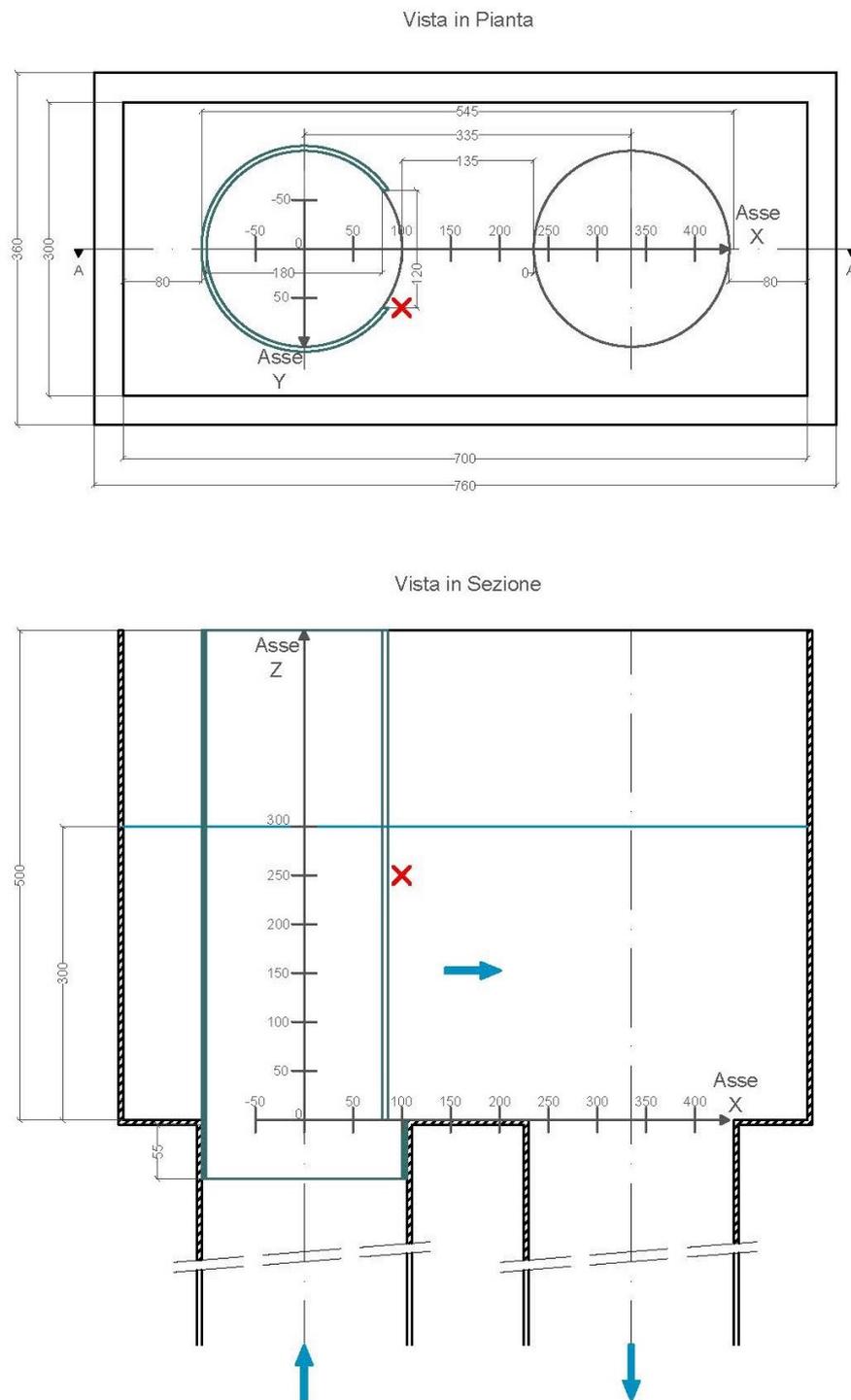
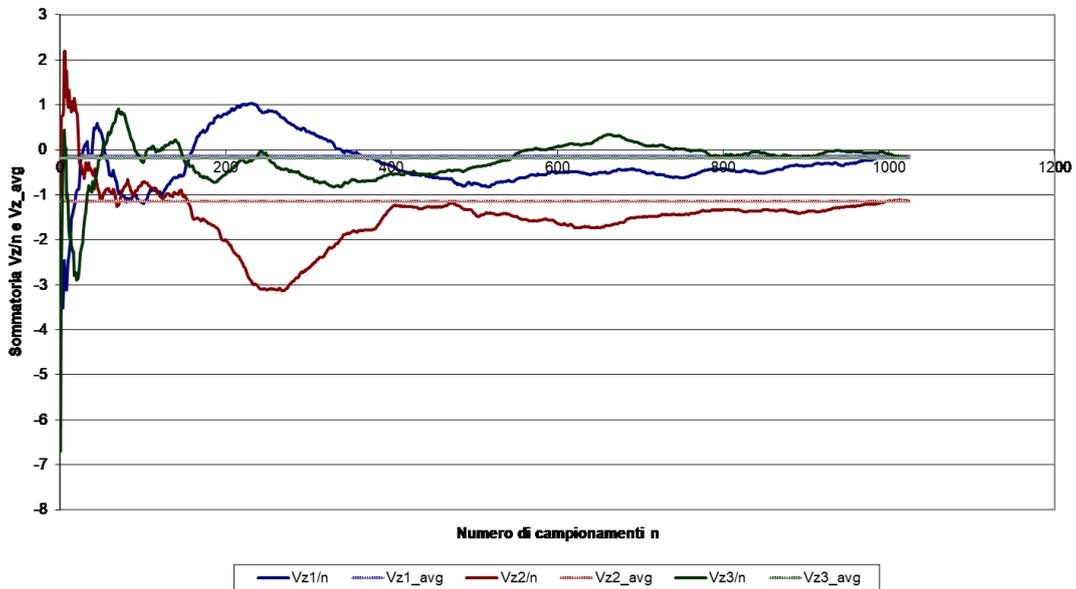


Figura 7.1

Nei grafici 7.1, 7.2 e 7.3, riportati di seguito, si può notare come il valore medio della componente di velocità, su tutti i campionamenti effettuati in un "burst" (Run riportati in tabella), sia una retta orizzontale, mentre la curva che rappresenta il rapporto tra la

sommatoria dei valori misurati fino ad un certo punto ed il numero di punti stessi, tende a schiacciarsi sul valore medio all'aumentare del numero dei punti di misurazione.

Andamento della sommatoria Vz/n e Vz_avg con 1024 campionamenti a 20 Hz. In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s



Andamento della sommatoria Vz/n e Vz_avg con 7500 campionamenti a 25 Hz. In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

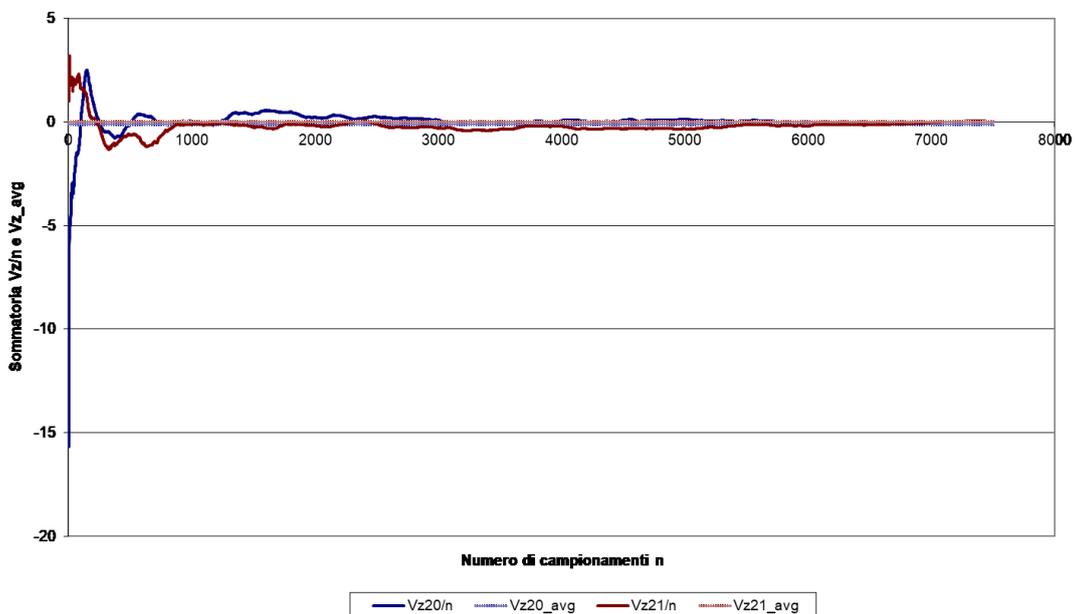
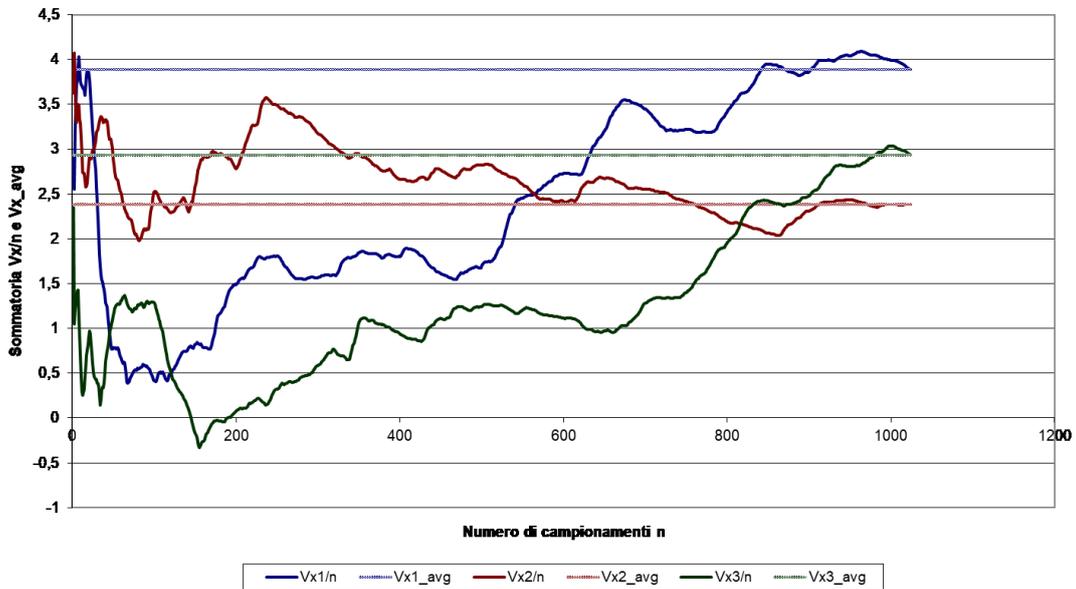


Grafico 7.1

Andamento della sommatoria V_x/n e V_x_avg con 1024 campionamenti a 20 Hz. In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s



Andamento della sommatoria V_x/n e V_x_avg con 7500 campionamenti a 25 Hz. In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

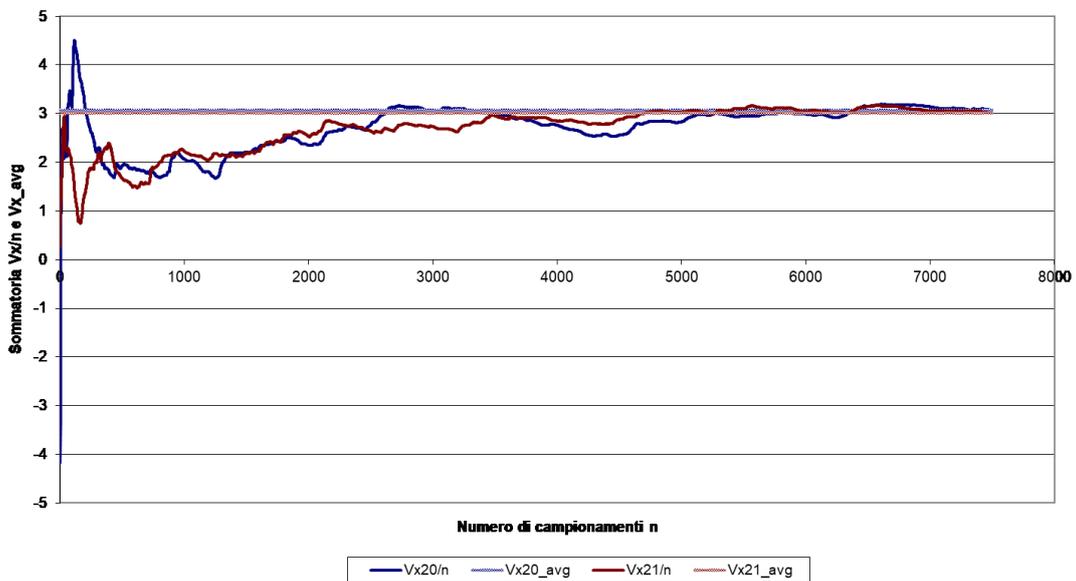
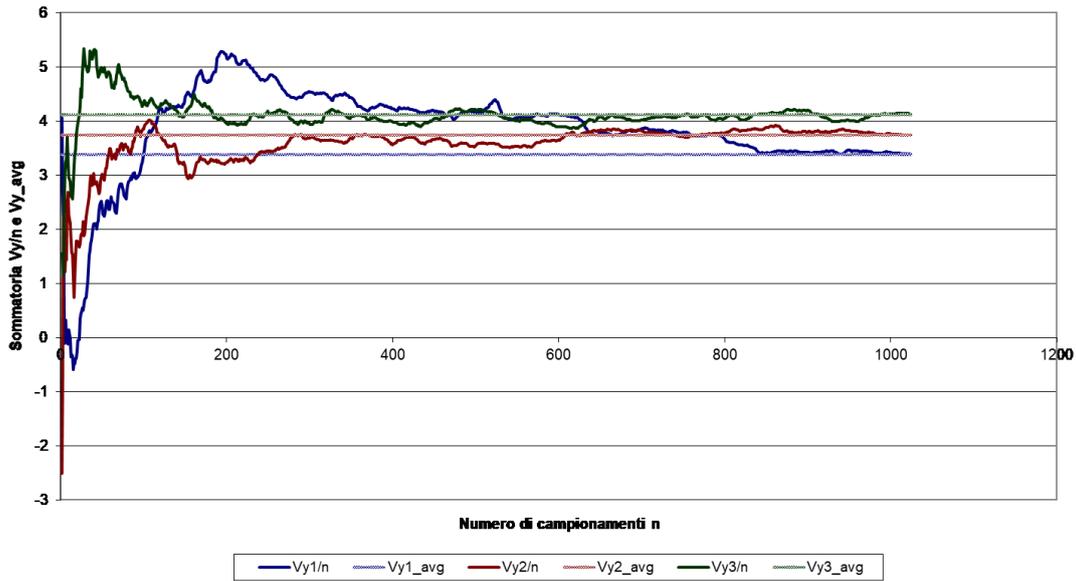


Grafico 7.2

Andamento della sommatoria Vy/n e Vy_avg con 1024 campionamenti a 20 Hz. In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s



Andamento della sommatoria Vy/n e Vy_avg con 7500 campionamenti a 25 Hz. In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

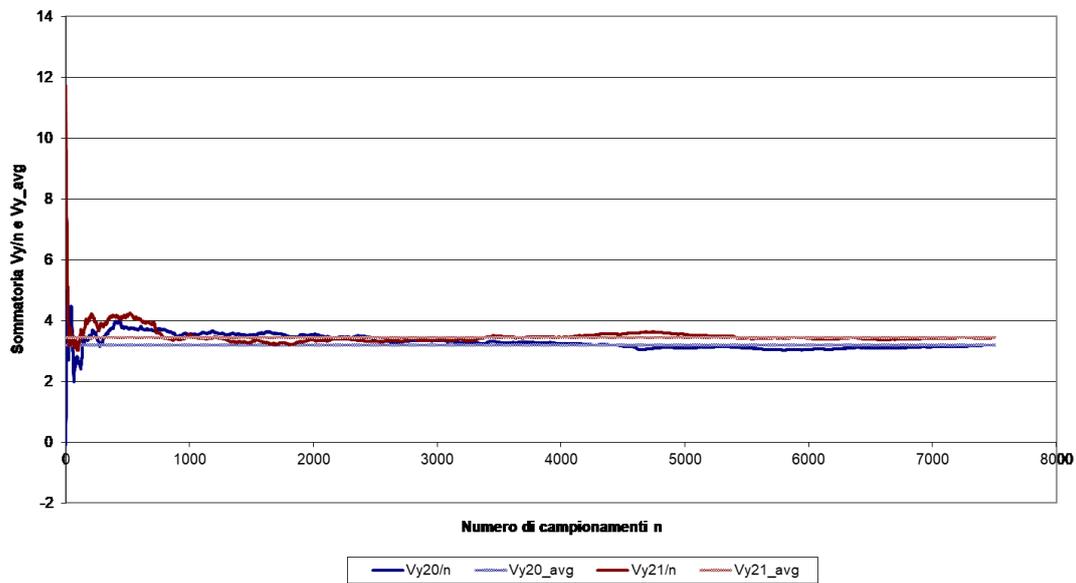


Grafico 7.3

Come si può notare, la convergenza al valore medio della componente di velocità, non è immediata, ma avviene in maniera più o meno accentuata a partire dai 600 ÷ 700 punti di acquisizione, e tende a stabilizzarsi, con un ragionevole margine di errore, dopo i 1000 campionamenti.

Nei grafici 7.4, 7.5 e 7.6, si riporta l'errore nella misurazione della velocità media, valutato come differenza, tra la media del valore della componente di velocità, misurata fino ad un certo punto, e la media della componente di velocità al punto successivo. Anche in questo caso si può notare come l'errore, nella valutazione della velocità media in un volume di misura, tende a ridursi all'aumentare del numero dei punti di misurazione per "burst" (Run).

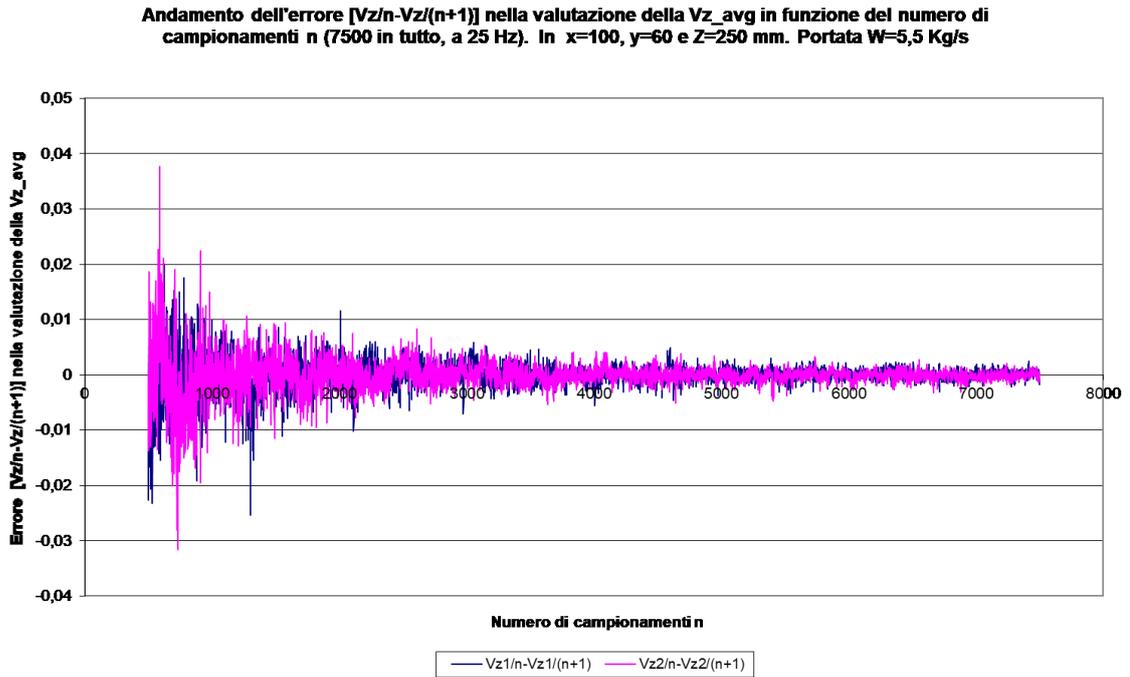


Grafico 7.4

Andamento dell'errore $[Vx/n-Vx/(n+1)]$ nella valutazione della Vx_avg in funzione del numero di campionamenti n (7500 in tutto, a 25 Hz). In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

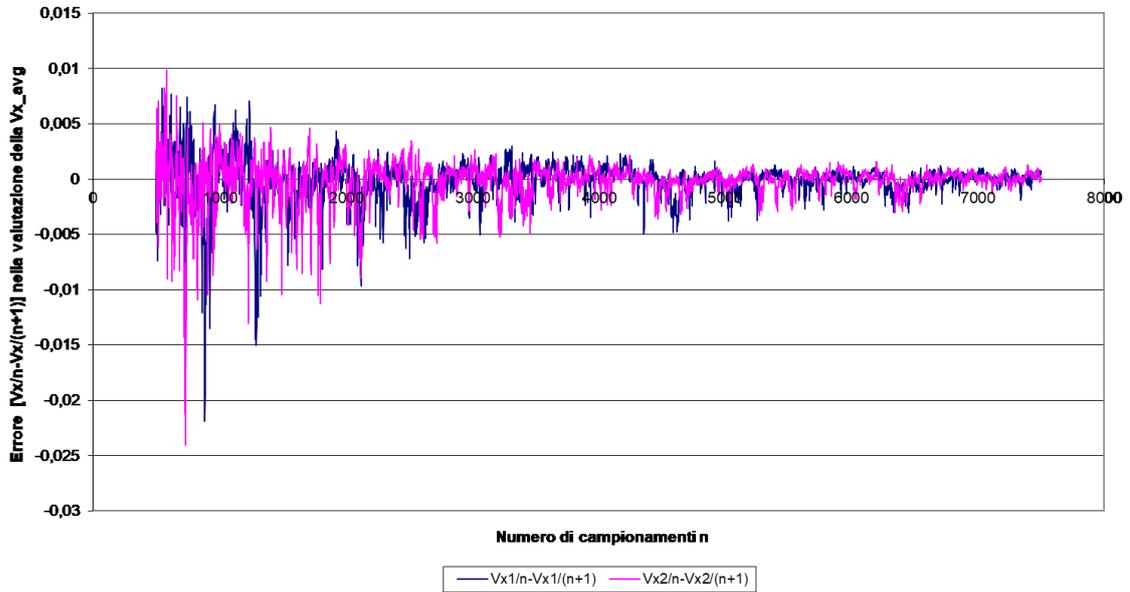


Grafico 7.5

Andamento dell'errore $[Vy/n-Vy/(n+1)]$ nella valutazione della Vy_avg in funzione del numero di campionamenti n (7500 in tutto, a 25 Hz). In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

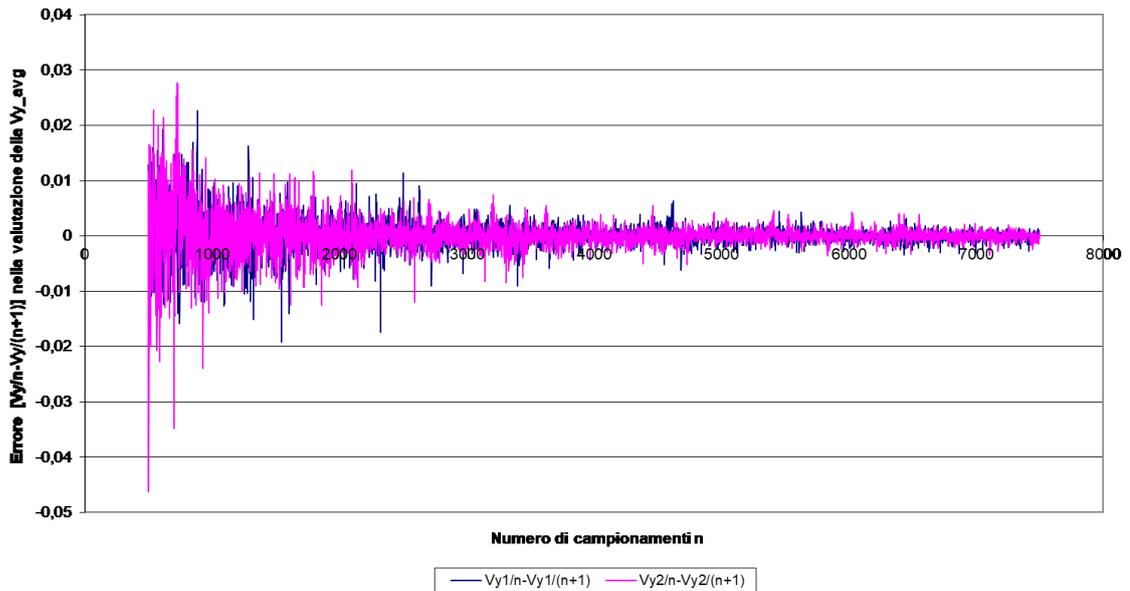


Grafico 7.6

Nei grafici 7.7, 7.8 e 7.9, si riporta invece lo scarto nella misurazione della velocità media su ciascun Run, valutato come somma tra l'errore, al variare del numero di punti di campionamento, ed il valore medio della componente di velocità sul Run stesso.

Questi grafici permettono di notare che il valore della velocità media in un volume di misura, cambia anche con il "burst" (Run) considerato, infatti nel corso delle campagne di misurazione, si verificano continue variazioni delle condizioni al contorno, quali lo sporco dell'acqua, l'aumento della temperatura, la presenza di bolle d'aria, l'abbassamento del battente liquido nel target.

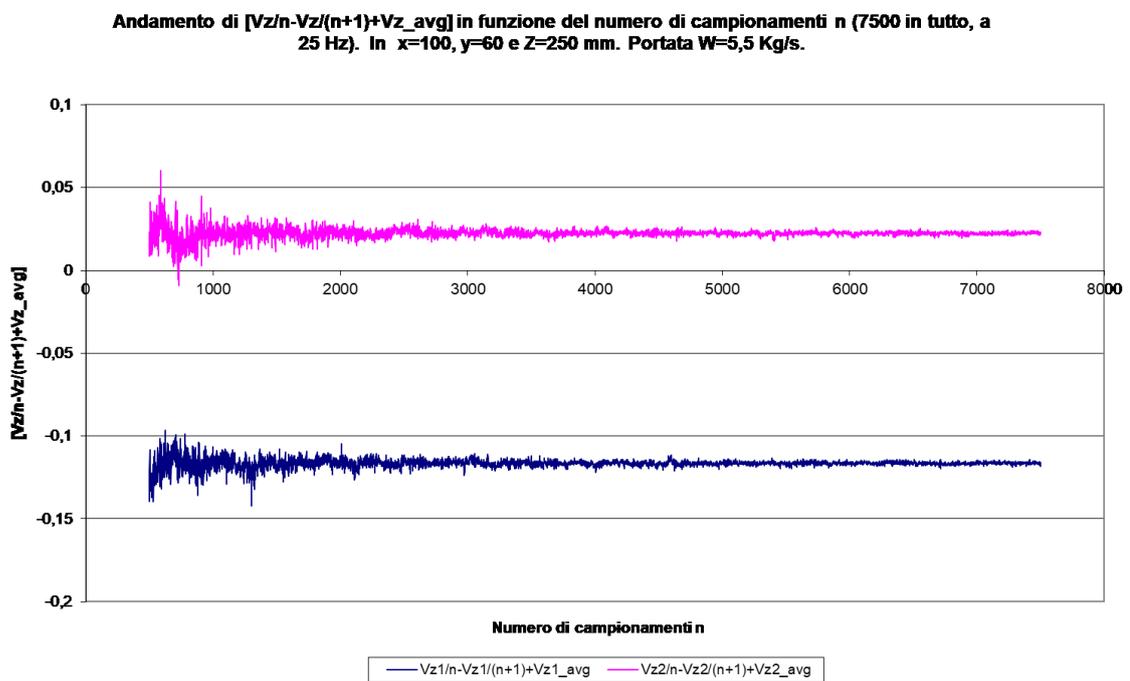


Grafico 7.7

Andamento di $[Vx/n-Vx/(n+1)+Vx_avg]$ in funzione del numero di campionamenti n (7500 in tutto, a 25 Hz). In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

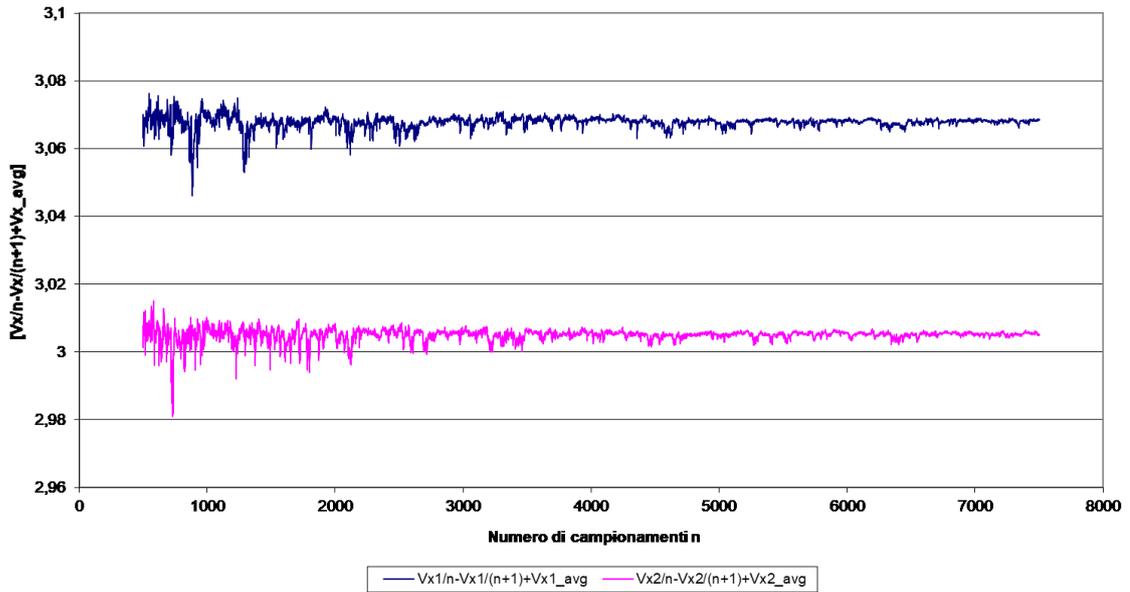


Grafico 7.8

Andamento di $[Vy/n-Vy/(n+1)+Vy_avg]$ in funzione del numero di campionamenti n (7500 in tutto, a 25 Hz). In $x=100, y=60$ e $Z=250$ mm. Portata $W=5,5$ Kg/s

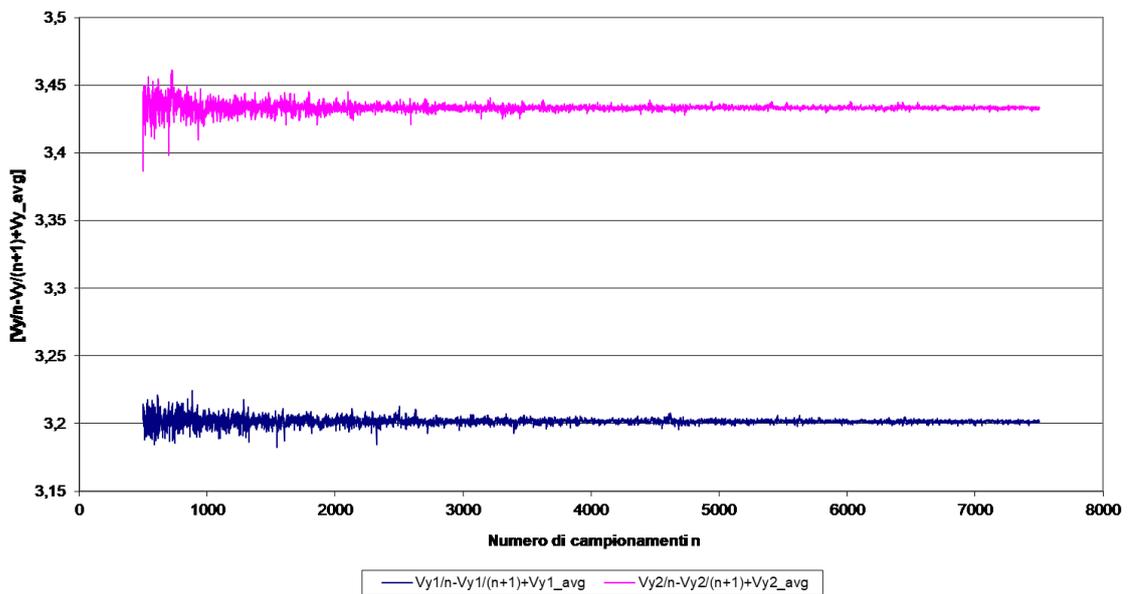


Grafico 7.9

8. SPERIMENTAZIONE SUL TARGET A “CANALE”

Con la nuova sezione di prova, del tipo a “canale”, realizzata presso i laboratori del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, si è provveduto prima a studiare i campi di velocità del fluido all’interno del target, sia nella configurazione con singolo inserto che in quella con doppio inserto sulla mandata e pareti laterali, per poi caratterizzare il profilo d’interfaccia del liquido nella configurazione con doppio inserto con luce di 120 mm e pareti laterali.

In particolare, con battente d’acqua iniziale fissato a 300 mm, si è valutato l’effetto della variazione della portata sulle modalità di deflusso e sul campo di velocità nel target.

La portata è stata fatta variare tra il minimo valore misurabile ed il massimo valore raggiungibile, con valvola di regolazione completamente aperta.

Di seguito verranno di volta in volta indicati i punti di misura all’interno del target, ed il sistema di riferimento adottato. L’origine è stata fissata in corrispondenza dell’asse del condotto di alimentazione della vasca all’intersezione col piano passante per il fondo della vasca stessa. L’asse x ha la stessa direzione del deflusso, e passa per l’origine e per gli assi dei condotti afferenti la vasca. L’asse y passa per l’origine sul condotto di alimentazione ed il suo verso positivo è sempre indicato nei disegni riportati nel seguito. L’asse z, ovvero la quota, è l’asse della tubazione di alimentazione della vasca.

I punti di misurazione della velocità sono stati scelti anche in funzione dell’ingombro della sonda stessa, tutt’altro che trascurabile, bisogna infatti ricordare che le misurazioni effettuate si riferiscono al volume di controllo all’interno del target e non alla posizione fisica della sonda.

Occorre inoltre considerare che per acquisire i dati in maniera corretta, la sonda deve rimanere completamente immersa nell’acqua durante il campionamento, e pertanto visto che il battente di liquido in quiete è stato fissato a 300 mm, la quota massima raggiunta dalla sonda durante le misurazioni è pari a 250 mm.

Visto l’ingombro degli inserti che impedivano di posizionare liberamente la sonda, si sono concentrate le misure di velocità sulla mezzaria della vasca, piano x-z con $y = 0$, e si sono fatte variare sia la x che la z con passo di 50 mm.

Di particolare interesse risultano infatti i profili di velocità nel piano x-z passante per la mezzaria del target, ovvero nella direzione dominante del deflusso.

La tipica conduzione di una prova ha richiesto una precisa sequenza di operazioni:

- Accensione dei due computer necessari all'acquisizione dei dati (uno per la portata fornita dal venturimetro tramite il trasduttore di pressione ad esso collegato, e l'altro per i dati provenienti dalla sonda ADV per la misura delle velocità), ed impostazione del nome del file su cui registrarli.
- Posizionamento della sonda, nel punto di misurazione prescelto, con acqua in quiete, ed attivazione della stessa. Questa operazione è necessaria in quanto all'accensione la sonda rileva automaticamente la distanza dalle pareti del target, e la sua posizione non può essere modificata, a meno di dover far ripartire l'acquisizione nella nuova posizione. Per questo motivo tutti i file di seguito riportati hanno un run 0, caratterizzato da velocità praticamente nulle.
- Accensione della pompa, e settaggio della portata prescelta per le misurazioni, mediante manovra sulla valvola di regolazione. Contestuale apertura dell'alimentazione dello scambiatore di calore, per mantenere la temperatura dell'acqua nel circuito sempre intorno ai valori di quella della rete.
- Attesa di un paio di minuti dopo l'accensione della pompa, prima di far partire le acquisizioni, per permettere al flusso d'acqua nel target di stabilizzarsi. In realtà, il tempo d'attesa dipende fortemente dalla portata che si deve far circolare, infatti quanto più alta è la portata, tanto più tempo bisogna attendere prima di cominciare l'acquisizione.
- Avvio delle misure di portata e velocità, con la maggiore contemporaneità possibile, al fine di avere la massima corrispondenza tra la portata misurata e le componenti di velocità rilevate.
- Acquisizione di 100 valori di portata e di 1024 campionamenti di velocità per ciascun run, nel punto di misurazione prescelto.
- Annotazione dei fenomeni visibili ad occhio nudo, per la caratterizzazione del profilo dell'acqua all'interfaccia con l'aria, e dei parametri misurati in tempo reale dalla sonda, quali le componenti istantanee delle velocità, il fattore di correlazione, ed il rapporto segnale/rumore, che permettono di avere un'idea immediata sulla bontà dei dati misurati.
- Spostamento della sonda ADV nel nuovo punto di misurazione, ed esecuzione di un nuovo ciclo di prove.

I risultati delle misurazioni effettuate sono riportati nelle tabelle, estratte dai file .xls utilizzati per l'elaborazione dei dati acquisiti, e riportate nel seguito.

In esse si può notare come in ciascun run siano riportati i valori dei seguenti parametri:

- Portata in kg/s, ricavata dalla media di 100 campionamenti, e convertita dalla misurazione in volt mediante la seguente formula:

$$\text{Portata in kg/s} = (\text{Valore di portata in Volt} - 0.99) \times 25 / 4.$$

- Posizione del volume di misura (x, y, z) in mm, nel sistema di riferimento indicato.
- Media su 1024 campionamenti delle singole componenti di velocità (Vx, Vy, Vz) in cm/s, nel sistema di riferimento indicato.
- Media su 1024 campionamenti del modulo delle velocità istantanee.

Nelle tabelle si riportano anche dei parametri utili all'analisi dei campi di velocità rilevati dalla sonda ADV:

- Il valore medio della portata (kg/s) su tutte le misurazioni effettuate in un file di acquisizione, in quanto eseguite sempre a portata costante, e variando solo la posizione del punto di misura.

- La velocità media dell'acqua (cm/s) nel condotto di ingresso alla vasca, alla portata media:

$$v = W / (\rho \times A), \text{ dove } W \text{ è la portata in kg/s, } \rho \text{ è la densità dell'acqua pari a } 1000 \text{ kg/mc, ed } A \text{ è la sezione del condotto di alimentazione (diametro interno } 215 \text{ mm) pari a } 0.0363 \text{ mq } (\pi \times d^2 / 4).$$

- La velocità media dell'acqua (cm/s) all'uscita del setto di immissione alla vasca (largo 120 mm) con battente d'acqua fissato a 300 mm, alla portata media:

$$v = W / (\rho \times L \times H), \text{ dove } W \text{ è la portata in kg/s, } \rho \text{ è la densità dell'acqua pari a } 1000 \text{ kg/mc, } L \text{ è la larghezza della finestra del setto di alimentazione pari a } 120 \text{ mm, ed } H \text{ l'altezza del battente d'acqua durante il deflusso, fissato a } 300 \text{ mm, sebbene si può intuire come all'aumentare della portata aumenti anche l'altezza della finestra interessata dal deflusso orizzontale dell'acqua.}$$

8.1. CAMPI DI VELOCITA' TARGET CON SINGOLO INSERTO

In una prima campagna di misurazioni si sono effettuate delle rilevazioni delle componenti di velocità all'interno del target a "canale", nella configurazione con singolo inserto sulla condotta di alimentazione della vasca, con finestra larga 120 mm.

In questa sessione di prove, fissato il battente d'acqua con fluido in quiete a 300 mm, si sono svolte le acquisizioni dei campi di velocità all'interno del target con l'ausilio della sonda ADV, con portata fissata a circa 5.4 kg/s.

Le misurazioni si sono prima concentrate nel piano x-z con $y = 0$ (piano passante per la mezzaria della vasca), x compreso tra -50 mm e +250 mm, z compreso tra 50 mm e 250 mm (passo lungo gli assi x e z di 50 mm).

Per poi dedicarsi ai piani x-z con $y = +/- 60$ mm (piani passanti per le pareti della finestra), x compreso tra 100 mm e 250 mm, z compreso tra 50 mm e 250 mm (passo lungo gli assi x e z di 50 mm).

Nella figura 8.1.1 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090903 (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090903.xls, di cui, nella tabella 8.1.1, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 2 al Run 8 (i Run 0 ed 1 non sono stati elaborati, in quanto utilizzati per settare gli strumenti di misura).

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

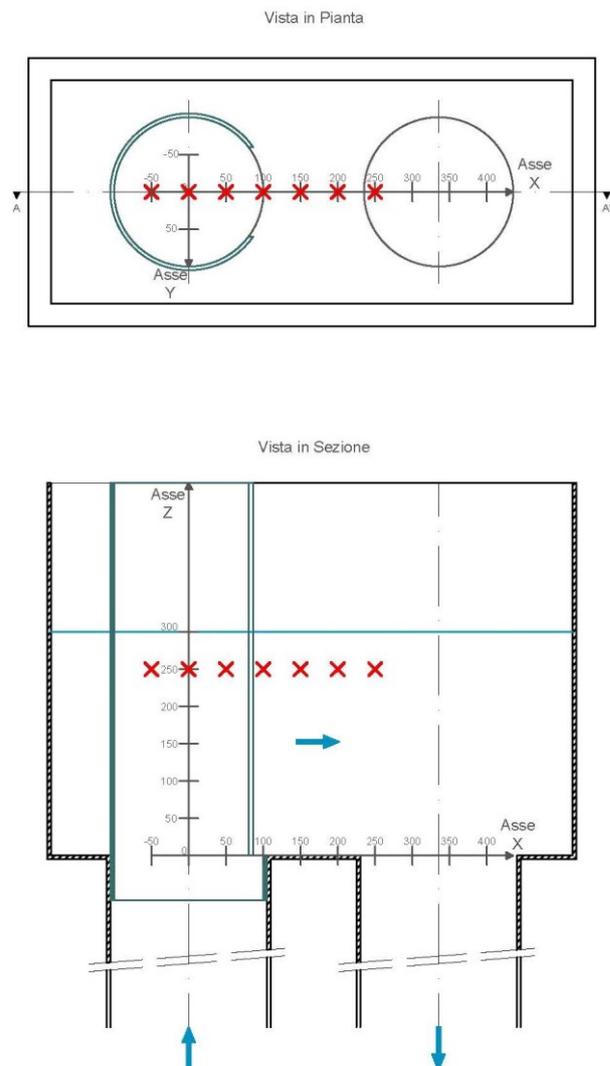


Figura 8.1.1

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $z = 250$ mm ed x variabile da -50 mm a $+250$ mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.4 kg/s.

File P090903 - Run da 2 a 8

Run	Portata (kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,035608125	-50	0	250	-0,616748047	-1,432597656	-1,01776367	7,209246831
1	5,37911875	-50	0	250	7,447011719	-1,182246094	2,517324219	10,987319
2	5,36849375	-50	0	250	9,106835938	-0,867695312	2,999082031	12,28739722
3	5,3810375	0	0	250	9,293046875	0,958300781	6,853994141	14,11515596
4	5,37180625	50	0	250	9,063476563	-1,834384766	11,18825195	17,19354123
5	5,3471875	100	0	250	9,494746094	-0,393398438	17,31984375	21,93369086
6	5,3339375	150	0	250	10,00166992	-4,244306641	17,5449707	23,49094755
7	5,36426875	200	0	250	5,647910156	-0,393808594	16,75265625	20,78372072
8	5,34545625	250	0	250	1,360185547	3,270947266	15,58533203	19,74294753
		Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
		5,36 (kg/s)		14,78 (cm/s)			14,89888021 (cm/s)	

Tabella 8.1.1

**Componenti della velocità in $y=0$, $Z=250$ mm, ed x variabile tra -50 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,4$ Kg/s. File P090903. Run da 2 a 8.**

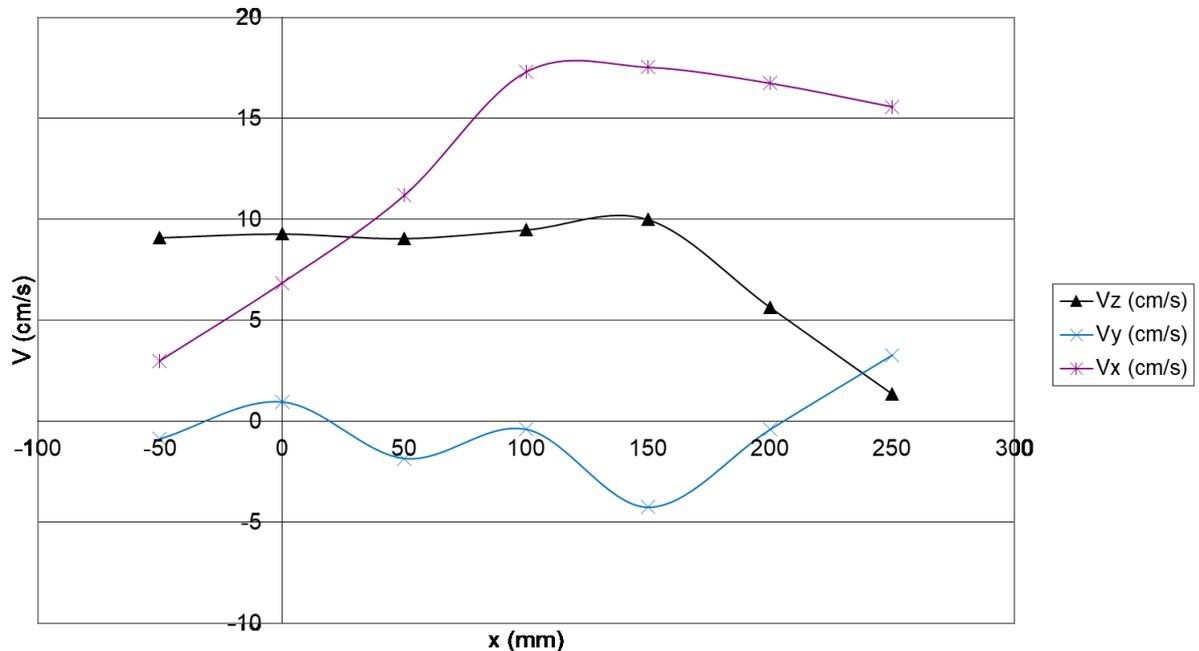


Grafico 8.1.1

Nella figura 8.1.2 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090903 (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090903.xls, di cui, nella tabella 8.1.2, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 9 al Run 15.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $z = 200$ mm ed x variabile da -50 mm a

+250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.4 kg/s.

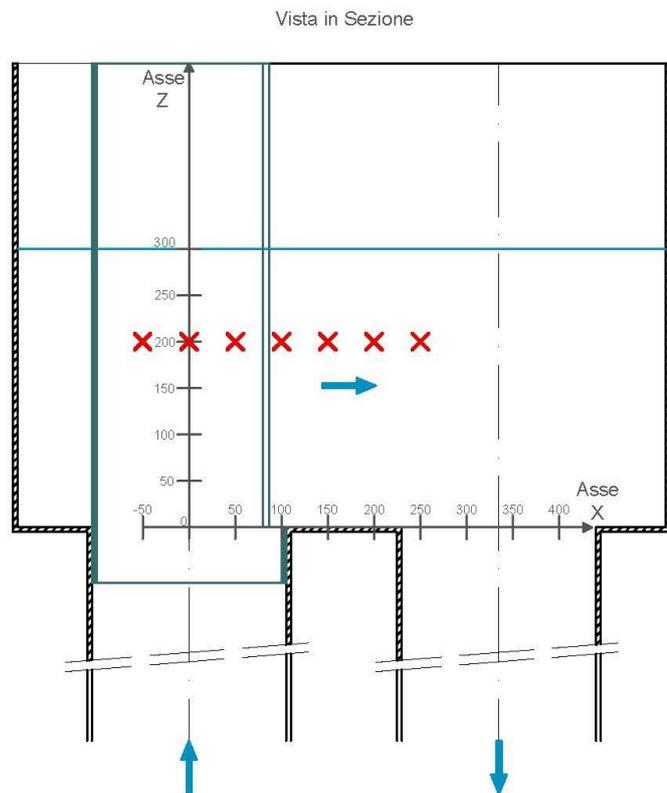
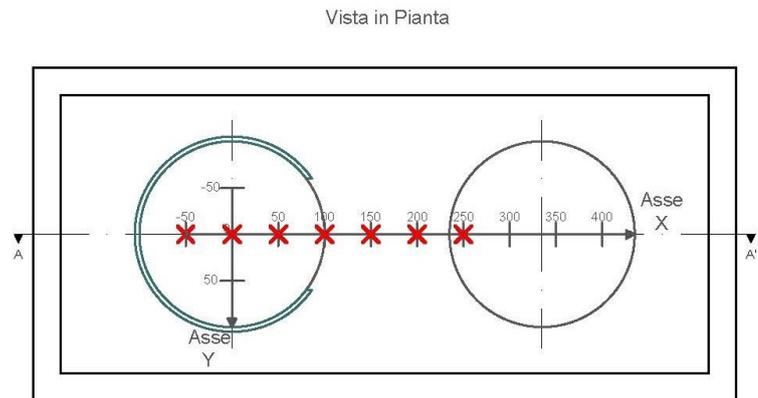


Figura 8.1.2

File P090903 - Run da 9 a 15

Run	Portata (kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
15	5,37911875	-50	0	200	10,60947266	1,31375	1,990947266	13,89137184
14	5,36849375	0	0	200	12,39649414	1,158798828	4,982148437	15,98302948
13	5,3810375	50	0	200	11,71050781	-1,491806641	9,329003906	17,97221213
12	5,37180625	100	0	200	10,44025391	-1,478378906	14,17642578	20,85773484
11	5,3471875	150	0	200	8,671679688	-0,403476563	17,00786133	22,75172948
10	5,3339375	200	0	200	11,10599609	2,086386719	14,20860352	21,30221926
9	5,36426875	250	0	200	5,418740234	5,169970703	14,12303711	19,57549621
		Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
		5,4 (kg/s)		15,49 (cm/s)			14,89914683 (cm/s)	

Tabella 8.1.2

**Componenti della velocità in y=0, Z=200 mm, ed x variabile tra -50 mm e 250 mm.
 Portata W=5,4 Kg/s. File P090903. Run da 9 a 15.**

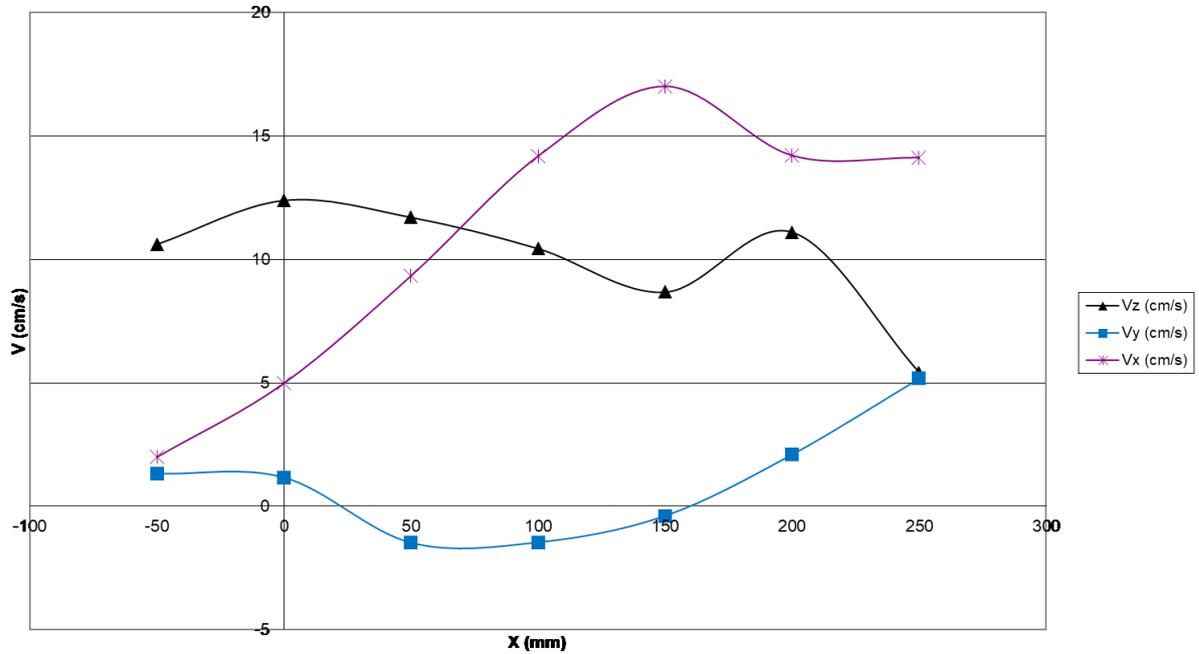


Grafico 8.1.2

Nella figura 8.1.3 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P110903 (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P110903.xls, di cui, nella tabella 8.1.3, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 2 al Run 8.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato

in figura, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $z = 150$ mm ed x variabile da -50 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

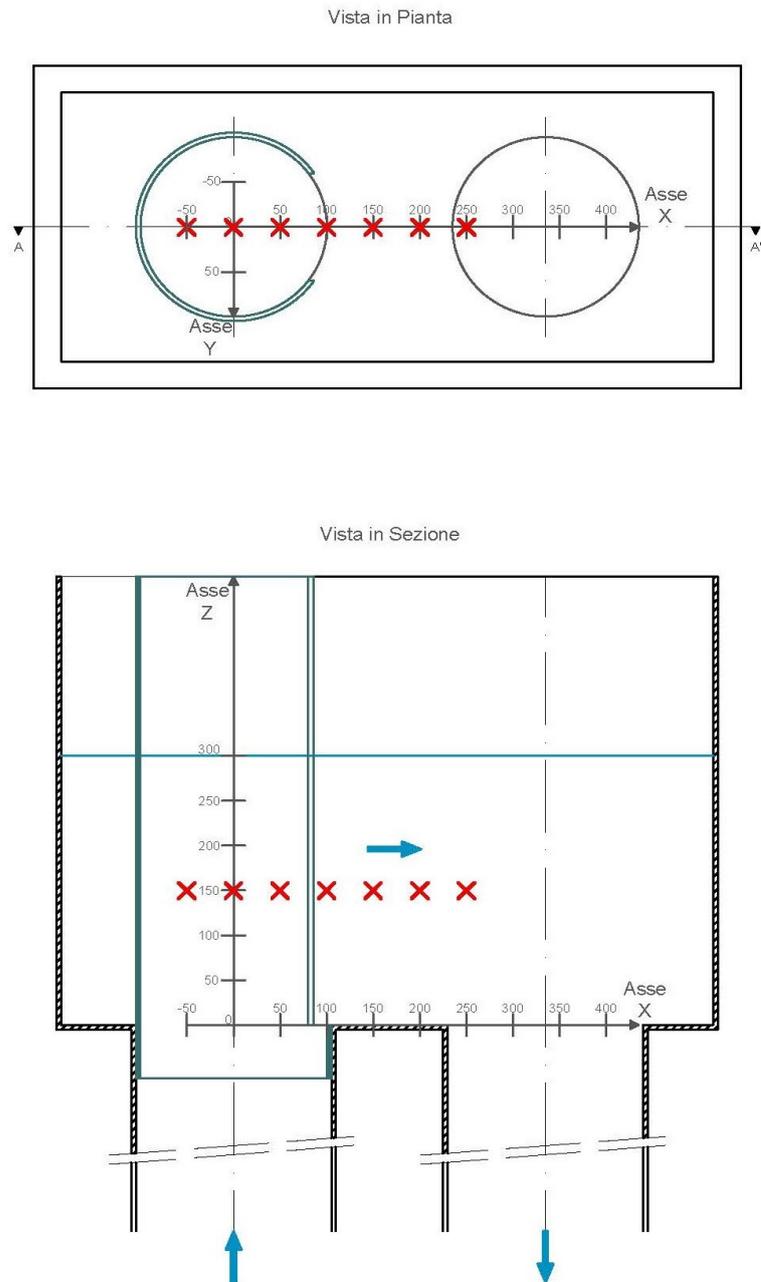


Figura 8.1.3

File P110903 - Run da 2 a 8

Run	Portata (kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,03454625	-50	0	150	4,684296875	-9,773583984	-1,691445313	16,92183279
1	5,53649375	-50	0	150	10,62911133	0,007646484	1,663144531	15,17401074
2	5,4689375	-50	0	150	12,17459961	3,35578125	2,012226563	16,56321939
3	5,51116875	0	0	150	13,06293945	2,681953125	3,395761719	16,88545586
4	5,486728125	50	0	150	10,55013672	0,031220703	7,473476563	17,36237081
5	5,473159375	100	0	150	8,838720703	-1,674492188	14,21597656	21,01257277
6	5,4938875	150	0	150	0,295693359	-0,505488281	15,77523438	20,70330945
7	5,50589375	200	0	150	5,39234375	-5,75390625	14,37448242	21,68362085
8	5,52125625	250	0	150	0,727011719	9,976181641	12,10366211	21,58433849
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,50 (kg/s)					15,16 (cm/s)		15,2769184	

Tabella 8.1.3

**Componenti della velocità in y=0, Z=150 mm, ed x variabile tra -50 mm e 250 mm.
 Portata W=5,5 Kg/s. File P110903. Run da 2 a 8.**

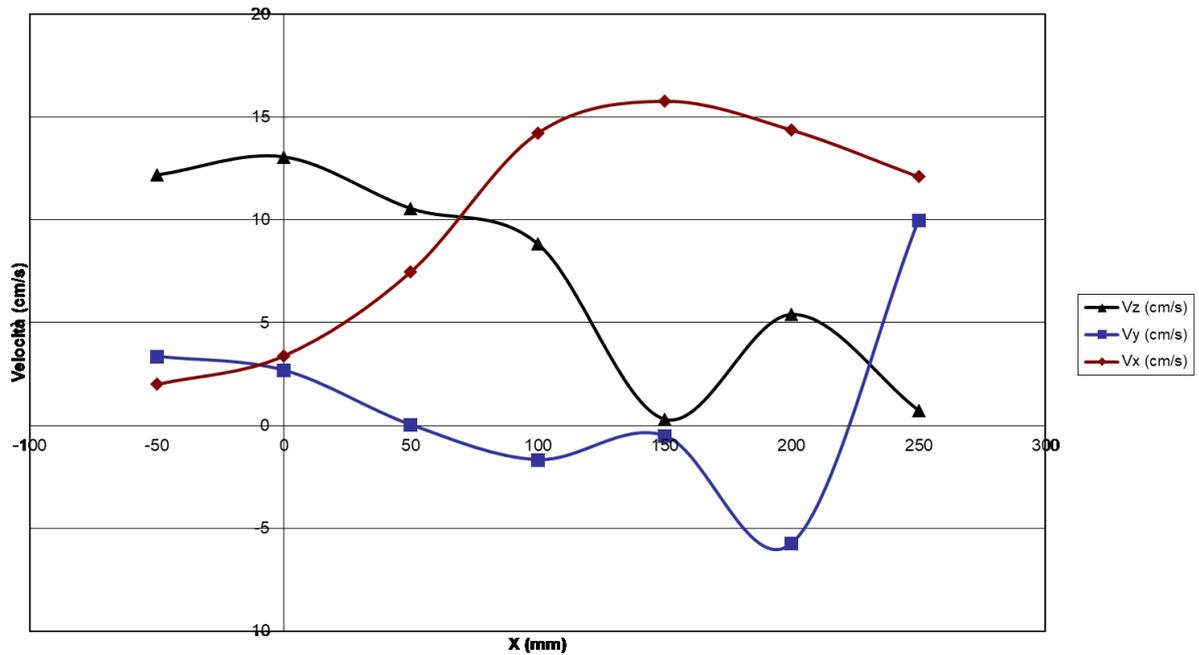


Grafico 8.1.3

Nella figura 8.1.4 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P110903B (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P110903B.xls, di cui, nella tabella 8.1.4, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 7.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $z = 100$

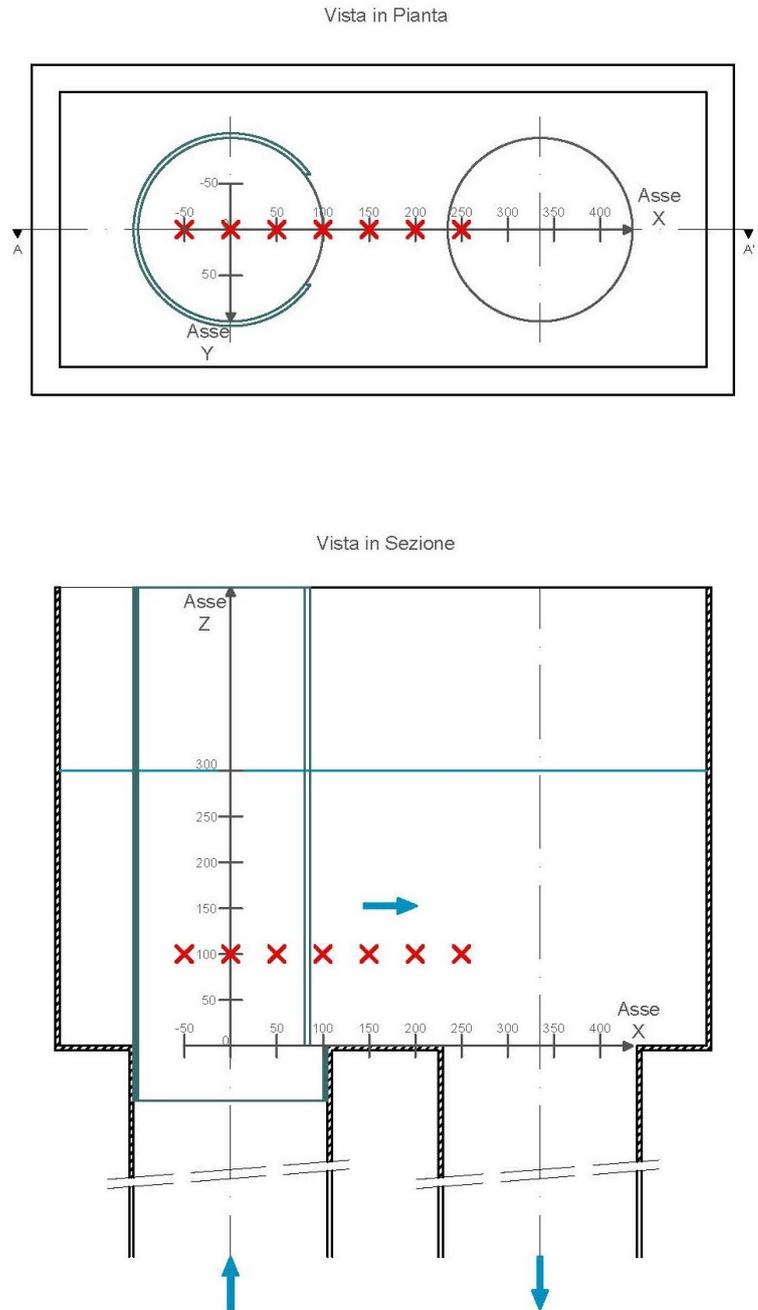


Figura 8.1.4

mm ed x variabile da -50 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

File P110903B - Run da 1 a 7

Run	Portata (kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg		Avg	Media modulo velocità (cm/s)
					Vz (cm/s)	Vy (cm/s)	Vx (cm/s)	
0	5,48525	-50	0	100	11,17210938	3,374316406	0,740966797	16,42870655
1	5,4856875	-50	0	100	15,98772461	4,078261719	0,943876953	19,73783287
2	5,483834375	0	0	100	12,28975586	0,666396484	2,172792969	17,42751399
3	5,500659375	50	0	100	10,18160156	-0,514980469	6,387294922	16,50293054
4	5,4804125	100	0	100	7,92609375	-1,908945313	12,3827832	19,51686865
5	5,479896875	150	0	100	6,420732422	-5,818291016	12,44113281	19,25863392
6	5,48685625	200	0	100	4,009179688	-0,209902344	8,148828125	14,85668205
7	5,45996875	250	0	100	4,462783203	-5,586074219	5,879853516	16,15715769
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)		
5,48 (kg/s)				15,11 (cm/s)		15,2290935 (cm/s)		

Tabella 8.1.4

**Componenti della velocità in y=0, Z=100 mm, ed x variabile tra -50 mm e 250 mm.
 Portata W=5,5 Kg/s. File P090903B. Run da 1 a 7.**

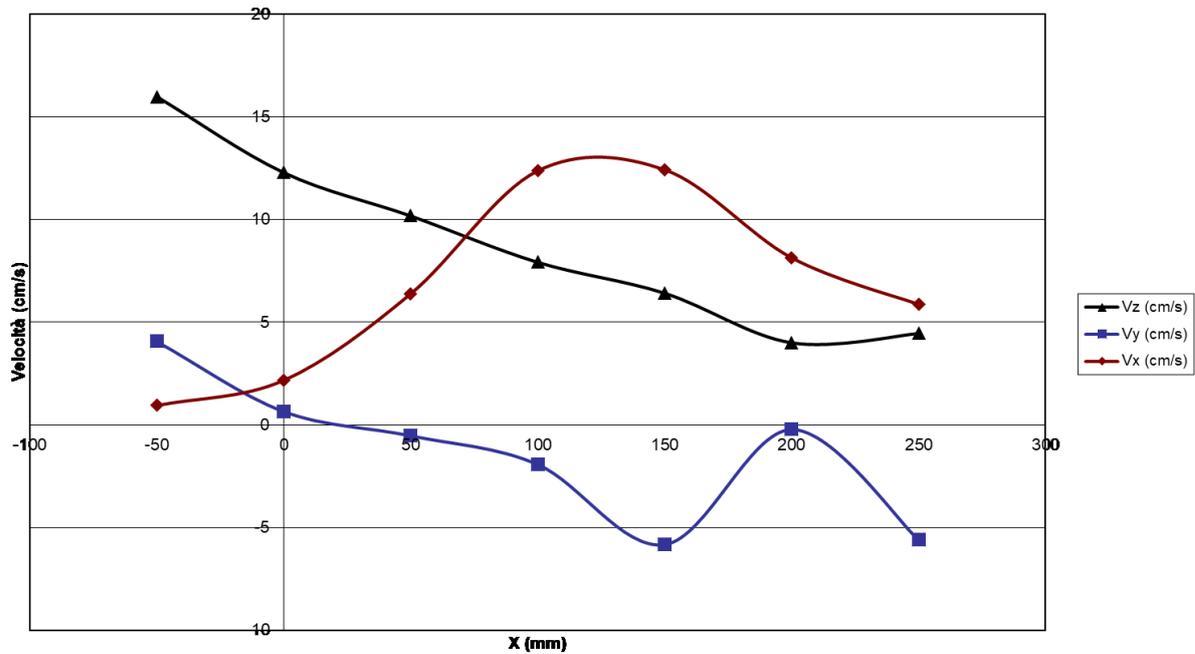


Grafico 8.1.4

Nella figura 8.1.5 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P110903C (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P110903C.xls, di cui, nella tabella 8.1.5, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 9.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $z = 50$ mm

ed x variabile da -50 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

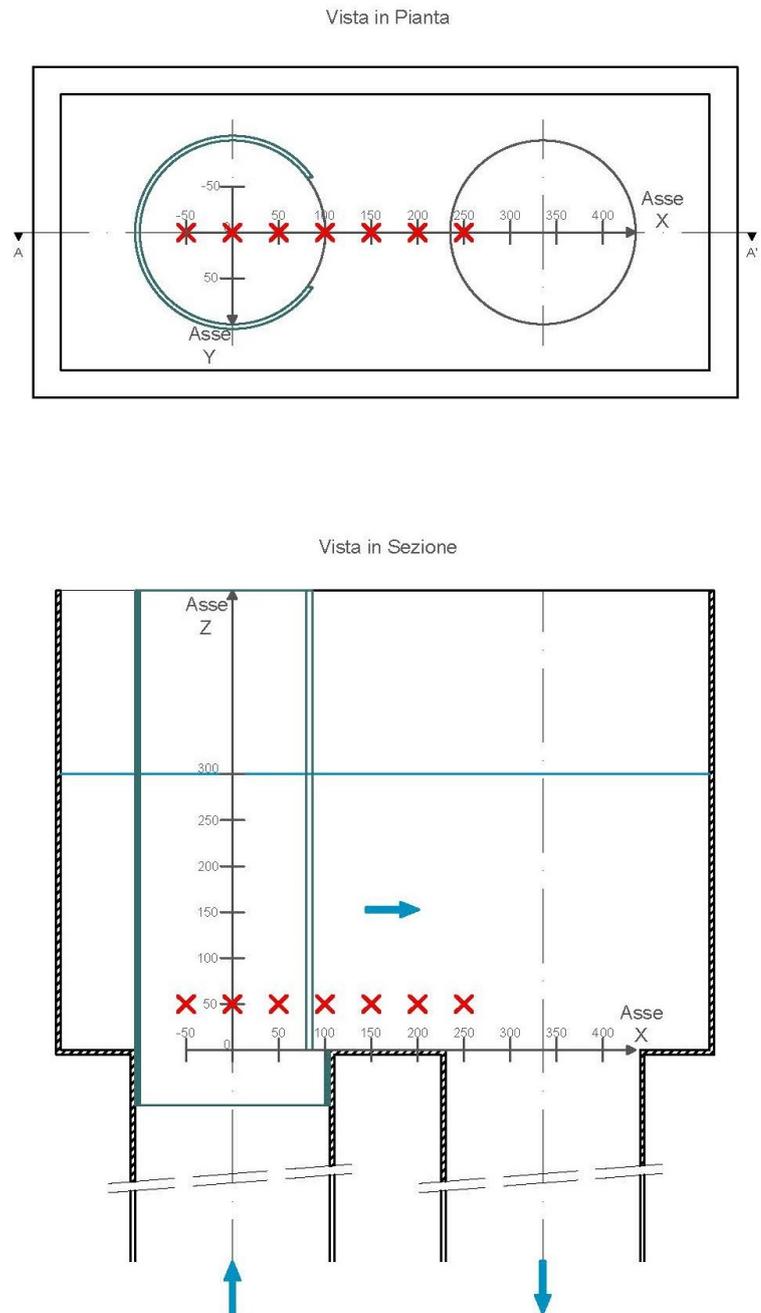


Figura 8.1.5

File P110903C - Run da 1 a 9

Run	Portata (Kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	5,493290625	-50	0	50	14,66170898	1,059902344	0,087197266	19,10410692
1	5,47233125	-50	0	50	17,22513672	4,789726563	0,053691406	21,2773016
2	5,4807875	0	0	50	16,76948242	2,424755859	0,644990234	20,5875336
3	5,462309375	50	0	50	15,60891602	-1,349248047	4,201298828	20,10096998
4	5,461065625	100	0	50	12,03928711	-10,61969727	10,36709961	22,25894025
5	5,497146875	100	0	50	11,23387695	-6,597880859	7,910214844	20,00115071
6	5,476478125	150	0	50	8,475068359	-0,321054688	-1,132539063	19,89284487
7	5,4902375	200	0	50	-13,82745117	-17,61729492	5,234169922	30,70029378
8	5,4537875	200	0	50	-0,028613281	6,070107422	0,934941406	18,08418733
9	5,47085	250	0	50	-13,68338867	0,78	-3,070234375	27,74774565
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,47 (kg/s)					15,09 (cm/s)		15,20524498 (cm/s)	

Tabella 8.1.5

**Componenti della velocità in y=0, Z=50 mm, ed x variabile tra -50 mm e 250 mm.
 Portata W=5,5 Kg/s. File P110903C. Run da 1 a 9.**

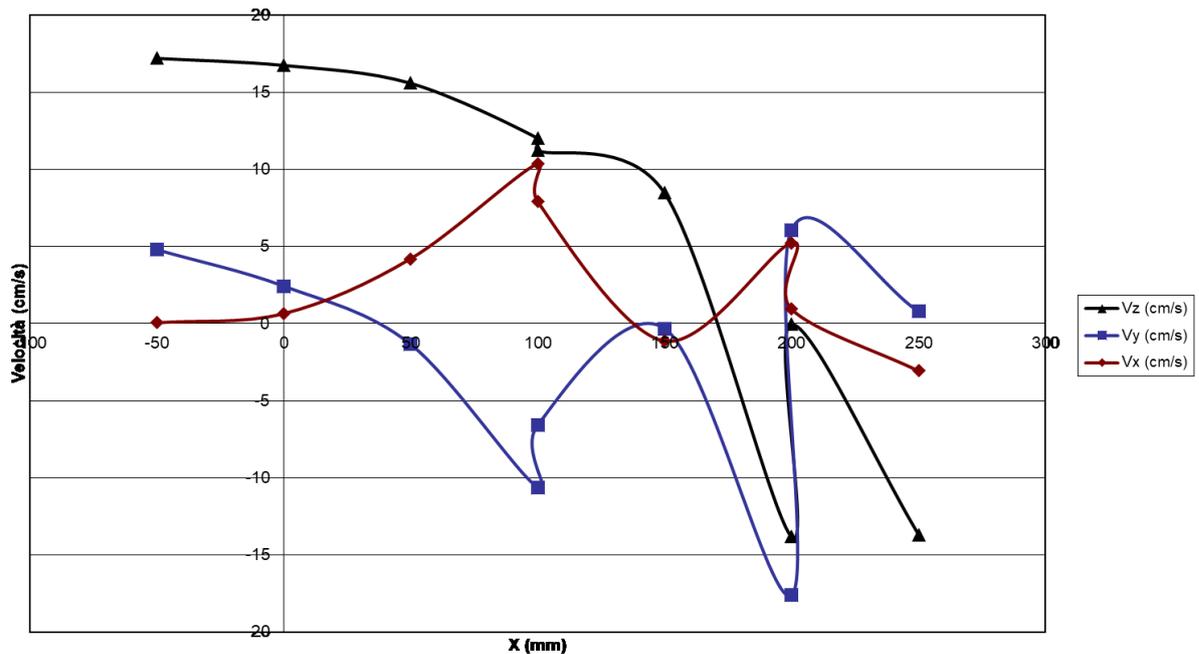


Grafico 8.1.5

Le componenti di velocità sopra riportate, sono state combinate in forma tabellare nei file W5y0.xls, W5y0c.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy0.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = 0$.

Nella figura 8.1.6 si riporta la vista in pianta della vasca, con singolo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target ($y = 0$ mm, z variabile da 50 mm a 250 mm ed x variabile da -50 mm a +250 mm), ed il sistema di riferimento adottato.

Mentre in figura 8.1.7 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = 0$, con portata fissata in 5.4 kg/s, (elaborati nel file Matlab vel2dy0.m).

Punti di misura nella Vista in Pianta.
Configurazione con singolo inserto con luce 120 mm.

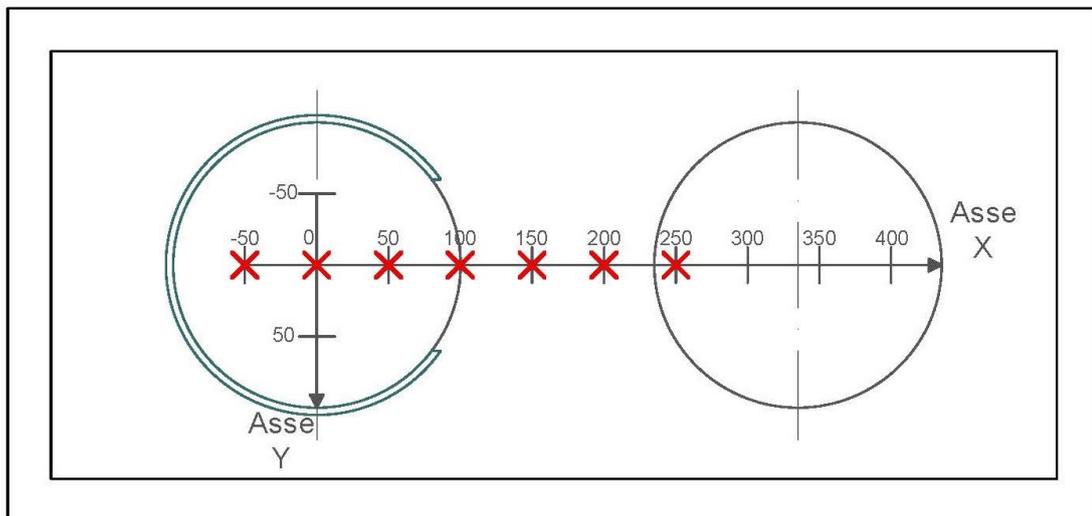


Figura 8.1.6

Vettori velocità nel Piano X-Z con $Y=0$. Portata 5.4 kg/s.

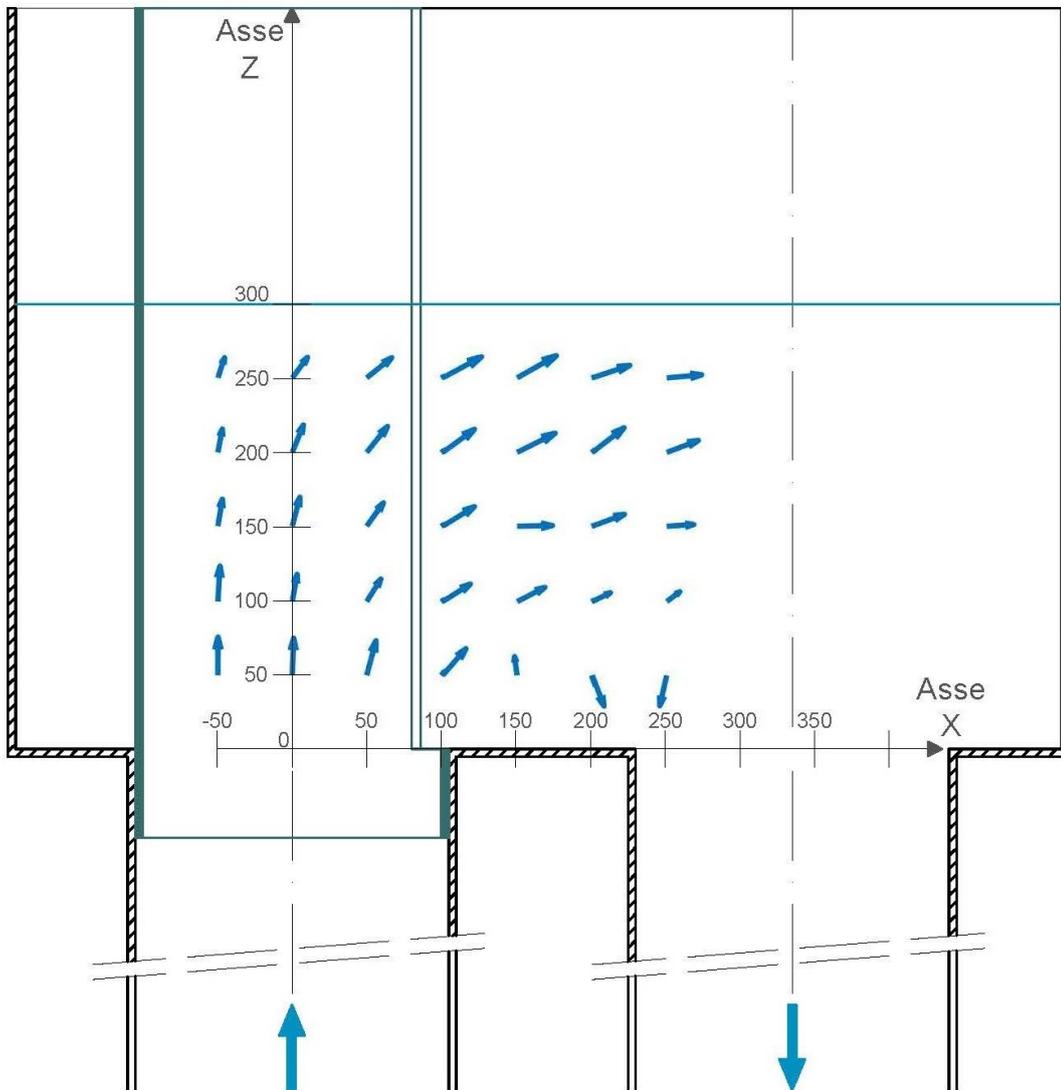


Figura 8.1.7

Nella figura 8.1.8 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P150903 (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P150903.xls, di cui, nella tabella 8.1.6, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 8.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 60$ e -60 mm, $z =$

250 mm ed x variabile da 100 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

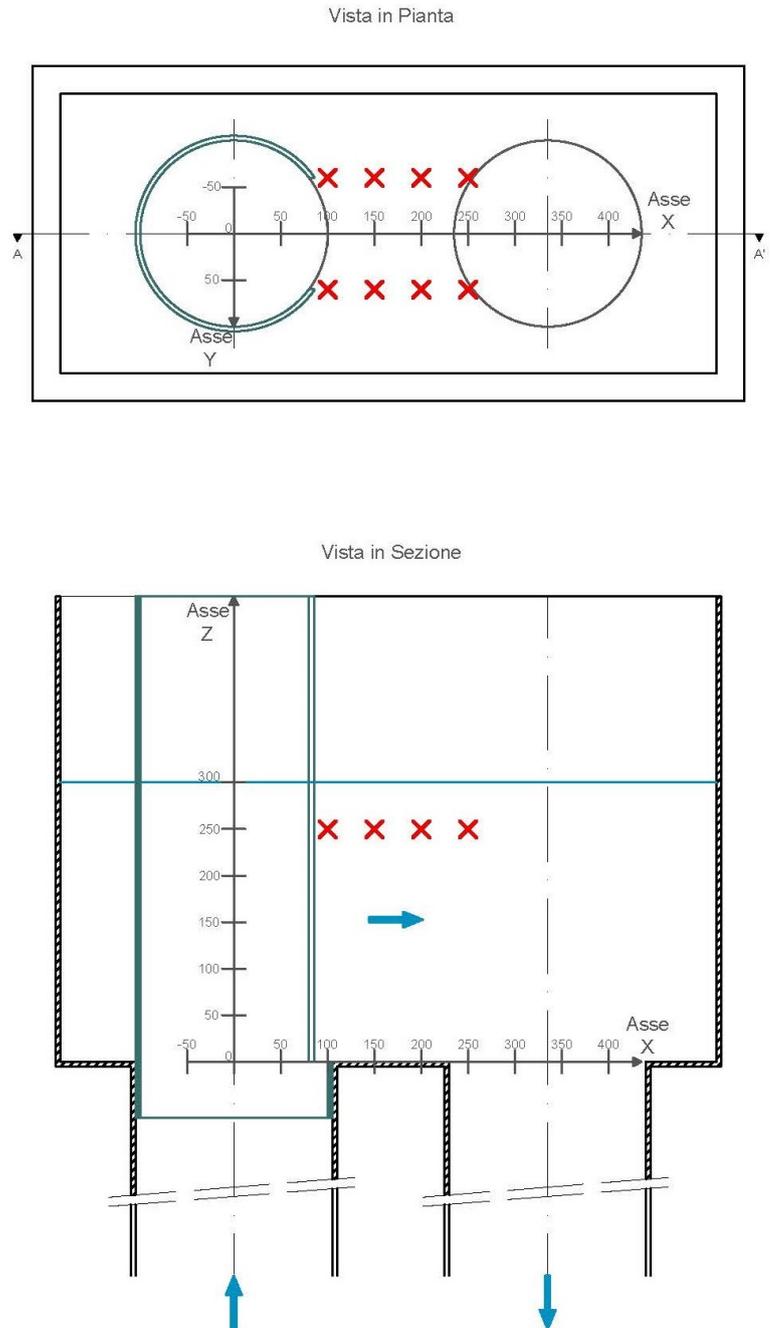


Figura 8.1.8

File P150903 - Run da 1 a 8

Run	Portata (Kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,061904063	100	60	250	-6,750546875	-13,14010742	0,905048828	20,35031831
1	5,461265625	100	60	250	0,301992188	-0,616386719	1,542363281	8,884662187
2	5,47925625	150	60	250	-2,551669922	-2,426054688	1,663710938	9,529165
3	5,478146875	200	60	250	0,341552734	3,212070313	1,620869141	10,22426933
4	5,483009375	250	60	250	0,502949219	0,909267578	2,170488281	9,206351307
5	5,47221875	100	-60	250	0,342324219	0,629296875	0,397792969	8,695426851
6	5,43688125	150	-60	250	0,532451172	-0,156337891	1,609042969	8,395349892
7	5,47081875	200	-60	250	-2,855761719	1,331435547	1,838388672	16,11387321
8	5,4698375	250	-60	250	0,422363281	-0,441044922	1,740078125	9,715069984
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,47 (Kg/s)					15,07 (cm/s)		15,19147027 (cm/s)	

Tabella 8.1.6

**Componenti della velocità in y=60 mm, Z=250 mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata W=5,5 Kg/s. File P150903. Run da 1 a 4.**

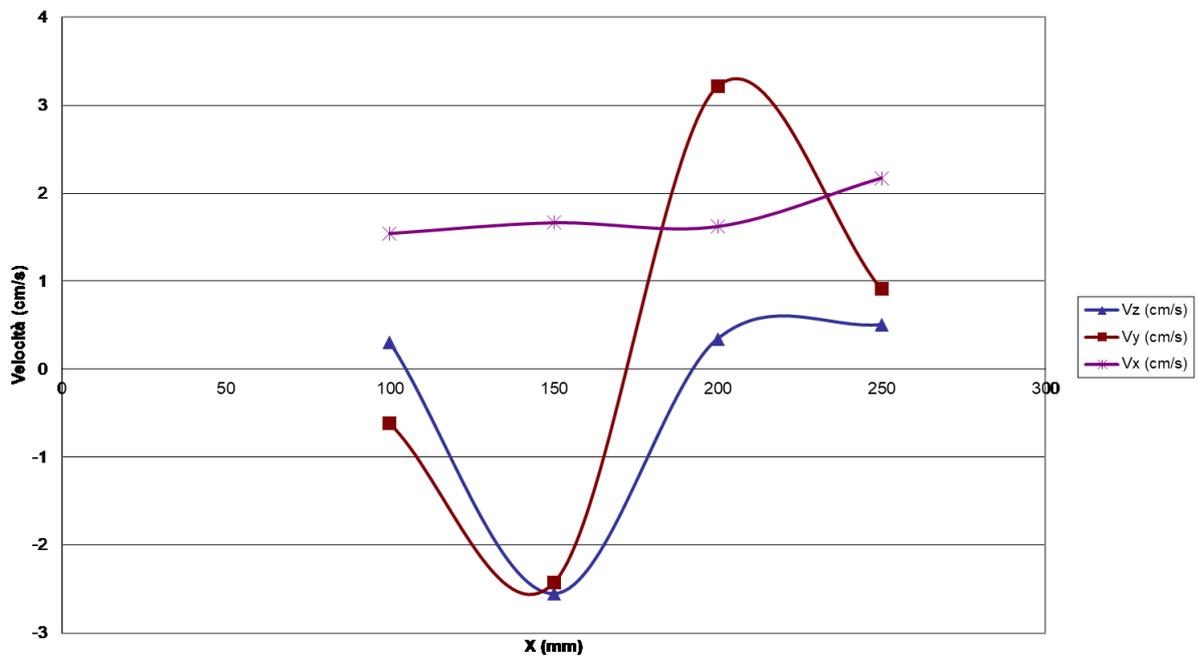


Grafico 8.1.6

Componenti della velocità in $y=60$ mm, $Z=250$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,5$ Kg/s. File P150903. Run da 5 a 8.

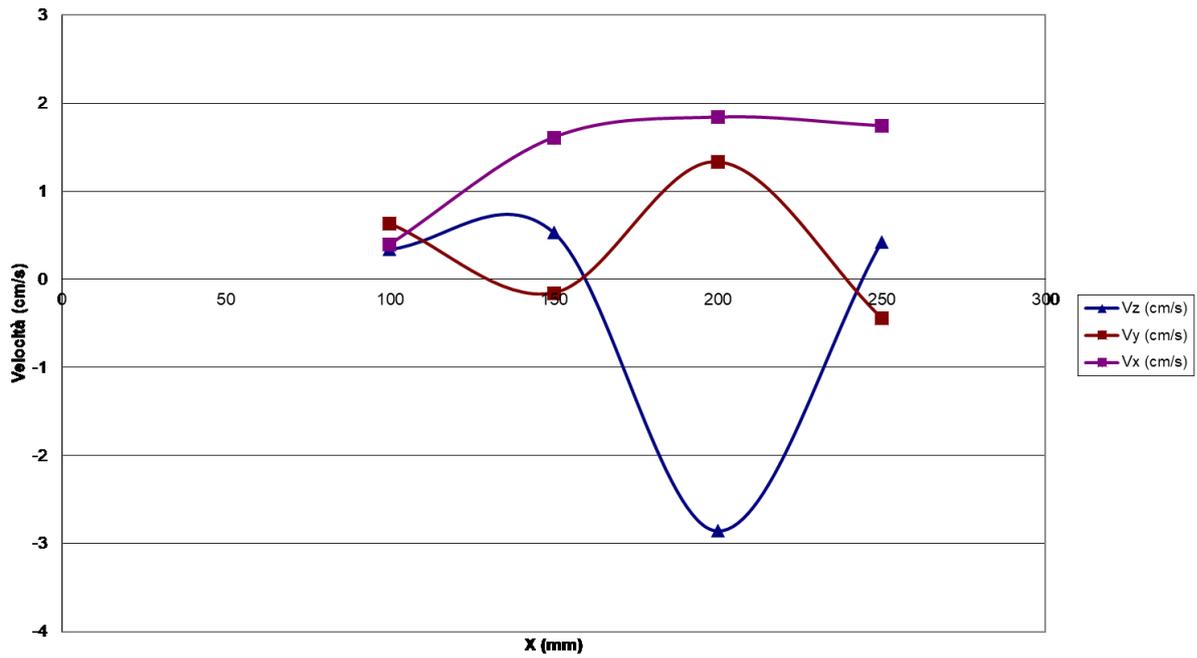


Grafico 8.1.7

Componenti della velocità in $y=60$ e -60 mm, $Z=250$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,5$ Kg/s. File P150903. Run da 1 a 8.

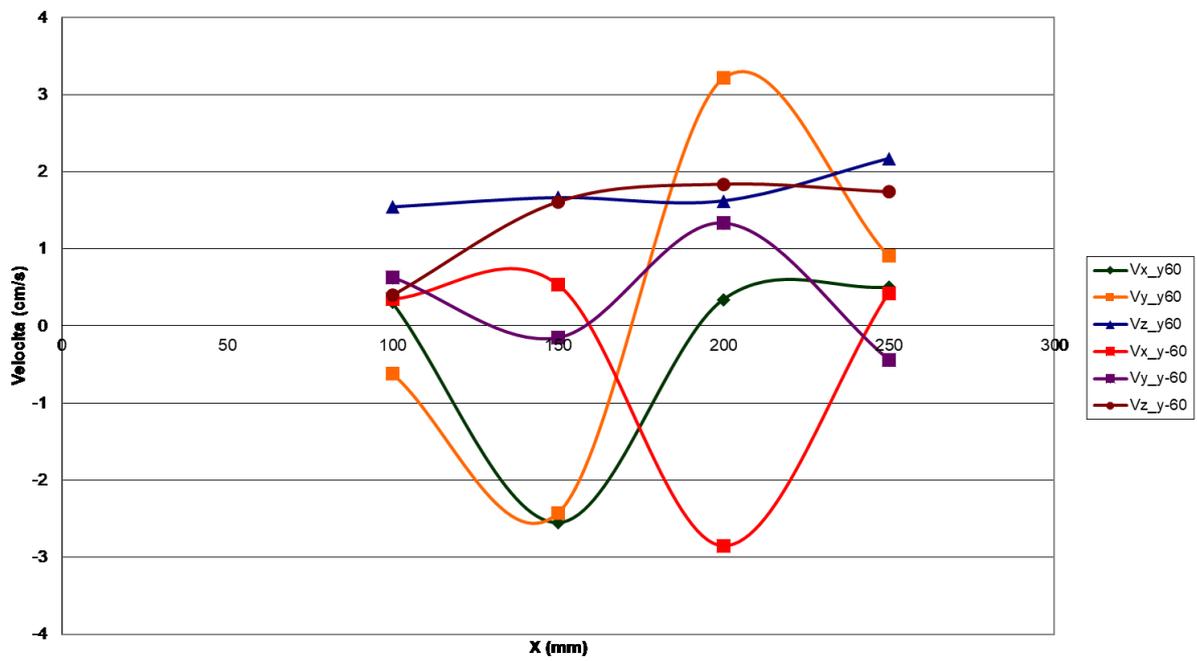


Grafico 8.1.8

Nella figura 8.1.9 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P160903B (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P160903B.xls, di cui, nella tabella 8.1.7, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 8.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 60$ e -60 mm, $z =$

200 mm ed x variabile da 100 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

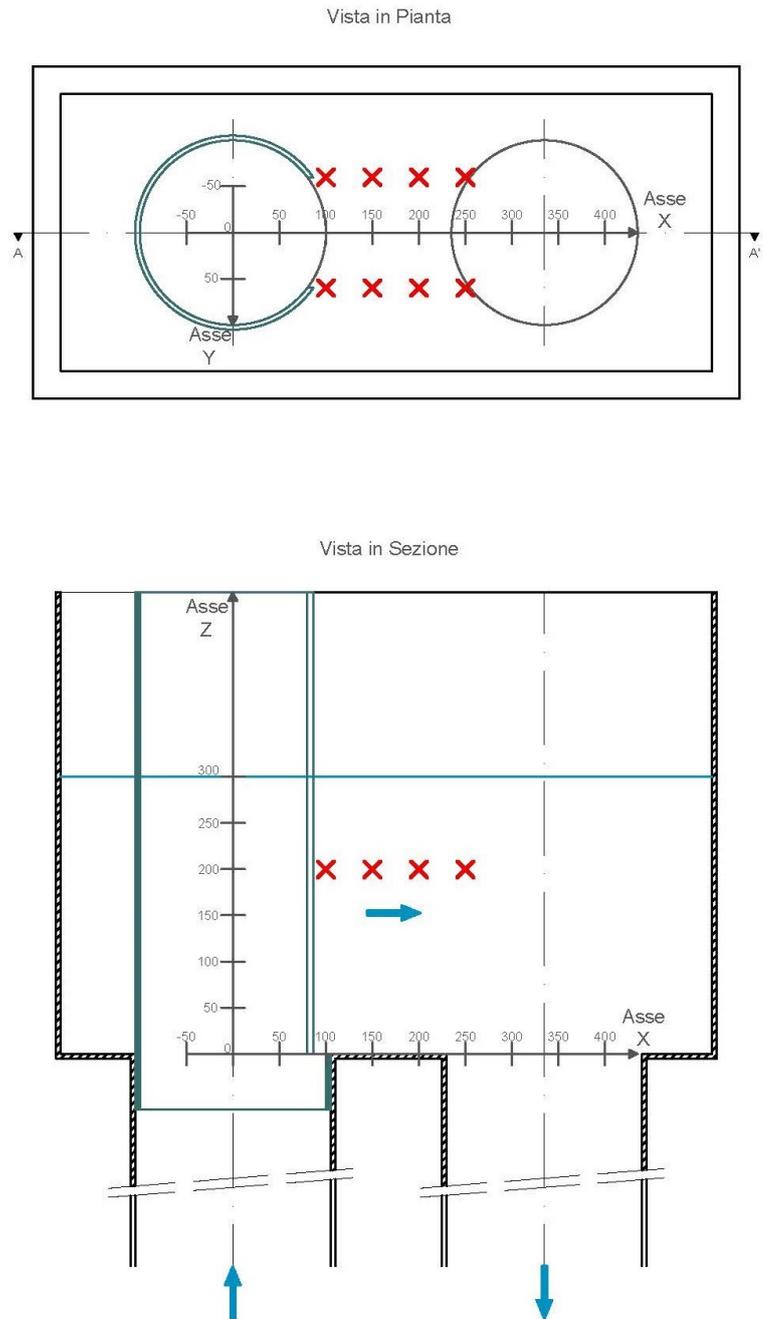


Figura 8.1.9

File P160903B - Run da 1 a 8

Run	Portata (Kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,033810625	100	60	200	0,845175781	-0,788203125	-1,726630859	4,325128677
1	5,45888125	100	60	200	-0,757519531	-3,936113281	2,963857422	8,650951854
2	5,445675	150	60	200	0,179609375	0,547636719	7,132275391	13,14423442
3	5,439271875	200	60	200	-5,773945313	6,535917969	9,043779297	19,94896359
4	5,48071875	250	60	200	-1,377792969	9,109082031	9,279873047	18,6204235
5	5,4703	100	-60	200	-0,626083984	3,730224609	2,986328125	8,38160153
6	5,497375	150	-60	200	-0,003457031	1,01984375	7,771386719	16,17095799
7	5,43915	200	-60	200	-0,241074219	-3,067578125	9,628173828	17,99288876
8	5,48143125	250	-60	200	0,236972656	-1,411933594	7,994570313	12,80589642
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,46 (Kg/s)					15,06 (cm/s)		15,17805664 (cm/s)	

Tabella 8.1.7

**Componenti della velocità in y=60 mm, Z=200 mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata W=5,5 Kg/s. File P160903B. Run da 1 a 4.**

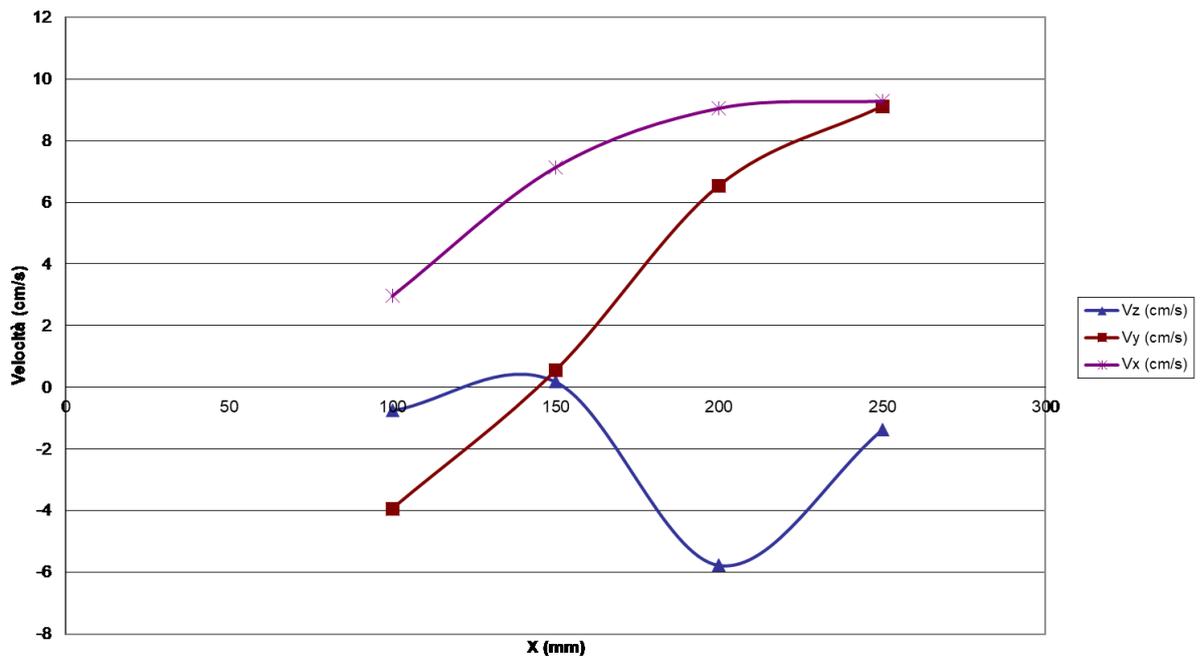


Grafico 8.1.9

Componenti della velocità in $y=60$ mm, $Z=200$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,5$ Kg/s. File P160903B. Run da 5 a 8.

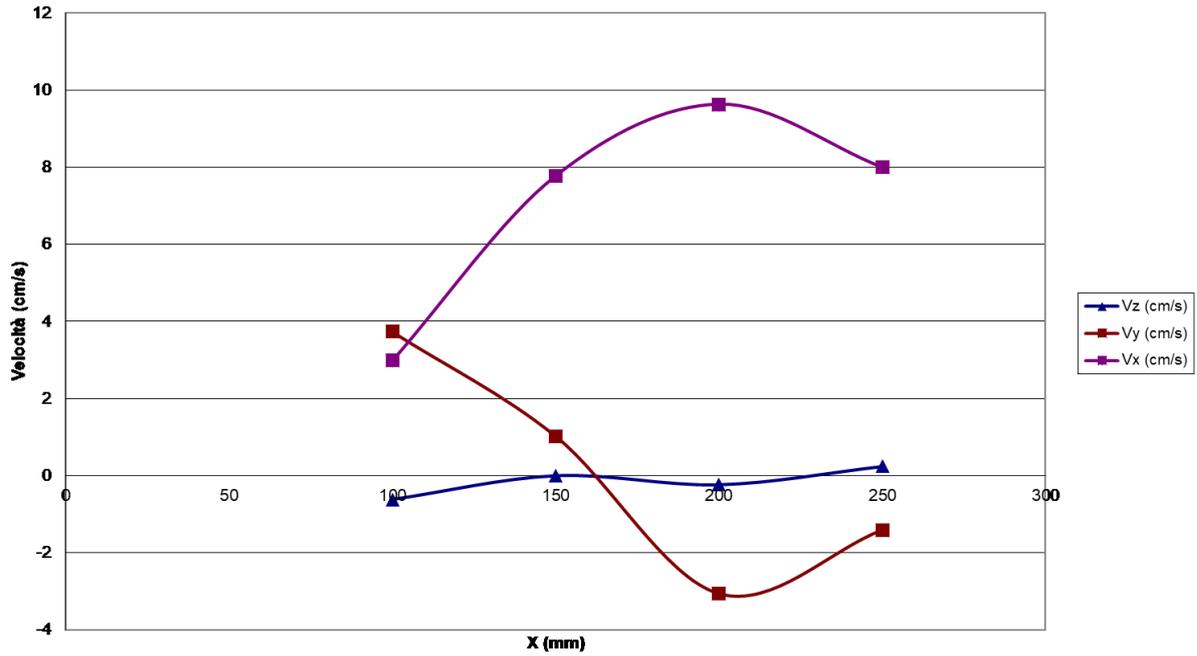


Grafico 8.1.10

Componenti della velocità in $y=60$ e -60 mm, $Z=200$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,5$ Kg/s. File P160903B. Run da 1 a 8.

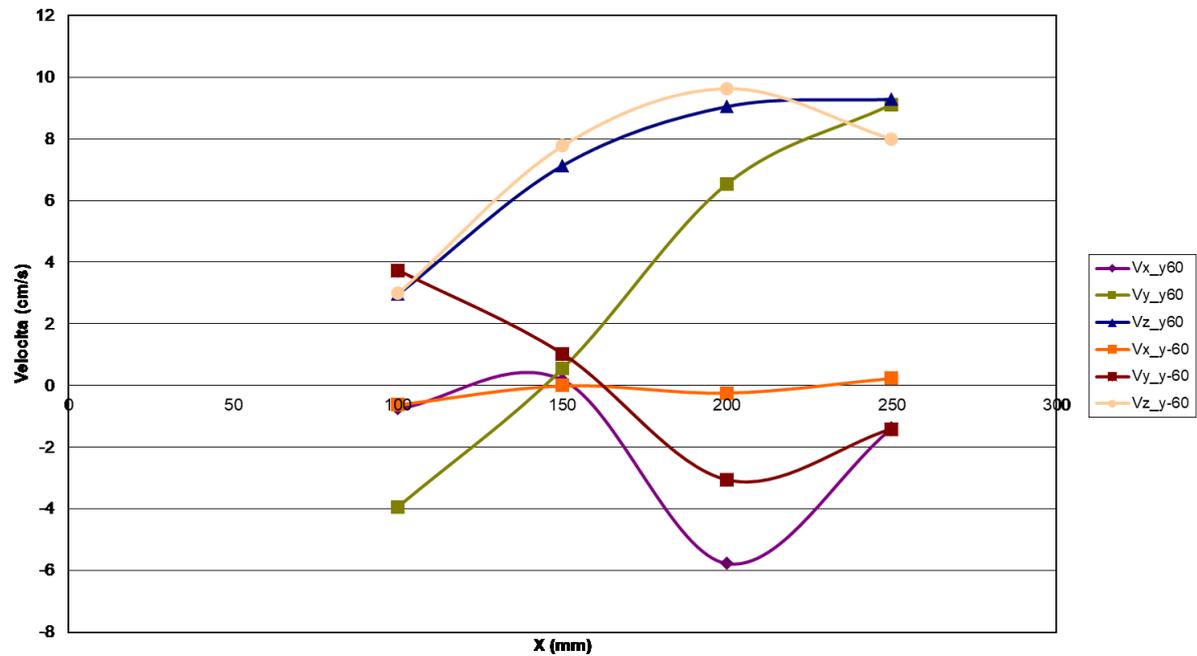


Grafico 8.1.11

Nella figura 8.1.10 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P160903C (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P160903C.xls, di cui, nella tabella 8.1.8, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 8.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 60$ e -60 mm, $z =$

150 mm ed x variabile da 100 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.5 kg/s.

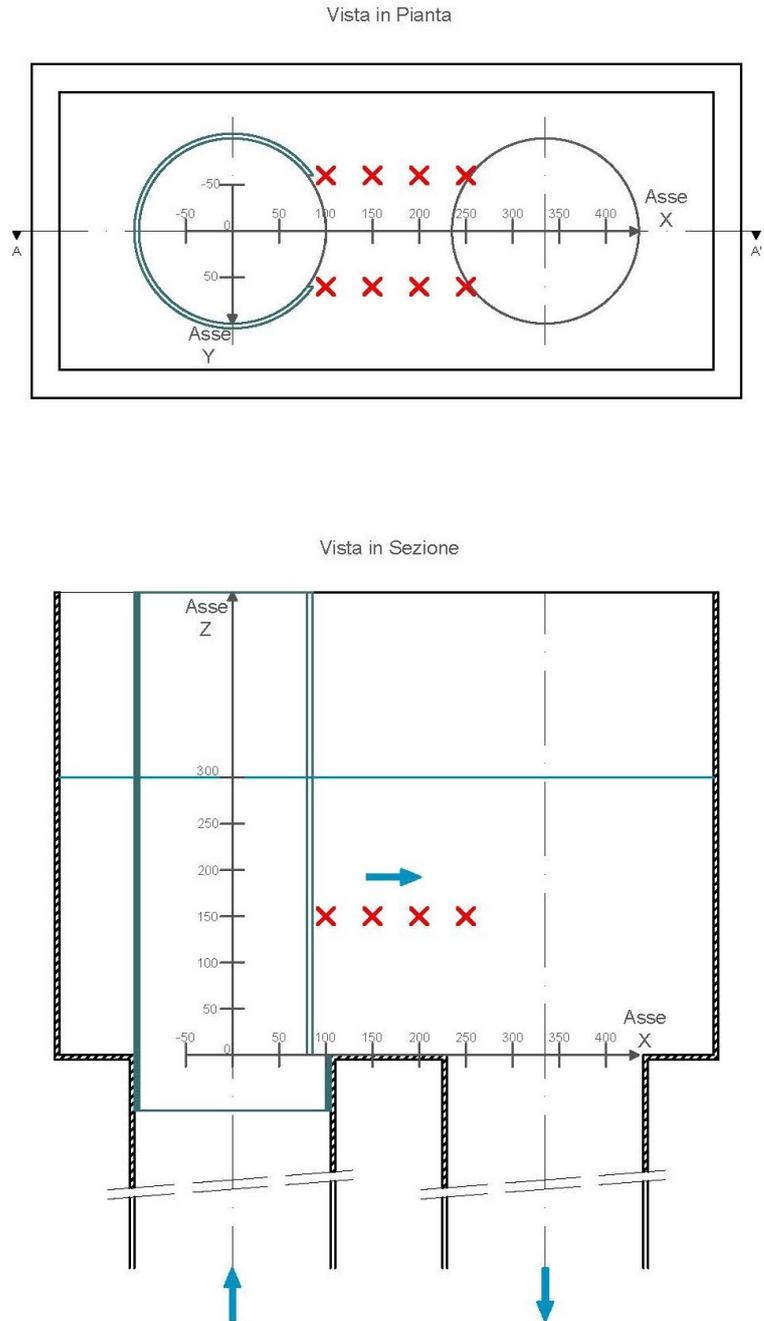


Figura 8.1.10

File P160903C - Run da 1 a 8

Run	Portata (Kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,034750625	100	60	150	1,578945313	1,15921875	-0,614726563	3,473535224
1	5,452128125	100	60	150	1,102236328	-4,206972656	4,2121875	10,05116182
2	5,445684375	150	60	150	1,518339844	1,008935547	6,219912109	11,28436293
3	5,44906875	200	60	150	-1,538964844	5,566162109	6,823369141	13,96972637
4	5,470903125	250	60	150	3,088613281	8,180205078	8,564013672	16,37348732
5	5,4454	100	-60	150	2,989013672	-0,236679688	5,599863281	10,41876823
6	5,50353125	150	-60	150	3,317148438	-1,834980469	8,252304688	14,55035186
7	5,4573875	200	-60	150	-0,013613281	-5,697138672	9,842275391	15,64509599
8	5,45848125	250	-60	150	-0,460664063	-2,150019531	8,305361328	13,02825173
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,46 (Kg/s)				15,05 (cm/s)			15,16756402 (cm/s)	

Tabella 8.1.8

**Componenti della velocità in y=60 mm, Z=150 mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata W=5,5 Kg/s. File P160903C. Run da 1 a 4.**

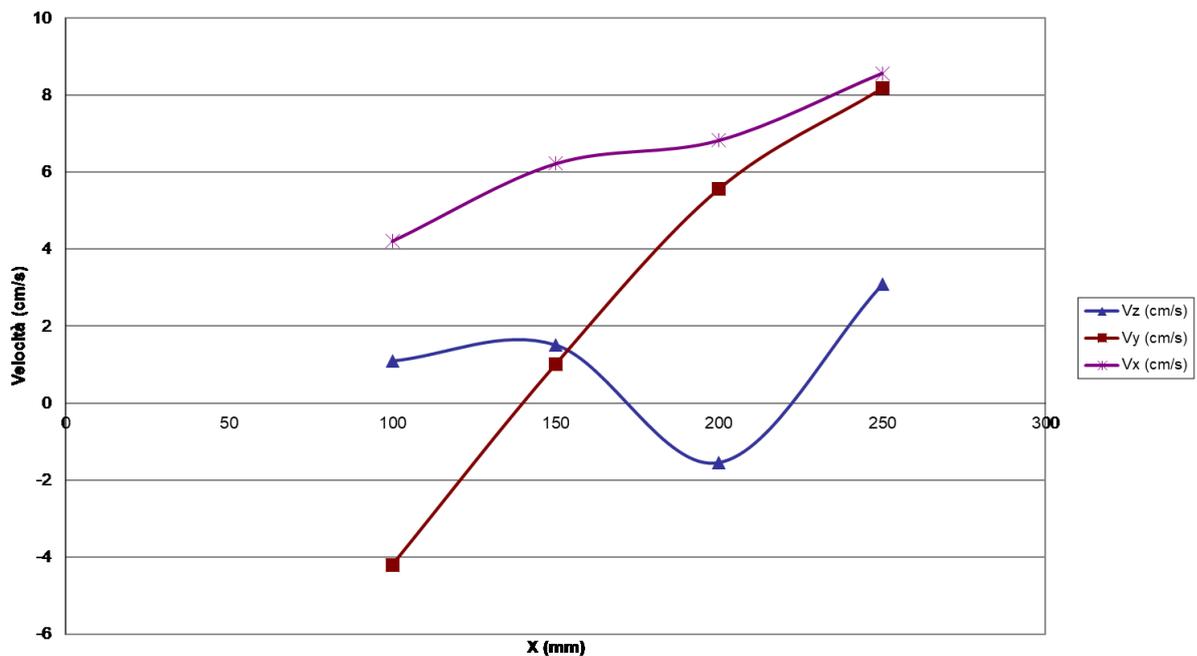


Grafico 8.1.12

Componenti della velocità in $y=60$ mm, $Z=150$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,5$ Kg/s. File P160903C. Run da 5 a 8.

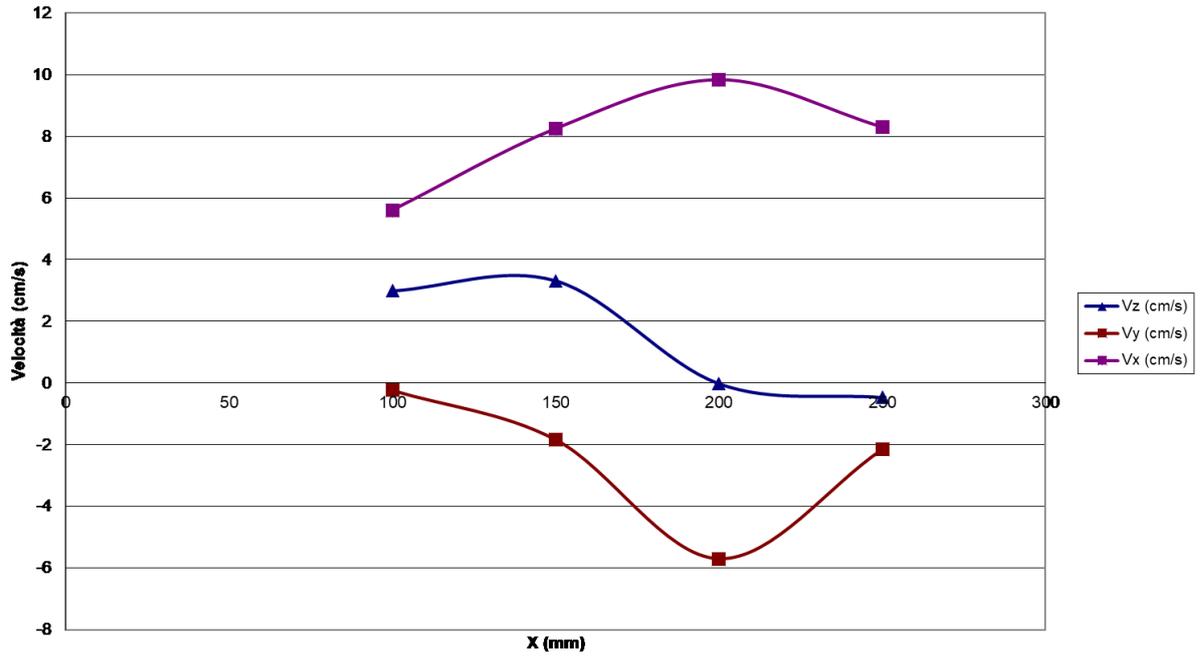


Grafico 8.1.13

Componenti della velocità in $y=60$ e -60 mm, $Z=150$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,5$ Kg/s. File P160903C. Run da 1 a 8.

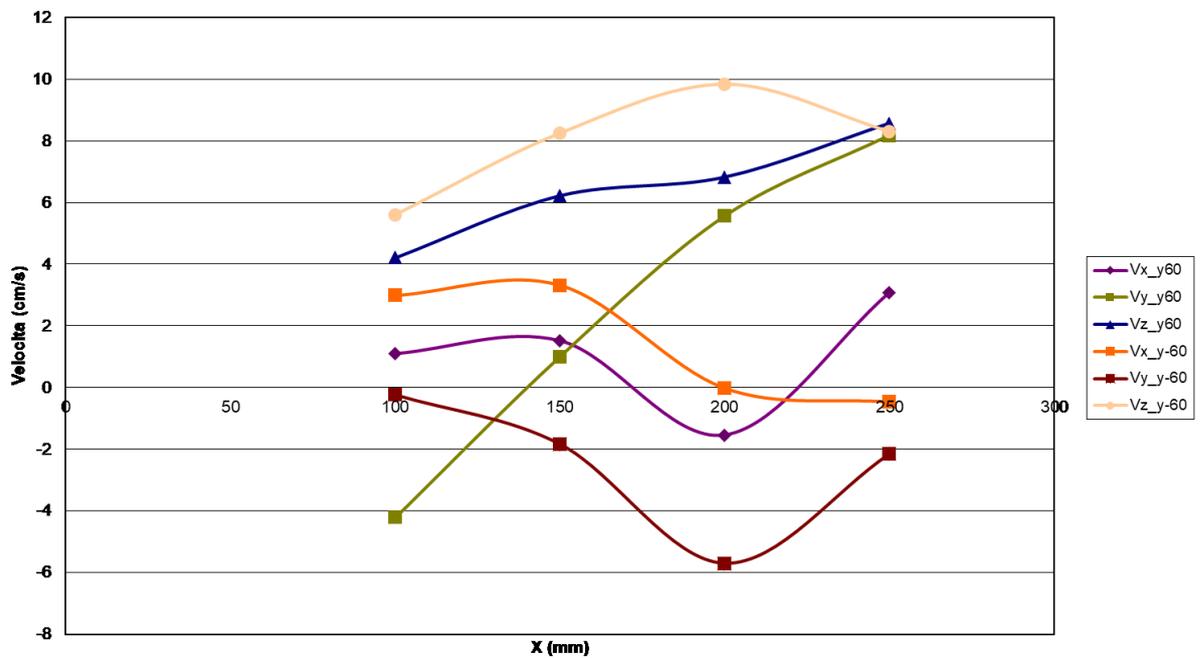


Grafico 8.1.14

Nella figura 8.1.11 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P160903D (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P160903D.xls, di cui, nella tabella 8.1.9, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 8.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 60$ e -60 mm, $z =$

100 mm ed x variabile da 100 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.45 kg/s.

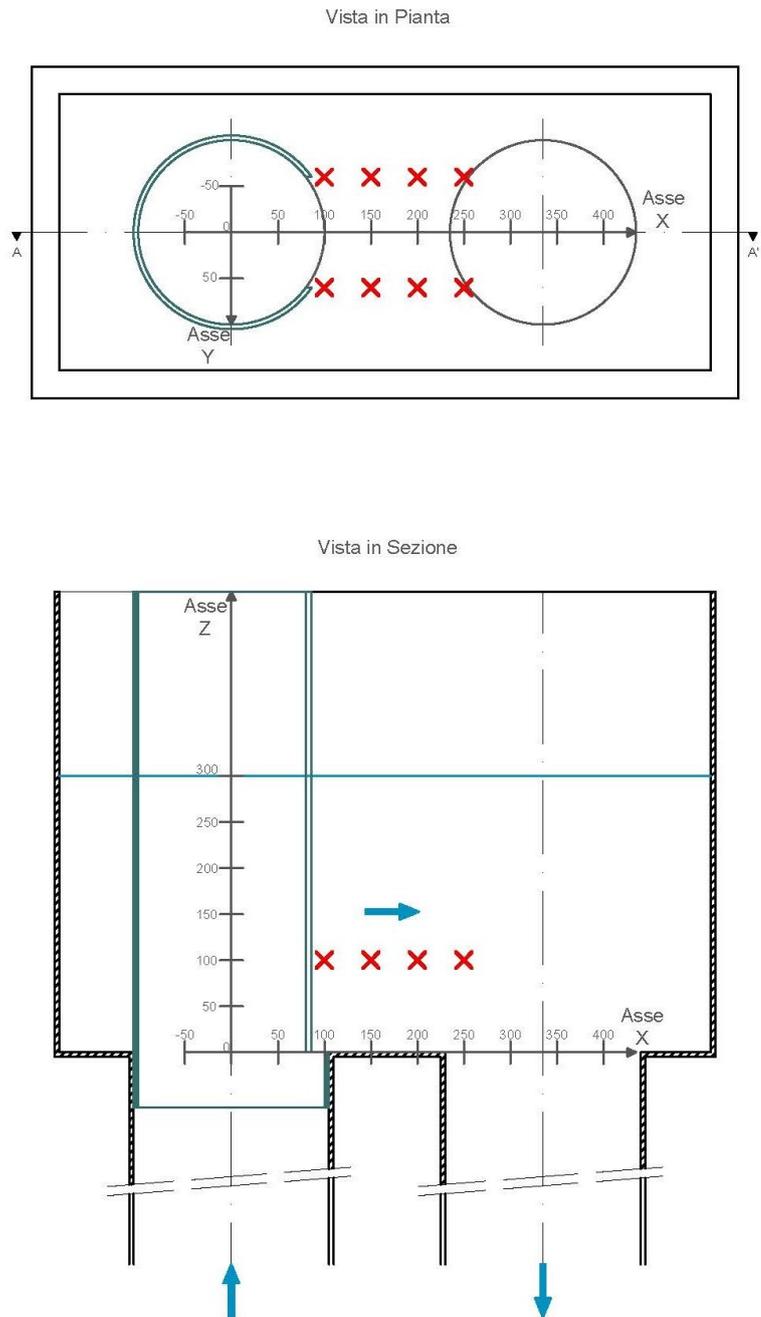


Figura 8.1.11

File P160903D - Run da 1 a 8

Run	Portata (Kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg Vz (cm/s)	Avg Vy (cm/s)	Avg Vx (cm/s)	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,663422813	100	60	100	1,031679688	0,814833984	-0,897021484	3,161445973
1	5,453621875	100	60	100	7,389609375	0,287099609	6,002558594	15,17085776
2	5,45460625	150	60	100	4,131621094	1,678876953	5,618613281	11,71650276
3	5,43708125	200	60	100	-1,354550781	1,39921875	3,225957031	10,97999009
4	5,438528125	250	60	100	0,819921875	2,371699219	1,925654297	8,344966676
5	5,462371875	100	-60	100	5,169863281	-0,639970703	6,030517578	16,67990489
6	5,449015625	150	-60	100	5,202519531	-7,564267578	6,828388672	14,11800661
7	5,466821875	200	-60	100	0,029980469	-1,566982422	2,578076172	9,815151709
8	5,43110625	250	-60	100	-2,913652344	-2,280546875	4,986425781	9,837041737
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,45 (Kg/s)					15,02 (cm/s)		15,1365115 (cm/s)	

Tabella 8.1.9

**Componenti della velocità in y=60 mm, Z=100 mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata W=5,45 Kg/s. File P160903D. Run da 1 a 4.**

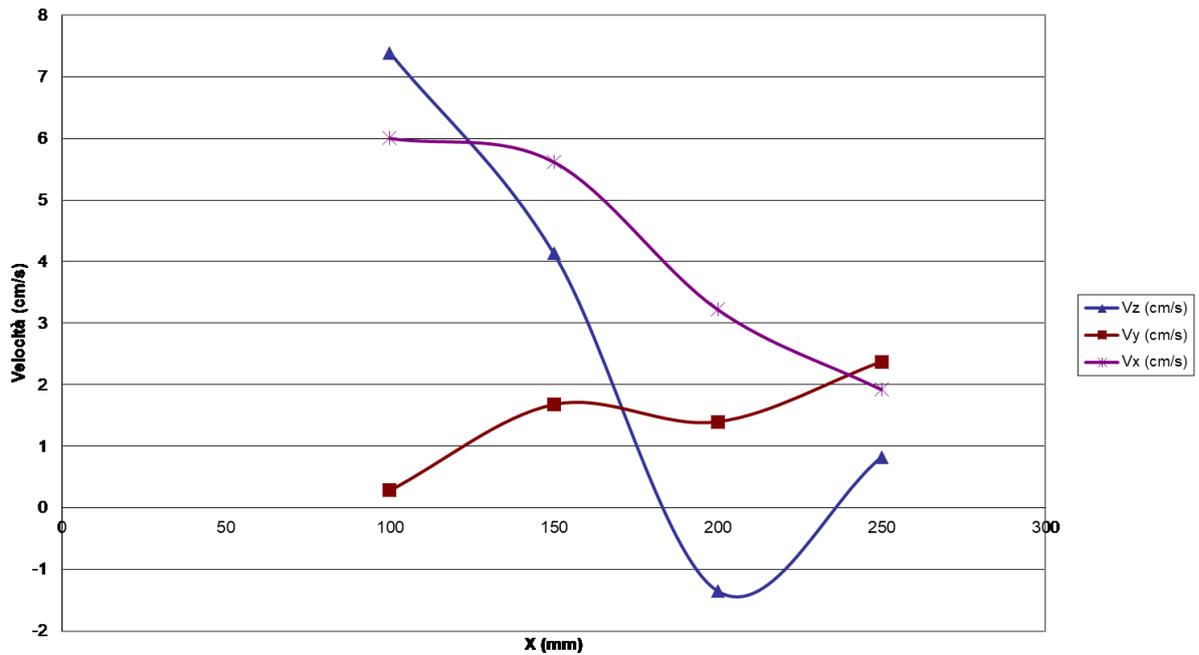


Grafico 8.1.15

Componenti della velocità in $y=-60$ mm, $Z=100$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,45$ Kg/s. File P160903D. Run da 5 a 8.

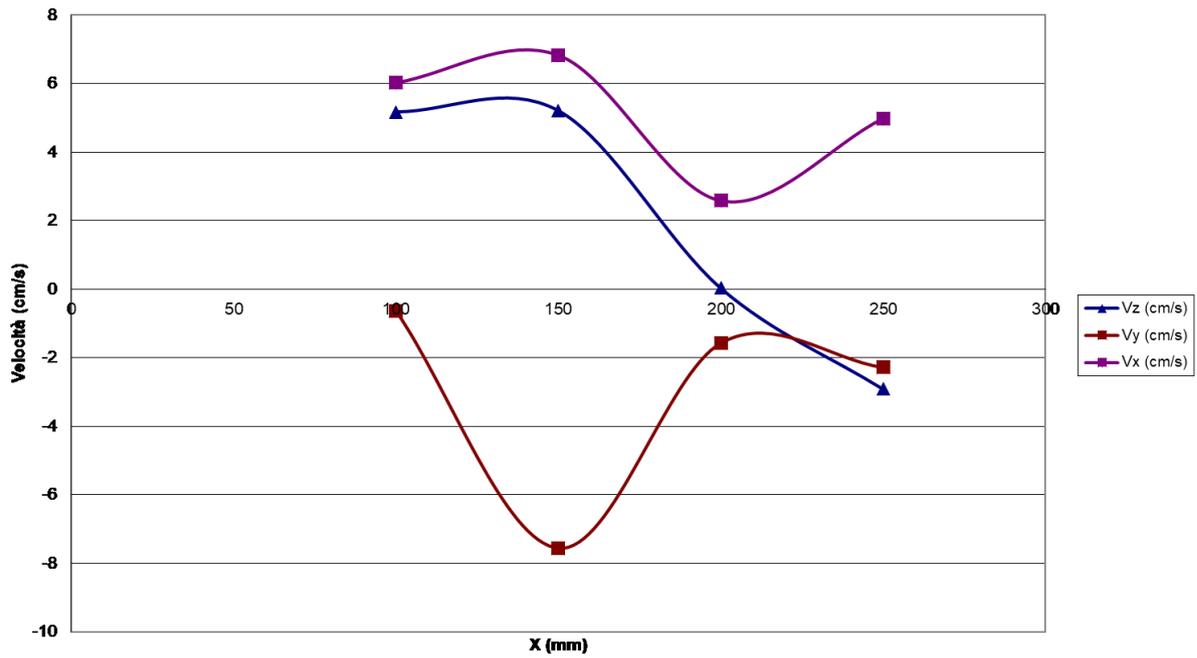


Grafico 8.1.16

Componenti della velocità in $y=60$ e -60 mm, $Z=100$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata $W=5,45$ Kg/s. File P160903D. Run da 1 a 8.

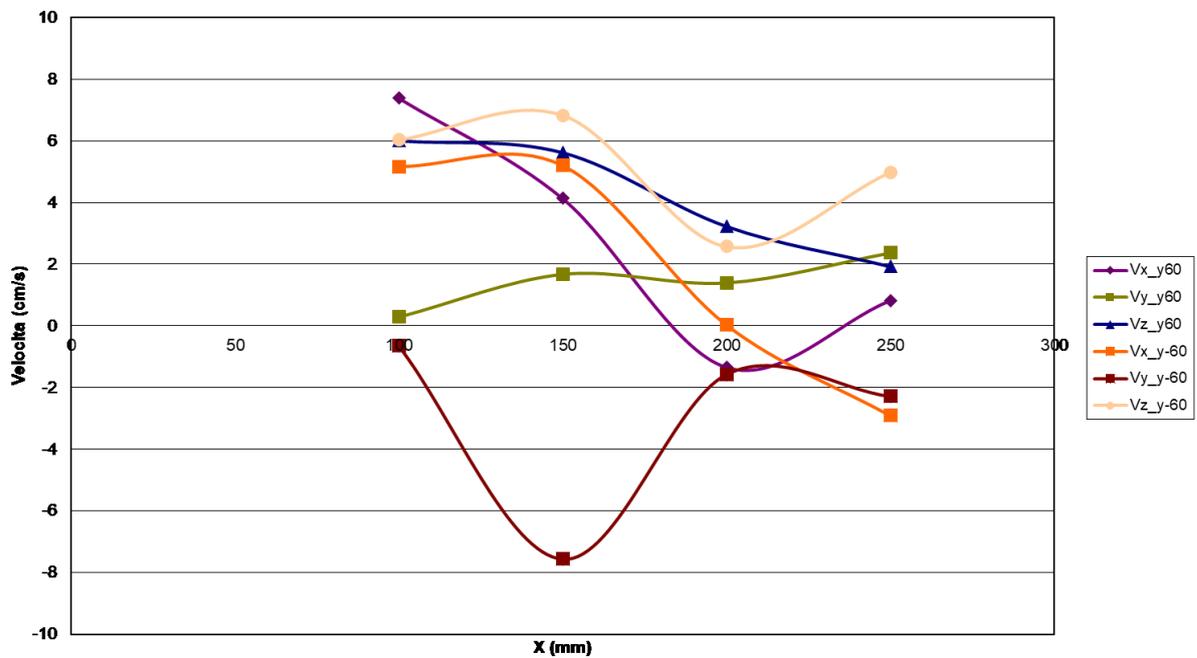


Grafico 8.1.17

Nella figura 8.1.12 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con singolo inserto sulla mandata, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P160903E (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P160903E.xls, di cui, nella tabella 8.1.10, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 8.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, è ubicato nella posizione $y = 60$ e -60 mm, $z =$

50 mm ed x variabile da 100 mm a +250 mm (configurazione a canale con un solo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm). Portata fissata in 5.45 kg/s.

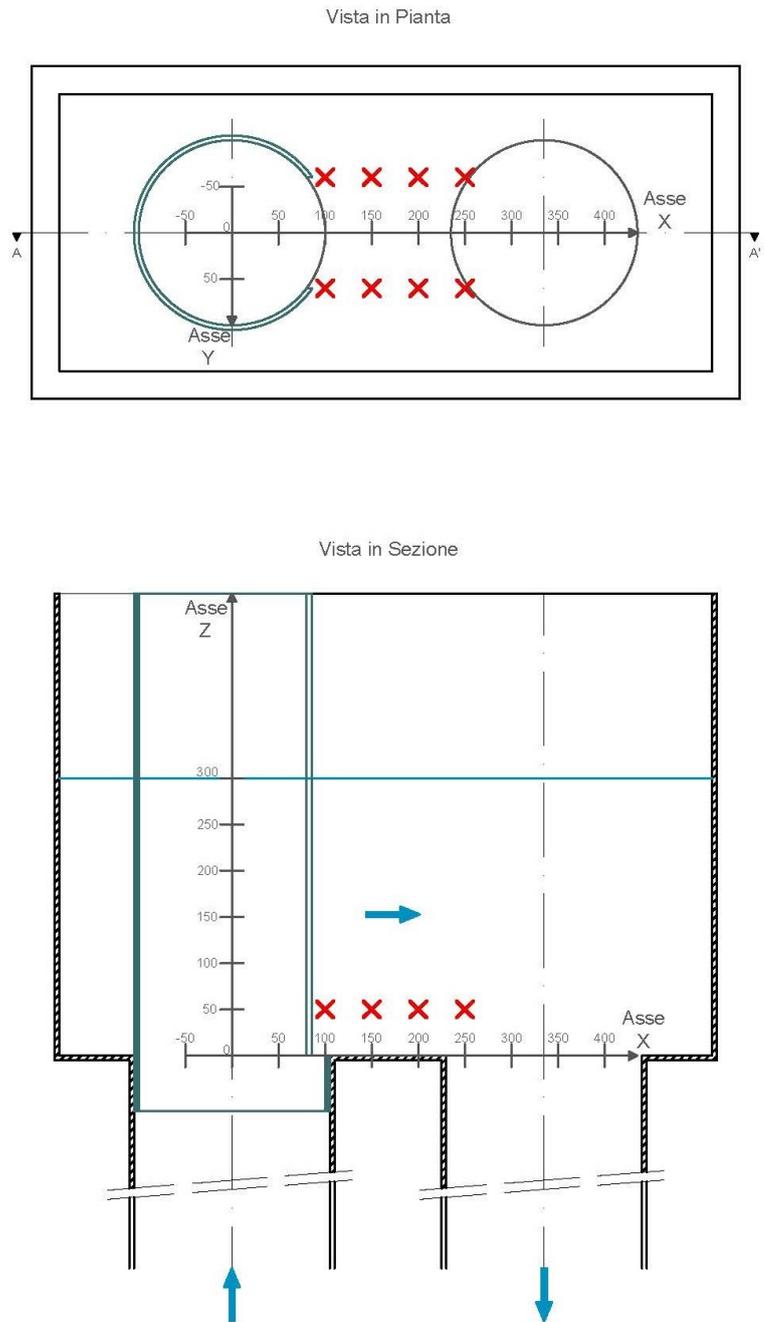


Figura 8.1.12

File P160903E - Run da 1 a 8

Run	Portata (Kg/s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Avg			Media modulo velocità (cm/s)
					Vz (cm/s)	Vy (cm/s)	Vx (cm/s)	
0	0,034768438	100	60	50	1,788935547	-0,359199219	-1,268935547	5,661011204
1	5,452215625	100	60	50	8,182050781	-0,8021875	1,773623047	12,53466234
2	5,433971875	150	60	50	3,260644531	-2,265810547	-2,060175781	16,06878131
3	5,45461875	200	60	50	-1,144726563	-1,774179688	-2,797851563	13,22876461
4	5,476321875	250	60	50	-1,226572266	-2,296416016	-2,778769531	9,16014438
5	5,4780375	100	-60	50	7,634355469	-7,365878906	3,801347656	14,42141268
6	5,477528125	150	-60	50	1,409492188	-0,334941406	0,274160156	16,76773745
7	5,492528125	200	-60	50	-1,550517578	2,653046875	0,447451172	8,932743143
8	5,43338125	250	-60	50	-2,510234375	3,446689453	-1,019189453	11,16607478
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,46 (Kg/s)				15,05 (cm/s)			15,17312609 (cm/s)	

Tabella 8.1.10

**Componenti della velocità in y=60 mm, Z=50 mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
 Portata W=5,46 Kg/s. File P160903E. Run da 1 a 4.**

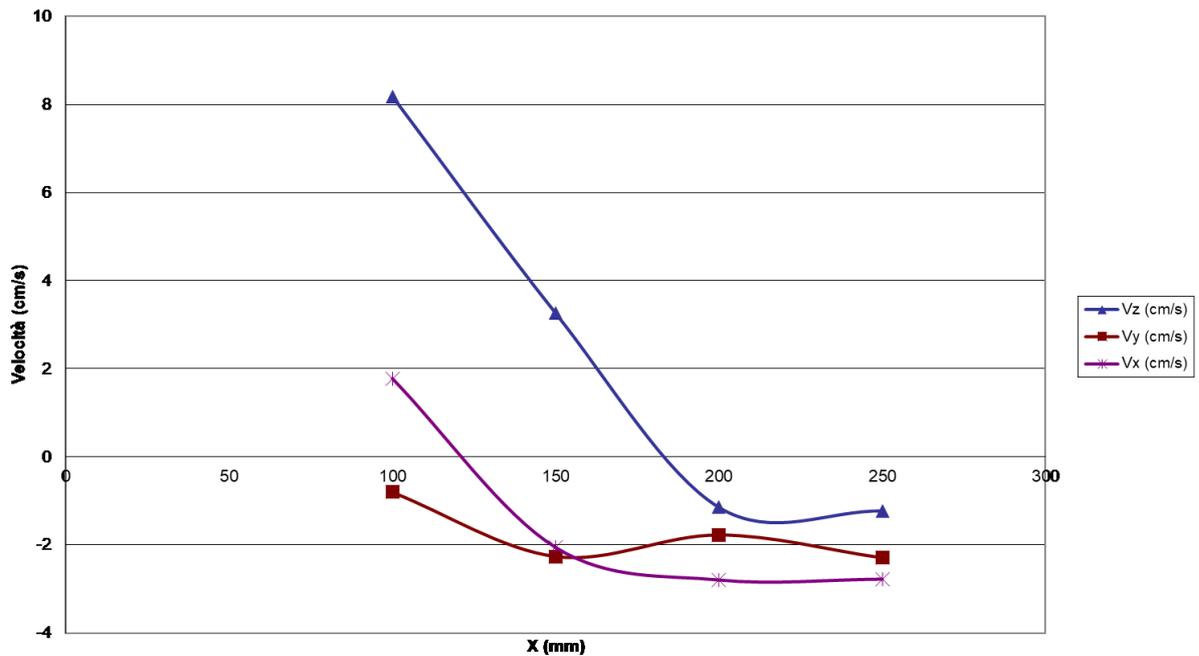


Grafico 8.1.18

Componenti della velocità in $y=60$ mm, $Z=50$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
Portata $W=5,46$ Kg/s. File P160903E. Run da 5 a 8.

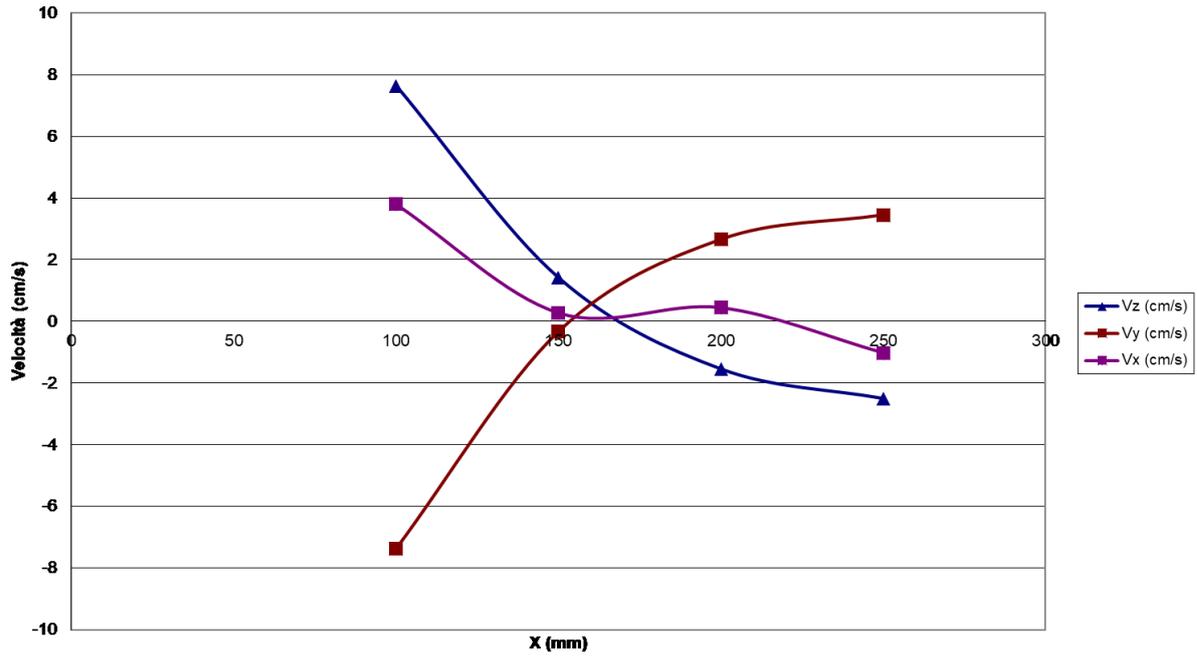


Grafico 8.1.19

Componenti della velocità in $y=60$ e -60 mm, $Z=50$ mm, ed x variabile tra 100 mm e 250 mm.
Portata $W=5,46$ Kg/s. File P160903E. Run da 1 a 8.

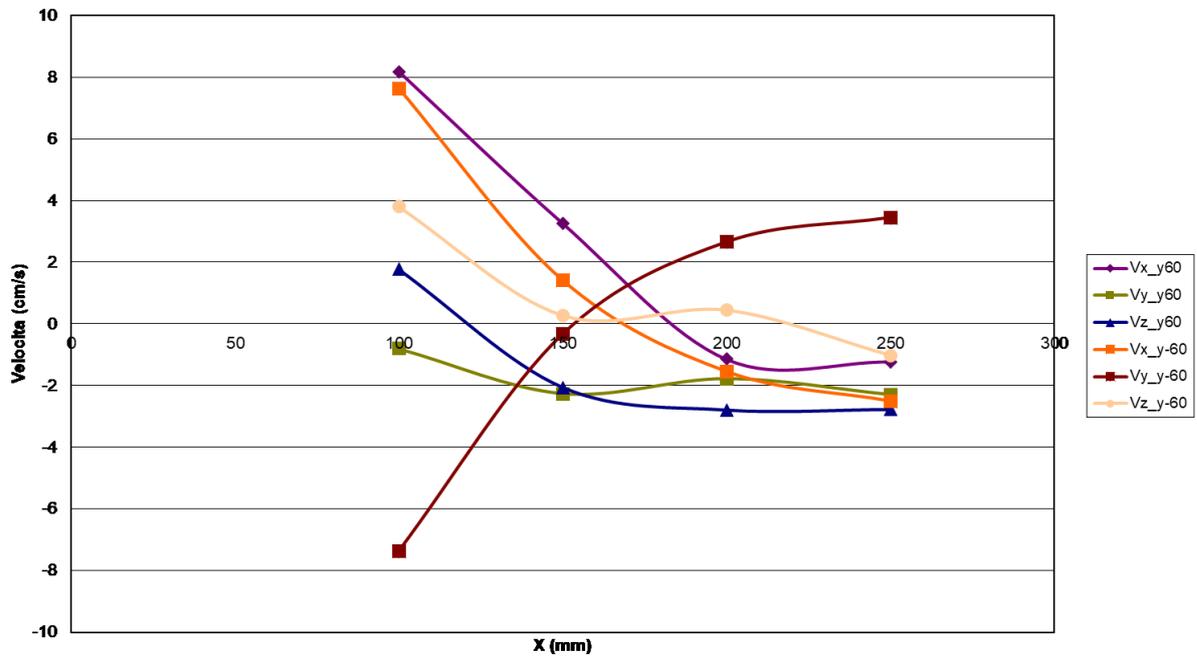


Grafico 8.1.20

Le componenti di velocità sopra riportate, sono state combinate in forma tabellare nei file W5y60-60.xls, W5y60.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy60.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = 60$ mm.

Nella figura 8.1.13 si riporta la vista in pianta della vasca, con singolo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target ($y = 60$ mm, z variabile da 50 mm a 250 mm ed x variabile da 100 mm a 250 mm), ed il sistema di riferimento adottato.

Mentre in figura 8.1.14 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = 60$ mm, con portata fissata in 5.4 kg/s, (elaborati nel file Matlab vel2dy60.m).

Punti di misura nella Vista in Pianta.
Configurazione con singolo inserto con luce 120 mm.

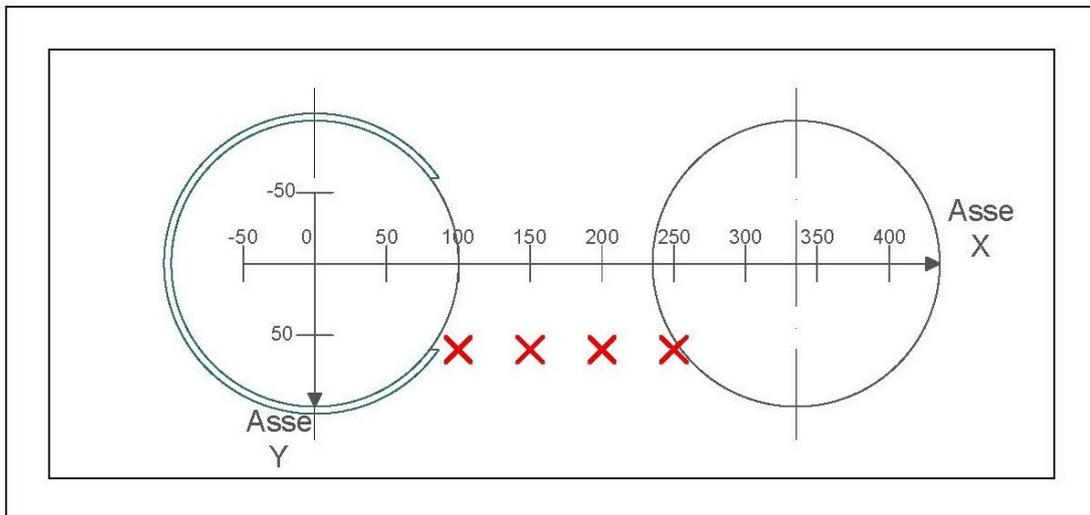


Figura 8.1.13

Vettori velocità nel Piano X-Z con $Y = 60$ mm. Portata 5.4 kg/s.

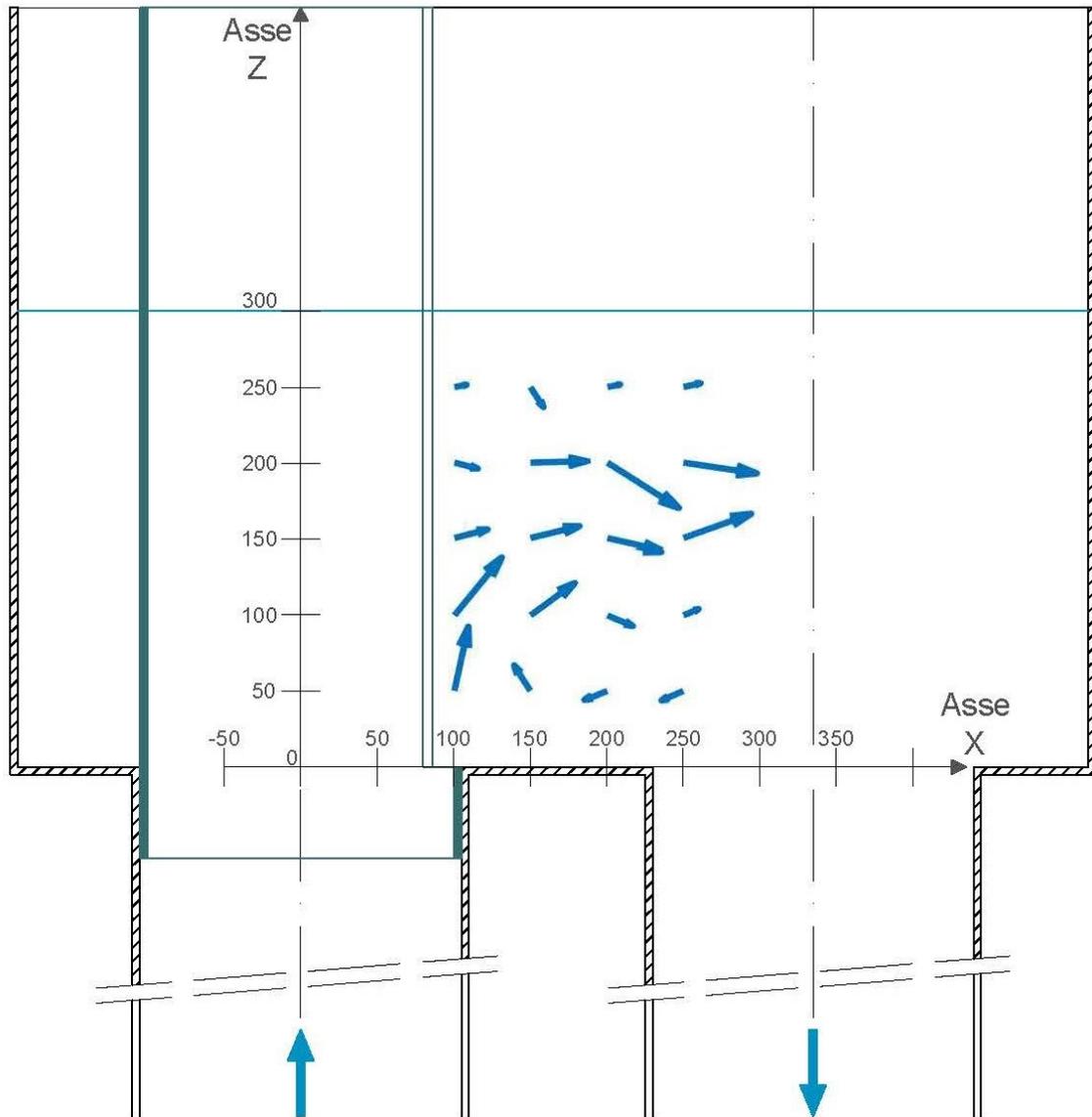


Figura 8.1.14

Le componenti di velocità sopra riportate, sono state combinate in forma tabellare nei file W5y60-60.xls, W5y-60.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy_60.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = -60$ mm.

Nella figura 8.1.15 si riporta la vista in pianta della vasca, con singolo inserto sulla mandata con luce 120 mm, e battente 300 mm, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target ($y = -60$ mm, z variabile da 50 mm a 250 mm ed x variabile da 100 mm a 250 mm), ed il sistema di riferimento adottato.

Mentre in figura 8.1.16 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = -60$ mm, con portata fissata in 5.4 kg/s, (elaborati nel file Matlab vel2dy_60.m).

Punti di misura nella Vista in Pianta.
Configurazione con singolo inserto con luce 120 mm.

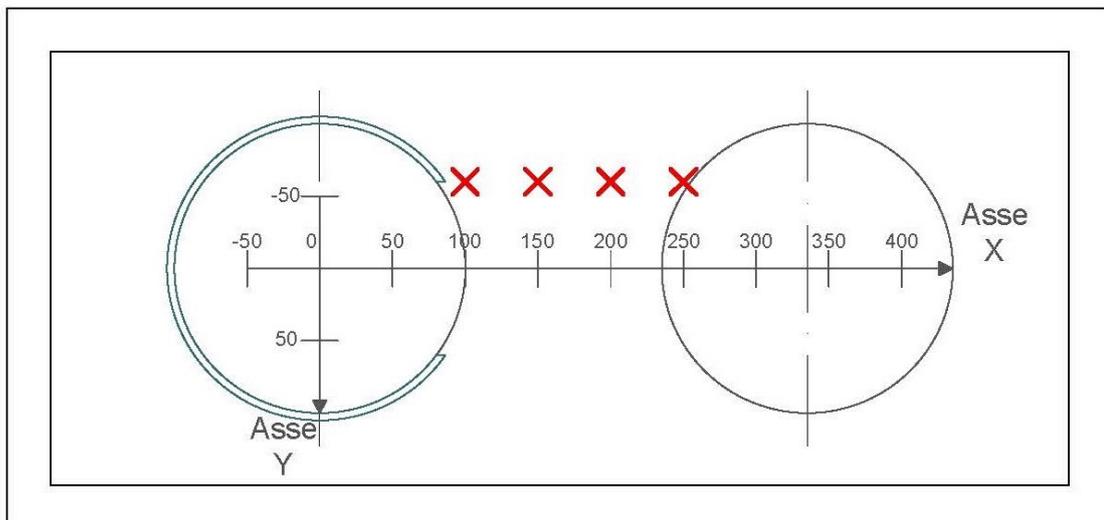


Figura 8.1.15

Vettori velocità nel Piano X-Z con $Y = -60$ mm. Portata 5.4 kg/s.

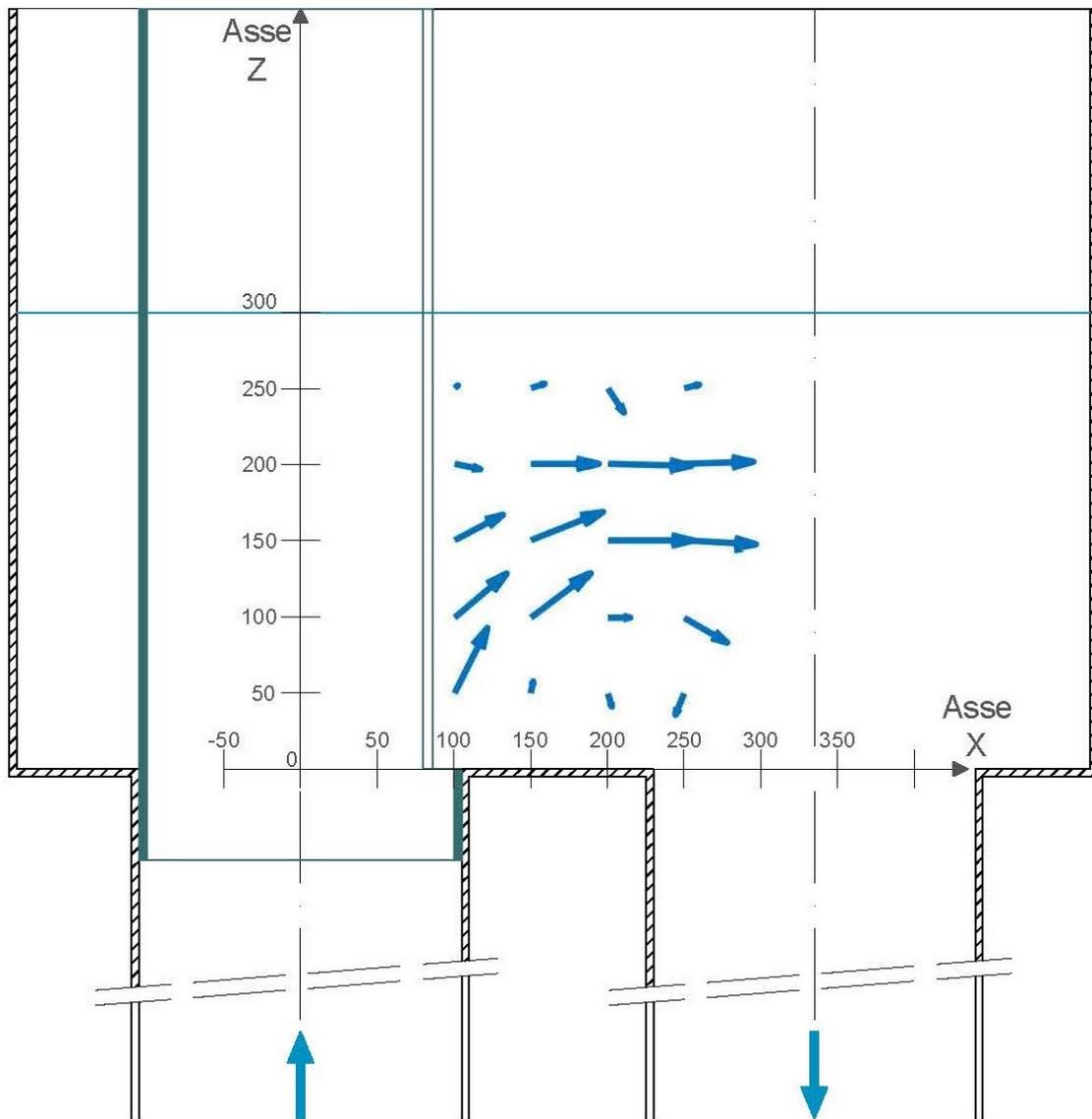


Figura 8.1.16

8.2. CAMPI DI VELOCITA' TARGET CON DOPPIO INSERTO E PARETI LATERALI

In una seconda campagna di misurazioni si sono effettuate delle rilevazioni delle componenti di velocità all'interno del target a "canale", nella configurazione con doppio inserto, con finestra larga 120 mm, e pareti laterali.

In questa sessione di prove, fissato il battente d'acqua con fluido in quiete a 300 mm, si sono svolte le acquisizioni dei campi di velocità all'interno del target con l'ausilio della sonda ADV, con 4 differenti valori di portata (~ 5 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s).

Le misurazioni, visto l'ingombro della sonda, si sono concentrate nel piano x-z con $y = 0$ (piano passante per la mezzaria della vasca), x compreso tra -50 mm e +250 mm, z compreso tra 50 mm e 250 mm (passo lungo gli assi x e z di 50 mm).

Nella figura 8.2.1 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $x = -50$ mm, e z variabile da 250 mm a 50 mm.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Nel seguito si riportano i risultati delle misurazioni effettuate, nei punti indicati in figura, con 4 diverse portate: ~ 5 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s.

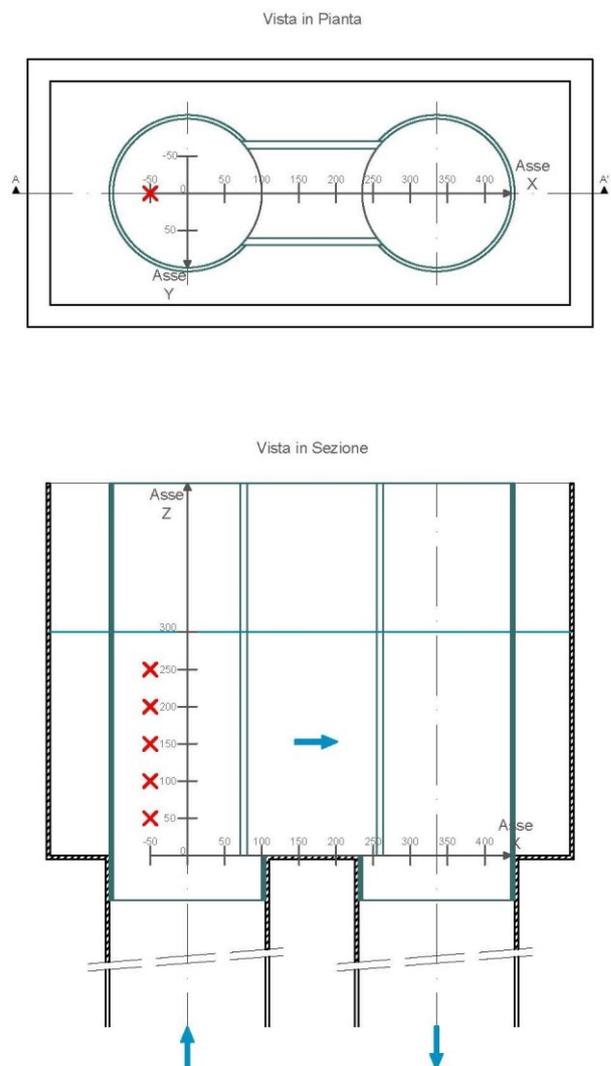


Figura 8.2.1

Portata fissata in 5.47 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604A (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604A.xls, di cui, nella tabella 8.2.1, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604A - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,03531625	-50	0	250	-0,442675781	-0,365175781	-1,947412109	6,274353896
1	5,462475	-50	0	250	7,933046875	-2,137451172	-0,064677734	11,84779383
2	5,462003125	-50	0	200	9,835498047	0,409609375	-0,502207031	12,54233618
3	5,484225	-50	0	150	12,33335938	1,330605469	-0,789892578	14,31789664
4	5,462546875	-50	0	100	13,85326172	-0,08953125	-2,735898438	16,33256531
5	5,49228125	-50	0	50	15,32557617	2,556708984	-2,831308594	17,45875166
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,47270625 (kg/s)				15,809 (cm/s)			15,20196181 (cm/s)	

Tabella 8.2.1

Componenti della velocità in $x=-50$, $y=0$ e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata $W=5.47$ Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604A. Run da 1 a 5.

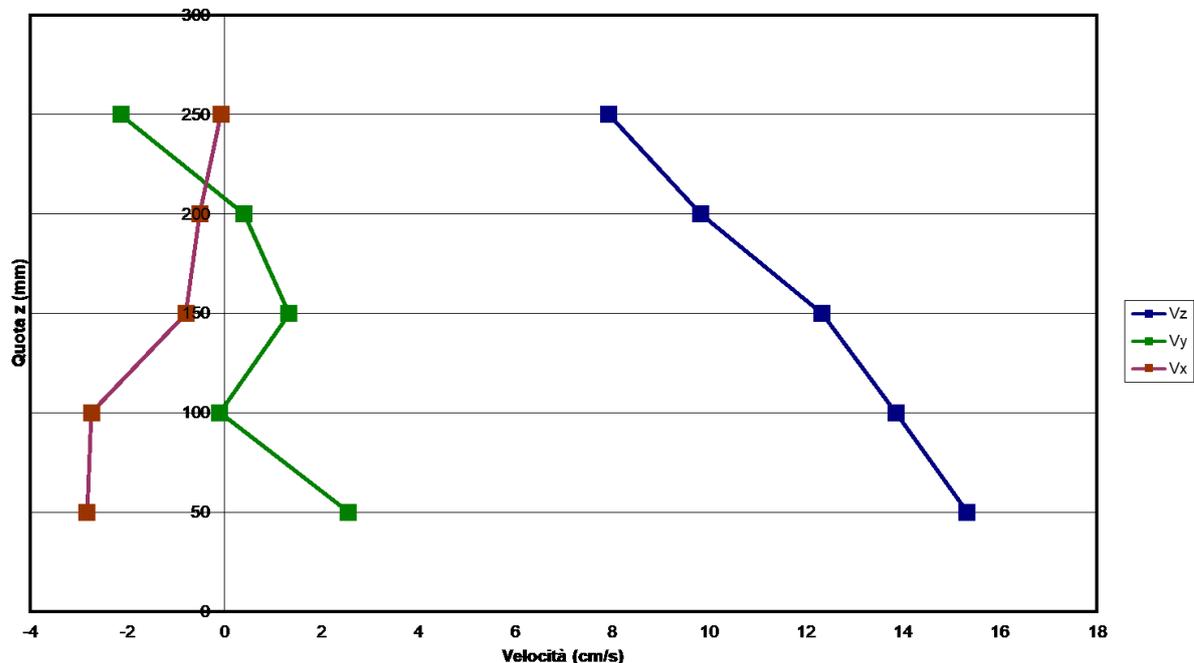


Grafico 8.2.1

Portata fissata in 10.05 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604F (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604F.xls, di cui, nella tabella 8.2.2, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604F - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,035195938	-50	0	250	-0,870849609	-3,301582031	-1,260380859	12,09067148
1	10,03585313	-50	0	250	16,9524707	3,634492188	6,063349609	22,13865751
2	10,03614063	-50	0	200	19,56371094	3,106699219	3,727050781	24,54682914
3	10,05331563	-50	0	150	23,67239258	3,520908203	3,077246094	27,76267507
4	10,04818438	-50	0	100	28,46776367	3,538896484	0,08125	32,04729807
5	10,0682	-50	0	50	29,01229492	5,138828125	-1,043798828	32,91788272
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
10,04833875 (kg/s)		29,026 (cm/s)			27,91205208 (cm/s)			

Tabella 8.2.2

Componenti della velocità in x=-50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=10,05 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604F. Run da 1 a 5.

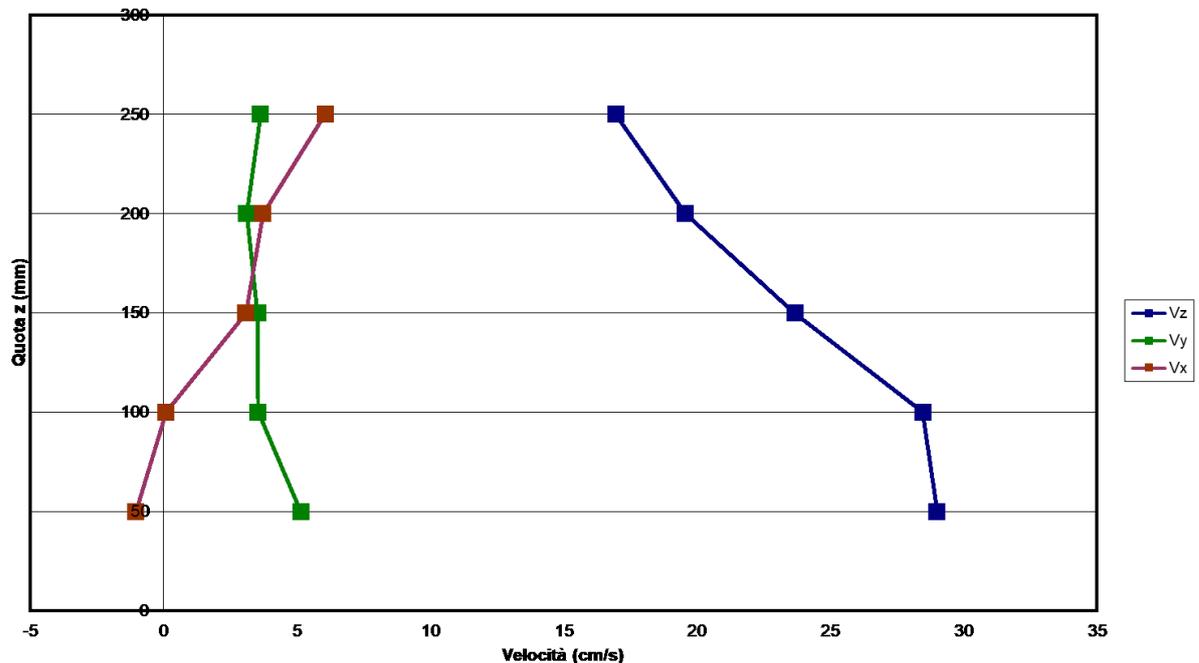


Grafico 8.2.2

Portata fissata in 15.02 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604A (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604A.xls, di cui, nella tabella 8.2.3, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604A - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,03527875	-50	0	250	0,00890625	-1,14056641	-2,177158203	6,165250336
1	15,02140625	-50	0	250	22,48657227	2,199267578	5,794941406	29,70484308
2	15,00870938	-50	0	200	37,50836914	5,468125	3,421865234	42,91119991
3	15,02021563	-50	0	150	36,59913086	8,759335938	1,837597656	41,93542178
4	15,0118375	-50	0	100	44,35658203	9,068173828	-1,670019531	48,97966256
5	15,01688125	-50	0	50	46,48115234	10,31888672	-1,71765625	51,1140652
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
15,01581 (kg/s)					43,375 (cm/s)		41,71058333 (cm/s)	

Tabella 8.2.3

Componenti della velocità in x=-50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=15,02 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604A. Run da 1 a 5.

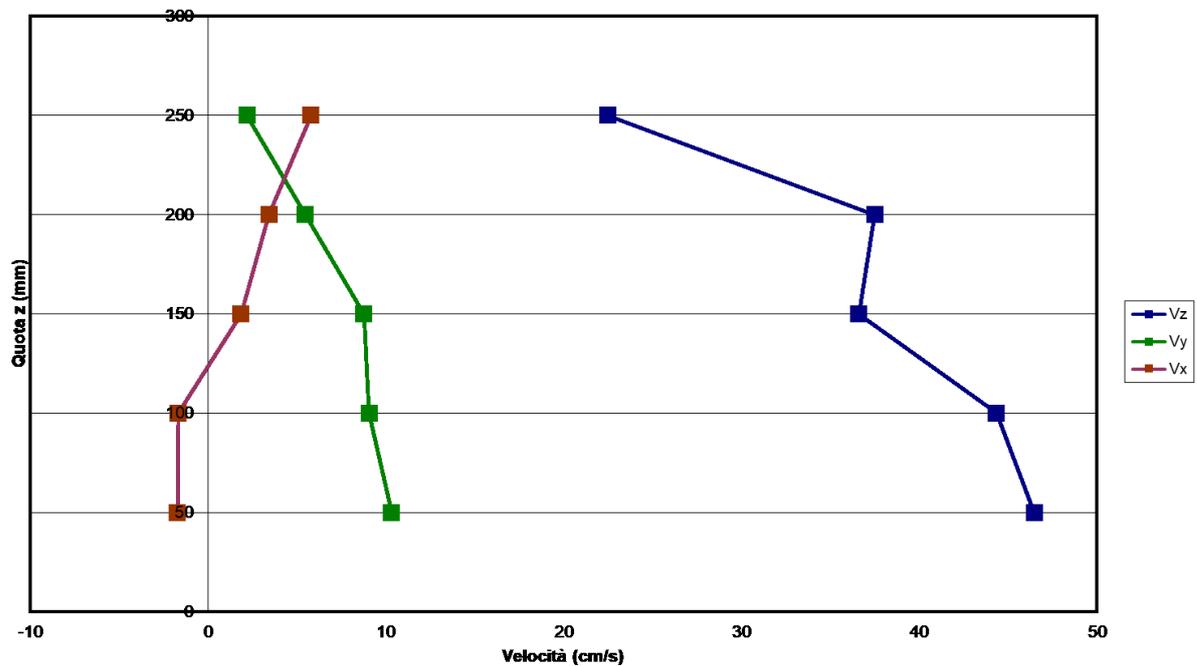


Grafico 8.2.3

Portata fissata in 19.88 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604F (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604F.xls, di cui, nella tabella 8.2.4, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604F - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,0331475	-50	0	250	-0,225673828	-0,009091797	-0,770751953	7,07071992
1	19,88851563	-50	0	250	36,69581055	-0,129404297	9,208095703	45,49265834
2	19,81780313	-50	0	200	51,18734375	11,58177734	6,829169922	57,39815966
3	19,8912125	-50	0	150	53,76806641	12,63677734	3,903681641	60,92958287
4	19,9547875	-50	0	100	63,01060547	15,02891602	0,933261719	69,40740733
5	19,83263125	-50	0	50	66,50700195	14,08427734	-2,079257813	72,47358224
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
19,87699 (kg/s)				57,417 (cm/s)			55,21386111 (cm/s)	

Tabella 8.2.4

**Componenti della velocità in x=-50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=19,88 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604F. Run da 1 a 5.**

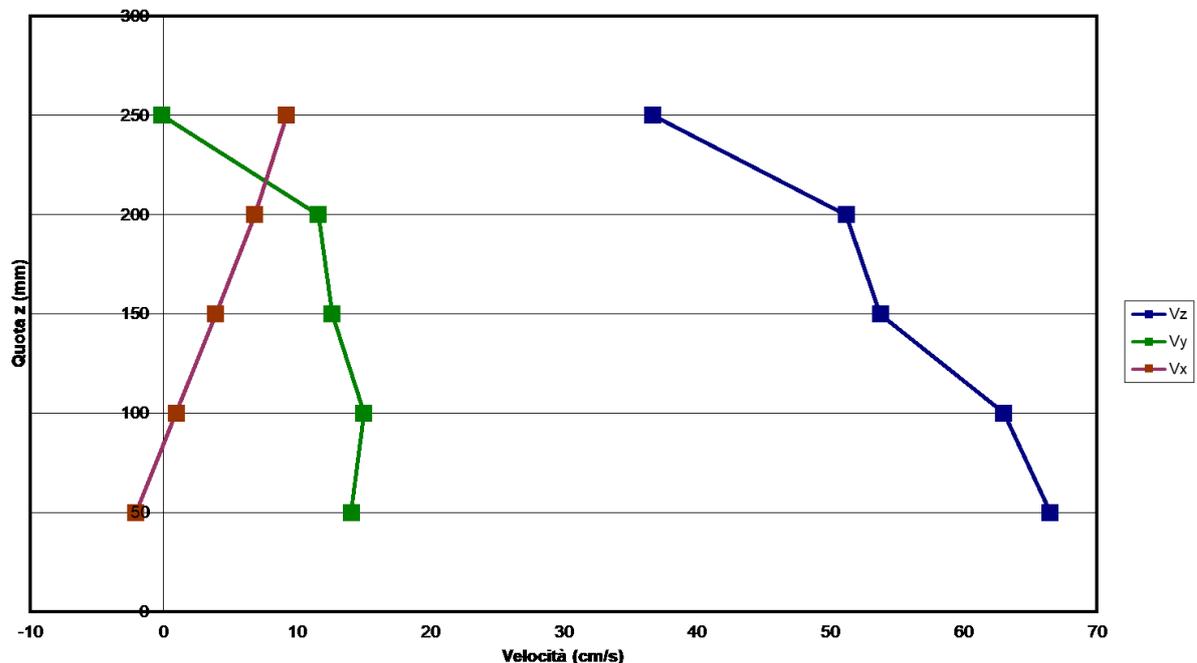


Grafico 8.2.4

Nella figura 8.2.2 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $x = 0$ mm, e z variabile da 250 mm a 50 mm.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Nel seguito si riportano i risultati delle misurazioni effettuate, nei punti indicati in figura, con 4 diverse portate: ~ 5 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s.

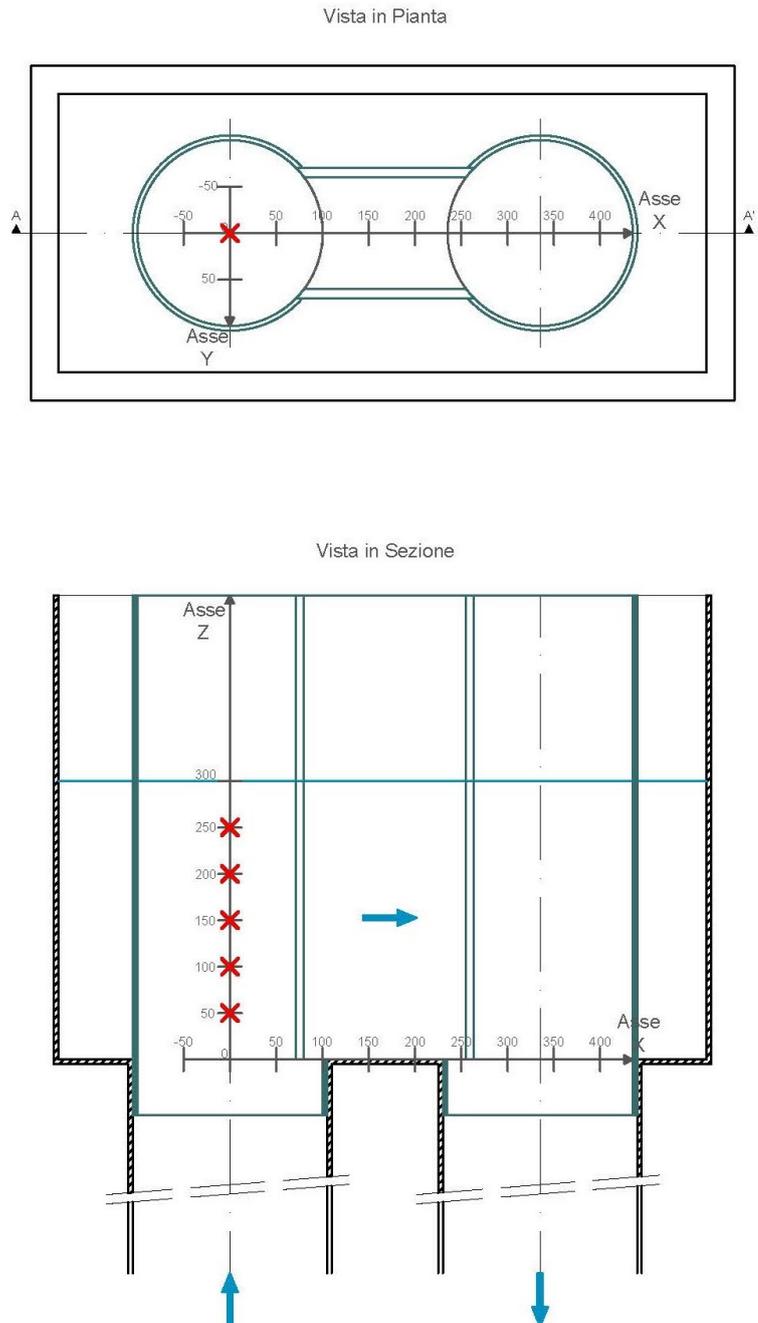


Figura 8.2.2

Portata fissata in 5.47 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604B (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604B.xls, di cui, nella tabella 8.2.5, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604B - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,035010313	0	0	250	0,455117188	0,288994141	-0,917314453	11,73406045
1	5,47130625	0	0	250	7,942890625	-4,132548828	3,886220703	12,74986486
2	5,4675625	0	0	200	11,17160156	-0,337822266	4,702431641	14,27915599
3	5,47936875	0	0	150	13,29345703	1,929912109	3,155849609	15,98946581
4	5,4804875	0	0	100	15,73550781	-0,143603516	1,958173828	18,22026908
5	5,4742875	0	0	50	17,01292969	0,068964844	1,133505859	18,68111843
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
5,4746025 (kg/s)				15,814 (cm/s)			15,20722917 (cm/s)	

Tabella 8.2.5

**Componenti della velocità in x=0, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=5.47 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604B. Run da 1 a 5.**

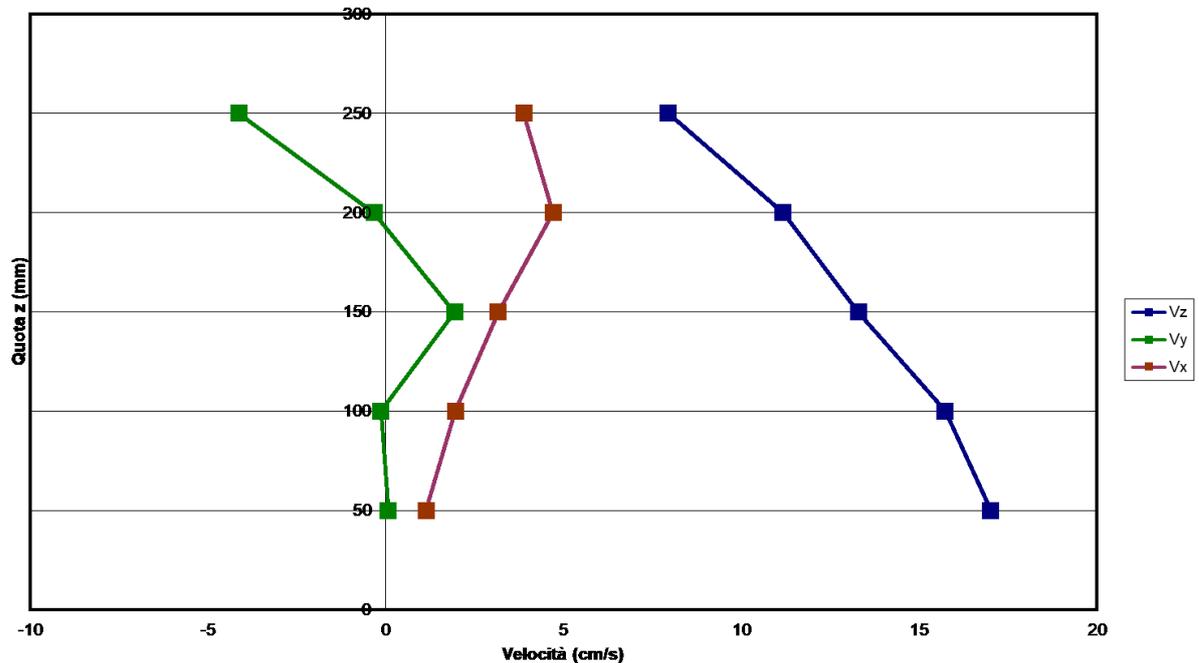


Grafico 8.2.5

Portata fissata in 10.04 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604G (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604G.xls, di cui, nella tabella 8.2.6, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604G - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	5,052730313	0	0	250	-0,323261719	0,985917969	-0,398300781	6,222676048
1	10,04410313	0	0	250	16,96208008	1,201220703	9,00984375	23,65894253
2	10,03993438	0	0	200	21,46358398	2,126142578	7,886640625	26,94845963
3	10,0461	0	0	150	24,72616211	2,303916016	5,244306641	28,77773731
4	10,0403	0	0	100	25,32876953	1,46328125	3,335195313	29,14788003
5	10,02254375	0	0	50	30,83625977	1,051220703	-0,319326172	33,98656963
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
10,03859625 (kg/s)		28,998 (cm/s)			27,88498958 (cm/s)			

Tabella 8.2.6

Componenti della velocità in x=0, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=10,04 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604G. Run da 1 a 5.

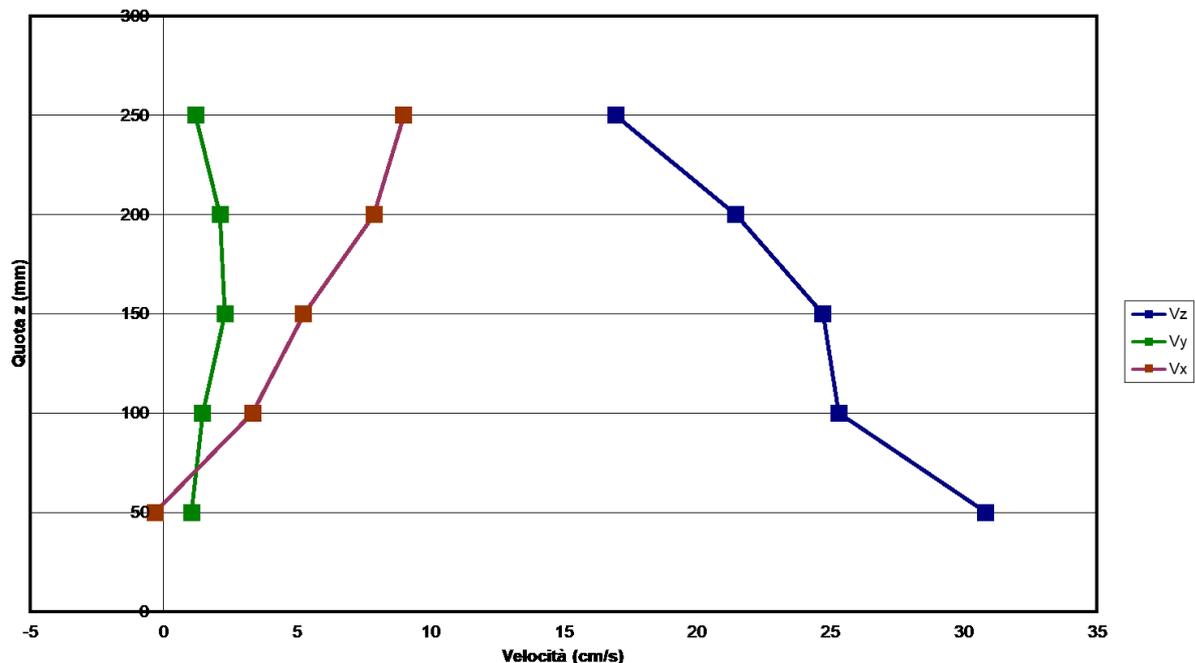


Grafico 8.2.6

Portata fissata in 15.01 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604B (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604B.xls, di cui, nella tabella 8.2.7, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604B - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,034188438	0	0	250	-0,212949219	-0,356142578	-1,361826172	2,872557757
1	15,0068	0	0	250	30,38683594	-1,575087891	13,93224609	40,59140197
2	15,01062813	0	0	200	34,1409082	2,230917969	12,96006836	42,75336681
3	15,02480313	0	0	150	39,73376953	5,656328125	10,22623047	45,74844289
4	15,02070625	0	0	100	42,0352832	6,553876953	6,359902344	47,46729334
5	14,99040313	0	0	50	45,92019531	4,246445312	1,724052734	50,42303096
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
15,01066813 (kg/s)		43,36 (cm/s)			41,69630035 (cm/s)			

Tabella 8.2.7

Componenti della velocità in x=0, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=15,01 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604B. Run da 1 a 5.

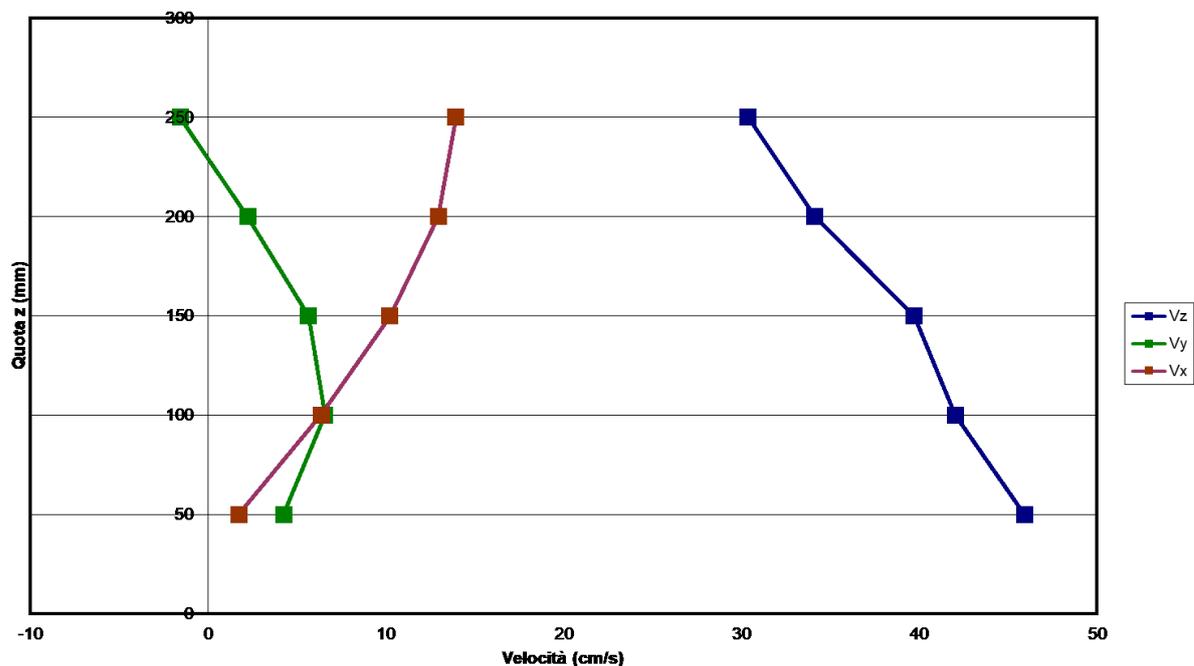


Grafico 8.2.7

Portata fissata in 19.88 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604G (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604G.xls, di cui, nella tabella 8.2.8, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604G - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,0337925	0	0	250	-0,315625	-0,312626953	-1,22875	2,627549648
1	19,86748125	0	0	250	40,78145508	3,098017578	18,53428711	52,03808545
2	19,91455	0	0	200	49,31894531	7,950810547	15,28743164	57,58794377
3	19,85300938	0	0	150	53,60154297	8,462275391	11,74818359	60,82599639
4	19,8949125	0	0	100	57,39137695	10,08338867	10,07973633	65,10252365
5	19,8558125	0	0	50	61,82600586	7,739609375	4,419638672	67,60350725
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
19,87715313 (kg/s)					57,418 (cm/s)		55,21431424 (cm/s)	

Tabella 8.2.8

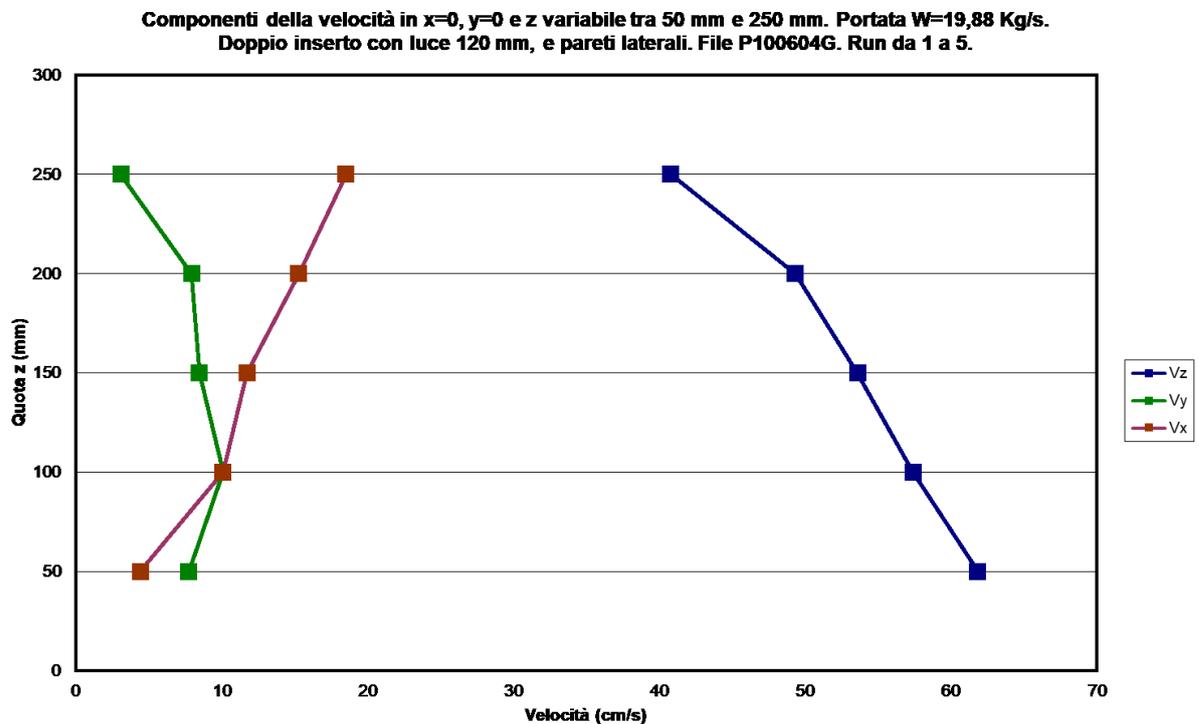


Grafico 8.2.8

Nella figura 8.2.3 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $x = 50$ mm, e z variabile da 250 mm a 50 mm.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Nel seguito si riportano i risultati delle misurazioni effettuate, nei punti indicati in figura, con 4 diverse portate: ~ 5 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s.

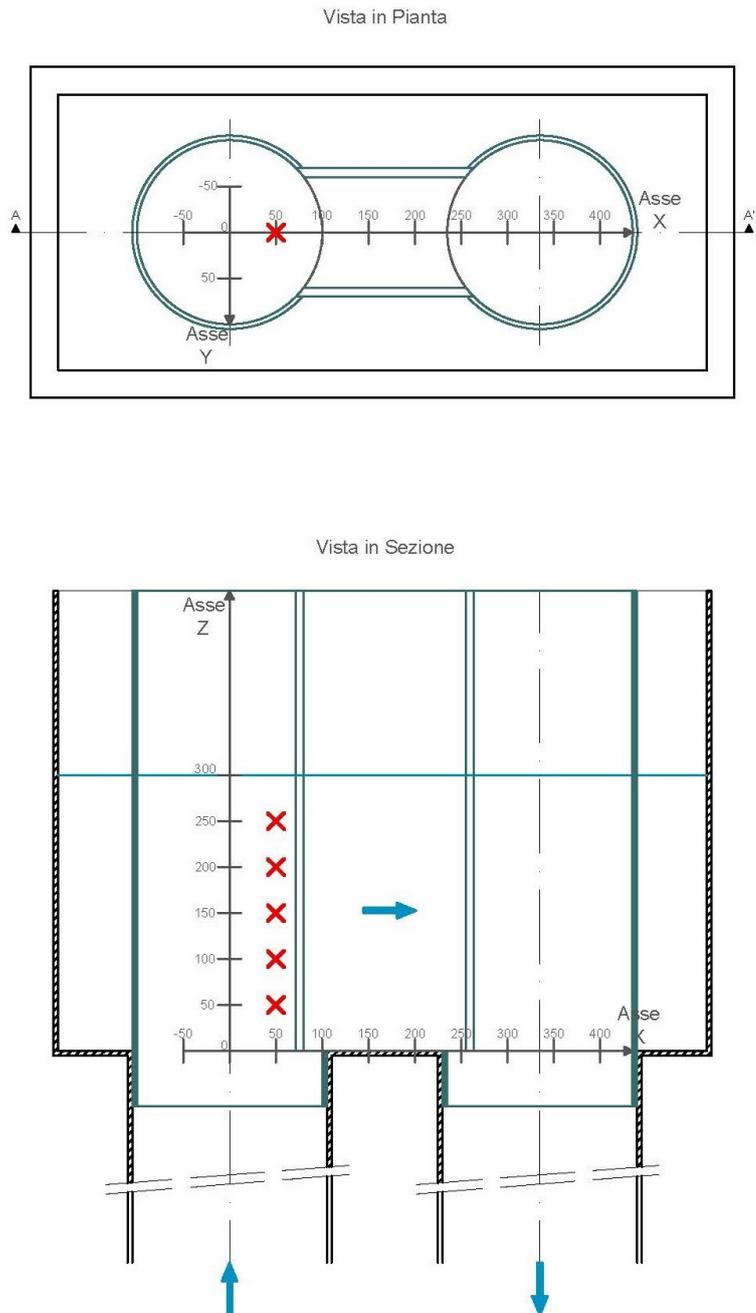


Figura 8.2.3

Portata fissata in 5.45 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604C (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604C.xls, di cui, nella tabella 8.2.9, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604C - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,034790313	50	0	250	0,74671875	0,098603516	-0,57545898	17,04642573
1	5,434234375	50	0	250	10,21398438	1,494199219	8,632460937	16,30305387
2	5,466978125	50	0	200	13,21513672	0,591503906	7,703798828	18,23348545
3	5,452346875	50	0	150	11,44614258	1,810537109	7,434453125	15,96932782
4	5,453259375	50	0	100	12,5034082	-0,264892578	6,810712891	17,62673809
5	5,46116875	50	0	50	18,47589844	0,012529297	4,589228516	21,43403133
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
5,4535975 (kg/s)		15,753 (cm/s)			15,14888194 (cm/s)			

Tabella 8.2.9

**Componenti della velocità in x=50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=5.45 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604C. Run da 1 a 5.**

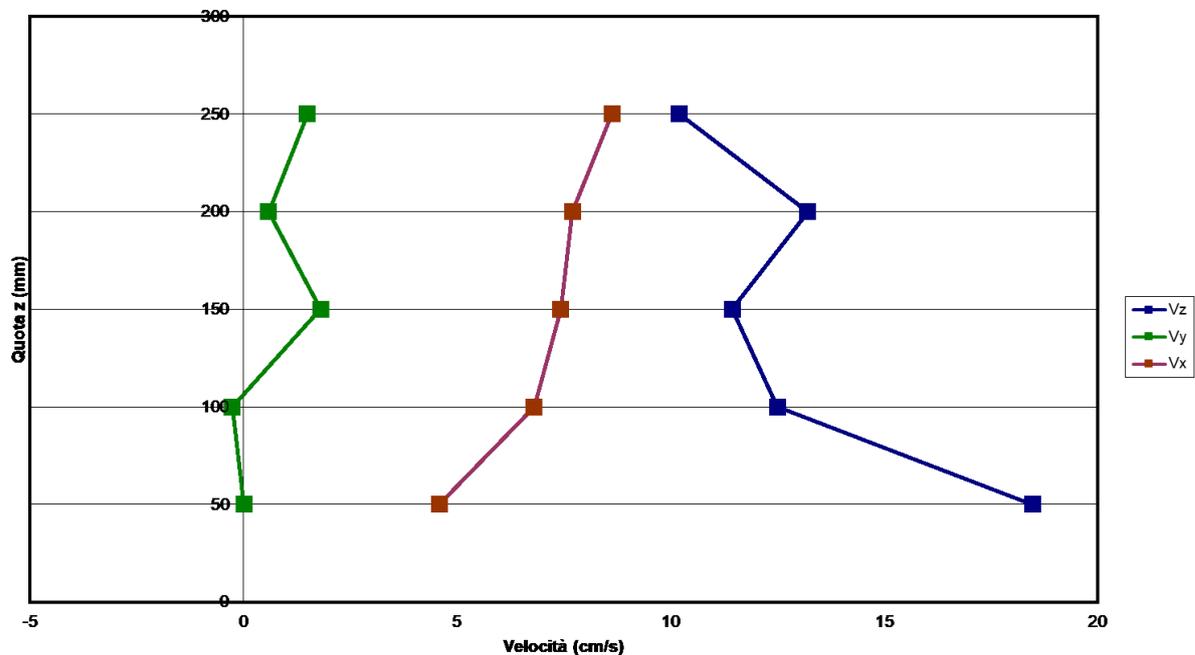


Grafico 8.2.9

Portata fissata in 10.05 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604H (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604H.xls, di cui, nella tabella 8.2.10, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604H - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,03392875	50	0	250	0,532207031	-0,394677734	-0,733027344	4,493872412
1	10,03495	50	0	250	17,72460938	-0,549013672	19,07702148	30,30287863
2	10,048875	50	0	200	22,01745117	2,355849609	17,511875	31,73509126
3	10,05549375	50	0	150	24,01851563	5,235634766	13,82636719	33,09926913
4	10,0483	50	0	100	23,21799805	2,392568359	11,68022461	30,05778432
5	10,03866875	50	0	50	29,3724707	-1,849619141	9,195058594	33,83635233
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
10,0452575 (kg/s)					29,017 (cm/s)		27,90349306 (cm/s)	

Tabella 8.2.10

**Componenti della velocità in x=50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=10,05 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604H. Run da 1 a 5.**

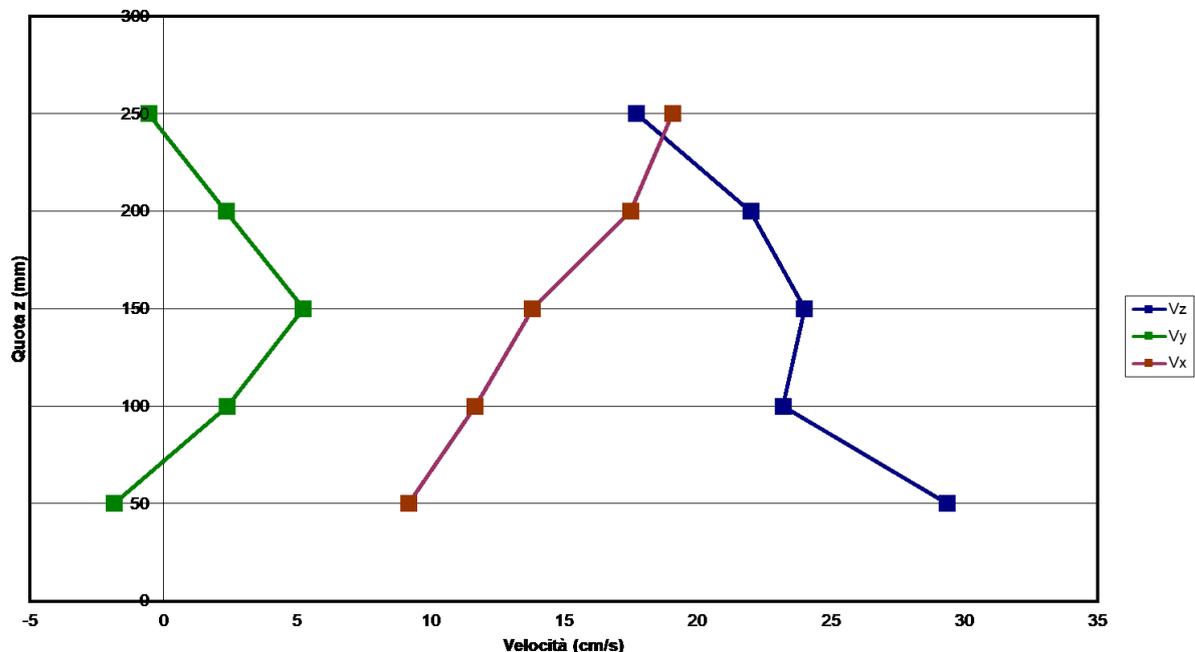


Grafico 8.2.10

Portata fissata in 15.00 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604C (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604C.xls, di cui, nella tabella 8.2.11, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604C - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,033198125	50	0	250	0,811455078	-0,311474609	-1,249365234	3,323372868
1	15,002775	50	0	250	27,20334961	3,153837891	25,83805664	42,93119907
2	14,99599063	50	0	200	30,36583008	5,388583984	24,16048828	45,46347068
3	15,0148875	50	0	150	32,98274414	3,944199219	21,87506836	45,28179584
4	14,99688438	50	0	100	37,71949219	5,58828125	19,59371094	48,43408706
5	15,0043875	50	0	50	41,81069336	-1,552412109	15,74885742	48,98756951
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
15,002985 (kg/s)				43,338 (cm/s)			41,67495833 (cm/s)	

Tabella 8.2.11

**Componenti della velocità in x=50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=15,00 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604C. Run da 1 a 5.**

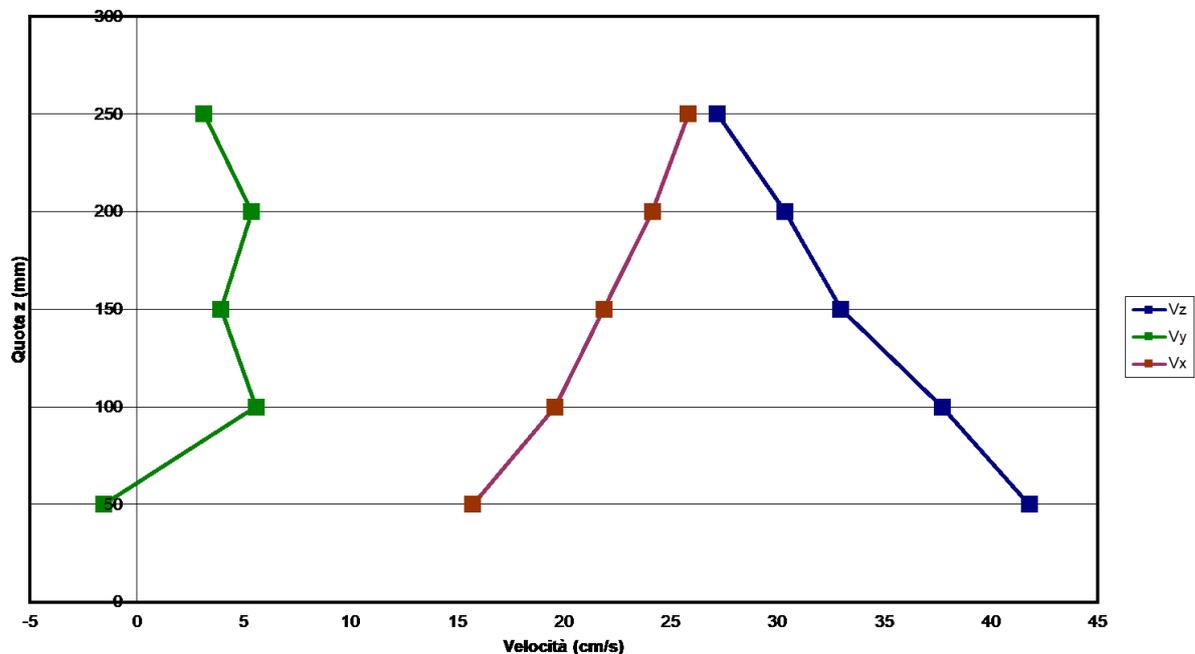


Grafico 8.2.11

Portata fissata in 19.90 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604H (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604H.xls, di cui, nella tabella 8.2.12, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604H - Run da 1 a 5									
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)	
0	0,032435625	50	0	250	0,251738281	-0,768515625	0,694580078	4,675417684	
1	19,88339063	50	0	250	37,64982422	-2,550859375	33,89643555	60,38076556	
2	19,86654688	50	0	200	31,27057617	6,533046875	31,3465332	58,09119393	
3	19,88565625	50	0	150	43,29152344	13,30866211	27,74816406	61,63477072	
4	19,95509063	50	0	100	51,38275391	4,715126953	26,11990234	64,08123322	
5	19,88391875	50	0	50	58,24685547	1,555654297	17,645	67,25974613	
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)		
19,89492063 (kg/s)				57,469 (cm/s)			55,2636684 (cm/s)		

Tabella 8.2.12

**Componenti della velocità in x=50, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=19,90 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604H. Run da 1 a 5.**

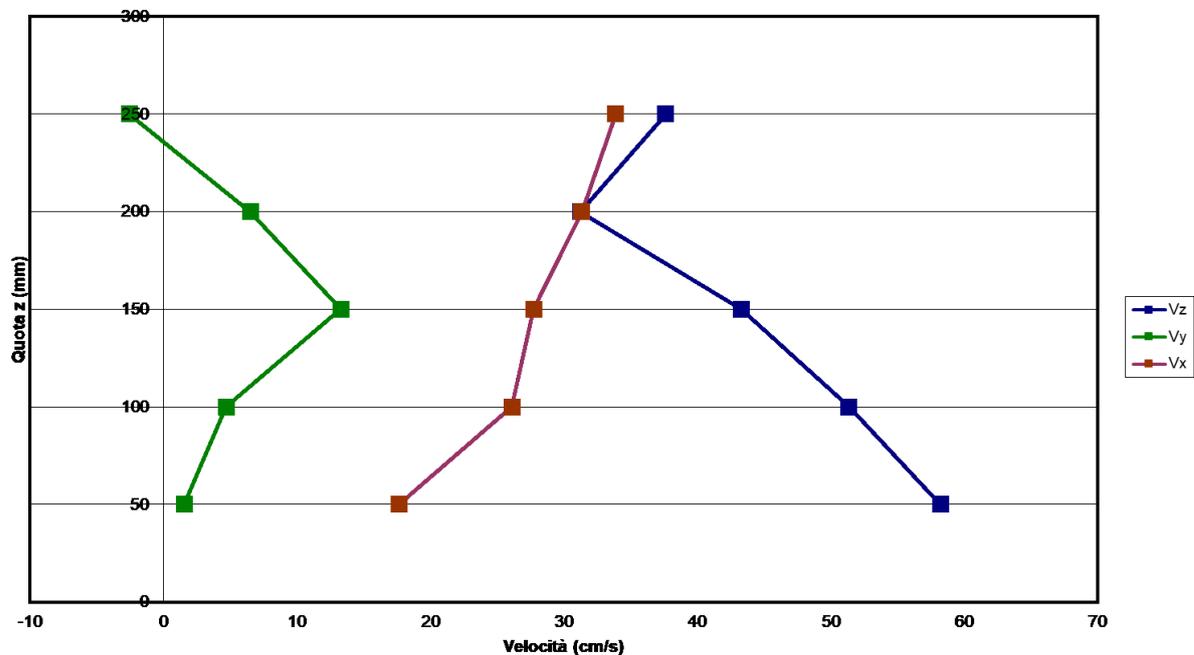


Grafico 8.2.12

Nella figura 8.2.4 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $x = 100$ mm, e z variabile da 250 mm a 50 mm.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Nel seguito si riportano i risultati delle misurazioni effettuate, nei punti indicati in figura, con 4 diverse portate: ~ 5 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s.

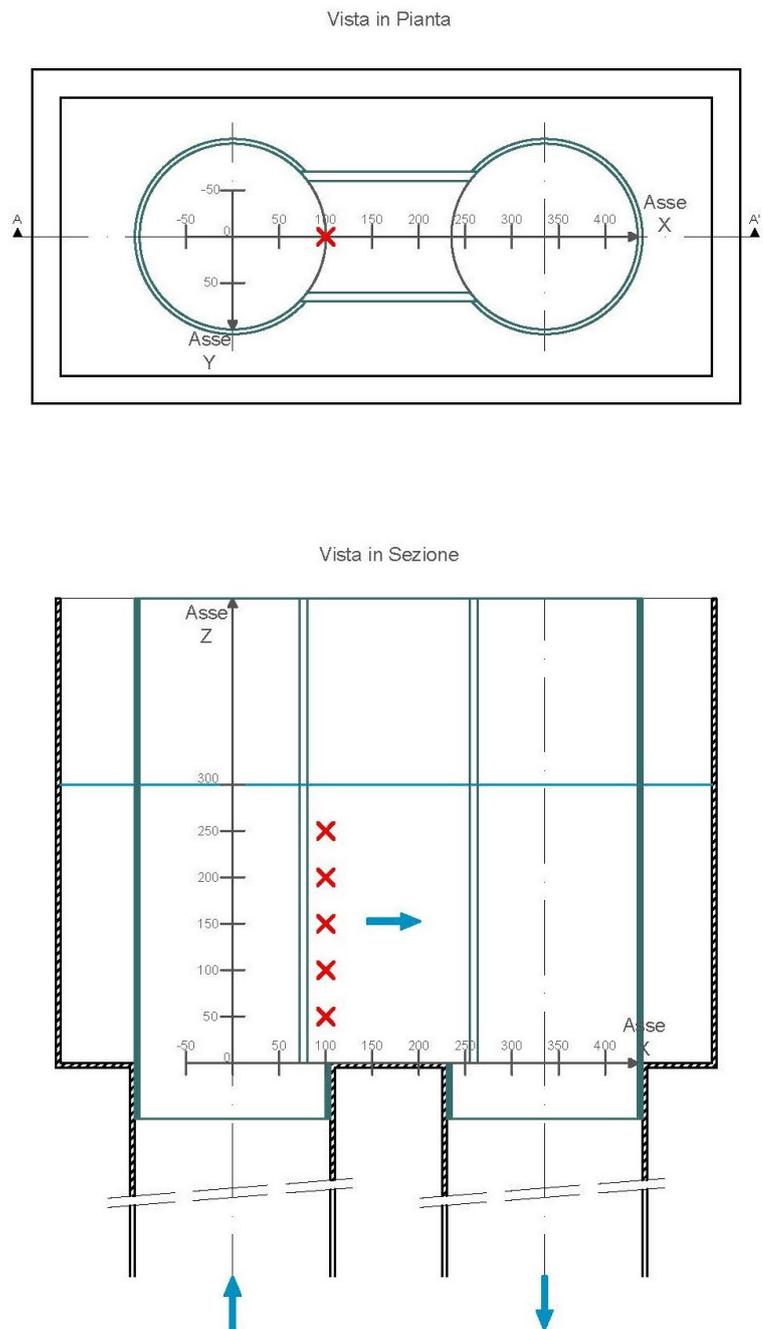


Figura 8.2.4

Portata fissata in 5.44 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604D (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604D.xls, di cui, nella tabella 8.2.13, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604D - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	2,739376563	100	0	250	-0,160771484	0,966826172	-0,385136719	11,89354566
1	5,45068125	100	0	250	9,397841797	1,070126953	13,25151367	19,2135324
2	5,45093125	100	0	200	11,12404297	1,429765625	13,63720703	21,09209459
3	5,4269125	100	0	150	9,499238281	0,690341797	12,1103125	19,31979078
4	5,44264375	100	0	100	8,659550781	0,845273438	12,31911133	19,13048595
5	5,43650625	100	0	50	15,17670898	-6,146542969	12,24383789	23,120888
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
5,441535 (kg/s)		15,719 (cm/s)			15,115375 (cm/s)			

Tabella 8.2.13

Componenti della velocità in x=100, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=5.44 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604D. Run da 1 a 5.

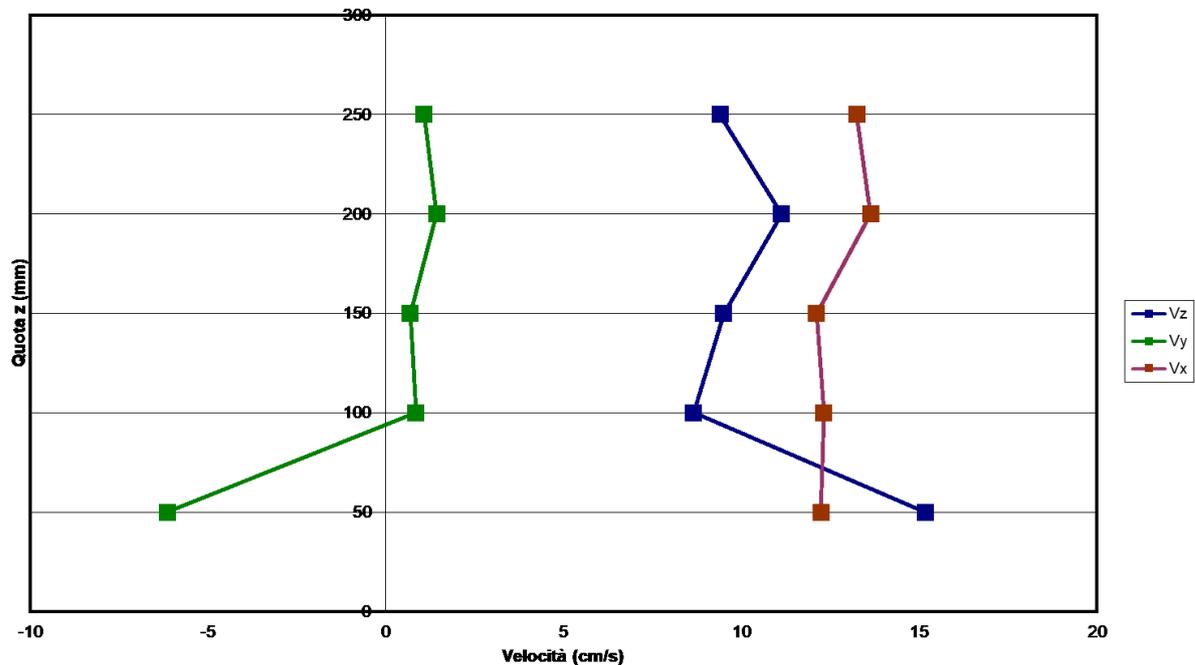


Grafico 8.2.13

Portata fissata in 10.03 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604I (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604I.xls, di cui, nella tabella 8.2.14, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604I - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,033415	100	0	250	0,131503906	-0,263457031	-1,328154297	3,955594165
1	10,04478125	100	0	250	15,2815332	-2,020722656	25,54128906	34,48734398
2	10,02405625	100	0	200	19,38383789	2,113486328	24,83652344	35,81087265
3	10,0126625	100	0	150	19,8046875	3,616386719	24,04255859	35,34807228
4	10,03003125	100	0	100	19,13135742	0,837685547	24,30430664	35,43013878
5	10,01491875	100	0	50	33,11005859	-2,099882813	20,03330078	42,6140202
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
10,02529 (kg/s)				28,959 (cm/s)			27,84802778 (cm/s)	

Tabella 8.2.14

**Componenti della velocità in x=100, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=10,03 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604I. Run da 1 a 5.**

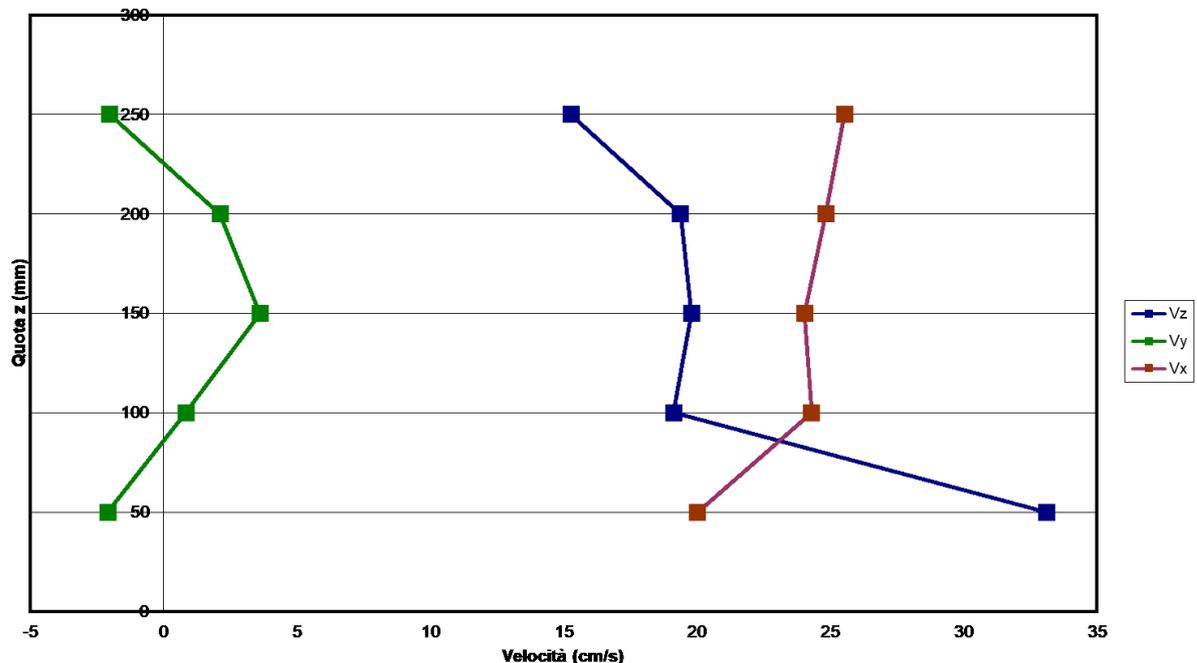


Grafico 8.2.14

Portata fissata in 14.99 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604D (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604D.xls, di cui, nella tabella 8.2.15, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604D - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,033042188	100	0	250	-0,084951172	-0,698320312	-0,553408203	4,148191743
1	14,99344063	100	0	250	25,27769531	-2,091650391	38,67280273	52,082516
2	14,99062813	100	0	200	25,16427734	-0,061103516	36,81493164	51,47697851
3	15,00275	100	0	150	23,93146484	5,427246094	33,49217773	47,75066058
4	14,99309688	100	0	100	25,92356445	3,48265625	34,24616211	49,88978665
5	14,98265	100	0	50	43,23964844	-4,17234375	33,11966797	59,96243297
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
14,99251313 (kg/s)				43,308 (cm/s)			41,64586979 (cm/s)	

Tabella 8.2.15

**Componenti della velocità in x=100, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=14,99 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604D. Run da 1 a 5.**

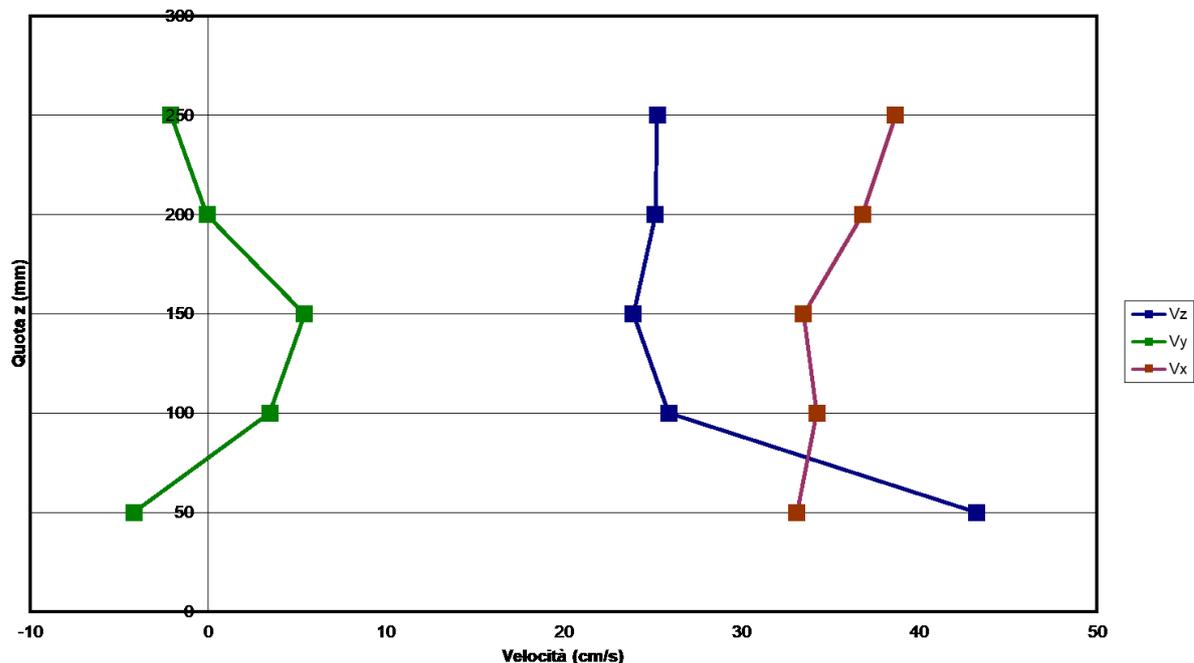


Grafico 8.2.15

Portata fissata in 19.93 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604I (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604I.xls, di cui, nella tabella 8.2.16, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604I - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,032065625	100	0	250	0,087841797	-0,086894531	-0,796279297	4,711051946
1	19,97705938	100	0	250	29,49503906	-1,948632813	49,1480957	65,29412337
2	19,94819688	100	0	200	32,83449219	-0,163886719	49,46682617	68,70666084
3	19,90414063	100	0	150	31,72773438	12,68367188	45,89041016	68,32288041
4	19,8946875	100	0	100	44,17391602	11,75782227	50,27765625	75,83152705
5	19,90895	100	0	50	58,51323242	-10,04216797	45,64461914	82,39871455
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
19,92660688 (kg/s)				57,5606 (cm/s)			55,35168576 (cm/s)	

Tabella 8.2.16

Componenti della velocità in x=100, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=19,93 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604I. Run da 1 a 5.

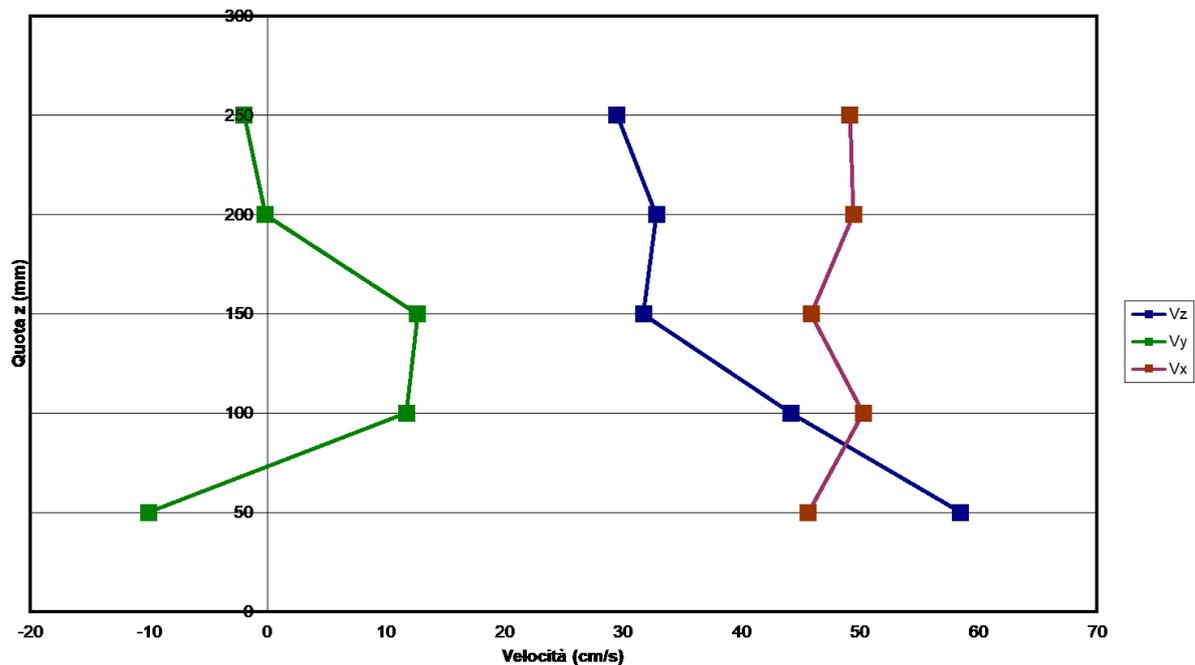


Grafico 8.2.16

Nella figura 8.2.5 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con doppio inserto, con luce di 120 mm, e pareti laterali, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target, ed il sistema di riferimento adottato.

Si può notare come il punto scelto per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato, è ubicato nella posizione $y = 0$ mm, $x = 150$ mm, e z variabile da 250 mm a 50 mm.

In ciascun punto di misurazione sono stati effettuati 1024 campionamenti per Run con frequenza di 20 Hz (durata del singolo campionamento di 0.05 s).

Nel seguito si riportano i risultati delle misurazioni effettuate, nei punti indicati in figura, con 4 diverse portate: ~ 5 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s.

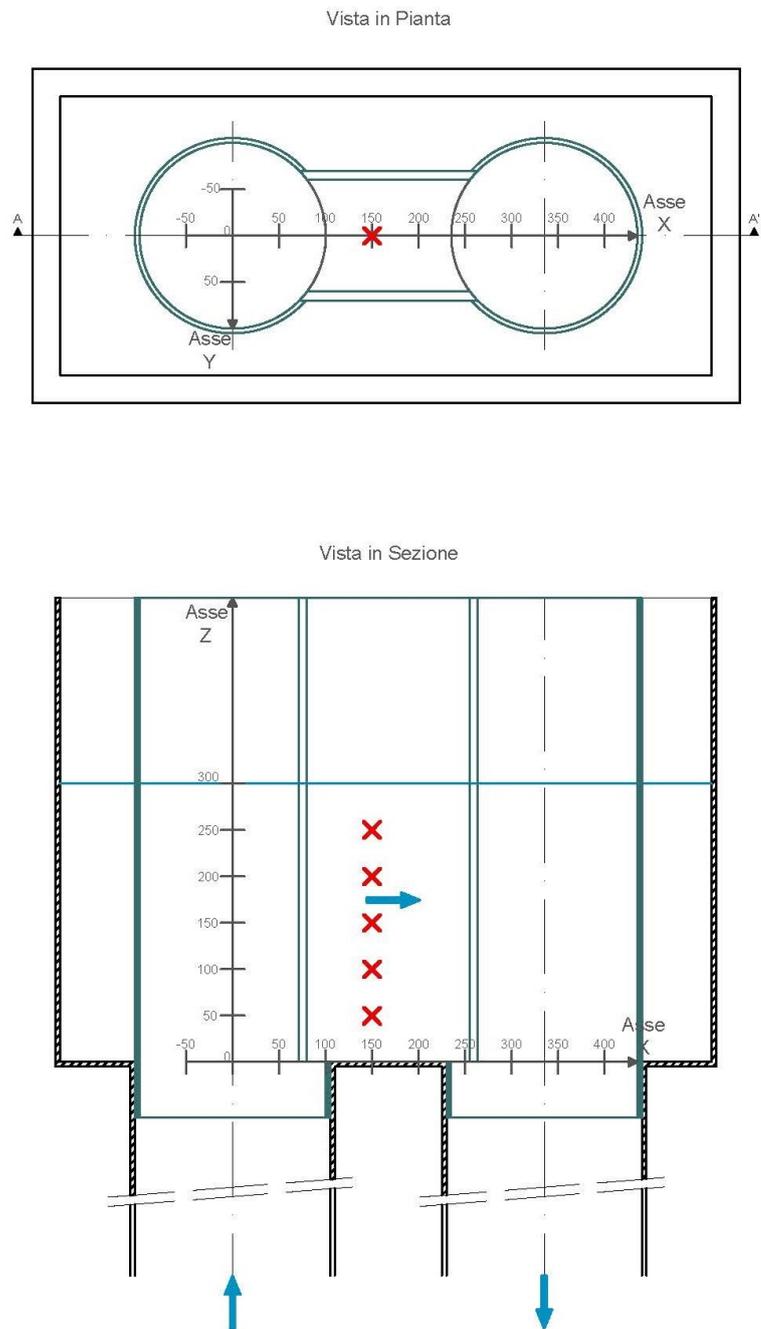


Figura 8.2.5

Portata fissata in 5.45 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604E (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604E.xls, di cui, nella tabella 8.2.17, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604E - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,03488875	150	0	250	0,352021484	-0,955048828	-1,272470703	7,606814707
1	5,4563	150	0	250	7,370625	2,923447266	12,49319336	18,6949194
2	5,454896875	150	0	200	7,687617188	-0,321298828	12,50649414	19,07146705
3	5,440053125	150	0	150	4,152832031	2,306152344	13,29979492	18,13996972
4	5,456040625	150	0	100	5,867871094	-0,0903125	13,88636719	19,83949406
5	5,4682625	150	0	50	3,835800781	-2,541962891	2,229296875	14,43960167
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
5,455110625 (kg/s)		15,758 (cm/s)			15,15308507 (cm/s)			

Tabella 8.2.17

Componenti della velocità in x=150, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=5.45 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604E. Run da 1 a 5.

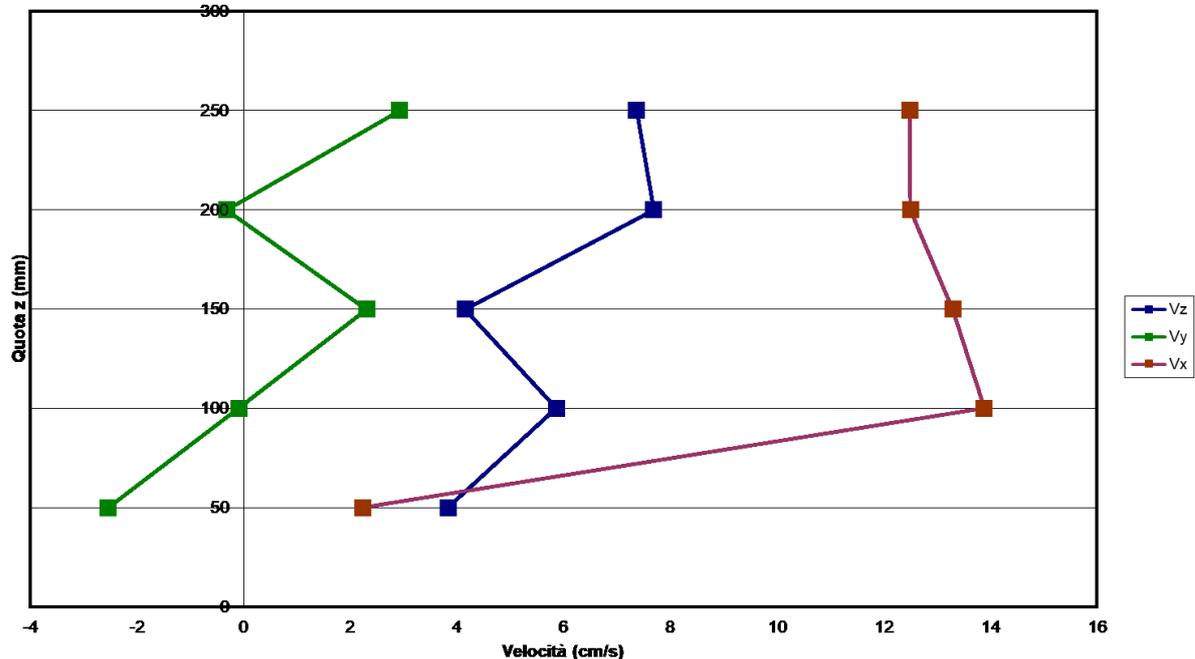


Grafico 8.2.17

Portata fissata in 10.06 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P090604L (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P090604L.xls, di cui, nella tabella 8.2.18, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P090604L - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,032535625	150	0	250	-0,188017578	-0,672236328	-1,672832031	5,408086586
1	10,04417188	150	0	250	12,23782227	-0,584316406	26,47053711	32,69147135
2	10,05825938	150	0	200	14,54544922	-2,254414063	26,31005859	34,79149591
3	10,0637125	150	0	150	10,84808594	1,859101563	24,69121094	31,35517351
4	10,05677188	150	0	100	8,048574219	-3,133798828	26,66932617	32,71134756
5	10,06001563	150	0	50	5,429462891	-4,696650391	3,959316406	19,64029506
Media delle portate					Velocità media condotto ingresso		Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
10,05658625 (kg/s)					29,05 (cm/s)		27,93496181 (cm/s)	

Tabella 8.2.18

Componenti della velocità in x=150, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=10,06 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P090604L. Run da 1 a 5.

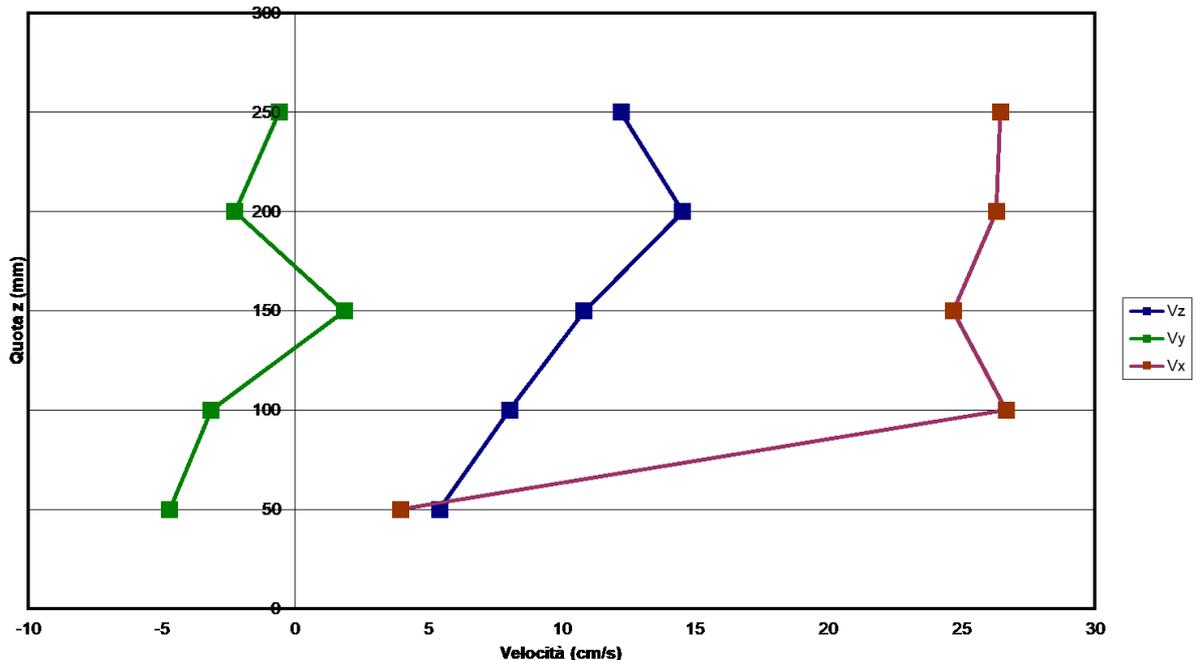


Grafico 8.2.18

Portata fissata in 15.01 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604E (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604E.xls, di cui, nella tabella 8.2.19, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604E - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,03291875	150	0	250	0,267080078	-0,295351563	-1,748925781	7,755762962
1	15,0014875	150	0	250	19,23683594	1,404716797	39,81770508	48,99490205
2	15,00220313	150	0	200	13,32869141	-0,318789062	36,16124023	44,29676884
3	15,0312625	150	0	150	16,45970703	5,862998047	40,01289063	48,79035056
4	15,00266875	150	0	100	11,88214844	-1,313310547	39,59652344	47,88777553
5	15,03459375	150	0	50	7,431425781	-7,382910156	14,97243164	33,49135085
Media delle portate				Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)	
15,01444313 (kg/s)		43,371 (cm/s)			41,70678646 (cm/s)			

Tabella 8.2.19

**Componenti della velocità in x=150, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=15,01 Kg/s.
 Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604E. Run da 1 a 5.**

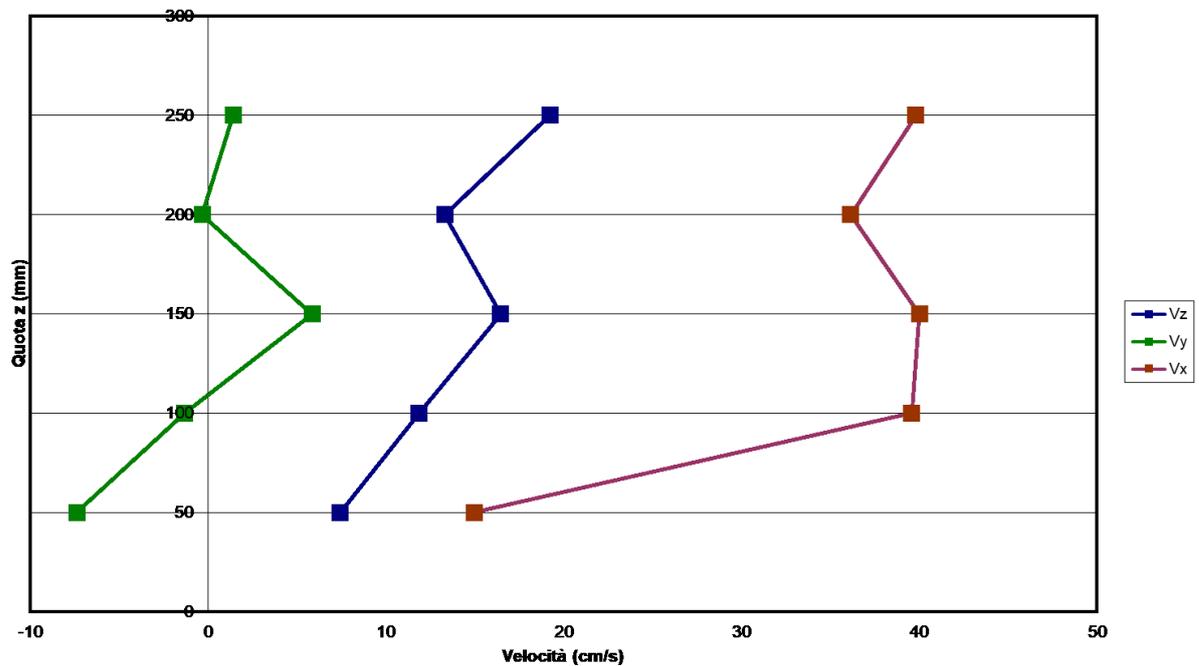


Grafico 8.2.19

Portata fissata in 19.91 kg/s.

I dati di portata e quelli di velocità, rilevati durante le misurazioni, sono riportati nel file P100604L (.dat, .adv, .vel), mentre le elaborazioni sui dati grezzi sono riportate nel file P100604L.xls, di cui, nella tabella 8.2.20, si riporta una sintesi dei dati analizzati, dal Run 1 al Run 5.

File P100604L - Run da 1 a 5								
Run	Portata (Kg/s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Avg (cm/s) Vz	Avg (cm/s) Vy	Avg (cm/s) Vx	Media modulo velocità (cm/s)
0	0,034471875	150	0	250	0,575107422	0,785634766	-1,08359375	5,267553308
1	19,94810938	150	0	250	21,98297852	-10,23827148	53,92378906	65,91719027
2	19,94027813	150	0	200	21,39808594	-5,58171875	51,26561523	63,21990884
3	19,88212813	150	0	150	19,4622168	10,61056641	48,9155957	61,58388373
4	19,91862813	150	0	100	13,54007813	-1,688330078	51,11022461	61,83575355
5	19,8549375	150	0	50	8,379082031	-8,508720703	12,82532227	39,11970453
Media delle portate		Velocità media condotto ingresso			Velocità media luce da 120 mm (H 300 mm)			
19,90881625 (kg/s)		57,5092 (cm/s)			55,30226736 (cm/s)			

Tabella 8.2.20

Componenti della velocità in x=150, y=0 e z variabile tra 50 mm e 250 mm. Portata W=19,91 Kg/s. Doppio inserto con luce 120 mm, e pareti laterali. File P100604L. Run da 1 a 5.

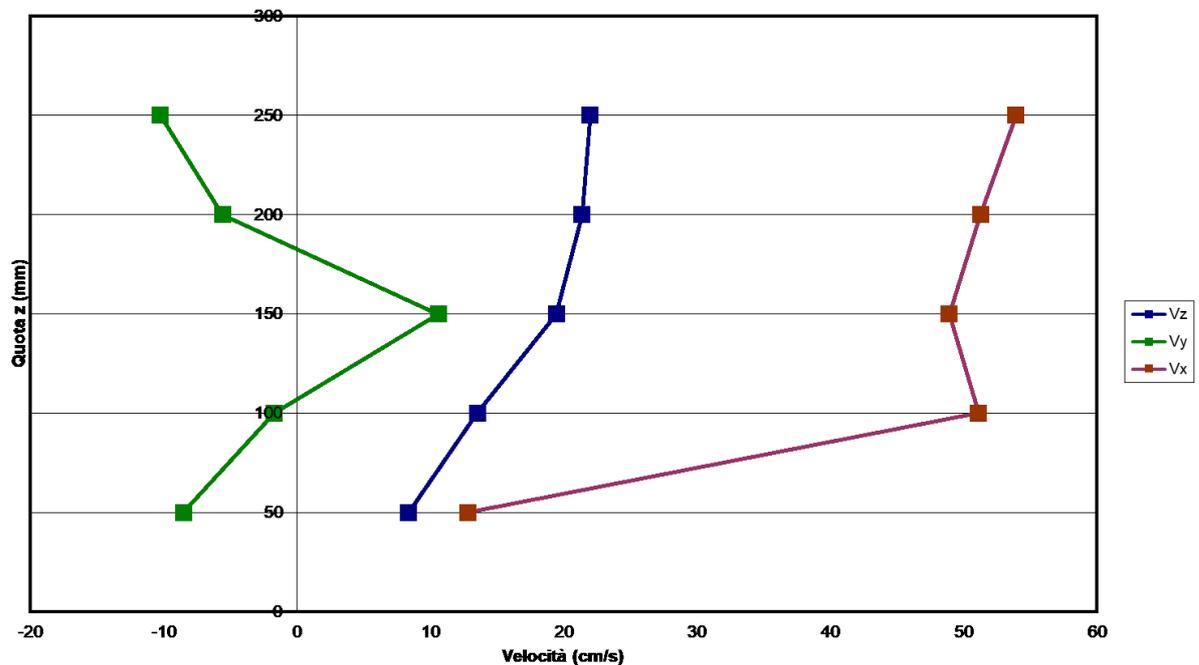


Grafico 8.2.20

Le componenti di velocità sopra riportate, sono state combinate in forma tabellare, ed elaborate in alcuni file Matlab che restituiscono le stesse sotto forma vettoriale, nel piano X-Z con $y = 0$, con 4 diverse portate: $\sim 5 \text{ kg/s}$, $\sim 10 \text{ kg/s}$, $\sim 15 \text{ kg/s}$, $\sim 20 \text{ kg/s}$.

Nella figura 8.2.6 si riporta la vista in pianta della vasca, con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm, in cui sono indicati i punti di misura all'interno del target ($y = 0 \text{ mm}$, z variabile da 50 mm a 250 mm ed x variabile da -50 mm a +150 mm), ed il sistema di riferimento adottato.

Punti di misura nella Vista in Pianta.
Configurazione con doppio inserto con luce 120 mm e pareti laterali.

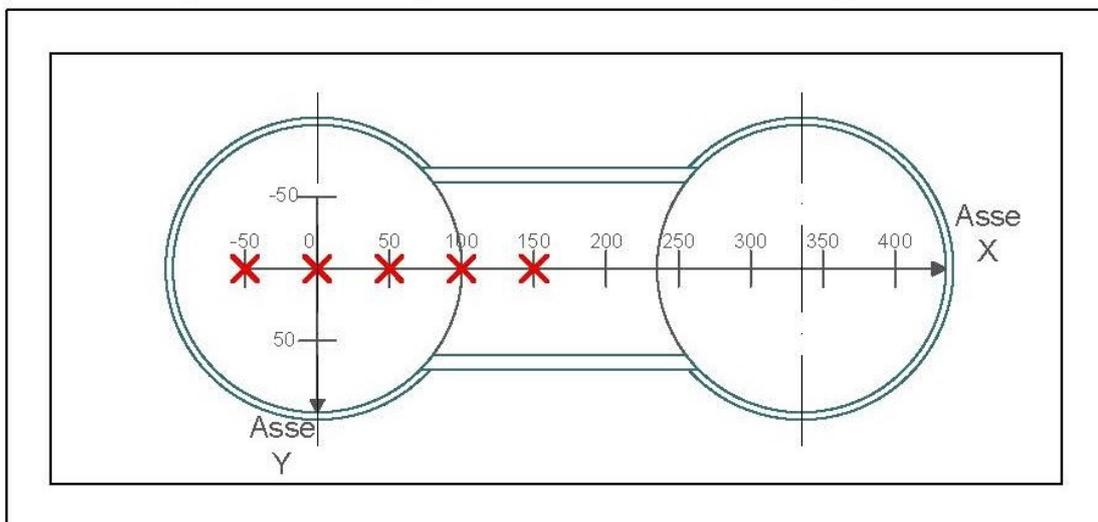


Figura 8.2.6

Portata fissata in 5.4 kg/s.

Le componenti di velocità, con portata di 5.4 kg/s, sono state combinate in forma tabellare nei file Portata5.xls (tabella 8.2.21), Portata5.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy0W5.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = 0$ (configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm).

Componenti di velocità nel piano $y=0$, portata $W=5.4$ Kg/s						
Presenza del doppio inserto con luce $L=120$ mm e pareti laterali						
Battente 300 mm						
x	y	z	Vz	Vy	Vx	File
-50	0	250	7,933047	-2,13745	-0,06468	p090604a
-50	0	200	9,835498	0,409609	-0,50221	
-50	0	150	12,33336	1,330605	-0,78989	
-50	0	100	13,85326	-0,08953	-2,7359	
-50	0	50	15,32558	2,556709	-2,83131	
0	0	250	7,942891	-4,13255	3,886221	p090604b
0	0	200	11,1716	-0,33782	4,702432	
0	0	150	13,29346	1,929912	3,15585	
0	0	100	15,73551	-0,1436	1,958174	
0	0	50	17,01293	0,068965	1,133506	
50	0	250	10,21398	1,494199	8,632461	p090604c
50	0	200	13,21514	0,591504	7,703799	
50	0	150	11,44614	1,810537	7,434453	
50	0	100	12,50341	-0,26489	6,810713	
50	0	50	18,4759	0,012529	4,589229	
100	0	250	9,397842	1,070127	13,25151	p090604d
100	0	200	11,12404	1,429766	13,63721	
100	0	150	9,499238	0,690342	12,11031	
100	0	100	8,659551	0,845273	12,31911	
100	0	50	15,17671	-6,14654	12,24384	
150	0	250	7,370625	2,923447	12,49319	p090604e
150	0	200	7,687617	-0,3213	12,50649	
150	0	150	4,152832	2,306152	13,29979	
150	0	100	5,867871	-0,09031	13,88637	
150	0	50	3,835801	-2,54196	2,229297	

Tabella 8.2.21

In figura 8.2.7 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = 0$, configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm, portata fissata in 5.4 kg/s.

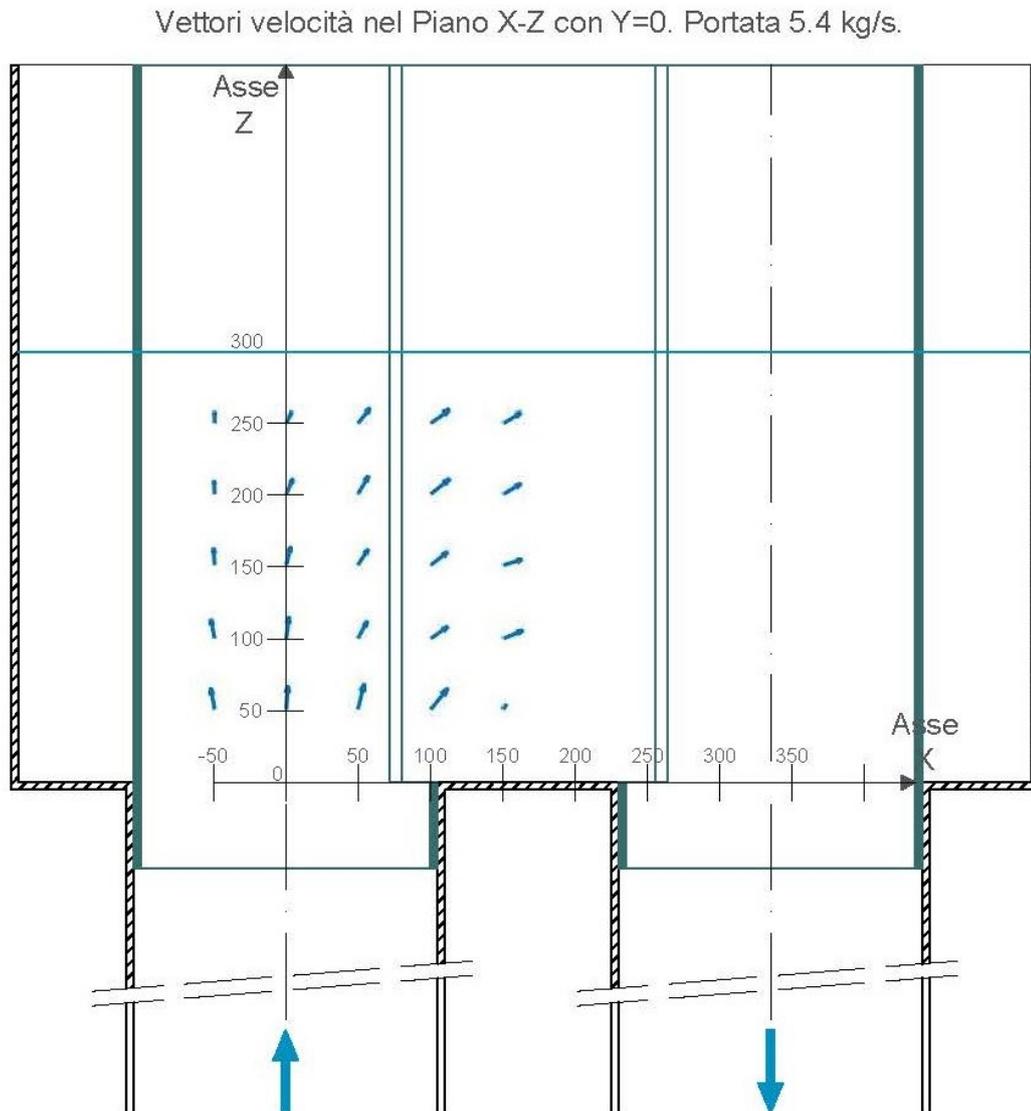


Figura 8.2.7

Portata fissata in 10 kg/s.

Le componenti di velocità, con portata di 10 kg/s, sono state combinate in forma tabellare nei file Portata10.xls (tabella 8.2.22), Portata10.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy0W10.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = 0$ (configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm).

Componenti di velocità nel piano $y=0$, portata $W=10.0$ Kg/s						
Presenza del doppio inserto con luce $L=120$ mm e pareti laterali						
Battente 300 mm						
x	y	z	Vz	Vy	Vx	File
-50	0	250	16,95247	3,634492	6,06335	p090604f
-50	0	200	19,56371	3,106699	3,727051	
-50	0	150	23,67239	3,520908	3,077246	
-50	0	100	28,46776	3,538896	0,08125	
-50	0	50	29,01229	5,138828	-1,0438	
0	0	250	16,96208	1,201221	9,009844	p090604g
0	0	200	21,46358	2,126143	7,886641	
0	0	150	24,72616	2,303916	5,244307	
0	0	100	25,32877	1,463281	3,335195	
0	0	50	30,83626	1,051221	-0,31933	
50	0	250	17,72461	-0,54901	19,07702	p090604h
50	0	200	22,01745	2,35585	17,51188	
50	0	150	24,01852	5,235635	13,82637	
50	0	100	23,218	2,392568	11,68022	
50	0	50	29,37247	-1,84962	9,195059	
100	0	250	15,28153	-2,02072	25,54129	p090604i
100	0	200	19,38384	2,113486	24,83652	
100	0	150	19,80469	3,616387	24,04256	
100	0	100	19,13136	0,837686	24,30431	
100	0	50	33,11006	-2,09988	20,0333	
150	0	250	12,23782	-0,58432	26,47054	p090604l
150	0	200	14,54545	-2,25441	26,31006	
150	0	150	10,84809	1,859102	24,69121	
150	0	100	8,048574	-3,1338	26,66933	
150	0	50	5,429463	-4,69665	3,959316	

Tabella 8.2.22

In figura 8.2.8 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = 0$, configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm, portata fissata in 10 kg/s.

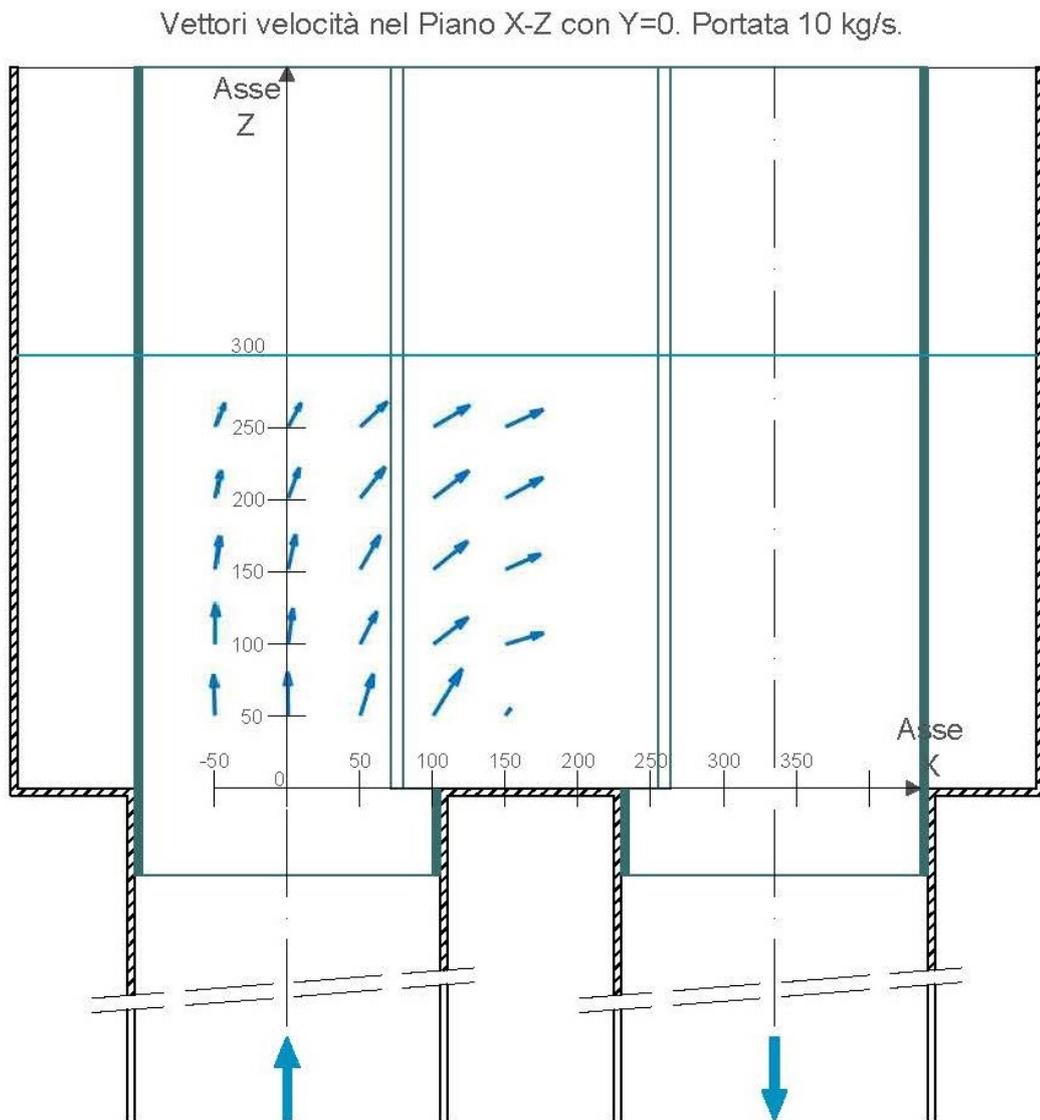


Figura 8.2.8

Portata fissata in 15 kg/s.

Le componenti di velocità, con portata di 15 kg/s, sono state combinate in forma tabellare nei file Portata15.xls (tabella 8.2.23), Portata15.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy0W15.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = 0$ (configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm).

Componenti di velocità nel piano $y=0$, portata $W=15.0$ Kg/s						
Presenza del doppio inserto con luce $L=120$ mm e pareti laterali						
Battente 300 mm						
x	y	z	Vz	Vy	Vx	File
-50	0	250	22,48657	2,199268	5,794941	p100604a
-50	0	200	37,50837	5,468125	3,421865	
-50	0	150	36,59913	8,759336	1,837598	
-50	0	100	44,35658	9,068174	-1,67002	
-50	0	50	46,48115	10,31889	-1,71766	
0	0	250	30,38684	-1,57509	13,93225	p100604b
0	0	200	34,14091	2,230918	12,96007	
0	0	150	39,73377	5,656328	10,22623	
0	0	100	42,03528	6,553877	6,359902	
0	0	50	45,9202	4,246445	1,724053	
50	0	250	27,20335	3,153838	25,83806	p100604c
50	0	200	30,36583	5,388584	24,16049	
50	0	150	32,98274	3,944199	21,87507	
50	0	100	37,71949	5,588281	19,59371	
50	0	50	41,81069	-1,55241	15,74886	
100	0	250	25,2777	-2,09165	38,6728	p100604d
100	0	200	25,16428	-0,0611	36,81493	
100	0	150	23,93146	5,427246	33,49218	
100	0	100	25,92356	3,482656	34,24616	
100	0	50	43,23965	-4,17234	33,11967	
150	0	250	19,23684	1,404717	39,81771	p100604e
150	0	200	13,32869	-0,31879	36,16124	
150	0	150	16,45971	5,862998	40,01289	
150	0	100	11,88215	-1,31331	39,59652	
150	0	50	7,431426	-7,38291	14,97243	

Tabella 8.2.23

In figura 8.2.9 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = 0$, configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm, portata fissata in 15 kg/s.

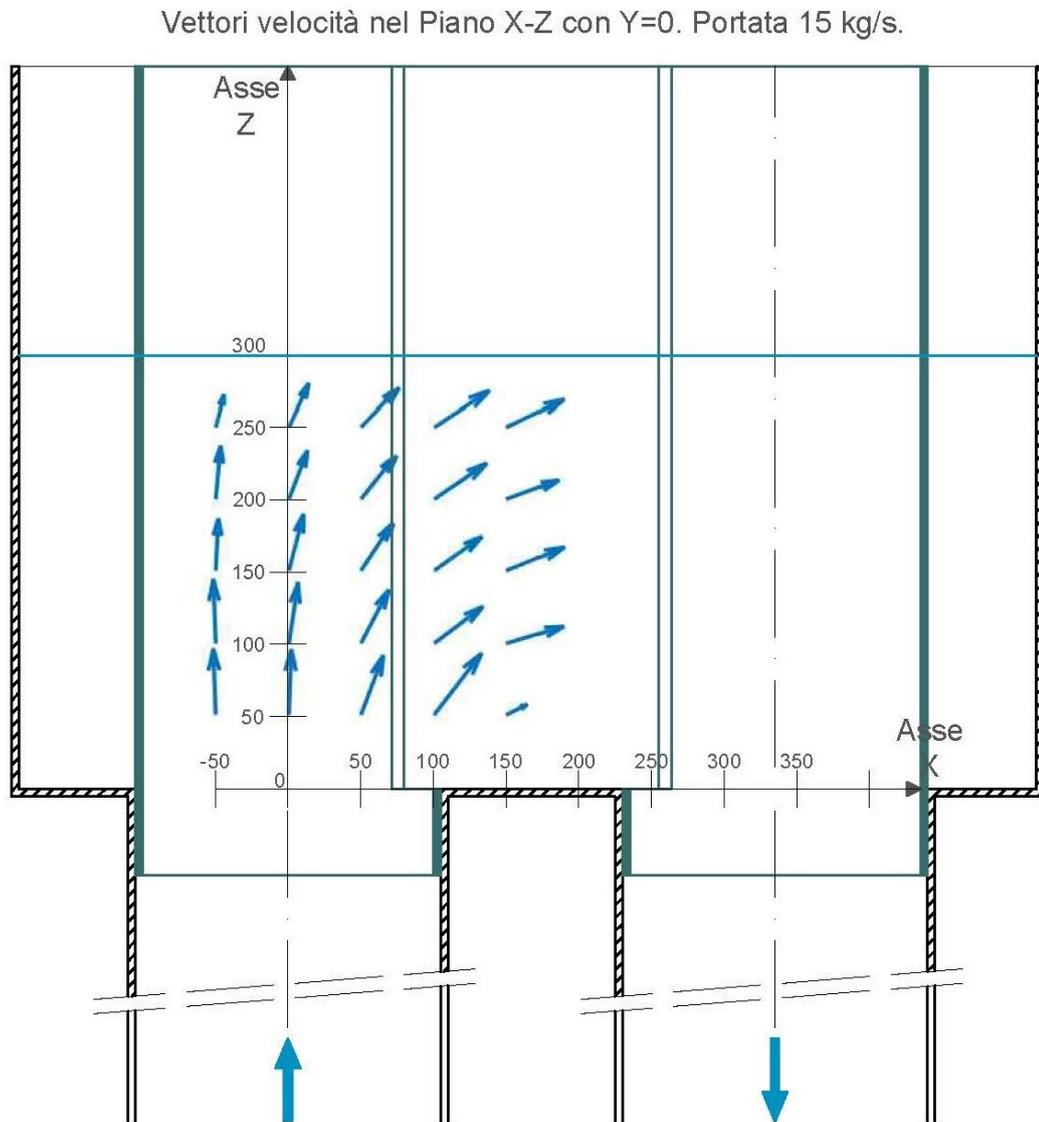


Figura 8.2.9

Portata fissata in 20 kg/s.

Le componenti di velocità, con portata di 20 kg/s, sono state combinate in forma tabellare nei file Portata20.xls (tabella 8.2.24), Portata20.dat, ed elaborate nel file Matlab vel2dy0W20.m, che restituisce le stesse sotto forma vettoriale nel piano X-Z con $y = 0$ (configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm).

Componenti di velocità nel piano $y=0$, portata $W=19.9$ Kg/s						
Presenza del doppio inserto con luce $L=120$ mm e pareti laterali						
Battente 300 mm						
x	y	z	Vz	Vy	Vx	File
-50	0	250	36,69581	-0,1294	9,208096	p100604f
-50	0	200	51,18734	11,58178	6,82917	
-50	0	150	53,76807	12,63678	3,903682	
-50	0	100	63,01061	15,02892	0,933262	
-50	0	50	66,507	14,08428	-2,07926	
0	0	250	40,78146	3,098018	18,53429	p100604g
0	0	200	49,31895	7,950811	15,28743	
0	0	150	53,60154	8,462275	11,74818	
0	0	100	57,39138	10,08339	10,07974	
0	0	50	61,82601	7,739609	4,419639	
50	0	250	37,64982	-2,55086	33,89644	p100604h
50	0	200	31,27058	6,533047	31,34653	
50	0	150	43,29152	13,30866	27,74816	
50	0	100	51,38275	4,715127	26,1199	
50	0	50	58,24686	1,555654	17,645	
100	0	250	29,49504	-1,94863	49,1481	p100604i
100	0	200	32,83449	-0,16389	49,46683	
100	0	150	31,72773	12,68367	45,89041	
100	0	100	44,17392	11,75782	50,27766	
100	0	50	58,51323	-10,0422	45,64462	
150	0	250	21,98298	-10,2383	53,92379	p100604l
150	0	200	21,39809	-5,58172	51,26562	
150	0	150	19,46222	10,61057	48,9156	
150	0	100	13,54008	-1,68833	51,11022	
150	0	50	8,379082	-8,50872	12,82532	

Tabella 8.2.24

In figura 8.2.10 si riportano i vettori di velocità nel piano X-Z con $y = 0$, configurazione con doppio inserto con luce 120 mm, e battente 300 mm, portata fissata in 20 kg/s.

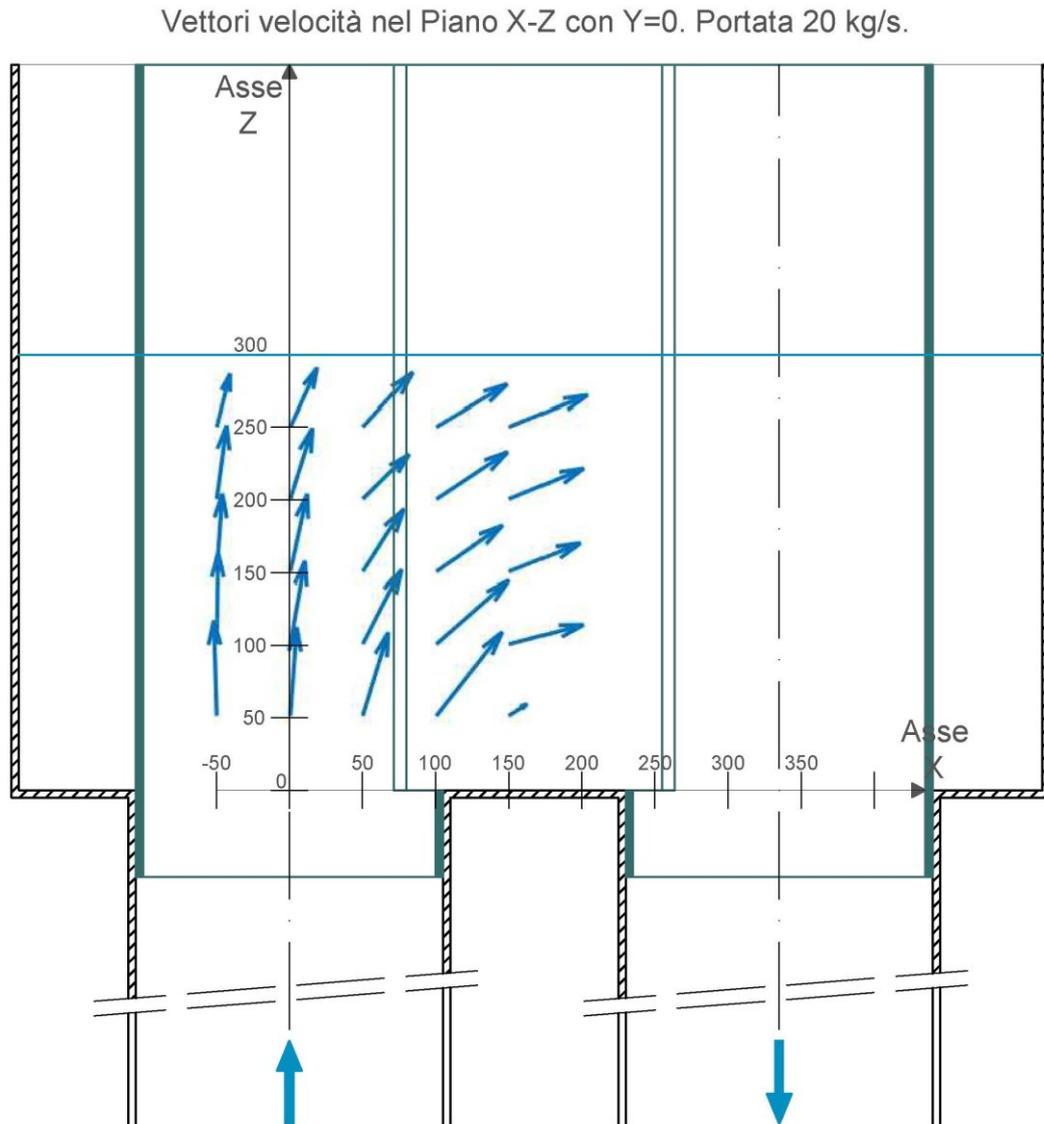


Figura 8.2.10

8.3. CARATTERIZZAZIONE PROFILO D'INTERFACCIA

In questa sessione di prove si sono effettuate delle misure di livello, con l'intento di caratterizzare il profilo d'interfaccia dell'acqua all'interno del target a "canale".

Nella figura 8.3.1 si riporta la vista in pianta ed in sezione della vasca, con doppio inserto con luce di 120 mm e pareti laterali, in cui sono indicati i punti di misura del livello all'interno del target, sulla mezzaria ($y = 0$), ed il sistema di riferimento adottato. Si può notare come i punti scelti per le misurazioni, nel sistema di riferimento indicato in figura, sono ubicati nella posizione $y = 0$ mm, $z = 300$ mm (battente iniziale con acqua in quiete), ed x variabile da -50 mm a $+250$ mm.

In ciascun punto si sono svolte 10 misurazioni di livello con 4 diverse portate: ~ 5.4 kg/s, ~ 10 kg/s, ~ 15 kg/s, ~ 20 kg/s.

Nel seguito si riporta un estratto, sotto forma tabellare, dei file utilizzati per l'elaborazione delle misurazioni effettuate, dove sono indicati i file di portata (.dat), ed a seguire i relativi grafici, dove si riporta la variazione di livello nella mezzaria del target, rispetto al battente iniziale di 300 mm, ad una data portata.

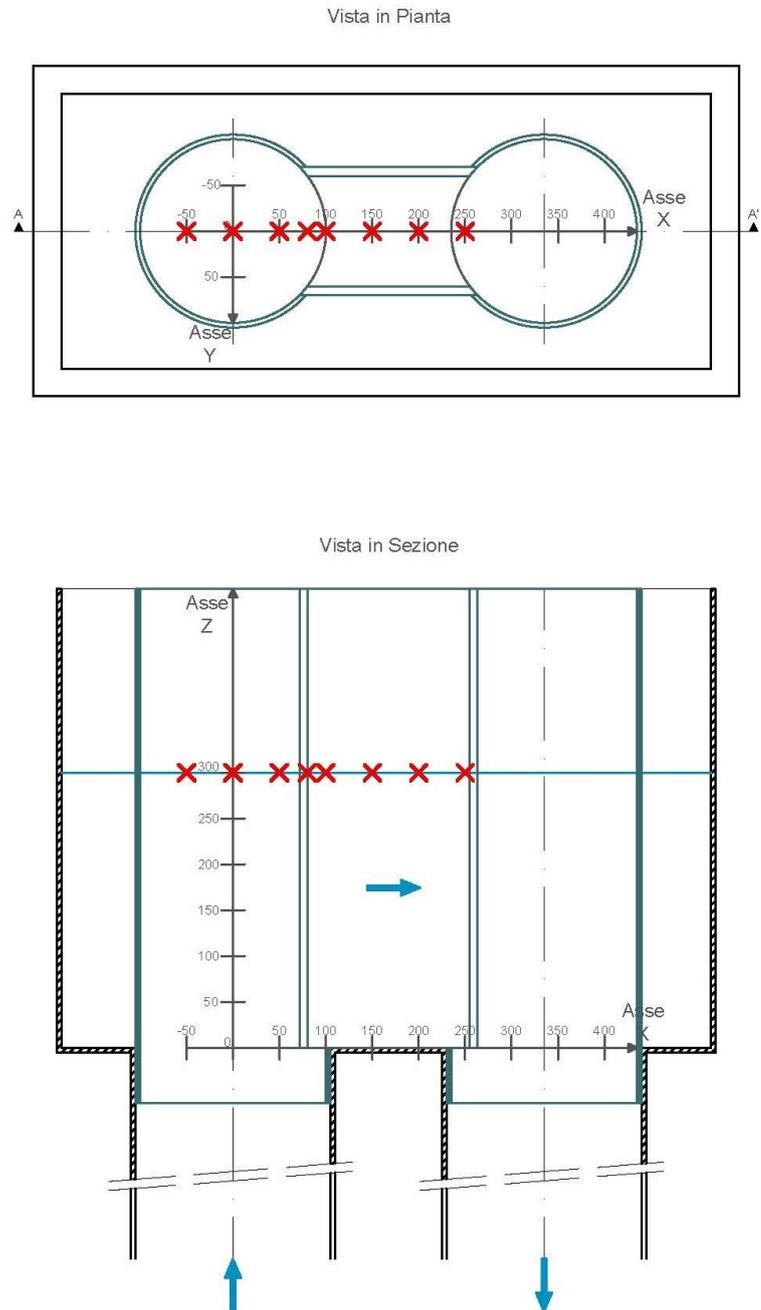


Figura 8.3.1

File excel: Livelli5								
Misure di livello al variare di x sulla mezzaria (y=0)								
Portata costante: W= 5.4 Kg/s								
File di portata P210704g (per x=-50;0;50), P210704h (per gli x restanti)								
10 misurazioni di livello per ciascuna x								
h0: variazione di livello rispetto al battente iniziale (300 mm)								
	x (mm)							
	-50	0	50	80	100	150	200	250
h0 (mm)	1,84	1,91	1,6	1,97	0,46	-0,29	-0,51	0
h0 (mm)	1,52	0,98	1,67	1,4	0,23	0,08	-0,07	-0,58
h0 (mm)	2,15	2,43	2,38	0,4	1,39	0,11	-0,23	0,18
h0 (mm)	1,2	1,92	1,09	0,8	1,23	-0,37	-0,53	-0,37
h0 (mm)	1,22	1,31	1,41	1,45	0,44	-0,25	-0,33	-0,38
h0 (mm)	2,03	2,16	2,51	0,88	1,37	0,14	-0,05	-0,61
h0 (mm)	0,92	0,72	1,14	1,41	0,97	0,78	-0,06	-0,5
h0 (mm)	1,95	1,85	2,27	0,23	1,31	0,01	-0,76	-0,1
h0 (mm)	0,93	2,98	1,23	2,02	0,19	-0,49	-0,29	-0,41
h0 (mm)	1,91	1,73	1,36	0,6	1,16	0,56	-0,62	-0,03
h0medio	1,567	1,799	1,666	1,116	0,875	0,028	-0,345	-0,28

Tabella 8.3.1

Variation of level at varying x in the mezzaria (y=0), W=5.4 Kg/s, double insert with L=120 mm and lateral walls, flap 300 mm, flow rate P210704g/h, excel file Livelli5

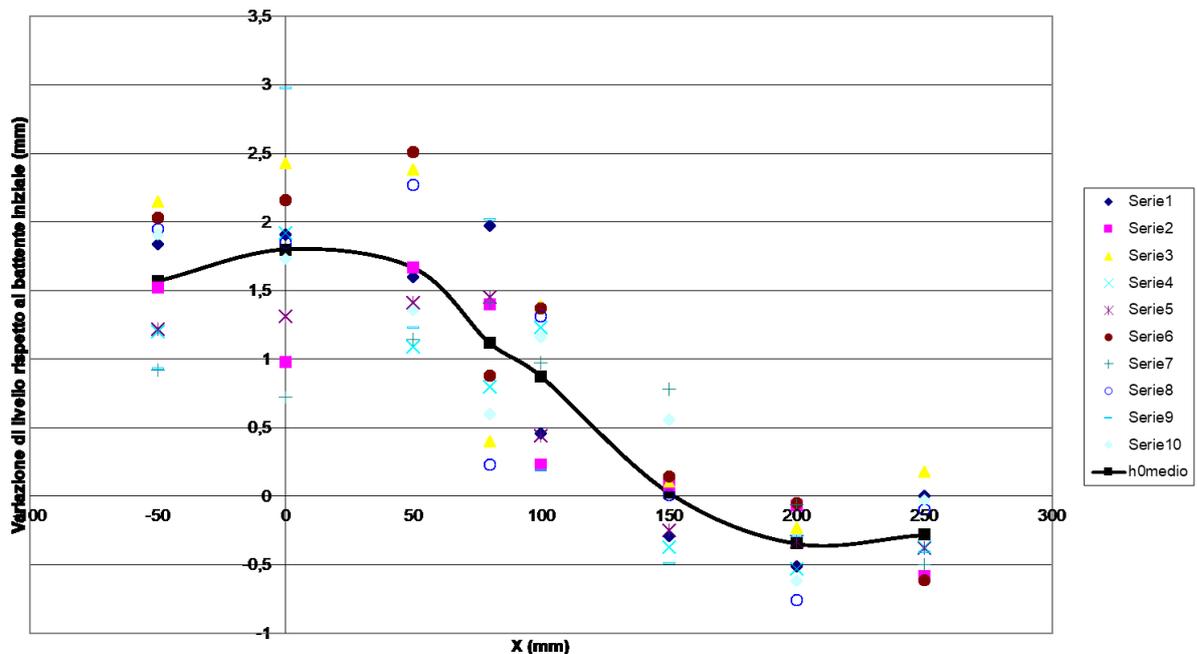


Grafico 8.3.1

File excel: Livelli10								
Misure di livello al variare di x sulla mezzaria (y=0)								
Portata costante: W= 10 Kg/s								
File di portata P210704f								
10 misurazioni di livello per ciascuna x								
h0: variazione di livello rispetto al battente iniziale (300 mm)								
	x (mm)							
	-50	0	50	80	100	150	200	250
h0 (mm)	4,35	7,37	5,76	4,08	3,92	2,22	-0,5	-0,96
h0 (mm)	7,23	8,64	6,93	2,31	2,72	0,08	-1,36	-1,74
h0 (mm)	4,14	6,58	5,55	4,83	3,33	-0,91	-0,13	-0,94
h0 (mm)	5,48	6,06	8,2	3,69	1,95	1,52	0,44	-1,69
h0 (mm)	5,12	4,74	4,46	2,13	3,44	-0,92	-1,16	-1,92
h0 (mm)	9,49	5,48	6,9	4,44	2,92	0,04	-0,62	1,62
h0 (mm)	4,62	4,6	4,44	2,63	2,15	2,46	-1,65	-1,09
h0 (mm)	7,75	6,98	5,03	3,28	2,22	2,93	1,73	0,04
h0 (mm)	6,69	5,95	6,27	4,43	1,12	1,42	0	-0,08
h0 (mm)	4,78	9,28	4,5	2,52	2,61	1,15	-0,83	-0,96
h0medio	5,965	6,568	5,804	3,434	2,638	0,999	-0,408	-0,772

Tabella 8.3.2

Variation of level at varying x in the weir (y=0), W=10 Kg/s, double insert with L=120 mm and lateral walls, gate 300 mm, file of flow P210704f, file excel Livelli10

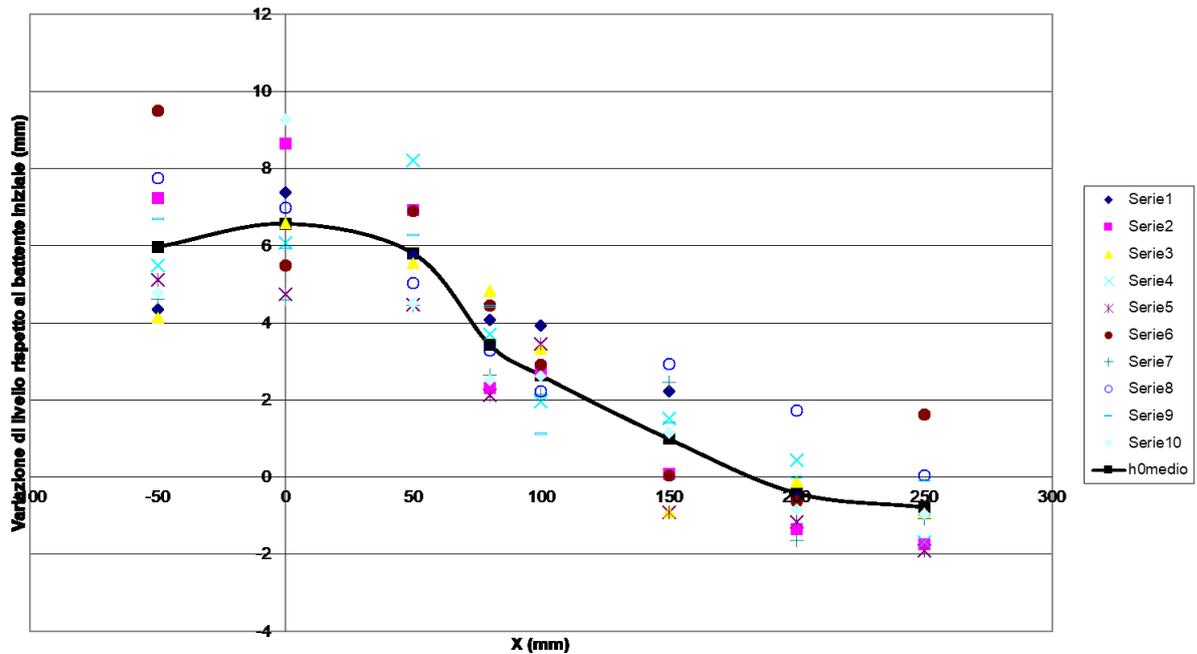


Grafico 8.3.2

File excel: Livelli15								
Misure di livello al variare di x sulla mezzaria (y=0)								
Portata costante: W= 15 Kg/s								
File di portata P210704d, eccetto che per x=80 mm a cui fa riferimento il file P210704e								
10 misurazioni di livello per ciascuna x								
h0: variazione di livello rispetto al battente iniziale (300 mm)								
	x (mm)							
	-50	0	50	80	100	150	200	250
h0 (mm)	20,48	16,79	17,51	13,92	9,89	1,07	2,23	1,06
h0 (mm)	18,6	19,74	14,56	20,41	13,03	-1,81	-1,95	2,5
h0 (mm)	16,52	24,43	19,97	14,16	8,38	2,45	0,77	0,61
h0 (mm)	19,54	14,91	13,65	13,14	11,88	-0,13	5,86	3,83
h0 (mm)	19,99	15,72	19,84	15,35	8,75	4,42	2,15	2,02
h0 (mm)	17,49	21,49	18,34	18,93	14,5	1,59	0,75	0,71
h0 (mm)	14,61	16,73	15,46	14,68	16,69	6,67	-0,45	3,81
h0 (mm)	21,86	13,18	19,78	13,44	9,61	7,43	4,06	2,35
h0 (mm)	18,43	24,92	16,1	15,83	8,83	2,5	3,24	4,42
h0 (mm)	17,6	21,61	20,57	14,59	11,52	5,06	6,06	4,91
h0medio	18,512	18,952	17,578	15,445	11,308	2,925	2,272	2,622

Tabella 8.3.3

Variatione di livello al variare di x nella mezzaria (y=0), W=15 Kg/s, doppio inserto con luce L=120 mm e pareti laterali, battente 300 mm, file di portata P210704d/e, file excel Livelli15

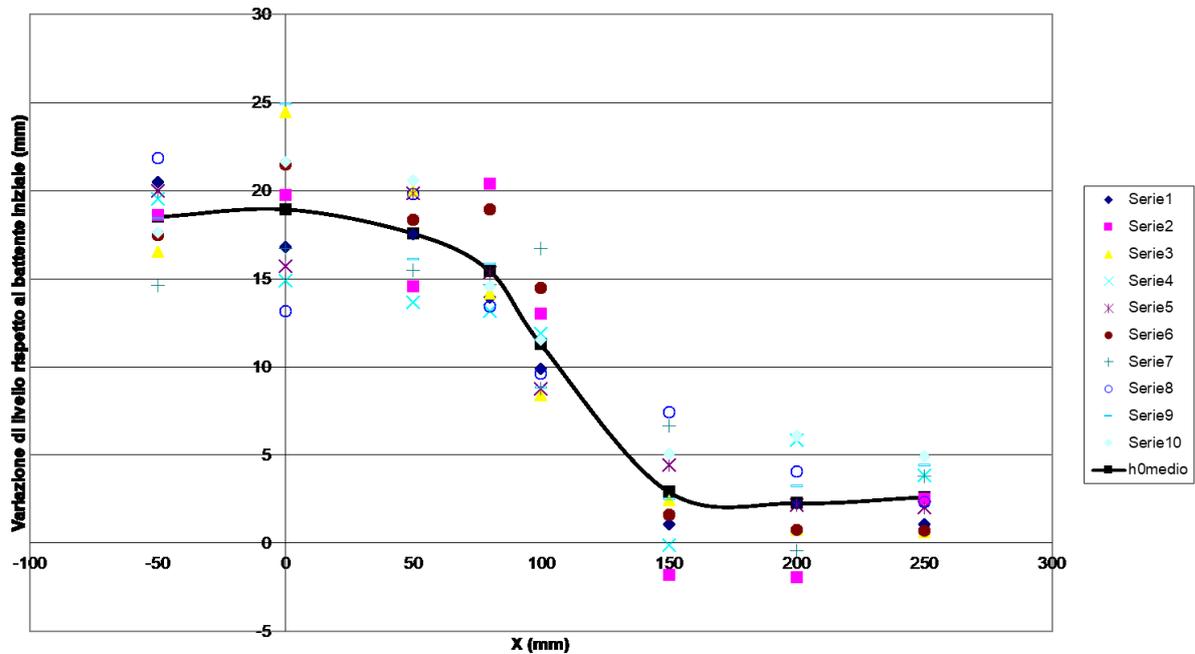


Grafico 8.3.3

File excel: Livelli20								
Misure di livello al variare di x sulla mezzaria (y=0)								
Portata costante: W= 20 Kg/s								
File di portata P210704c, eccetto che per x=80 mm a cui fa riferimento il file P210704e								
10 misurazioni di livello per ciascuna x								
h0: variazione di livello rispetto al battente iniziale (300 mm)								
	x (mm)							
	-50	0	50	80	100	150	200	250
h0 (mm)	40,31	44,66	45	30,23	30,55	12,36	0,77	6,84
h0 (mm)	30,38	33,53	24,54	27,84	26,19	9,2	-4,25	10,54
h0 (mm)	30,14	34,88	33,26	24,33	23,13	21,23	-0,74	4,1
h0 (mm)	33,59	35,73	37,77	26,76	19,11	23,17	6,99	-2,73
h0 (mm)	29,66	27,44	33,88	29,41	21,57	16,64	2,16	-2,19
h0 (mm)	28,33	36,98	31,6	30,84	24,38	10	2,95	0,64
h0 (mm)	32,22	33,42	29,2	24,78	26,28	11,06	4,97	-4,1
h0 (mm)	32,35	31,24	34,88	25,25	31,59	13,9	5,56	8,87
h0 (mm)	27,91	28,49	29,92	29,03	26	20,9	-0,08	1,84
h0 (mm)	29,61	30,43	35,28	30,05	22,79	12,72	5,58	5,01
h0medio	31,45	33,68	33,533	27,852	25,159	15,118	2,391	2,882

Tabella 8.3.4

Variatione di livello al variare di x nella mezzaria (y=0), W=20 Kg/s, doppio inserto con luce L=120 mm e pareti laterali, battente 300 mm, file di portata P210704c/e, file excel Livelli20

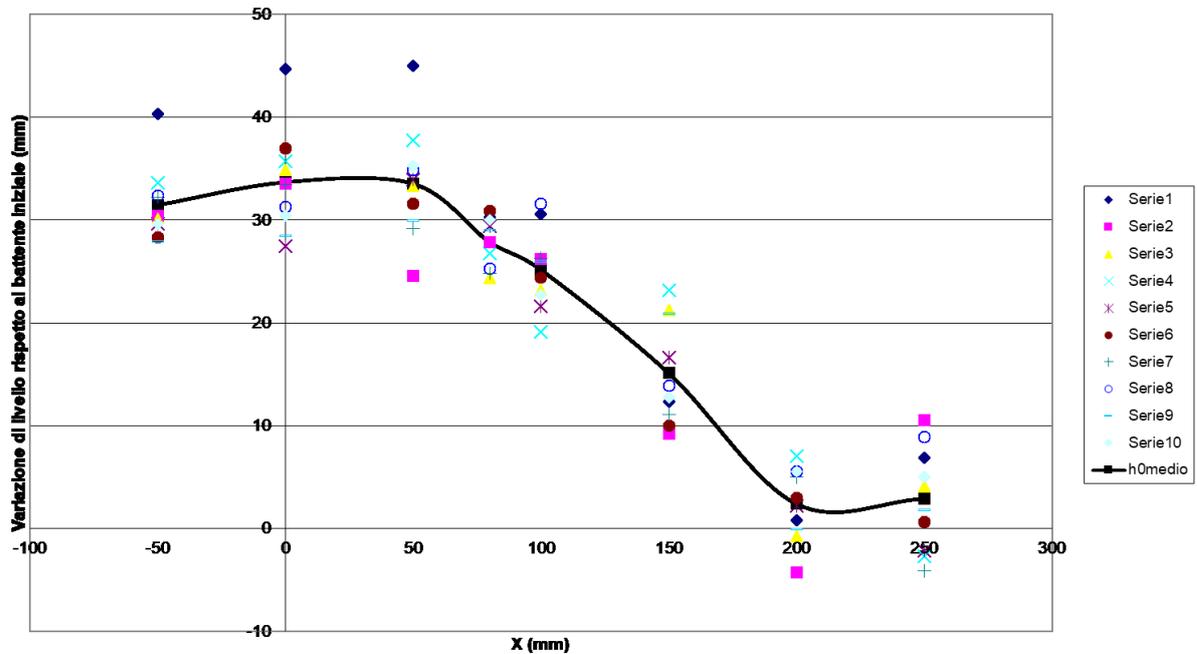


Grafico 8.3.4

Nella tabella seguente si riporta una sintesi della variazione media di livello nella mezzaria, con battente iniziale di 300 mm, con 4 diverse portate, mentre nel grafico si ha una restituzione grafica dei dati riportati in tabella.

File excel: LivelliTot											
Livello medio al variare di x sulla mezzaria (y=0)											
Portata variabile: 5,4, 10, 15, 20 kg/s											
Media di 10 misurazioni di livello per ciascuna x											
h0medio: variazione media di livello rispetto al battente iniziale (300 mm)											
	x (mm)									Portate (Kg/s)	file excel
	-50	0	50	80	100	150	200	250			
h0medio(mm)	1,567	1,799	1,666	1,116	0,875	0,028	-0,345	-0,28	5,4	Livelli5	
h0medio(mm)	5,965	6,568	5,804	3,434	2,638	0,999	-0,408	-0,772	10	Livelli10	
h0medio(mm)	18,512	18,952	17,578	15,445	11,308	2,925	2,272	2,622	15	Livelli15	
h0medio(mm)	31,45	33,68	33,533	27,852	25,159	15,118	2,391	2,882	20	Livelli20	

Tabella 8.3.5

Variazione del livello medio al variare di x nella mezzaria (y=0), portata variabile, doppio inserto con luce L=120 mm e pareti laterali, battente 300 mm, file excel LivelliTot

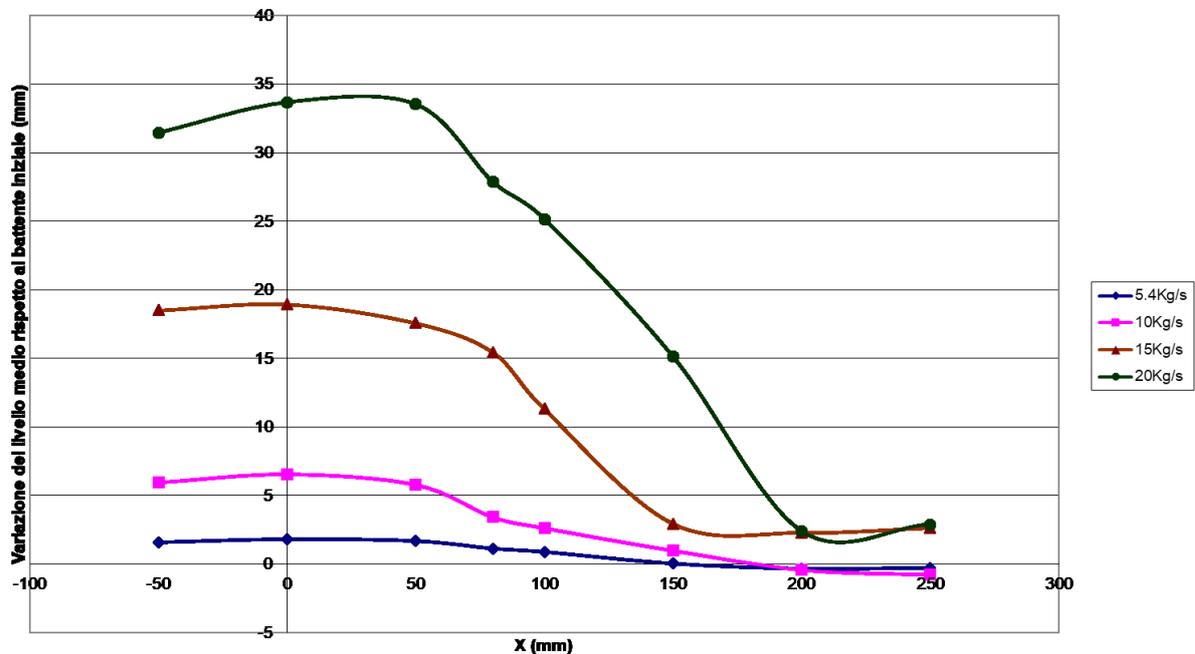


Grafico 8.3.5

8.4. CONCLUSIONI

Da quanto sopra, si evince come la fluidodinamica nel target a “canale” sia riconducibile ad uno stramazzo in larga soglia, con lo spigolo vivo verso monte, e pertanto è possibile utilizzare la stessa terminologia utilizzata in letteratura circa l’efflusso di liquidi da stramazzo [11].

Il fluido proveniente dal basso, raggiunge una quota detta battente (o carico h_0) dello stramazzo (maggiore del battente iniziale di 300 mm), e devia attraverso la luce dell’inserito (larga 120 mm) nel moto prevalentemente orizzontale che si instaura nella zona centrale del target a “canale”.

La superficie libera del fluido è quella superiore, a contatto con l’aria, pertanto la vena stramazzaante risulta annegata, e dà luogo ad ondulazioni superficiali (vena ondulata), di ampiezza crescente con la portata.

In prossimità della soglia (finestra larga 120 mm) si presenta la cosiddetta chiamata di sbocco: cioè la superficie libera subisce un graduale abbassamento, che è ovvia conseguenza della velocità assunta dal liquido, per via della trasformazione di energia potenziale in energia cinetica.

Il brusco cambio di direzione, e la riduzione della sezione d’efflusso nella finestra, fanno sì che la corrente nel target a “canale” sia nettamente turbolenta.

Alla luce delle sperimentazioni svolte, appare evidente che per avere un deflusso orizzontale sufficientemente stabile nel target occorre che il cambio di direzione del metallo liquido sia posizionato quanto più lontano possibile dal target stesso, ma questo porterebbe alla completa revisione dell’impianto ed il passaggio da una configurazione a piscina ad una a loop, con tutti gli svantaggi del caso.

In altri progetti europei, quali quello proposto dal gruppo belga SCK-CEN, denominato MYRRHA, meglio descritto nel seguito, e poi nel progetto integrato per l’XT-ADS, si è continuata ad utilizzare una configurazione simmetrica del target windowless, ma si sono apportate le seguenti importanti modifiche [12]:

- Il fluido proviene dall’alto, attraverso una sezione anulare che si restringe nella zona del target, per accelerare il deflusso. Si dovrebbe così creare un’interfaccia in cui la regione di ricircolo centrale è lambita da una corrente fortemente turbolenta in grado di rimuovere il calore depositato dal fascio, vedasi figura 8.4.1. Mentre nella configurazione precedente il fluido proveniva dal basso e subiva l’inversione del

moto proprio in corrispondenza dell'interfaccia, dove si viene a creare la zona di ricircolo.

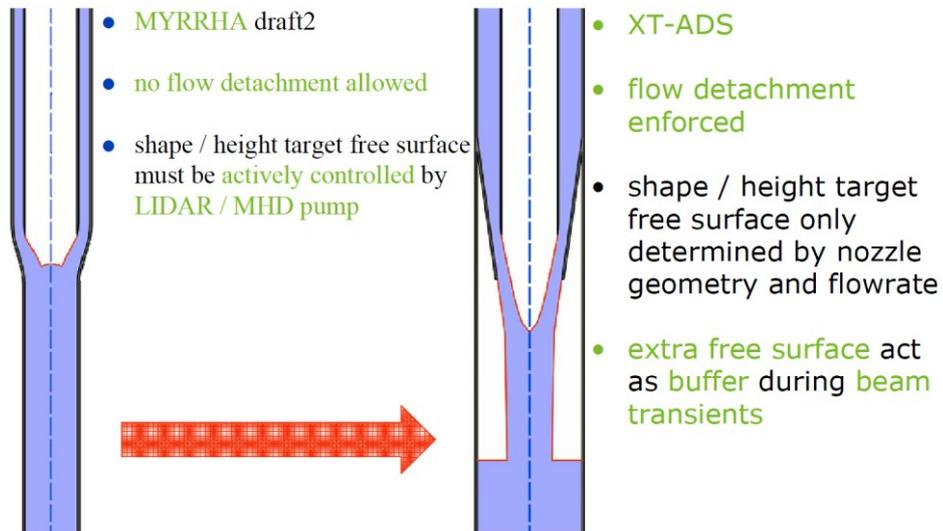


Figura 8.4.1

- Riduzione delle dimensioni del target che passa da un diametro interno di 200 mm ad uno di 87.7 mm.

9. PROGETTI EUROPEI PER L'ADS

A seguito del progetto preliminare sviluppato nel 1998, che era basato sul concetto di amplificatore di energia proposto dal CERN, molti centri di ricerca europei si sono impegnati nello sviluppo di un ADS sperimentale, oltre a quello guidato da ANSALDO a cui si è ispirata la presente tesi.

Uno di questi progetti è quello proposto dal gruppo belga SCK-CEN, denominato MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications), che è un reattore di ricerca multifunzionale basato sul principio dell'ADS, in grado di lavorare sia in modalità sottocritica (ADS) che in modalità critica.

Il progetto MYRRHA è progredito attraverso vari programmi di sviluppo della Commissione Europea. Nel corso del tempo sono stati apportati alcuni perfezionamenti sia ai sistemi primari che nella disposizione degli impianti, nonché al design del reattore [13] [14] [15].

MYRRHA è stato concepito come un ADS per applicazioni di ricerca e sviluppo, costituito da un acceleratore di protoni con fascio incidente su un target di spallazione, senza finestra, accoppiato a un core veloce sottocritico di 50 MWth. Il progetto del 2005 è stato utilizzato come base di partenza all'interno del progetto integrato per l'XT-ADS (Dimostrazione sperimentale della fattibilità tecnica della trasmutazione in un ADS).

9.1. PROGETTO MYRRHA

Il progetto MYRRHA ha avuto inizio nel 1998, ad opera del consorzio belga SCK-CEN. MYRRHA è un ADS sperimentale per la ricerca sui materiali e sul combustibile, per lo studio della fattibilità della trasmutazione degli attinidi minori (MA) e dei prodotti di fissione a lunga vita (LLFP), derivanti dal riprocessamento dei rifiuti radioattivi, ed infine per dimostrare la fattibilità dell'ADS con un ragionevole livello di potenza.

La figura. 9.1.1 mostra lo schema di funzionamento dell'ADS MYRRHA.

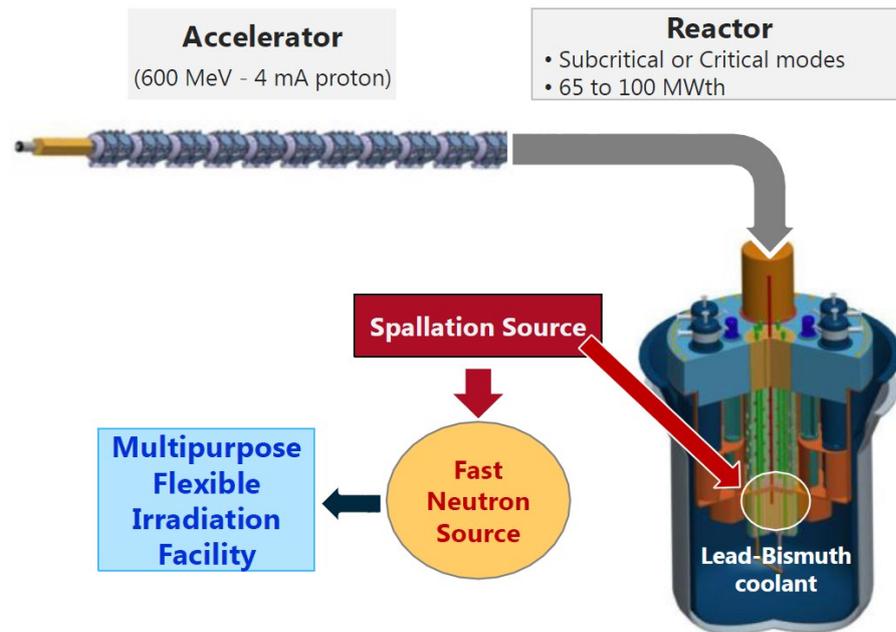


Figura 9.1.1

Il programma di ricerca e sviluppo a sostegno del progetto MYRRHA, e più in generale per lo sviluppo dell'ADS, è focalizzato sulle seguenti questioni chiave:

- Il progetto del target di spallazione, ovvero del componente più caratterizzante l'ADS, che fa da collegamento tra un reattore classico e la tecnologia dell'acceleratore;
- Lo sviluppo di tecnologia per l'eutettico Piombo-Bismuto;
- Il comportamento dei materiali e dell'eutettico Pb-Bi sotto irraggiamento;
- La qualificazione del combustibile sotto irraggiamento in presenza dell'eutettico Pb-Bi;
- Lo sviluppo di una strumentazione avanzata per la visualizzazione ad ultra suoni;
- Lo sviluppo della robotica in ambienti aggressivi (metallo liquido e radiazioni);
- La ricerca sull'operatività del core in modalità sottocritica e critica e lo sviluppo di tecniche di monitoraggio del core.

MYRRHA possiede diverse stazioni di irraggiamento dentro ed attorno al core del reattore. In questo modo è possibile ottenere uno spettro neutronico molto ampio, che va dai neutroni termici a quelli veloci. Entrambi i flussi neutronici, termici e veloci, sono poi estremamente elevati rispetto ai reattori classici, e questo permette di simulare, in un lasso di tempo ragionevole, l'esposizione dei materiali a lunghi tempi di irraggiamento. Inoltre, la combinazione di una elevata dose di irraggiamento e di una ingente produzione di gas

leggeri (H, He) vicino al target di spallazione, risulta molto interessante per lo studio dei materiali utilizzati nella ricerca sulla fusione.

Di seguito si riporta una sintesi delle possibili applicazioni di MYRRHA:

- Dimostrare la fattibilità dell'ADS accoppiando i tre principali componenti (acceleratore, target di spallazione e reattore sottocritico) con un ragionevole livello di potenza per consentire il feedback operativo, scalabile per applicazioni industriali;
- Permettere lo studio di una efficace tecnologia per la trasmutazione delle scorie nucleari ad alta attività, in particolare degli attinidi minori che richiederebbero un'intensità di flusso elevata ($\Phi > 0,75 \text{ MeV} = 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$);
- Operare come un impianto flessibile di irraggiamento a spettro veloce che consente:
 - lo sviluppo del combustibile per reattori innovativi;
 - lo sviluppo dei materiali per i sistemi di IV Generazione;
 - lo sviluppo dei materiali per i reattori a fusione;
 - la produzione di radioisotopi per applicazioni medicali ed industriali;
 - lo sviluppo di applicazioni industriali.

ACCELERATORE

L'acceleratore è il driver di MYRRHA poiché fornisce i protoni ad alta energia utilizzati nel target di spallazione per la creazione di neutroni, che a loro volta alimentano il nocciolo del reattore. Nel progetto attuale di MYRRHA, l'acceleratore deve essere in grado di fornire un fascio di protoni con un'energia di 600 MeV e una corrente di fascio media di 3,2 mA. Il fascio raggiunge il core in modalità onda continua (CW). Una volta al secondo, il raggio viene disattivato per 200 μs così da poter eseguire accurate misurazioni in tempo reale e monitorare la sotto criticità del reattore. Il fascio protonico raggiunge il core dall'alto.

La disponibilità dell'acceleratore è una questione cruciale per il funzionamento dell'ADS. Un'elevata disponibilità è espressa da un lungo Mean Time Between Failure (MTBF), che è comunemente ottenuto da una combinazione di sovradimensionamento e ridondanza. Oltre a queste due strategie, è necessario implementare la tolleranza ai guasti per ottenere l'MTBF richiesto. La tolleranza al guasto consente all'acceleratore di ripristinare il fascio protonico se la durata del trip, dovuta al guasto di un singolo componente, è inferiore ad un certo intervallo di tempo. Nel caso di MYRRHA, la tolleranza al guasto del fascio è di 3 secondi. Entro un periodo operativo di MYRRHA, pari a 3 mesi, il numero di guasti del fascio con interruzione superiore a 3 secondi deve essere inferiore a 10, mentre interruzioni del fascio più brevi sono permesse senza limitazioni. La combinazione di ridondanza e tolleranza al

guasto dovrebbe consentire di ottenere un valore di MTBF superiore a 250 ore per un ciclo operativo di 3 mesi.

Al momento, esistono solo due tipi di acceleratori di protoni, con potenza del fascio dell'ordine dei megawatt, in modalità onda continua: i ciclotroni e gli acceleratori lineari. Gli acceleratori lineari, soprattutto se realizzati con superconduttori, hanno la possibilità di implementare la tolleranza ai guasti e di offrire un'elevata modulazione del fascio, permettendo così di recuperare il fascio in breve tempo e di aumentarne l'energia.

NUCLEO E PRIMARIO

I principali componenti e sistemi del progetto attuale di MYRRHA sono gli stessi dell'XT-ADS, del Progetto EUROTRANS, con solo le dimensioni aumentate. Il sistema primario ed il secondario sono stati progettati per evacuare una potenza massima del core di 100 MWth. Tutti i componenti sono ottimizzati per la gestione da remoto, sia per la sostituzione che l'ispezione, e la gestione dei componenti stessi.

Dal momento che MYRRHA è un ADS del tipo a piscina, il vessel del reattore ospita tutti i sistemi primari. Il design a piscina è stato scelto in quanto: si evitano le penetrazioni dal basso nel vessel, aumentando così la sicurezza del reattore; permette di avere un volume per lo stoccaggio del combustibile; è caratterizzato da una elevata inerzia termica.

La figura. 9.1.2 mostra una vista schematica del reattore MYRRHA con i suoi componenti interni principali.

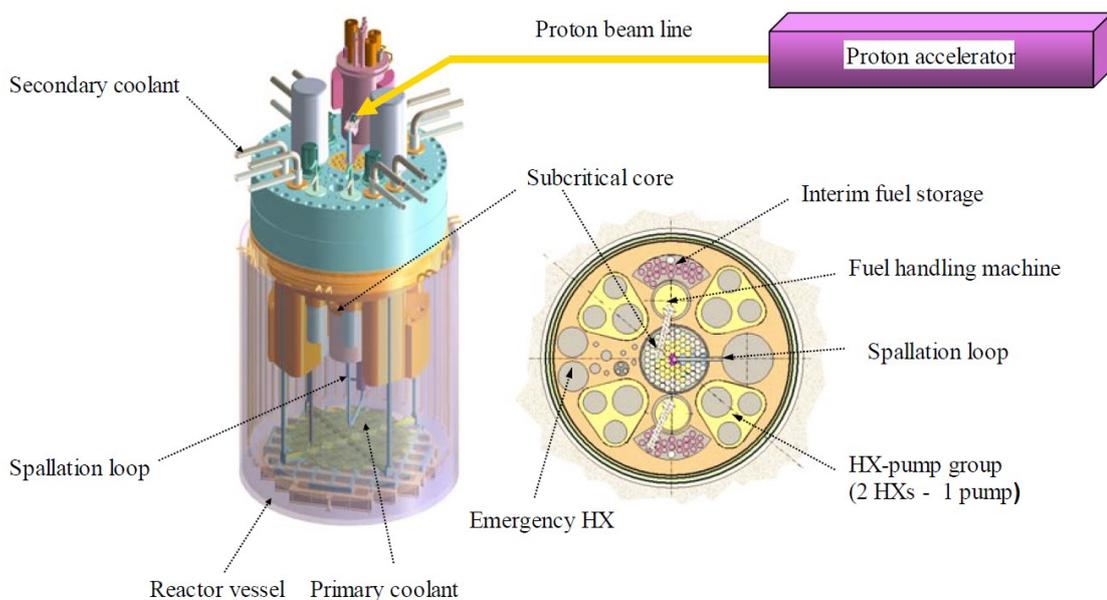


Figura 9.1.2

Il vessel è chiuso dal coperchio del reattore, che supporta tutti i componenti interni. Un diaframma all'interno del vessel separa l'eutettico piombo-bismuto (LBE) caldo da quello freddo, supporta l'In-Vessel Fuel Storage (IVFS), ovvero lo stoccaggio del combustibile all'interno del vessel, e fornisce una separazione tra zone a pressione differente.

La piscina contiene anche il core sotto critico a spettro veloce, caricato con combustibile a gruppi esagonali tipici dei reattori veloci raffreddati con eutettico Pb-Bi. Il core è montato su una colonna di supporto centrale proveniente dal coperchio e stabilizzata dal diaframma che separa le parti fredde e calde del refrigerante LBE. Il circuito utilizzato come target per la spallazione è completamente immerso nella piscina e termicamente interconnesso con il core, ma l'eutettico Piombo-Bismuto utilizzato come bersaglio è fisicamente separato da quello per il raffreddamento del core sotto critico.

Poiché l'accesso dall'alto è molto limitato, visto l'elevato numero di penetrazioni nel coperchio, e poiché i componenti introdotti nella piscina sono sottoposti ad una ingente spinta di galleggiamento, a causa dell'elevata densità dell'eutettico Pb-Bi, il carico e lo scarico dei gruppi di combustibile è eseguito dal basso, mediante robot con controllo remoto. La piscina contiene anche le pompe primarie per la circolazione del metallo liquido, gli scambiatori di calore e due robot per la gestione del combustibile, basati sulla tecnologia a spina rotante già utilizzata nei reattori veloci. Vedasi figura 9.1.3.

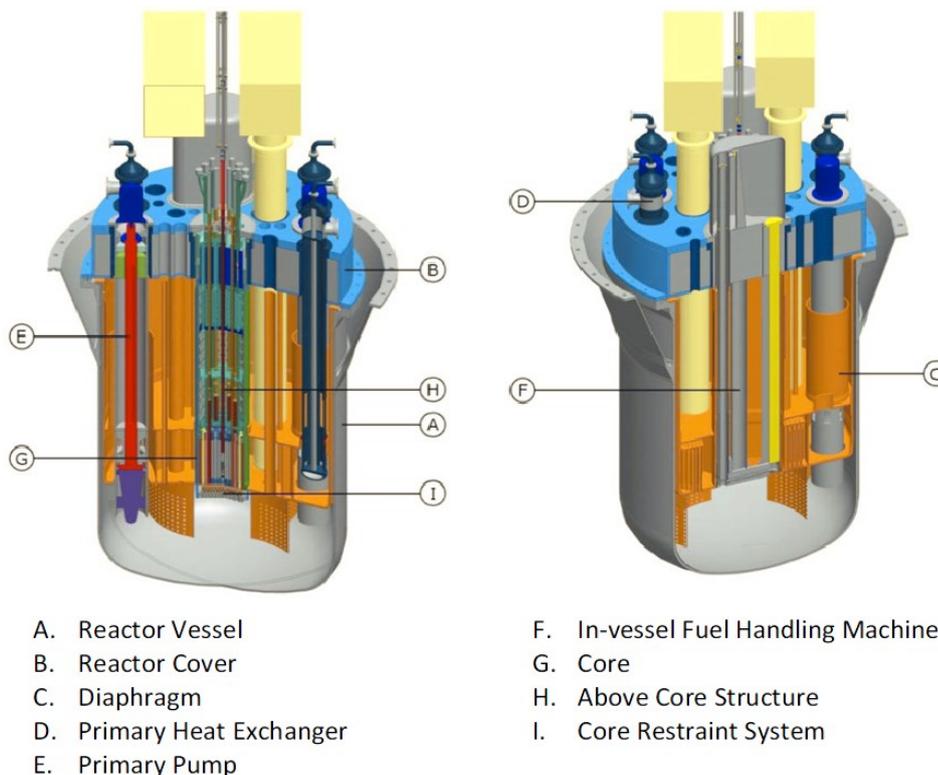


Figura 9.1.3

Un cambiamento importante rispetto alla versione precedente del core è il passaggio da un target di spallazione del tipo senza finestra (windowless) a un target di spallazione con finestra. La versione precedente aveva infatti bisogno di tre esagoni centrali per ospitare il modulo di spallazione mentre il progetto attuale richiede solo un esagono centrale. Per meglio adattarsi al solo target centrale, la dimensione del core è leggermente maggiore rispetto al progetto dell'XT-ADS. Di conseguenza le In-Pile test Section (IPS), hanno un diametro maggiore che aumenta la flessibilità per gli esperimenti. Trentasette posizioni possono essere occupate dagli IPS o dal target di spallazione (quello centrale del core in configurazione sotto critica) o dalle barre di controllo e di shutdown (nella configurazione critica del core), vedasi figura 9.1.4. Ciò permette una grande flessibilità nella scelta della posizione più adatta ad ogni esperimento, in funzione del flusso neutronico desiderato.

La richiesta di una elevata intensità di flusso neutronico veloce è stata ottenuta ottimizzando la configurazione della geometria del core e massimizzando la densità di potenza. L'uso dell'eutettico piombo-bismuto (LBE) come refrigerante consente di abbassare la temperatura operativa all'ingresso del core fino a 270 °C, diminuendo così il rischio di corrosione e permettendo di aumentare il ΔT nel core. Tutto ciò, insieme all'adozione di sistemi di spegnimento affidabili e passivi, consentirà di raggiungere una elevata intensità di flusso neutronico veloce.



Figura 9.1.4

Allo stato attuale del progetto, il core del reattore (figura 9.1.4) è costituito da gruppi di combustibile esagonali, composti da barre cilindriche caricate con pastiglie di combustibile a

ossido misto (MOX), tipiche dei reattori veloci, con contenuto di Plutonio di circa il 35 % [16].
 Nella figura 9.1.5 si riporta una vista schematica delle barre di combustibile di MYRRHA.

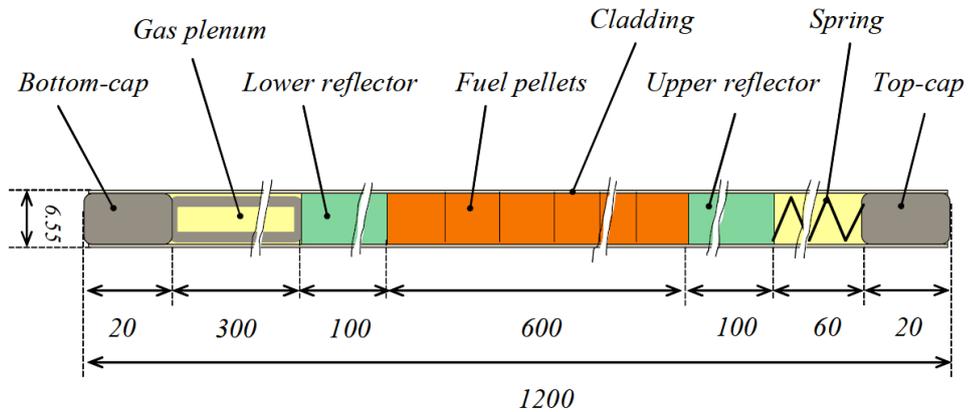


Figura 9.1.5

Al fine di aumentare la densità di potenza si è ottimizzato sia il diametro che il passo delle barre, come riportato in figura 9.1.6.

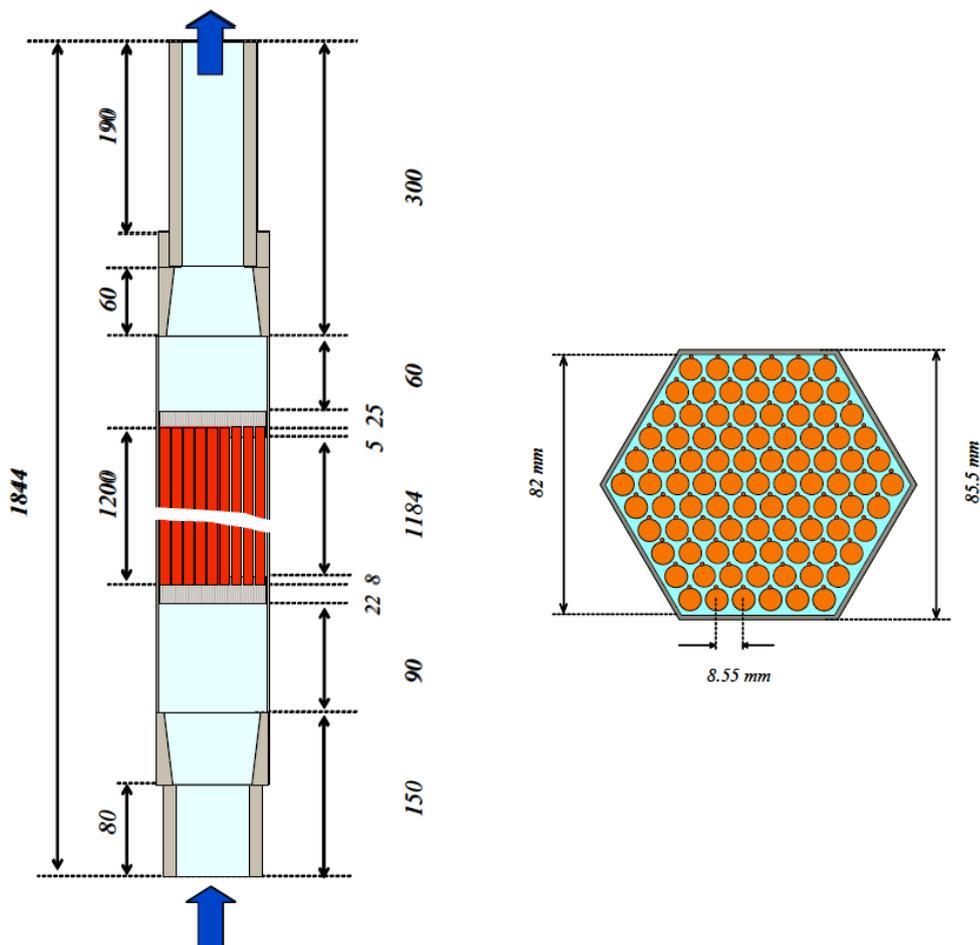


Figura 9.1.6

Nella figura 9.1.4 si vede il layout del core critico (con 7 IPS centrali) all'equilibrio del ciclo del combustibile, dove 37 posizioni sono disponibili per i canali multifunzionali (MFC), che possono ospitare indifferentemente:

- Gruppi di combustibile e gruppi fantoccio, caricati dal basso (in tutte le 151 posizioni);
- Barre IPS, di controllo e di spegnimento, caricate dall'alto.

In modalità sotto critica, l'acceleratore è il driver del sistema. Esso fornisce i protoni ad alta energia che sono usati nel target di spallazione per creare neutroni veloci che a loro volta alimentano il core sotto critico. L'acceleratore è in grado di fornire un fascio di protoni con un'energia di 600 MeV e una corrente massima di 4 mA.

In modalità sotto critica, il gruppo di spallazione è situato nella zona centrale del core. Il calore depositato dalla spallazione viene dissipato dal circuito primario del reattore. Il modulo di spallazione garantisce la separazione tra l'eutettico Piombo-Bismuto e la hall del reattore, e assicura le condizioni ottimali per la reazione di spallazione. L'assemblaggio del modulo di spallazione è concepito come un IPS, e pertanto è facilmente rimovibile o sostituibile.

Diversamente dal layout critico (figura 9.1.4), in modalità ADS le barre di controllo e di spegnimento sono sostituite da dispositivi di assorbimento da utilizzare solo durante il rifornimento del combustibile.

Come in modalità critica, sono previsti due diversi tipi di barre fantoccio (figura 9.1.4):

- un anello interno, che circonda la zona fissile, costituito da barre LBE (per aumentare la "riflessione" neutronica);
- un anello esterno fatto di barre piene di pellets YZrO (per schermare il core barrel).

I sistemi di raffreddamento primario, secondario e terziario sono stati progettati per rimuovere la massima potenza termica del core, pari a 110 MW. I 10 MW in più rispetto alla potenza nominale del core sono dovuti alla potenza depositata dai protoni, alla potenza dell'In-Vessel Fuel Storage (IVFS), ed alla potenza depositata dai raggi γ nelle strutture. L'aumento medio della temperatura del refrigerante nel core, in condizioni nominali, è di 140 °C con una velocità di 2 m/s. Il sistema di raffreddamento primario è costituito da due pompe e quattro scambiatori di calore primari (PHX).

Le pompe primarie devono fornire una portata in massa di eutettico Pb-Bi pari a 4750 kg/s (453 l/s per pompa). La pressione di esercizio delle pompe è di 300 kPa. Le pompe verranno fissate al coperchio nella parte superiore del reattore, il coperchio dovrebbe essere l'unico elemento di supporto e guida dei gruppi pompa.

Il sistema di raffreddamento secondario è un sistema di raffreddamento ad acqua, mentre il sistema terziario è un sistema di raffreddamento ad aria. Questi sistemi funzionano in modalità attiva durante il normale funzionamento, ed in modalità passiva in condizioni di emergenza, per la rimozione del calore di decadimento.

La principale connessione termica tra i sistemi di raffreddamento primario e secondario è fornita dagli scambiatori di calore primari (figura 9.1.7). Questi scambiatori di calore sono a fascio tubiero, a passaggio singolo e controcorrente. Come refrigerante secondario viene utilizzata acqua pressurizzata a 200 °C, che scorre attraverso il tubo di alimentazione centrale dello scambiatore (PHX) fino alla cupola inferiore. Tutte le pareti che separano l'eutettico Pb-Bi e l'acqua (ovvero il tubo dell'acqua di alimentazione, la cupola inferiore e lo spazio anulare superiore) sono a doppia parete, per evitare il preriscaldamento dell'acqua di raffreddamento sul secondario e per evitare, in caso di rottura del tubo centrale, le perdite d'acqua nell'eutettico Pb-Bi.

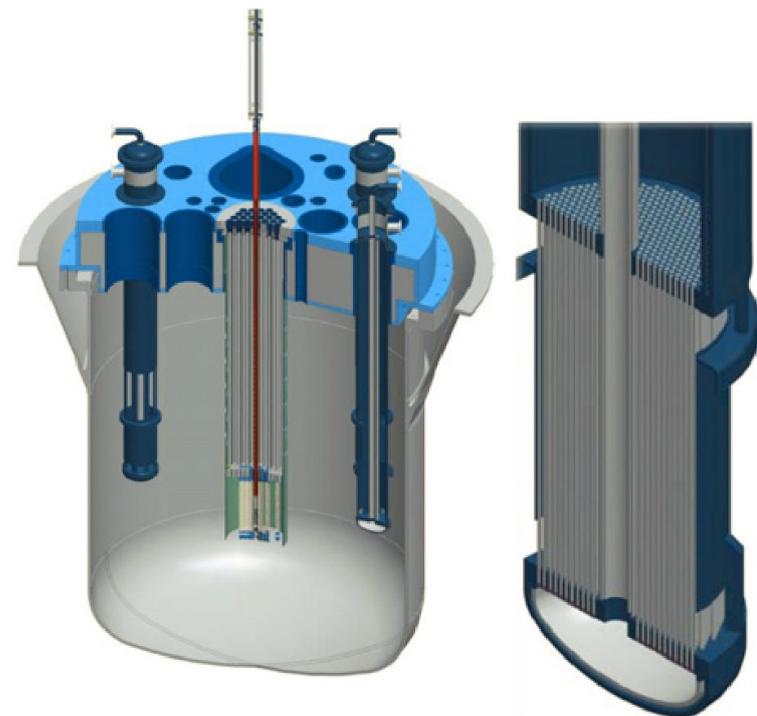


Figura 9.1.7

In caso di perdita del flusso primario (guasto delle pompe primarie), gli scambiatori di calore primari non sono in grado di estrarre tutta la potenza termica. In questi casi, il fascio protonico deve essere spento nel caso sotto critico, e le barre di arresto inserite nel caso critico. La rimozione del calore di decadimento (DHR) è ottenuta per convezione naturale sul primario, secondario e terziario. Un ulteriore DHR è garantito dalla convezione naturale dell'aria a contatto con il vessel del reattore (RVACS, reactor vessel air cooling system).

Poiché al di sopra del core non c'è lo spazio sufficiente per la gestione del combustibile, vista la presenza del tubo del fascio protonico e di molteplici penetrazioni nel coperchio, fin dal primo progetto di MYRRHA, la gestione del combustibile viene eseguita da sotto il nucleo. Le barre di combustibile sono tenute in posizione dal galleggiamento, e sono agganciate da sotto alla piastra di supporto centrale.

Per la gestione del combustibile vengono utilizzate due macchine situate ai lati opposti del core (figura 9.1.8). Ogni macchina copre un lato del core. L'uso di due macchine offre una gamma di posizioni sufficienti per lo stoccaggio del combustibile, senza la necessità di aumentare il volume del vessel. Ogni macchina si basa sulla tecnologia già usata nei reattori veloci, del tipo a "spina rotante", utilizzando robot SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm). Per estrarre o inserire le barre di combustibile, il braccio robotico può spostarsi verso l'alto o verso il basso di circa 2 metri. Per maneggiare le barre si usano una pinza ed un braccio guida. Un sensore a ultrasuoni (US) viene utilizzato per identificare in modo univoco le barre di combustibile.

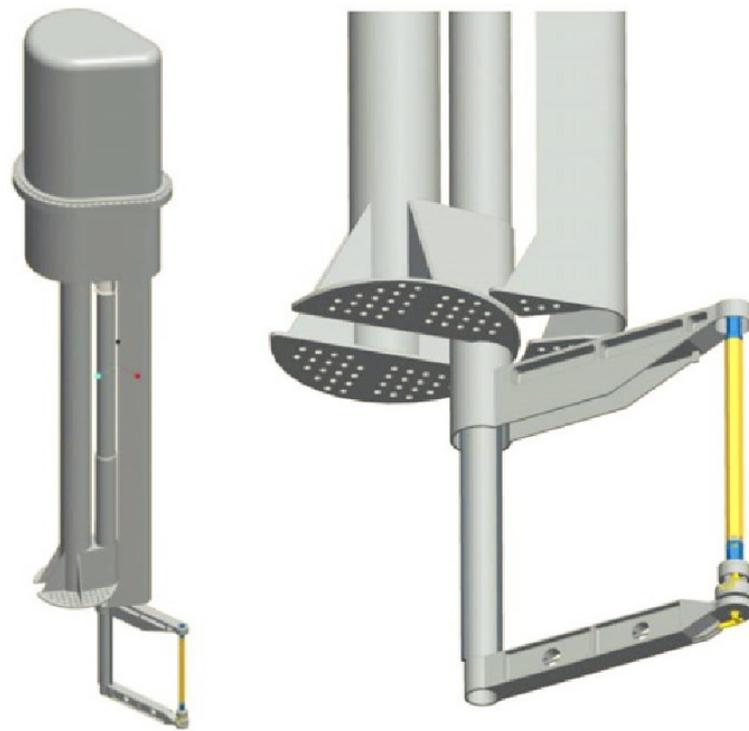


Figura 9.1.8

La macchina per la manipolazione del combustibile all'interno del vessel eseguirà anche l'ispezione ed il recupero in loco di una barra del combustibile non vincolata. La scansione incrementale a punto singolo può essere eseguita da un sensore ad ultrasuoni (US) montato sulla pinza dell'IVFHM. Il deflettore sotto il diaframma risulta essere cruciale in quanto limita l'area di lavoro in cui sono necessari l'ispezione ed il recupero, impedendo agli oggetti di

migrare nello spazio tra il diaframma ed il coperchio del reattore, inoltre consente la scansione laterale.

Nella tabella seguente sono riportate le principali caratteristiche del core e del primario di MYRRHA.

Total core power	100 MWth
Total reactor power	110 MWth
Total primary mass flow rate	9500 kg/s
LBE mass inventory	4500 Ton
Core inlet temperature at full power	270°C
Hot plenum temperature at full power	350°C
Average core temperature difference at full power	140°C
Cold shut down temperature	200°C
Temperature of secondary cooling loop	200°C saturated water/steam
Number of fuel assemblies in a critical reference case	69
Number of penetrations for experiments and other applications	37
Total neutron flux in first 6 experimental positions	$\sim 2\text{-}3 \cdot 10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$
Fast neutron flux in first 6 experimental positions	$\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ for $E > 0.75 \text{ MeV}$

Tabella 9.1.1

LAYOUT IMPIANTO ED EDIFICIO DEL REATTORE

Il layout dell'impianto comprende l'edificio del reattore, il tunnel LINAC, l'edificio dell'acceleratore, gli edifici di controllo, l'edificio per lo stoccaggio del combustibile esausto e altri edifici ausiliari necessari per gli impianti di servizio. Tutti gli edifici dell'impianto sono fuori terra, fatta eccezione per l'edificio del reattore, in cui il vessel ed il coperchio del reattore si trovano completamente sotto il livello del suolo. In figura 9.1.9 è illustrato l'attuale layout di MYRRHA all'interno del sito SCK-CEN.

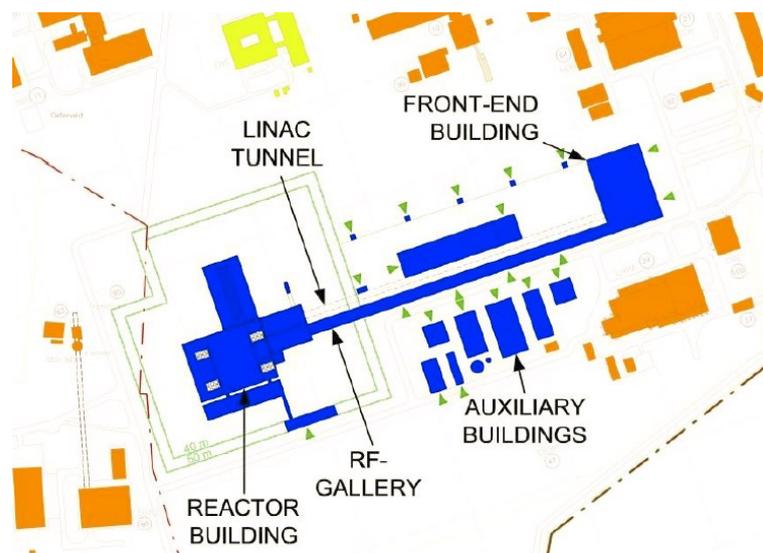


Figura 9.1.9

Gli edifici dell'impianto sono inseriti nel contesto urbano, per una facile ed efficace interconnessione con i fabbricati e le infrastrutture esistenti. La distanza minima tra gli edifici dipende dalle norme antincendio e tiene anche conto dell'accessibilità agli stessi. Per motivi di sicurezza l'edificio del reattore è collocato ad una distanza di oltre 200 m dagli edifici ausiliari. L'edificio dell'acceleratore, il tunnel LINAC e l'edificio del reattore, si allungano complessivamente per una lunghezza di circa 400 m ed occupano buona parte del layout dell'impianto. E' previsto anche lo spazio per future estensioni di MYRRHA o di altri progetti SCK-CEN.

Il progetto dell'edificio del reattore è iniziato con la hall del reattore ubicata nel centro dell'edificio stesso, in cui si trova il vessel, e dove confluiscono i sistemi di sicurezza, il tubo del fascio ed alcuni sistemi ausiliari. La hall del reattore è anche la principale responsabile del contenimento primario, pertanto è il locale più importante e complesso del reattore. Anche altri locali fanno parte del contenimento primario, dal momento che il termine di sorgente è presente anche in questi locali con valori relativamente alti. Gli altri locali definiscono il contenimento secondario. In figura 9.1.10 si può vedere una sezione dell'edificio del reattore.

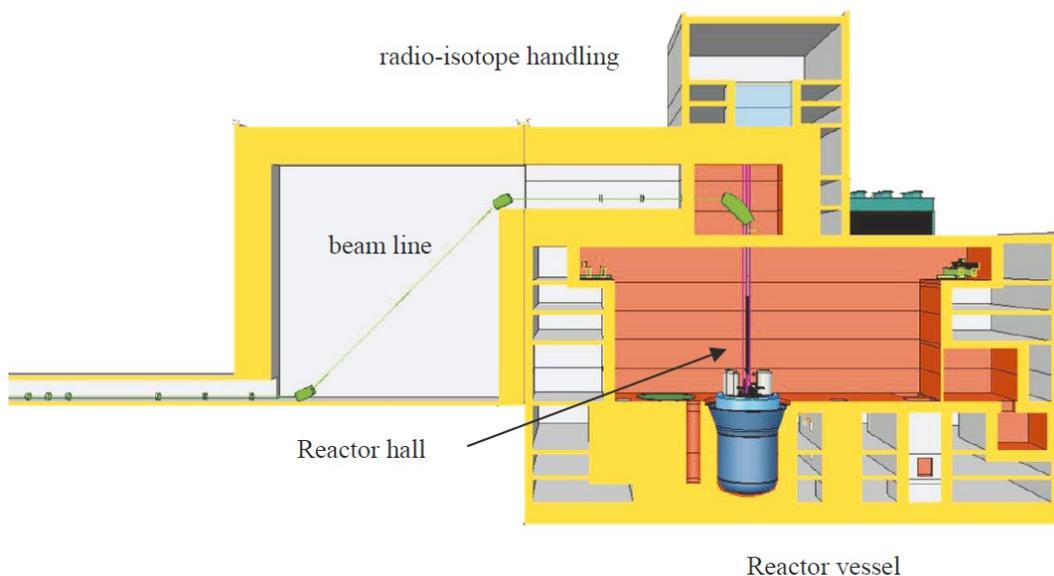


Figura 9.1.10

Un requisito chiave per il layout dell'edificio del reattore è prevenire la contaminazione dei locali del confinamento secondario, visto che questi sono (facilmente) accessibili ai lavoratori. Ciò si ottiene implementando i flussi logistici in una sola direzione, il che significa che i nuovi componenti possono entrare nel contenimento primario solo attraverso un accesso con una camera di equilibrio dedicata e che i rifiuti possono essere rimossi solo attraverso un'altra uscita. Semplicemente i componenti contaminati e/o attivati non possono

entrare in stanze non contaminate. Questo approccio è applicato al combustibile nuovo ed esausto, ma anche agli esperimenti.

Un importante elemento nella hall del reattore è il tubo del fascio che collega l'acceleratore al reattore. Questa struttura metallica, avente una lunghezza di circa 23 m, deve essere rimossa durante i periodi di manutenzione per poter caricare/scaricare gli esperimenti nel/dal nucleo del reattore. La rimozione del tubo del fascio ed il seguente riallineamento viene eseguito da un sistema di gestione remoto, in quanto il contenimento primario non è accessibile ai lavoratori durante le normali operazioni. La larghezza della hall del reattore è determinata dalla lunghezza massima del braccio robotico. L'altezza della hall è determinata dal componente più lungo da sostituire, dall'altezza del carroponete (capacità di 400 tonnellate) e dalla parte superiore del tubo del fascio sotto vuoto.

Si è deciso di realizzare una fossa di stoccaggio all'interno del reattore, per rendere possibile la sostituzione del diaframma e del coperchio del reattore, durante la vita dell'impianto, senza dover realizzare i locali di scarico (hot-cells) per questi componenti. Nella hall del reattore si trova anche un altro pozzo, utilizzato durante le ispezioni come serbatoio di scarico per l'intero volume di eutettico Pb-Bi.

L'attuale layout dell'edificio del reattore è più grande rispetto ai progetti precedenti, visto che molte funzioni, prima ubicate in edifici separati, sono ora concentrate in un singolo edificio, con flussi di lavoro più semplici per materiali e personale.

L'assemblaggio dei diversi componenti di MYRRHA dovrebbe iniziare nel 2022, per due anni si dovrebbero eseguire test a diversi livelli di potenza, per poi operare a piena potenza a partire dal 2025.

9.2. TRASMUTAZIONE E FUTURO DEL NUCLEARE

Una delle maggiori sfide che la nostra società deve affrontare è la crescente domanda di energia in genere, ed elettrica in particolare, come ad esempio nel riscaldamento degli edifici e nella locomozione. Nel corso dell'ultimo secolo l'approvvigionamento energetico era basato in buona parte sui combustibili fossili, che però causano una eccessiva emissione di CO₂.

Allo stesso tempo, le fonti di energia rinnovabile non possono soddisfare la domanda completa di energia, infatti sebbene si dimostrino valide le soluzioni di micro/mini generazione diffusa, quali gli impianti fotovoltaici sugli edifici residenziali e sulle piccole attività produttive, gli impianti di grandi dimensioni, quali le pale eoliche o gli stessi impianti fotovoltaici con potenze dell'ordine dei GW, presentano non pochi problemi di impatto

ambientale e di accettabilità sociale, non molto dissimili da quelli riscontrati con gli impianti nucleari.

Inoltre bisogna rimarcare come le principali fonti rinnovabili, quali il solare e l'eolico, siano per definizione intermittenti, e pertanto si pone il problema dello stoccaggio dell'energia ed il conseguente uso di batterie altamente inquinanti.

La soluzione potrebbe essere quella di utilizzare l'energia nucleare, in quanto "carbon free", per soddisfare il carico di base delle utenze elettriche.

Risulta quindi evidente come l'energia nucleare deve continuare ad essere parte del "paniere energetico" del futuro, e per farlo non può prescindere dall'affrontare il problema delle scorie ad alta attività, per le quali è necessaria una soluzione socialmente accettabile. Anche se lo stoccaggio in strati geologici profondi potrebbe offrire una soluzione tecnicamente valida, la scala temporale, necessaria perchè la radiotossicità dei rifiuti scenda al livello dell'uranio naturale, è molto lunga, dell'ordine di $500.000 \div 1000000$ di anni. Sono quindi necessari lunghi periodi di monitoraggio del sito di stoccaggio.

La trasmutazione degli elementi ad alta attività con lunga vita media di decadimento presenti nelle scorie nucleari (come gli attinidi minori: l'americio, il curio, il nettunio, ecc...) consente di ridurre questa scala temporale in modo significativo. Passando da un valore "geologico" a un valore paragonabile a quello delle normali attività umane. Durante la trasmutazione i nuclei di questi attinidi sono suddivisi in prodotti di fissione a vita più breve, la cui radiotossicità si riduce a quella dell'uranio naturale dopo alcune centinaia di anni. Vedasi l'impatto della trasmutazione nella figura 9.2.1.

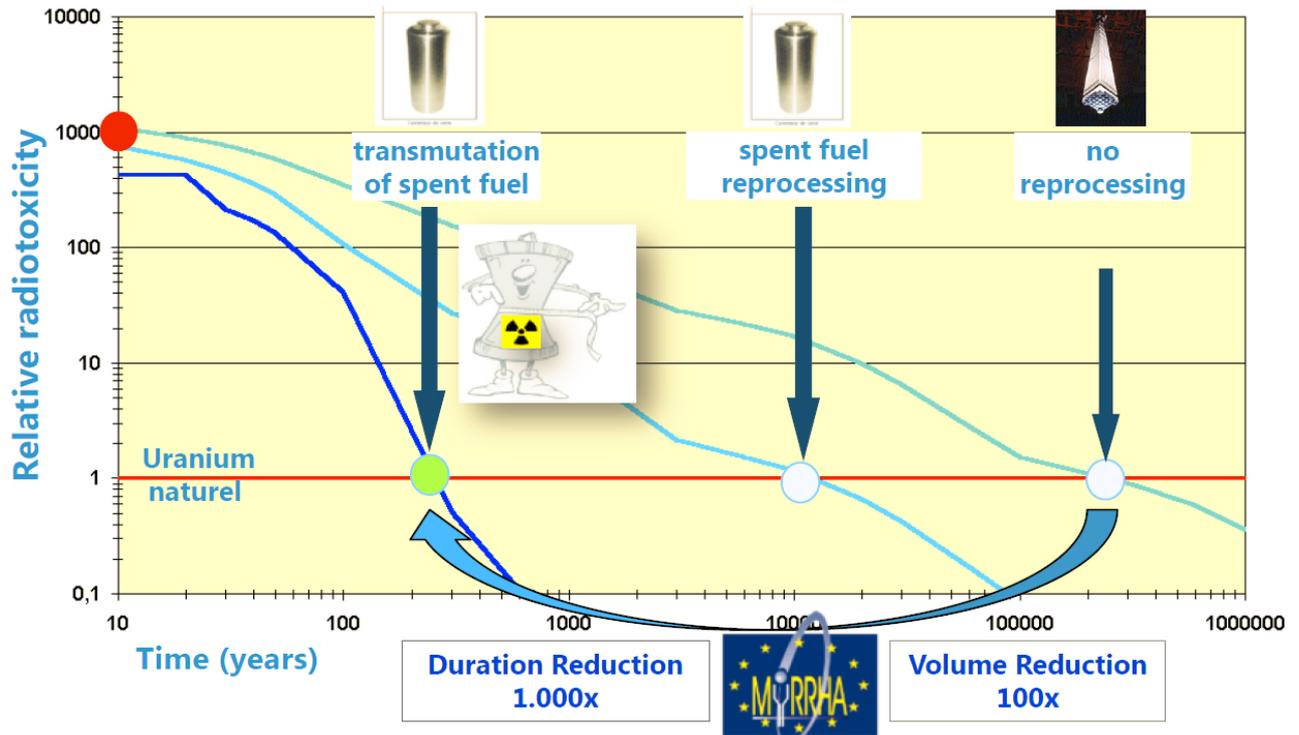


Figura 9.2.1

Al fine di trasmutare questi elementi con una lunga vita media in modo efficiente, sono necessari reattori nucleari con uno spettro neutronico veloce. Inoltre, l'introduzione di attinidi minori nel nucleo del reattore richiede misure appropriate per garantire il funzionamento flessibile e sicuro del sistema. Per sviluppare le tecnologie associate a questi reattori veloci, è necessario utilizzare impianti dedicati, accoppiati a sistemi con acceleratore.

La progettazione, su scala realistica, di una tale installazione per la trasmutazione è un passo essenziale. Infatti non è sufficiente dimostrare il principio della trasmutazione, visto che la tecnologia necessaria deve essere ancora sviluppata.

Su un lasso di tempo ancora più lungo, la fusione nucleare può certamente contribuire a soddisfare l'approvvigionamento energetico del pianeta, visto che le riserve di combustibile per la fusione sono quasi illimitate ed il problema dei rifiuti è minimo.

Ma anche in questo caso l'ulteriore sviluppo tecnologico di reattori ibridi accoppiati ad un acceleratore è di primaria importanza per lo studio dei materiali.

10. BIBLIOGRAFIA

- 1) C. Rubbia, J.A. Rubio (CERN), S. Buono (Sincrotrone Trieste), F. Carminati (CERN), N. Fietier (Nice U.), J. Galvez, C. Geles, Y. Kadi, R. Klapisch (CERN), P. Mandrillon (Nice U.), "Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier", Ginevra, 1995.
- 2) Ansaldo Divisione Nucleare, "ADS Demonstration Facility: document no. ADS 5 SMEX0237".
- 3) S. Baldi, "Progetto di un'Apparecchiatura per lo studio del campo di velocità nella regione bersaglio dell'Energy Amplifier", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria, 1999.
- 4) R. Cascone, "Studio fluidodinamico della regione bersaglio dell'ADS (Accelerator Driven System)", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria, 2000.
- 5) L. Musco, "Campi di velocità nella regione bersaglio dell'Amplificatore di Energia", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria, 2001.
- 6) F. Longo, "Progettazione e realizzazione di un'apparecchiatura per lo studio del bersaglio del prototipo ADS in configurazione asimmetrica", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria, 2003.
- 7) <http://www.sontek.com/product/adv.html>
- 8) Kraus N.C., Lohrmann A., Cabrera R., "New Acoustic Meter for Measuring 3D Hydraulic Engineering", vol 120, n.3, 1994.
- 9) Kikura H., Yamanaka G., Taishi T, Aritomi M., Takeda Y., Mori M., "Development of Ultrasonic Velocity Profile Method for Flow Rate Measurements of Power Plant", ICONE9, Ninth International Conference on Nuclear Engineering, Nice, France, 8-12 April, 2001, paper 445.
- 10) Sontek, ADV Software Reference Manual Version 4.0, Copyright 1995-1997 by Sontek.
- 11) De Marchi Giulio, "Idraulica. basi scientifiche e applicazioni tecniche", volume primo, parte seconda, Hoepli, Milano 1966.
- 12) Hamid Aït Abderrahim, "MYRRHA A Fast Spectrum Pb-Bi Cooled Experimental Facility in Belgium", BRIX anual workshop, April 7-9, 2008.

- 13) Didier De Bruyn*, Hamid Aït Abderrahim, Peter Baeten, and Paul Leysen, "The MYRRHA ADS Project in Belgium Enters the Front End Engineering Phase", C 23rd Conference on Application of Accelerators in Research and Industry, CAARI 2014, Belgian Nuclear Research Centre (SCK•CEN), Boeretang 200, Mol 2400, Belgium, Physics Procedia 66 (2015) 75 – 84.
- 14) P. Baeten, M. Schyns, Rafaël Fernandez, Didier De Bruyn and Gert Van den Eynde, "MYRRHA: A multipurpose nuclear research facility", Belgian Nuclear Research Center (SCK•CEN), Mol, Belgium, published by EDP Sciences, 2014.
- 15) MYRRHA Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications - A flexible and fast spectrum irradiation facility, ThEC13, CERN, Geneva (CH), October 28-31, 2013.
- 16) H. Aït Abderrahim, V. Sobolev*, E Malambu, "Fuel design for the experimental ADS MYRRHA", Technical Meeting on use of LEU in ADS. October 10-12, 2005. IAEA, Vienna, Austria.