

25. - IMPATTO GEOAMBIENTALE TRA INFRASTRUTTURE INTERRATE E FALDA IDRICA PRESENTE NEI CALCARI DELLA PUGLIA

25.1. - PREMESSA

La presenza di una falda acquifera nei calcari cretatici del sottosuolo pugliese, permeabili per fratturazione e carsismo, ha costituito spesso motivo di ostacolo alla progettazione e realizzazione di opere ed infrastrutture interraste immerse in falda. Molti centri abitati pugliesi che si affacciano sulla costa sono caratterizzati dalla presenza di una falda idrica con pelo libero molto superficiale, tale da interessare le fondazioni ed i piani interrati di

gran parte degli edifici esistenti.

Per lungo tempo si sono redatti diversi progetti e programmi urbanistici prevedenti opere interraste e sottofalda, quasi mai realizzati nella falsa ed errata convinzione di andare incontro ad interventi finanziariamente non convenienti, di dubbia fattibilità tecnica, o addirittura esposti a presunti sconvolgimenti ambientali. Le conoscenze maturate circa le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero cretatico consentono, invece, di prevedere con certezza gli effetti che dette opere esercitano sulla falda e, quindi, di pilotare i progetti verso soluzioni compatibili dal punto di vista ambientale, oltre che fattibili dal punto di vista tecnico ed economico.

Nella città di Bari, il cui ritratto idrogeologico è stato ampiamente illustrato nel capitolo 15, si riscontrano formazioni acquifere delle più permeabili della regione. Le esperienze qui attuate in sito nell'ultimo cinquantennio hanno consentito di acquisire importanti accorgimenti esecutivi, finalizzati a consentire la progettazione e la realizzazione di opere immerse in falda, le quali sono quindi da considerarsi fattibili sia in termini idrogeologici e geotecnici sia economici, onde è da auspicare che si avvii una seria e programmata realizzazione di infrastrutture nel sottosuolo e in falda, allorché ritenute importanti in un quadro generale di pianificazione e riqualificazione urbana, nonché di ammodernamento e rilancio trasportistico.

25.2. - PROGETTAZIONE DI OPERE INTERRATE E SOTTO FALDA

La realizzazione di scavi a cielo aperto nell'acquifero comporta la necessità di abbassare il livello di falda sotto il piano di fondo scavo, e ciò al fine di eseguire i lavori in assenza di acqua. La depressione idrodinamica indotta sulla falda nell'area di scavo determina modifiche dei carichi piezometrici della falda nelle aree circostanti, con il conseguente rischio di fenomeni di subsidenza, oltre che l'incremento di spessore ed il sollevamento della zona di transizione tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare, quest'ultima di invasione continentale. L'area entro cui, a seguito dei pompaggi, i carichi piezometrici della falda subiscono significativi abbassamenti aumenta con la profondità di

scavo, così come aumenta anche lo spessore ed il sollevamento della zona di transizione. Ciò suggerisce di operare una distinzione tra strutture superficiali di modeste estensioni, per esempio con un solo piano interrato e solo parzialmente immerse nella falda, e strutture profonde costituite da due o più piani interrati, in tutto o in parte immersi nella falda. Mentre per le prime è possibile eseguire gli scavi degli ammassi rocciosi estraendo e convogliando verso l'esterno l'acqua di falda, senza determinare significative variazioni piezometriche della falda, per le strutture interrate profonde è necessario eseguire preliminari interventi specialistici nel sottosuolo, atti a limitare le portate di filtrazione dell'acqua di falda negli scavi. Per queste ultime opere, si elencano e si descrivono sinteticamente i criteri da osservare nella progettazione.

Il progetto deve essere basato su attente verifiche idrauliche con idonei modelli di calcolo, con cui accertare che, durante i lavori ed alla fine degli stessi, l'entità delle possibili variazioni piezometriche della falda siano trascurabili rispetto alle condizioni iniziali. È da verificare, inoltre, il galleggiamento del complesso struttura-terreno sottoposto ad interventi di impermeabilizzazione, sia in fase provvisoria che finale, dovuto alle sottospinte idrauliche. Detta verifica è particolarmente importante poiché dette opere, allorché profonde, comportano notevoli alleggerimenti a causa degli scavi.

Il progetto geotecnico dell'opera interrata profonda deve articolarsi nelle seguenti fasi:

- 1) indagini, caratterizzazione e modellazione geotecnica;
- 2) definizione delle tecnologie e tipi degli interventi speciali nell'ammasso roccioso, con descrizione delle fasi e delle modalità costruttive, atte a costituire una vasca stagna, prima di effettuare lo scavo;
- 3) progetto delle fondazioni e degli involucri esterni, totalmente avvolti da membrane impermeabili, atte ad assicurare la perfetta tenuta idraulica dell'opera;
- 4) verifiche di sicurezza e prestazionali;
- 5) piani di controllo e monitoraggio delle principali grandezze (spostamenti assoluti e relativi dell'opera strutturale interagente con il terreno, carichi piezometrici e concentrazione salina della falda, ecc.).

Per quanto riguarda le indagini, la caratterizza-

zione e la modellazione geotecnica di cui al punto 1), a parte i sondaggi necessari ad individuare le stratigrafie, le anomalie carsiche, tipi e frequenza delle discontinuità costituite essenzialmente dai giunti di strato e fratture negli ammassi rocciosi, particolarmente importanti sono i rilievi riguardanti la morfologia della superficie della falda e delle sue variazioni giornaliere, in funzione delle maree, e stagionali in funzione delle condizioni idrologiche.

Le tecnologie e i tipi di interventi speciali di cui al punto 2) devono essere scelti per poter espletare, nella fase provvisoria dei lavori, due distinte finalità:

- la funzione idraulica, finalizzata all'impermeabilizzazione dell'ammasso roccioso, prima dell'esecuzione degli scavi, in prossimità del fondo e delle pareti di scavo;

- la funzione statica, consistente nell'individuare la geometria del suddetto ammasso roccioso impermeabilizzato, atta ad assicurare le necessarie condizioni di stabilità durante tutta l'esecuzione dei lavori. Le pareti dello scavo ed il fondello dello scavo sono infatti sottoposte a spinte idrauliche che devono essere equilibrate con il peso proprio.

Detti interventi speciali consistono, quindi, nel preventivo "intasamento" delle numerose soluzioni di continuità, che possono realizzarsi mediante miscele cementizie iniettate attraverso fori attrezzati con speciali tubi a valvole. Le esperienze maturate nella città di Bari negli ultimi decenni hanno consentito di testare metodologie e tipi di miscele da iniettare di successo, che qui solo per semplicità sono definite cementizie. (COTECCHIA & TAFUNI, 2007, COTECCHIA, 2010). Il metodo delle iniezioni, che consente la costituzione di vasche stagne nell'intorno dell'opera in sotterraneo, è il metodo vincente per procedere con gli scavi senza rischi di allagamento durante i lavori. Sono auspicabili, ovviamente, studi adeguatamente mirati e campi sperimentali atti a verificare la possibilità concreta di conseguire risultati ottimali ed accettabili, adottando tecniche alternative.

Per quanto riguarda il punto 3), si fa presente che in fase definitiva la funzione statica e quella idraulica sono ovviamente svolte dall'opera finale, le cui strutture portanti ed involucri esterni possono essere di tipo prefabbricato o non. L'intera

superficie esterna dell'opera deve essere avvolta poi da manti impermeabili costituenti in pratica una sorta di "pelle protettiva", finalizzata ad impedire la permeazione dell'acqua di falda verso gli interrati ed a proteggere il cemento armato.

Il punto 4) viene svolto con le modalità previste nelle Norme Tecniche per le Costruzioni. Si sottolinea che il progetto deve contenere le previsioni numeriche sull'entità delle variazioni piezometriche della falda causate dalle opere di impermeabilizzazione.

Con riferimento al punto 5) il progetto deve, infine, contenere un piano di controllo e di monitoraggio geotecnico ed idraulico. Le misure sperimentali delle condizioni idrauliche della falda e dei comportamenti geotecnici dell'ammasso roccioso interagente con la struttura devono essere confrontate, giornalmente e durante tutta la fase dei lavori, con le previsioni progettuali, secondo quanto determinato al suddetto punto 4.

La procedura progettuale e le attività di controllo in corso d'opera qui descritte garantiscono, senza perplessità alcuna, le condizioni di sicurezza da attribuire all'opera ed all'ordito urbanistico dell'intorno.

25.3. - OPERE INTERRATE E SOTTO FALDA ESEGUITE NELLA CITTÀ DI BARI

Il primo caso di impermeabilizzazione dei calcri di Bari degno di nota risale agli anni '50 ed ha riguardato la Cripta della Basilica di S. Nicola, costruita nell'anno 1086, che da circa due secoli era chiusa al culto perché immersa nelle acque di falda. Il sollevamento del livello di falda, conseguente alle oscillazioni glacio-eustatiche del livello mare, ha infatti prodotto, più volte nei secoli, l'allagamento della Cripta e la necessità di sollevare progressivamente il suo pavimento (cap. 2). Nel 1956 sono stati quindi eseguiti interventi di impermeabilizzazione dell'ammasso roccioso (fig. 25.1), che hanno consentito di eliminare i vari pavimenti prodotti nel tempo e scoprire il primo pavimento di basole alternato a mosaici della Cripta stessa, riaprendola quindi al culto. Detto pavimento trovasi oggi a oltre 1 m di profondità sotto il livello freatico di massima escursione della falda.

In COTECCHIA, 2010 è riportato un interessante confronto tra i risultati ottenuti dalle tecniche di

grouting disponibili 60 anni fa e quelli invece ottenibili con le tecniche attuali di iniezioni in ammassi rocciosi fratturati. All'epoca veniva iniettata una miscela di acqua, cemento (tradizionale e pozzolatico) e bentonite, preceduta da trucioli di cellofan questi ultimi utilizzati, per ridurre la permeabilità dell'ammasso roccioso e consentire quindi il trattenimento entro le fratture della miscela impermeabilizzante.

Altri importanti interventi di impermeabilizzazione realizzati negli anni '70 riguardano i locali interrati sotto falda della Banca Popolare di Bari in Corso Cavour, e del Banco di Roma in Piazza Madonna. In entrambi i casi gli interventi di impermeabilizzazione dell'ammasso calcareo eseguiti prima degli scavi sono consistiti nell'iniettare miscele cementizie additivate con bentonite, adottando pressioni più elevate alle massime profondità (COTECCHIA, 1971; GRASSI 1971).

Con riferimento alla suddetta Banca Popolare di Bari, i fori di iniezione per l'impermeabilizzazione della roccia sottostante il fondo scavo, esteso su un'area di 720 mq e profondo 6 m dal p.c. e 4 m dal pelo libero della falda, vennero eseguiti secondo uno schema geometrico a maglie quadrate di lato pari a circa 1 m, mentre quelli esterni secondo uno schema a quinconce con interasse di soli 0,3 – 0,5 m (fig. 25.2). Le iniezioni avvenivano in due fasi: la prima a bassa pressione (fino ad un massimo di 7 atm), la seconda con pressione massima di 25 atm. In tutti i fori le iniezioni sono state eseguite dal basso verso l'alto. Per controllare l'efficacia del progressivo intasamento di tutte le discontinuità, si è iniettato a fori alterni e sono stati eseguiti continui controlli da fori pilota. Laddove necessario si interveniva con una terza ed ultima fase di iniezioni.

Procedendo nel tempo e superando gli esempi di scarso interesse, di seguito si illustra l'opera interrata più significativa dal punto di vista sia tecnico che scientifico, ossia il parcheggio sotterraneo in Piazza Cesare Battisti.

25.3.1. - *Il parcheggio multipiano in Piazza Cesare Battisti*

Nella Piazza Cesare Battisti al centro della città di Bari (figg. 25.3, 25.4) si è progettato e realizzato

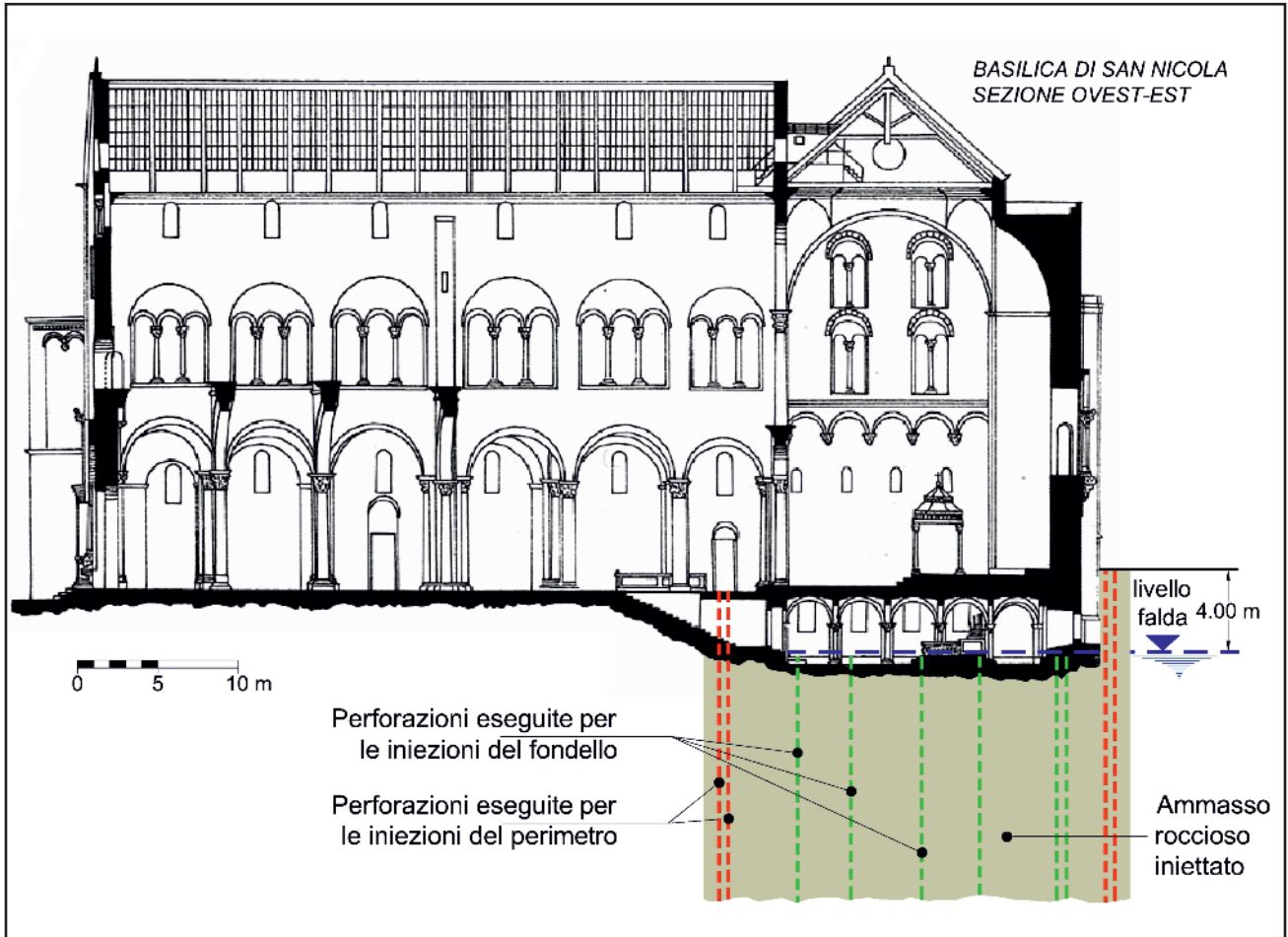


Fig. 25.1 - Sezione longitudinale della Basilica di San Nicola di Bari, e della Cripta sottostante con indicazione delle iniezioni eseguite nell'anno 1956 (COTECCHIA, 2010).

- Longitudinal profile of the Saint Nicholas Cathedral in Bari, and the subterranean Crypt with indication of the injections carried out in 1956 (after COTECCHIA, 2010).

un grande parcheggio, profondo 12 m rispetto al p.c., con tre piani interrati ed esteso su una superficie di circa 7.000 mq, di forma rettangolare con i lati minori ($L = 44,7$ m) lungo Via Nicolai e lungo Via Crisanzio e maggiori ($L = 156,4$ m) lungo le facciate esterne dell'Ateneo, dell'ex Palazzo delle Poste e della Facoltà di Giurisprudenza.

Il parcheggio risulta quasi completamente immerso in falda, il cui pelo libero è a circa +7 m rispetto al fondo scavo. Detta falda, galleggiante su acqua di mare, circola nell'ammasso calcareo cretaceo, fortemente permeabile per carsismo e fratturazione, rappresentante il *bedrock* della città di Bari.

L'opera in esame ha suscitato notevoli interessi dal punto di vista tecnico-scientifico poiché è stato possibile verificare, con controlli sperimentali ef-

fettuati durante tutte le fasi costruttive, l'adeguatezza dei modelli di calcolo geotecnico-strutturale ed idrogeologici adottati (COTECCHIA & TAFUNI, 2007; COTECCHIA *et alii*, 2007). Gli ottimi risultati conseguiti, evidenziati con il monitoraggio in corso d'opera, dimostrano la possibilità di effettuare, per queste complesse opere interrate e sotto falda dell'Ingegneria Civile, adeguate previsioni progettuali, con un elevato grado di attendibilità e sicurezza, confrontabili con quello delle strutture in elevazione. Questa positiva esperienza tecnico-professionale incoraggia a considerare il difficile ambiente idrogeologico del sottosuolo della città di Bari, non già un ostacolo, ma una risorsa di spazio disponibile per l'allocatione di servizi ed attività utili alla città, migliorandone anche le condizioni ambientali.

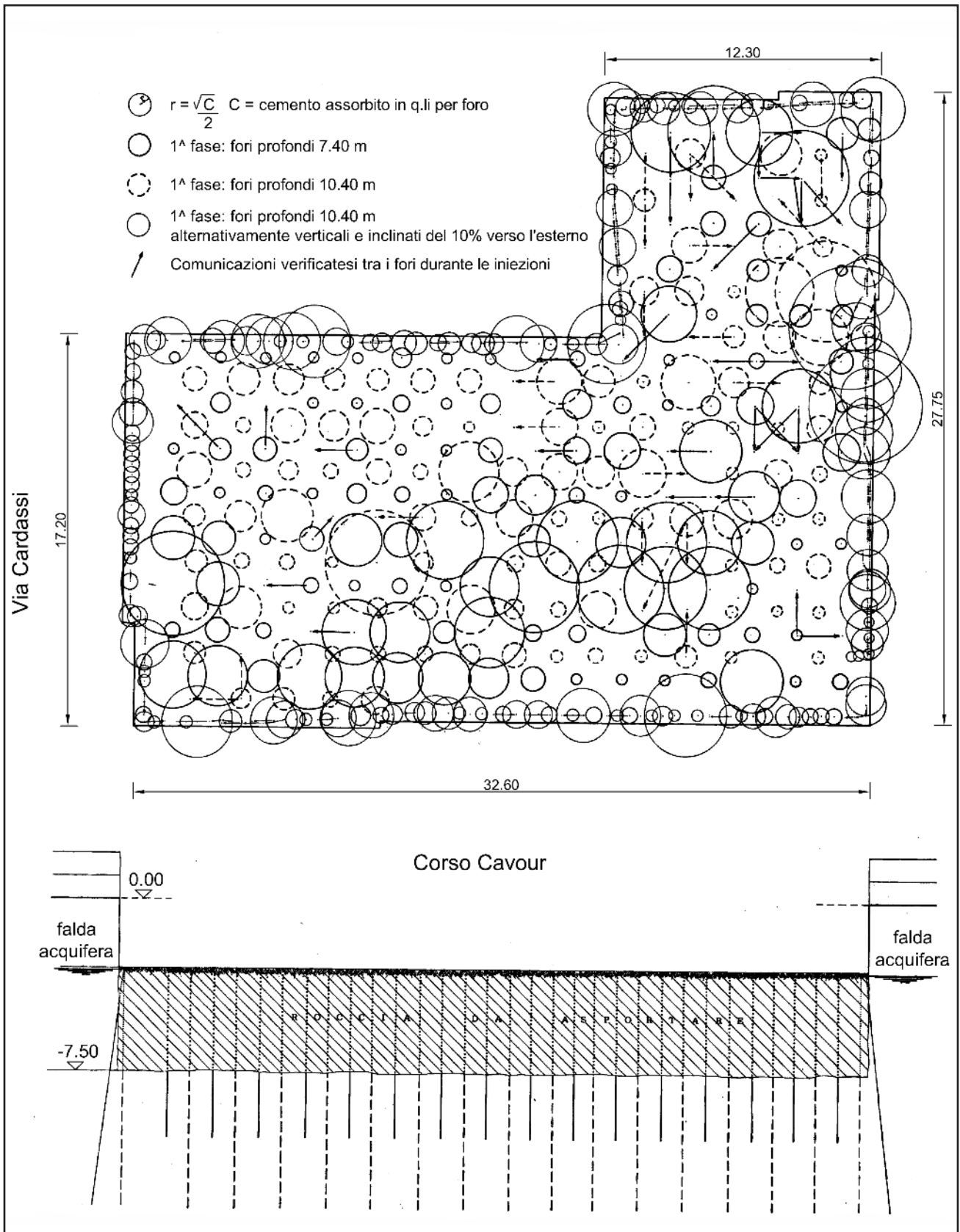


Fig. 25.2 - Disposizione geometrica dei fori di iniezione impermeabilizzante, interferenze verificatesi tra di essi ed assorbimenti del cemento denunciati da ogni singolo foro nell'impermeabilizzazione e nel consolidamento dei calcri di fondazione del fabbricato della Banca Popolare di Bari (GRASSI, 1971).

- Geometry of the impermeabilizing injection boreholes, related interferences among them, and cement absorption in each borehole during impermeabilization and reinforcement of the foundation limestones in the Banca Popolare di Bari building (after GRASSI, 1971).

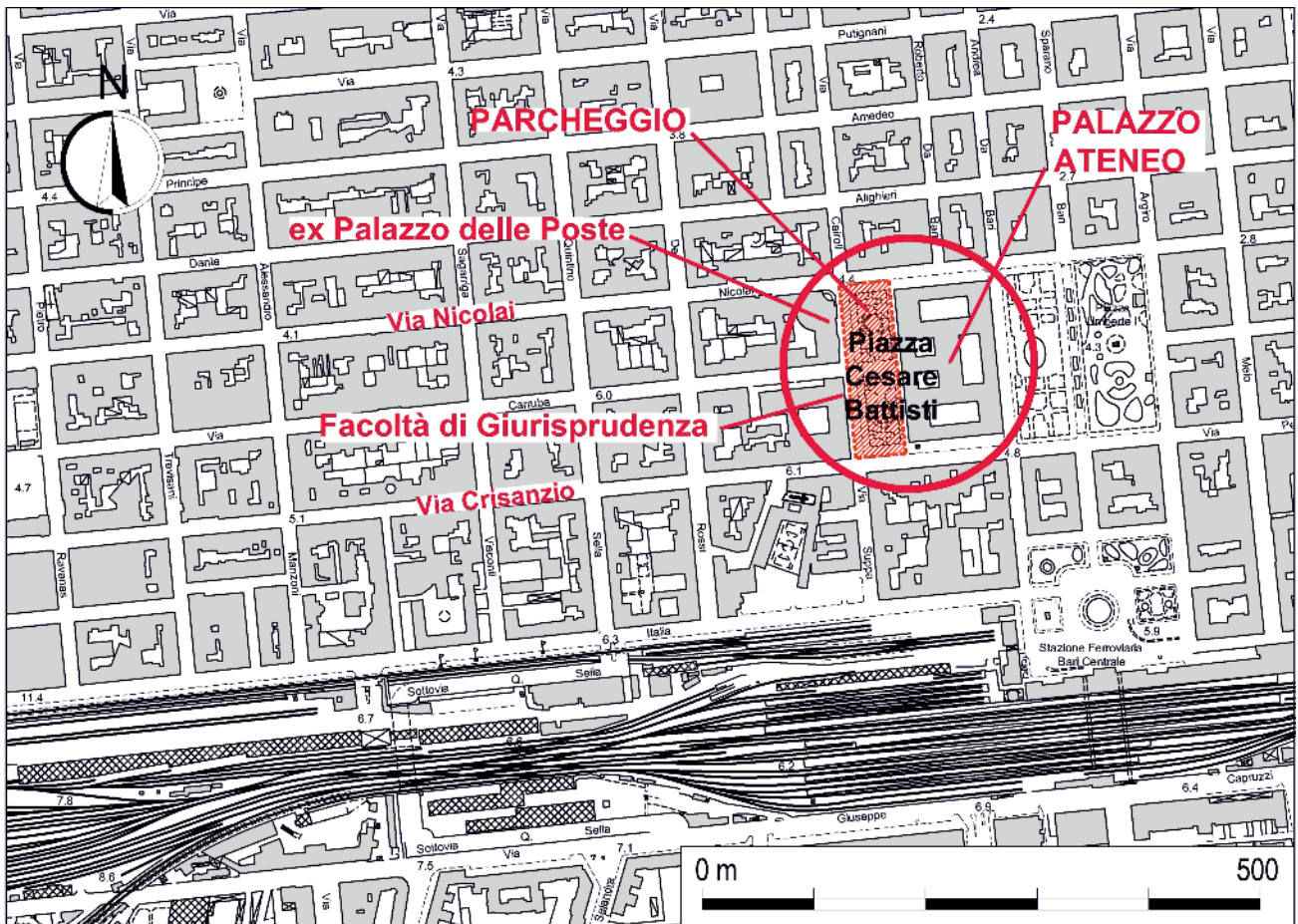


Fig. 25.3 - Parcheggio interrato al centro della Città di Bari (Piazza Cesare Battisti), eseguito fra il 2006 e il 2010.
 - Underground parking lot in the town of Bari (Cesare Battisti Square), built between 2006 and 2010.

25.3.1.1. - Sistema di iniezione M.P.S.P. (Multiple packer sleeved pipes)

Al fine di realizzare le operazioni di scavo sotto falda in condizioni ottimali e quasi all'asciutto, si sono progettati e realizzati gli interventi geotecnici di impermeabilizzazione e consolidamento dell'ammasso roccioso tramite iniezioni di miscele cementizie, opportunamente additivate, eseguite secondo geometria, tipologia e modalità esecutive indicati nella figura 25.5. Le iniezioni sono state eseguite con il sistema M.P.S.P. (Multiple packer sleeved pipes). La tecnica adottata è consistita nell'installazione, all'interno di perforazioni ϕ 100/140 mm, di tubazioni attrezzate, oltre che con valvole di non ritorno per le iniezioni, con "otturatori a sacco" fissati ad intervalli regolari alle stesse tubazioni. Detti otturatori delimitano le fasce di intervento entro cui avviene l'iniezione delle miscele, consentendo di rendere flessibile il sistema in modo di

adattarsi alla irregolare distribuzione delle soluzioni di continuità (COTECCHIA & TAFUNI, 2007; COTECCHIA, 2010).

Nell'esempio che si cita si sono iniettati tre diversi tipi di miscele cementizie, confezionate in cantiere sulla base dei risultati di prove di iniettabilità in sito, assecondando lo stato di fratturazione della roccia.

La miscela impiegata nelle prime fasi di iniezione in ciascun foro è composta da: *Cemento 425 kg/mc*, *Acqua 850 l/mc*, *Bentonite 1 kg/mc* (miscela tradizionale). Una miscela cementizia leggermente meno viscosa della precedente (Miscela Mistra) è stata iniettata nelle fasi successive consentendo di saturare, con minori pressioni di iniezione, le parti di ammasso non trattate con le precedenti miscele, aumentando, così, il raggio di azione e di influenza del singolo perforo.

Infine, nelle zone più intensamente fratturate e con presenza di vuoti anche decimetrici, si sono

iniettate miscele cementizie espanse, caratterizzate da un'alta viscosità e capacità di rigonfiare. La composizione di dette ultime miscele è la seguente: *Cemento 628 kg/mc, Acqua 785 l/mc, Bentonite 16 kg/mc, Additivo espandente 1,1 kg/mc.*

In figura 25.6 si riporta il caso di giunti di strato colmati per tutto il loro sviluppo da miscela cementizia tradizionale, mentre nelle figure 25.7 e 25.8 si illustrano i casi in cui i giunti di strato, allargati dal carsismo, sono stati preintasati da miscela cementizia espansa e occlusi definitivamente da quella tradizionale e da quella Mistra.

25.3.1.2. - Prove di permeabilità in sito e determinazione della portata di filtrazione entrante nello scavo

In fase di progetto dell'opera si era ipotizzato che, a seguito degli interventi di iniezione, il coefficiente di permeabilità dell'acquifero avrebbe subito una riduzione da 1 cm/s a 5×10^{-4} cm/s (COTECCHIA, 2010). Sotto detta assunzione è stata calcolata la portata di filtrazione entrante nell'intero scavo, pari a 100 l/s. Prima di dare inizio alle operazioni di scavo sono state eseguite quindi delle

prove di permeabilità, a varie profondità, in sondaggi verticali realizzati nell'ammasso roccioso iniettato del perimetro e del fondello, e ciò al fine di verificare il risultato raggiunto in termini di riduzione del coefficiente di permeabilità dell'acquifero. Tutte le prove di permeabilità eseguite hanno fornito un coefficiente di permeabilità di molto inferiore al valore assunto in progetto (fig. 25.9). È stato quindi eseguito il calcolo della portata entrante nello scavo, assumendo un coefficiente di permeabilità pari a $4,1 \times 10^{-5}$ cm/s, ossia pari al valore medio di tutti i valori determinati con le prove di permeabilità in sito. Esso ha fornito una portata pari a 6 l/s, di poco superiore a quella misurata in sito al termine degli scavi, pari a 4 l/s (fig. 25.10).

25.3.1.3. - Impermeabilizzazione definitiva dell'opera

Nonostante il successo ottenuto nel grouting e quindi nell'impermeabilizzazione al contorno e alla base dell'opera, si è comunque dato luogo alla realizzazione della impermeabilizzazione definitiva, occorrente in ogni caso per una ottimale realizzazione di un'opera nel sottosuolo calcareo

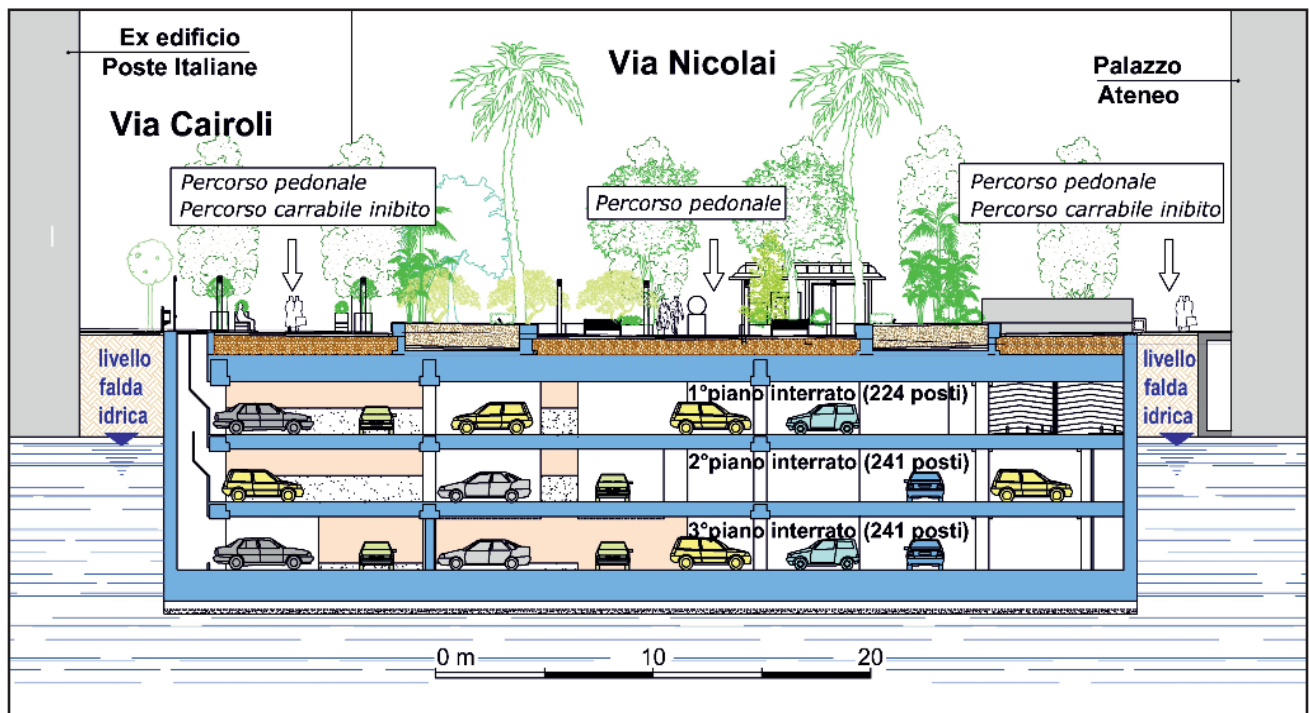


Fig. 25.4 - Sezione trasversale del parcheggio sotterraneo di Piazza Cesare Battisti con indicazione del livello di falda.
- Transversal profile of the underground parking lot at Cesare Battisti Square, with indication of the water table level.

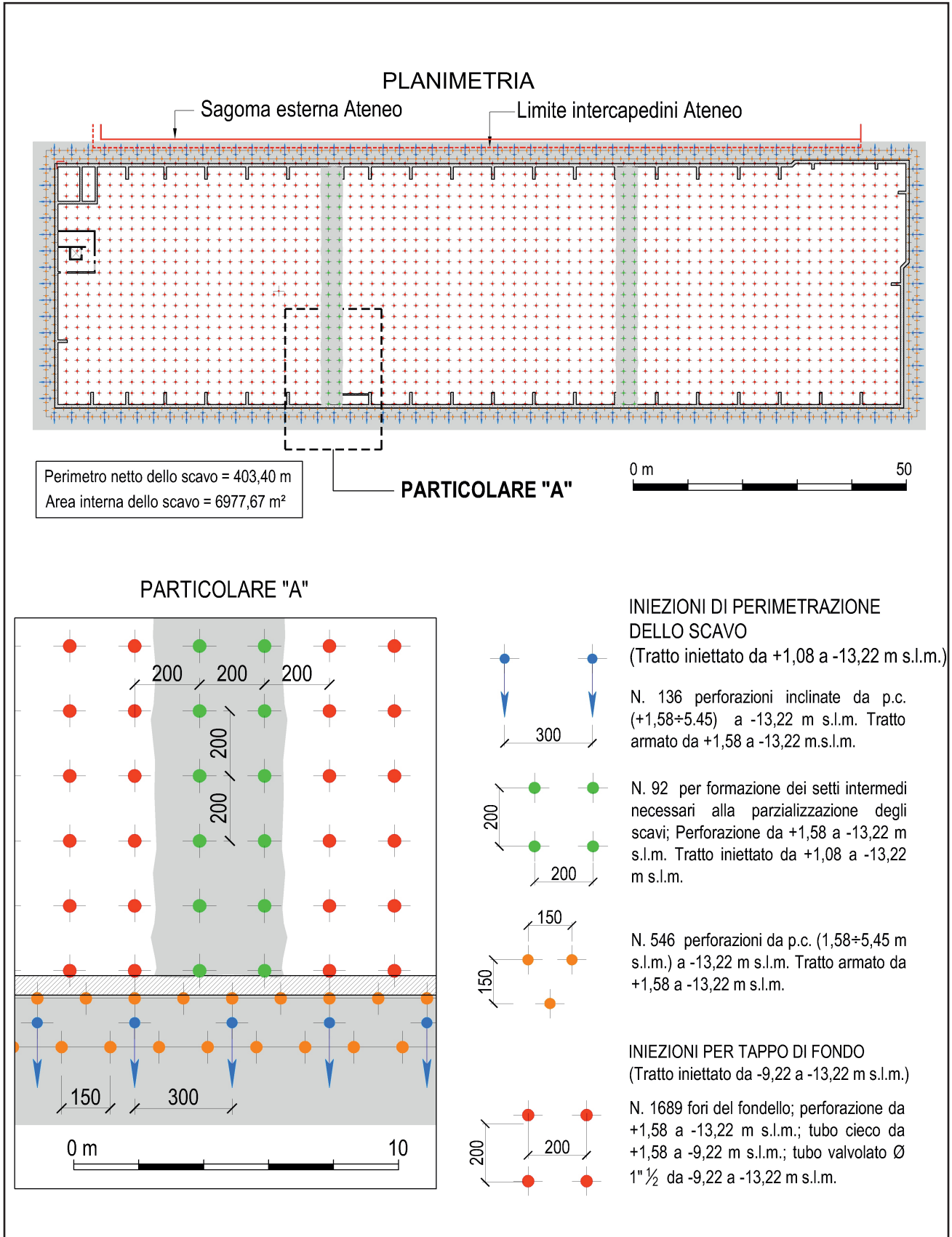


Fig. 28.5 - Planimetria del trattamento di impermeabilizzazione e consolidamento per la realizzazione della "vasca stagna" nella quale è stata immessa la struttura prefabbricata del parcheggio.

- Map of the impermeabilization and reinforcement operations for the "watertight tank" where the parking prefabricated structure was located.



Fig. 25.6 - Parcheggio in Piazza Cesare Battisti: miscela cementizia tradizionale penetrata nei giunti di strato del calcare.
- Parking lot in Cesare Battisti Square: grouting penetrated into the bedding planes of the limestones.

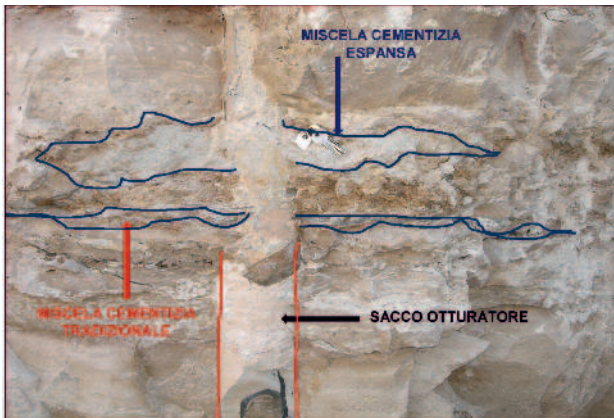


Fig. 25.7 - Sacco otturatore della tubazione adottata per le iniezioni delle miscele espanse.
- Packer of pipes adopted for the injections of expanded mixtures.

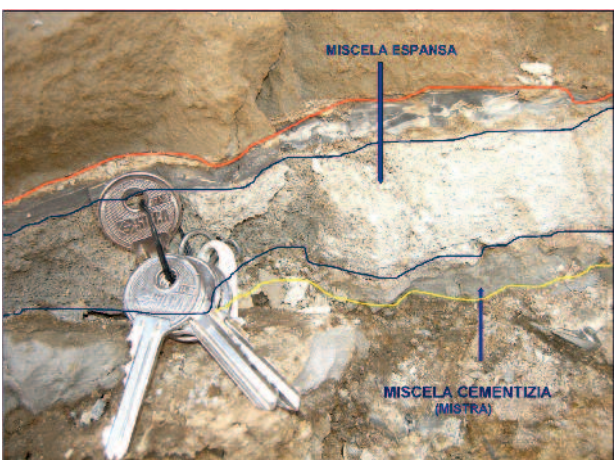


Fig. 25.8 - Vuoto carsico pre-intasato dalla miscela espansa e poi occluso da quella Mistra.
- Karst void pre-filled by the expanding mixture, and then by the Mistra.

fratturato e sede di falda acquifera.

L'impermeabilizzazione definitiva dell'opera, riguardante l'intera superficie esterna contro terra della struttura e l'impalcato di copertura che sostiene tra l'altro un giardino pensile, è consistita in apposite membrane composte da robusti film di polietilene ad alta densità, accoppiate a speciali matrici multilaminari che hanno aderito perfettamente al calcestruzzo dell'intero involucro esterno dell'opera (COTECCHIA, 2010).

25.3.1.4. - Effetti della immersione dell'involucro del parcheggio sul deflusso della falda

Le premesse fin qui sottolineate e, in particolare, la parametrizzazione dell'ambiente idrico sotterraneo, con i risultati illustrati già nel capitolo 15, hanno consentito di affrontare il non facile ma inevitabile argomento, riguardante la quantificazione degli effetti che l'involucro in parola, una volta immerso in falda, produce sulle condizioni di deflusso della stessa (COTECCHIA *et alii*, 2007; COTECCHIA, 2010).

Le indagini idrogeologiche eseguite hanno consentito di definire il modello concettuale dell'acquifero, poi implementato col codice di calcolo agli Elementi Finiti Sutra 2D3D.1 per la valutazione degli effetti che l'opera eserciterà sull'ambiente acquifero circostante, con riferimento sia alla distri-

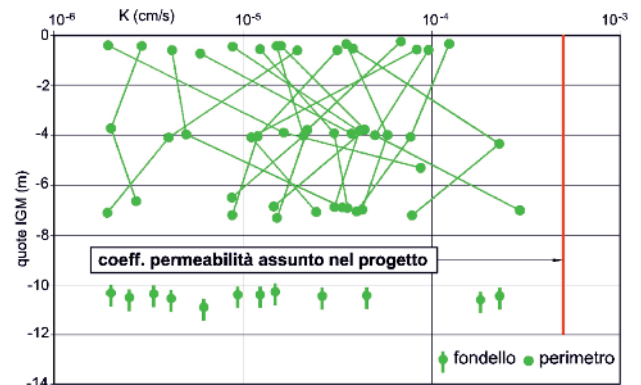


Fig. 25.9 - Coefficienti di permeabilità determinati da prove di assorbimento eseguite nella formazione calcarea impermeabilizzata, al termine dell'esecuzione della "vasca stagna" (in verde), e coefficiente di permeabilità assunto prudenzialmente nel progetto esecutivo (in rosso).

- Permeability coefficients from absorption tests in the impermeabilized limestone formation, after realization of the "watertight tank" (in green), and permeability coefficient used in the executive project (in red).

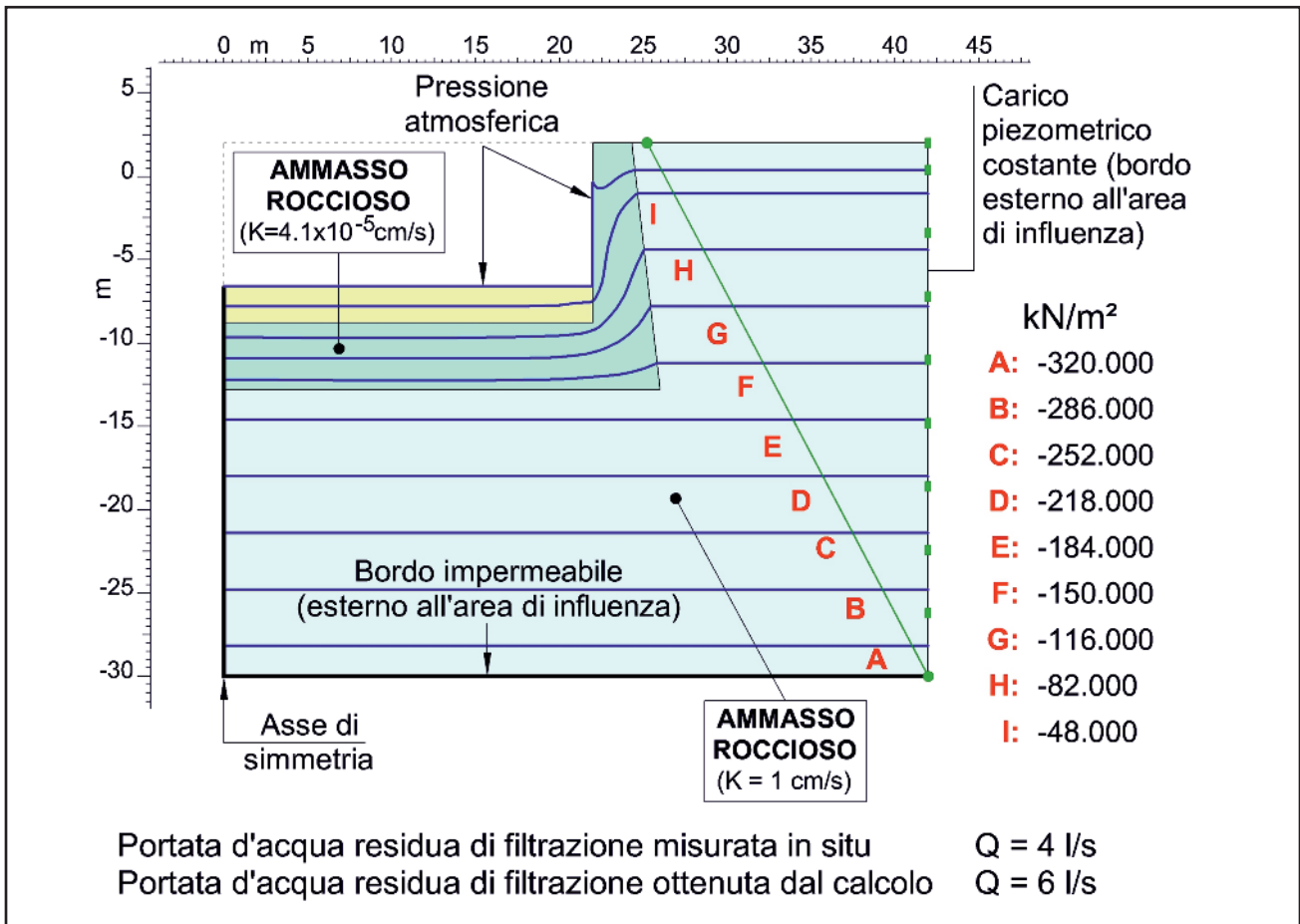


Fig. 25.10 - Risultato del calcolo di filtrazione eseguito con il metodo degli elementi finiti (Plaxis) per la determinazione della portata entrante nello scavo.
 - Outcome of the filtration analysis performed by means of the finite elements method (Plaxis) for the determination of the discharge entering the excavation.

buzione dei carichi piezometrici, sia all'equilibrio esistente tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare.

Il calcolo è stato eseguito in condizioni tridimensionali. Alla base del modello si è assunto un piano orizzontale impermeabile, coincidente con l'interfaccia acqua dolce – acqua di mare. La figura 25.11 mostra le condizioni iniziali ed al contorno assunte nel calcolo. L'assunzione di bordi impermeabili ai lati del modello e quota piezometrica costante sui bordi di monte e di valle è stata verificata attraverso un'analisi parametrica, che ha evidenziato che di là di detti bordi la falda non subisce nessuna modifica. Le condizioni al contorno adottate devono pertanto ritenersi non fisicamente presenti ma comunque esterne all'area di influenza dell'opera. Sul contorno di valle e di monte del modello è stata assunta una quota piezometrica rispettivamente pari a 0 e 15 cm, cui consegue, nel-

l'ipotesi di acquifero omogeneo ed isotropo, una cadente piezometrica costante pari a $i = 3 \text{ ‰}$.

Il parcheggio è stato considerato nel calcolo come una porzione di acquifero a bassissima permeabilità. Nella figura 25.12 si mostrano le superfici equipotenziali deformate dalla presenza del parcheggio, mentre in figura 25.13 le isopieziche tracciate sul piano orizzontale posto a quota pari a quella che il pelo libero della falda presenta sul bordo di valle del modello. Il sollevamento della falda nel punto B dell'involucro è pari solo ad 1 cm, mentre a valle, nel punto E, si verifica un abbassamento di pari entità. Le variazioni piezometriche e della superficie freatica della falda sono dunque pressoché irrilevanti e appena percettibili nella pratica di siffatte operazioni.

Nella figura 25.14 si riportano le componenti orizzontali dei vettori velocità di filtrazione appartenenti a due particolari piani orizzontali, uno posto

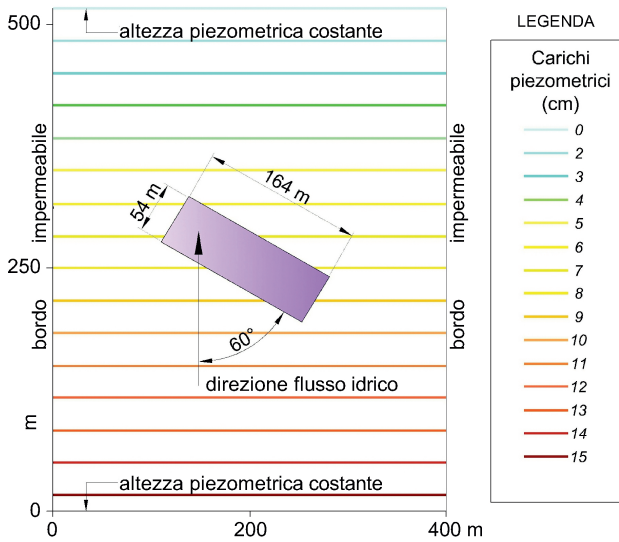


Fig. 25.11 - Condizioni iniziali e al contorno adottate nel calcolo di filtrazione eseguito con il metodo degli elementi finiti (Sutra 2D3D.1).
 - Initial and boundary conditions adopted in the filtration analysis performed by means of the finite elements method (Sutra 2D3D.1).

a quota zero, l'altro posto a quota pari a quella del fondello impermeabilizzato. Nella figura 25.15 si riportano invece le componenti verticali dei vettori velocità di filtrazione appartenenti a tre sezioni verticali del parcheggio, le cui tracce sono riportate in figura 25.14a. I vettori velocità di filtrazione mostrano che nella parte centrale del parcheggio le linee di flusso si immergono sotto l'involucro, mentre per la parte superiore sono indotte all'aggiramento del volume parcheggio stesso.

Il calcolo sin qui illustrato è stato eseguito nel-

l'ipotesi che l'interfaccia tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare rappresenti per la falda un bordo impermeabile fisso. Esso, quindi, è estraneo alle effettive condizioni di galleggiamento della falda di acqua dolce sulla sottostante acqua di mare e della stratificazione salina che caratterizza la zona di transizione. È stato quindi eseguito una verifica agli elementi finiti adottando la teoria della dispersione idrodinamica (cap. 5) e ciò al fine di valutare gli effetti che la realizzazione dell'opera provoca sulle condizioni di equilibrio tra la falda

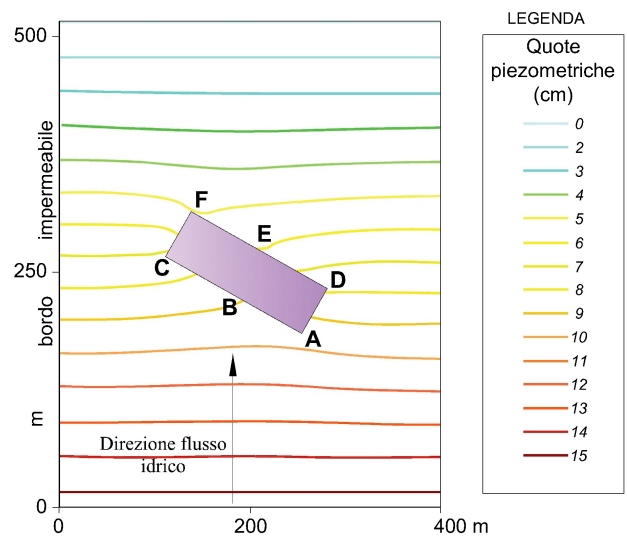


Fig. 25.13 - Isopieziche ottenute dal calcolo dopo la realizzazione dell'opera - Sezione orizzontale a quota del pelo libero della falda del contorno di valle.
 - Isopiezic lines after realization of the engineering work - Horizontal profile at elevation of the water table.

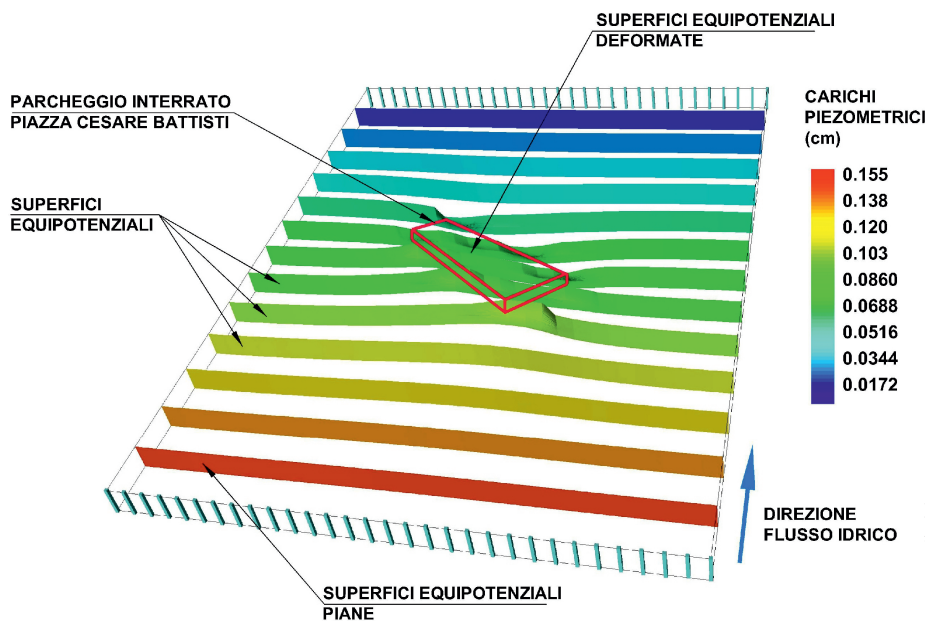


Fig. 25.12 - Superfici equipotenziali della falda acquifera risultanti dal calcolo quali effetti della realizzazione dell'opera.
 - Equipotential surfaces of the water table induced by realization of the engineering work.

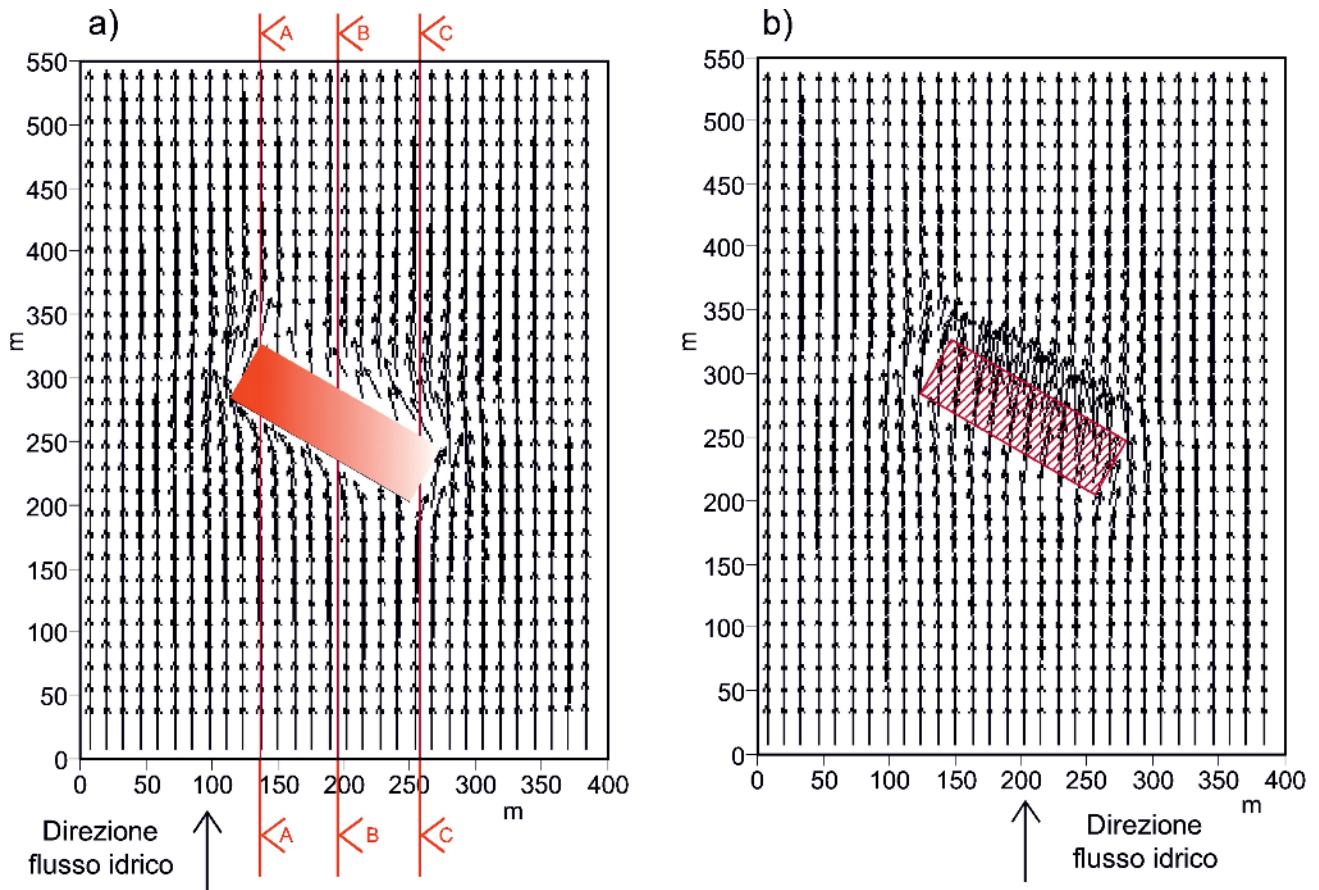


Fig. 25.14 - Componente orizzontale dei vettori di velocità di filtrazione conseguente all'esecuzione dell'opera: a) piano orizzontale passante per il pelo libero della falda del contorno di valle; b) piano orizzontale passante per la base del fondello impermeabilizzato.

- Horizontal component of the filtration velocity vectors consequent to realization of the engineering work: a) horizontal plane at elevation of the water table the perimeter of the valley; b) horizontal plane passing at the base of the impermeabilized bottom plug.

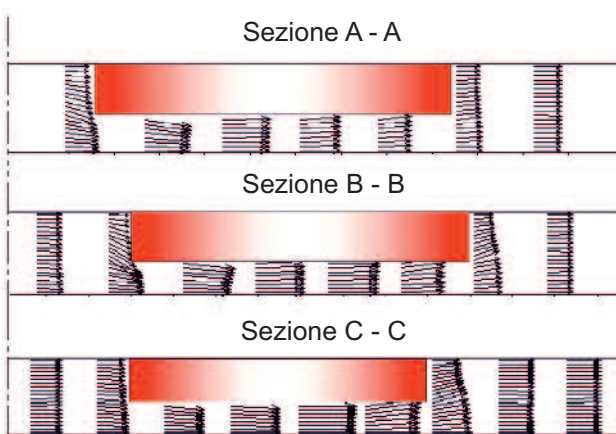


Fig. 25.15 - Vettori della velocità di filtrazione delle acque di falda in corrispondenza delle sezioni A-A, B-B e C-C del parcheggio realizzato (tracce sono indicate in figura 25.14).

- Filtration velocity vectors of groundwater in correspondance of the profiles A-A, B-B and C-C of the parking lot (traces shown in the figure 25.14).

di acqua dolce e la sottostante acqua di mare. In figura 25.16 è riportato il risultato del calcolo espresso in termini di distribuzione della concen-

trazione salina della falda di acqua dolce e dei vettori velocità di filtrazione. Gli spostamenti osservati per le varie isoaline sono risultati irrilevanti.

Le indagini idrogeologiche eseguite durante l'esecuzione dei lavori hanno confermato le previsioni progettuali. È stato infatti possibile verificare l'assenza di variazioni piezometriche della falda imputabili all'immersione dell'opera in falda. Letture idrometrografiche eseguite in piezometri disposti nell'intorno dell'opera durante tutta la durata dei lavori e dopo, hanno infatti evidenziato variazioni piezometriche irrilevanti, dello stesso tipo di quelle osservate prima dei lavori, giustificabili peraltro sulla base delle variazioni del livello del mare e delle condizioni idrologiche della falda (COTECCHIA, 2010). Anche la stratificazione salina della falda, controllata mediante sonde conduttimetriche durante tutta la durata dei lavori, non ha subito alcuna variazione degna di rilievo.

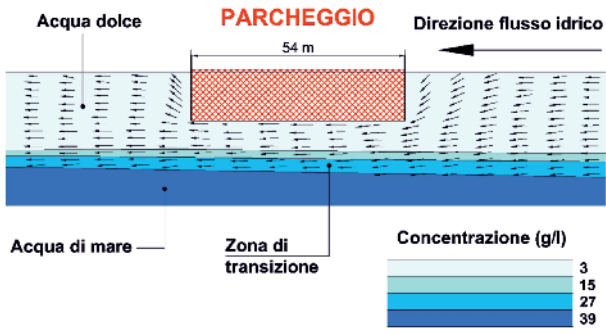


Fig. 25.16 - Vettori velocità di filtrazione e isoaline dopo la realizzazione della struttura.

- Filtration velocity vectors and salinity contour lines after realization of the engineering work.