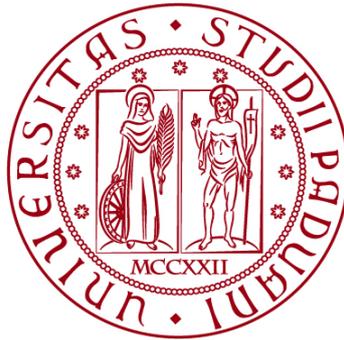


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**Le barriere del Mo.S.E. per la protezione di
Venezia: principio di funzionamento e analisi della
prima manovra di chiusura**

Relatore: Chiar.mo PROF. DANIELE P. VIERO

Laureando: NICCOLÒ BUSOLIN

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Sommario

Introduzione.....	1
Capitolo 1. Il Mo.S.E.....	3
1.1 L'infrastruttura.....	3
1.2 Cenni storici.....	4
1.3 Contesto geografico e morfologico.....	5
1.4 Finalità dell'opera	8
1.5 Principio di funzionamento.....	10
1.5.1 Configurazione di riposo	14
1.5.2 Transizione: da configurazione di riposo a operativa.....	16
1.5.3 Configurazione operativa	18
1.5.4 Transizione: da configurazione operativa a riposo.....	19
Capitolo 2. La prima operazione del Mo.S.E.	21
2.1 Condizioni metereologiche e idrometriche del 3 ottobre 2020.....	22
2.2 Chiusura del 3 ottobre 2020.....	23
2.3 Condizioni metereologiche del 15 e 16 ottobre 2020	27
2.4 Chiusura del 15 ottobre2020.....	27
2.5 Chiusura del 16 ottobre 2020.....	29
Capitolo 3. Stima della filtrazione fra le barriere	31
3.1 Contributi di portata in laguna durante gli eventi pluviali.....	31
3.2 Stima della portata	33
Capitolo 4. Analisi dei 3 eventi a posteriori	35
4.1 Calcolo del livello idrometrico in laguna durante gli eventi di ottobre 2020 ..	35
4.2 Disturbo prodotto dal Mo.S.E. nell'alto Adriatico	38
Conclusioni.....	41
Bibliografia.....	39

Introduzione

La presente tesi di laurea verte sull'opera Mo.S.E., un sistema di sbarramento mobile realizzato presso le bocche di porto della laguna di Venezia con lo scopo di contrastare un problema che sovente affligge le città lagunari creando molteplici svantaggi, le acque alte.

Nel primo capitolo si presenta l'opera nel suo complesso, le sue finalità e le scelte progettuali. In particolare, anche attraverso disegni qualitativi, viene poi concentrata l'attenzione sul principio che consente il sollevamento delle paratoie del Mo.S.E.

Al capitolo secondo si analizzano le condizioni metereologiche e idrometriche che, nell'ottobre del 2020, hanno portato i tecnici ad azionare, per la prima volta in maniera integrale, il sistema di difesa. I dati di quest'ultima analisi verranno poi ripresi al capitolo terzo per stimare la portata d'acqua che riesce a penetrare attraverso le barriere del Mo.S.E. durante le fasi di chiusura.

Infine, servendosi dei dati precedentemente citati e di quelli prodotti da un modello matematico in grado di simulare i livelli idrometrici in condizioni di bocche di porto chiuse ed aperte, viene fatto un confronto fra quest'ultimi di modo da comprendere se effettivamente certe chiusure sono superflue (in funzione dei livelli misurati) e se il sistema, quando lo si rende operativo, produce degli effetti sul golfo di Venezia.

La stesura di questo elaborato si appoggia al lavoro di ricerca svolto da Mel et al. (2021) sul primo funzionamento del Mo.S.E., e sui dati messi a disposizione dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree di Venezia e dal Consorzio Venezia Nuova, l'ente incaricato della realizzazione del sistema.

Capitolo 1. Il Mo.S.E.

1.1 L'infrastruttura

Il Mo.S.E. (acronimo di MODulo Sperimentale Elettromeccanico) è un'infrastruttura idraulica realizzata per la difesa di Venezia e delle città lagunari dal fenomeno delle acque alte¹.

L'opera è costituita da un sistema di 4 barrire situate alle 3 bocche di porto della laguna di Venezia, esse qualora sia necessario vengono sollevate (*figura 1*) separando temporaneamente il mare dalla laguna. L'insieme dei quattro sbarramenti conta un totale di 78 paratoie indipendenti.



Figura 1. La bocca di porto di Chioggia con le paratoie del Mo.S.E. in funzione. Gli elementi gialli sono le paratoie, l'insieme delle paratoie costituisce lo sbarramento. Fonte: sito web Consorzio Venezia Nuova

Il progetto Mo.S.E. non prevede solamente la realizzazione delle quattro barriere, ma anche altre opere per la tutela delle città lagunari, come il rinforzo delle scogliere all'esterno delle bocche di porto ed il rialzo delle rive e delle pavimentazioni.

¹ **Acque alte:** Terminologia con la quale si identificano le frequenti inondazioni a cui sono soggette le città lagunari a causa delle maree.

1.2 Cenni storici

Venezia è da sempre vittima di allagamenti, provocati dalle sopraccitate acque alte. Sin dalla sua fondazione (421 d.c.), i veneziani sono stati abituati a convivere e a limitare questo problema, che si è sempre presentato con una frequenza non allarmante. La metodologia utilizzata per contrastare questo fenomeno consisteva nel rialzo delle pavimentazioni (laddove fosse possibile), nei punti più bassi della città, e in opere idrauliche atte a defluire l'acqua portata in città dalle maree.

La volontà di proteggere il capoluogo Veneto e le città limitrofe con un'opera civile iniziò nella seconda metà dello scorso secolo, più precisamente dopo l'*acqua grande*² del 1966. Così, nel 1975 venne presentato l'appalto-concorso nazionale istituito da parte del Ministero dei Lavori Pubblici per individuare una soluzione progettuale adeguata alla configurazione della laguna. Nel 1980 venne decretato che, coerentemente con quanto osservato e consigliato da un gruppo di professionisti, era necessario realizzare degli sbarramenti mobili alle bocche di porto della laguna di Venezia. L'incarico di realizzare i primi studi, ritenuti indispensabili dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, venne affidato nel 1982 al Consorzio Venezia Nuova.

L'inizio delle attività in cantiere risale al 2003, anno in cui si iniziò a ricostruire la scogliera all'esterno della bocca di porto di Malamocco. Il termine dell'opera e la sua consegna sono previsti per settembre 2023.

² **Acqua grande:** termine con il quale i veneziani hanno battezzato l'acqua alta del 1966.

1.3 Contesto geografico e morfologico

Si tratta di uno sbarramento mobile unico nel suo genere proprio come il contesto geografico e morfologico in cui è stato realizzato. Infatti, la laguna di Venezia, che si estende per una superficie pari a circa 550 km², è situata nella parte superiore mare Adriatico, ed ha una profondità media di circa 1,2 m. Quest'ultimo ha una conformazione semichiusa ed allungata, e comunica con il mar Mediterraneo attraverso lo stretto di Otranto (*figura 2*). Le acque della regione nord dell'Adriatico sono le più soggette a variazioni di altezza (Mel et al., 2021), causate da fattori astronomici, metereologici e barometrici. L'aumento del livello idrometrico è infatti provocato dall'azione combinata delle maree astronomiche³, dei venti di Bora e Scirocco⁴ e dalla bassa pressione. Inoltre, tali variazioni di altezza sono favorite dalla configurazione territoriale della zona.

All'interno della laguna vi sono barene naturali⁵ e moltissime isole (circa 50), tra cui, la più nota, Venezia. Possiede un cordone litoraneo lungo 60 km, interrotto solo dalle 3 bocche di porto, che la mettono in comunicazione con il mare, esse costituiscono l'interfaccia di scambio idrico tra mare e laguna.

³ **Maree astronomiche:** fenomeno a cui sono soggette le acque degli oceani, sono provocate dalla luna e dagli astri che esercitano una forza di attrazione su di esse. Le acque subiscono una deformazione tale per cui si raggiunge l'equilibrio fra forza centrifuga del moto della terra e forza d'attrazione degli astri.

⁴ **Venti di Bora e Scirocco:** il primo è un vento presente tipicamente nella regione centro-settentrionale dell'Adriatico, il secondo è un vento che soffia da sud del Mediterraneo. Entrambi esercitano un'azione modellatrice sulle acque dell'Adriatico ed influiscono sul fenomeno delle acque alte di Venezia.

⁵ **Barene:** terre emerse all'interno della laguna, esse sono in grado di variare la loro altezza in base al livello idrometrico, a patto che l'escursione non sia repentina, infatti, spesso, vengono sommerse dalle maree. Danno un importantissimo contributo allo smorzamento del moto ondoso che si propaga dal mare alla laguna.

La bocca di porto di Lido, la più larga delle tre, è la più a nord e la più vicina a Venezia. Il progetto Mo.S.E. ha previsto la realizzazione di un'isola artificiale nel mezzo che ha generato due canali. Il canale Treporti Nord possiede 21 paratoie ed è largo 420 m, mentre il canale di San Niccolò Sud è largo 400 m ed è attrezzato con 20 paratoie. La bocca di porto centrale, quella di Malamocco, è quella adibita al passaggio di grandi navi dirette al porto commerciale della vicina Marghera. La larghezza è di 380 m e conta 19 paratoie. Infine, a sud della laguna si trova la bocca di porto di Chioggia, essa si estende per 360 m ed è provvista di 18 paratoie.

Mediamente il volume che transita tra mare e laguna (e viceversa) è di 400 milioni di m³, tale quantità di acqua viene scambiata 2 volte al giorno a causa delle maree astronomiche. Queste ultime generano un'escursione media del livello idrometrico pari ad 1 m, valore che, come prima detto, può subire consistenti variazioni.

In laguna, inoltre, vengono convogliate le acque piovane e fluviali provenienti da un bacino scolante⁶ di 2000 km² che scarica circa 2,5 milioni di m³ (Consorzio Venezia Nuova).

⁶ **Bacino scolante:** insieme dei corpi idrici che scaricano in un recipiente, in questo caso: la laguna.

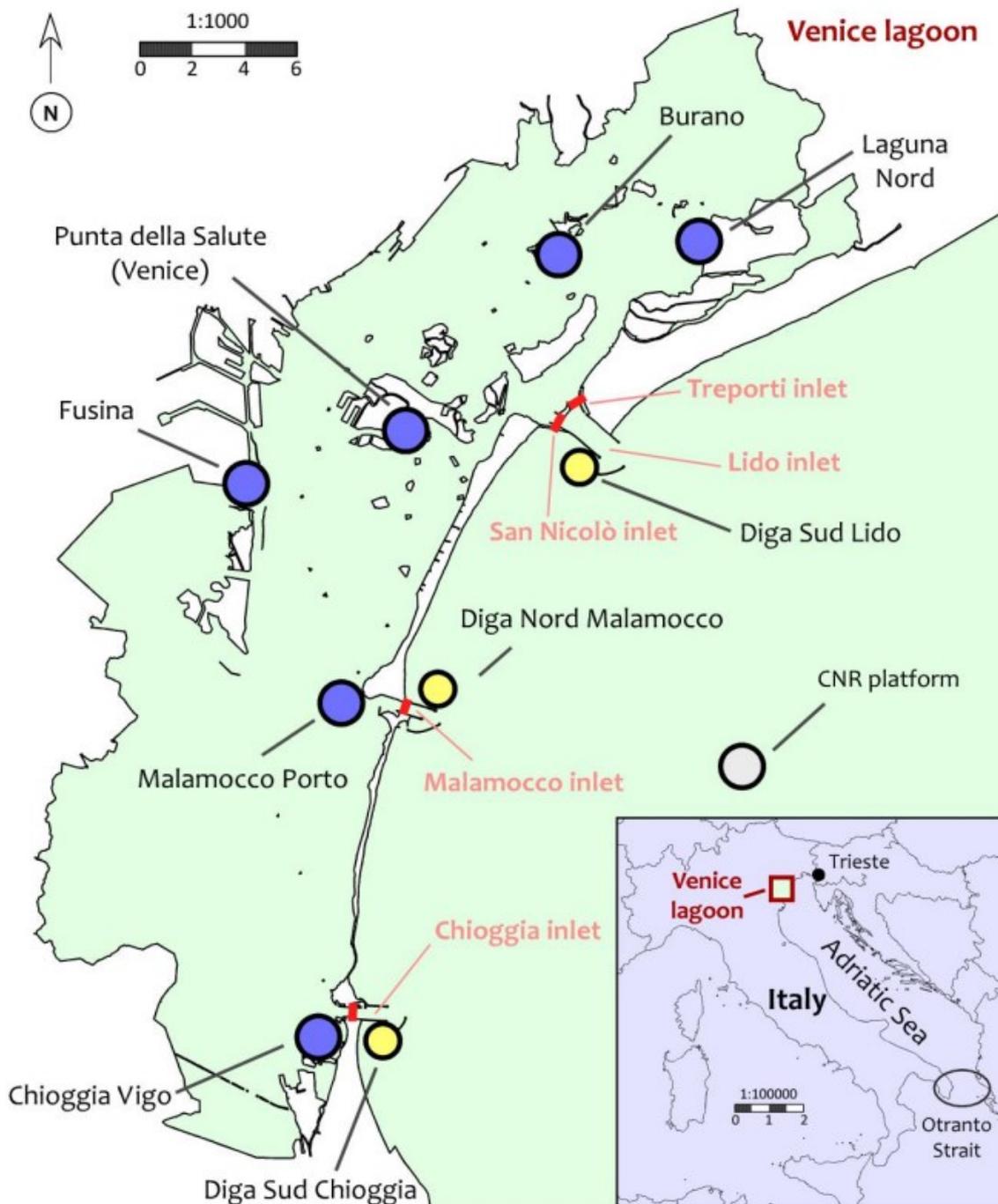


Figura 2. In basso a destra è possibile inquadrare la posizione della laguna rispetto al mare Adriatico. Più in grande è visibile la laguna, nello specifico si evidenziano le tre bocche di porto che interrompono il cordone litoraneo che separa il mare dalla laguna. Inoltre, vengono messi in risalto le stazioni di rilevamento presenti all'interno e all'esterno della laguna. A largo (pallino grigio) si trova la piattaforma del CNR, all'interno (pallini blu) sono 6 i misuratori, mentre all'esterno della laguna vengono identificati con i pallini gialli 3 misuratori. Fonte: Mel et al., 2021.

1.4 Finalità dell'opera

Essendo quindi le città lagunari erette pochi centimetri sopra al livello del mare esse subiscono le inondazioni provocate dalle sopradescritte acque alte, queste provocano danni al patrimonio edilizio esistente e notevoli disagi alle attività commerciali.

La frequenza con cui i fenomeni di allagamento si verificano nelle città lagunari ha mostrato una tendenza di crescita preoccupante, specie negli ultimi anni. Ciò è riconducibile non solo al fenomeno di subsidenza, a cui Venezia e le altre città lagunari sono da sempre soggette, responsabile del progressivo abbassamento del piano campagna causato dalla compattazione del terreno sottostante⁷, ma anche ai cambiamenti climatici (Brambati et al., 2009). Quest'ultimi, infatti, stanno provocando una crescita del livello dei mari a causa dello scioglimento dei ghiacciai, accompagnata da fenomeni meteorologici di intensità crescente negli anni anche a latitudini come quelle della laguna di Venezia.

Dunque, lo scopo del Mo.S.E. è quello di isolare temporaneamente la laguna dall'Adriatico qualora il livello dell'acqua cresca oltre il livello di salvaguardia, fissato a +110 cm sullo zero di punta della salute (Ve). Questo valore è stato fissato osservando i dati relativi al periodo che va dal 2004 al 2014 e risulta essere un compromesso fra numero di chiusure annue contenute e protezione dei centri abitati (Mel et al., 2014). Il sistema di chiusura si basa quindi su un riferimento locale, che rappresenta la media del livello rilevata negli anni che vanno dal 1885 al 1909. Esso risulta essere 23 cm più in basso rispetto al riferimento nazionale, l'IGM 1942⁸ (Mel et al., 2021; Centro Previsioni e Segnalazioni Maree).

⁷ Il fenomeno di subsidenza nella laguna di Venezia è stato velocizzato dall'azione antropica. Infatti, è stato dimostrato che il pompaggio di acqua avvenuto a scopo industriale (nella vicina Marghera), ha accelerato bruscamente la compattazione del terreno.

⁸ **IGM1942**: Zero idrometrico di riferimento per l'Italia. Esso corrisponde al medio mare di Genova nel 1942.

Grazie a quest'opera idraulica le mareggiate vengono fermate fuori dalle 3 bocche di porto, viene così mantenuto un livello consono all'interno del bacino che evita gli allagamenti nelle zone più basse delle città⁹ e limita i disagi causati da questi.



Figura 3. In blu è possibile vedere le zone di Venezia che si allagano con una marea di 110 cm a Punta della Salute. Il 12% della città risulterebbe allagato. Fonte: sito consorzio Venezia Nuova.

⁹ Le zone più basse della città di Venezia sono piazza San Marco, la zona in prossimità del ponte di Rialto e l'area limitrofa alla stazione Ferroviaria.

1.5 Principio di funzionamento

Il sistema di paratoie costruito alle bocche di porto della laguna di Venezia, prima di essere realizzato, è stato a lungo studiato e confrontato con altre soluzioni. Infine, si è optato per una tipologia di paratoia a ventola¹⁰.

Nello specifico, vi erano alcuni vincoli da rispettare (Consorzio Venezia Nuova). Anzitutto, allo sbarramento era richiesto di proteggere completamente dal fenomeno delle acque alte e la vicinanza con Venezia e le altre isole suggeriva di realizzare un'opera poco impattante dal punto di vista paesaggistico. Inoltre, essendovi il porto commerciale di Marghera e moltissime attività basate sulla pesca era necessario garantire la fruibilità delle bocche di porto anche qualora esse fossero chiuse. Infine, gli scambi idrici laguna-mare dovevano essere disturbati il meno possibile per garantire un basso impatto ambientale.

Il progetto Mo.S.E. rispetta buona parte dei punti precedentemente elencati, in quanto: il principio di funzionamento (sotto riportato) garantisce l'invisibilità dell'opera qualora questa non sia operativa; infatti, i cassoni quando sono nella configurazione di riposo sono completamente immersi e non alterano la profondità del canale. Viceversa, quando il sistema viene attivato, è sì visibile ma costituisce un ottimo sbarramento al propagarsi delle mareggiate all'interno della laguna. Per quanto riguarda la possibilità di adoperare le bocche di porto anche qualora le paratoie siano sollevate, sono state realizzate delle conche di navigazione¹¹ in corrispondenza dei tre ingressi. A Lido e Chioggia sono stati realizzati dei piccoli porti rifugio e delle conche di navigazione di modeste dimensioni, esse garantiscono il transito di mezzi di soccorso e pescherecci. A Malamocco la conca di navigazione è di notevoli dimensioni (*figura 5*) poiché vi devono transitare navi dirette

¹⁰ **Paratoia a ventola:** tipologia costruttiva che consiste in una paratoia vincolata sul fondo mediante cerniere, essa può ruotare attorno all'asse di quest'ultime.

¹¹ **Conche di navigazione:** Opere realizzate per consentire alle navi di superare un dislivello idrometrico.

al porto di Marghera, essa è protetta da una scogliera esterna atta a smorzare il moto ondoso¹².

L'unico punto sulla quale emerge una criticità è durante le chiusure delle bocche; infatti, il sistema risulta efficiente come sbarramento e ciò dal punto di vista dell'ambiente lagunare non è positivo. Se è vero che fermare le mareggiate fuori dai 3 ingressi rappresenta un beneficio per le città che non vengono colpite dalle acque alte, non lo è altrettanto per le barene della laguna. Quest'ultime, infatti, si nutrono dei sedimenti portati dalle maree per poter crescere verticalmente (D'Alpaos et al., 2022) e rappresentano un elemento indispensabile per l'ecosistema lagunare. Inoltre, i fondali durante le chiusure vengono fortemente sollecitati dalle onde prodotte dal vento, ciò induce il sollevamento di sedimenti che vanno poi a depositarsi nei canali rendendo indispensabili le operazioni di dragaggio¹³.

¹² **Moto ondoso:** tipico moto dell'acqua generato perlopiù dal vento (ma anche dal passaggio di imbarcazioni), si tratta di onde che si propagano e che sono in grado di conservare la loro energia anche per svariati chilometri. Si assiste a una riduzione considerevole di questa solo in presenza di ostacoli o in prossimità di una costa (diminuzione di altezza). Esso è spesso responsabile di processi erosivi.

¹³ **Dragaggio:** operazione con la quale si asportano fanghi e sabbie da un fondale marino, l'obiettivo della procedura di dragaggio citata nel testo è quella di rimuovere i sedimenti nei canali e portarli altrove.



Figura 4. Paratoia del Mo.S.E. durante le operazioni di trasporto. Da questa angolazione è possibile apprezzare il gruppo cerniera-connettori e la vernice con cui è ricoperta la superficie esterna.



Figura 5. Conca di navigazione realizzata a Malamocco, essa è un canale parallelo alle bocche di porto che possiede due porte (una a lato mare ed una a lato laguna).

Per quanto concerne al funzionamento vero e proprio dell'opera è necessario inquadrare la modalità costruttiva.

Le 78 paratoie sono realizzate in acciaio¹⁴ e rivestite con una vernice gialla (*figura 4*) che ne ritarda la corrosione dovuta all'aggressione chimica dell'acqua salmastra, all'interno vi sono degli anodi sacrificali¹⁵ che garantiscono la protezione catodica. Esse sono cave internamente, tale aspetto costruttivo ricopre un ruolo fondamentale nel funzionamento idraulico dell'opera. Inoltre, ogni una di essa è equipaggiata con parabordi ed alette in gomma, inclinometri ed ammortizzatori¹⁶, tubi rigidi e flessibili (in seguito verrà spiegato il loro utilizzo) e dei gruppi cerniere-connettori. Quindi, le paratoie sono assicurate, mediante 2 cerniere (*si veda figura 4*) a dei cassoni in calcestruzzo adagiati sul fondo. Essi garantiscono il corretto posizionamento delle barriere e le ospitano durante il loro periodo di inattività. Sono indispensabili per il corretto funzionamento dell'opera poiché qualora si verificassero cedimenti differenziali fra questi elementi in calcestruzzo, al sollevarsi delle barriere ci potrebbero essere collisioni. Per evitare ciò, è stato realizzato un sistema di fondazione a pali¹⁷, risultata l'unica metodologia efficace per terreni limosi ed argillosi (*I suoli della provincia di Venezia – A.R.P.A.V., 2008*) come quello dei fondali della laguna veneziana. I cedimenti, sebbene siano contenuti, si verificano sempre. Infatti, sono stati stimati e considerati in fase progettuale.

¹⁴ Le barriere sono realizzate in acciaio al carbonio S355 (Gian Mario Paolucci, 2016), si tratta di una lega caratterizzata da discrete proprietà meccaniche e da un'ottima saldabilità.

¹⁵ **Anodi sacrificali:** presenti in ogni elemento immerso in acqua o soggetto a correnti galvaniche. Si tratta di un oggetto che si corrode al posto della struttura.

¹⁶ **Inclinometri ed ammortizzatori:** Il primo dispositivo rileva e restituisce l'angolo di inclinazione della paratoia, il secondo serve durante l'avvicinamento della paratoia al cassone di calcestruzzo.

¹⁷ **Sistema di fondazione a pali:** Utilizzato su terreni dalle proprietà meccaniche scadenti, consente di trasmettere il carico alla base del palo, raggiungendo così strati di terreno in profondità dalle caratteristiche di resistenza migliori. Inoltre, una parte del carico viene trasmesso per attrito terreno-fusto.

1.5.1 Configurazione di riposo

Con riferimento alla *figura 6* è possibile vedere come si dispone la paratoia in configurazione di riposo.

Essa è adagiata sul fondo e riempita d'acqua, quest'ultimo aspetto è necessario per garantire che la paratoia resti sdraiata all'interno del cassone. Infatti, come tutti gli elementi immersi in acqua è soggetta alla spinta idrostatica¹⁸ che, se non correttamente bilanciata, rischia di far galleggiare la paratoia.

Nel caso del Mo.S.E., concentrando l'attenzione su una singola paratoia, il bilancio delle forze deve necessariamente risultare:

$$G_S + G_W > F_A \quad (1)$$

Dove G_S è la forza peso, rivolta verso il basso, è il prodotto fra la forza di gravità e la somma delle masse di tutti gli elementi che costituiscono la parte strutturale della paratoia (la massa può variare da 168 ton fino a 330 ton). G_W è la forza peso, rivolta verso il basso, esercitata dal volume d'acqua stipato all'interno della paratoia. Infine, F_A è la spinta idrostatica, rivolta verso l'alto. Essa è il prodotto fra volume della paratoia immersa, quindi in questo caso tutto il volume occupato dalla paratoia, ed il peso specifico dell'acqua della laguna di Venezia.

¹⁸ **Spinta idrostatica:** Un corpo immerso in un fluido riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del fluido spostato. Essa è anche nota come spinta archimedeica, è un principio noto in idraulica già dall'antichità. È un contributo che va necessariamente tenuto da conto quando si valutano le forze agenti su un elemento immerso in un fluido.

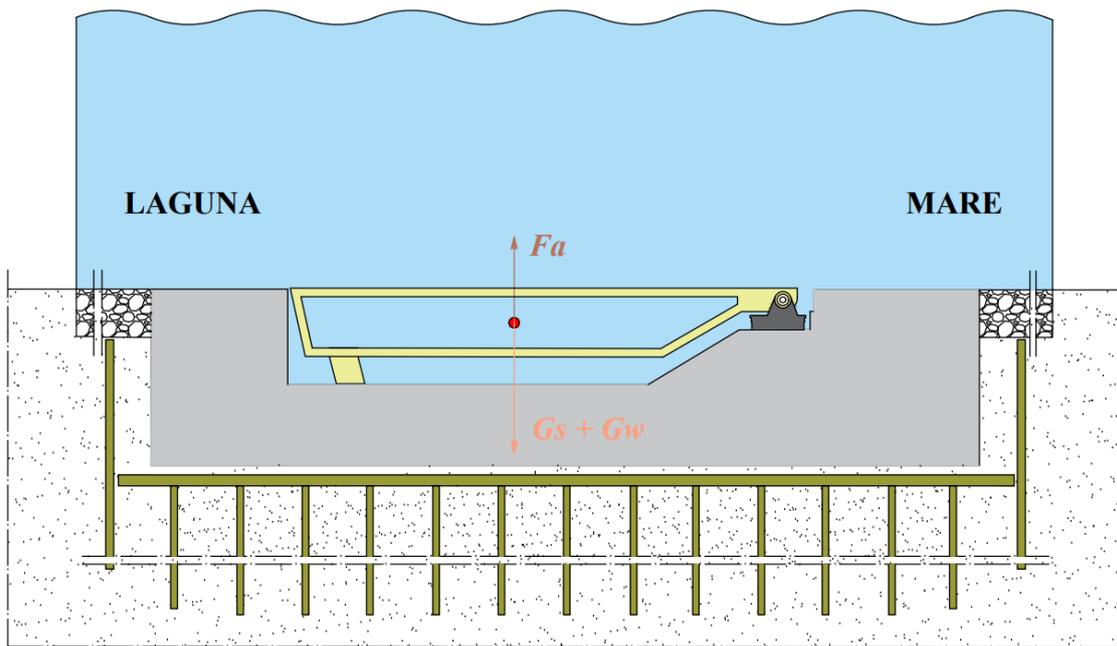


Figura 6. Sezione trasversale dell'opera durante la sua configurazione di riposo. La rappresentazione è qualitativa poiché non in scala, come si può notare la paratoia è incernierata al cassone di calcestruzzo e riempita d'acqua. Le forze agenti sull'elemento di acciaio sono state schematizzate e concentrate in un ipotetico centro di massa.

1.5.2 Transizione: da configurazione di riposo a operativa

Quando si rende necessaria l'attivazione del sistema di sbarramento, poiché è in arrivo una marea che supererebbe il livello di salvaguardia¹⁹, iniziano le operazioni di attivazione.

Le decisioni operative vengono prese all'interno della sala di controllo, situata presso l'Arsenale di Venezia²⁰. Qui gli operatori ed i tecnici hanno a disposizione tutti i dati in tempo reale dei mareografi situati fuori dalle bocche di porto (si veda *figura 2*) e lungo tutta la laguna. Avviata la procedura di attivazione, viene utilizzato un altro elemento fondamentale dell'infrastruttura: i condotti dell'aria compressa. Essi corrono all'interno degli alloggiamenti in calcestruzzo ed hanno il compito di recapitare aria ad alta pressione all'interno della camera delle paratoie.

Iniziando a pompare aria compressa nelle paratoie l'acqua presente viene forzata ad uscire, ciò si verifica soltanto se viene rispettata la seguente disuguaglianza:

$$p_{aria,in} > p_{acqua,out} \quad (2)$$

Sostanzialmente, è necessario introdurre aria ($p_{aria,in}$) che abbia una pressione ben superiore rispetto alla pressione dell'acqua contenuta all'interno delle paratoie ($p_{acqua,out}$), quest'ultima è possibile stimarla conoscendo il peso specifico dell'acqua presente in laguna e la profondità a cui sono poste le paratoie.

¹⁹ **Livello di salvaguardia:** +110 cm a Punta della Salute o +130 cm a Chioggia.

²⁰ **Arsenale di Venezia:** la zona nord del famoso complesso storico è divenuta la sede operativa del Mo.S.E.

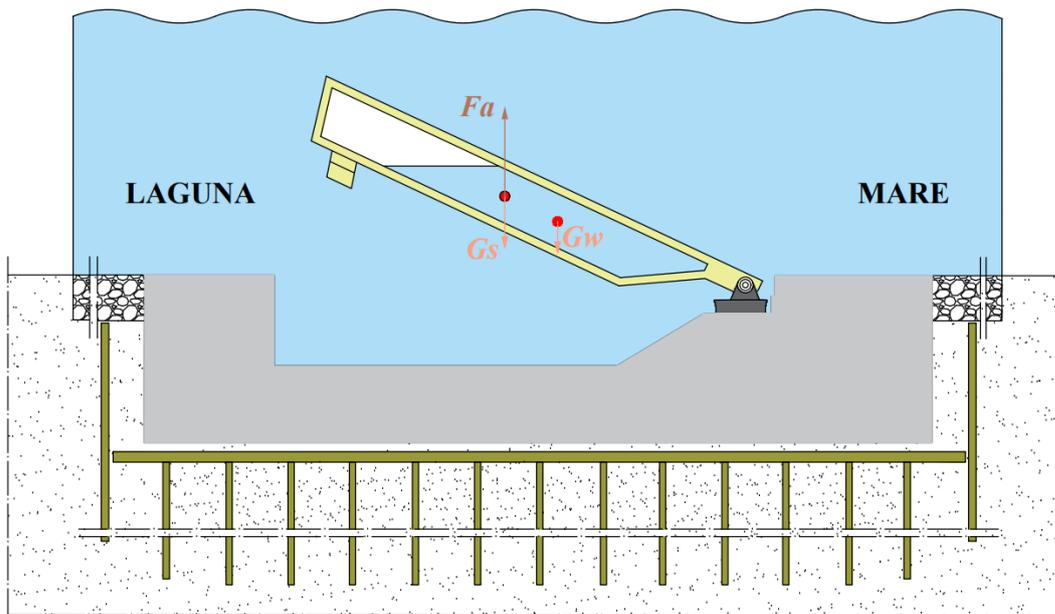


Figura 7. Rappresentazione della paratoia durante la sua fase transitoria. Com'è possibile notare, il contributo della forza peso si è ridotto rispetto alla figura 4 poiché il volume d'acqua stipato all'interno della camera si è ridotto.

Gradualmente l'aria inizia a rimpiazzare l'acqua, forzandola ad uscire, ed analizzando la disuguaglianza (1) si può notare come G_W si riduca. Tale riduzione fa gradualmente dominare la spinta idrostatica F_A (invertendo il segno della disuguaglianza) consentendo alle paratoie di ruotare attorno alle cerniere e sollevarsi senza l'ausilio di nessun dispositivo che le spinga (figura 5).

1.5.3 Configurazione operativa

La manovra di chiusura delle bocche di porto (*figura 6*) può considerarsi terminata solo quando tutte le barriere sono sollevate e poste al loro angolo di lavoro di circa 42° rispetto al piano passante per il centro di rotazione.

Tale configurazione la si ottiene portando a termine l'operazione di espulsione di acqua presente all'interno degli elementi scatolari descritti al paragrafo 1.5.2. Le barriere del Mo.S.E. una volta erette possono proteggere la laguna da maree di altezza pari al massimo 3 m. Il tempo di sollevamento di una singola barriera risulta pari a 30 minuti, si tratta dunque di un sistema di sbarramento mobile molto rapido.

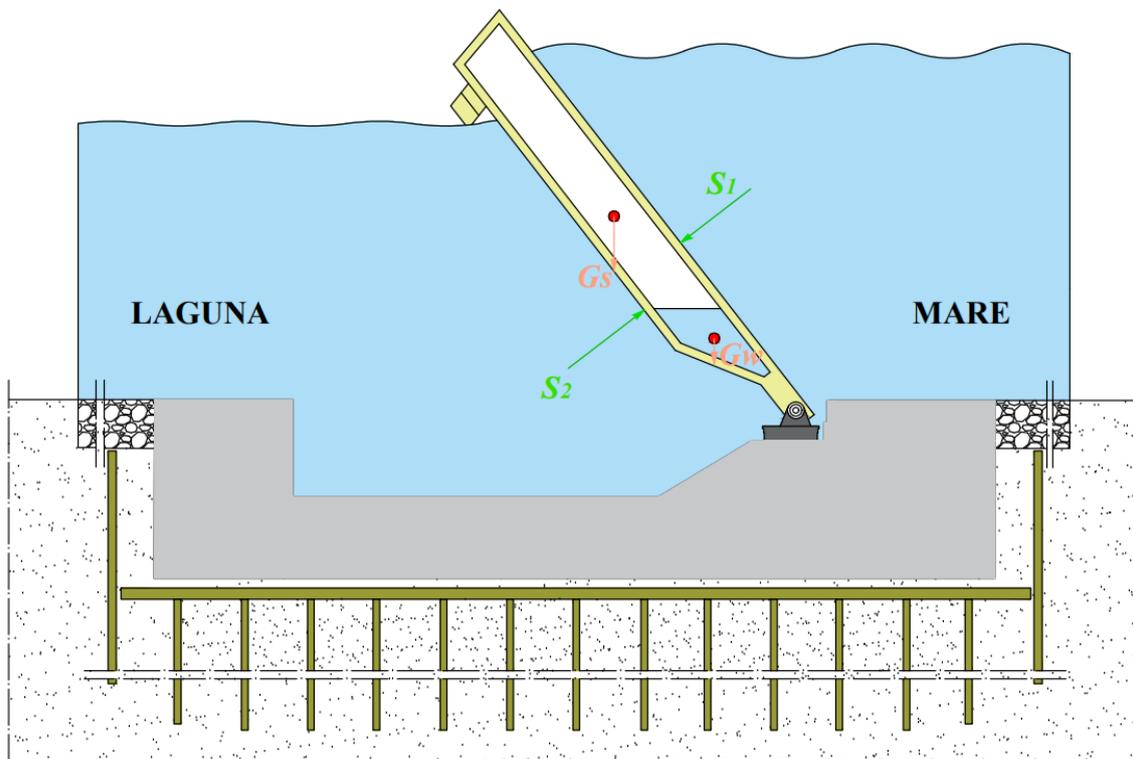


Figura 8. Paratoia sollevata che genera il dislivello idrometrico. In questa figura, in maniera qualitativa, sono state riportate le forze che agiscono sulla paratoia. G_s , il peso di tutti gli elementi strutturali, varia di molto poco (poiché la parte emersa non è più soggetta alla forza di Archimede); G_w , che rappresenta il peso dell'acqua rimanente nella camera interna, varia il suo baricentro poiché si riduce il volume. Infine, sono state schematizzate due forze: S_1 ed S_2 . La seconda rappresenta la spinta idrostatica del volume d'acqua a sinistra della paratoia, S_1 invece riassume la spinta idrostatica del volume a destra dell'elemento incernierato.

1.5.4 Transizione: da configurazione operativa a riposo

Quando l'evento mareale volge al termine, ed il livello misurato all'interno della laguna diviene pari a quello misurato in mare, è necessario abbassare le paratoie.

Proprio come per l'apertura, l'operazione di chiusura fa ruotare le paratoie attorno all'asse delle cerniere fino a raggiungere la configurazione descritta al punto 1.5.1. Questa rotazione si verifica poiché viene pompata acqua all'interno della struttura scatolare, in questo modo, facendo riferimento alla relazione (1), G_W assume gradualmente sempre più significato nella relazione fin tanto da provocare la rotazione precedentemente descritta.

L'operazione di chiusura richiede all'incirca 15 minuti, la si può considerare terminata quando i tamponi²¹ della barriera impattano sugli elementi di calcestruzzo e la paratoia si trova come in *figura 6*.

²¹ **Tamponi:** Le barriere del Mo.S.E. sono equipaggiate con due tamponi che fungono da finecorsa durante la chiusura. Essi servono anche ad evitare un contatto fra struttura metallica e struttura in calcestruzzo, se si verificasse tale accoppiamento si assisterebbe ad un deterioramento dei due elementi per abrasione.

Capitolo 2. La prima operazione del Mo.S.E.

La prima operazione del Mo.S.E. è avvenuta nell'ottobre del 2020. In quel periodo le particolari condizioni metereologiche e barometriche hanno reso necessaria la protezione delle città lagunari per ben tre giorni: il 3, il 15 ed il 16 ottobre.

A precedere la prima chiusura completa sono stati svolti alcuni test su piccoli gruppi di paratoie (*si veda <https://www.mosevenezia.eu/>*) per valutare i tempi di sollevamento ed il corretto funzionamento di tutti gli elementi, inoltre, da giugno 2020 a dicembre 2021 si è svolto un periodo di prova durante il quale il sistema è stato movimentato qualora il CPSM avesse previsto un livello maggiore o uguale a 1,30 m a PS o Chioggia.

La prima operazione ha senz'altro dato l'opportunità di notare degli aspetti mai visti prima dal punto di vista idraulico. Infatti, quando il sistema diviene operativo la laguna viene isolata dall'Adriatico e ciò implica che la marea non può propagarsi al di là delle barriere. Questo consente di notare con maggiore chiarezza l'effetto che ha il vento sull'acqua e quali sono le ripercussioni sul golfo di Venezia una volta che il sistema entra in funzione. Inoltre, considerando che le barriere non sono a tenuta stagna poiché indipendenti e libere di oscillare, è stato possibile condurre una stima sull'infiltrazione di acqua quando queste sono in posizione operativa (Mel et al., 2021).

2.1 Condizioni metereologiche e idrometriche del 3 ottobre 2020

Il 3 ottobre 2020 è entrato in funzione, per la prima volta, il sistema Mo.S.E. con successo.

L'operazione si è resa necessaria poiché era prevista una marea che, nella tarda mattinata, avrebbe potuto superare un livello a PS²² di 1.30 m. Come è possibile notare dalle previsioni fatte dal CPSM (*figura 9, previsioni marea astronomica a PS ottobre 2020*), la differenza tra livello misurato (*con riferimento ai valori misurati, figura 10*) e livello previsto è stata di circa 0.6 m, tale valore non risulta essere elevato (Mel et al., 2014), ed è senz'altro dovuto alla componente metereologica e barometrica sotto descritta.

Dunque, ad accentuare l'evento mareale dei primi giorni dell'ottobre 2020 sono state le particolari condizioni verificatesi nella zona lagunare già nei giorni finali del mese di settembre. Infatti, la direzione del vento ha incentivato la migrazione d'acqua da sud verso nord dell'Adriatico. Inoltre, un altro importante contributo è stato dato dalle condizioni barometriche: nella parte settentrionale, in corrispondenza del golfo di Venezia, vi era una pressione atmosferica inferiore rispetto alla parte meridionale del mare Adriatico (Mel et al., 2021). Durante la mattinata del 3 ottobre, la piattaforma del CNR a largo della laguna (*pallino grigio, figura 2*), ha misurato la massima intensità del vento, pari a 14 m/s alle 9.00 CET. La soglia di salvaguardia di 1.10 m è stata superata per 4 ore, infatti, i misuratori situati fuori dalle bocche di porto (*figura 2, pallini gialli*) hanno rilevato i seguenti livelli idrometrici (a barriere chiuse): Diga Sud Lido 1.32 m, Diga Nord Malamocco 1.27 m e Diga Sud Chioggia 1.23 m.

Osservando i livelli precedentemente riportati è possibile farsi un'idea dell'effetto che ha esercitato il vento. Infatti, concorde al vento, la quota del pelo libero cresce da sud verso nord (riferendosi alle bocche di porto).

²² **PS:** punta della salute

2.2 Chiusura del 3 ottobre 2020

Le operazioni di sollevamento delle 78 barriere sono iniziate alle 7.30 CET (*funzionamento al paragrafo 1.5.2.*) e terminate attorno alle 8.50 CET. Di notevole importanza è analizzare il livello misurato a PS dopo la chiusura delle bocche di porto, inizialmente pari a 0.77 m e successivamente sceso a 0.70 m. Quest'ultima riduzione è avvenuta a causa della propagazione delle onde di mareggiata (Mel et al., 2021).

Si ricorda che, in accordo con le quote altimetriche fornite dal CPSM (<https://www.comune.venezia.it/it/content/interpretare-la-previsione-di-marea>), è necessario un livello di poco superiore ai 0.80 m a PS per allagare il punto più basso di Venezia, ovvero piazza San Marco.

Coerentemente con quanto detto al paragrafo precedente, il livello registrato all'interno della laguna, dal misuratore di Chioggia posto a sud della laguna, è stato di 0.68 m a causa dell'effetto del vento. La massima differenza di livello, fra interno ed esterno, è stata rilevata alle 11.30 CET e pari a 0.6 m, ottenuta per differenza tra i valori misurati a PS e a Diga Sud Lido (fuori dalla bocca di porto). L'operazione di chiusura (si veda il funzionamento al *paragrafo 1.5.4.*) è iniziata alle 14.10 CET, non appena il livello misurato alle bocche di porto (lato mare) ha iniziato a decrescere e ad essere confrontabile con il livello all'interno della laguna. Anche in questo caso è stato possibile notare un aspetto mai visto prima, durante la chiusura delle paratoie i livelli misurati dai sei mareografi posti all'interno della laguna (*figura 2*) hanno mostrato la tendenza ad incrementare.

Mediamente, si è passati da un livello di 0.64 m alle 9.20 CET (30 minuti dopo il sollevamento del sistema) ad un livello di 0.70 m alle 14.20 CET (10 minuti dopo l'inizio delle operazioni di chiusura). Com'è possibile notare dalla *figura 11 (b)*, osservando la linea nera che rappresenta la media dei valori, il livello a bocche di porto chiuse tende a crescere.

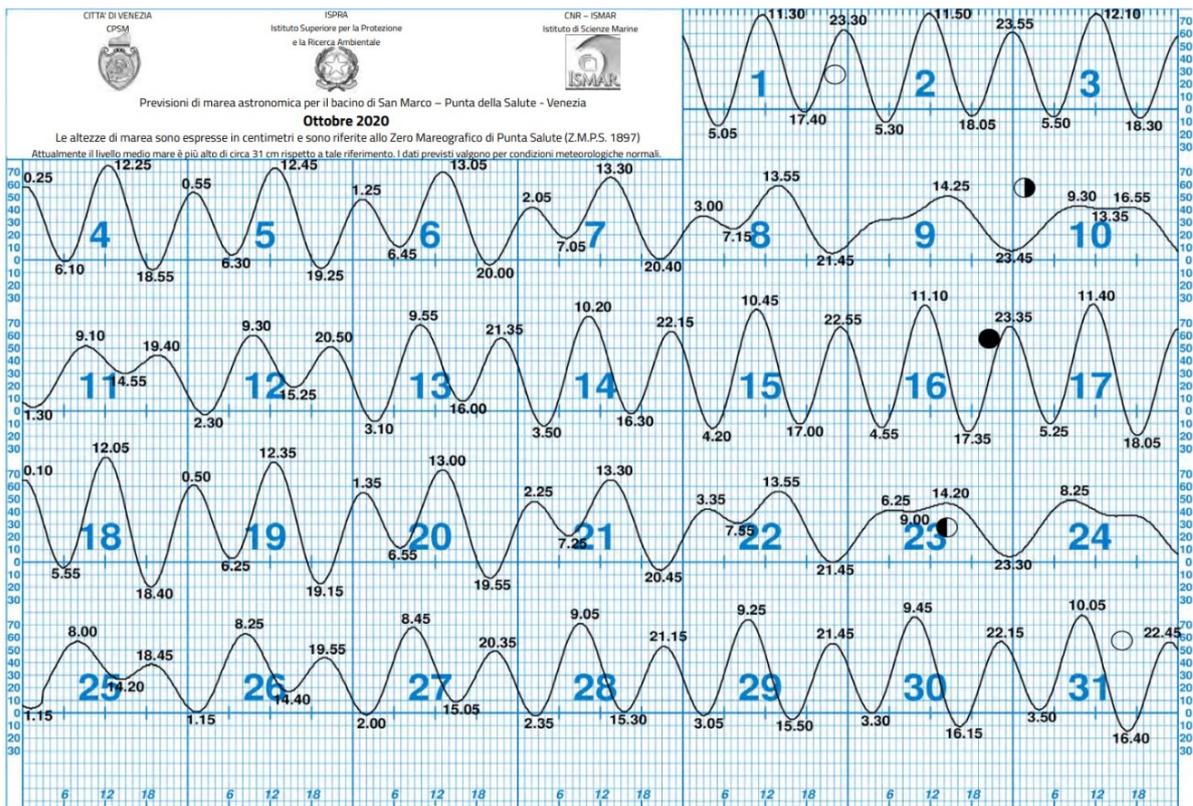


Figura 9. Previsioni di marea astronomica fornite dal CPSM per il mese di ottobre. Sull'asse verticale sono espressi i cm previsti, mentre sull'asse orizzontale l'orario in cui si prevede il picco.

Fonte: archivio valori CPSM



	data	ora solare	valore(cm)		data	ora solare	valore(cm)	
1	26-feb-20	0.30	80		57	06-ott-20	12.00	82
2	28-feb-20	1.10	85		58	07-ott-20	11.45	85
3	01-mar-20	1.05	80		59	12-ott-20	8.55	81
4	02-mar-20	21.50	95		60	13-ott-20	9.00	84
5	06-mar-20	7.50	101		61	13-ott-20	20.25	81
6	07-mar-20	8.25	84		62	14-ott-20	9.25	91
7	08-mar-20	9.35	81		63	14-ott-20	21.15	82
8	08-mar-20	23.25	80	*	64	15-ott-20	9.05	132
9	10-mar-20	23.45	81		65	15-ott-20	22.00	80
10	25-apr-20	23.30	83	*	66	16-ott-20	9.15	111
11	26-apr-20	23.50	81		67	17-ott-20	10.45	105
12	05-mag-20	21.35	85		68	18-ott-20	11.05	92
13	06-mag-20	22.05	83		69	19-ott-20	11.30	84
14	11-mag-20	14.55	81		70	26-ott-20	20.10	89
15	19-mag-20	20.45	80		71	27-ott-20	9.00	92
16	23-mag-20	22.50	81		72	29-ott-20	9.15	83
17	03-giu-20	20.25	86		73	30-ott-20	9.50	80
18	04-giu-20	21.35	116		74	15-nov-20	10.10	81
19	05-giu-20	21.30	99		75	16-nov-20	10.45	91
20	06-giu-20	22.35	89		76	29-nov-20	9.45	89
21	07-giu-20	23.15	95		77	30-nov-20	10.15	88
22	09-giu-20	0.00	91		78	01-dic-20	10.25	91
23	10-giu-20	15.55	81	*	79	02-dic-20	9.45	124
24	11-giu-20	15.15	81		80	03-dic-20	1.40	82
25	14-giu-20	18.40	80		81	03-dic-20	10.30	99
26	16-giu-20	19.45	84		82	04-dic-20	2.05	94
27	17-giu-20	20.20	88		83	04-dic-20	11.30	86
28	18-giu-20	20.40	88	*	84	05-dic-20	0.50	122
29	19-giu-20	21.15	86	*	85	05-dic-20	6.50	87
30	20-giu-20	21.50	81	*	86	05-dic-20	10.50	114
31	03-lug-20	21.05	84	*	87	06-dic-20	0.45	120
32	04-lug-20	21.50	80	*	88	06-dic-20	6.25	81
33	02-ago-20	22.10	83	*	89	06-dic-20	14.10	123
34	03-ago-20	21.30	94		90	07-dic-20	2.50	81
35	04-ago-20	22.30	82		91	07-dic-20	15.20	94
36	23-ago-20	14.00	80		92	08-dic-20	8.55	95
37	29-ago-20	20.00	95		93	08-dic-20	10.45	89
38	30-ago-20	10.00	84		94	08-dic-20	16.25	138
39	30-ago-20	20.40	102	*	95	09-dic-20	8.10	113
40	03-set-20	12.00	80	*	96	10-dic-20	7.20	122
41	18-set-20	11.45	82	*	97	11-dic-20	6.45	124
42	19-set-20	12.05	83	*	98	12-dic-20	7.30	113
43	20-set-20	12.10	81		99	12-dic-20	22.30	88
44	25-set-20	8.35	81		100	13-dic-20	9.05	99
45	27-set-20	10.05	92		101	13-dic-20	22.40	88
46	27-set-20	21.15	87		102	14-dic-20	9.40	97
47	28-set-20	9.30	87		103	15-dic-20	10.30	101
48	28-set-20	21.50	90		104	16-dic-20	11.05	96
49	29-set-20	21.25	85		105	17-dic-20	11.10	85
50	01-ott-20	11.05	83	*	106	28-dic-20	10.10	128
51	02-ott-20	11.30	97		107	28-dic-20	23.05	81
52	02-ott-20	22.50	97	*	108	29-dic-20	9.15	93
* 53	03-ott-20	11.10	119		109	29-dic-20	22.05	82
54	03-ott-20	22.45	95	*	110	30-dic-20	9.10	110
55	04-ott-20	11.45	100	*	111	31-dic-20	9.35	104
56	05-ott-20	11.35	98		112			

* MOSE in funzione

Valori aggiornati al
31 dicembre 2020

**registrati in (Piattaforma)
con Mose in funzione**

Figura 10. Valori misurati dal CPSM maggiori o uguali a 80 cm nel mese di ottobre 2020. I valori rossi indicano che il dato rilevato è stato registrato dalla piattaforma del CNR in mare aperto. L'asterisco, invece, indicano i valori con il Mo.S.E. in funzione. Fonte: archivio valori CPSM

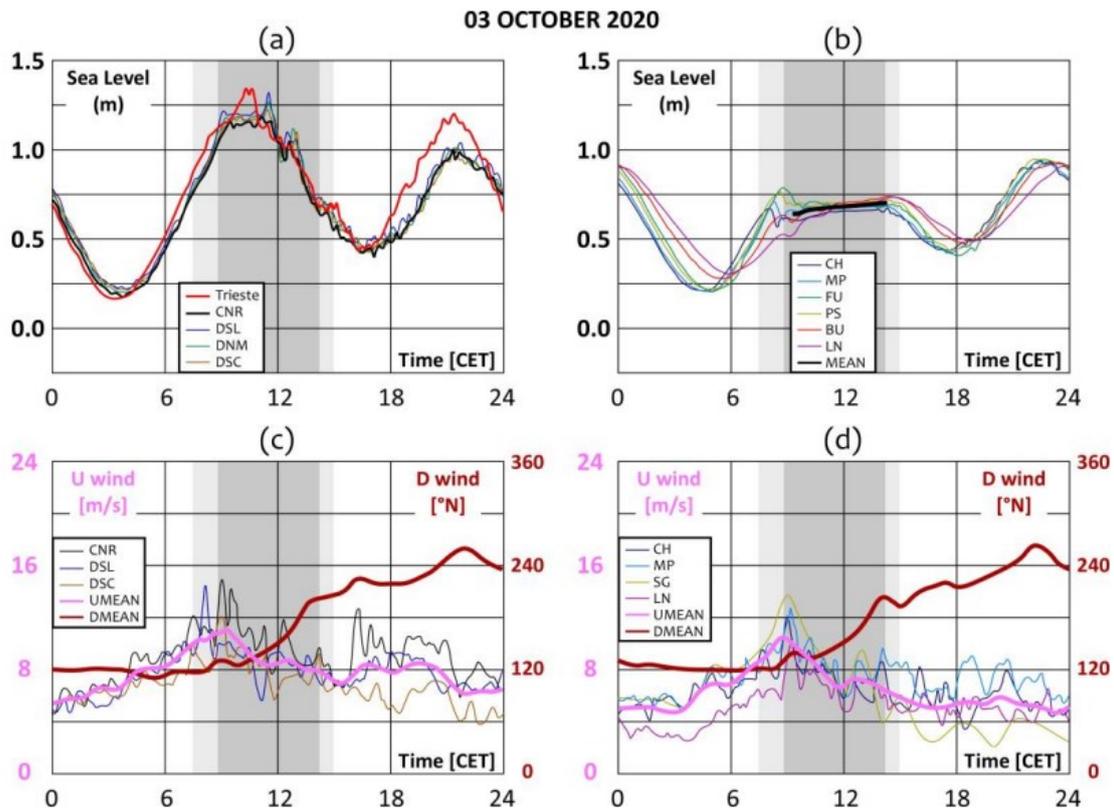


Figura 11. Valori del 3 ottobre di livello idrometrico e vento in funzione dell'orario del giorno, (fonte: Mel et al., 2021). Per tutti e quattro i grafici la banda grigia scura identifica il periodo in cui Mo.S.E. era operativo, le sfumature grigie denotano quando era in fase di sollevamento ed abbassamento. La figura 11 (a) contiene i valori registrati dai misuratori posti fuori dalle bocche di porto (DSL, DNM, DSC), gli altri due sono i valori registrati dalla piattaforma del CNR e dal misuratore di Trieste. Similmente, anche nella figura 11(b) vengono indicati i livelli registrati però dai 6 misuratori posti all'interno della laguna (si faccia riferimento a figura 2). Nella figura 11 (c), vengono graficati i valori della velocità del vento misurati all'esterno di DSL, DSC e dalla piattaforma del CNR. Inoltre, la linea rosa rappresenta la media della velocità del vento, quella rossa scura la media della direzione del vento. Infine, il grafico 11(d) rappresenta le intensità di vento misurate all'interno della laguna: Chioggia Porto, Malamocco Porto, San Giorgio, Laguna Nord. Similmente a figura 11 (c), la linea rossa scura esprime la media della direzione del vento e quella rosa la media della velocità del vento.

2.3 Condizioni metereologiche del 15 e 16 ottobre 2020

Anche in questo periodo la coesistenza dei fattori astronomici e metereologici ha portato ad una marea tale per cui è stato necessario sollevare il Mo.S.E.

Le previsioni fornite dal CPSM per il 15 ottobre (*figura 9*) indicavano una marea astronomica di 0.81 m a PS, il livello misurato dalla piattaforma del CNR è stato invece di 1.32 m (*si veda figura 10*). La differenza è stata dunque di 0.5 m, dieci centimetri in meno rispetto a quella del 3 ottobre. Durante questa giornata, il livello di salvaguardia (1.10 m) è stato superato per 3.5 ore. A Diga Sud Lido, mentre le barriere del Mo.S.E. erano sollevate, si sono registrati 1.35 m, Diga Nord Malamocco 1.40 m e Diga Sud Chioggia 1.44 m (*figura 10*); gradiente di altezza idrometrica che è stato generato dal vento di Bora (Mel et al., 2021).

Nella giornata successiva, il 16 ottobre, la marea astronomica prevista a PS era di 0.84m. La componente metereologica ha incrementato di circa 0.40 m il livello, infatti, il dato medio rilevato dalla piattaforma del CNR è stato di 1.11 m. Durante l'attività del sistema di sbarramento, i dati registrati fuori dalle bocche di porto sono stati: 1.16 m a Diga Nord Malamocco e 1.17 m a Diga Sud Lido e Diga Sud Chioggia.

2.4 Chiusura del 15 ottobre 2020

Alle 6.10 CET le barriere hanno iniziato a sollevarsi, terminando la manovra alle 7.10 CET. Durante questa giornata, il vento ha rappresentato un contributo non trascurabile.

Per capirlo è necessario osservare i dati registrati dai mareografi dopo la chiusura delle bocche di porto, a PS il livello misurato è passato da 0.65 m (poco dopo la chiusura) a 0.47 m. Anche all'interno della laguna, per effetto del vento, si è assistito ad una consistente differenza di altezza idrometrica: a Chioggia (sud della laguna) si sono toccati i 0.92 m, si è assistito ad una differenza media con PS di circa 0.40 m.

In accordo con i valori (sotto riportati) registrati dopo la chiusura, anche in questo caso il livello della laguna è aumentato (+ 0.04 m). La fase di abbassamento delle paratoie è iniziata alle 12.00 CET dalla bocca di porto di Chioggia è stato il punto in cui per primo si è raggiunto la minor differenza di livello mare-laguna.

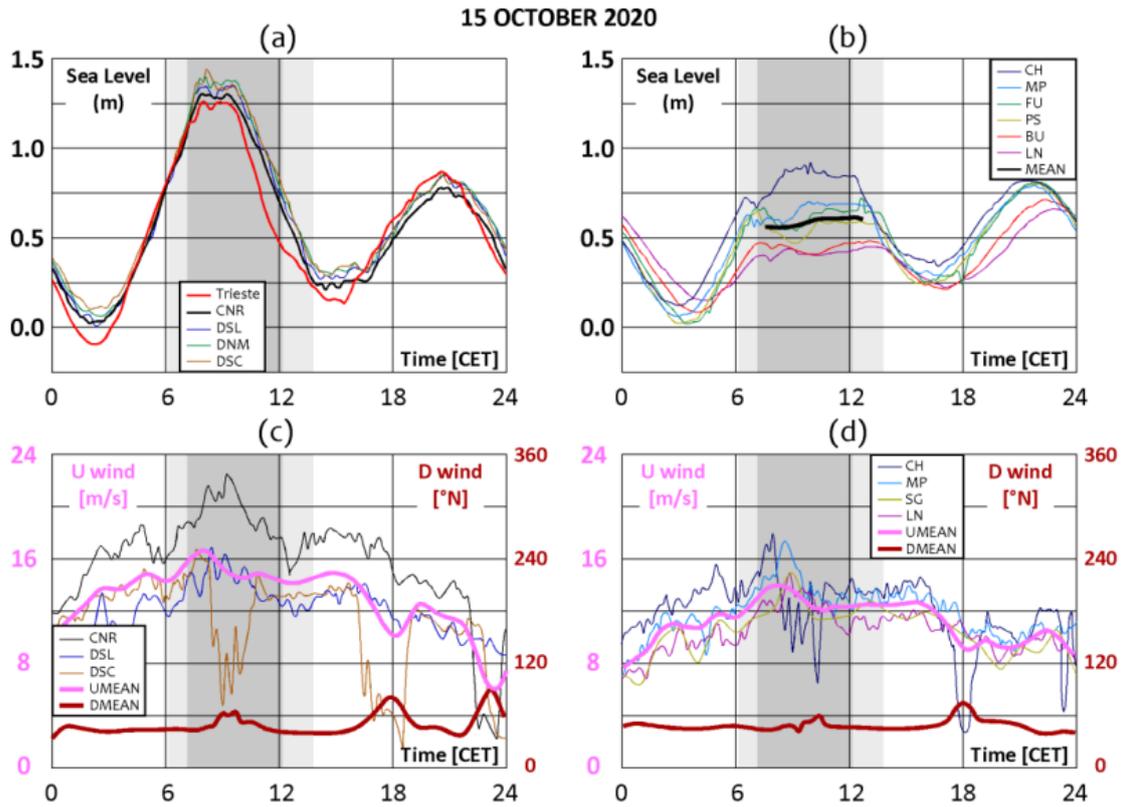


Figura 12 (a) e 12 (b), valori di altezza idrometrica registrati dai misuratori citati a figura 11(a) e 11 (b).
 Figura 12 (c) e 12 (d), valori di velocità e direzionalità del vento rilevati dai misuratori citati a figura 11 (c) e 11(d). Fonte: Mel et al., 2021.

2.5 Chiusura del 16 ottobre 2020

Anche il 16 ottobre, le operazioni di attivazione del sistema Mo.S.E. sono iniziate attorno alle 6.10 CET. L'aumento di livello rilevato in laguna, dopo questa fase, è stato di + 0.05 m (si veda *figura 12 b*, valore medio).

Il livello misurato, poco dopo la chiusura totale delle bocche (7.10 CET), a PS è stato di 0.45 m e 0.50 m a Chioggia. Il livello misurato (*figura 8*) dalla piattaforma del CNR, alle 9.10 CET, è stato di 1.11 m, mentre il massimo dislivello raggiunto fra mare e laguna è stato di 0.75 m.

Alle ore 12.30 CET le barriere hanno iniziato ad abbassarsi poiché l'evento mareale è volto al termine.

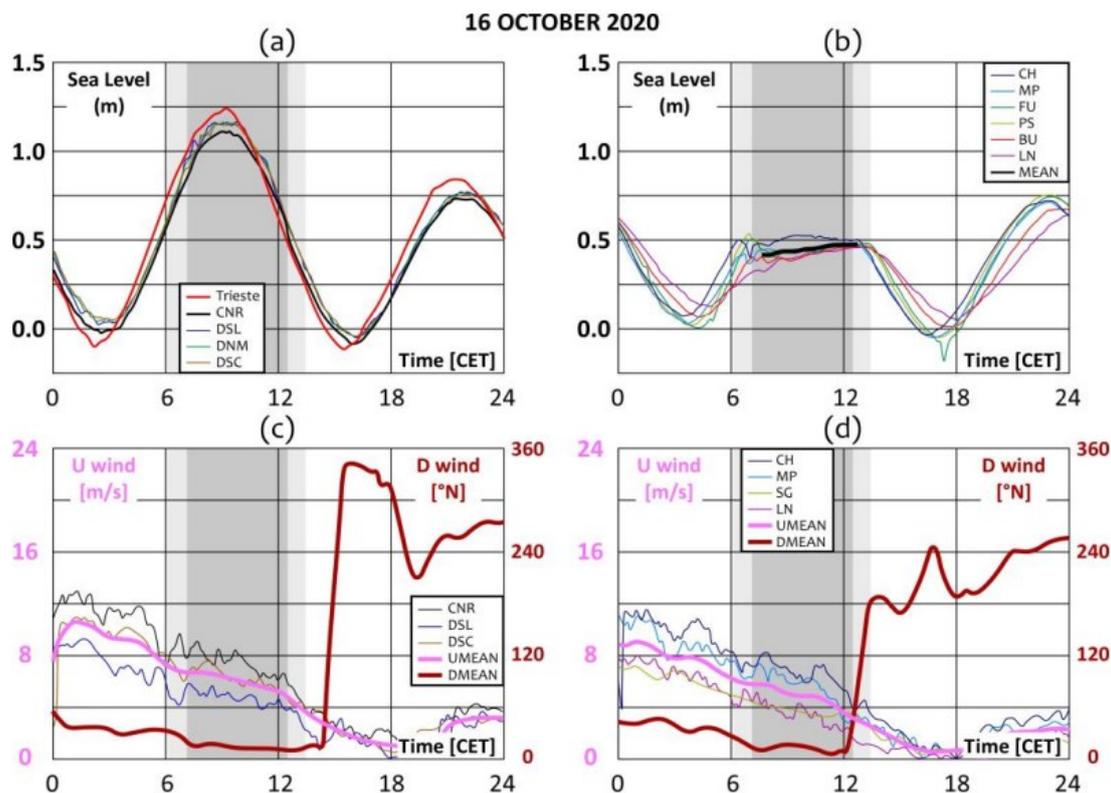


Figura 13 (a) e 13 (b), valori di altezza idrometrica registrati dai misuratori citati a figura 11(a) e 11 (b).
Figura 13 (c) e 13 (d), valori di velocità e direzionalità del vento rilevati dai misuratori citati a figura 11 (c) e 11(d). Fonte: Mel et al., 2021.

Capitolo 3. Stima della filtrazione fra le barriere

Vista una delle caratteristiche costruttive del Mo.S.E. più interessante, ovvero l'indipendenza delle barriere l'una dall'altra, è stato d'interesse fin dalle fasi progettuali e sperimentali stimare la quantità d'acqua che riesce a fluire attraverso gli elementi di sbarramento.

3.1 Contributi di portata in laguna durante gli eventi pluviali

Durante le tre chiusure sopradescritte, i sei misuratori presenti nella laguna (*figura 2, pallini blu*) hanno registrato un incremento del livello idrometrico in laguna.

Tale aumento è causato da tre contributi: la pioggia che cade all'interno della laguna (chiusa), l'area afferente alla laguna di circa 2000 km² che, durante gli eventi pluviali, scarica acqua piovana ed infine vi è l'infiltrazione tra le barriere. Infatti, come brevemente introdotto nel *capitolo 1*, le 78 barriere sono indipendenti. Tale caratteristica tecnica implica che la singola barriera è libera di oscillare e muoversi indipendentemente da quello che fanno quelle attorno ad essa. Va da sé che il sistema, quando è operativo, non è a tenuta stagna e ciò implica che essendoci un dislivello provocato dalla chiusura si verifica una filtrazione d'acqua dal mare verso la laguna. Inoltre, il traferro²³ fra le barriere non è da considerarsi costante e ciò complica non di poco la stima dell'area attraverso il quale l'acqua può infiltrarsi l'acqua. Esso infatti, in condizioni dinamiche, provocate dalle onde di mareggiata, varia in funzione dell'angolo di oscillazione (Adami et al., 2003).

Si può quindi affermare che, l'infiltrazione d'acqua fra le barriere del Mo.S.E. è causata dal traferro, dall'oscillazione delle barriere e, come identificato dagli studi condotti su modelli in scala 1:10 e 1:30 (Consorzio Venezia Nuova), dal dislivello mare-laguna.

La prime chiusure totali della laguna, avvenute nell'ottobre 2020 ed analizzate nel *capitolo 2*, hanno dato la possibilità di stimare concretamente la quantità d'acqua che

²³ **Traferro:** spazio che separa lateralmente una barriera dall'altra.

attraversa le barriere. È stato possibile rilevare l'incremento di livello grazie ad un'operazione di filtrazione dei dati registrati dai sei misuratori di livello (interni alla laguna) durante le tre chiusure, durate mediamente circa 5 ore e 50 minuti ciascuna.

Quest'ultimi hanno osservato un incremento medio di 10 mm/h (figura 14 a), si può stimare che il contributo dato dall'infiltrazione fra le barriere è di 9 mm/h (Mel et al., 2021). La restante parte, 1 mm/h, è la somma della pioggia caduta sopra la laguna e dell'apporto dovuto all'area afferente.

Questi valori possono essere considerati corretti poiché risultano compresi nell'intervallo stimato dal Commissione Degli Esperti (1998); infatti, in quest'ultimo studio l'incremento di livello risultava essere pari a 2.7 mm/h qualora le barriere fossero immobili, 4.5 mm/h in condizioni di onde moderate e più di 21mm/h con onde causate da maree eccezionali.

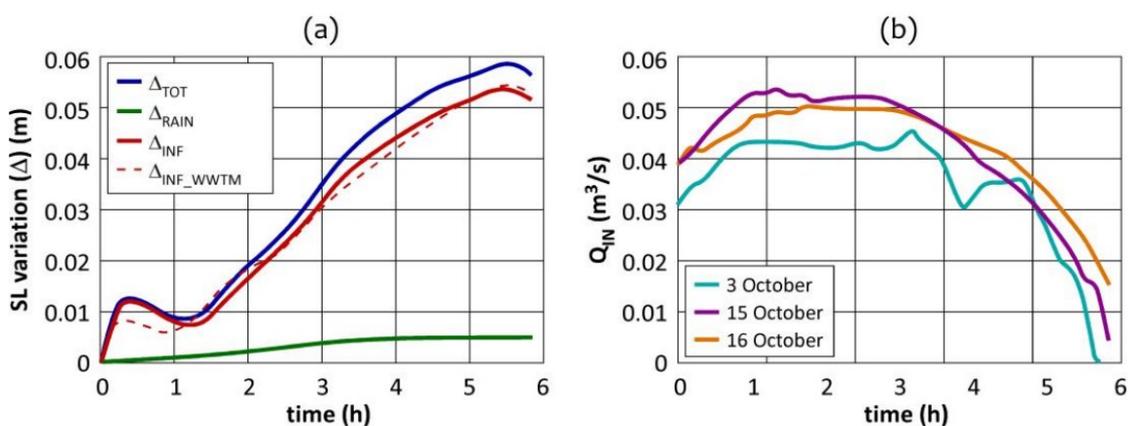


Figura 14 (a), variazione del livello idrometrico durante il funzionamento del Mo.S.E. in funzione de tempo (dati del 3,15 e 16 ottobre aggregati). La linea verde (Δ_{RAIN}) è il contributo dato dalla pioggia più l'area afferente, la linea blu (Δ_{TOT}) è invece l'infiltrazione totale; infine, la linea rossa tratteggiata è la filtrazione d'acqua attraverso le barriere stimata utilizzando il modello WWTM (descritto al capitolo 4). Figura 14 (b), servendosi dell'equazione (3) e del modello WWTM si ottengono i valori di portata in ingresso distinta nei 3 giorni di chiusura. Fonte: Mel et al., 2021.

3.2 Stima della portata

Ragionando in termini di portata (*figura 14 b*), è possibile stimare la filtrazione d'acqua con la formula:

$$Q_{in} = C_Q \cdot \sqrt{2 g \Delta h} = [m^3/h] \quad (3)$$

Dove Q_{in} è la portata in ingresso dal mare, g è la forza di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$), 2 è una costante e Δh la differenza di altezza fra l'acqua del mare e l'acqua della laguna.

Nella stima che segue, il coefficiente di efflusso C_Q , è posto pari a 266 m^2 . Esso corrisponde ad un'area di filtrazione di 180 m^2 (che è possibile ottenere moltiplicando il traferro fra barriere per l'altezza dell'acqua dalla parte del mare) moltiplicata per $1,48$ (Mel et al., 2021). Va ricordato che, il coefficiente C_Q è funzione anche della forma attraverso il quale defluisce l'acqua, nel caso delle barriere del Mo.S.E., l'effetto dinamico provocato dalle onde fa variare quest'ultima. Pertanto, si tratta di una stima e non di un valore esatto. Servendosi dell'equazione (3) è possibile quantificare una portata superiore a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (*figura 14b*), inoltre, è possibile valutare il contributo di ogni singola bocca di porto in funzione della propria area (per dimensioni, si veda *capitolo 1*).

La bocca di porto di Lido possiede 2 schiere di barriere: San Nicolò, che contribuisce per il 29% e Treporti per il 16%. Malamocco è responsabile per il 31% mentre Chioggia per il 24%.

In conclusione, osservando il grafico riportato nella *figura 14 (b)*, è interessante notare come la portata fluente attraverso le paratoie inizi a diminuire a 4 ore dalla chiusura. È possibile giustificare questo ragionando sui singoli eventi (dalla durata media di 5 ore e 50), infatti, come prima detto, essendo che le barriere vengono abbassate nel momento in cui la marea sta calando, il contributo Δh dell'equazione (3) si riduce facendo diminuire la portata in ingresso. Pertanto, se la marea cala, cala anche il dislivello idrometrico fra mare e laguna, andando a ridurre la portata che attraversa le barriere.

Capitolo 4. Analisi dei 3 eventi a posteriori

È d'interesse interrogarsi su come sarebbero potute andare le cose qualora il sistema Mo.S.E. non avesse fermato la marea fuori dalle bocche di porto durante gli eventi mareali di cui al *capitolo 2*.

Durante la fase di test dell'opera, con l'ausilio di un modello matematico, il WWTM, è stato possibile ricostruire l'andamento del livello idrometrico in laguna, in condizioni di Mo.S.E. non operativo, nei giorni in cui il sistema di sbarramento è stato sollevato (Mel et al., 2021). In particolare, l'attenzione è stata focalizzata sui primi giorni di chiusura (le cui condizioni metereologiche ed idrometriche sono state analizzate al *capitolo 2*). Questa operazione è molto importante, non solo per tenere aggiornati i valori che quotidianamente vengono raccolti dal CPSM sull'andamento della marea all'interno della laguna, utili poi a rafforzare la qualità delle previsioni fatte, ma anche a capire se effettivamente il Mo.S.E. contribuisce a ridurre il livello in laguna durante certi eventi.

4.1 Calcolo del livello idrometrico in laguna durante gli eventi di ottobre 2020

Grazie al modello matematico WWTM²⁴ (Carniello et al., 2005), è stato possibile ottenere e comparare le altezze idrometriche a PS, Chioggia e Burano simulando l'inattività del Mo.S.E. Nella figura che segue, suddivisi per data e luogo vengono riportate le altezze in funzione del tempo.

²⁴ **Modello WWTM:** l'acronimo sta per Wind (vento), Wave (onda), Tidal (marea) Model (modello). È un modello bidimensionale agli elementi finiti (FEM). In questo capitolo, con riferimento a quanto fatto nel lavoro di ricerca di Daniele P. Viero et al., 2021 il modello viene impiegato per valutare le altezze idrometriche che si sarebbero raggiunte in alcuni punti della laguna nei giorni del 3, 15 e 16 ottobre in condizioni di Mo.S.E. inattivo.

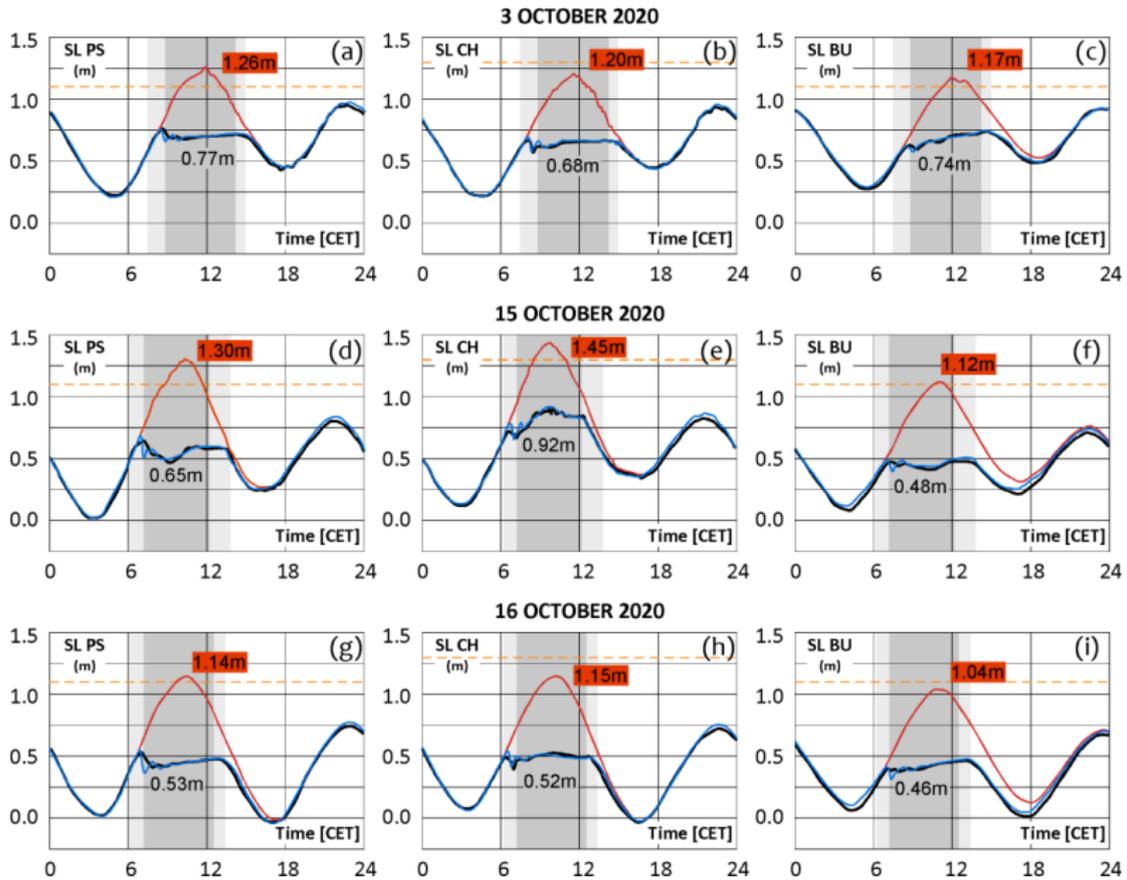


Figura 15. PS (Punta della Salute), CH (Chioggia), BU (Burano). La linea tratteggiata identifica il livello di salvaguardia (1.10 m per PS e 1.30 m per CH), la linea rosa rappresenta il livello calcolato dal modello matematico se il Mo.S.E. non fosse stato chiuso, la linea blu invece è sempre l'output del WWTM ma raffigura l'andamento calcolato qualora il Mo.S.E. fosse chiuso. Fonte: Mel et al., 2021.

Con riferimento alla figura 15, è corretto assumere che il WWTM restituisca dei risultati attendibili. Infatti, la linea blu quasi coincide con la linea nera. Quest'ultima rappresenta l'andamento del livello in laguna registrato dai mareografi del CPSM, ciò vuol dire che l'output del modello matematico (linea blu) è in grado di riprodurre opportunamente bene quanto accade nella realtà. Osservando i nove picchi calcolati dal WWTM, si nota rapidamente che solo il 15 ottobre la soglia fissata per la fase di test (1.30 m) sarebbe stata superata (Mel et al, 2021).

È interessante evidenziare come il livello che si raggiunge all'interno della laguna sia mediamente più basso rispetto al livello registrato fuori dalla laguna. Osservando quanto riportato nella figura 15(a), il picco calcolato a PS dal modello matematico è 1.26 m mentre il picco registrato a Diga Sud Lido (lato mare) è stato di 1.32 m.

Ciò significa, continuando a considerare validi i risultati restituiti dal WWTM, che il picco registrato in mare non sarebbe coinciso con il picco registrato in laguna se le barriere fossero state inattive. Nello specifico, non si sarebbe superato il livello di salvaguardia fissato per la fase di test.

Osservando i dati registrati dal 2015 al 2019 (Mel et al., 2021), e focalizzando l'attenzione sulle maree che hanno superato i 110 cm a Diga Sud Lido o Diga Sud Chioggia, si perviene al diagramma a barre di *figura 16*.

Mediamente si osserva una discrepanza di 0.03 – 0.04 m fra esterno ed interno della laguna, su 65 casi analizzati in sole 20 occasioni si è raggiunta la soglia di salvaguardia di 1.10 sia in mare che in laguna a PS.

In conclusione, l'impiego di modelli matematici in grado di riprodurre questi scenari è fondamentale per scongiurare falsi allarmi o sollevamenti del sistema quando non sia necessario.

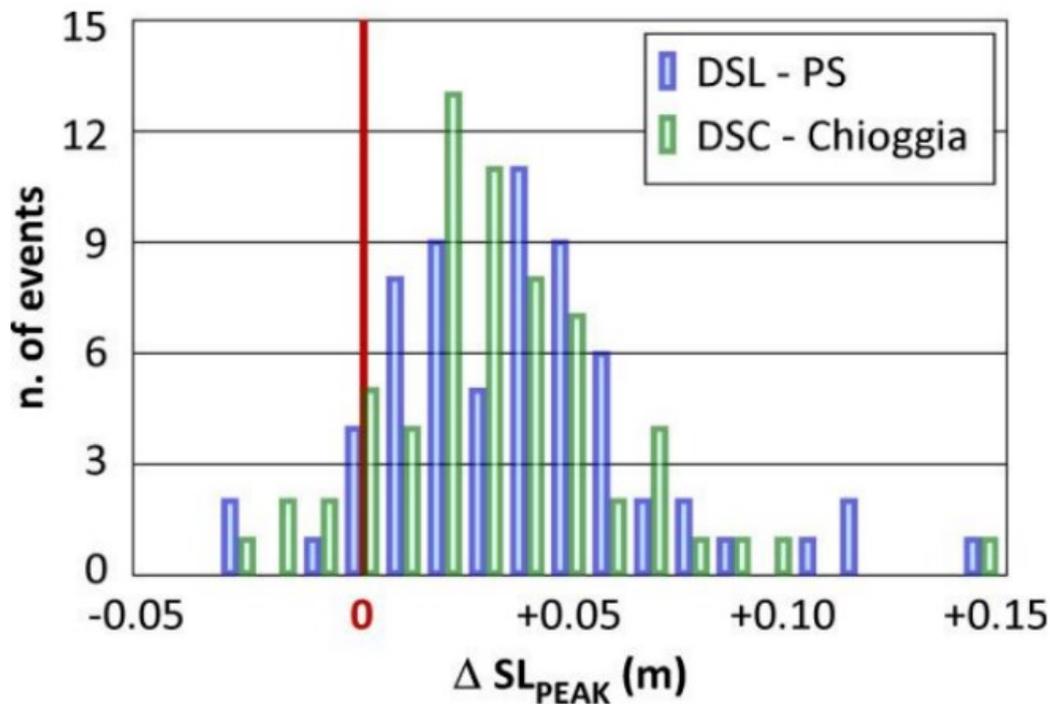


Figura 16. Le barre blu rappresentano il confronto fra Diga Sud Lido e PS, mentre quelle verdi riportano il confronto fra DSC e Chioggia. Sull'asse delle ordinate si riporta il numero di eventi, mentre su quello delle ascisse la differenza fra esterno ed interno laguna. Fonte: Mel et al., 2021.

4.2 Disturbo prodotto dal Mo.S.E. nell'alto Adriatico

È lecito chiedersi, osservando anche le misurazioni dei mareografi, se la chiusura temporanea delle bocche di porto mediante l'utilizzo delle barriere possa produrre alcuni effetti idrodinamici in prossimità delle bocche di porto (lato mare) e sulla parte settentrionale del mare Adriatico.

Nella figura 17 (a), sfruttando il WWTM di cui al paragrafo precedente, sono state riportate le simulazioni di due maree di 0.70 m imponendo l'assenza di vento, una in condizioni di Mo.S.E. attivo (linea blu tratteggiata) ed una in condizioni di inattività (linea blu continua). Si nota, che appena dopo aver chiuso le bocche di porto, il livello in prossimità di queste cresce rispetto alla condizione indisturbata (solo nelle fasi iniziali).

Ciò è dovuto alla riduzione del flusso transitante attraverso dei tre ingressi alla laguna (Mel et al., 2021). Qualche ora dopo il livello torna ad essere simile alla condizione non disturbata (linea tratteggiata blu). La linea rossa rappresenta la differenza fra i livelli, appena dopo la chiusura si arriva ad avere una differenza di + 25 cm.

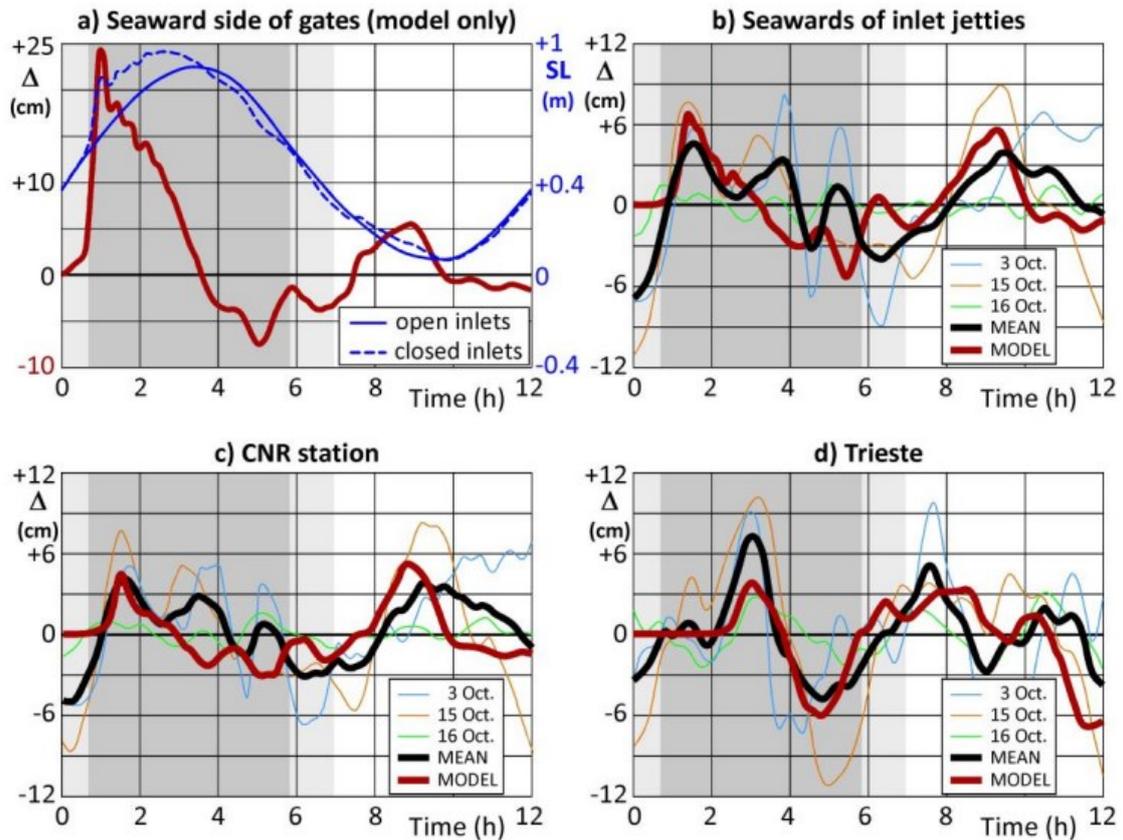


Figura 17 (a), la linea continua blu è la marea riprodotta dal modello WWTM con le bocche di porto aperte (condizione indisturbata), mentre la linea blu tratteggiata rappresenta la marea in condizioni di bocche di porto chiuse (intervallo di tempo: parte grigia scura e grigia chiara). La linea rossa scura grafica la differenza di livello tra una situazione e l'altra, risultato ottenuto sempre con l'impiego del WWTM. Figura 17 (b) (c) (d), la linea nera è il risultato della media fra le linee sottili, esse riportano i livelli misurati durante gli eventi del 3, 15 e 16 ottobre approssimati con una curva sinusoidale.

Nei grafici (b), (c) e (d) viene riportata sempre la differenza fra livello (Mo.S.E. chiuso rispetto a Mo.S.E. aperto) con la linea rossa scura, la linea nera invece rappresenta la media delle linee sottili, quest'ultime sono la differenza fra livello misurato ed un'approssimazione sinusoidale fatta nelle prime 12 ore post chiusura (nei giorni 3, 15, 16 ottobre).

Ciò che si nota è come la linea nera abbia dei picchi molto simili alla linea rossa, in termini di altezza e tempo, ciò implica che la chiusura delle bocche di porto con le barriere produce dei disturbi a livello idrodinamico che poi si propagano nell'alto Adriatico (Mel et al., 2021). Queste sono delle onde lunghe di ridotta ampiezza che si propagano nella regione settentrionale, il loro effetto si attenua con il passare del tempo fino a vanificarsi del tutto dopo circa 12 ore.

Conclusioni

A seguito della sua messa in funzione, il Mo.S.E. è risultato essere una soluzione efficace per risolvere il problema delle acque alte di Venezia. L'ingegnoso sistema ha infatti dimostrato, durante i test e durante le chiusure, di essere in grado di fermare i fenomeni mareali più consistenti. Esso però presenta delle criticità non trascurabili dal punto di vista ambientale (si veda paragrafo 1.4) la cui soluzione diventerà la sfida dei prossimi anni.

Ciò che emerge da quanto riportato nella descrizione generale del Mo.S.E., è che il sistema resta unico nel suo genere e per questo necessita di essere studiato ed analizzato anche dopo la fine della costruzione. Quanto detto ai capitoli tre e quattro è frutto dell'osservazione delle prime manovre di chiusura. Pertanto, la quantità di dati è tale da poter fare una stima, che risulta essere di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ per quanto riguarda la filtrazione d'acqua fra le barriere, che si traduce in un innalzamento del livello del mare di 1 cm/h , e quindi un aumento di $+ 0.05 - 0.04 \text{ m}$ del livello idrometrico successivamente alla chiusura delle bocche di porto, per chiusure della durata compresa fra le 4 e le 6 ore.

Un aspetto interessante che è stato dimostrato, confrontando dati misurati e simulazioni modellistiche, è che la chiusura delle bocche di porto induce alcuni effetti sulle condizioni idrometriche del mare. Come conseguenza del blocco del flusso in ingresso alla laguna, durante la fase di chiusura delle paratoie si assiste ad un incremento del livello di circa 25 cm in corrispondenza delle bocche di porto dalla parte del mare, che si annulla in un paio d'ore dopo il sollevamento delle barriere. Questo sopralzo dei livelli a ridosso delle paratoie genera delle onde lunghe e di ridotta ampiezza che si propagano nell'alto Adriatico; il loro effetto, che è percepibile fino a Trieste, svanisce dopo poche ore.

Risulta inoltre evidente l'importanza di disporre di modelli matematici per la simulazione dell'idrodinamica della laguna di Venezia poiché le chiusure, che diverranno sempre più frequenti a causa dei cambiamenti climatici, influiranno sul livello registrato in laguna e di conseguenza sulla serie storica di dati registrati, che risulterà priva dei naturali picchi di marea. L'impiego di modelli idrodinamici, tra gli altri scopi, continuerà a dare solidità alle previsioni mareali fatte dal CPSM e servirà a scongiurare eventuali sollevamenti non necessari.

Bibliografia

- Mel, A. R., Viero, P. D., Carniello, L., Defina, A., D'Alpaos, L., The first operations of Mo.S.E. system to prevent the flooding of Venice: insights on the hydrodynamics of a regulated lagoon, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Volume 261, 31 October 2021, 107547, 3-14, 18-24.
- Mel, A. R., D'Alpaos, L., MO.S.E.: la linea Maginot del terzo millennio, XXXIV Convegno nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bari, 8-10 settembre 2014, 1-2.
- Carbognin, L., Teatini, P., Tomasin, A., Tosi, L., Global change and relative sea level rise at Venice: what impact in term of flooding, *Clim. Dyn.* 35, 1039–1047, 2010, 1-2.
- Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P., Tosi, L., The Lagoon of Venice: Geological setting, evolution and land subsidence, *Episodes* 26(3), 2003, 264-268.
- Tognin, D., Finotello, A., D'Alpaos, A., Viero, P. D., Pivato, M., Mel, A. R., Defina, A., Bertuzzo, E., Marani, M., Carniello, L., Loss of geomorphic diversity in shallow tidal embayments promoted by storm-surge barriers, *Science Advantages*, 149682, 2022, 1-10.
- Carniello, L., Defina, A., Fagherazzi, S., D'Alpaos, L., A combined wind wave–tidal model for the Venice lagoon, Italy, *journal of geophysical reserch earth surface*, 110, F04007 2005, 1-3.
- Adami, A., Studio sugli effetti in scala nelle prove in modello fisico delle paratoie, 1997.
- Scotti, A., Progettazione delle opere di difesa dalle acque alte II, 1993.
- Mel, A. R., Carniello, L., D'Alpaos, L., How long the Mo.S.E. barriers will be effective in protecting all the urban settlements in the Venice lagoon? The wind setup constraint, *Costal Engineering*, volume 168, 103923, 2021, 2-21.

Carta dei suoli della provincia di Venezia, Arpav Veneto,

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/conoscenza-dei-suoli/carte-1-50.000/carta-dei-suoli-della-provincia-di-venez>

Interpretare le previsioni di marea, Comune di Venezia,

<https://www.comune.venezia.it/it/content/interpretare-la-previsione-di-marea>.

Sistema Mo.S.E., Mose Venezia, <https://www.mosevenezia.eu/mose/>

Ecosistema, Mose Venezia, <https://www.mosevenezia.eu/ecosistema/>