GIOVANNI CECCONI*

VENEZIA E IL PROBLEMA DELLE ACQUE ALTE. IL RISCHIO DI DANNO AL PATRIMONIO URBANO A CAUSA DELLA CRESCITA RELATIVA DEL LIVELLO DEL MARE**

PREMESSA

Può la struttura fisica della città di Venezia convivere con le acque alte senza opere eccezionali, limitando gli interventi al restauro e alla manutenzione (delle rive, dei marginamenti, delle murature, dei cunicoli fognari e delle fondazioni), alle difese locali ("insulae") e alle misure di prevenzione (la previsione e la segnalazione delle maree, l'adeguamento della rete dei sottoservizi e delle fosse settiche)? Per rispondere a questa domanda è necessario valutare l'entità dei danni diretti e indiretti prodotti dalle acque alte, sia quelle usuali sia quelle eccezionali, tenendo conto della loro frequenza annuale, degli effetti cumulati e concomitanti che, a parità di altre condizioni, fanno aumentare nel tempo l'entità del danno.

In questo articolo, dopo aver esaminato i cinque principali processi di degrado del patrimonio urbano associati alle acque alte e individuato i fattori meteoclimatici più rappresentativi degli effetti, si è ricostruita l'evoluzione di questi fattori nel corso degli ultimi due secoli, dal 1800, tentando di stabilirne l'evoluzione più probabile nel corso del prossimo secolo, fino al 2100.

In questo modo, dopo aver definito alcuni valori di soglia oltre i quali è da temere che la città possa perdere quelle capacità di resilienza[1] che le permettono di vivere sull'acqua resistendo agli allagamenti, al moto ondoso e all'aggressione marina, è stato possibile ricavare una misura della distanza che separa la condizione attuale dalla situazione di non ritorno, oltre la quale i danni crescono in modo esponenziale e non vi è più la possibilità pratica di porvi rimedio senza gravi sconvolgimenti. Benché gli effetti futuri di alcuni meccanismi di degrado non si possano stabilire con certezza (i processi non sono né lineari né indipendenti dalle sollecitazioni passate e i danni aumentano di molto sia all'aumentare del livello e della durata delle sommersioni, sia al crescere del loro numero totale cumulato nel tempo) vi sono elementi che fanno ritenere che in un periodo di 30-50 anni si raggiungerà un degrado tale che nessuna ulteriore acqua alta potrà essere tollerata dalla città.

Non ha fondamento, quindi, continuare a pensare che, poiché Venezia ha finora resistito alle acque alte eccezionali, continuerà a farlo anche nel prossimo secolo con normali interventi di manutenzione, senza alcun intervento speciale, come le opere mobili alle bocche di porto per la regolazione dei flussi di marea, che elimini completamente le acque alte.

* *Giovanni Cecconi, ingegnere, è responsabile del servizio ingegneria del Consorzio Venezia Nuova*

** *Le valutazioni riportate nell'articolo si basano sui dati contenuti nel* Tema 7 *dell'Allegato 6 allo Studio d'Impatto Ambientale del progetto di massima della chiusura mobile delle bocche di porto. Il* Tema 7 *tratta della valutazione dei danni prodotti dalle acque alte, considerando vari scenari di intervento.*
Si ringrazia l'ing. Viviana Ardone, in stage presso il Consorzio Venezia Nuova, per la preziosa collaborazione nell'elaborazione dei dati contenuti in questo articolo

[1] *Resilienza: capacità di resistere a sollecitazioni ripetute nel tempo*

SCENARI DI CRESCITA DEL LIVELLO DEL MARE

Variazioni del livello del mare misurate nel corso dell'ultimo secolo

Nel seguito vengono presentate le cause che in questo secolo hanno prodotto, a Venezia, una crescita relativa del livello del mare di 23 cm. Viene, inoltre, presentata l'ipotesi di ciò che è probabile accada nel prossimo secolo, sulla base delle informazioni storiche disponibili e delle previsioni del *Second Appraisal Report* (SAR), 1995, in materia di *Climate Change*. Tale rapporto è stato redatto dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), istituito nel 1988 congiuntamente dalle Nazioni Unite e dal World Meteorological Organisation (WMO), nell'ambito dell'United Nation Environmental Program (UNEP) sull'ambiente, per raggiungere un consenso a livello internazionale sulle opinioni scientifiche che riguardano i mutamenti climatici.

Nell'ultimo secolo il livello del mare a Venezia è cresciuto per effetto della riduzione di quota del suolo (subsidenza) e dell'aumento del livello del mare Adriatico (eustatismo).

Subsidenza

In questo secolo nel centro storico di Venezia si è verificata una subsidenza di circa 12 cm, causata per 8 cm dall'estrazione d'acqua dalle falde del sottosuolo (subsidenza di origine antropica) e per i restanti 4 cm dalla subsidenza naturale a carattere regionale. È importante osservare che nel centro storico si sono verificati, per effetto dei sovraccarichi applicati localmente ai suoli dal peso di edifici e di infrastrutture, cedimenti localizzati con tassi superiori a 4 cm/secolo, per esempio in corrispondenza della spalla del ponte di Rialto adiacente al Palazzo dei Camerlenghi e, più recentemente, al Tronchetto e a S. Elena.

Recenti controlli effettuati dal CNR hanno confermato l'arresto della subsidenza antropica con il termine dell'estrazione d'acqua dal sottosuolo (1970) e il perdurare della subsidenza naturale che si è mantenuta stabile dopo i grandi interventi di deviazione dei fiumi a partire dal XIV secolo.

Eustatismo

Con il termine di eustatismo si intendono le variazioni del livello medio dei mari per effetto:

- della dilatazione termica degli oceani;
- della ridistribuzione delle acque del globo fra gli oceani, le calotte polari, i ghiacciai e le acque sotterranee;
- della variazione di salinità delle acque.

Tutti questi effetti dipendono dalle condizioni climatiche della terra e, in particolare, dalla temperatura media dell'atmosfera e degli oceani. I fenomeni coinvolti riguardano soprattutto l'atmosfera, il ciclo idrologico dell'acqua e i cicli biogeochimici dei gas–serra che influenzano la capacità radiante dell'atmosfera.

Nelle passate ere geologiche, il livello del mare ha subito grandi variazioni. Circa 10 mila anni fa, ad esempio, il livello dell'Adriatico era più basso di quasi 20 m rispetto a oggi, come dimostra la presenza, al largo del litorale veneziano, di spiagge relitte con depositi di sabbia sovrastanti strati di torba di origine lagunare, situate appunto a circa 20 m di profondità.

Negli ultimi tre millenni (denominati "periodo climatico Sub-Atlantico" e caratterizzati da alterne vicende) la fase climatica più marcata di cui rimangono tracce sicure è stato il lungo periodo freddo della "piccola età glaciale" tra il 1550 e il 1850. In questo periodo il livello del mare è diminuito ed è probabile che la ridotta profondità dei fondali lagunari abbia prodotto effetti diretti e indiretti sull'interrimento dei canali di navigazione[2]. Ha fatto poi seguito un periodo caldo che, dopo una breve pausa dal 1950 al 1975, ancora perdura (Mauro Pinna, 1996).

Negli ultimi decenni le attività umane hanno causato un aumento della concentrazione dei gas-serra che intrappolano il calore solare nell'atmosfera riscaldando la superficie del pianeta; come conseguenza dell'aumento della temperatura gli esperti prevedono un aumento del tasso di crescita del livello del mare nel prossimo secolo. Per quanto riguarda la laguna di Venezia, in un lavoro del 1996, pubblicato dall'Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti di Venezia, L. Carbognin e G. Taroni hanno elaborato le misure mareografiche di Venezia (Punta della Salute) e di Trieste (Molo Sartorio), giungendo alle conclusioni di seguito riportate (Fig. 1 a pagina 27).

Rispetto alla subsidenza:

- la subsidenza antropica che si è prodotta in laguna dal 1931 al 1970 per effetto dell'estrazione di acqua dal sottosuolo ha provocato, in quegli anni, un calo medio del livello del suolo di 19,2 cm/secolo (19,2 cm/secolo = 38,6 cm/secolo – 15,4 cm/secolo – 4 cm/secolo[3]), ma dal 1970, con la cessazione delle estrazioni di acqua, il calo si è arrestato;
- permane, comunque, la subsidenza regionale con una riduzione del livello del suolo di 4 cm/secolo.

Rispetto all'eustatismo:

- nel periodo 1896-1993, il livello medio del mare Adriatico, misurato a Trieste, località ritenuta altimetricamente stabile (si veda ad esempio il rapporto di S. Zerbini, 1996), è mediamente cresciuto di 11,3 cm/secolo;
- dal 1970 a oggi, sia a Venezia che a Trieste non si rileva alcuna crescita del livello del mare Adriatico, in particolare a Venezia il livello è rimasto stabile e pari a circa 23 cm sul medio mare IGM del 1897.

In conclusione la crescita complessiva del livello del mare a Venezia nel corso dell'ultimo secolo, pari a 23 cm, risulta determinata dai seguenti contributi:

- crescita del livello del Mare Adriatico: 11,3 cm;
- subsidenza antropica dal 1931 al 1970: 7,7 cm;
- subsidenza regionale: 4,0 cm.

[2] *Tali effetti si sono sommati all'apporto di sedimenti dal mare e dai fiumi che allora sfociavano in laguna*

[3] *I 19,2 cm/secolo sono dati cioè dal trend di Venezia meno il trend di Trieste meno la subsidenza regionale, sempre a Venezia*

Scenari futuri per i prossimi 100 anni, fino al 2100

Nel rapporto IPCC - SAR '95 sono contenuti numerosi scenari di crescita del livello del mare tra di loro molto divergenti: valori mediani variabili da 27 cm a 49 cm dal 1990 al 2100, con un limite inferiore di 13 cm e un limite superiore di ben 94 cm.

La stima di 49 cm dal 1990 al 2100 è stata ottenuta con il modello ufficialmente adottato nel SAR '95, mentre la stima di un aumento pari a 27 cm è stata ricavata dallo stesso SAR '95 con un modello più evoluto che non è stato adottato nei documenti ufficiali del SAR '95[4].

A detta degli esperti la notevole incertezza è dovuta a numerosi fattori: l'effettiva crescita delle emissioni di gas-serra nel prossimo secolo; l'affidabilità del modello di previsione del riscaldamento globale; la variazione di temperatura nelle masse d'acqua degli oceani.

Data la notevole variabilità delle previsioni SAR '95 è ragionevole dare maggior fiducia ai dati storici e quindi, considerando sia le misure storiche che la miglior stima del SAR '95 per il *business as usual*[5], si sono ipotizzati tre scenari (A, B, C) di crescita del livello del mare a Venezia nel prossimo secolo (Fig. 1 a sinistra, nella pagina seguente):

- scenario A, ottimistico: tenuto conto che dal 1970 a oggi (1996) non si è registrata alcuna significativa tendenza all'aumento del livello del mare, si assume che, anche in futuro, l'unica causa di crescita sarà la subsidenza regionale con il valore, ormai consolidato, di 4 cm/secolo.
- scenario B, realistico: tenuto conto che mediamente nell'ultimo secolo il livello del mare Adriatico è cresciuto di 11,3 cm, si può assumere che questo andamento continui, anche nel prossimo secolo, sommandosi alla subsidenza regionale considerata nello scenario precedente (4 cm/secolo + 11,3 cm/secolo = 15,3 cm/secolo).
- scenario C, pessimistico: tenuto conto che il livello dei mari potrebbe crescere a causa delle variazioni climatiche conseguenti alla crescita dei gas - serra in atmosfera, la stima più accreditata dell'IPCC - SAR '95 aggiunge alla subsidenza regionale di 4 cm/secolo una crescita del livello del mare di 49 cm in 110 anni, dal 1990 al 2100 (crescita che è superiore del 430% rispetto alla crescita storica).

Lo scenario C, basato sull'assenza di qualsiasi azione di contenimento dei gas-serra, descrive una crescita non lineare del livello del mare che, secondo l'IPCC, è già iniziata nel 1990: poiché dal 1970 a oggi (1996) non si è registrata alcuna crescita del livello del mare lo scenario di crescita è stato traslato in avanti a partire dall'anno 2000.

Nella figura 2 (a destra nella pagina seguente) sono riportati gli aumenti delle acque alte superiori a 80 cm corrispondenti agli scenari adottati: è evidente l'aumento esponenziale delle acque alte per pochi centimetri di perdita di quota e come lo scenario C sia insostenibile.

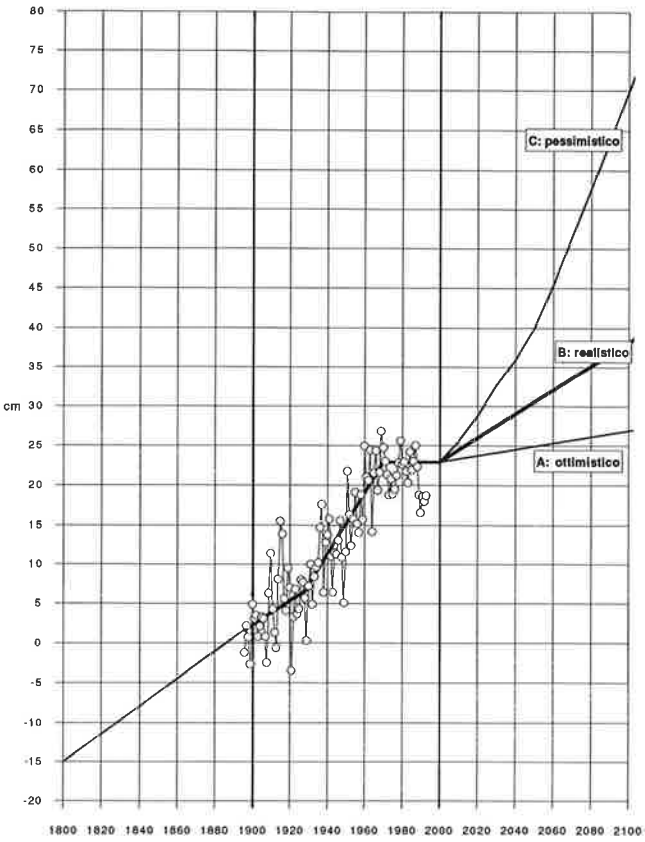
Nel prosieguo del testo si farà sempre riferimento allo scenario B.

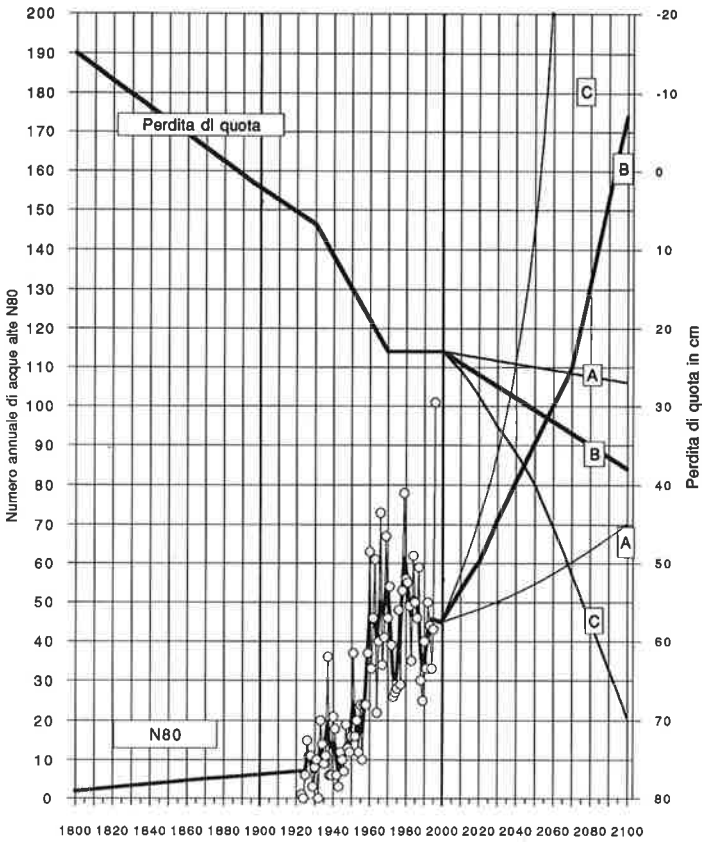
[4] *Quest'ultimo modello non è stato adottato nei documenti ufficiali del* SAR *'95 per ragioni di uniformità tra il modello di riscaldamento ed il modello di crescita del livello del mare*

[5] Business as usual*: termine con cui si indica lo scenario corrispondente all'assenza di misure di contenimento delle emissioni dei gas-serra*

Nella pagina seguente Fig. 1 (a sinistra). Scenari di crescita del medio mare a Venezia rispetto al medio mare convenzionale del 1897 (media del periodo 1884-1909, IGM 1910). Il grafico mostra l'evoluzione avvenuta fino a oggi e quella prevista fino al 2100 secondo gli scenari A, B e C. I tondi indicano il livello medio annuale

Fig. 2 (a destra). Acque alte annuali a Venezia superiori a 80 cm, fino a oggi e nei prossimi 100 anni per una perdita di quota secondo gli scenari A B e C. I tondi indicano il numero annuale di acque alte





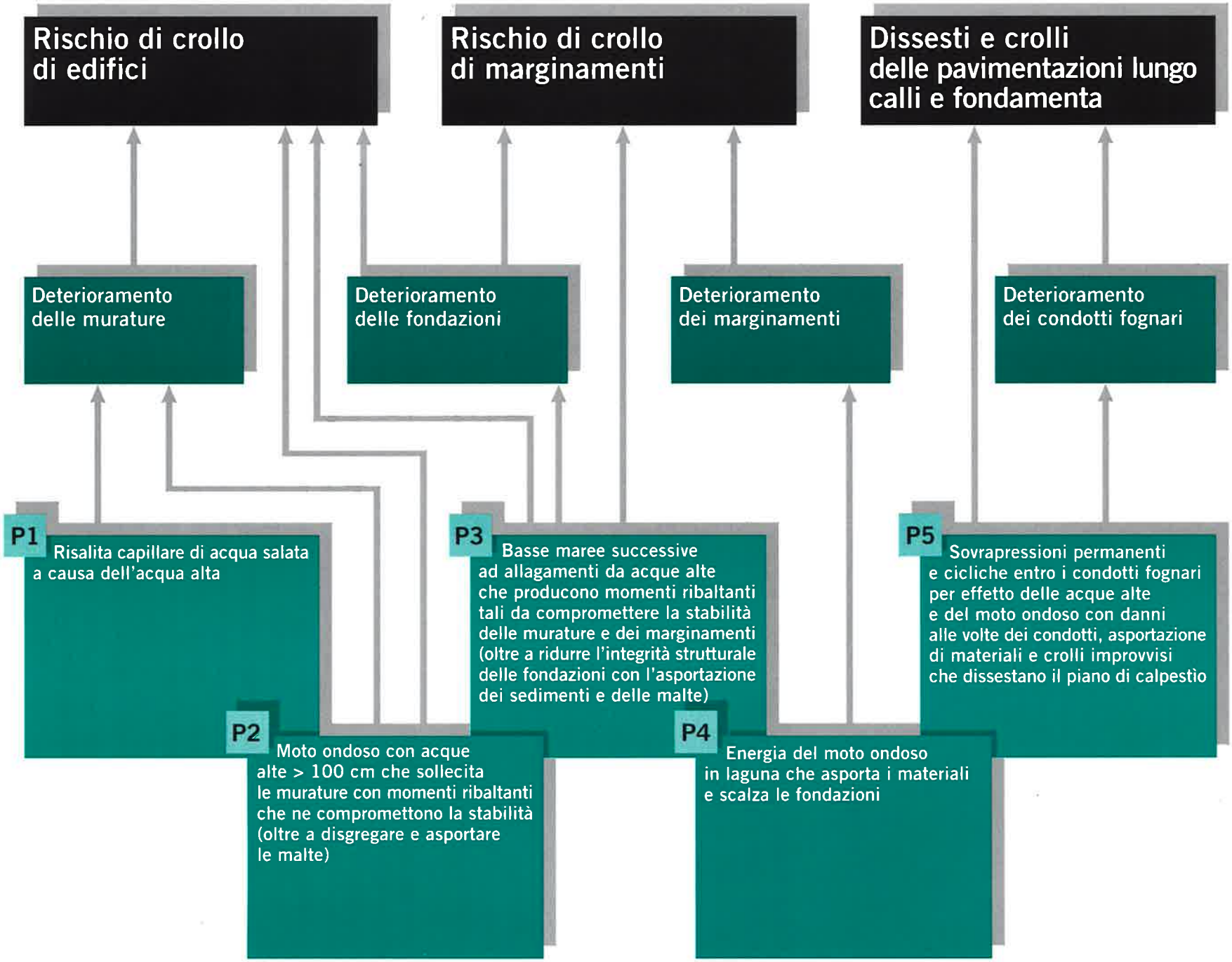
DANNI PRODOTTI DALLE ACQUE ALTE ALLE STRUTTURE FISICHE URBANE

I danni prodotti dalle acque alte sono riconducibili a tre categorie:

1) danni permanenti e progressivi alle strutture fisiche (i marginamenti, le fondamenta, le fondazioni, gli edifici in muratura, i condotti di scarico);
2) danni temporanei alle attività socio-economiche, culturali e alle merci;
3) danno indiretto associato all'idea di abbandono e trascuratezza del "bene Venezia", un bene unico e irripetibile, che è percepito come lasciato in balia delle acque alte e del moto ondoso ed è in continua "riparazione".

Le considerazioni che seguono si limitano alla prima categoria di danni, quelli permanenti e progressivi prodotti dalle acque alte alle strutture fisiche.

Poiché i danni di natura chimica e meccanica sono prodotti dalla combinazione delle acque alte e del moto ondoso generato dai natanti e dal vento, e tenuto conto che la morfologia lagunare si è trasformata nel corso del tempo con l'approfondimento dei bassifondi così da provocare una maggiore generazione e propagazione del moto ondoso contro i margini di Venezia e degli altri centri storici lagunari, è stato considerato anche il danno progressivo delle onde e delle acque alte alla morfologia lagunare.


Rischio di crollo di edifici
Rischio di crollo di marginamenti
Dissesti e crolli delle pavimentazioni lungo calli e fondamenta
Deterioramento delle murature
Deterioramento delle fondazioni
Deterioramento dei marginamenti
Deterioramento dei condotti fognari
P1
Risalita capillare di acqua salata a causa dell'acqua alta
P2
Moto ondoso con acque alte > 100 cm che sollecita le murature con momenti ribaltanti che ne compromettono la stabilità (oltre a disgregare e asportare le malte)
P3
Basse maree successive ad allagamenti da acque alte che producono momenti ribaltanti tali da compromettere la stabilità delle murature e dei marginamenti (oltre a ridurre l'integrità strutturale delle fondazioni con l'asportazione dei sedimenti e delle malte)
P4
Energia del moto ondoso in laguna che asporta i materiali e scalza le fondazioni
P5
Sovrapressioni permanenti e cicliche entro i condotti fognari per effetto delle acque alte e del moto ondoso con danni alle volte dei condotti, asportazione di materiali e crolli improvvisi che dissestano il piano di calpestìo

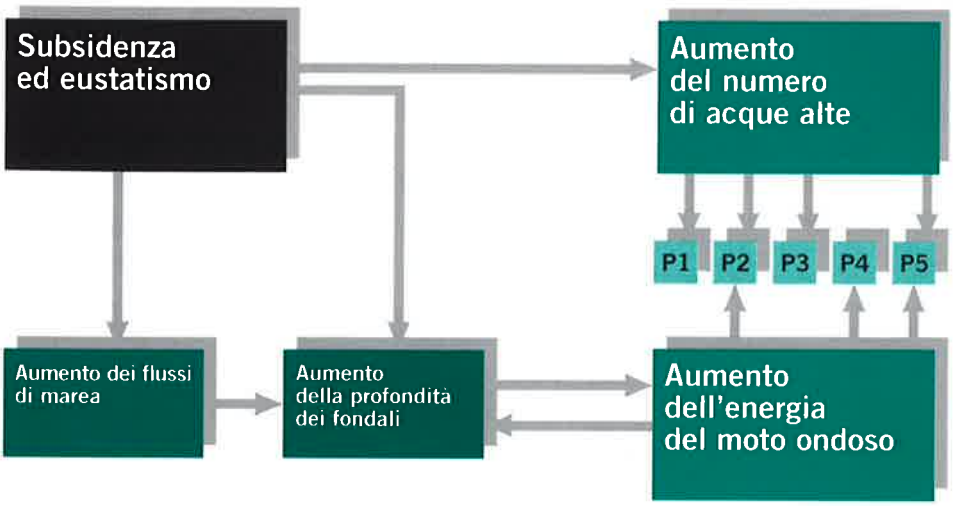
Il metodo adottato consiste nell'analisi di cinque principali processi di degrado denominati P1, P2, P3, P4, P5 (Fig. 3 nella pagina precedente).

Nella figura a sinistra si vede come i processi di degrado, operando insieme possono dar luogo a tre tipi di danno grave: crollo degli edifici; crollo dei marginamenti; crollo delle pavimentazioni lungo le calli e le fondamenta.

Ad esempio, si vede come la perdita di stabilità degli edifici dipenda da ben tre processi di degrado: il deterioramento delle murature per risalita capillare salina durante le acque alte (P1); il moto ondoso durante le acque alte (P2); le basse maree successive alle alte maree (P3). Nella tabella 1 i fattori ambientali sono associati al tipo di struttura urbana soggetta al processo di degrado.

Strutture urbane	P1	P2	P3	P4a	P4b	P5
Edifici lungo le rive esterne	×	×	×	×	×	
Edifici lungo le rive interne	×		×		×	
Edifici interni distanti dalle rive	×					
Marginamenti lungo le rive esterne		×	×	×	×	
Marginamenti lungo le rive interne			×		×	
Condotti di scarico nel sottosuolo		×*		×*	×	×

La figura 4 in basso evidenzia come tutti i fattori di degrado siano strettamente dipendenti dalla perdita di quota per subsidenza ed eustatismo e alcuni anche dall'erosione dei fondali lagunari.

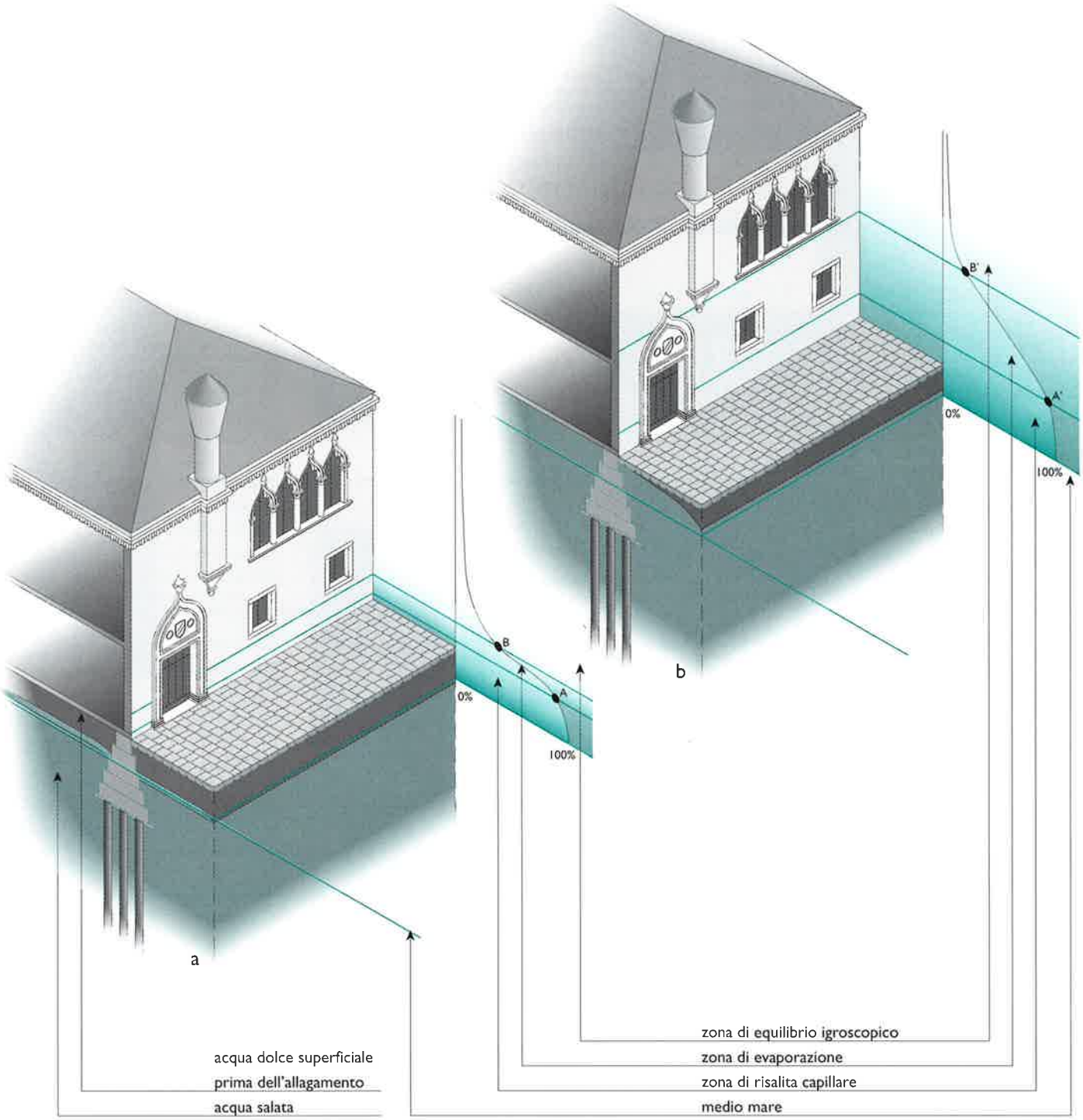


Nella pagina precedente
Fig. 3. Principali processi di degrado e loro effetti sulle strutture fisiche urbane

In questa pagina
Tab. 1. Rapporto tra fattori di degrado e strutture fisiche urbane.
Fattori di degrado direttamente condizionati dall'acqua alta:
P1, risalita capillare di acqua salata;
P2, moto ondoso con acque alte maggiori di 100 cm;
P3, basse maree successive ad allagamenti;
P5, sovrapressioni entro i condotti fognari per effetto delle acque alte e del moto ondoso.
Fattori di degrado comunque presenti:
P4a, moto ondoso da vento;
P4b, moto ondoso da natanti a motore

** Se il condotto sfocia lungo le rive esterne esposte al moto ondoso prodotto dal vento, questo effetto si aggiunge al moto ondoso provocato da natanti*

Fig. 4. Fattori di crescita del degrado a causa di subsidenza ed eustatismo


a
b
B
A
0%
100%
B'
A'
0%
100%
acqua dolce superficiale
prima dell'allagamento
acqua salata
zona di equilibrio igroscopico
zona di evaporazione
zona di risalita capillare
medio mare

Processo P1. Danni agli edifici per effetto della risalita capillare di acqua salata a causa dell'acqua alta

Problema

Le fondazioni degli edifici di Venezia sono a contatto diretto con l'acqua o si trovano in un terreno saturo.

Già in condizioni normali, cioè anche senza allagamenti, l'umidità risale lungo le pareti rendendo precario l'utilizzo dei piani terra e deteriorando le strutture murarie per cui si rende necessaria una manutenzione molto frequente. Il deterioramento dei mattoni e delle malte delle murature è comunque limitato e simile a quello che si riscontra in altri centri storici dove vi siano problemi di umidità.

In presenza di allagamenti con acqua salata invece (Fig. 5 nella pagina precedente), aumenta l'estensione della superficie di imbibimento, la risalita capillare lungo la muratura è maggiore e transita un maggiore volume d'acqua che poi evapora dalle pareti; inoltre l'acqua contiene un elevato contenuto di sali che, cristallizzando, desquamano i mattoni e disgregano le malte (Biscontin e altri, 1982).

Questo processo è tanto più intenso quanto più lunghi sono la durata dell'acqua alta e il tempo che l'acqua dolce impiega a sostituire l'acqua salata a contatto con le murature sino a che queste ritornano alle condizioni di imbibimento che si avevano prima dell'acqua alta.

È evidente che il danno è tanto più grave quanto più frequenti sono gli allagamenti con acqua salata (cioè il numero di cicli di imbibizione, trasporto della soluzione salina, cristallizzazione).

Benché gli edifici di Venezia siano stati costruiti con una protezione adeguata, in quanto il territorio un tempo era a una quota più elevata rispetto al medio mare attuale e le parti più basse degli edifici erano realizzate con materiale impermeabile (in genere con pietra d'Istria), negli ultimi tre secoli la struttura della città ha subito una perdita di quota di almeno 60 cm che ha reso inefficace tale protezione.

Si ritiene che tutti gli edifici della città collocati in zone con quote inferiori a 140 cm, i quali subiscono allagamenti con ricorrenza di 5 anni o superiore, siano soggetti al degrado per la risalita capillare di acqua salata.

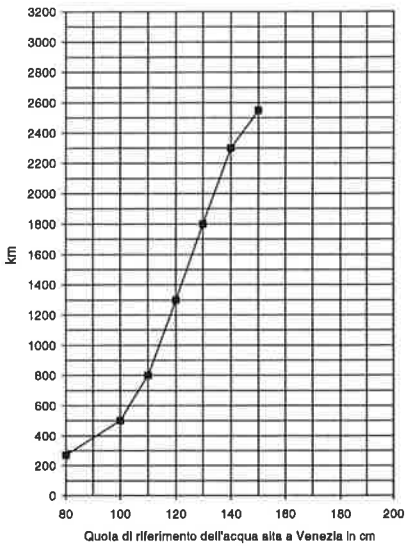
Tenuto conto che il degrado interessa sia le murature perimetrali sia quelle interne, risulta per esempio che con una marea di 140 cm lo sviluppo complessivo delle murature a rischio è di ben 2300 km (Fig. 6). All'inizio del secolo, con 23 cm di maggiore elevazione del suolo, lo sviluppo delle strutture murarie a rischio era molto più contenuto: circa 1300 km.

Indicatori del degrado

Un indicatore rappresentativo della crescita delle sollecitazioni dovute alla risalita capillare di acqua salata è costituito dal numero annuale di episodi di acqua alta maggiori di 80 cm e di 100 cm e dal loro totale cumulato dall'inizio del secolo (Fig. 7 nella pagina seguente).

Nella pagina precedente
Fig. 5. Processo di degrado P1. Risalita capillare di acqua salata: a) in condizioni normali (acqua poco salata, zona di evaporazione e cristallizzazione limitata); b) a seguito di un'acqua alta (acqua ricca di sali, zona di evaporizzazione e cristallizzazione estesa)

In questa pagina
Fig. 6. Estensione delle murature interne ed esterne soggette alla risalita capillare in base a diverse quote di marea



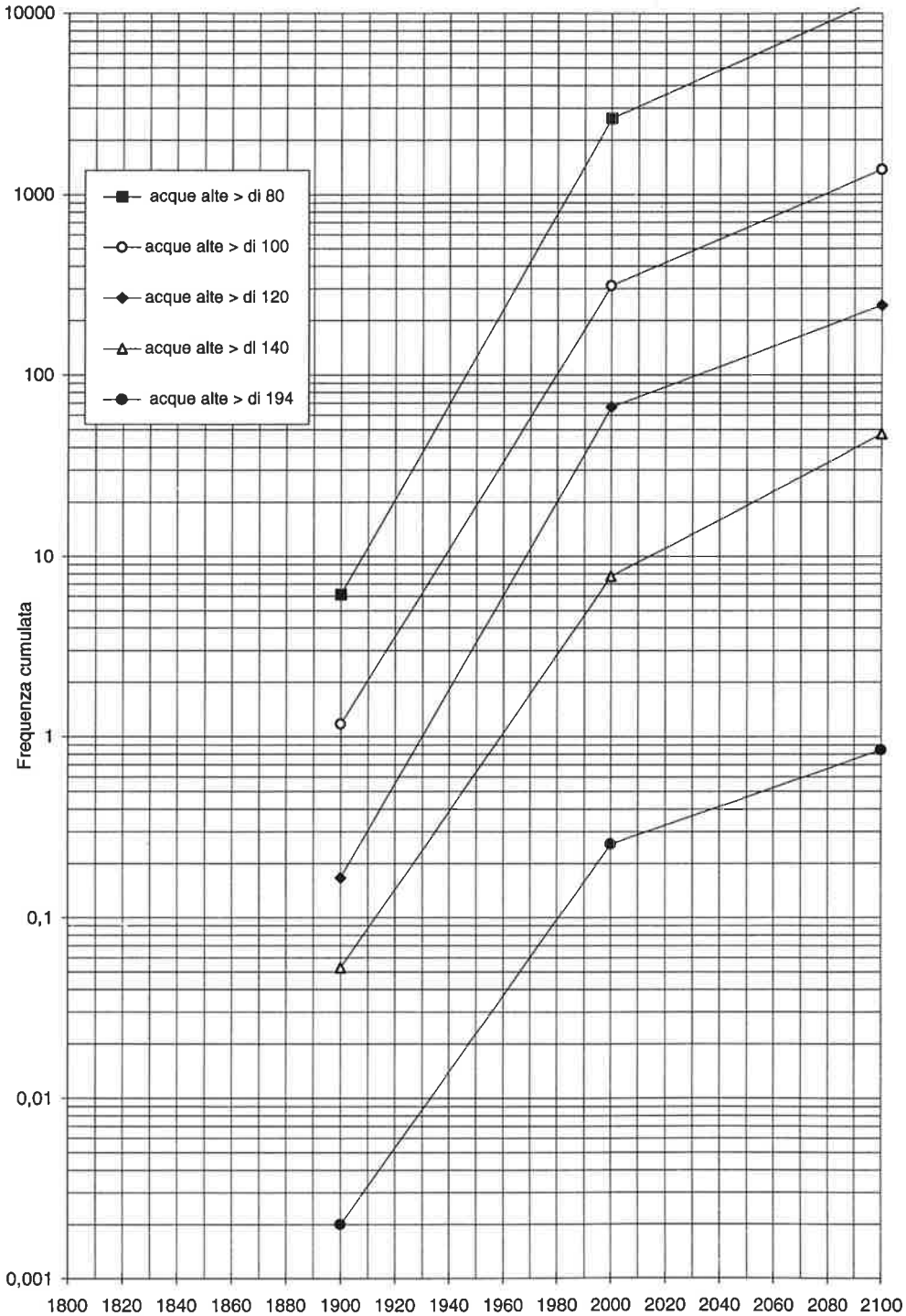


Fig. 7. Crescita della frequenza cumulata delle acque alte, per diversi livelli di marea. Il grafico mostra l'evoluzione del fenomeno registrata in questo secolo e quella prevista fino al 2100. L'aumento della frequenza cumulata delle acque alte è connesso con i processi di degrado P1, P3 e P5

Un altro indicatore è rappresentato dalla crescita percentuale del moto ondoso in laguna a causa dell'aumento delle imbarcazioni a motore e dell'approfondimento dei fondali lagunari.

Come criterio di sicurezza per la conservazione di Venezia è giustificato assumere che i cicli di risalita di acqua salata non debbano crescere di più del doppio rispetto alla situazione attuale. Assumendo l'ipotesi realistica di una crescita del livello del mare di circa 15 cm (11 cm di eustatismo e 4 cm di subsidenza regionale), la condizione critica si verificherebbe già tra 40 anni.

Questo periodo potrebbe anche ridursi per effetto dell'eventuale crescita del moto ondoso prodotto da natanti a motore e dell'aumento del moto ondoso da vento in laguna per effetto del prevedibile approfondimento medio dei fondali dagli attuali 95 cm a 120 cm, nel 2100.

Lavori di manutenzione

I lavori per evitare la risalita capillare delle acque lagunari non vengono eseguiti con la frequenza necessaria perché costosi e di lunga durata; essi consistono nel taglio delle murature e nella posa di lastre di materiale a elevata impermeabilità e resistenza, ripristinando poi gli intonaci interni ed esterni o, come sempre più spesso accade, lasciando le murature direttamente esposte all'aria per tutto il tratto direttamente interessato dalla risalita capillare.

Con questo tipo di intervento vengono protette le strutture in elevazione e resi più stabili i piani terra; non è invece protetta la fascia di muratura che si trova tra il taglio e il terreno. Questa va perciò sostituita con mattoni trattati con resine siliconiche o va trattata con l'applicazione di intonaci a bassissima permeabilità.

Anche dopo aver realizzato le difese locali sino alla quota 100 cm, se non saranno realizzate le opere mobili, la frequenza dei lavori di manutenzione, che è già inadeguata, dovrà aumentare. Come si è detto, infatti, a causa del cedimento locale degli edifici e di subsidenza ed eustatismo, la fascia in pietra d'Istria è ormai insufficiente a limitare la risalita capillare di acqua salata che si produce durante le acque alte e, inoltre, le onde prodotte dal vento e dai natanti a motore (ormai dalla metà del '900) esercitano la loro azione erosiva direttamente sulle murature, attaccando e asportando le malte.

Difese locali ("insulae") e opere mobili

Le difese locali realizzate mediante il sollevamento delle pavimentazioni e dei marginamenti fino alla quota 100 cm possono solo ridurre il problema limitando il numero degli allagamenti, mentre le opere mobili associate alle difese locali arrestano completamente le acque alte e, quindi, il degrado per la risalita capillare di acqua salata.

Solo perciò integrando le difese locali con le opere mobili, per le acque alte superiori a 100, la risalita capillare di acqua salata nelle murature per sommersione potrà essere completamente eliminata, superando le difficoltà pratiche connesse con la gestione di un grande numero di cantieri per gli interventi di restauro e di manutenzione.

Processo P2. Danni agli edifici per moto ondoso con acque alte >100 cm

Problema

La perdita relativa di quota del territorio rispetto al medio mare ha reso possibile un nuovo processo che ha introdotto nel tempo il grave rischio di crollo degli edifici. Durante le acque alte, infatti, è ora più probabile che le onde raggiungano gli edifici trasferendo alle murature forti spinte orizzontali mai prima sperimentate (Fig. 8).

Le onde da considerare sono sia quelle prodotte dal vento in laguna, che raggiungono le maggiori altezze, sia quelle prodotte dai natanti a motore che sono meno alte ma ben più frequenti e diffuse.

In uno studio ultimato dal Consorzio Venezia Nuova nel 1989, dal titolo

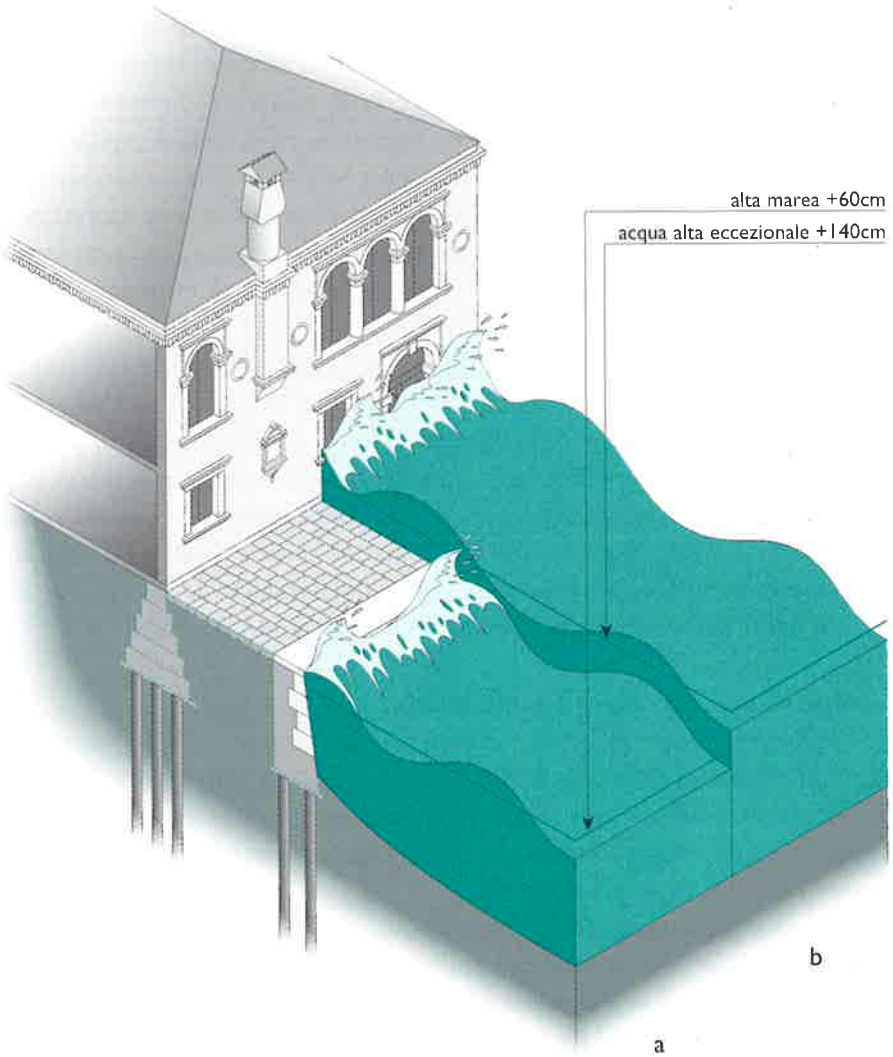


Fig. 8. Processo di degrado P2. Spinta del moto ondoso contro le murature: a) in condizioni normali (l'onda è intercettata dal marginamento); b) durante un'acqua alta eccezionale (l'onda transita sopra il marginamento amplificandosi)

Valutazione del rischio di danno al patrimonio urbano a causa delle acque alte, si è dimostrato che il fattore di sicurezza rispetto alla stabilità delle murature di un edificio tipico del centro storico di Venezia, benché sia elevato per le normali sollecitazioni, diventa prossimo all'unità quando le murature sono investite da onde di 80 cm di altezza fra cavo e cresta.

Un fattore di sicurezza pari a 1 è indice di una situazione a elevatissimo rischio di crollo che non può essere accettata in quanto significa che la sicurezza dell'edificio e delle persone che vi abitano viene a dipendere da fattori non controllabili (come la variabilità delle caratteristiche di resistenza delle strutture o la distribuzione effettiva della pressione sulle murature).

Dalla teoria delle onde è noto che l'altezza massima di un'onda su un fondale che si riduce gradualmente è pari alla profondità del fondale, ma se invece la riduzione è brusca, come nel caso di una fondamenta allagata, la sua altezza raggiunge un valore pari a 1,5 volte il fondale (Fig. 8).

Se, quindi, un marginamento viene allagato da una marea con un battente d'acqua di 50 o di 80 cm, le onde massime diventano rispettivamente di 75 o di 120 cm. Queste onde mantengono la loro altezza per uno spazio limitato dell'ordine di 6 m (1-2 volte la lunghezza d'onda).

Pertanto sono ora a rischio di crollo gli edifici:

- esposti alla laguna aperta nella direzione dalla quale possono giungere onde con altezza di almeno 50 cm (altezza che può dare luogo, in presenza di un allagamento delle rive, a un'onda amplificata di almeno 80 cm);
- retrostanti marginamenti a quota tale che durante le acque alte si possa creare un battente di almeno 50 cm;
- retrostanti marginamenti con larghezza non superiore a 6 m.

In generale i centri abitati lagunari sono sufficientemente protetti dal moto ondoso in quanto l'altezza delle rive o la loro larghezza sono tali da evitare che le onde si frangano direttamente contro le pareti degli edifici.

Con le alte maree esistono, però, rischi di crollo per una serie di edifici esposti alle onde di bora a Venezia e a Murano. La lunghezza del fronte a rischio di crollo è rispettivamente dell'ordine di 1,65 km (Fondamenta Nuove) e di 0,86 km (nella parte est dell'isola).

Indicatori del degrado

Poiché oltre all'onda estrema che può produrre il crollo, i marginamenti delle rive sono aggrediti da un moto ondoso crescente che asporta i materiali e disgrega le rive, rendendo così necessaria una sempre più frequente manutenzione, gli indicatori significativi della crescita di questo processo sono rappresentati:

- dall'aumento dell'energia del moto ondoso a causa dell'approfondimento dei fondali lagunari (la quota parte più dannosa di questa energia si verifica in concomitanza di acque alte superiori a 100 cm, che consentono la propaga-

zione delle onde sopra le fondamenta sino a raggiungere gli edifici (Fig. 9);

- dall'aumento della frequenza annuale delle acque alte > 140 cm (Fig. 10).

Un criterio per la sicurezza di questi edifici è che queste particolari sollecitazioni non crescano di più di 2 volte rispetto a quelle attuali. Senza alcun intervento il periodo critico verrebbe raggiunto in circa 40 anni.

Lavori di manutenzione

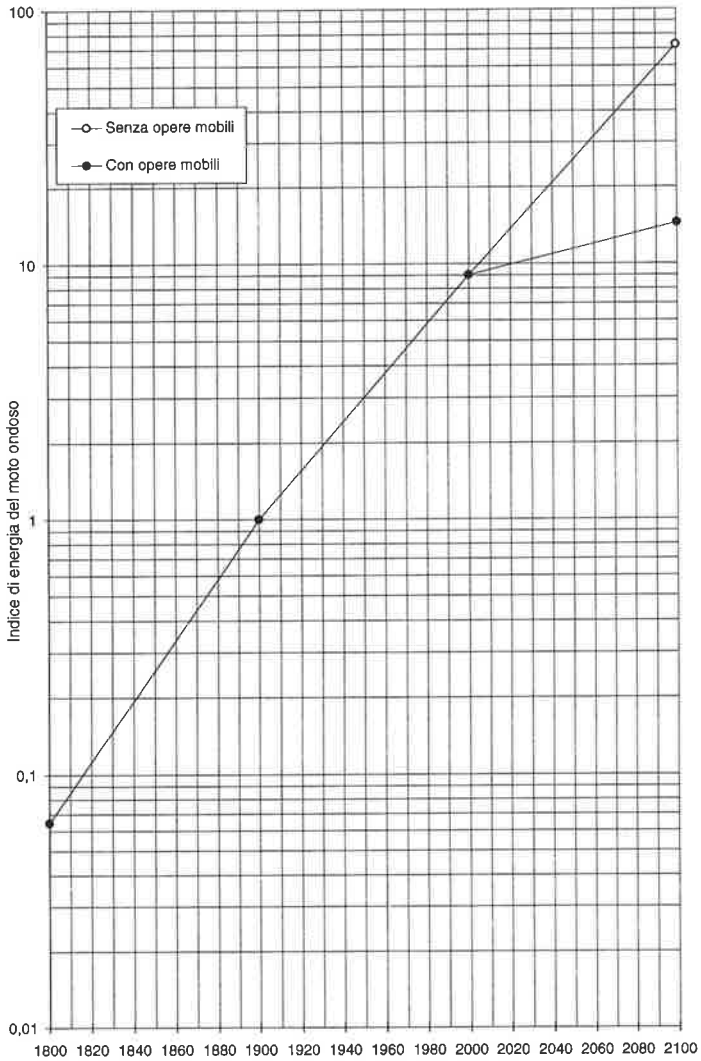
Le pareti degli edifici interessate sono quelle dei piani terra con una superficie da rinforzare di 4950 m^2 a Venezia e 2580 m^2 a Murano.

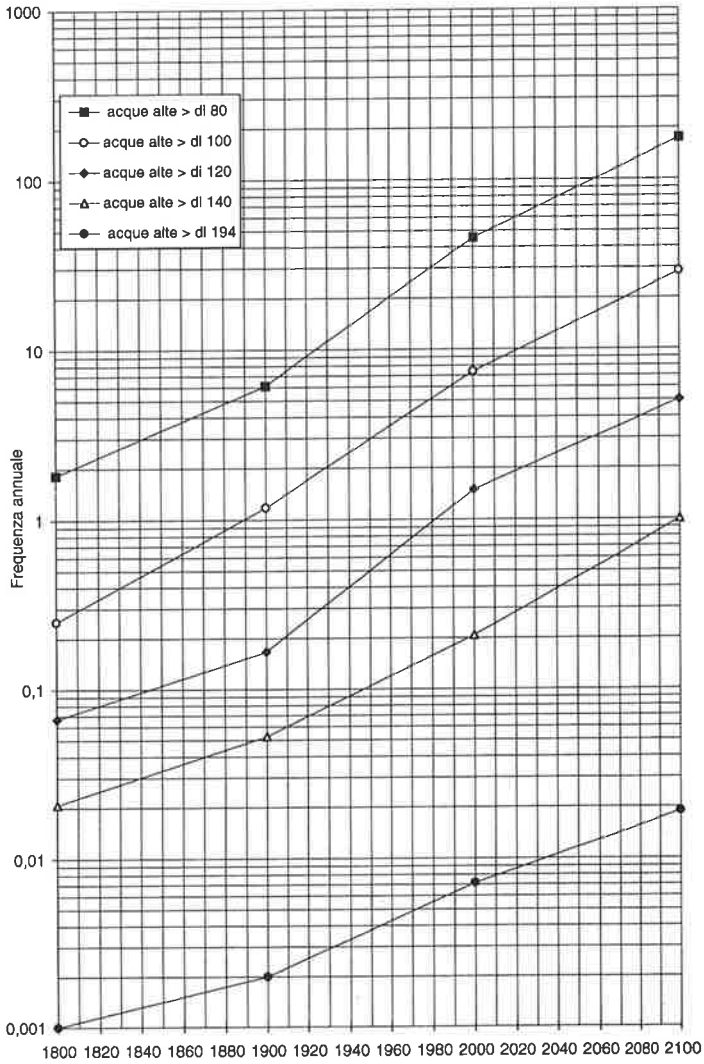
Difese locali ("insulae") e opere mobili

Poiché le difese locali sono limitate a quota 100, non offrono alcuna protezione contro il moto ondoso durante acque alte superiori a tale quota. Perciò,

Fig. 9 (a sinistra). Processo di degrado P2. Crescita dell'energia del moto ondoso con acque alte > 100 cm rispetto all'inizio del secolo, per effetto dell'aumento delle frequenza delle acque alte e della maggiore profondità dei fondali

Fig. 10 (a destra). Aumento della frequenza delle acque alte per subsidenza ed eustatismo. Il fenomeno è connesso con i processi di degrado P1, P2, P3 e P5





solo con le opere mobili alle bocche di porto, che impediscono gli allagamenti dei marginamenti di fronte agli edifici, questo rischio di danno grave viene completamente eliminato in quanto le onde non potrebbero più propagarsi sopra le fondamenta. Alle opere mobili devono comunque essere associati interventi per ridurre il moto ondoso in laguna (stabilizzazione dei fondali e protezioni ai bordi dei canali artificiali, sovralzo dei fondali, barene artificiali realizzate con riuso dei materiali dragati).

Processo P3. Danni agli edifici e ai marginamenti per effetto delle basse maree successive ad allagamenti

Problema

Questo particolare tipo di danno agli edifici di sponda e ai marginamenti è dovuto all'anomala spinta ribaltante che si produce quando a un'acqua alta che ha allagato il territorio saturando il terreno fa seguito una bassa marea ordinaria che determina uno squilibrio fra il livello della falda e quello del canale.

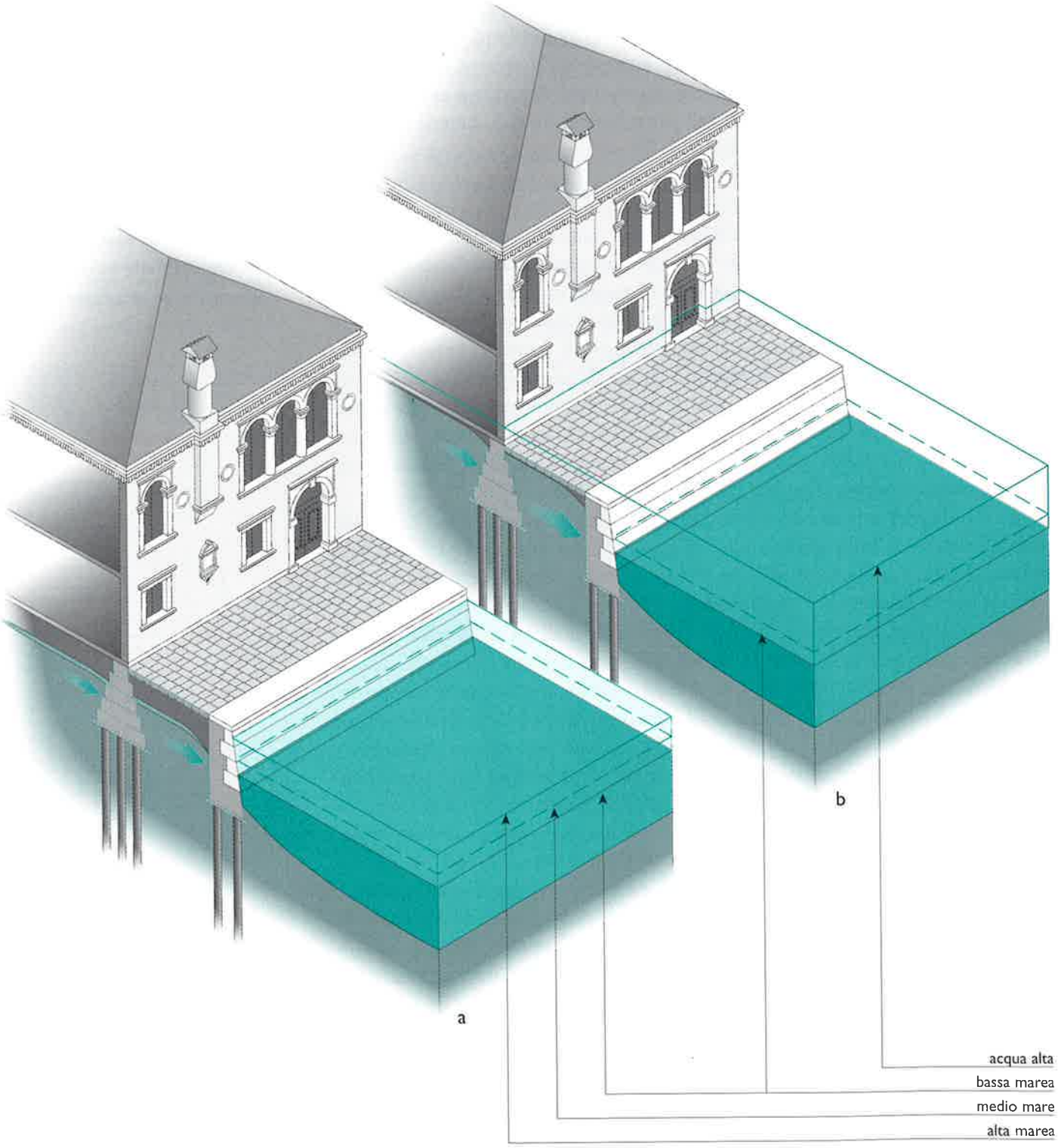
Il livello di falda in adiacenza ai marginamenti è sempre piuttosto stabile rispetto al variare del livello di marea e oscilla di poco attorno a una quota leggermente superiore al livello medio del mare. Fintanto che il territorio non viene allagato il marginamento viene sollecitato in modo ciclico: in marea crescente con una spinta positiva dal canale, in marea calante con una spinta nella direzione opposta (Fig. 11 nella pagina seguente).

In condizioni normali le spinte sono contenute e, sulla base di alcune verifiche eseguite nello studio citato a pagina 35, per due casi tipici di marginamento (senza edificio retrostante e con edificio direttamente esposto alle oscillazione della marea) il coefficiente di sicurezza è risultato adeguato.

Con le acque alte, invece, quando il territorio si allaga e il livello di falda viene a coincidere con la quota del territorio, si verifica una nuova condizione di carico che, tuttavia, fin tanto che la zona è allagata, continua a non essere critica per la stabilità delle strutture (il carico idrostatico della falda è infatti del tutto controbilanciato dal livello raggiunto dal pelo libero dell'acqua). Quando il livello del mare inizia a decrescere le condizioni di carico modificano i fattori di sicurezza relativi alla stabilità delle strutture. Si è infatti riscontrato che l'elevata impermeabilità del sistema terreno - marginamento impedisce al livello di falda di calare con la medesima rapidità con cui cala la marea e quindi si sviluppano forti dislivelli tra la falda e il livello dell'acqua.

Le analisi di stabilità hanno evidenziato che con un dislivello di soli 80 centimetri i marginamenti si trovano in condizioni critiche, con fattori di sicurezza ben lontani da quelli previsti dalla normativa (il fattore di sicurezza, nel caso di strutture integre e senza fuori piombo, è prossimo a 1 per marginamenti senza edifici e diventa 1,4 per edifici che si affacciano direttamente sui canali; in entrambi i casi il fattore di sicurezza non è adeguato in quanto inferiore a quello di regolamento pari a 1,5).

A causa degli allagamenti, il marginamento viene quindi a trovarsi in una condizione critica, la cui gravità cresce con la frequenza degli allagamenti, che


a
b
acqua alta
bassa marea
medio mare
alta marea

può causare danni di entità variabile in relazione alle caratteristiche specifiche di resistenza di ogni singola struttura, fino al suo collasso (Fig. 12).

Al rischio di danno grave si accompagna un progressivo degrado in quanto la parte alta del marginamento viene influenzata da un moto di filtrazione che tende ad asportare i leganti delle pietre e successivamente i sedimenti retrostanti, riducendo ulteriormente la stabilità della struttura e la sua resistenza anche nei confronti del moto ondoso generato dalle imbarcazioni.

Nel 1966 lo sviluppo dei marginamenti soggetti almeno una volta all'anno al sovraccarico idrostatico era simile a quello attuale. Allora però questi marginamenti avevano sopportato un minor numero di cicli di carico: nei 30 anni trascorsi dal 1966 a oggi i marginamenti superati una volta all'anno dalle maree sono stati sovraccaricati oltre 30 volte, mentre quelli superati 45 volte all'anno sono stati sovraccaricati oltre 1350 volte. La situazione è quindi certamente peggiorata.

Indicatori del degrado

In questo caso l'indicatore più significativo del danno risulta essere la crescita della frequenza delle acque alte superiori a 80 cm e in particolare il numero totale cumulato a partire dall'inizio del secolo, come per il processo P1 (Fig. 10 a pag. 36 e Fig. 7 a pag. 32). Come criterio di sicurezza si assume che il totale di acque alte già verificatesi dall'inizio del secolo non raggiunga la soglia di 5000 episodi, corrispondente al doppio dei casi già registrati. Senza alcun intervento questo valore critico verrebbe raggiunto in circa 40 anni.

Difese locali ("insulae") e opere mobili

Gli interventi di protezione locale (fino a quota 100 cm) riducono i danni prodotti dalle acque basse successive agli allagamenti in quanto evitano gli allagamenti in tutte le zone del centro storico di Venezia fino alla quota stabilita. Ciò avviene solo nella situazione attuale, mentre essi non introdurrebbero alcun vantaggio in presenza di un aumento del livello medio del mare

In presenza delle difese locali, i marginamenti del centro storico di Venezia a rischio (con l'attuale livello del mare) si riducono da 37,1 km a circa 33 km, con una riduzione modesta, dell'ordine del 10% circa. Le sole protezioni locali possono unicamente contribuire ad allontanare nel tempo il raggiungimento dello stato critico.

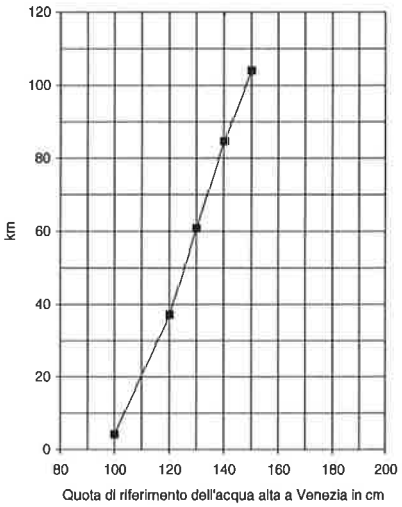
Invece, le opere mobili, insieme alle "insulae" fino a quota 100 cm, evitando qualsiasi allagamento, eliminano completamente questo processo di degrado.

Problema

Tutte le isole lagunari e in generale ogni sponda esposta alle acque sono contornate da strutture che le proteggono dall'azione erosiva prodotta dal moto ondoso e che hanno caratteristiche dimensionali diverse in funzione

Nella pagina precedente
Fig. 11. Processo di degrado P3. Danni ai marginamenti e alle fondazioni degli edifici di bordo: a) in condizioni di normale escursione di marea (la falda oscilla attorno a una quota poco superiore al livello medio del mare); b) con basse maree dopo acque alte che hanno allagato il territorio (quando il territorio si allaga, la falda raggiunge la quota delle pavimentazioni e ritorna ai livelli normali in tempi molto più lunghi dell'abbassamento della marea, determinando pressioni e perdita di sedimenti)

In questa pagina
Fig. 12. Processo di degrado P3. Estensione delle rive urbane con edifici o marginamenti soggetti a basse maree successive ad allagamenti, per diversi livelli di marea



Processo P4. Danni da moto ondoso in laguna alle conterminazioni delle isole e approfondimento dei fondali

dell'altezza d'onda esistente nelle diverse zone della laguna.

Nella laguna di Venezia, a fondale poco profondo, l'altezza delle onde generate dal vento, a parità di durata e velocità del vento e di lunghezza libera dello specchio acqueo, cresce al crescere della profondità dell'acqua.

L'aumento relativo del livello del mare rispetto al territorio (per subsidenza, eustatismo ed erosione del fondale) determina condizioni di sollecitazione da moto ondoso sempre più critiche per le strutture delle conterminazioni lagunari (Fig. 13). Nella laguna di Venezia i marginamenti soggetti all'azione del moto ondoso da vento hanno uno sviluppo complessivo di circa 120 km.

Per valutare la variazione dell'altezza dell'onda e dell'energia trasmessa alle strutture al variare della profondità del fondale si può fare riferimento alla teoria delle onde. Come si è detto, su bassi fondali l'altezza d'onda è limitata dalla scarsa profondità e quindi varia in modo quasi proporzionale al battente d'acqua; dove invece i fondali sono profondi l'altezza d'onda dipende esclusivamente dalla durata e dalla velocità del vento e non è quindi in rapporto con l'aumentare della profondità dei fondali (in laguna i fondali di 3-4 metri possono essere considerati profondi).

Inoltre, in accordo con le formule empiriche normalmente utilizzate per dimensionare le opere di protezione delle scarpate dal moto ondoso, le dimensioni di tali strutture dipendono dall'altezza d'onda elevata al cubo.

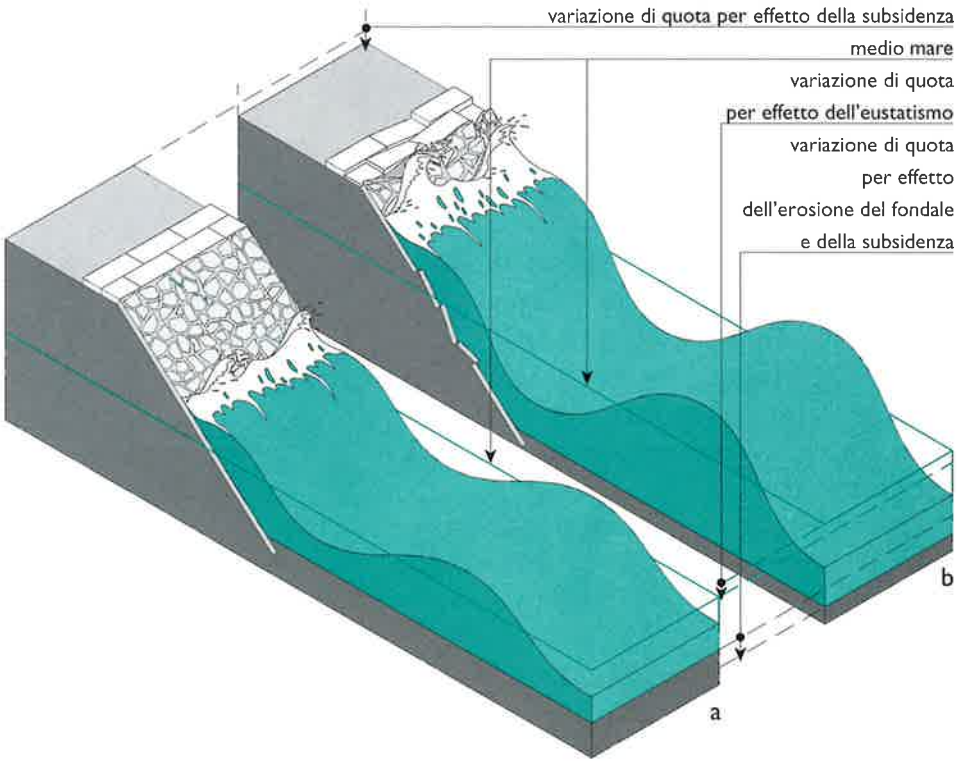


Fig. 13. Processo di degrado P4. Generazione del moto ondoso in laguna: a) all'inizio del secolo; b) con un aumento della profondità del fondale lagunare

Si può quindi concludere che ogni variazione del battente d'acqua, nelle zone dove le profondità sono inferiori a 2-3 metri, determina una variazione dell'energia trasmessa dalle onde alle sponde lagunari proporzionale al battente elevato al cubo.

In generale vi è una stretta relazione tra intensità del moto ondoso ed evoluzione morfologica della laguna. L'evoluzione della struttura fisica della laguna è un fenomeno complesso dovuto a erosione di barene, velme e fondali; interrimento o dragaggio di canali; trasferimento dei materiali dragati all'esterno della laguna; interruzione (che ha avuto inizio con la deviazione storica dei fiumi) degli apporti di sedimenti; perdita di sedimenti dovuta alla variazione dei volumi di marea e alla profondità dei fondali.

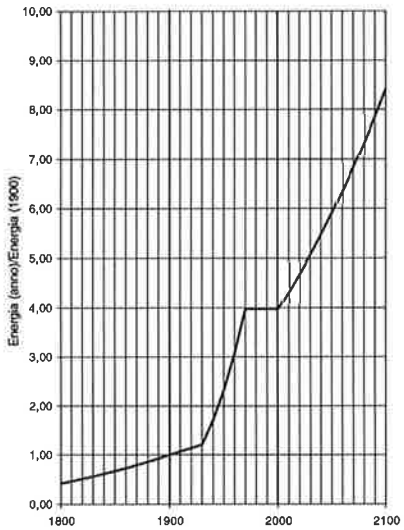
Le aree umide lagunari sono scomparse con un ritmo di 30 ettari/anno nel 1900; 75 ettari/anno negli anni '60 e ora questa tendenza prosegue al ritmo di 35 ettari/anno. La laguna continua a perdere in mare 0,7 milioni di m^3 di sedimenti all'anno. Questa tendenza, che sta trasformando la laguna da ambiente umido di basso fondale a un "braccio di mare", dipende da molte cause. Le principali sono certamente gli interventi realizzati nei secoli passati e opere più recenti come la costruzione dei moli e il dragaggio dei grandi canali lagunari, ma anche gli effetti prodotti dalla navigazione a motore, dall'inquinamento delle acque e dalla pesca di molluschi con mezzi meccanici.

Allo scopo di quantificare l'entità del degrado morfologico in atto di per sé e per calcolare le conseguenze sul moto ondoso contro gli edifici si ricorda che i fondali lagunari, che all'inizio del 1900 avevano una profondità media di 60 cm, ora hanno una profondità di 95 cm (il contributo di 35 cm è dovuto per 23 cm alla crescita del livello relativo del mare e per 12 cm all'erosione dei fondali lagunari). Alla variazione di 35 cm rispetto alla profondità di 60 cm corrisponde un aumento del 58% che significa un incremento dell'energia trasmessa dal moto ondoso del 300%.

Ipotizzando, per il futuro, lo stesso andamento si prevede, alla fine del prossimo secolo, una profondità media di circa 120 cm con un aumento dell'energia di più di 8 volte (Fig. 14). La manutenzione di Venezia e delle isole dell'estuario non può, quindi, prescindere dagli interventi per contrastare il degrado morfologico.

Con le opere mobili, controllando il livello durante le acque alte, si riduce la perdita in mare dei sedimenti lagunari e l'erosione dei fondali e delle barene.

Fig. 14. Crescita relativa dell'energia del moto ondoso in laguna per effetto della maggiore profondità dei fondali. Il grafico indica l'evoluzione del fenomeno dal 1800 a oggi e quella prevista fino al 2100



Problema

I cunicoli per lo scarico in laguna delle acque del centro storico di Venezia sono strutture scatolari realizzate in modo piuttosto semplice: la parte bassa è composta da mattoni resi solidali con malte; la copertura invece è in genere realizzata con una lastra in pietra d'Istria semplicemente appoggiata.

In generale i cunicoli sono stati costruiti con andamento orizzontale alla

Processo P5.
Danni al sottosuolo e alle pavimentazioni a causa della sovrapressione entro i condotti fognari dovuta alle acque alte e al moto ondoso

più alta quota consentita dal territorio, con la volta mediamente a una distanza di circa 30 cm dalla pavimentazione che li ricopre.

Poiché i cunicoli sono stati costruiti alcuni secoli fa quando il livello del mare era più basso di non meno di 60 cm, si può ricavare che in origine le volte dei cunicoli non venivano raggiunte dal livello ordinario delle acque. La parte superiore dei cunicoli si trovava allora a una distanza dal livello medio mare che, per le zone della città con il territorio oggi a quota variabile tra 80 e 140 cm rispetto a Punta della Salute, era allora variabile tra 110 e 170 cm (nel primo caso 80 + 60 – 30 = 110 cm; nel secondo 140 + 60 – 30 = 170 cm).

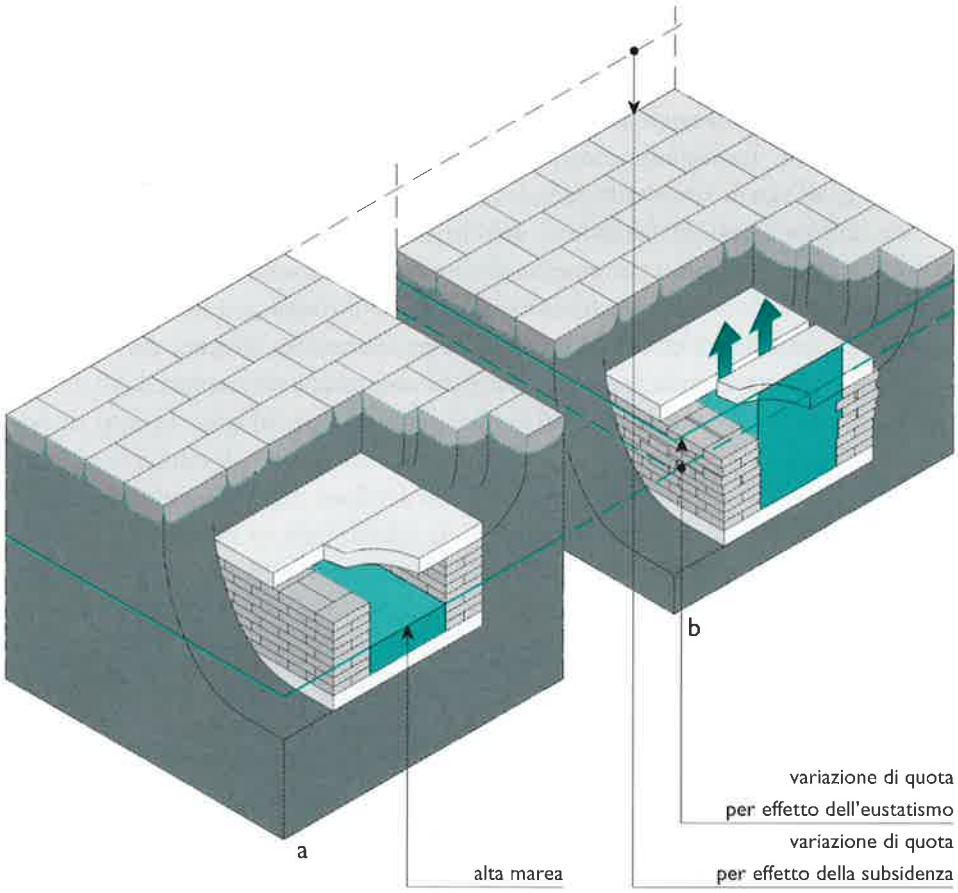


Fig. 15. Processo di degrado P5. Sovrapressioni contro le volte dei condotti fognari durante le alte maree: a) all'epoca della costruzione (condotti a pelo libero); b) a seguito della crescita relativa del livello del mare (condotti in pressione)

Col tempo, a causa di subsidenza ed eustatismo i cunicoli sono stati invasi completamente dall'acqua con frequenza crescente e oggi nelle parti basse della città essi vengono completamente allagati alcune centinaia di volte all'anno. I cunicoli, inizialmente realizzati per funzionare a canaletta, oggi funzionano in pressione con sollecitazioni che producono l'asportazione dei sedimenti fini dei terreni di fondazione attraverso le fessure esistenti nella parte alta dei cunicoli stessi (Fig. 15). Un'ulteriore e grave conseguenza di questo processo è rappresentata dalla dispersione di liquami nel sottosuolo di Venezia.

L'andamento planimetrico dei cunicoli non è noto in quanto queste strutture sono state costruite e sistemate in tempi diversi e a più riprese. Una stima indiretta, certamente per difetto, consiste nell'assumere che sotto ogni calle e ogni campo di Venezia vi sia almeno un collettore: risulta così che, ad esempio, nelle zone oggi allagate durante le maree con il colmo a 120 cm, lo sviluppo dei cunicoli con volta a 90 cm è di circa 63 km (Fig. 16).

Applicando gli stessi criteri anche agli altri centri abitati lagunari si ottiene che lo sviluppo complessivo dei cunicoli a rischio è pari a circa 100 km.

Indicatori del degrado

Anche in questo caso l'indicatore significativo della crescita delle sollecitazioni cui sono sottoposti i condotti fognari è rappresentato dal numero annuale di acque alte superiori a 80 cm e in particolare dal totale cumulato dall'inizio del secolo (Fig. 10 a pag. 36 e Fig. 7 a pag. 32). Il criterio di sicurezza è sempre quello già impiegato negli altri processi e cioè che il totale di eventi cumulati dall'inizio del secolo non raddoppi; senza alcun intervento la situazione critica di rischio di danneggiamenti gravi verrebbe raggiunta in circa 40 anni.

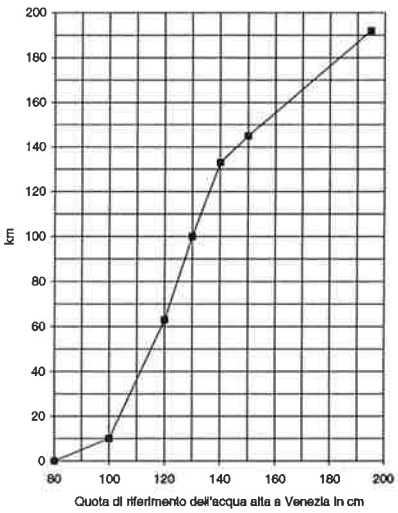
Difese locali ("insulae") e opere mobili

Questo processo di degrado può essere arrestato solo ristrutturando i cunicoli in modo da renderli completamente impermeabili. Con questo tipo di intervento è possibile ripristinare la stabilità delle volte dei cunicoli e soprattutto arrestare la perdita dei sedimenti. Non è invece possibile bonificare il sottosuolo dai liquami che si sono già infiltrati nelle fondazioni degli edifici.

Con le opere mobili rimarrebbero a rischio soltanto i cunicoli collocati nelle zone che oggi sono allagate con maree sino a 100 cm, che attualmente hanno uno sviluppo di circa 10 km e che saranno comunque resi impermeabili nel corso della realizzazione delle difese locali.

Le opere mobili, assieme alle difese locali sino a quota 100 cm e alla manutenzione di 10 km di condotti, eliminano completamente gli effetti di questo processo di degrado.

Fig. 16. Processo di degrado P5. Estensione complessiva delle calli con le volte dei condotti soggette a sovrapressioni, in base a diversi livelli di marea



CONCLUSIONI

Sulla base dei cinque processi di degrado separatamente considerati e degli indicatori esaminati, la progressiva perdita di quota della città può portare a una situazione insostenibile di elevato rischio di danno nel corso di circa 40 anni, durante i quali è pressoché certo che si verificherà il raddoppio delle sollecitazioni cumulate associate alle acque alte e si raddoppierà il rischio di crollo per moto ondoso.

Solo per due processi di degrado il raggiungimento dello stato critico può

essere ritardato con le protezioni locali a "insula" insieme alle manutenzioni ordinarie e straordinarie e alla sostituzione dei materiali originari deteriorati.

Con le opere mobili alle bocche di porto e la riduzione del moto ondoso, invece, la città potrà essere mantenuta nel modo più sicuro ed efficace per il prossimo secolo, in quanto minori saranno gli interventi di rinforzo e quelli di sostituzione dei materiali originari e, quindi, i tempi e i costi per la loro realizzazione.

BIBLIOGRAFIA

Biscontin e altri, *Indagine sui fenomeni di risalita capillare nelle murature di Venezia*, Il mattone di Venezia, Ateneo Veneto, 29 ottobre 1982.

Carbognin L., Taroni G., *Eustatismo a Venezia e Trieste nell'ultimo secolo*, Atti dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere e Arti, Tomo CLIV (1995-1996).

Comune di Venezia, *Definizione dei rischi derivanti dalle acque alte per l'abitato di Venezia. Stato attuale di organizzazione della città.* Rapporto redatto dal Gruppo di lavoro incaricato nell'ambito della procedura di valutazione dell'impatto ambientale del progetto delle opere di chiusura mobili alle bocche di porto, Venezia, novembre 1996.

IPCC Report, *Climate Change 1995, 3 volumes, Cambridge University Press, 1995.*

Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova, *Valutazione del rischio di danno al patrimonio urbano a causa delle acque alte*, Venezia, marzo 1989.

Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova, *Descrizione dello "stato di fatto" delle componenti fisiche della laguna*, Comune di Venezia, maggio 1996.

Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova, *Tema 7 (Valutazione dei danni residui prodotti dalle acque alte)* dell'allegato 6 allo Studio di Impatto Ambientale del progetto di massima della chiusura mobile delle bocche di porto, Venezia, aprile 1997.

Pinna M., *Le variazioni del clima*, Geografia e Società, Franco Angeli, Milano, 1996.

Zerbini S. e altri, *Sea level in Mediterranean: a first step towards separating crustal movements and absolute sea level variations,* "Global and Planetary Change", *1996.*