

POLITECNICO DI TORINO



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE, EDILE E GEOTECNICA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

IMPERMEABILIZZAZIONE DI STRUTTURE INTERRATE

Soluzioni tecnologiche e sistemi di tenuta all'acqua

Relatore:

Prof. Carlo Caldera

Co-Relatore:

Ing. Paolo Roffina

Candidato:

Andrea Pio Parracino

Ottobre 2017

Ai miei genitori

Se costruire significa operare nella realtà, e se la realtà è, come ogni giorno ci appare dalle esperienze fisiche, estremamente complessa e concatenata, mentre la scienza per la povertà dei suoi strumenti è costretta a procedere a furia di limitazioni e di semplificazioni, lasciando fra sé e la realtà un abisso, bisogna pure che l'ingegnere trovi nel suo spirito una forza che lo animi a varcare in qualche modo quell'abisso, perché la sua opera sorga sicura e prenda tra le altre il suo posto con dignità di forma e di sostanza.

Arturo Danusso



Indice dei contenuti

Indice dei contenuti	II
Indice delle figure	V
Indice delle tabelle	VII
Indice delle schede	VIII
INTRODUZIONE	1
QUADRO NORMATIVO	6
Capitolo 1 ESPOSIZIONE E SOLLECITAZIONI	9
1.1. Considerazioni generali	9
1.2. Interazione acqua-terreno	11
1.3. Il problema del gas radon nelle costruzioni.....	13
Capitolo 2 REQUISITI PRESTAZIONALI.....	18
2.1. Considerazioni generali	18
2.2. Requisiti di progetto	18
Capitolo 3 METODI DI SCAVO E COSTRUZIONE.....	23
3.1. Considerazioni generali	23
3.2. Classificazione della struttura sottoquota	25
3.3. Metodi costruttivi per strutture sottoquota profonde	25
3.3.1. Metodo “Bottom-up”	27
3.3.2. Metodo “Top-down”	30
3.4. Metodi costruttivi per strutture sottoquota superficiali	33
3.4.1. Costruzione entro scavo non confinato	34
3.5. Considerazioni sui metodi illustrati	35
3.6. Tecnologie costruttive	36
3.6.1. Contenimento del terreno	36
3.6.2. Esclusione o depressione della falda	44
Capitolo 4 SISTEMI DI IMPERMEABILIZZAZIONE.....	48
4.1. Considerazioni generali	48
4.2. Sistema di tenuta a sacchetto (tipo A) – “Tanked Protection”	49
4.2.1. Sistema Esterno (Ae).....	51
4.2.2. Sistema Rovescio (Aer).....	52
4.2.3. Sistema Sandwich (As)	53

4.2.4.	Sistema Interno (Ai)	55
4.2.5.	Applicazione del sistema di tenuta a sacchetto	56
4.3.	Sistema di tenuta strutturalmente integrata (tipo B) – “Vasca Bianca”	57
4.3.1.	Caratteristiche del calcestruzzo di fondazione	59
4.3.2.	Costruzioni in calcestruzzo armato	65
4.3.3.	Calcestruzzo non armato e costruzioni in mattoni	68
4.3.4.	Applicazione del sistema di tenuta strutturalmente integrata.....	68
4.4.	Sistema di tenuta con cavità drenata (tipo C)	69
4.4.1.	Sistema per pareti verticali.....	70
4.4.2.	Sistema per platee orizzontali	70
4.4.3.	Vantaggi e svantaggi della cavità drenata.....	70
4.4.4.	Applicazione del sistema di tenuta a cavità drenata.....	71
Capitolo 5	MATERIALI PER IMPERMEABILIZZAZIONE	73
5.1.	Considerazioni generali	73
5.2.	Membrane prefabbricate in bitume-polimero	75
5.3.	Membrane prefabbricate sintetiche	81
5.4.	Membrane idroespansive	83
5.5.	Prodotti e sistemi da applicare in situ	85
Capitolo 6	APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI IMPERMEABILIZZAZIONE TIPO A	91
6.1.	Considerazioni generali	91
6.2.	Membrane prefabbricate non in adesione alla struttura	92
6.2.1.	Sistema monostrato semplice	93
6.2.2.	Sistema monostrato compartimentato con dispositivi di controllo ed iniezione	93
6.2.3.	Sistema doppio strato con controllo ed iniezione.....	94
6.3.	Membrane prefabbricate in completa adesione alla struttura	95
6.4.	Membrane idroespansive	98
6.4.1.	Applicazione delle membrane idroespansive	99
6.4.2.	Impermeabilizzazioni idroespansive a pannelli di cellulosa	99
6.4.3.	Membrane idroespansive pre-getto	100
6.5.	Prodotti e sistemi da applicare in situ	102
6.5.1.	Prodotti a base di resine termoindurenti.....	102
6.5.2.	Prodotti a base di resine termoplastiche	102
6.5.3.	Prodotti a base bituminosa	103

6.5.4.	Prodotti a base cementizia.....	103
6.5.5.	Profili sigillanti.....	104
Capitolo 7	PROGETTAZIONE STRUTTURE INTERRATE NUOVA COSTRUZIONE.....	107
7.1.	Considerazioni generali.....	107
7.2.	Classificazione e scomposizione del sistema edilizio.....	107
7.2.1.	Elementi e strati.....	110
7.3.	Palo di fondazione.....	112
7.3.1.	Palo passante il telo.....	112
7.3.2.	Palo non passante il telo.....	115
7.4.	Giunto strutturale.....	117
7.4.1.	Giunto strutturale con profilato idroespansivo interno.....	117
7.4.2.	Giunto strutturale con profilato idroespansivo esterno.....	120
7.5.	Sigillatura tubazione passante.....	122
7.5.1.	Tubazione passante parete verticale.....	122
7.5.2.	Tubazione passante la platea.....	125
7.6.	Superfici verticali.....	127
7.6.1.	Superfici verticali con scavo confinato.....	127
7.6.2.	Superfici verticali con scavo libero.....	130
7.7.	Fossa ascensore.....	133
Capitolo 8	CONFRONTO DELLE SOLUZIONI.....	137
8.1.	Considerazioni generali.....	137
8.2.	Requisiti fondamentali dei sistemi di impermeabilizzazione.....	137
8.3.	MATRICE DI CONFRONTO.....	142
	CONCLUSIONI.....	146
	BIBLIOGRAFIA.....	148
	SITOGRAFIA.....	150

Indice delle figure

Figura 1: Esposizione e sollecitazioni (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo)	10
Figura 2: Sezione schematica di una porzione di terreno (Fonte / Mapei, Impermeabilizzazione di strutture interrato)	11
Figura 3: Sezione di terreno in presenza di falda freatica (Fonte / Mapei, Impermeabilizzazione di strutture interrato)	12
Figura 4: Sezione di terreno in presenza di falda artesianica (Fonte / Mapei, Impermeabilizzazione di strutture interrato)	12
Figura 5: La sequenza di disintegrazione dell' U-238 (Fonte / Radon: Guida tecnica UFSP, Ufficio federale della sanità pubblica, Servizio tecnico e d'informazione sul radon, 3003 Berna).....	14
Figura 6: Come penetra il radon nelle abitazioni (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)	14
Figura 7: Mappatura regioni italiane (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)	15
Figura 8: Risultati delle misure di concentrazione di radon (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)	15
Figura 9: Fonti di insorgenza di tumore polmonare (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica.....	16
Figura 10: Vita utile/durabilità (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo).....	20
Figura 11: Costi totali di proprietà (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo).....	21
Figura 12: Diagramma dei momenti flettenti (Fonte / Simplifying design and construction, Alan Tovey).....	24
Figura 13: Metodi costruttivi (Fonte / Construction Methodology, http://www.railsystem.net/cut-and-cover/ [02/10/2017])	25
Figura 14: Metodo Bottom-up (Fonte / Construction Methodology, http://www.railsystem.net/cut-and-cover/ [02/10/2017])	29
Figura 15: Metodo Top-down (Fonte / Construction Methodology, http://www.railsystem.net/cut-and-cover/ [02/10/2017])	32
Figura 16: Scavo non confinato (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo)	33
Figura 17: Scavo non confinato con palancole (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo)	33
Figura 18: Scavo di sbancamento (Fonte / http://carblat.ru/scavi-di-sbancamento/ [06/10/2017])	37

Figura 19: Paratia di pali trivellati (Fonte / Bertioia Costruzioni, http://www.bertioia.it/lavorazioni/pali-trivellati-per-fondazioni-e-consolidamento-terreni/ , [20/09/2017]).....	38
Figura 20: Berlinese di micropali (Fonte / Negropal, http://www.negropal.com/servizi/berlinesi-di-micropali-e-protezione-scavi/ , [20/09/2017])	39
Figura 21: Fasi realizzative del Jet grouting (Fonte / http://www.railsystem.net/jet-grouting/ , [02/10/2017]).....	40
Figura 22: Palancole metalliche (Fonte / ELTO, https://www.elto.it/site/palancole_acciaio_gallery.php , [03/10/2017]).....	41
Figura 23: Fasi realizzative diaframmi (Fonte / TREVI, http://www.trevispa.com/en/Technologies/diaphragm-walls-hydromill , [03/10/2017])	43
Figura 24: Sistema well-point (Fonte / KLAUDIA, http://www.en.klaudia.eu/wellpoints-wellpoints_application.html , [08/10/2017])	46
Figura 25: Sistema a sacchetto esterno Ae (per la parete) e esterno rovescio Aer (per la platea).....	51
Figura 26: Sistema a sacchetto esterno rovescio Aer.....	52
Figura 27: Sistema a sacchetto sandwich As	54
Figura 28: Sistema a sacchetto interno.....	56
Figura 29: Sistema strutturalmente integrata "Vasca bianca" (Fonte / WASCOTEC, Sistema vasca bianca: Tecnologia per l'impermeabilizzazione delle costruzioni in calcestruzzo).....	58
Figura 30: Schema logico che il progettista deve seguire per adempiere alle esigenze di durabilità delle opere in c.c. (Fonte / UNICAL: Guida alla prescrizione della durabilità delle strutture in cemento armato)	60
Figura 31: Sistema con cavità drenata (Fonte / http://www.fisproducts.co.uk/our-solutions/structural-waterproofing/cavity-drain-systems/ [05/10/2017])	69
Figura 32: Grafico invecchiamento-resistenza flessionale (Fonte / Quaderno tecnico INDEX – Guida all'impermeabilizzazione).....	77
Figura 33: Armature composite (Fonte / Quaderno tecnico INDEX – Guida all'impermeabilizzazione).....	78
Figura 34: Resistenza a trazione e allungamento a rottura tipici delle membrane con mescola uguale (Fonte / Quaderno tecnico INDEX – Guida all'impermeabilizzazione).....	79
Figura 35: Flessibilizzazione PVC e FPO.....	82
Figura 36: Struttura molecolare bentonite (Fonte / http://www.bentonite.it/struttura-della-bentonite.php [02/10/2017]).....	84

Indice delle tabelle

Tabella 1: Livelli di impermeabilità (Fonte / BS 8102-2009)	19
Tabella 2: Confronto tra metodi di scavo (Fonte / Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002)	35
Tabella 3: Sistemi di tenuta all'acqua.....	48
Tabella 4: Prospetto 1 tratto dalla norma UNI EN 206-1 con indicazione delle classi di esposizione ambientale	63
Tabella 5: Prospetto 2 tratto dalla norma UNI EN 206-1 con l'indicazione dei valori limite all'attacco chimico	63
Tabella 6: Prospetto F.1 tratto dalla norma UNI EN 206-1 con l'indicazione dei valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo	64
Tabella 7: Raccomandazioni per il mix design (Fonte / SIKA: Sistemi di tenuta all'acqua, Paolo Roffina)	65
Tabella 8: Massima apertura delle fessure nel cls (Fonte / SIKA: Sistemi di tenuta all'acqua, Paolo Roffina)	66
Tabella 9: Raccomandazioni per la progettazione	67
Tabella 10: Materiali per impermeabilizzazione.....	74
Tabella 11: Applicabilità sistema monostrato semplice.....	93
Tabella 12: Applicabilità sistema monostrato compartimentato.....	94
Tabella 13: Applicabilità sistema doppio strato compartimentato.....	94
Tabella 14: Applicabilità membrane autoadesive post getto	96
Tabella 15: Applicabilità autoadesive pre-getto	97
Tabella 16: Applicabilità pannelli di cellulosa.....	100
Tabella 17: Applicabilità membrane idroespansive pre-getto	101
Tabella 18: Applicabilità prodotti a base di resine termoindurenti.....	102
Tabella 19: Applicabilità prodotti a base di resine termoplastiche	103
Tabella 20: Applicabilità prodotti a base bituminosa	103
Tabella 21: Applicabilità prodotti a base cementizia.....	104
Tabella 22: Applicabilità profili sigillanti.....	105
Tabella 23: Schema di classificazione del sistema tecnologico (Fonte/ UNI 8290 Parte I).....	109
Tabella 24: Matrice di confronto.....	144

Indice delle schede

Scheda 1: DT_IMP.ppt	114
Scheda 2: DT_IMP.pnpt	116
Scheda 3: DT_IMP.gspii	119
Scheda 4: DT_IMP.gspie	121
Scheda 5: DT_IMP.tppv	124
Scheda 6: DT_IMP.tpp	126
Scheda 7: DT_IMP.svsc	129
Scheda 8: DT_IMP.svsl	132
Scheda 9: DT_IMP.fa.....	135



INTRODUZIONE

Negli ultimi anni c'è stata, soprattutto nelle aree densamente urbanizzate, una vera e propria rincorsa all'utilizzo degli spazi sotterranei di edifici, cortili e strade, per gli scopi più svariati: autorimesse, locali tecnologici, ambienti destinati allo stoccaggio e ad attività produttive, locali destinati ad unità abitative ed uso pubblico.

Di conseguenza il progettista è chiamato, con sempre maggior frequenza ed attenzione, ad affrontare questo tipo di problematiche, operando scelte non semplici sia per l'impatto sul costo dell'opera che per le conseguenze che una errata progettazione può comportare.

Qualsiasi difetto di impermeabilizzazione riduce notevolmente la durabilità di edifici e infrastrutture, compromettendone l'uso previsto, in quanto l'acqua, sia essa di natura meteorica o di falda, è veicolo per tutti gli agenti aggressivi - anidride carbonica, cloruro, solfati etc. - i quali penetrano all'interno dei materiali riducendone le prestazioni tecniche e qualitative.

Questo comporta costosi lavori di ripristino strutturale, danni, deterioramento di finiture interne, tempi di inattività operativa o gravi conseguenze per l'ambiente interno a causa dell'umidità e della condensa.

La necessità di controllare i materiali più appropriati da impiegare e la corretta applicazione degli stessi in cantiere è prioritario per garantire una efficace ed efficiente realizzazione.

La chiave di accesso per una corretta impermeabilizzazione è l'impiego di materiali compatibili, sia tra di loro che con le strutture da proteggere in quanto molteplici sono le funzioni e gli strati funzionali che si integrano costruttivamente.

In genere l'attenzione del progettista è rivolta esclusivamente alla scelta della membrana impermeabile. Se ciò appare non immotivato, va osservato che il mantenimento nel tempo della funzione di tenuta all'acqua richiede una analisi a sistema. La durata di una membrana impermeabile dipende quindi non solo dalla qualità intrinseca, ma anche dalle interazioni che si vengono a determinare tra gli strati ed elementi tecnici componenti una specifica soluzione.

Proprio in ragione di ciò nella tesi, come anche sottolineato dal titolo, non si parlerà di impermeabilizzazioni, ma di sistemi di tenuta all'acqua.

La progettazione preliminare ed esecutiva delle impermeabilizzazioni è fondamentale per la stesura dei dettagli costruttivi e deve prendere in conto le azioni a cui è sottoposta la struttura e il suo comportamento statico nel tempo.

Le variabili che condizionano la progettazione di strutture interrato possono essere:

- ESOGENE
 - contesto;
 - ambito di realizzazione;
 - opere provvisoriale;
 - analisi di carichi aggiuntivi sismici, dinamici e idrostatici;
 - portanza e natura del terreno (stabilità, permeabilità, cedimenti differenziati);
 - presenza di agenti aggressivi nell'acqua o nel terreno;
 - livello di falda.

- ENDOGENE
 - destinazione d'uso (parcheggi, spazi tecnici per impianti);
 - durabilità delle opere;
 - tecnologia costruttiva (opere provvisoriale, condizioni al contorno).

Le problematiche principali che possono presentarsi durante l'esecuzione dei lavori e che devono essere analizzate con la massima attenzione e risolte per evitare l'inefficacia del sistema di impermeabilizzazione progettata sono le lesioni strutturali (in platea), le fessurazioni (anche diffuse nelle zone più deboli o più sollecitate), le riprese di getto, i giunti operativi (che sono soggetti a ripetuti movimenti provocati da carichi variabili e/o da dilatazioni termiche), le tubazioni passanti o i ferri distanziatori, la manutenzione (accessibilità per l'ispezione e il ripristino).

La presente tesi si pone quindi come obiettivo quello di essere un utile strumento di supporto per progettisti, direttori dei lavori, committenti, imprese generali di costruzioni e produttori di prodotti impermeabilizzanti, relativamente agli approcci, ai sistemi e ai metodi riguardanti questa tipologia di interventi.

Nell'elaborato sono presenti 9 schede che rappresentano le soluzioni maggiormente utilizzate, affiancate da altrettante tavole grafiche dove sono indicati i criteri progettuali, la stratigrafia, le principali caratteristiche ed i criteri esecutivi dei dettagli studiati.

La struttura della tesi è pensata come una linea guida e segue quindi l'iter ideale della progettazione:

- definizione delle caratteristiche dell'ambiente esterno ovvero le diverse condizioni di esposizione e sollecitazione a cui sono soggette le strutture interrato;
- definizione dei requisiti dell'ambiente interno ovvero la destinazione d'uso, il livello di impermeabilità, la vita utile;
- scelta del metodo di scavo e costruttivo;
- definizione dei principali sistemi di impermeabilizzazione;
- presentazione dei prodotti e sistemi disponibili in commercio;
- progetto e dettagli di impermeabilizzazione;
- matrice di confronto.

Bibliografia essenziale

- BIG MAT, “*Impermeabilizzazione*”, QUADERNO TECNICO, n° 5;
- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., “*Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione*”, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- SCHVARCZ RICCARDO, “*L'impermeabilizzazione delle strutture interrato ai fini del buon isolamento: quali garanzie e forme di controllo?*”, IL GIORNALE DELL'INGEGNERE, n° 4, aprile 2015.



QUADRO NORMATIVO

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO - TERMINOLOGIA

- **UNI 8290:1981** Parte I Edilizia residenziale - Sistema tecnologico - Classificazione e terminologia
- **UNI 8290:1983** Parte II Edilizia residenziale - Sistema tecnologico - Analisi dei requisiti
- **UNI 8290:1987** Parte III Edilizia residenziale - Sistema tecnologico - Analisi degli agenti
- **UNI 10838:1999** Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia

CALCESTRUZZO

- **UNI EN 206-1:2006** Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- **UNI 11104:2004** Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1
- **UNI EN 1504-2:2005** Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 2: Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo
- **UNI EN 1504-9:2008** Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 9: Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi
- **UNI EN 934-2:2012** Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Additivi per calcestruzzo - Parte 2: Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura

GEOSINTETICI

- **UNI 11309:2008** Geosintetici con funzione barriera - Geosintetici polimerici a base di polietilene a media e alta densità - Caratteristiche e limiti di accettazione
- **UNI 11332:2009** Geosintetici con funzione barriera - Geocompositi bentonitici - Caratteristiche e limiti di accettazione
- **UNI 11498:2013** Geosintetici con funzione barriera - Geosintetici polimerici ad aderenza migliorata a base di polietilene a media e alta densità - Caratteristiche e limiti di accettazione
- **UNI EN 13361:2013** Geosintetici con funzione barriera - Caratteristiche richieste per l'impiego nella costruzione di bacini e di dighe
- **UNI EN 13362:2005** Geosintetici con funzione barriera - Caratteristiche richieste per l'impiego nella costruzione di canali
- **UNI EN 13491:2008** Geosintetici con funzione barriera - Caratteristiche richieste per l'impiego come barriere ai fluidi nella costruzione di gallerie e strutture in sotterraneo
- **UNI EN 15382:2013** Geosintetici con funzione barriera - Caratteristiche richieste per l'impiego in infrastrutture di trasporto

MEMBRANE

- **UNI EN 13967:2012** Membrane flessibili per impermeabilizzazione - Membrane di materiale plastico e di gomma impermeabili all'umidità incluse membrane di materiale plastico e di gomma destinate ad impedire la risalita di umidità dal suolo - Definizioni e caratteristiche
- **UNI EN 13969:2007** Membrane flessibili per impermeabilizzazione - Membrane bituminose destinate ad impedire la risalita di umidità dal suolo - Definizioni e caratteristiche
- **UNI EN 14891:2012** Prodotti impermeabilizzanti applicati liquidi da utilizzare sotto le piastrellature di ceramica incollate con adesivi - Requisiti, metodi di prova, valutazione della conformità, classificazione e designazione
- **UNI EN 14909:2012** Membrane flessibili per impermeabilizzazione - Membrane di materiale plastico e di gomma destinate ad impedire la risalita di umidità - Definizioni e caratteristiche
- **UNI EN 14967:2006** Membrane flessibili per impermeabilizzazione - Membrane bituminose per muratura destinate ad impedire la risalita di umidità - Definizioni e caratteristiche
- **UNI EN 15814:2015** Rivestimenti per impermeabilizzazione di elevato spessore a base di bitume modificato con polimeri - Definizioni e requisiti
- **UNI EN 13245-2:2009** Materie plastiche - Profilati di policloruro di vinile non plastificato (PVC-U) per applicazioni edilizie - Parte 2: Profilati di PVC-U e di PVC-UE per finiture su pareti interne ed esterne e su soffitti

Capitolo 1

ESPOSIZIONE E SOLLECITAZIONI

1.1. Considerazioni generali

Le fondazioni ed ogni altra struttura interrata sono parzialmente o completamente esposte al terreno circostante ed all'acqua di falda o di percolazione, con conseguenti sollecitazioni ed esposizioni specifiche, derivanti dalle condizioni ambientali predominanti, permanenti o temporanee.

Come sempre la parte basilare della diagnosi è l'anamnesi, ovvero per sviluppare progetti risolutivi si devono conoscere i problemi, quindi l'analisi del contesto in cui si opera. Dai rilievi idrogeologici effettuati o reperiti si possono ricavare informazioni utili per analizzare il livello e la variabilità della falda dell'acqua e valutarne la quota rispetto al piano campagna in riferimento all'opera che si deve realizzare. Si deve inoltre porre estrema attenzione a valutare la quota di falda di progetto che influenzerà le scelte dell'impermeabilizzazione e la definizione dei carichi di sottospinta idraulica per la struttura fondazionale e anche ai fini delle spinte orizzontali residue sui muri perimetrali.

Tutta questa importanza deriva da una semplicissima considerazione: la spinta idraulica è un carico molto elevato. Una spanna d'acqua (25 cm) corrisponde a un carico di 250 kg/m^2 che grava dal basso verso l'alto sulla platea di base della struttura. Un solo metro di altezza d'acqua genera ben 1000 kg/m^2 e con luci libere di inflessione di almeno 5-6 metri si sviluppano momenti flettenti decisamente importanti che devono essere noti a chi sta progettando la struttura.

Qui di seguito sono elencate le diverse condizioni di esposizione a cui le strutture interrate possono essere esposte:

- diversi livelli di pressione idrica e di esposizione all'acqua (es. terreno umido, acqua di percolazione o acqua di falda in pressione idrostatica e acque libere);
- acqua di falda aggressiva contenente sostanze chimiche (comunemente solfati e cloruri in soluzione);
- forze statiche eterogenee (dovute a carichi, cedimenti, sollevamenti, ecc.);

- forze dinamiche (causate per esempio da cedimenti, terremoti, esplosioni, ecc.);
- variazioni di temperatura (gelo notturno/invernale, calore diurno/estivo);
- gas nel terreno (es. metano e radon);
- agenti biologici aggressivi (radici di piante/coltivazioni, attacco da funghi o batteri).



Figura 1: Esposizione e sollecitazioni (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo)

1.2. Interazione acqua-terreno

Il terreno è costituito da materiale solido di diversa natura e tipologia oltre che da spazi vuoti al cui interno è presente aria così come può entrarvi e circolare anche l'acqua.

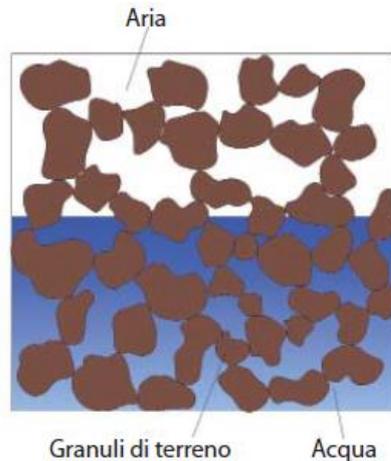


Figura 2: Sezione schematica di una porzione di terreno (Fonte / Mapei, Impermeabilizzazione di strutture interrate)

L'attitudine di un terreno a farsi attraversare dall'acqua è definita permeabilità ed è funzione della presenza di vuoti nel materiale solido che costituisce il terreno stesso.

Se i vuoti sono costituiti da pori, si parla di permeabilità per porosità; se i vuoti sono costituiti da fratture, si parla, invece, di permeabilità per fratturazione; in entrambi i casi, solo i vuoti che comunicano tra loro possono permettere il movimento dell'acqua.

I terreni costituiti da granuli grossolani sono molto permeabili; questo significa che l'acqua si infiltra più facilmente e non tende a rimanere in superficie. Nei terreni costituiti da granuli molto piccoli, come ad esempio i terreni argillosi, il moto di filtrazione è reso più difficoltoso, quindi l'acqua tende a rimanere in superficie. Nei terreni, invece, costituiti da strati di roccia compatta, la permeabilità varia a seconda della quantità e delle dimensioni delle fratture e di quanto queste fratture si intersecano.

Più di un secolo fa Darcy studiò il flusso dell'acqua attraverso strati orizzontali di sabbia e stabilì che la velocità di flusso attraverso mezzi porosi è direttamente proporzionale alla perdita di carico e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso. Darcy legò le diverse grandezze con la ben nota relazione:

$$v = k \cdot i = k \cdot (\Delta h/L)$$

dove:

v = velocità di filtrazione;

k = coefficiente di permeabilità o coefficiente di conducibilità idraulica;

i = gradiente idraulico o cadente piezometrica.

Numerosi studi hanno dimostrato sperimentalmente come la legge di Darcy ben rappresenti il moto di filtrazione in un mezzo poroso saturo, a condizione che le velocità si mantengano entro valori tali da garantire un regime laminare. Di fatto, essendo le velocità del fluido nel terreno relativamente basse, per tutti i tipi di materiale, dalle sabbie alle argille, il moto è sempre in condizioni laminari, quindi la legge di Darcy è applicabile in tutti i terreni (dimostrato da Terzaghi, 1921-1925).

L'acqua che percola nel terreno e si muove nel sottosuolo dà origine alle "falde idriche" sotterranee. Di seguito con il termine "acquifero" si indicherà un terreno (più o meno compatto, stratificato o no) che può immagazzinare acqua, farla circolare e restituirla in quantità apprezzabili. Un acquifero è delimitato, almeno nella parte inferiore, da uno strato di terreno impermeabile; l'acqua si muove all'interno degli acquiferi, anche se molto lentamente.

In generale, si chiamano falde freatiche o libere, gli acquiferi alimentati direttamente dall'acqua piovana che si infiltra dalla superficie e penetra nel terreno permeabile, finché non incontra una formazione impermeabile (per es. di argilla) che ne arresta il movimento. Questo strato costituisce la base, o "letto", della falda freatica; il limite superiore della falda freatica è costituito, in pratica, dalla fine della zona satura ("superficie freatica"). L'acqua in essa contenuta ha una pressione uguale a quella atmosferica.

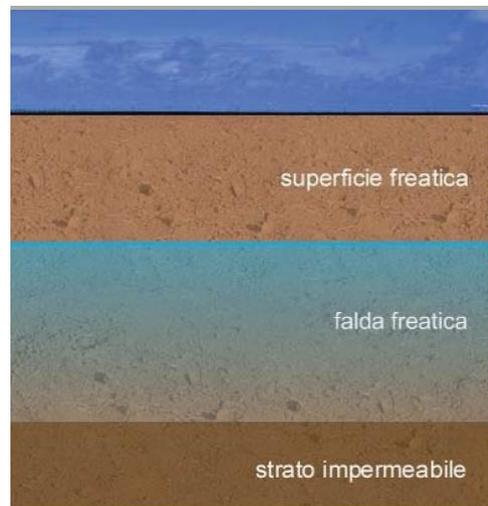


Figura 3: Sezione di terreno in presenza di falda freatica (Fonte / Mapei, Impermeabilizzazione di strutture interrate)

Esistono anche falde dette in pressione, o falde artesiane, che sono delimitate sia nella parte inferiore che in quella superiore da uno strato impermeabile. L'acqua che alimenta queste falde è quella che si infiltra dove il terreno permeabile, che costituisce la falda stessa, viene a trovarsi in superficie e, quindi, può ricevere acqua. Pertanto, la zona "di ricarica" di una falda in pressione può trovarsi anche molto distante dalla falda stessa. Si parla di falda "in pressione" perché l'acqua all'interno della falda è sottoposta ad una pressione, superiore a



Figura 4: Sezione di terreno in presenza di falda artesianica (Fonte / Mapei, Impermeabilizzazione di strutture interrate)

quella atmosferica, grazie alla quale può risalire spontaneamente all'interno di un foro scavato nel terreno.

L'acqua contenuta in un terreno può essere classificata in modo diverso a seconda del legame esistente con i granuli di terreno:

- acqua di ritenuta, che aderisce ai grani di terreno non prendendo parte al ciclo idrologico;
- acqua libera, che è in grado di filtrare nel terreno per effetto della forza di gravità.

Ai fini della soluzione delle problematiche legate al drenaggio dei terreni, l'acqua libera è quella che riveste maggiore importanza.

1.3. Il problema del gas radon nelle costruzioni

Considerazioni generali

Negli ultimi decenni è stato evidenziato un nuovo pericolo connesso con l'utilizzo degli edifici, rappresentato dall'eventuale presenza di gas radon nel terreno e dalla necessità quindi di prevedere adeguate misure di sicurezza contro le esalazioni di questo gas.

Non è oggetto della presente tesi la trattazione delle modalità di difesa dell'ambiente abitativo dal gas radon. Quanto di seguito riportato ha solo lo scopo di fornire un'informazione di base sul problema radon nelle costruzioni.

Che cos'è il Radon

Il radon (Rn-222) è un gas nobile generato dal decadimento del radio (Ra-226), che a sua volta è un prodotto del decadimento dell'uranio (U-238). Poiché l'uranio è presente in varie concentrazioni quasi ovunque sulla crosta terrestre, anche il radon si trova praticamente dappertutto nel terreno.

Anche in alte concentrazioni il radon è:

- invisibile;
- inodore;
- inerte;
- né combustibile né esplosivo;
- non riconoscibile dall'odore né dal gusto;
- decade in prodotti radioattivi con un periodo di dimezzamento di circa quattro giorni.

Il radon è dannoso soprattutto a causa di questi prodotti di disintegrazione, infatti, può essere inalato sia direttamente come gas nei polmoni oppure sotto forma di pulviscolo, contenente i suoi prodotti di decadimento.

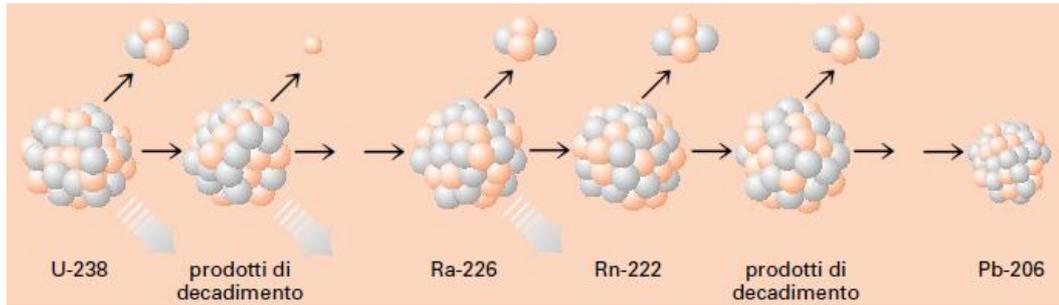


Figura 5: La sequenza di disintegrazione dell' U-238 (Fonte / Radon: Guida tecnica UFSP, Ufficio federale della sanità pubblica, Servizio tecnico e d'informazione sul radon, 3003 Berna)

La presenza del radon nelle abitazioni può essere di diversa origine:

- Aria esterna: il radon che diffonde dal sottosuolo, nella maggior parte dei casi si diluisce nell'aria atmosferica senza costituire un grosso pericolo;
- I materiali da costruzione;
- L'acqua d'uso domestico: l'acqua nel sottosuolo può caricarsi di Rn-222 per liberarlo poi nelle abitazioni al momento dell'utilizzo;
- Il sottosuolo: è da ritenere la fonte primaria dell'inquinamento da radon. L'eszalazione del radon dipende dalla quantità di uranio presente nel sottosuolo e dalla possibilità di migrazione verso l'esterno legata alla porosità ed al grado di fessurazione del sottosuolo. Il Rn-222, quando arriva in superficie, penetra nelle cantine e nelle intercapedini, più facilmente lungo giunti, fessure e passaggi di tubazioni.

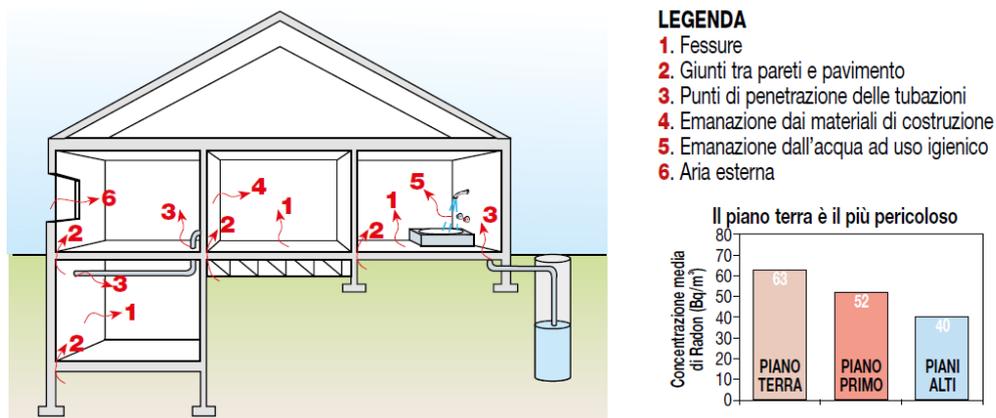


Figura 6: Come penetra il radon nelle abitazioni (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)

Mappatura e classificazione delle aree a rischio

Negli ultimi anni si sono succedute, nei vari paesi, una serie di indagini volte a definire una mappa dei territori e delle abitazioni esistenti a rischio radon.

In Italia, negli anni 90 è stata condotta un'indagine dall'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente – ex ENEA/DISP) e dall'ISS (Istituto Superiore della Sanità) in collaborazione con 17 Regioni e due Provincie Autonome, su un campione di 5000 casi.

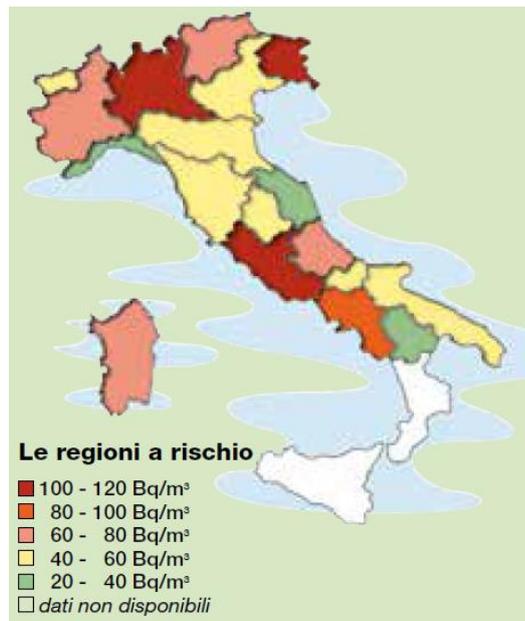


Figura 7: Mappatura regioni italiane (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)

La radioattività del radon e dei suoi derivati si esprime in Bq/m³ (Bq = becquerels, numero di disintegrazioni al secondo per m³ di aria). I risultati dell'indagine nazionale sono riportati nel grafico accanto.

Distribuzione della concentrazione media annua di radon nel campione di abitazioni e percentuale case con >200 e >400 Bq/m³. I valori medi nazionali riportati nel riquadro ottenuti dai valori medi di ogni Regione pesati sulla base del relativo numero di famiglie residenti

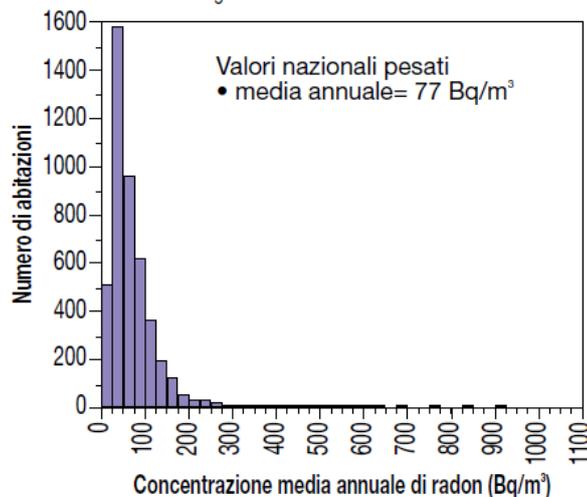


Figura 8: Risultati delle misure di concentrazione di radon (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)

I dati disponibili a livello mondiale sono quelli forniti da Stati Uniti e Paesi della Comunità Europea mentre sono scarse le informazioni che riguardano gli altri paesi. Il comitato scientifico delle Nazioni Unite che si occupa degli effetti delle radiazioni atomiche, sulla base di quanto disponibile, ha assunto come valore medio pesato mondiale, per le abitazioni, una concentrazione di 40 Bq/m³.

Il valore di 77 Bq/m³ misurato in Italia può essere considerato come un valore medio / alto rispetto alla situazione mondiale. L'attenzione al problema delle varie organizzazioni che si occupano del radon si sta' sempre più concentrando verso la definizione dei valori limite da considerare pericolosi e che quindi impongono delle misure di contenimento dell'inquinamento.

Aspetti sanitari

Il radon è un gas inerte insapore, incolore, inodore ma radioattivo e può indurre il tumore polmonare se viene respirato. Secondo una ricerca americana, il radon è imputato di essere la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo della sigaretta e, nei soli Stati Uniti, provocherebbe la morte di 19.000 persone.

In Italia recenti indagini nazionali attribuiscono al radon il 10% dei decessi dovuti a tumore al polmone mentre l'80% è attribuibile al fumo da sigaretta, e solo il restante 10% ad altre cause. Le morti attribuibili al radon si stima siano 3000 l'anno. Sorprendentemente il radon è un pericoloso agente tumorale trascurato dalla vigente legislazione che finora si è limitata a semplici "raccomandazioni".

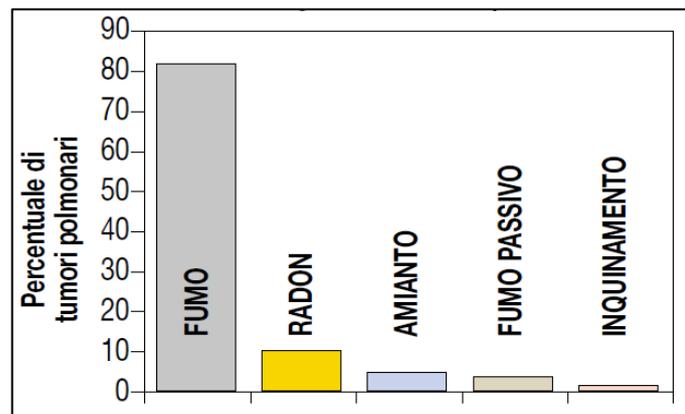


Figura 9: Fonti di insorgenza di tumore polmonare (Fonte / Index, Capitolato tecnico, Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall'acqua e dal radon, anche in zona sismica)

Non è tanto la radioattività del gas stesso ad essere la causa principale del tumore, quanto quella dei suoi derivati che si formano per decomposizione spontanea del radon al momento della sua periodica trasformazione che avviene ogni 3.8 giorni.

Bibliografia essenziale

- BIG MAT, “*Impermeabilizzazione*”, QUADERNO TECNICO, n° 5;
- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., “*Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione*”, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- INDEX, “*Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall’acqua e dal radon, anche in zona sismica*”, CAPITOLATO TECNICO;
- MAPEI, “*Impermeabilizzazione di strutture interrate*”, QUADERNO TECNICO;
- SIKA, “*Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo*”;
- UFSP, “*Radon: Guida tecnica*”, UFFICIO FEDERALE DELLA SANITÀ PUBBLICA, SERVIZIO TECNICO E D’INFORMAZIONE SUL RADON, Berna.

Capitolo 2

REQUISITI PRESTAZIONALI

2.1. Considerazioni generali

Gli ambienti interni delle strutture interrato possono assolvere a diverse funzioni e non sono da considerarsi come unità separate rispetto agli ambienti fuori terra. In Italia l'utilizzo dei locali interrati è sempre stato relegato a funzioni di rimessaggio d'oggetti e cose di poco valore economico.

Con l'avvento della motorizzazione si è pensato di sfruttare i locali interrati per il ricovero delle vetture; in tempi più recenti, con l'aumento del costo dei terreni edificabili, l'interesse dei locali interrati è cresciuto, portando ad usufruire degli spazi interrati come unità abitative (taverne, aree ricreative, centri benessere, palestre, cinema), oppure per scopi commerciali (magazzini, centri commerciali) o per accogliere locali tecnologici (centrali termiche, impianti di condizionamento, etc.).

Nelle abitudini costruttive, gli ambienti interrati non hanno sempre avuto quell'attenzione, che dovrebbe essere attribuita a locali che sempre più debbono assolvere a precise richieste funzionali.

2.2. Requisiti di progetto

Gli ambienti interrati dovrebbero essere progettati per rispondere a delle specifiche finalità d'utilizzo e di conseguenza a determinati requisiti, i quali divengono parte integrante dei dati di progetto del sotterraneo.

Per definire la strategia di impermeabilizzazione e il tipo di sistema idonei per ogni specifico progetto, è importante considerare non solo le condizioni del terreno, ma anche i requisiti progettuali del committente: funzionalità, utilizzo futuro, durata e costi totali di proprietà.

LIVELLO DI IMPERMEABILITÀ RICHIESTO

Le norme britanniche BS 8102-2009 (Code of practice for protection of below ground structures against water from the ground) descrivono il diverso livello di impermeabilità che può essere abbinato a requisiti di protezione supplementari.

La seguente tabella classifica gli ambienti sotterranei in funzione della destinazione d'uso e specifica alcuni requisiti che in fase di progettazione dovrebbero essere considerati.

Categoria dei locali	Destinazione d'uso	Livello prestazionale
Classe 1 Utilizzo di base	<ul style="list-style-type: none"> • Parcheggi sotterranei • Locali tecnici • Officine 	Locali senza particolari finiture, senza controllo d'U.R. e temperatura, sono accettabili macchie d'umidità e leggere infiltrazioni
Classe 2 Utilizzo di base particolare	<ul style="list-style-type: none"> • Parcheggi sotterranei • Locali tecnici • Depositi • Officine 	Locali senza particolari finiture, controllo dell'U.R. e della temperatura, accettabile un po' di umidità ma non tollerabile la penetrazione d'acqua
Classe 3 Utilizzo particolare con pubblico	<ul style="list-style-type: none"> • Uffici e unità residenziali ventilati • Ristoranti e aree commerciali • Centri ricreativi 	Ambiente asciutto, locali con buon livello di rivestimento e pavimentazione, controllo dell'U.R. e della temperatura
Classe 4 Utilizzo speciale	<ul style="list-style-type: none"> • Locali residenziali • Sale computer/server • Archivi • Aree e strutture con scopi specifici 	Ambiente completamente asciutto, locali con ottimo livello di rivestimento e pavimentazione adeguati all'utilizzo, eccellente controllo dell'U.R. e della temperatura

Tabella 1: Livelli di impermeabilità (Fonte / BS 8102-2009)

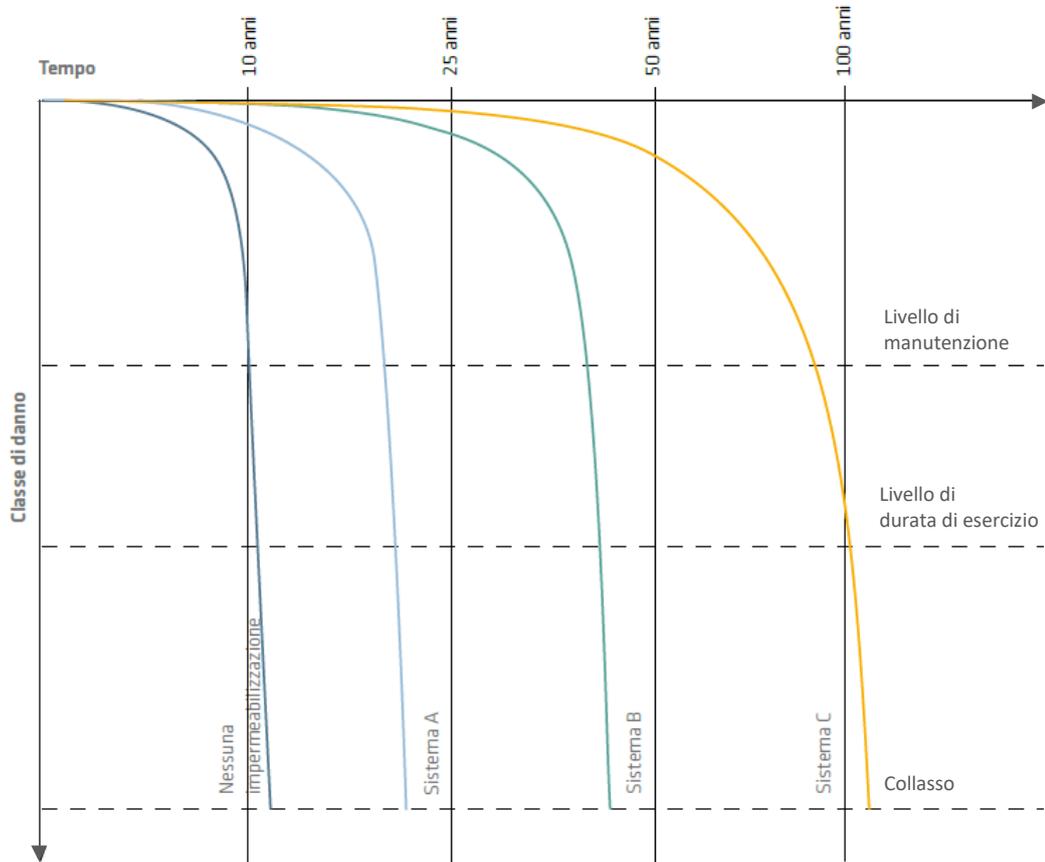
VITA UTILE/DURABILITÀ

La vita utile di ogni struttura in calcestruzzo è condizionata, oltre che da fattori ambientali e dalle condizioni di esercizio delle strutture stesse, dalla durata del sistema di impermeabilizzazione scelto.

Ai fini della durabilità, il calcestruzzo deve essere progettato secondo la normativa UNI 11104:2004 (applicazione italiana della UNI EN 206-1:2001), che definisce le classi di esposizione ambientale in base alle quali vengono prescritti i valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo: il massimo rapporto a/c, la classe di resistenza minima ed il minimo contenuto in cemento.

Impermeabilizzare non significa soltanto proteggere dall'acqua gli ambienti interrati, e quanto in essi contenuto, ma anche preservare la struttura dal degrado e garantirne la fruibilità nel tempo.

Il grafico sottostante mostra vita utile/durabilità di una struttura in funzione della qualità del sistema impermeabile.



- Nessuna impermeabilizzazione:** struttura direttamente esposta all'acqua di falda senza alcun sistema di impermeabilizzazione.
- Sistema A:** struttura protetta con un sistema di impermeabilizzazione di classe bassa.
- Sistema B:** struttura protetta con un sistema di impermeabilizzazione di classe media.
- Sistema C:** struttura protetta con un sistema di impermeabilizzazione di classe elevata.

Figura 10: Vita utile/durabilità (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo)

COSTI TOTALI A CARICO DEL COMMITTENTE

Il costo totale di proprietà (TCO) per proprietario e investitore comprende tutti i costi di costruzione per l'intera durata di esercizio della struttura, compresi l'investimento iniziale, il costo di eventuali perdite o danni agli arredi interni, alle merci, etc. a causa delle infiltrazioni di acqua, il costo delle riparazioni e della manutenzione, nonché il costo di eventuali tempi di inattività durante tali lavori.

Il grafico sottostante illustra il costo totale di proprietà per un progetto specifico (es. tipico edificio commerciale) con durata di esercizio richiesta di almeno 50 anni.

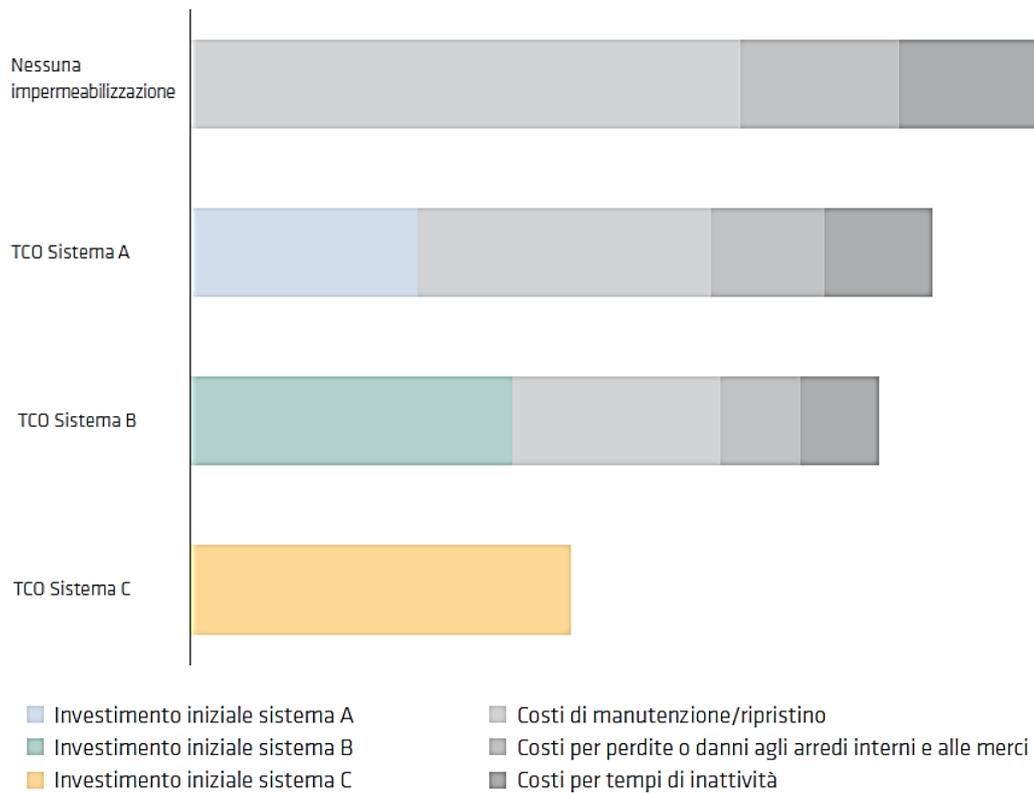


Figura 11: Costi totali di proprietà (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo)

Bibliografia essenziale

- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., *“Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione”*, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- BS 8102-2009, *“Code of practice for protection of below ground structures against water from the ground”*, BRITISH STANDARDS;
- SIKA, *“Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo”*;
- UNI EN 206-1:2006 Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
- UNI 11104:2004 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1.

Capitolo 3

METODI DI SCAVO E COSTRUZIONE

3.1. Considerazioni generali

Il tipo e la profondità di scavo e costruzione condizionano anche la scelta e l'installazione del sistema di impermeabilizzazione (ad esempio, per alcuni sistemi impermeabilizzanti applicati esternamente è necessario un adeguato spazio di lavoro). Questo aspetto deve quindi essere preso in considerazione nella fase iniziale della progettazione, al fine di pianificare scavi sufficienti ed ogni opera provvisoria necessaria.

La scelta del metodo costruttivo della struttura interrata dovrà essere fatto tenendo conto delle caratteristiche statiche della sovrastruttura (peso, proporzioni, schema statico), inoltre sono da considerare i problemi generati da possibili cedimenti e sollevamenti del terreno e dal galleggiamento dell'intera struttura per effetto della sottospinta della falda. In tal senso, in presenza di falda acquifera, anche se solo in alcuni periodi dell'anno, è necessario realizzare una struttura di fondazione chiusa, capace di contrastare la spinta dell'acqua in pressione, quindi una fondazione a platea.

L'impiego di fondazioni a plinto e travi rovesce è consentito solo in presenza di percolazioni o acquiferi sospesi e limitati, in quanto l'impermeabilizzazione di ambiti interrati necessita sempre un supporto (o confinamento) strutturale.

Tale struttura deve essere progettata al fine di resistere ai carichi idraulici orizzontali e dal basso che si sommano alle spinte dei terreni ed ai carichi verticali determinati da peso proprio e sovraccarichi.

Un solo metro di altezza d'acqua genera ben 1000 kg/m^2 e con luci libere di inflessione di almeno 5-6 metri si sviluppano momenti flettenti decisamente importanti che devono essere noti a chi sta progettando la struttura.

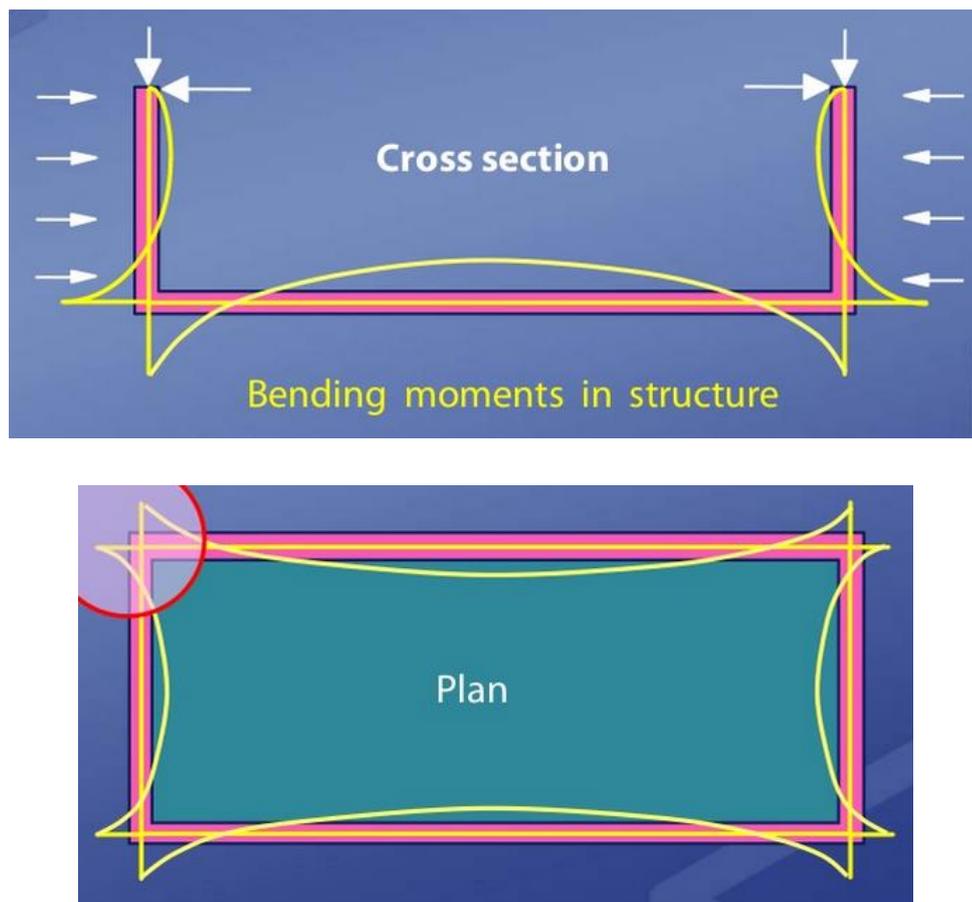


Figura 12: Diagramma dei momenti flettenti (Fonte / Simplifying design and construction, Alan Tovey)

La costruzione di una struttura lineare e modulare permette di realizzare il manufatto in tempi rapidi e con una maggiore qualità in quanto, oltre a semplificare l'approccio progettuale e realizzativo, facilita la verifica dei cedimenti e l'ubicazione dei giunti.

I maggiori problemi si riscontrano solitamente nei giunti di ripresa di getto, in quelli di lavoro (dilatazione, rotazione, traslazione) e nei dettagli dei passaggi di impianti e punti singolari della struttura. La sigillatura di questi elementi deve essere progettata in modo accurato e dipendente dalla tipologia di impermeabilizzazione selezionata.

Per strutture interrato da eseguirsi in adiacenza o in prossimità di costruzioni esistenti è necessario verificare che le deformazioni nel terreno intorno allo scavo non arrechino danni ai manufatti circostanti.

3.2. Classificazione della struttura sottoquota

Le strutture interrato, in funzione della profondità, si classificano in:

- a) struttura “superficiale”: composta da uno o due piani sotterranei, o comunque di modesta estensione in profondità;
- b) struttura “profonda”: composta generalmente da più di due piani sotterranei, o comunque estesa in profondità per un'altezza superiore a due piani.

Per l'immersione in falda si distinguono due casi:

1. completamente o parzialmente immersa nella falda in modo continuato o comunque frequente, o può esserlo in futuro, nell'arco di vita previsto per la struttura;
2. in contatto occasionalmente con acque percolanti di origine meteorica o antropica e con l'acqua naturalmente trattenuta dal terreno per capillarità.

Questa classificazione di tipo generale, permette di decidere il metodo costruttivo, i materiali ed il tipo di protezione dall'ambiente esterno più appropriati.

3.3. Metodi costruttivi per strutture sottoquota profonde

I vari metodi costruttivi possono essere classificati in tre categorie:

- 1) scavo non confinato, con scarpa laterale
- 2) metodo “bottom-up”
- 3) metodo “top-down”

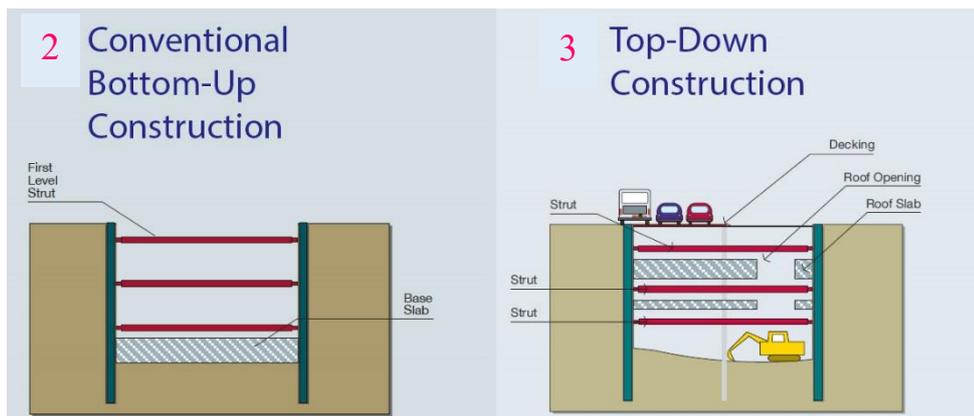


Figura 13: Metodi costruttivi (Fonte / Construction Methodology, <http://www.railsystem.net/cut-and-cover/> [02/10/2017])

Lo scavo non confinato è poco utilizzato per profondità di una certa importanza, perché comporta l'occupazione di ampie aree esterne all'impronta dell'edificio, volumi di scavo molto superiori al volume dell'opera interrata e modifiche tensionali nel terreno in grado di influenzare eventuali costruzioni adiacenti. Questo primo metodo viene quindi descritto nel successivo paragrafo, relativo alle strutture sottoquota superficiali.

In tutti i casi di scavo confinato l'opera di sostegno delle pareti perimetrali è costruita (almeno nella sua parte più profonda) prima che si esegua il corrispondente scavo, evitando quindi i volumi di scavo esterni all'opera di sostegno ed i corrispondenti successivi rinfianchi.

I tipi costruttivi impiegati per la costruzione preventiva dell'opera di sostegno possono essere diversi: paratie di pali o di micropali, diaframmi continui, palancole metalliche, strutture composte da jet grouting colonnari armati e non, combinazione di più tipi diversi. La scelta tra i tipi costruttivi è dettata dalle caratteristiche del terreno interessato, dalla presenza di edifici presso il perimetro di scavo, dall'ingombro delle macchine operatrici, oltre alle ovvie valutazioni economiche.

Nei casi in cui è prevista l'interazione permanente o frequente con la falda, la permeabilità del terreno gioca un ruolo fondamentale nella scelta del tipo costruttivo delle opere di sostegno. A loro volta il metodo costruttivo adottato e la tipologia delle opere di sostegno condizionano in generale il metodo di impermeabilizzazione: ad esempio, nel caso frequente di scavo confinato da diaframmi in calcestruzzo armato, il metodo "a sacchetto" non potrà essere applicato, a meno di affiancare ai diaframmi delle contropareti, creando così una certa ridondanza di elementi verticali.

L'opera di sostegno potrà essere considerata una struttura permanente e quindi collaborare con il resto dell'organismo strutturale, oppure potrà essere considerata puramente provvisoria. In quest'ultimo caso la stabilità a lungo termine dell'opera è garantita dalle sole strutture che vengono realizzate all'interno dello scavo.

In presenza di falda, nel caso di funzione permanente con affiancamento di controparete ed elemento d'impermeabilizzazione interposto, alla struttura di presidio dello scavo è affidato il compito di contenere, anche a lungo termine, le spinte efficaci del terreno, mentre la spinta della falda è sopportata dalla struttura scatolare interna (contropareti e platea).

3.3.1. Metodo “Bottom-up”

Secondo il metodo “bottom-up”, si procede dapprima ad eseguire le opere di sostegno perimetrali e successivamente si realizza lo scavo al loro interno, fino alla quota di imposta delle fondazioni. In seguito si realizza la struttura interna, che cresce quindi dal basso verso l’alto, da cui il nome del metodo.

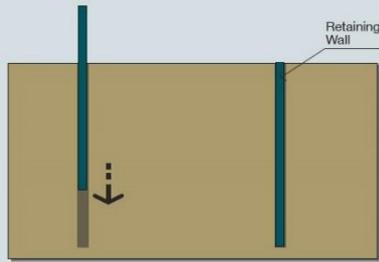
Le opere di contenimento perimetrali ed i loro vincoli provvisori debbono quindi sostenere per intero le spinte del terreno e della falda. La falda può essere depressa per tutto il periodo necessario all’esecuzione dello scavo e della nuova struttura interrata. I vincoli maggiormente impiegati sono tiranti di ancoraggio nel terreno, preferiti ai puntoni interni in quanto lasciano ampi spazi di manovra alle attrezzature di scavo ed ai mezzi di trasporto dei materiali di risulta.

Con questo metodo, non vi sono particolari problemi per la posa di un’impermeabilizzazione; il metodo più naturale risulta il sistema esterno rovescio (Aer). Nell’eventualità di una sovrastruttura preesistente, per limitare le interferenze con lo scavo, è necessario puntellare le sue fondazioni per tutta la durata dei lavori.

Di seguito sono elencate le fasi di applicazione del metodo bottom-up:

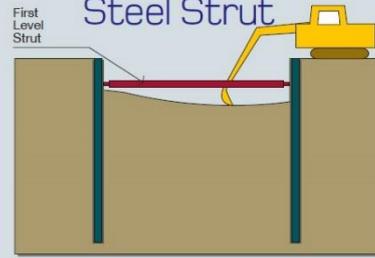
- a) esecuzione di una paratia verticale lungo il perimetro dello scavo, generalmente con trave di collegamento alla sommità;
- b) scavo all’interno della paratia fino alla quota del primo ordine di tiranti/puntoni;
- c) esecuzione dei tiranti/puntoni e delle eventuali travi orizzontali di ripartizione;
- d) messa in forza dei tiranti/puntoni;
- e) ripetizione delle fasi b), c), d), per successive fasi di scavo corrispondenti ai vari ordini di vincoli e fino al fondo;
- f) eventuale posa dell’impermeabilizzazione e realizzazione delle strutture di fondo (fossa di aggettamento, platea, etc.), previa regolarizzazione e trattamento del terreno di fondo scavo se necessario;
- g) costruzione delle strutture in spicco dalla platea e fino al piano di campagna: pilastri, solette, e pareti perimetrali, a tergo delle quali andrà via via posta l’impermeabilizzazione, se prevista;
- h) nel caso (frequente) in cui le solette costituiscono i vincoli definitivi per le opere di sostegno, dopo la maturazione di esse si procede alla rimozione dei puntoni provvisori, ed eventualmente alla disattivazione dei tiranti (non necessaria, ma opportuna per controllare fin dalla fase esecutiva il comportamento della costruzione interrata e del terreno circostante nella sua configurazione finale);
- i) realizzazione delle strutture fuori terra.

01. Installation of Retaining Wall



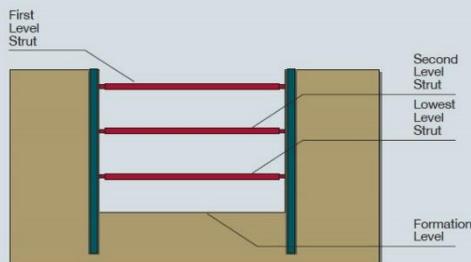
The underground retaining wall is installed before excavation commences. The retaining wall can be a concrete diaphragm wall, a concrete bored pile wall or a steel sheet pile wall; depending on the site condition, soil type and the excavation depth.

02. Excavation & Installation of Steel Strut



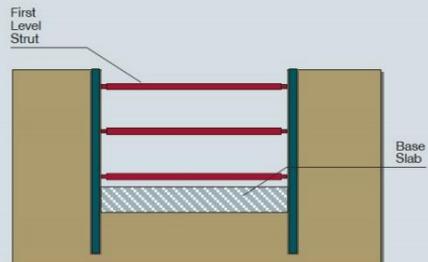
The soil is excavated to the first strut level. The first level strut is installed before the excavation proceeds further.

03. Excavation & Installation of Steel Strut



The soil is excavated to the next strut level and the second level strut is installed. It continues till the excavation reaches the final depth or formation level. The number of strut levels depends on the excavation depth.

04. Construction of Underground Structure



At formation level, the reinforced concrete slab or base slab is constructed, followed by the removal of the lowest level strut and the side walls are constructed.

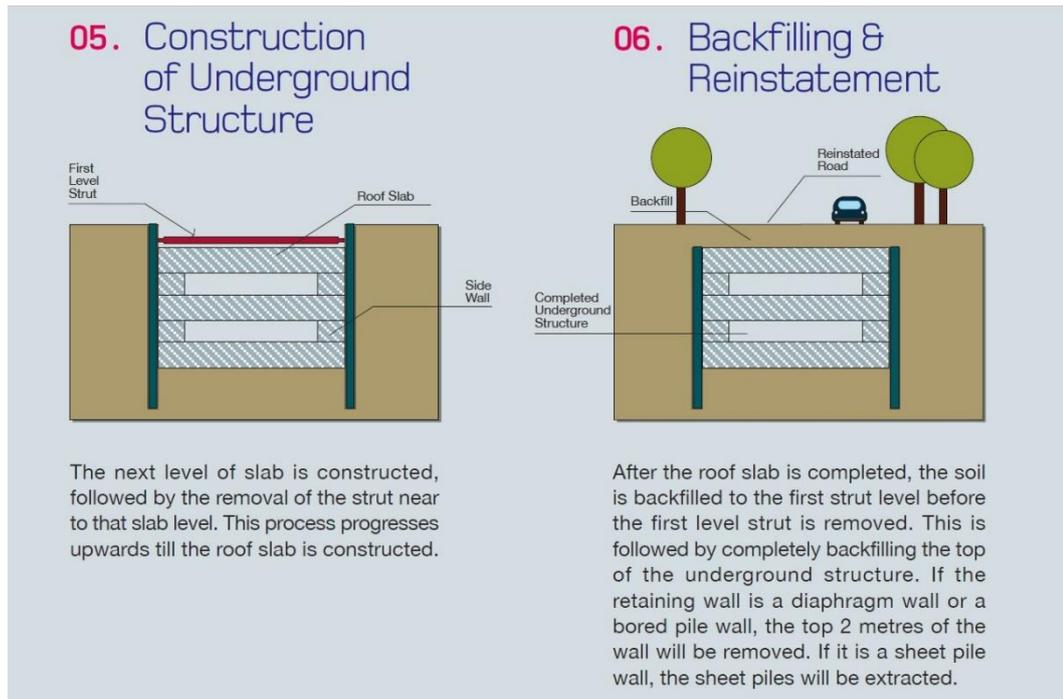


Figura 14: Metodo Bottom-up (Fonte / Construction Methodology, <http://www.railsystem.net/cut-and-cover/> [02/10/2017])

3.3.2. Metodo “Top-down”

Secondo tale metodo, si procede ad eseguire le opere di sostegno perimetrali e si realizzano quindi le strutture interne man mano che si scava, cominciando dalle strutture a piano campagna (soletta di copertura) e procedendo nella costruzione verso il basso, fino alla platea di fondo.

Gli elementi orizzontali della struttura definitiva (o parte di essi) costituiscono quindi i vincoli temporanei e definitivi per le opere di sostegno perimetrali. Nel caso più generale le solette dei diversi piani interrati non possono sostenere il loro peso proprio su luci corrispondenti alla distanza tra i lati opposti dello scavo ed occorre quindi preconstituire i pilastri intermedi ai quali appoggiarle: si ricorre a tecniche particolari di fondazioni profonde (pali o elementi di diaframma) nelle quali la parte che corrisponde all'altezza di scavo assume la forma regolare e le tolleranze proprie dei pilastri in c.a. o in acciaio.

Nel caso si debba prevedere un'impermeabilizzazione ed un contromuro, l'appoggio delle solette sull'opera di sostegno perimetrale può essere risolto in due modi diversi per assicurare la necessaria continuità dell'impermeabilizzazione:

- a) le solette sono eseguite assieme al contromuro e ad esso “appese”; il contromuro risulta in trazione (oppure viene precompresso) e si scarica su una robusta trave di collegamento che lo solidarizza alla sommità dell'opera di sostegno;
- b) le solette si appoggiano al diaframma tramite nicchie orizzontali in esso ricavate, lungo le quali risvolta anche l'impermeabilizzazione.

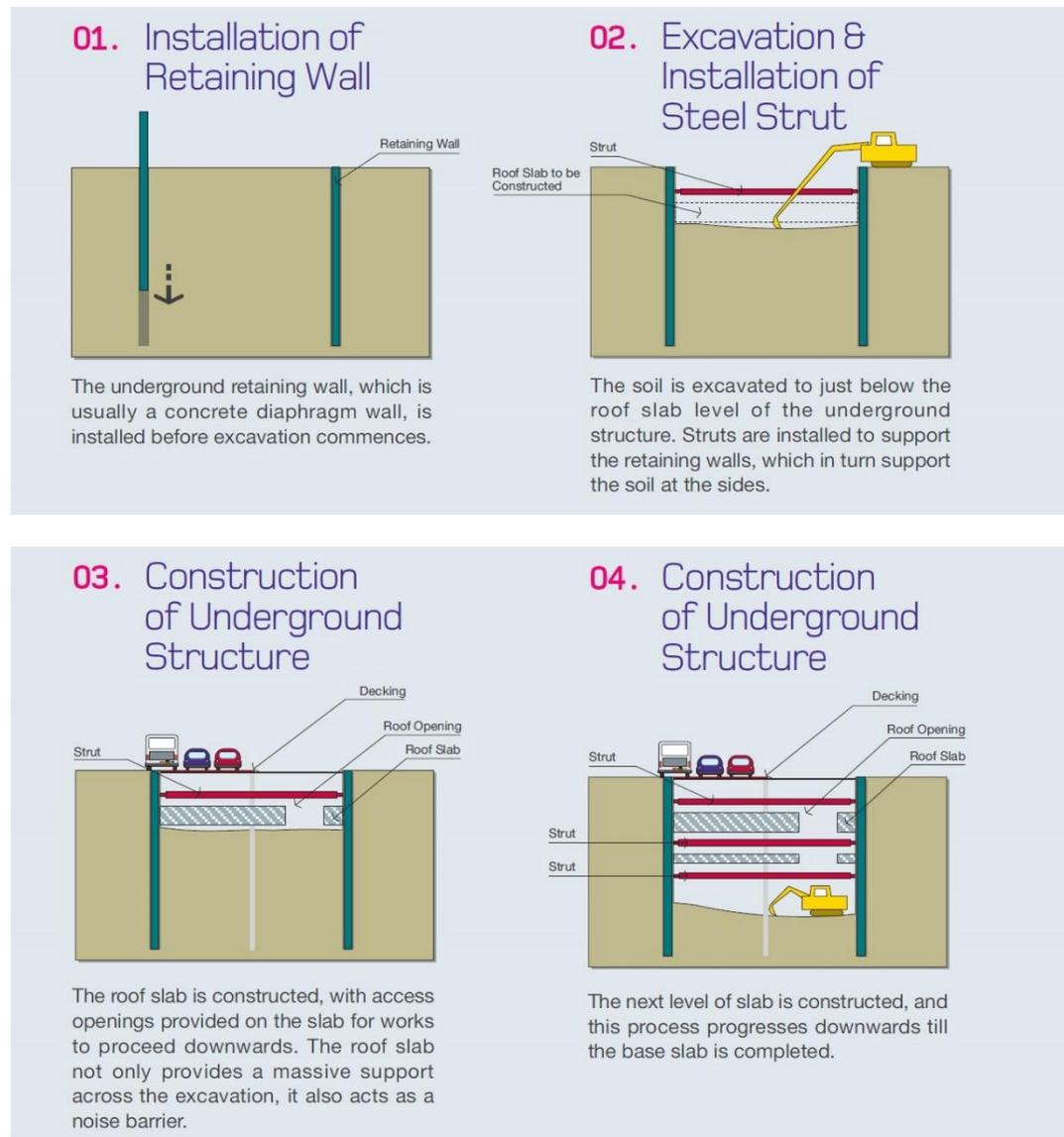
In entrambi i casi l'impermeabilizzazione deve essere anch'essa posta in opera dall'alto verso il basso.

Nell'eventualità di una sovrastruttura preesistente, per limitare le interferenze con lo scavo, è necessario puntellare le sue fondazioni per tutta la durata dei lavori, ricorrendo ad elementi simili a quelli adottati per le solette della nuova opera.

Una possibile sequenza costruttiva è la seguente:

- a) esecuzione di una paratia lungo il perimetro di scavo, esecuzione di una trave di collegamento in sommità;
- b) esecuzione degli elementi verticali necessari al sostegno delle solette;
- c) esecuzione della soletta di copertura del sotterraneo con funzione anche di puntone alla sommità delle opere di sostegno perimetrali; in essa viene lasciato il varco per il passaggio dei mezzi di cantiere che provvedono all'allontanamento del materiale di risulta ed all'alimentazione dei materiali di costruzione. Nel getto vengono predisposte le armature di chiamata per le strutture verticali sottostanti. In particolare, nel caso di contromuro con impermeabilizzazione interposta, dalla trave di collegamento in sommità

- pendono le barre di trazione che assicurano il sostegno delle solette sottostanti e dei tratti di contromuro via via eseguiti, che non possono essere appoggiati sul fondo dello scavo parziale e non è conveniente solidarizzare all'opera di sostegno esterna, attraversando l'impermeabilizzazione;
- d) scavo al di sotto della soletta di copertura, generalmente per l'altezza di un piano;
 - e) realizzazione della nuova soletta, con modalità analoghe alla precedente;
 - f) esecuzione delle pareti perimetrali in sottomurazione, eventuale completamento degli elementi verticali interni, conferendo loro la forma dei pilastri definitivi;
 - g) ripetizione del ciclo d), e), f) per tutti i piani del sotterraneo;
 - h) a partire dalla fase c), parallelamente all'esecuzione dell'opera interrata si può procedere alla realizzazione delle strutture fuori terra.



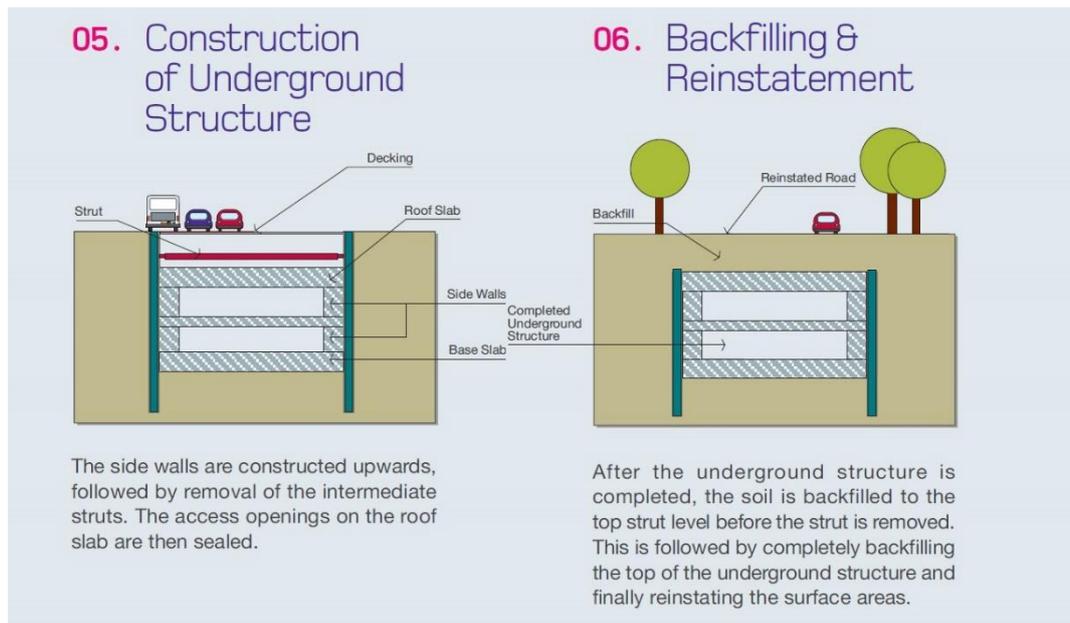


Figura 15: Metodo Top-down (Fonte / Construction Methodology, <http://www.railsystem.net/cut-and-cover/> [02/10/2017])

3.4. Metodi costruttivi per strutture sottoquota superficiali

Essendo la profondità delle strutture modesta, il metodo costruttivo non è influenzato tanto dalle caratteristiche statiche, ma piuttosto dalle condizioni dell'ambiente esterno e dai requisiti richiesti per l'ambiente interno.

Le strutture potranno essere realizzate in generale in muratura o calcestruzzo armato:

- 1) entro uno scavo non confinato; secondo le caratteristiche richieste per l'ambiente interno e la presenza di un battente idrostatico potrà essere o meno richiesta una platea di fondo e un sistema di impermeabilizzazione o di drenaggio; il metodo costruttivo è descritto qui di seguito;
- 2) entro uno scavo armato con palancole, in presenza di un battente idrostatico permanente: il metodo costruttivo è una semplificazione del metodo bottom-up presentato, una volta realizzate le strutture permanenti gli elementi metallici di presidio delle pareti di scavo vengono rimossi.



Figura 16: Scavo non confinato (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo)

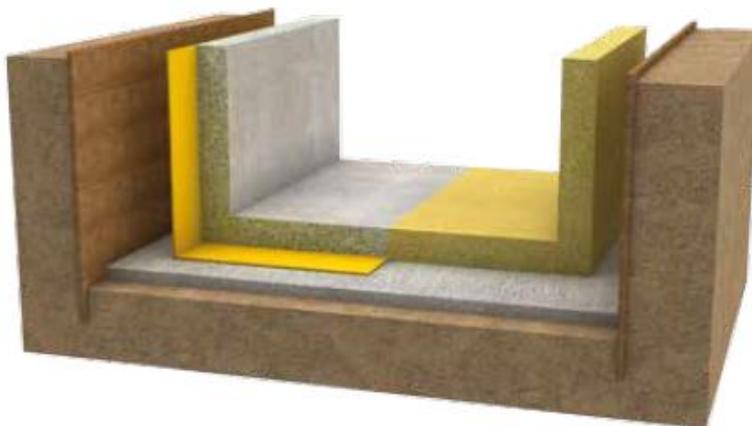


Figura 17: Scavo non confinato con palancole (Fonte / Sika, Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo)

3.4.1. Costruzione entro scavo non confinato

Tale metodo si applica nelle condizioni più favorevoli, ovvero sostanzialmente in mancanza di particolari vincoli imposti dall'ambiente circostante, e per strutture superficiali.

Per la realizzazione della struttura interrata si procede nel modo seguente:

- a) sbancamento generale fino alla quota di posa della platea di fondo;
- b) trattamenti del piano di posa - regolarizzazione, compattazione, bonifica etc.;
- c) getto del magrone di sottofondazione;
- d) eventuale posa dell'impermeabilizzazione sul fondo;
- e) realizzazione delle strutture fino al disopra della quota del terreno naturale;
- f) eventuale posa dell'impermeabilizzazione lungo le pareti contoterra;
- g) ripristino del terreno attorno alla struttura.

Le condizioni da verificare prima dello scavo di sbancamento generale sono:

- assenza di vincoli lungo il perimetro; lo scavo sarà più esteso in pianta rispetto all'impronta dell'edificio, per consentire il passaggio all'esterno dei muri perimetrali, questo metodo basilare di scavo con scarpa laterale consente un metodo costruttivo dal basso verso l'alto, senza restrizioni nella scelta del sistema impermeabile. La presenza di vincoli lungo il perimetro potrà richiedere la realizzazione di strutture di presidio locali (paratie, diaframmi, berlinesi, muri di contenimento, etc.);
- possibilità di abbattere la falda in modo permanente nelle fasi da a) ad f) fino ad una quota inferiore al piano di fondo scavo.

Si rimanda ai successivi paragrafi la trattazione delle opere provvisorie e le problematiche di contenimento della falda e di stabilità delle pareti dello scavo.

3.5. Considerazioni sui metodi illustrati

I tre metodi illustrati presentano ciascuno limitazioni di applicazione e vantaggi. Questi sono brevemente raccolti nella seguente tabella.

Termine di raffronto	Scavo non confinato	BOTTOM-UP	TOP-DOWN
situazione al contorno dell'area di scavo	necessario spazio attorno al perimetro di scavo per consentire passaggio e scavi a scarpata	lo scavo si può spingere al limite dell'area disponibile	lo scavo si può spingere al limite dell'area fuori del perimetro disponibile
interferenze nel terreno circostante lo scavo	possibile interferenza con le strutture dei sottoservizi	possibile interferenza dei tiranti con strutture interrato circostanti	nessuna interferenza al di fuori dell'area di scavo
strutture preesistenti	non ci possono essere	possono esistere, di norma con fondazioni all'esterno del perimetro di scavo	possono esistere, anche con fondazioni all'interno del perimetro di scavo
attività al piano campagna	nessuna attività possibile fino al completamento del sotterraneo	nessuna attività possibile fino al completamento del sotterraneo	possibile l'esecuzione di attività dopo il completamento della soletta a quota terreno
strutture perimetrali	le pareti del sotterraneo vengono realizzate come normali pareti in c.a.	le pareti del sotterraneo sono costituite dalle paratie, spesso affiancate da un contromuro	le pareti del sotterraneo sono costituite dalle paratie, spesso affiancate da un contromuro
profondità del sotterraneo	limitata dall'estensione delle scarpate laterali	nessuna limitazione	nessuna limitazione
interferenza con la falda in fase di scavo, in terreni permeabili	limiti imposti dalla necessità di abbattere la falda su un'area più vasta del sotterraneo	limiti imposti solo dalla tecnica di abbassamento o contenimento della falda (well points, tampone, ecc.)	limiti imposti solo dalla tecnica di abbassamento o contenimento della falda (well points, tampone, ecc.)
protezione della struttura dalla falda	massima libertà di scelta	scelte condizionate dal tipo di paratie, dalla presenza o meno delle contropareti, ecc.	complessità della posa dell'impermeabilizzazione in corrispondenza delle solette

Tabella 2: Confronto tra metodi di scavo (Fonte / Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002)

3.6. Tecnologie costruttive

Nel presente paragrafo si descrivono sinteticamente le opere, interamente provvisorie o in tutto o in parte definitive, destinate alla realizzazione di strutture sottoquota e specificatamente finalizzate alla costruzione delle stesse, nelle condizioni imposte dall'ambiente circostante.

Per consentire l'edificazione delle strutture all'interno dello scavo, è necessario molte volte realizzare delle opere provvisorie per il contenimento del terreno o al fine di abbattere la piezometrica della falda. Spesso le opere provvisorie vengono incorporate interamente o in parte nella struttura definitiva.

In funzione della presenza di un acquifero profondo e della necessità di allontanamento delle acque meteoriche, si devono considerare tecnologie realizzative dei sistemi di depressione della falda o, in alternativa, opere di impermeabilizzazione profonda per costituire tamponi di fondo.

Queste ultime strutture provvisorie hanno lo scopo di ridurre drasticamente la portata delle acque filtranti dall'esterno, creando barriere a minor permeabilità rispetto al terreno naturale. In condizioni stratigrafiche favorevoli, la loro funzione può essere sostituita dalla presenza di strati di bassa permeabilità a profondità opportuna.

Questo paragrafo si articola in due parti:

- la prima relativa alla descrizione delle opere provvisorie strutturali destinate al contenimento del terreno;
- la seconda relativa alle opere di esclusione o depressione della falda.

3.6.1. Contenimento del terreno

Nella progettazione di opere interrato, dopo la necessaria caratterizzazione geotecnica dei terreni in cui si andrà ad edificare, si devono prevedere sistemi idonei ad assicurare la stabilità dei fronti di scavo e la limitazione delle deformazioni.

Una prima suddivisione delle tecnologie si può quindi riferire al metodo costruttivo:

- scavo non confinato;
- bottom-up;
- top-down.

Per gli ultimi due metodi le tecniche per la realizzazione delle pareti laterali sono le stesse, mentre la realizzazione dei vincoli che contribuiscono alla stabilità delle pareti sono diversi: tiranti o puntelli provvisori nel metodo bottom-up, le stesse strutture orizzontali definitive della costruzione nel metodo top-down.

Scavo non confinato

Lo scavo non confinato, ovvero lo sbancamento generale dell'area di edificazione, che scarpate laterali di pendenza adeguata, è la metodologia più semplice ed economica per la realizzazione di strutture sottoquota e sfrutta la resistenza del terreno (in genere il suo angolo di attrito interno) ai fini della stabilità delle pareti dello scavo.

In caso di presenza di falda o di precipitazioni atmosferiche bisogna conoscere, oltre all'angolo di attrito interno, anche le caratteristiche di permeabilità del terreno, per valutare la sua capacità di assorbimento naturale e le portate da esaurire. Le precipitazioni atmosferiche possono generare fenomeni di erosione delle scarpate che hanno influenza diretta sul risultato finale non essendo ostacolati da alcuna vegetazione, come nei pendii naturali.

Il limite di questo sistema sono le problematiche che insorgono a causa dei volumi aggiuntivi richiesti, che aumentano più che proporzionalmente in funzione della profondità dello scavo, spazi di rispetto in superficie nei riguardi dei sovraccarichi permanenti limitrofi e spazi aggiuntivi in profondità per l'agibilità delle attrezzature per la costruzione dell'opera interrata.

In caso si costruisca in prossimità di edificazioni o infrastrutture (strade, canali, fognature) si deve considerare, oltre al sovraccarico che esse comportano, l'esigenza di limitare le deformazioni del terreno su cui sono posate, per non compromettere la loro integrità strutturale e la loro funzionalità.



Figura 18: Scavo di sbancamento (Fonte / <http://carblat.ru/scavi-di-sbancamento/> [06/10/2017])

Paratie di pali

Il contenimento dei terreni può essere effettuato utilizzando serie di pali infissi, o più spesso trivellati, preventivamente allo scavo. I pali sono in genere accostati, ma si possono usare tecniche per ottenere pali secanti.

Diversi possono essere i diametri di palo utilizzabili e le tecniche di esecuzione in funzione delle caratteristiche del terreno e della profondità da raggiungere. A tal fine si sceglie l'interasse in modo da prevenire smottamenti di terreno nello spazio che rimane fra palo e palo. In presenza di falda acquifera, costante o temporanea, possono generarsi problemi di stabilità locale che comportano il rischio di franamento del terreno tra i pali, con conseguenti possibili cedimenti in superficie.

Date le limitate capacità flessionali dei pali, per raggiungere profondità di scavo elevate e per contenere le deformazioni del terreno all'esterno della parete, si ricorre in genere a sistemi di puntelli o tiranti.

Ai fini dei costi la paratia di pali si compara con i diaframmi continui. In genere la prima è più economica nei terreni coesivi, nei quali si possono trivellare pali di diametro anche notevole (oltre 1 m) senza necessità di sostenere le pareti del perforo con rivestimenti metallici o fanghi bentonitici.



Figura 19: Paratia di pali trivellati (Fonte / Bertoia Costruzioni, <http://www.bertoia.it/lavorazioni/pali-trivellati-per-fondazioni-e-consolidamento-terreni/>, [20/09/2017])

Paratia di micropali o “Berlinese”

La paratia “Berlinese” è realizzata dall'accostamento di micropali, (il termine impropriamente impiegato in Italia, definirebbe in realtà delle paratie costituite da profilati metallici ad H infissi, fra i quali vengono inserite tavole di legno per realizzare un paramento continuo).

Concettualmente è analoga alla palificata, ma i pali hanno piccolo diametro (micropali) e sono costituiti da tubi in acciaio iniettati sia all'interno che al contatto palo-terreno con pasta o malta fluida di cemento.

A causa della limitata resistenza flessionale di questa struttura si rende necessario un sistema di tiranti, anche per scavi di profondità modesta. Esso è realizzato collegando tutti i pali tra loro con una trave di ripartizione, solitamente composta da profilati di acciaio, alla quale sono ancorati i tiranti, composti da gruppi di trefoli di acciaio armonico, ancorati al terreno mediante iniezioni di miscele di cemento e quindi pretesi prima di procedere con l'approfondimento dello scavo.

Il ricorso ai tiranti introduce due problematiche:

- la complessità tecnologia propria dei tiranti, specie se questi debbono assumere carattere permanente oppure se la testa viene a trovarsi sotto la quota di falda;
- possibili problemi di carattere giuridico in merito alla presenza dei bulbi di ancoraggio dei tiranti sotto edifici limitrofi o comunque in profondità nei terreni di proprietà circostanti che, se non concordata preventivamente e formalizzata in atti, può ritenersi abusiva.

Per le costruzioni che comportano profondi scavi in pendio, nelle quali non è possibile contrastare la parete di monte contro la parete di valle tramite le strutture orizzontali definitive a causa delle altezze molto diverse, il ricorso a tiranti permanenti può essere obbligato.



Figura 20: Berlinese di micropali (Fonte / Negropal, <http://www.negropal.com/servizi/berlinesi-di-micropali-e-protezione-scavi/>, [20/09/2017])

Jet grouting colonnare

La realizzazione di palificate trivellate ha trovato nuove possibilità tecnologiche sostituendo la tradizionale trivellazione del palo con la miscelazione al terreno in posto di una sospensione acqua/cemento.

La colonna jet è in pratica un palo di calcestruzzo, che viene realizzato in situ senza asportare il terreno, ma miscelando il terreno stesso (che nell'impasto funge da aggregato) con pasta fluida di cemento (legante).

Per la realizzazione del jet grouting si procede alla trivellazione del terreno con un foro di piccolo diametro, prodotto con l'introduzione di aste cave, e alla successiva iniezione di miscela di cemento ed acqua a elevatissima pressione (fino a oltre 400 bar). Si genera così un getto ad alta velocità che erode il terreno e lo mescola al legante, con il risultato finale di una colonna cilindrica.

L'efficacia dell'azione erosiva può essere aumentata inviando un getto d'aria tramite un ugello coassiale a quello di iniezione della sospensione cementata, con la funzione di isolare il getto liquido dalla miscela di terreno rimescolato e legante fluido che si trova al suo intorno, aumentando l'energia residua con cui colpisce il terreno da erodere.

Per contro, le proprietà meccaniche del "calcestruzzo" realizzato in situ sono mediocri e sono influenzate dalla composizione e dalla granulometria del terreno; tipicamente i pali jet danno risultati assai scadenti in terreni limosi e sono spesso irrealizzabili in argille, specie se compatte.

Le colonne possono essere dotate di un'armatura costituita da un tubo di acciaio, che può essere installato semplicemente tuffandolo nella colonna fresca appena eseguita, oppure inserendolo e sigillandolo con malta cementizia in una perforazione secondaria, eseguita a colonna maturata.

Le pareti di sostegno eseguite con la tecnica del jet grouting possono quindi avere una resistenza flessionale, anche se minore (a parità di sezione) rispetto ai pali o ai diaframmi in c.a. Esse possono tuttavia essere eseguite anche in file multiple compenstrate, dando luogo ad un muro a gravità.

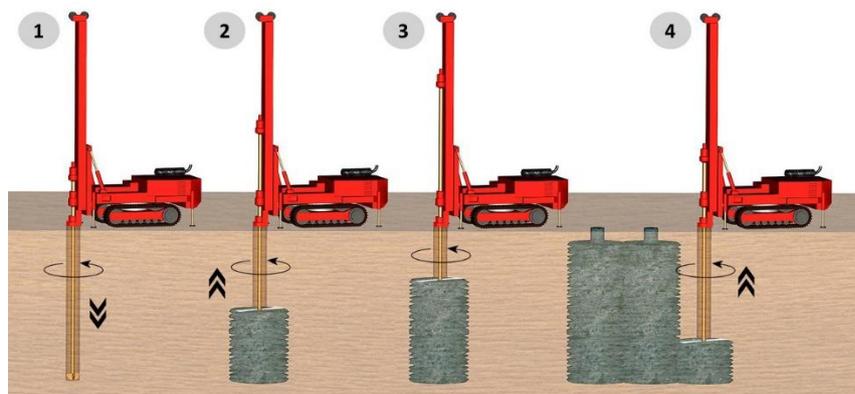


Figura 21: Fasi realizzative del Jet grouting (Fonte / <http://www.railsystem.net/jet-grouting/>, [02/10/2017])

Palancolate

L'opera di sostegno può essere ottenuta anche con la posa di palancole metalliche, infisse nel terreno a percussione o per vibrazione. Le palancole sono elementi metallici profilati di sagoma opportuna, con gargami ai bordi laterali (gargame = doppia maschiatura tra due elementi contigui di palancola), che vengono infissi uno accanto all'altro, con i gargami che si incernierano uno nell'altro, in modo da formare una parete continua metallica avente una notevole resistenza alla flessione e quindi adatta al contenimento delle pareti di scavo.

La tenuta idraulica delle pareti così armate è senz'altro imperfetta, sia perché il giunto fra pannelli non è stagno, sia perché esso può risultare addirittura aperto in profondità per deviazioni dell'infissione in terreni eterogenei.

Per le oggettive difficoltà di infissione in terreni a granulometria varia, è più frequente l'uso di palancolate in terreni sabbiosi e soprattutto in limosi e argillosi di consistenza non troppo elevata. La tecnologia si presta ad essere applicata direttamente in acqua e quindi ne è frequentissimo l'uso in opere marittime.

L'infissione degli elementi può comportare disturbo per rumore e vibrazioni negli eventuali edifici limitrofi. Per il raggiungimento di altezze di scavo importanti, inoltre, è frequente il ricorso a sistemi di tiranti o puntelli come per le paratie di micropali.



Figura 22: Palancolate metalliche (Fonte / ELTO, https://www.elto.it/site/palancole_acciaio_gallery.php, [03/10/2017])

Diaframmi continui

Un diaframma è una struttura gettata in opera o prefabbricata che viene collocata all'interno del terreno, prima dello scavo, per garantirne la stabilità nelle successive fasi di scavo. Un diaframma continuo viene realizzato accostando “pannelli” di diaframma a sezione rettangolare.

Le dimensioni standard di questi “pannelli” sono 2500÷3300mm x 600÷1200mm con profondità che normalmente superano i 10 metri, arrivando anche oltre i 30÷40 metri.

Anche i diaframmi si possono tirantare, sia per contenere le sollecitazioni nel pannello e garantire la stabilità della parete, sia per contenere le sue deformazioni orizzontali.

I diaframmi sono normalmente realizzati con meccaniche provviste di frese che, calate nel terreno attraverso dei cordoli guida in calcestruzzo, realizzati preliminarmente, scavano una sezione verticale; per evitare crolli delle pareti di scavo, si riempie lo stesso con fango bentonitico.

La costruzione dei diaframmi si pratica in genere a pannelli alterni, primari e secondari, ma pur avendo introdotto metodologie di affiancamento guidato e di immorsamento meccanico tra “pannelli” successivi, rimangono aperte per i diaframmi le medesime problematiche idrauliche che si sono tratteggiate per le palancolate: tenuta idraulica dei giunti e continuità della parte inferiore. Resta in ogni caso il vantaggio di un numero di giunti assai minore, a parità di sviluppo della parete.

Nel confronto con la paratia di pali si osserva che la resistenza flessionale offerta dalla sezione rettangolare è superiore, a parità di materiali impiegati, rispetto a quella raggiungibile con le sezioni circolari dei pali.

Il getto avviene, come per i pali trivellati, previa posa delle gabbie di armatura, tramite un tubo-getto a fondo foro che, sfruttando il diverso peso specifico tra fango bentonitico e calcestruzzo, sostituisce il fango a partire dal fondo. Smottamenti di terreno causati da urti nella posa delle gabbie o variazioni di falda durante il getto possono causare discontinuità per intrusione di terra all'interno dei “pannelli”.

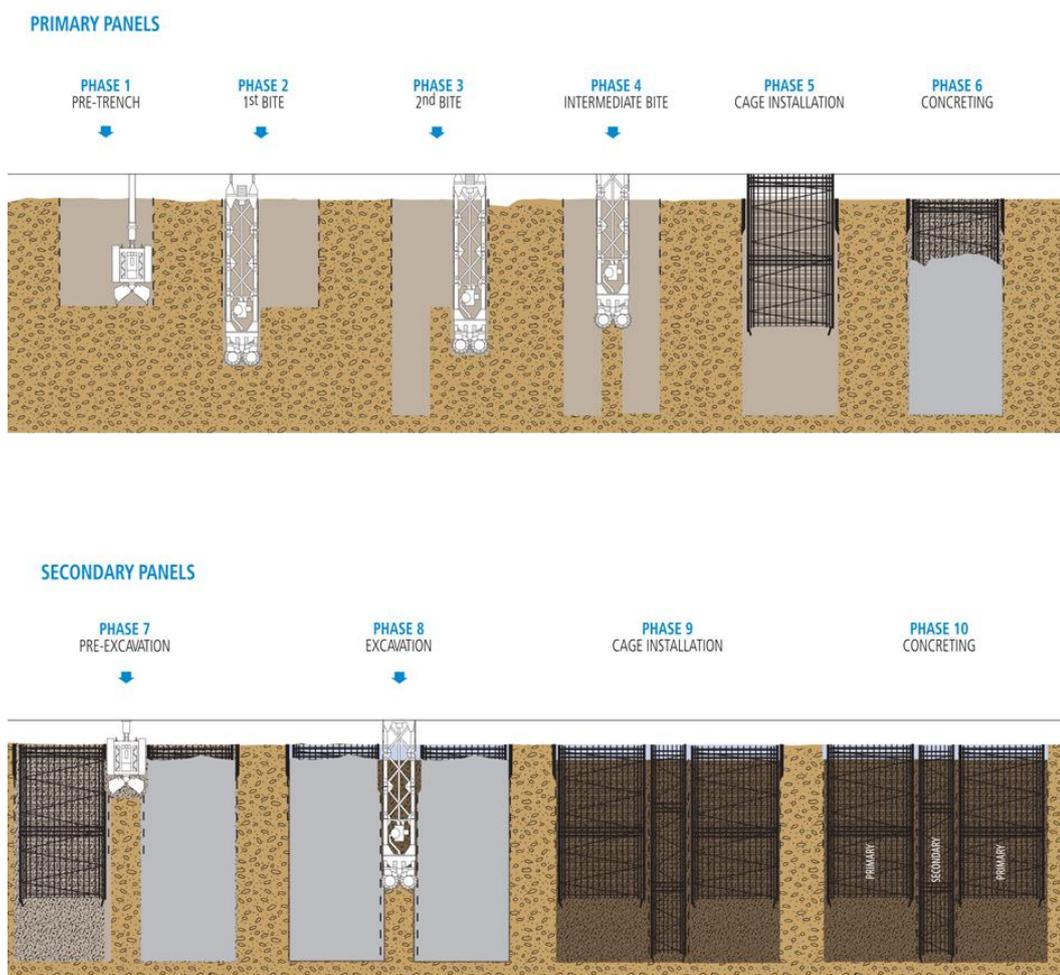


Figura 23: Fasi realizzative diaframmi (Fonte / TREVI, <http://www.trevispa.com/en/Technologies/diaphragm-walls-hydromill>, [03/10/2017])

3.6.2. Esclusione o depressione della falda

In stretta correlazione con le opere provvisorie necessarie per la realizzazione degli scavi, si devono considerare le operazioni di allontanamento delle acque dal fondo scavo, sia quelle di provenienza meteorica sia, soprattutto, quelle di falda.

Per le acque meteoriche sarà sufficiente predisporre canalette laterali al magrone di fondo connesse con pozzetti e pompe ad innesco automatico per garantire l'esecuzione all'asciutto delle operazioni successive.

Per le acque di falda dovranno essere predisposte in alternativa opere di impermeabilizzazione del fondo scavo (tamponi di fondo), oppure di depressione della piezometrica della falda al di sotto di esso. La scelta avviene in fase di progettazione sulla base delle risultanze dell'indagine geotecnica ed idrogeologica.

È importante che, qualunque sia la portata da emungere, le attrezzature di emungimento comprendano i filtri necessari per evitare il trasporto in sospensione delle particelle più fini del terreno.

Poiché i mezzi di emungimento possono avere una efficienza decrescente nel tempo, è opportuno corredare il sistema con piezometri che consentano di mantenere sotto controllo il risultato raggiunto e di programmare ed eseguire tempestivamente le necessarie operazioni di lavaggio e spurgo dei pozzi.

Tamponi di fondo

A completamento della chiusura idraulica laterale realizzata con diaframmi o palancole, si ricorre a "tappi di fondo" realizzati con accostamento di corte colonne jet grouting o con iniezione di miscele cementizie a bassa pressione.

La prima metodologia è analoga al jet grouting colonnare con la differenza che si tende a realizzare colonne del massimo diametro possibile, senza che occorra raggiungere elevate resistenze. Le colonne vengono disposte con uno schema a configurazione a maglie triangolari in modo da coprire l'intera estensione del fondo scavo.

La seconda metodologia consiste nell'idro-fratturazione controllata del terreno mediante miscele cementizie, iniettate a pressioni adeguate attraverso tubi valvolati, installati entro fori di diametro ridotto (120÷150 mm). La miscela si diffonde nel terreno lungo i piani di fratturazione, che finiscono per formare una struttura spaziale tridimensionale.

Tali metodi abbattano sostanzialmente la portata d'acqua che filtra dall'esterno, senza peraltro garantire l'impermeabilità completa. Bisogna ricordare però che l'effetto di queste opere sulla distribuzione delle sottopressioni è solo temporaneo: la realizzazione all'interno del manufatto impermeabilizzato comporterà entro breve tempo la ricostituzione della pressione di falda originarie sul contorno

impermeabile della nuova struttura, che quindi dovrà essere progettata per sostenere l'intera spinta idraulica.

Entrambi i tipi, ma più spiccatamente il tampone di jet grouting, producono anche un consolidamento del terreno trattato e quindi preconstituiscono anche un vincolo orizzontale al di sotto del fondo scavo, la cui azione è mobilitata fin dalle prime fasi dello scavo e quindi risulta particolarmente favorevole per limitare le deformazioni della parte profonda dell'opera di sostegno perimetrale. Il metodo delle iniezioni comporta una rigidità minore, ma con il vantaggio di una presollecitazione del puntone per le pressioni residue di iniezione che permangono nel terreno.

Depressione della falda mediante pozzi

Predisponendo un sistema di pozzi con pompe immerse ad adescamento automatico si può operare in terreni permeabili per abbassare la superficie piezometrica della falda.

Il metodo non ha limiti di profondità; è idoneo per terreni di permeabilità medio-alta. Per evitare l'interruzione dell'azione dei pozzi per eventuali interruzioni dell'alimentazione di energia elettrica dalla rete, occorre prevedere un gruppo di emergenza.

È importante che il pozzo subisca una fase iniziale di “sviluppo” consistente in operazioni di emungimento violento, alternate a fasi di immissione, allo scopo di asportare le frazioni fini di una ristretta zona di terreno circostante il filtro del pozzo e di rimuoverle dal dreno in ghiaio calibrato che viene posto in opera nello spazio anulare tra il filtro ed il terreno.

In assenza di tali operazioni l'efficienza del pozzo può venir fortemente ridotta da cadenti idrauliche molto elevate sia all'interno del dreno, sia nel terreno circostante il pozzo, che può gradualmente intasarsi.

L'interesse tra i pozzi varia in funzione della permeabilità del terreno da pochi metri a 15÷20 m; il diametro è funzione della portata da emungere, che lo condiziona sia perché è opportuno limitare la velocità di ingresso, sia perché la dimensione della pompa sommersa da installare nel pozzo è ovviamente funzione della stessa portata.

Si deve considerare il massimo livello di falda raggiungibile durante i lavori, maggiorato di un coefficiente di sicurezza che consideri la probabilità di eventi meteorici nel bacino di invaso del cantiere. In funzione della stratigrafia dello specifico sito, può risultare conveniente approfondire la cinturazione perimetrale oltre il limite necessario per le esigenze statiche, allo scopo di limitare le portate di aggotamento e gli effetti all'esterno, installando pozzi con i tratti filtranti compresi entro la profondità della cinturazione.

Un particolare molto importante è anche quello dello smantellamento del sistema di emungimento, che deve prevedersi solo dopo aver realizzato la struttura, impermeabilizzata o meno, in misura tale da garantire che la stessa sia in grado di equilibrare con il proprio peso la sottospinta della falda.

Depressione della falda mediante well-point

I well-point sono pozzi di piccolo diametro attraverso i quali l'acqua è aspirata grazie alla depressione provocata da pompe a vuoto esterne ai pozzi stessi.

Il sistema comprende:

- pompa autoadescante ad alto grado di vuoto, elettrica o diesel, in grado di aspirare l'acqua fino a prevalenze elevate;
- collettore di aspirazione (raccordi flessibili) usato per collegare i well-point alla pompa;
- punte aspiranti (well-point), caratterizzate da una serie di filtri metallici (o di materiale plastico) per aggotare l'acqua senza asportare particelle solide dal terreno;
- tubazione di scarico per allontanare l'acqua aspirata dallo scavo.

Nel caso l'acqua debba essere condotta a distanze notevoli dallo scavo, dovranno essere impiegate delle pompe supplementari di "rilancio".

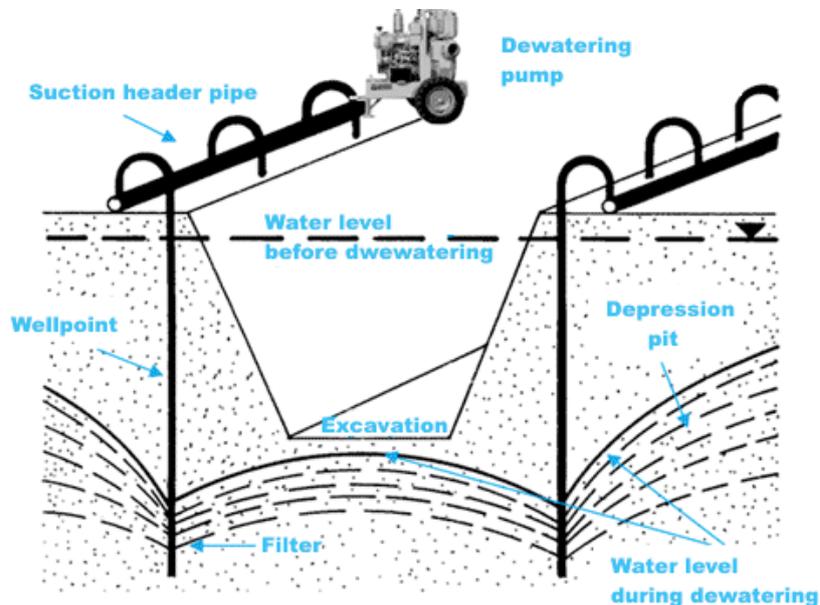


Figura 24: Sistema well-point (Fonte / KLAUDIA, http://www.en.klaudia.eu/wellpoints-wellpoints_application.html, [08/10/2017])

Il sistema è idoneo per abbassamenti di 6÷7 m; per abbassamenti maggiori si ricorre all'installazione di più sistemi successivamente a quote di scavo intermedie. È adatto per terreni di permeabilità non molto elevata (sabbie, anche limose, sabbie e ghiaie) e limita l'ampiezza dello spazio esterno nel quale si risente la depressione della falda.

Bibliografia

- BIG MAT, “*Impermeabilizzazione*”, QUADERNO TECNICO, n° 5;
- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., “*Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione*”, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- RAILSYSYSTEM, Construction Methodology, <http://www.railsystem.net/cut-and-cover/> [02/10/2017];
- SIKA, “*Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo*”;
- TOVEY ALAN, “*Simplifying design and construction*”;
- UNI EN 206-1:2006 Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
- UNI 11104:2004 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1

Capitolo 4**SISTEMI DI IMPERMEABILIZZAZIONE****4.1. Considerazioni generali**

Il presente capitolo è interamente dedicato alla descrizione dei principali sistemi di impermeabilizzazione, i quali possono essere applicati individualmente o combinati tra loro, allo scopo di ottenere sistemi più affidabili e prestazioni più elevate.

La British Standards BS 8102:2009 - *Codice di Pratica per la protezione delle strutture interrato dall'acqua* - definisce tre tipologie di sistemi:

SISTEMI DI TENUTA ALL'ACQUA		
A	A SACCHETTO	(in inglese, "tanked protection", ovvero serbatoio, contenitore stagno). L' involucro impermeabile avvolge fondo e lati dell'opera interrata. Il sistema si distingue in diversi tipi, secondo che l'elemento di tenuta sia disposto all'esterno della struttura (sistema esterno), interposto tra due strutture (sandwich) o all'interno (sistema interno).
B	STRUTTURALMENTE INTEGRATO	L'involucro impermeabile è costituito dalla stessa struttura, che assume la configurazione di una scatola chiusa e stagna su fondo e pareti verticali.
C	A CAVITÀ DRENATA	L'acqua penetra, in modica quantità, attraverso le strutture contro-terra, per essere raccolta in una cavità realizzata tra queste strutture e l'ambiente interno vero e proprio, e quindi allontanata mediante pompaggio.

Tabella 3: Sistemi di tenuta all'acqua

Per ciascun sistema viene data una descrizione dettagliata e viene illustrata l'applicabilità in funzione dei diversi metodi costruttivi, delle differenti condizioni dell'ambiente esterno e dei requisiti di progetto dell'ambiente interno.

Successivamente, per il sistema “a sacchetto”, che risulta il più diffuso e appropriato per strutture sotterranee a contatto permanentemente o frequente con la falda, viene presentata una dettagliata analisi dell'applicabilità delle diverse tecnologie di impermeabilizzazione sviluppate.

4.2. Sistema di tenuta a sacchetto (tipo A) – “Tanked Protection”

La protezione cosiddetta a sacchetto costituisce un sistema di barriera in grado di escludere dalla struttura, acqua e/o vapore d'acqua e in qualche caso anche gas. Il sistema può essere applicato:

- Ae - Sulla faccia esterna delle pareti strutturali e della soletta di base **(Sistema esterno)**;
- Aer - Su di un qualsiasi supporto esterno **(Sistema esterno rovescio)**;
- As - Tra due parti della struttura stessa **(Sistema sandwich)**;
- Ai - Sulla faccia interna delle pareti strutturali **(Sistema interno)**.

L'efficacia e la sicurezza di un sistema a sacchetto fa affidamento soprattutto su:

- la formazione di adeguati e ben eseguiti sormonti tra i teli successivi, in caso di utilizzo di sistemi a membrana prefabbricata;
- la protezione adeguata della membrana stessa durante le fasi di costruzione e successivo rinterro.

Generalmente, con simili sistemi di impermeabilizzazione, viene richiesto un tipo di struttura monolitico, con movimenti minimi in corrispondenza dei giunti, in quanto può causare delle fessure all'elemento di tenuta con conseguente penetrazione di acqua. Il sistema dovrebbe essere selezionato, tenendo in considerazione la sua capacità di resistere ai movimenti strutturali che il progetto prevede.

Diventa essenziale, in fase di progetto, che le parti interessate sia alla costruzione della struttura che alla realizzazione del sistema d'impermeabilizzazione, abbiano frequenti contatti e collaborino in maniera completa.

Il sistema a sacchetto (esterno) dovrebbe essere continuo ed estendersi dal punto più basso della struttura sino ad una quota superiore al massimo livello di falda previsto nel corso della vita della struttura.

Per proteggere completamente il manufatto interrato dagli effetti dell'ambiente esterno, e dunque anche dalle acque di percolazione e dalla risalita capillare, è buona norma estendere la protezione fino a circa 150 mm almeno al di sopra del piano campagna. In caso di proseguimento della struttura con murature in elevazione, diventa importante la continuità della impermeabilizzazione anche a salire, con l'introduzione di opportuni taglia muro, barriere vapore e altro (cavity tray e damp-proof course).

Per quanto riguarda la durabilità della struttura portante, mentre nei sistemi esterno e rovescio (Ae e Aer) la struttura si trova avviluppata e quindi protetta dall'ambiente esterno, nei sistemi sandwich e interno (As e Ai) essa si trova esposta all'ambiente esterno, alla cui aggressione deve quindi far fronte.

Parlando di strategie di riparazione, il sistema interno (Ai) ha il vantaggio di una maggiore accessibilità, il che significa che la manutenzione è più fattibile. Tuttavia, nell'essere applicato alla faccia interna della struttura, l'elemento di tenuta è soggetto a pressioni negative che tendono a distaccarlo più facilmente dal supporto, per questo diventa molto importante il legame e la compatibilità dei materiali.

Nei sistemi esterni o sandwich l'accessibilità post costruzione è tipicamente impraticabile e, la riparazione risulta molto difficile per determinare con certezza il punto di un difetto esterno, perché i segni dell'infiltrazione dell'acqua sulla parete dell'ambiente interno possono mostrarsi in posizione diversa rispetto al punto di penetrazione nel sistema impermeabilizzante.

4.2.1. Sistema Esterno (Ae)

Se le condizioni del cantiere ed il progetto lo consentono, è sicuramente preferibile adottare il sistema a sacchetto esterno, cosicché la pressione idrostatica esterna (pressione positiva) agisca comprimendo il sistema di impermeabilizzazione contro la struttura stessa, amplificandone l'efficacia.

Dove si prevede la presenza di pressione idrostatica permanente, la struttura dovrà essere progettata sia per resistere alla pressione dell'acqua sia per limitare movimenti e fessurazioni entro un limite che possa essere accettato dal sistema di impermeabilizzazione selezionato.

Una particolare attenzione dovrebbe essere posta nel caso siano prevedibili cedimenti del sottofondo, specialmente quando le strutture portanti poggiano su pali, poiché il cedimento del piano orizzontale potrebbe rompere il sistema d'impermeabilizzazione nel punto di collegamento orizzontale/verticale fra soletta di fondo e fondazioni degli elementi verticali.

La figura seguente illustra un esempio di questo sistema di impermeabilizzazione per una costruzione sottoquota in calcestruzzo. Viene anche raffigurato il sistema cosiddetto rovescio, applicato per l'impermeabilizzazione della platea.

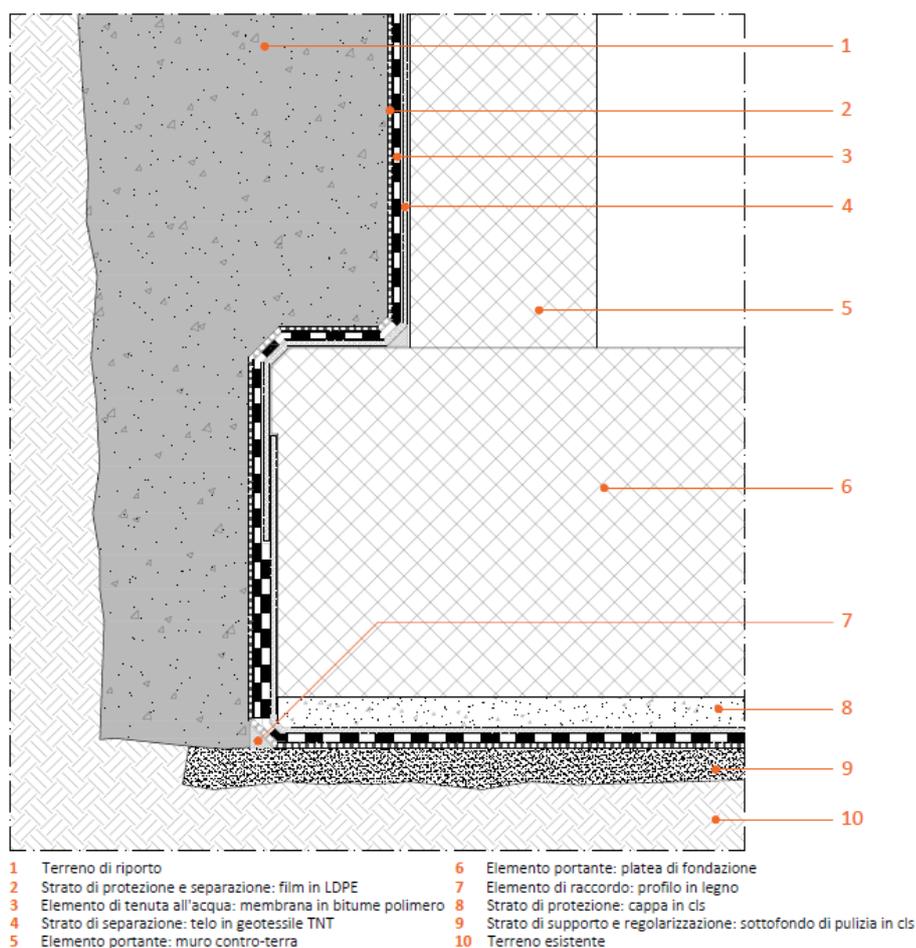


Figura 25: Sistema a sacchetto esterno Ae (per la parete) e esterno rovescio Aer (per la platea)

4.2.2. Sistema Rovescio (Aer)

Questo tipo è una variazione del tipo generale, dove il sacchetto viene applicato ad una superficie di supporto in pre-getto, cioè prima che venga realizzata la struttura.

Questo metodo viene più comunemente utilizzato in corrispondenza delle platee di fondazione, dove il sistema di impermeabilizzazione, generalmente realizzato con membrana prefabbricata, viene applicato direttamente sulla superficie del magrone; l'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della futura muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale

La figura seguente dà un esempio dell'uso del sacchetto rovescio dove la membrana è applicata al magrone di fondo e alle strutture di contenimento dello scavo, che potranno essere, ad esempio, paratie di micropali accostati, diaframmi o altre strutture a carattere provvisorio.

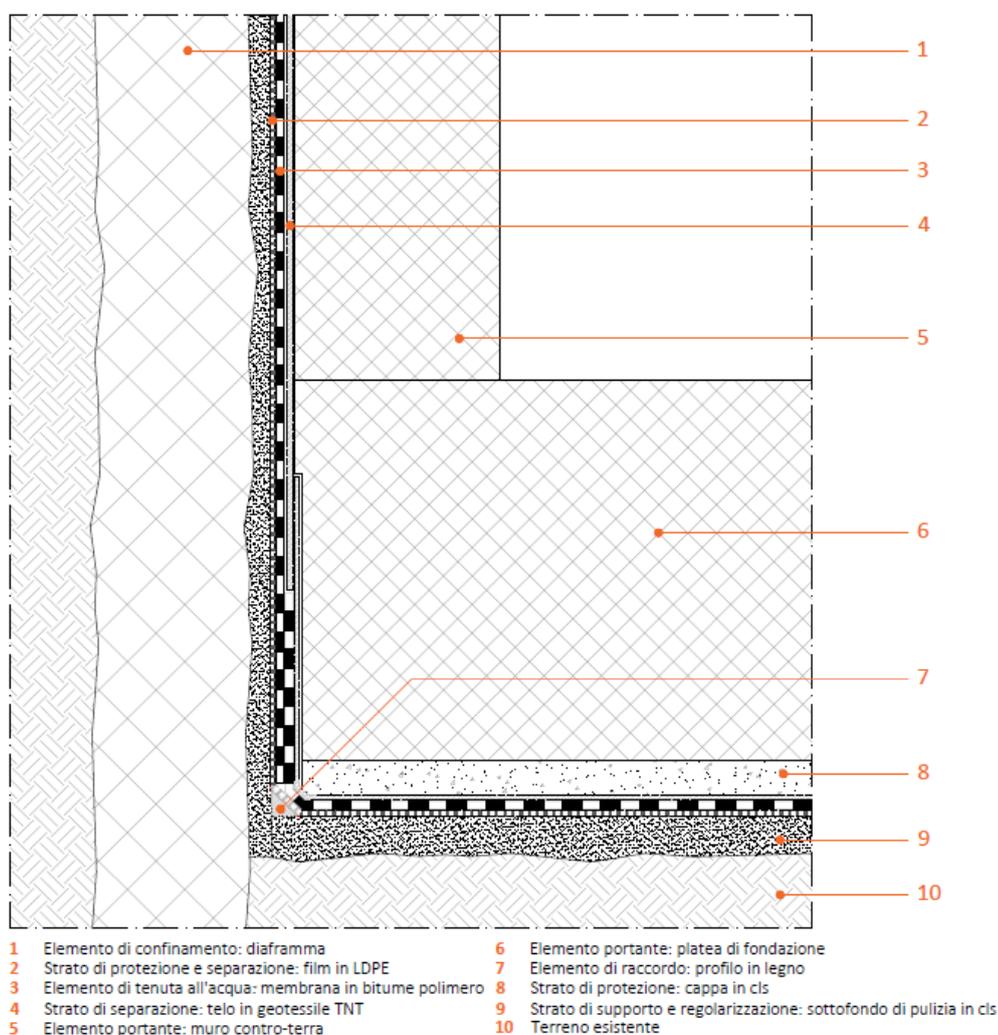


Figura 26: Sistema a sacchetto esterno rovescio Aer

Ogni sistema d'impermeabilizzazione prevede alcuni accorgimenti di messa in opera, che possono differire in maniera talvolta consistente. La maggior parte dei sistemi di impermeabilizzazione, data la loro intrinseca necessità di protezione meccanica, necessitano di uno strato di separazione/protezione tra il magrone e la posa del sistema stesso; e spesso gli stessi o altri, necessitano di ulteriori protezioni meccaniche dopo la loro applicazione, per impedire che il montaggio dell'armatura possa danneggiarne l'integrità e pregiudicarne l'efficacia.

È importante considerare i possibili effetti dannosi per l'impermeabilizzazione ad opera di un movimento/cedimento differenziale della struttura, soprattutto nella posizione al piede delle murature verticali. Se il sacchetto di fatto venisse lacerato, si potrebbe creare una via preferenziale di scorrimento dell'acqua tra l'impermeabilizzazione e la struttura, con conseguenti enormi difficoltà della localizzazione della posizione di rottura del manto. A questo punto ogni possibile riparazione diverrebbe poco efficace nonché costosa.

4.2.3. Sistema Sandwich (As)

Il sistema sandwich viene usato generalmente in presenza di contropareti in mattoni o calcestruzzo e quando il convenzionale sistema a sacchetto di tipo esterno non è praticabile per ragioni che possono derivare da particolari condizioni di cantiere, di sequenza delle lavorazioni, di difficoltà di accesso a posteriori od ancora da condizioni particolari del terreno.

Qualsiasi sia il sistema applicato, la collocazione dello stesso deve essere garantita dalla costruzione di una struttura capace di resistere alla massima sottospinta idraulica di progetto. Tale struttura generalmente è rappresentata da una platea orizzontale in calcestruzzo armato e da una muratura in calcestruzzo o in mattoni sul perimetro. Per pareti esterne in muratura, l'eventuale cavità che si forma tra membrana e parete potrà essere riempita con malta cementizia colata nell'interstizio.

Il sistema a sacchetto tipo sandwich può non risultare conveniente per applicazioni in presenza di pressione idrostatica permanente: in presenza di battente di falda permanente o probabile, si dovrà infatti mantenere attivo un sistema di drenaggio per impedire la formazione della sottospinta idraulica, fino al completamento della struttura di fondazione.

La figura seguente mostra un esempio di una impermeabilizzazione a sacchetto con sistema sandwich, dove l'elemento di tenuta è racchiuso tra una struttura esterna, destinata ad essere permeata dall'acqua di falda, ed una interna. A differenza del sistema esterno rovescio, entrambe le strutture interna ed esterna hanno qui carattere definitivo.

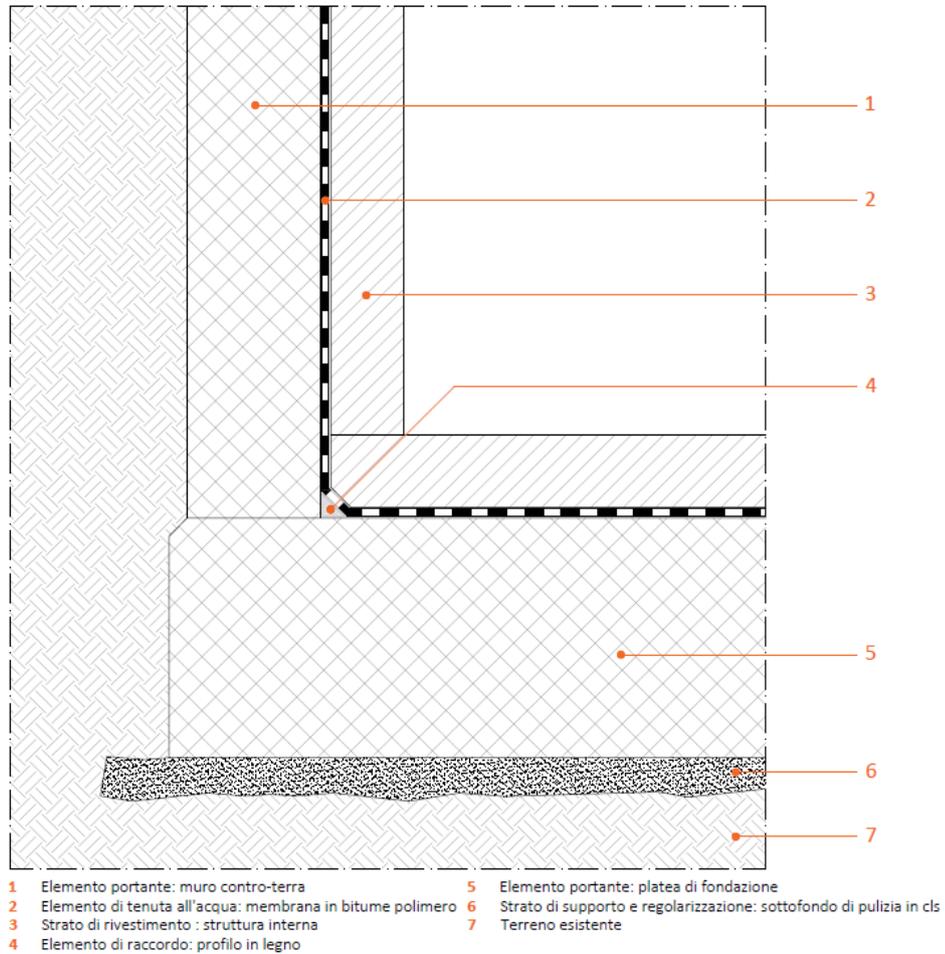


Figura 27: Sistema a sacchetto sandwich As

4.2.4. Sistema Interno (Ai)

Questo tipo di impermeabilizzazione è applicato all'interno dei muri della struttura. Si deve comunque agire in maniera da evitare la possibile separazione/distacco del sistema di impermeabilizzazione dal substrato, a causa della presenza di spinta idrostatica negativa. In caso di sistemi ad intonaco cementizio, si potrà procedere ad un ancoraggio meccanico.

Un eventuale distacco dell'elemento di tenuta non è semplicemente scongiurato dalla scarsità di acqua che può effettivamente penetrare dalla struttura esterna, ma dovrà essere valutato tenendo conto della pressione idrostatica indotta dall'intero battente idraulico.

Anche in questo caso, l'ottenimento della continuità dell'impermeabilizzazione comporta particolare attenzione alla realizzazione del dettaglio di collegamento tra il sistema orizzontale con il sistema verticale, soprattutto in caso di possibili cedimenti differenziali. La membrana dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere ripiegata verticalmente e consentire la sormonta con l'elemento di tenuta verticale.

Questa sistema è maggiormente indicato per interventi su strutture esistenti, dove si è impossibilitati ad accedere al lato esterno della muratura per via degli spazi confinati. In caso di strutture nuove, tale sistema trova applicazione per lo più in casi particolari, come ad esempio la fossa ascensore, o in abbinamento altri sistemi.

La figura seguente mostra un esempio di una impermeabilizzazione a sacchetto con sistema interno.

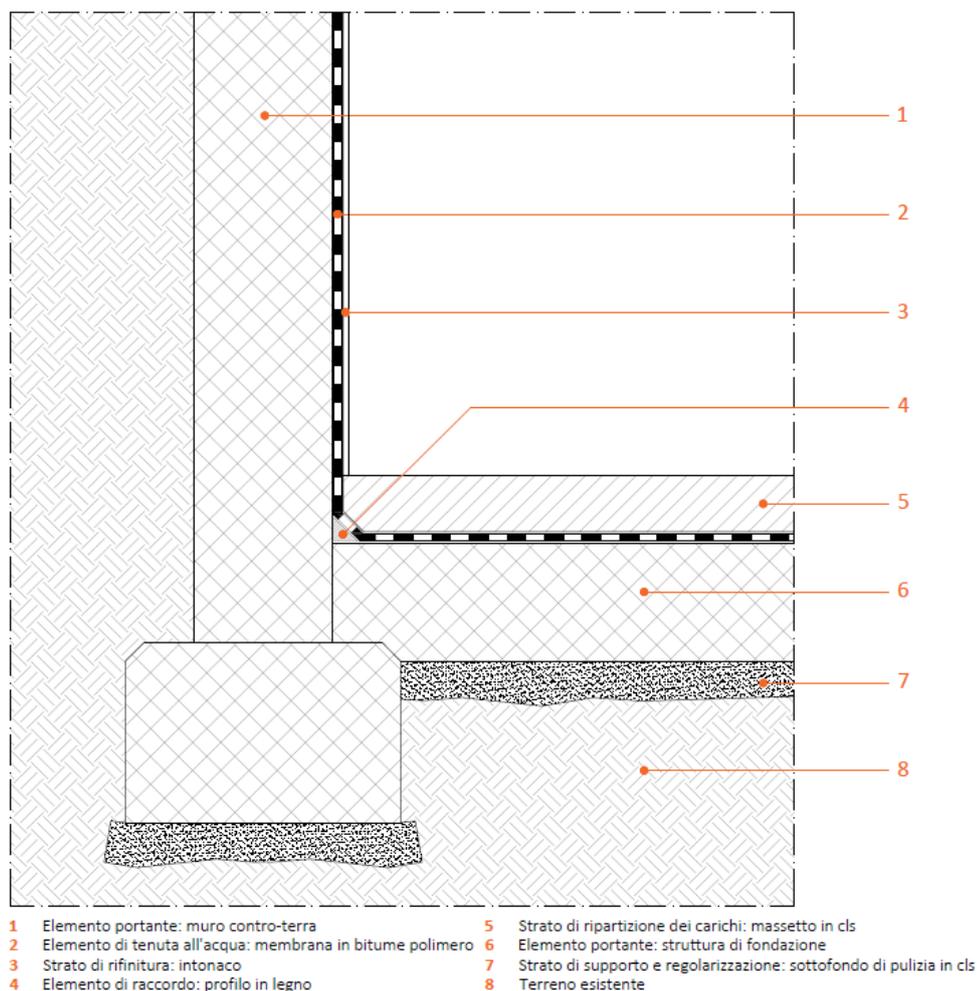


Figura 28: Sistema a sacchetto interno

4.2.5. Applicazione del sistema di tenuta a sacchetto

Il sistema generalmente preferibile, fra quelli di Tipo A, è ovviamente la realizzazione di un sacchetto completo esterno, che avvolge tutta la struttura, così che l'eventuale pressione dell'acqua forzi l'impermeabilizzazione direttamente contro le superfici della struttura e che quest'ultima risulti completamente protetta dall'eventuale aggressività degli agenti esterni.

Essendo il sistema più diffuso, l'argomento viene approfondito, in modo dettagliato, in un capitolo interamente dedicato (si veda § 6).

4.3. Sistema di tenuta strutturalmente integrata (tipo B) – “Vasca Bianca”

Nel sistema di Tipo B l'impermeabilizzazione non è data da un elemento aggiunto alla struttura, ma è la struttura stessa a essere impermeabile. Questi spazi interrati sono generalmente costruiti per mezzo di strutture a scatola in cemento armato, progettate per resistere alla pressione idrostatica in aggiunta agli altri carichi.

La protezione contro la penetrazione d'acqua si basa quindi sulla progettazione e realizzazione di calcestruzzi ad alta qualità abbinata ad adeguati sistemi tecnologici di tenuta per giunti di collegamento, costruttivi (ripresе di getto), di frazionamento-fessurazione programmata e di movimento (dilatazione).

Le tipologie tecnologiche, comprendono i rivestimenti con malte a comportamento osmotico, malte e soluzioni cristallizzanti, malte bicomponenti elastoplastiche, profilati, preformati e waterstop idroespansivi, resine liquide idroreattive, sigillanti idroespansivi, metodi di ermetizzazione delle cassetture, ecc.

Anche al calcestruzzo, inteso come materiale, possono essere richieste caratteristiche di impermeabilità intrinseca, adeguata alle condizioni di esposizione e di servizio delle strutture, anche se la norma più recente in ordine al calcestruzzo: UNI EN 206-1: “Calcestruzzo, specificazione, prestazione, produzione e conformità” accenna, solo di passaggio alla permeabilità, senza definirne parametri e limiti.

Un accenno appena più preciso è dato dalla norma UNI 9858: “Calcestruzzo, prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità”, che recita: “*Si considera adatta alla confezione di calcestruzzo impermeabile quella miscela la cui resistenza alla penetrazione dell'acqua, determinata secondo UNI 7699, dà come risultato un valore massimo minore di mm 50 e valori medi di penetrazione minori di mm 20. Il rapporto acqua/cemento non deve risultare superiore a 0,55.*”

I principali vantaggi dei sistemi di tipo B sono:

- non è danneggiabile durante la costruzione;
- ottimizzazione e risparmio dei tempi di esecuzione; la costruzione della struttura e l'impermeabilizzazione coincidono;
- interventi manutentivi puntuali, poco invasivi e immediatamente verificabili, perché causa effetto coincidono.

A tale tipo di struttura può essere accoppiato sia il sistema di tenuta di Tipo A che il sistema di protezione di Tipo C.

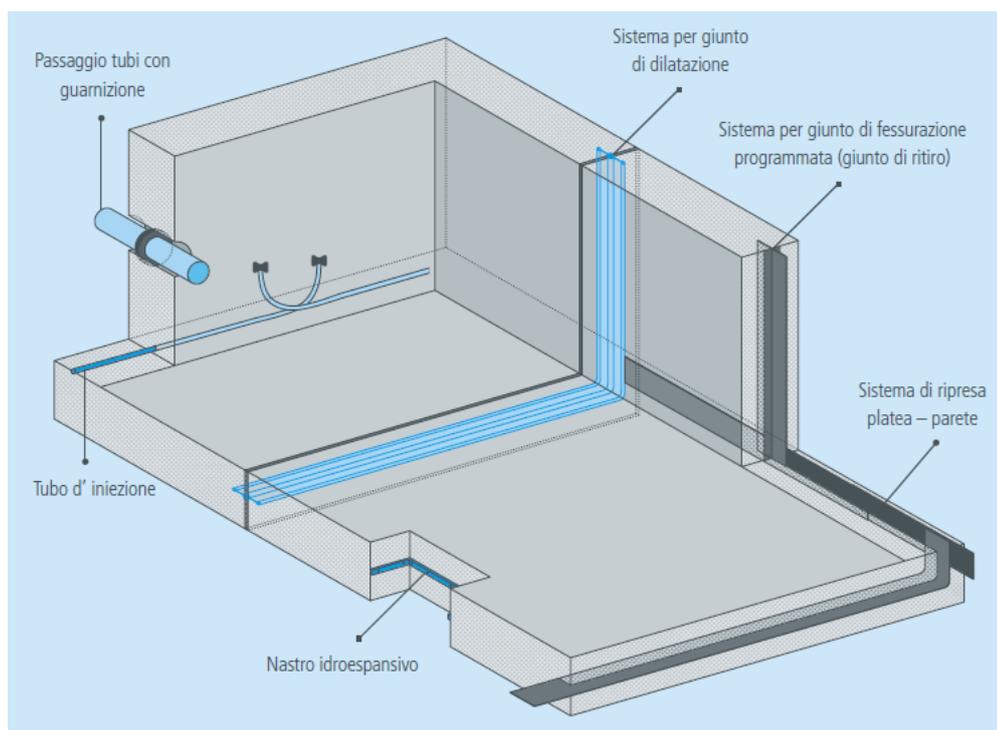


Figura 29: Sistema strutturalmente integrata "Vasca bianca" (Fonte / WASCOTEC, Sistema vasca bianca: Tecnologia per l'impermeabilizzazione delle costruzioni in calcestruzzo)

4.3.1. Caratteristiche del calcestruzzo di fondazione

In questo paragrafo si riportano i requisiti e le proprietà del calcestruzzo con riferimento alla normativa italiana ed europea.

Le Norme tecniche per le costruzioni del D.M. 14 gennaio 2008 definiscono la durabilità come la *“conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano garantiti durante tutta la vita dell’opera, deve essere garantita attraverso una opportuna scelta dei materiali e un opportuno dimensionamento delle strutture, comprese le eventuali misure di protezione e manutenzione”*.

Le Norme tecniche hanno recepito dalla normativa europea un concetto nuovo per la legislazione italiana sulle costruzioni in c.a.: l'esigenza di trasferire all'opera i livelli di sicurezza, definiti in fase di progetto, per un tempo stabilito pari alla vita utile di progetto. Le Norme tecniche hanno quindi cercato di circoscrivere un concetto aleatorio e soggettivo come la durabilità, mettendo ordine tra i parametri che la influenzano: la corrosione dei materiali, il tempo, l'ambiente di progetto, la posa in opera, la manutenzione programmata e la destinazione d'uso.

Quindi per durabilità s'intende, non solo il mantenimento dei coefficienti di sicurezza stabiliti in fase di progetto (per soddisfare i requisiti connessi alla capacità portante, alla limitazione della deformabilità e delle vibrazioni), ma anche la conservazione dell'efficienza iniziale per tutta la vita di servizio, dove per efficienza s'intende il rispetto degli stati limite legati alla funzionalità dell'opera.

La prevenzione del degrado delle strutture in c.a. si sviluppa nelle seguenti tre fasi:

- progetto: analisi del contesto ambientale, scelta dei materiali, concezione e calcolo della struttura, disegno dei particolari costruttivi;
- realizzazione: preparazione, messa in opera, controllo del copriferro, controlli di accettazione, compattazione e stagionatura del calcestruzzo;
- manutenzione: interventi programmati nel corso della vita utile di servizio dell'opera.

La Norma UNI EN 206-1 al paragrafo 5.3.2 affronta il problema della durabilità *“Le disposizioni valide nel luogo d’impiego del calcestruzzo dovrebbero riportare i requisiti sulla base di una vita di esercizio prevista di almeno 50 anni nelle normali condizioni di manutenzione. Se il calcestruzzo è conforme ai valori limite, si deve presumere che il calcestruzzo nella struttura soddisfi i requisiti di durabilità per l’uso previsto nelle specifiche condizioni ambientali, a condizione che:*

- *il calcestruzzo sia correttamente gettato, compattato e stagionato per esempio in conformità con la ENV 13670-1 oppure con altre norme pertinenti;*
- *il calcestruzzo rispetti il copriferro minimo richiesto per le specifiche condizioni ambientali, in accordo con la norma di progetto pertinente, per esempio la ENV 1992-1”*

La Figura 30 riporta lo schema che riassume quanto proposto dalle norme italiane ed europee, che sintetizza il percorso logico che il progettista, dovrà seguire per adempiere alle nuove esigenze di durabilità delle opere future.

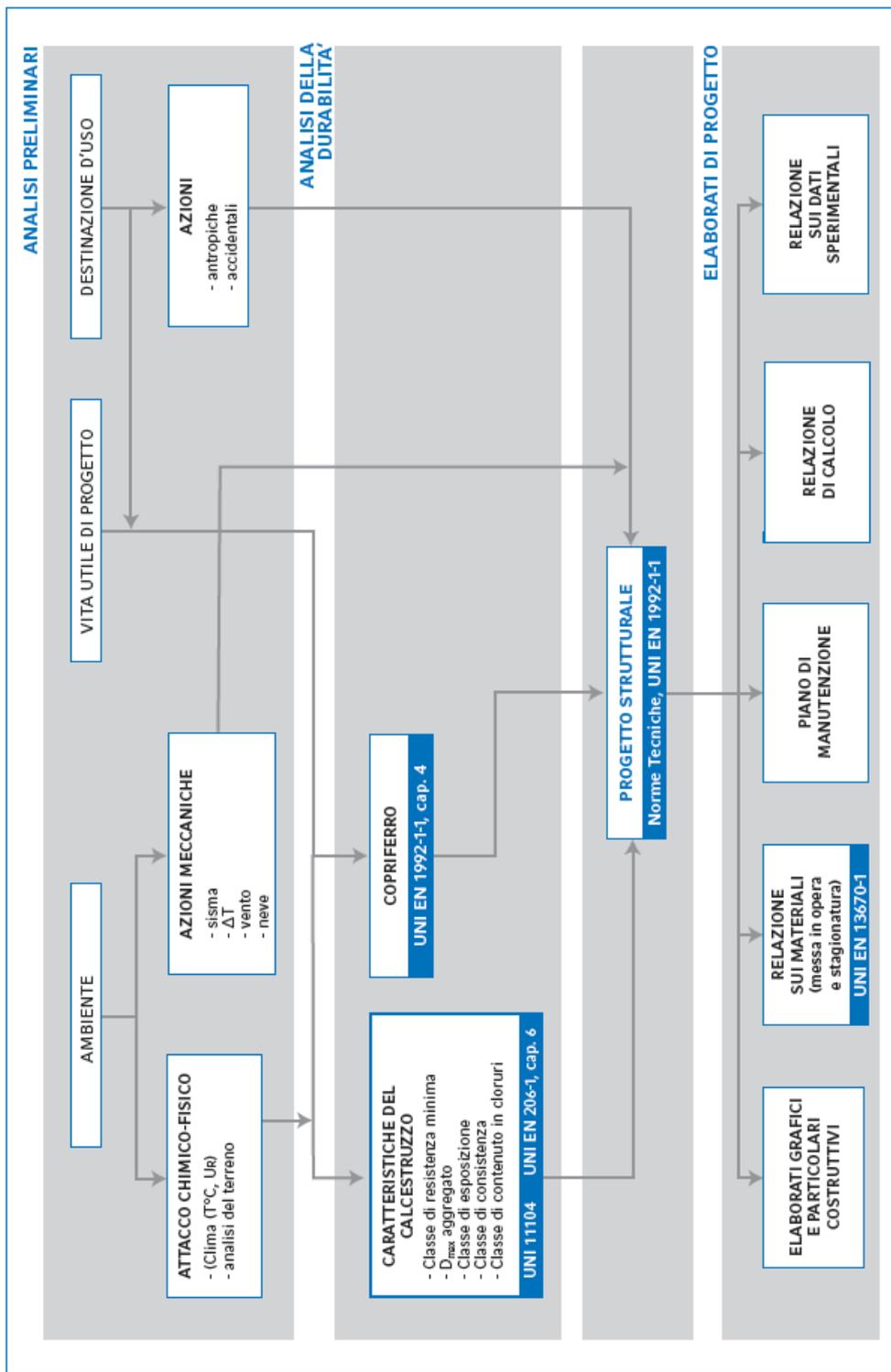


Figura 30: Schema logico che il progettista deve seguire per adempiere alle esigenze di durabilità delle opere in c.c. (Fonte / UNICAL: Guida alla prescrizione della durabilità delle strutture in cemento armato)

Le normative italiane ed europee prescrivono di definire la destinazione d'uso, la vita utile di progetto e l'ambiente in cui verrà eretta la struttura. Per ambiente si intendono tutte le azioni che l'ambiente eserciterà sulla struttura: siano esse meccaniche (sisma, vento, neve, escursioni termiche), siano chimico-fisiche (umidità, temperatura, concentrazione di cloruri, anidride carbonica, solfati, etc..).

Ai fini della durabilità, il calcestruzzo deve essere progettato secondo la normativa UNI 11104:2004 (applicazione italiana della UNI EN 206-1), che definisce le classi di esposizione ambientale (Tabella 4) in base alle quali vengono prescritti i valori limite all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno (Tabella 5) e per la composizione e le proprietà del calcestruzzo (Tabella 6): il massimo rapporto a/c, la classe di resistenza minima ed il minimo contenuto in cemento.

Classi di esposizione

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco		
X0	Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo/disgelo, abrasione o attacco chimico. Per calcestruzzo con armatura o inserti metallici: molto asciutto.	Calcestruzzo all'interno di edifici con umidità dell'aria molto bassa
2 Corrosione indotta da carbonatazione		
Nel caso in cui il calcestruzzo contenente armature o inserti metallici sia esposto all'aria e all'umidità, l'esposizione sarà classificata nel modo seguente: Nota Le condizioni di umidità si riferiscono a quelle presenti nel copriferro o nel ricoprimento di inserti metallici, ma in molti casi si può considerare che tali condizioni riflettano quelle dell'ambiente circostante. In questi casi la classificazione dell'ambiente circostante può essere adeguata. Questo può non essere il caso se c'è una barriera fra il calcestruzzo e il suo ambiente.		
XC1	Asciutto o permanentemente bagnato	Calcestruzzo all'interno di edifici con bassa umidità relativa Calcestruzzo costantemente immerso in acqua
XC2	Bagnato, raramente asciutto	Superfici di calcestruzzo a contatto con acqua per lungo tempo Molte fondazioni
XC3	Umidità moderata	Calcestruzzo all'interno di edifici con umidità relativa dell'aria moderata oppure elevata Calcestruzzo esposto all'esterno protetto dalla pioggia
XC4	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Superfici di calcestruzzo soggette al contatto con acqua, non nella classe di esposizione XC2

Classi di esposizione (Continua)

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare		
Qualora il calcestruzzo contenente armature o altri inserti metallici sia soggetto al contatto con acqua contenente cloruri, inclusi i sali antigelo, con origine diversa dall'acqua di mare, l'esposizione sarà classificata come segue: Nota In riferimento alle condizioni di umidità vedere anche sezione 2 del presente prospetto.		
XD1	Umidità moderata	Superfici di calcestruzzo esposte a nebbia salina
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine Calcestruzzo esposto ad acque industriali contenenti cloruri
XD3	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Parti di ponti esposte a spruzzi contenenti cloruri Pavimentazioni Pavimentazioni di parcheggi
4 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare		
Qualora il calcestruzzo contenente armature o altri inserti metallici sia soggetto al contatto con cloruri presenti nell'acqua di mare oppure con aria che trasporta sali derivanti dall'acqua di mare, l'esposizione sarà classificata come segue:		
XS1	Esposto a nebbia salina ma non in contatto diretto con acqua di mare	Strutture prossime oppure sulla costa
XS2	Permanentemente sommerso	Parti di strutture marine
XS3	Zone esposte alle onde oppure alla marea	Parti di strutture marine
5 Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza sali disgelanti		
Qualora il calcestruzzo bagnato sia esposto ad un attacco significativo dovuto a cicli di gelo/disgelo, l'esposizione sarà classificata come segue:		
XF1	Moderata saturazione d'acqua, senza impiego di agente antigelo	Superfici verticali di calcestruzzo esposte alla pioggia e al gelo
XF2	Moderata saturazione d'acqua, con uso di agente antigelo	Superfici verticali di calcestruzzo di strutture stradali esposte al gelo e nebbia di agenti antigelo
XF3	Elevata saturazione d'acqua, senza agente antigelo	Superfici orizzontali di calcestruzzo esposte alla pioggia e al gelo
XF4	Elevata saturazione d'acqua, con agente antigelo oppure acqua di mare	Strade e impalcati da ponte esposti agli agenti antigelo Superfici di calcestruzzo esposte direttamente a nebbia contenente agenti antigelo e al gelo

Classi di esposizione (Continua)

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione
6 Attacco chimico		
Qualora il calcestruzzo sia esposto all'attacco chimico che si verifica nel terreno naturale e nell'acqua del terreno avente caratteristiche definite nel prospetto 2, l'esposizione verrà classificata come è indicato di seguito. La classificazione dell'acqua di mare dipende dalla località geografica; perciò si dovrà applicare la classificazione valida nel luogo di impiego del calcestruzzo.		
Nota Può essere necessario uno studio speciale per stabilire le condizioni di esposizione da applicare quando si è: <ul style="list-style-type: none"> - al di fuori dei limiti del prospetto 2; - in presenza di altri aggressivi chimici; - in presenza di terreni o acque inquinati da sostanze chimiche; - in presenza della combinazione di elevata velocità dell'acqua e delle sostanze chimiche del prospetto 2. 		
XA1	Ambiente chimico debolmente aggressivo secondo il prospetto 2	
XA2	Ambiente chimico moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2	
XA3	Ambiente chimico fortemente aggressivo secondo il prospetto 2	

Tabella 4: Prospetto 1 tratto dalla norma UNI EN 206-1 con indicazione delle classi di esposizione ambientale

Valori limite per le classi di esposizione all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno

Gli ambienti chimicamente aggressivi classificati di seguito sono basati sul suolo naturale e per acqua nel terreno a temperature dell'acqua/terreno comprese tra 5 °C e 25 °C ed una velocità dell'acqua sufficientemente bassa da poter essere approssimata a condizioni statiche.				
La condizione più gravosa per ognuna delle condizioni chimiche determina la classe di esposizione.				
Se due o più caratteristiche di aggressività appartengono alla stessa classe, l'esposizione sarà classificata nella classe più elevata successiva, salvo il caso che uno studio specifico provi che ciò non è necessario.				
Caratteristica chimica	Metodo di prova di riferimento	XA1	XA2	XA3
Acqua nel terreno				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥200 e ≤600	>600 e ≤3 000	>3 000 e ≤6 000
pH	ISO 4316	≤6,5 e ≥5,5	<5,5 e ≥4,5	<4,5 e ≥4,0
CO ₂ mg/l aggressiva	prEN 13577:1999	≥15 e ≤40	>40 e ≤100	>100 fino a saturazione
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 oppure ISO 7150-2	≥15 e ≤30	>30 e ≤60	>60 e ≤100
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥300 e ≤1 000	>1 000 e ≤3 000	>3 000 fino a saturazione
Terreno				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^{a)} totale	EN 196-2 ^{b)}	≥2 000 e ≤3 000 ^{c)}	>3 000 ^{c)} e ≤12 000	>12 000 e ≤24 000
Acidità ml/kg	DIN 4030-2	>200 Baumann Gully	Non incontrato in pratica	
a)	I terreni argillosi con una permeabilità minore di 10 ⁻⁵ m/s possono essere classificati in una classe inferiore.			
b)	Il metodo di prova prescrive l'estrazione di SO ₄ ²⁻ mediante acido cloridrico; in alternativa si può usare l'estrazione con acqua se nel luogo di impiego del calcestruzzo c'è questa pratica.			
c)	Il limite di 3 000 mg/kg deve essere ridotto a 2 000 mg/kg se esiste il rischio di accumulo di ioni solfato nel calcestruzzo causato da cicli di essiccamento/bagnatura oppure suzione capillare.			

Tabella 5: Prospetto 2 tratto dalla norma UNI EN 206-1 con l'indicazione dei valori limite all'attacco chimico

prospetto F.1 Valori limite raccomandati per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

Nessun rischio di corrosione o attacco		Classi di esposizione												Ambienti chimici aggressivi					
		Corrosione da carbonatazione				Corrosione da cloruri				Attacco gelo/disgelo									
		Acqua marina		Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)		Acqua marina		Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)		XF1	XF2	XF3	XF4				XA1	XA2	XA3
X0		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
-		0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Classe di resistenza minima		C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	
Contenuto minimo di cemento (kg/m ³)		260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360	
Contenuto minimo di aria (%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	-	-	-	
Altri requisiti		Aggregati in accordo alla EN 12620 con sufficiente resistenza al gelo/disgelo															Cemento resistente ai solfati ^{b)}		
a)	Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni dovrebbero essere verificate conformemente ad un metodo di prova appropriato rispetto ad un calcestruzzo per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo per la relativa classe di esposizione.																		
b)	Qualora la presenza di SO ₄ comporti le classi di esposizione XA2 e XA3, è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati. Se il cemento è classificato a moderata o ad alta resistenza ai solfati, il cemento dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA2 (e in classe di esposizione XA1 se applicabile) e il cemento ad alta resistenza, ai solfati dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA3.																		

Tabella 6: Prospetto F.1 tratto dalla norma UNI EN 206-1 con l'indicazione dei valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

4.3.2. Costruzioni in calcestruzzo armato

È ben noto che la struttura porosa del conglomerato è responsabile dei fenomeni di degrado del materiale: pur essendo generalmente accettato che un calcestruzzo la cui composizione sia stata adeguatamente progettata, con un rapporto acqua/cemento limitato, e per la cui maturazione siano state poste in essere tutti i necessari accorgimenti possa essere caratterizzato da una buona durabilità, è altrettanto evidente che nessun calcestruzzo sia completamente impermeabile.

L'acqua può penetrare nel calcestruzzo, attraverso i suoi pori e le eventuali microfessure esistenti, sia per assorbimento capillare sia per effetto di una pressione idrostatica. Nel primo caso il movimento dell'acqua attraverso le microporosità del materiale avviene in assenza di qualsiasi gradiente di pressione, quale risultato della interazione fra l'acqua e le pareti dei pori. Nel secondo caso, ossia in presenza di un gradiente idraulico, il meccanismo che governa l'ingresso ed il trasporto di acqua attraverso il calcestruzzo viene definito *permeabilità*. In generale tuttavia con il termine di *permeabilità* si intende la resistenza del calcestruzzo alla penetrazione e/o al passaggio dell'acqua nelle effettive condizioni di servizio, che includono anche lo stadio fessurato.

Per ottenere un calcestruzzo intrinsecamente impermeabile è molto importante prevedere un'attenta progettazione del mix-design, considerare se lo stesso sarà prodotto da una centrale di cantiere o viceversa da una centrale di betonaggio esterna e quindi trasportato in cantiere. Il miglior risultato qualitativo sarà raggiunto quando sarà garantito il miglior compromesso tra i parametri, generalmente in conflitto tra loro, di resistenza, elevata lavorabilità, elevato rapporto aggregati/cemento, basso rapporto acqua/cemento e non ultimo economicità.

Di seguito si riporta una tabella con le raccomandazioni per il mix design di un calcestruzzo impermeabile.

Componenti	Commenti	Prescrizioni
Aggregati	Utilizzo della opportuna curva di distribuzione granulometrica. Non è consigliabile l'utilizzo di aggregati riciclati, selezionare preferibilmente aggregati di tipo alluvionale	Dmax aggregato 32 mm
Cemento	Conforme alle norme EN	Contenuto minimo di legante 350 kg/m ³
Aggiunta secondaria	Ceneri volanti e loppa granulare d'altoforno	Contenuto massimo 30% sul peso del legante
Acqua	Acqua di pozzo o acqua riciclata. Rapporto acqua cemento in accordo con la classe di esposizione prevista	Rapporto A/C < 0.55
Additivi per calcestruzzo	Il tipo dipende dal rapporto A/C previsto, dalla lavorabilità richiesta e dalla necessità di mantenimento della stessa	Add. plastificanti: 0.60 - 1.50 %
	Gamma di additivi per garantire la sufficiente riduzione della permeabilità	Add. impermeabilizzanti: 1.00 - 2.00 %

Tabella 7: Raccomandazioni per il mix design (Fonte / SIKA: Sistemi di tenuta all'acqua, Paolo Roffina)

In queste particolari strutture poi, assume importanza rilevante la progettazione dell'apertura delle fessure nel calcestruzzo le quali non solo dovranno essere calcolate secondo la teoria classica riportata dalle vigenti Norme, ma dovranno tener conto anche di alcuni fattori determinanti in relazione al tipo di costruzione e alla mano d'opera impiegata come:

- Tipologia di forma della struttura interessata;
- Cambi di sezione;
- Posizionamento dei giunti di costruzione e di dilatazione;
- Tipologia e sistema di getto (sequenze di costruzione, giunti di ripresa e/o di movimento);
- Ritiro in corrispondenza di pannelli adiacenti, platea di base e pali;
- Controllo degli effetti iniziali di dilatazioni termiche e di umidità generati dal mix-design e stagionatura del calcestruzzo;
- Problematiche relative alle teste pali.

Apertura delle fessure

Per problemi di durabilità intrinseca della struttura, sono da considerare con particolare attenzione le aperture delle fessure nel calcestruzzo. A seconda degli ambienti interni definiti di progetto andranno prese differenti precauzioni.

Per strutture definite come Classe 1 dell'ambiente interno il limite di apertura delle fessure dovrebbe essere non superiore a 0,2 mm. Per strutture definite invece come Classe 2-3-4 dell'ambiente interno, dove la tenuta idraulica è garantita soprattutto dalla struttura stessa, l'apertura massima delle fessure dovrà tenere conto anche dell'esposizione della struttura.

CLASSE dell'ambiente interno	Max apertura delle fessure	Tipo di esposizione cls	Classe di esposizione di riferimento
Classe 1	0,2 mm	<u>Severa:</u> superficie del cls esposta a pioggia, cieli di bagnatura alternati ad asciugatura o gelo occasionale e azione frequente di condensa	<u>Ambiente moderatamente aggressivo:</u> elevata U.R. in assenza di vapori corrosivi
Classe 1-2-3-4	0,1 mm	<u>Molto severa:</u> superficie del cls esposta a azione di aerosol marino, Sali decongelanti (direttamente o indirettamente), fumi corrosivi o frequente gelo in presenza di acqua	<u>Ambiente molto aggressivo:</u> presenza di liquido o di aeriformi particolarmente corrosivi

Tabella 8: Massima apertura delle fessure nel cls (Fonte / SIKA: Sistemi di tenuta all'acqua, Paolo Roffina)

Una particolare attenzione deve essere rivolta alla rete di waterstop che, data la loro applicazione in “circuito”, potrebbero addirittura facilitare la propagazione dell’acqua. Soprattutto dovranno essere previsti lungo il giunto orizzontale tra la platea orizzontale e lo spicco delle murature verticali perimetrali.

Principali cause di fessurazione sono:

- Azioni di flessione, per effetto delle quali le fessurazioni si estendono sino all’asse neutro e che sono corrette con l'aumento dello spessore dell’area di compressione.
- Ritiro e movimenti creati da variazioni termiche del calcestruzzo, dove le fessurazioni tendono ad essere uniformi attraverso la sezione di calcestruzzo.

Questo secondo caso è ovviamente quello più pericoloso che può comportare maggiori pericoli. Possibili accorgimenti per minimizzare i fenomeni sono l’aumento del tasso di armatura del calcestruzzo armato e la riduzione delle variazioni di temperatura e umidità.

Un’altra cosa da evitare è rappresentata dai cambi di sezione perché essi tendono a facilitare il formarsi delle fessure in maniera addirittura superiore a quanto si possa prevedere in fase di calcolo.

La platea orizzontale dovrebbe essere per lo più continua e con spessore tale da consentire una ripartizione dei carichi omogenee sul terreno sottostante, senza provocare assestamenti locali del terreno. Anche in questo caso, variazioni dello spessore, generalmente previste come risparmio di calcestruzzo, potrebbero portare a degli scompensi superiori al risparmio previsto.

Di seguito si riporta una tabella con le raccomandazioni per la progettazione di un calcestruzzo impermeabile.

Componenti	Linee guida
Progetto	Ridurre il ritiro ed i movimenti termici. Formazione massima fessure ≤ 0.2 mm per singola fessura
Spessore del calcestruzzo	Spessore minimo 200 mm
Preparazione del sito	Come consiglierebbe una buona pratica di cantiere
Dimensionamento	Massimo rapporto dimensionale consentito 3:1 Muro in calcestruzzo = massimo 25 m ² Lastra in calcestruzzo 100 m ²
Casseforme	Ben progettate Giunti bene sigillati (evitare perdite di boiacca/formazione di nidi di ghiaia)
Maturazione e stagionatura	Maturazione in linea con quanto prescritto dalle norme vigenti

Tabella 9: Raccomandazioni per la progettazione

4.3.3. Calcestruzzo non armato e costruzioni in mattoni

Non è generalmente possibile garantire una protezione strutturalmente integrata di Tipo B per mezzo di calcestruzzo convenzionalmente non armato o per mezzo di murature in mattoni. Questi sistemi generalmente richiedono sistemi di protezione di Tipo A e di Tipo C.

4.3.4. Applicazione del sistema di tenuta strutturalmente integrata

Con questo tipo di protezione si possono raggiungere le Classi 1 e 2 dell'ambiente interno e in particolari condizioni anche quelli relativi alla Classe 3. La protezione garantita all'ambiente interno dipende per lo più dal tipo di materiale strutturale selezionato ed utilizzato. Di seguito alcune considerazioni.

Calcestruzzo armato

Per mezzo di questo materiale si può generalmente raggiungere una protezione integrale, sia per le Classi 1 e 2 ed anche con alcune precauzioni per le Classi 3 e 4, soprattutto se ad essa è aggiunta un'impermeabilizzazione a sacchetto. Si possono aggiungere in alcuni casi particolari anche dei sistemi attivi di controllo delle condizioni interne degli ambienti.

Mattoni o calcestruzzo non armato

Questi sistemi, in assenza di sistemi di protezione aggiuntivi, dovrebbero essere utilizzati solamente per costruzioni semplici e poco profonde, massimo un piano interrato, e in assenza di pressione di falda. Possono essere raggiunte le Classi 1 e 2 di ambiente interno solamente con protezioni aggiuntive d'impermeabilizzazione.

Per una più completa protezione alla struttura è preferibile optare per l'utilizzo di calcestruzzo armato. La classe 3 d'ambiente interno può essere raggiunta a patto che sia aggiunto un sistema d'impermeabilizzazione coadiuvato da un sistema di drenaggio esterno. La Classe 4 invece può essere garantita solamente con l'utilizzo di calcestruzzo armato con in aggiunta un sistema d'impermeabilizzazione e di drenaggio.

4.4. Sistema di tenuta con cavità drenata (tipo C)

Questo sistema particolare consente di agire con successo a patto che i muri strutturali siano in condizioni di minimizzare la penetrazione d'acqua all'interno. Questa cavità di drenaggio, realizzata all'interno del muro strutturale, non deve tuttavia essere prevista ed utilizzata per la raccolta di ingenti venute d'acqua. Le pareti strutturali possono essere realizzate in calcestruzzo semplice o armato, in muratura o con palancolate. L'acqua che penetra all'interno delle strutture perimetrali, o che proviene da umidità o condensa viene raccolta in questa cavità di drenaggio, che può essere sia orizzontale sia verticale, e poi da qui portata ai previsti pozzetti di raccolta e quindi allontanata mediante pompaggio.

Un sistema a cavità drenata comprende 3 elementi principali:

- Membrana drenante;
- Canaletta di drenaggio e pozzetti di raccolta;
- Sistema di pompaggio.

Il sistema di protezione Tipo C sopraddetto può essere utilizzato in congiunzione anche ai sistemi di protezione Tipo A o B, precedentemente descritti.

L'impermeabilizzazione delle opere controterra deve essere progettata e realizzata con particolare attenzione, visto che la durata del rivestimento dovrà essere pari a quella dell'opera protetta; difficilmente saranno infatti possibili interventi di ripristino.

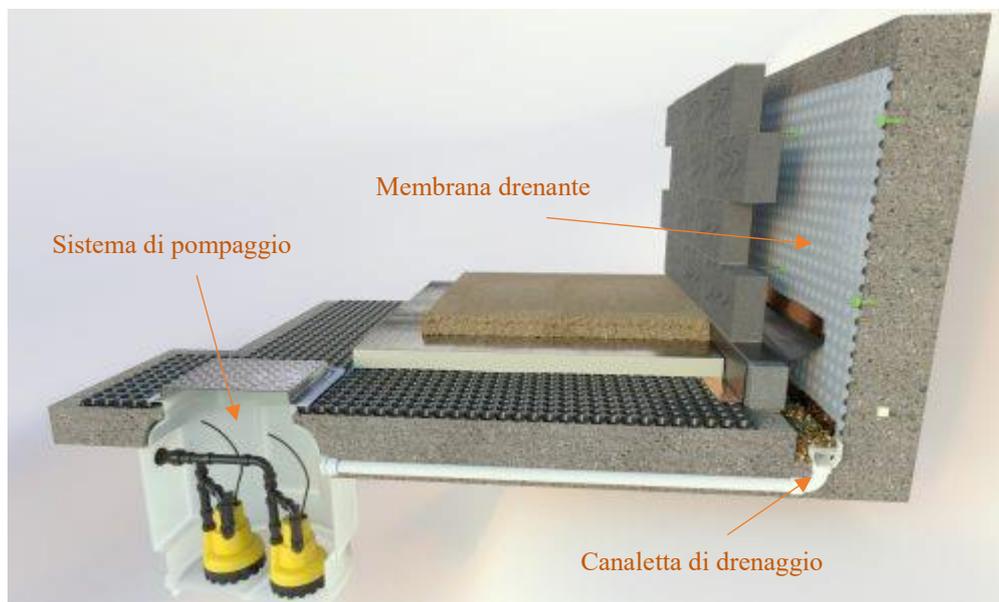


Figura 31: Sistema con cavità drenata (Fonte / <http://www.fisproducts.co.uk/our-solutions/structural-waterproofing/cavity-drain-systems/> [05/10/2017])

4.4.1. Sistema per pareti verticali

La parete realizzata internamente al muro strutturale non è generalmente calcolata per resistere ai carichi e dovrebbe essere realizzata evitando l'attraversamento dei distanziatori di cassero che potrebbero rivelarsi delle potenziali vie d'acqua.

È consigliabile prevedere un sistema d'impermeabilizzazione sulla superficie lato ambienti interni di questa parete, e possibilmente creare un'adeguata ventilazione della cavità esterna alla parete stessa.

Per la realizzazione di queste cavità drenate sono utilizzabili in modo molto efficiente ed anche economico i cosiddetti geocompositi di drenaggio. Questi materiali, generalmente realizzati in materiale plastico, preformati a forma tronco conica, sono in grado di garantire anche con spessori di 20 mm, una capacità di drenaggio e cioè di scarico di parecchi litri nell'unità di tempo, senza richiedere grandi larghezze di cavità.

Questa soluzione tecnica, adottata da sola o in congiunzione con i sistemi di Tipo A o B, è necessaria normalmente per garantire livelli di protezione dell'ambiente interno di tipo 3 e 4. In caso di costruzioni molto estese, questa cavità dovrà essere verificata anche tenendo conto dei regolamenti anti incendio.

4.4.2. Sistema per platee orizzontali

Tali cavità realizzate in orizzontale possono essere formate con calcestruzzi con preponderanza di ghiaia o anche per mezzo di sistemi di geocompositi di drenaggio a risalti tronco conici. Anche in questo caso tali sistemi sono preferibili dato il loro basso spessore e quindi volume occupato, in relazione alla loro comunque alta prestazione, sicuramente quindi preferibili alle soluzioni tradizionali (filtri graduati realizzati con sabbia e ghiaia), che richiedono il reperimento di notevoli volumi di materiale drenante, maggiori costi di trasporto e posa in opera di materiali di cava, maggiori volumi e costi di scavo nonché di messa in discarica del materiale asportato. La loro azione drenante è inoltre limitata nel tempo, a causa dell'intasamento causato dal materiale fine.

4.4.3. Vantaggi e svantaggi della cavità drenata

I principali vantaggi sono:

- È un sistema meno dipendente dai processi iniziali di costruzione, che sono sempre più difficili da prevedere e controllare ed è quindi un sistema in grado di raggiungere gli obiettivi previsti;

- L'installazione dello strato di drenaggio può essere realizzata nelle condizioni più favorevoli e comunque lontano dalle fasi critiche di cantiere;
- Si evitano le incertezze legate a lavorazioni difficoltose;
- Eventuali ingressi d'acqua dalla struttura primaria possono essere verificati ed eventualmente corretti prima della realizzazione finale del contromuro interno.

I principali svantaggi sono:

- Questo sistema comporta un utilizzo superiore di spazio utile, utilizzo che può essere minimizzato solo con l'impiego dei geocompositi;
- Si deve prevedere l'installazione di pompe di pescaggio dell'acqua raccolta; (per evitare problemi di interruzione dell'alimentazione elettrica è bene installare un sistema di emergenza parallelo);
- Se la parete strutturale esterna è in calcestruzzo convenzionale o muratura, in presenza di elevata pressione idrostatica, ci potrebbe essere una venuta d'acqua abbondante che non potrebbe essere drenata in maniera soddisfacente;
- Non sarà più possibile accedere alla parete strutturale esterna una volta realizzata la cavità drenata;
- Costi aggiuntivi per pompaggio, manutenzione per le pompe stesse.

4.4.4. Applicazione del sistema di tenuta a cavità drenata

Quando utilizzato in presenza di murature in calcestruzzo semplice e muratura, in condizioni di buon drenaggio, questo sistema è in grado di garantire l'ottenimento delle Classi 1 e 2 per l'ambiente interno anche in assenza di un sistema d'impermeabilizzazione. Utilizzato insieme ai sistemi di Tipo A e B, è in grado di garantire anche le Classi 3 e 4.

Bibliografia essenziale

- BRAC E. M. G., FERRARA L., “Impermeabilizzazione del calcestruzzo integro e fessurato mediante additivi cristallizzanti”, POLITECNICO DI MILANO, Milano, 2016;
- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., “Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione”, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- BS 8102-2009, “Code of practice for protection of below ground structures against water from the ground”, BRITISH STANDARDS;
- MOCCO E., “Calcestruzzo impermeabile & presidi di ermetizzazione: domande e risposte”, AZICHEM S.r.l, INGENIO N.44, 2016;
- NTC, Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. del 14 gennaio 2008;
- SIKA, “Soluzioni per strutture interrate in calcestruzzo”;
- TENAX, “Drenaggio e Protezione”;
- UNICAL, “Guida alla prescrizione della durabilità delle strutture in cemento armato”;
- UNI EN 206-1:2006 Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
- UNI 11104:2004 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1.

Capitolo 5

MATERIALI PER IMPERMEABILIZZAZIONE

5.1. Considerazioni generali

In questi ultimi anni i numerosi produttori, nazionali ed internazionali del settore dell'impermeabilizzazione, hanno introdotto sul mercato una gamma molto vasta di prodotti, nella quale figurano nuovi modelli di funzionamento, tecnologie e metodi di applicazione per proteggere le strutture dall'azione dell'acqua

Questo fatto, sicuramente positivo ed indice di un grande impegno di moltissimi produttori, ha reso difficile la scelta più appropriata della migliore soluzione al problema particolare.

Innanzitutto, per quanto concerne all'aspetto tecnico, si deve osservare come la funzione di tenuta idrica rappresenta solo una delle molteplici funzioni che sono svolte dai sistemi costruttivi. Solitamente il progettista rivolge la sua attenzione e approfondimento esclusivamente alla scelta dell'elemento di tenuta, cioè alla membrana impermeabilizzante.

Se questo appare non immotivato, è da osservare che il mantenimento nel tempo della funzione di tenuta richiede una analisi a sistema. Infatti molteplici sono le funzioni e gli strati funzionali che si integrano costruttivamente. La durata di una membrana impermeabile dipende quindi non solo dalla qualità intrinseca, ma anche dalle interazioni che si vengono a determinare tra gli strati ed elementi componenti all'interno di una specifica soluzione.

Quindi la durata di un prodotto per l'impermeabilizzazione dipende anche da altri fattori che possono ridurre in modo considerevole la service life. Proprio in ragione di ciò nella tesi non si parla di impermeabilizzazioni, ma di sistemi di impermeabilizzazione.

Nei prossimi paragrafi vengono date le principali informazioni riguardanti le diverse tipologie di prodotti:

- membrane prefabbricate in bitume-polimero;
- membrane prefabbricate sintetiche;
- membrane idroespansive;
- prodotti e sistemi da applicare in situ.

PREFABBRICATI	Membrane bitume-polimero	Bitume modificato		
		Plastomeriche	APP (polipropilene atattico)	
		Elastomeriche	SBS (stirene-butadiene-stirene)	
	Membrane sintetiche	Termoplastiche	PVC-P (policloruro di vinile plastificato)	
			HDPE (polietilene alta densità)	
			LDPE (polietilene bassa densità)	
			FPO (poliolefine flessibili)	
			TPO (poliolefine termoplastiche)	
			EPR (etilene propilene)	
			CPE (polietilene clorurato)	
			PIB (polisobutilene)	
			PP (polipropilene)	
		Termoplastiche-elastomeriche	E/P (etilene/propilene copolimero)	
			CSM (polietilene clorosolfonato monomero)	
			Elastomeriche	EPDM (etilene propilene diene monomero)
				IIR (isoprene isobutilene)
NBR (nitrile butadiene)				
CR (cloroprene)				
Membrane idroespansive	Geocompositi con bentonite			
	Bentonite pre-idratata			
	Bentonite trattata con polimeri			
DA APPLICARE IN SITU	Membrane liquide			
	Malta cementizia			
	Emulsione bituminosa			
	Profilati idroespansivi			
	Resine termoidurenti			

Tabella 10: Materiali per impermeabilizzazione

5.2. Membrane prefabbricate in bitume-polimero

Nei primi anni '60 il manto bituminoso tradizionale era costituito principalmente da carta bitumata ed era stato appena introdotto sul mercato il feltro di vetro bitumato di cui se ne apprezzava la stabilità dimensionale e la resistenza.

In quel periodo la chimica dei polimeri fece dei grossi passi avanti. Grazie alle scoperte del Prof. Natta, premio Nobel per la Chimica, si riusciva, nella catena polimerica, ad ordinare le molecole che altrimenti si unirebbero tra loro disordinatamente. La disposizione ordinata delle molecole conferisce, alla catena polimerica ottenuta, una maggior resistenza meccanica e una più elevata resistenza al calore e il polimero così ottenuto viene chiamato "ISOTATTICO", identificato dalla sigla IPP. Al contrario, il polimero dove le molecole sono disperse disordinatamente, viene invece chiamato "ATATTICO", identificato dalla sigla APP

Nel caso del polipropilene isotattico si ottengono resistenze meccaniche dell'ordine di 400 kg/cm² e resistenze al calore fino a 150°C. Il polipropilene atattico è invece più malleabile ed elastico, più simile alla gomma con allungamenti fino al 600%.

Inizialmente il processo di polimerizzazione stereospecifica produceva una resa in "isotattico" intorno al 90% ed il restante 10% era costituito da polipropilene atattico che, date le sue caratteristiche meccaniche, non trovava utilizzo nel settore della trasformazione delle materie plastiche ma trovò applicazione nella modifica dei bitumi.

Erano già note da tempo le modifiche dei bitumi stradali con gomma naturale e lattici di polimeri sintetici ma sia per ragioni economiche che tecniche (scarsa resistenza al calore) non avevano trovato applicazioni significative nel settore di fogli bituminosi per impermeabilizzazione.

La miscela bitume APP era invece molto resistente al calore con un punto di rammollimento di 150°C contro gli 85°C dei bitumi ossidati e ciò permise la produzione di fogli bituminosi armati con feltro di vetro da 50 g/m², i cui rotoli non rammollivano e non si afflosciavano al sole, come avveniva invece con il bitume ossidato spalmato sul vetro.

Attualmente sono in uso membrane prefabbricate bitume polimero che sono realizzate mediante una massa impermeabilizzante (il compound), una armatura e, ma non sempre, da elementi di finitura inferiore e superiore.

Il compound

Il compound di una membrana dopo l'introduzione dei polimeri, non ha subito grosse innovazioni. Oggi alcune membrane vengono realizzate unendo i due polimeri maggiormente utilizzati, l'APP (polipropilene atattico) e l'SBS (stirene-butadiene-stirene).

Il polipropilene atattico rientra nella categoria delle poliolefine e si ricava per polimerizzazione del propilene. Le membrane così ottenute vengono chiamate plastomeriche, in quanto il comportamento può essere assimilabile a quello di un materiale plastico. Il polipropilene atattico permette di ottenere membrane dalle seguenti caratteristiche:

- stabilità alle temperature elevate,
- flessibilità a freddo;
- basse deformazioni sotto carico di trazione.

Verso la fine degli anni '60 la Shell mise a punto una famiglia di polimeri elastomerici a caratteristiche termoplastiche; il copolimero stirolo-butadiene polimerizzato a blocchi (SBS) dove da “blocchi” di polistirene a caratteristiche plastiche si diramano catene di polibutadiene di caratteristiche elastiche, catene che possono essere lineari o radiali in funzione delle condizioni di polimerizzazione.

Questa particolare configurazione, conferisce al polimero un punto di rammollimento più netto, una volta raggiunta la temperatura di fusione del blocco polistirenico (80°C) il polimero diventa fluido quasi come una materia plastica e ciò lo rende più facilmente lavorabile con le stesse attrezzature delle materie plastiche, più veloci e meno costose di quelle della gomma e contrariamente a questa non necessita di vulcanizzazione.

Si dimostrò che la modifica dei bitumi distillati dava risultati estremamente interessanti come elasticità e flessibilità alle basse temperature, sufficienti come resistenza al calore.

Lo stirene-butadiene-stirene permette di ottenere delle membrane dalle caratteristiche migliorate:

- elevate deformazioni sotto carico di trazione;
- flessibilità a freddo.

Tali membrane non hanno resistenza ai raggi UV e, alle alte temperature, esse hanno una riduzione della consistenza il che non le rende idonee in climi caldi.

Oggi esistono anche membrane realizzate mediante due strati: quello soprastante in APP, quello sottostante in SBS. In questo modo si ottengono tre vantaggi:

- una buona resistenza al calore (dovuta all'APP);
- una buona flessibilità a freddo ed una buona resistenza alla lacerazione (SBS);
- posa in completa aderenza, consentita dalla presenza di un materiale di per sé adesivo (SBS).

Un altro aspetto positivo, rispetto al bitume tradizionale, è l'incremento della resistenza all'invecchiamento dato dai polimeri. Per infragilire un bitume ossidato è sufficiente un mese di invecchiamento accelerato a 70°C mentre dopo sei mesi di invecchiamento il compound bitume polimero è ancora flessibile.

Nel grafico seguente è possibile rilevare l'evoluzione del campo di stabilità dei diversi materiali con l'invecchiamento accelerato.

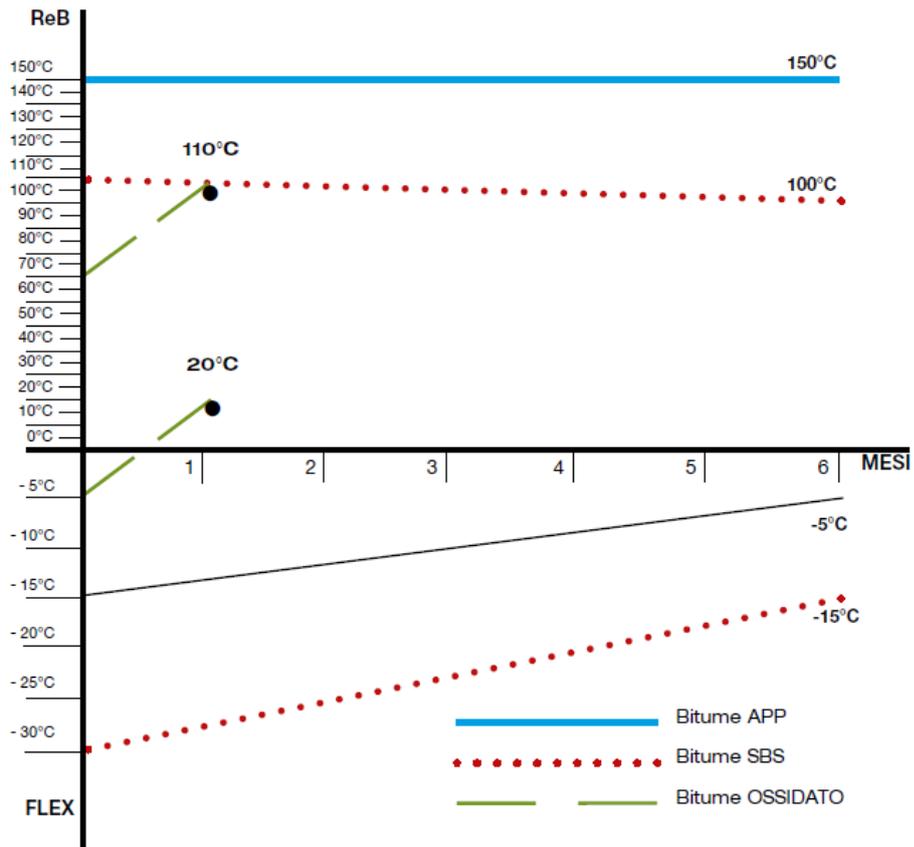


Figura 32: Grafico invecchiamento-resistenza flessionale (Fonte / Quaderno tecnico INDEX – Guida all'impermeabilizzazione)

L'armatura

L'introduzione delle prime armature nelle membrane, (membrane cosiddette prefabbricate), risale agli anni '60. Si può dire che senza armatura una membrana, su supporti anche limitatamente elastici, presenta problematiche di fessurazione. In generale quindi le proprietà meccaniche della membrana sono quasi esclusivamente dovute alla presenza di armatura.

I principali parametri che caratterizzano l'armatura e che modificano il comportamento finale della membrana sono:

- allungamento a rottura;
- resistenza alla lacerazione;
- resistenza a trazione;
- stabilità dimensionale.

Dopo il velo vetro che ha dato vantaggi in termini di stabilità dimensionale ma che non ha risolto i problemi di resistenza al punzonamento e di resistenza a fatica, si è utilizzato (anni '70) il tessuto non tessuto di poliestere da fiocco che ha dato alle membrane una maggiore elasticità, una maggiore resistenza al punzonamento ed una maggiore resistenza alla lacerazione. L'utilizzo poi di tessuto non tessuto da filo continuo ha poi fornito una maggiore isotropicità alla membrana.

Tuttavia, con questi tipi di armature, si ha ancora una non buonissima stabilità dimensionale a caldo e un coefficiente di dilatazione termica elevato. La tendenza, inoltre, a ridurre la grammatura di queste armature in poliestere, ha portato ad una riduzione delle resistenze meccaniche.

Si è arrivati, dopo la metà degli anni '90, all'utilizzo di armature composite (dette anche stabilizzate), cioè armature miste di rete (o filo) di vetro e poliestere che sommano i pregi delle due tipologie, fornendo così una buona resistenza al punzonamento, resistenza alla fatica e stabilità dimensionale.

L'armatura è realizzata mediante il trattamento contemporaneo di poliestere che viene stabilizzato con fibra di vetro.

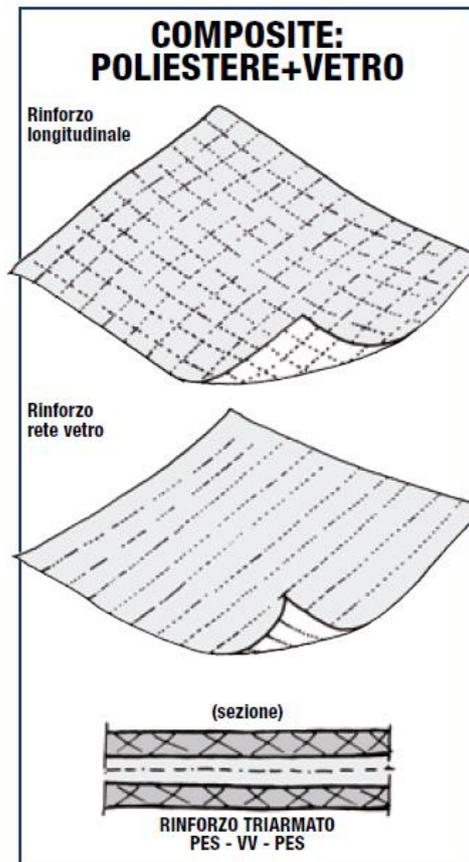


Figura 33: Armature composite (Fonte / Quaderno tecnico INDEX – Guida all'impermeabilizzazione)

Armatura	Bitume - APP		Bitume - SBS	
	Carico di rottura o carico massimo (N/5 cm)	Allungamento a rottura (%)	Carico di rottura o carico massimo (N/5 cm)	Allungamento a rottura (%)
Membrana armata velo vetro 50 g/m ² (L/T)	300/200	2/2	300/200	2 (*) (≥20) (†)
Membrana armata non tessuto di poliestere 160 g/m ² (L/T)	600/500	30 ÷ 50	600/500	30 ÷ 50
Membrana armata tessuto di vetro tipo DIN 200 g/m ² (L/T)	1.000/1.000	2/2	1.000/1.000	2/2

(*) Allungamento a rottura del velo vetro.
 (†) Allungamento a rottura della sola mescola Bitume - SBS dopo la rottura dell'armatura in velo vetro.

Figura 34: Resistenza a trazione e allungamento a rottura tipici delle membrane con mescola uguale (Fonte / Quaderno tecnico INDEX – Guida all'impermeabilizzazione)

Un elemento importante da considerare, in ogni caso, è che prestazioni meccaniche di alto rilievo non sono sempre necessarie, soprattutto in contesti tecnologici quali strutture monolitiche e poco sollecitate meccanicamente; è, quindi, importante, valutare volta per volta qual è la prestazione richiesta e, poi, decidere di conseguenza.

Le finiture

La finitura inferiore è quasi sempre realizzata mediante film termo-distruttibile che viene fuso dalla fiamma durante la fase di posa ed ha lo scopo di impedire che le spire della membrana non si incollino fra di loro durante lo stoccaggio. La finitura superiore può essere realizzata mediante una semplice talcatura oppure come una vera e propria protezione.

Di seguito vengono elencate le principali tipologie di finiture:

- talcatura serigrafata
- sabbiatura
- flamina
- goffratura
- autoprotezione minerale
- autoprotezione metallica
- tessuto non tessuto di poliestere
- finitura tessile

L'introduzione del film protettivo in fase di fabbricazione (le cosiddette membrane autoprotette) ha dato vantaggi in termini di maggiore durabilità della membrana in quanto impedisce alla radiazione solare di colpire direttamente la massa bituminosa. I tipi di protezione maggiormente usati sono quelli realizzati in scaglie di ardesia, di solito di colore grigio chiaro o rosso e in alluminio.

Negli ultimi anni sono stati presentati prodotti che utilizzano scaglie di ardesia ceramizzata anche di colore bianco, con un maggior coefficiente di riflessione e, quindi, un più ridotto assorbimento di calore da parte delle membrane.

Una innovazione più di tipo estetico che prestazionale è stata quella di trattare con differenti colorazioni le scaglie di ardesia che possono così realizzare decorazioni sulle coperture, "alleviando" un poco la forte omogeneità di una copertura realizzata in bitume polimero.

Le tipologie di posa

Le tipologie di posa correnti per le membrane bitume polimero sono essenzialmente quattro:

- in completa adesione;
- in semindipendenza;
- in indipendenza totale;
- con fissaggio meccanico;
- autoadesive.

Nel primo caso l'obiettivo principale è quello di evitare la trasmigrazione di acqua fra membrana e supporto; nel secondo caso l'obiettivo principale è quello di vincolare la membrana al supporto.

La posa in indipendenza consiste nel posare semplicemente la membrana su supporto senza alcun vincolo, con l'obiettivo principale di svincolare la membrana da eventuali movimenti del supporto; la posa con fissaggio meccanico consiste nel vincolare per punti o per linee la membrana al supporto, con l'obiettivo principale di limitare il vincolo con il supporto.

Le membrane autoadesive, hanno la caratteristica di aderire "intrinsecamente" al supporto, ottenendo così quell'aderenza che, in molti casi, è necessaria al fine di evitare delocalizzazione della membrana oppure per evitare che, in caso di guasto, l'acqua possa muoversi dalla zona di guasto ad altre zone con difficoltà di individuazione dello stesso. Le membrane autoadesive hanno il vantaggio di potere essere applicate senza fiamma e, quindi, con minori rischi in fase di esecuzione e la possibilità di applicazione anche su supporti sensibili alla sua azione, come, per esempio, il polistirene o il poliuretano.

5.3. Membrane prefabbricate sintetiche

Le membrane sintetiche più utilizzate per l'impermeabilizzazione delle fondazioni sono essenzialmente di due tipi:

- in cloruro di polivinile (PVC);
- a base di poliolefine (TPO o FPA).

A differenza delle membrane in bitume polimero possono o meno essere armate.

Il compound

Le materie sintetiche sono un prodotto connesso alla raffinazione del petrolio e, in particolare delle benzine. Attraverso un processo di scissione termica (cracking) la benzina grezza viene trasformata in diversi composti idrocarburici, necessari per la fabbricazione delle materie prime.

Nell'ambito dell'impermeabilizzazione le materie sintetiche maggiormente utilizzate sono il cloruro di polivinile (PVC), di tipo plastomerico e le poliolefine (TPO o FPA). I plastomeri, detti anche polimeri termoplastici sono formati da catene molecolari filiformi non legate tra loro. Se riscaldati, diventano plasmabili e, con il successivo raffreddamento, riacquistano la rigidità iniziale, mantenendo la geometria acquisita durante la lavorazione a caldo.

Le poliolefine sono un sottogruppo degli idrocarburi. Ad esse appartengono il polietilene ed il polipropilene. Attraverso particolari processi chimici e fisici le poliolefine vengono fatte diventare flessibili, quindi adatte ad essere facilmente sagomate geometricamente. La flessibilità deriva dal fatto di aumentare la distanza tra le catene molecolari, riducendo le forze di attrazione intramolecolare.

Il processo di flessibilizzazione (Figura 35) è di tipo interno in quanto già durante il processo di fabbricazione del polimero viene inserito un componente (comonomero) che esplica la funzione di distanziatore all'interno della catena molecolare. In questo modo non è possibile la migrazione, fenomeno invece tipico del PVC.

Caratteristiche importanti da valutare sono la stabilità dimensionale (maggiore è il valore, migliore è il prodotto), la flessibilità a freddo (maggiore in valore assoluto è il valore, migliore è il prodotto); la resistenza all'urto (maggiore è il valore, migliore è il prodotto), invecchiamento termico (minore sono le differenze fra i valori misurati prima della prova e dopo la prova, miglior è il prodotto). La permeabilità al vapore deve essere valutata in relazione alle condizioni igrometriche dell'ambiente interno, così come la resistenza alla grandine, che dipende dalle condizioni di contesto.

In ogni caso tali caratteristiche sono da valutarsi in relazione al contesto d'uso, al contesto ambientale ed alla specifica soluzione tecnica.

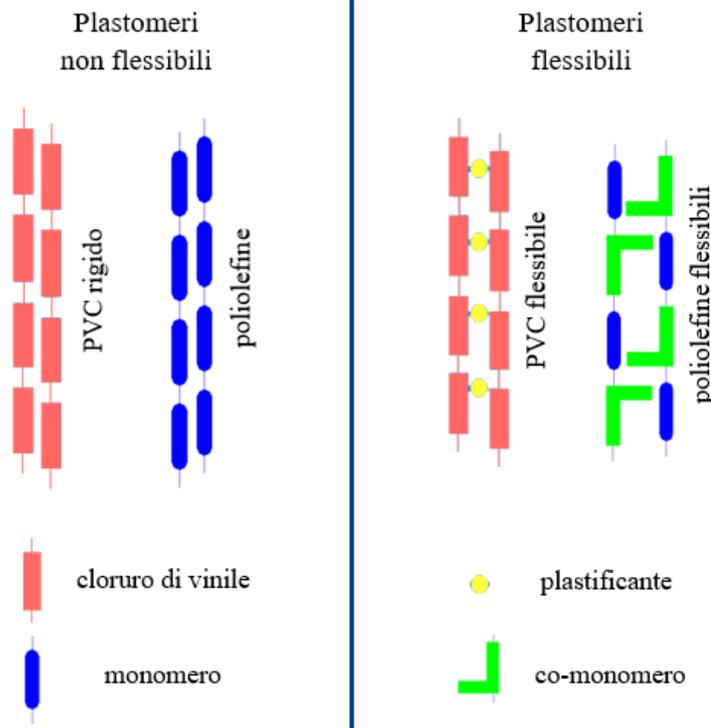


Figura 35: Flessibilizzazione PVC e FPO

L'armatura

Le membrane sintetiche generalmente non armate; la necessità di inserire un'armatura o meno dipende essenzialmente dal processo di fabbricazione. Tuttavia, si può affermare che le membrane in PVC sono quasi totalmente armate, mentre le membrane in poliolefine non sempre.

Le armature normalmente utilizzate sono il velo vetro ed il poliestere che conferiscono una certa stabilità dimensionale e migliori proprietà meccaniche.

Le finiture

Il genere i manti sintetici non sono dotati di pellicole o strati di finitura. In alcuni casi, al fine di evidenziare chiaramente il verso di posa o la correttezza delle procedure di posa, i prodotti sono realizzati bi-colore per distinguere lo strato superiore da quello inferiore.

Le tipologie di posa

Le tipologie di posa correnti per le membrane sintetiche sono essenzialmente due:

- in indipendenza totale;
- con fissaggio meccanico.

La posa in indipendenza consiste nel posare semplicemente la membrana su supporto senza alcun vincolo, con l'obiettivo principale di svincolare la membrana da eventuali movimenti del supporto; la posa con fissaggio meccanico consiste nel vincolare per punti o per linee la membrana al supporto.

5.4. Membrane idroespansive

Tra i sistemi impermeabilizzanti per le strutture sottoquota, si annoverano anche prodotti che sfruttano i principi fisici attivi di un particolare tipo di terreno: la bentonite.

La bentonite è una argilla di origine vulcanica datata circa 50 – 130 milioni di anni fa ed ha l'importante proprietà di aumentare di volume se viene a contatto con l'acqua.

La bentonite oggi normalmente utilizzata è quella di sodio ed è composta principalmente dal minerale montmorillonite (il contenuto può variare da un minimo del 70 fino a quasi il 100%, in genere è almeno l'80%) che è costituito, principalmente, da silicio ed alluminio e sodio.

Per comprendere meglio come funziona questo materiale, è necessario conoscere la sua struttura chimica (Figura 36). Esso è un solido composto a strati sovrapposti. Un solido a strati è caratterizzato dal fatto che i costituenti del singolo strato sono legati in modo forte, mentre i legami tra strati adiacenti sono deboli, in genere forze dette di “van der Waals”.

Nello spazio fra gli strati si possono inserire ioni o molecole neutre, causando un certo aumento di volume della struttura. L'inserimento di questi ioni è reversibile, ne consegue che vi possono essere più cicli di aumento-ritiro di volume. L'aumento è considerevole, pari a circa ad alcune decine di volte il volume iniziale.

L'acqua si comporta come un agente espandente: essa viene trattenuta fra gli strati di bentonite con legami molto forti che le impediscono di oltrepassare quest'ultima. La bentonite acquisisce così una struttura colloidale con una impermeabilità molto elevata, simile a quella delle impermeabilizzazioni realizzate in bitume polimero o sintetiche.

È importante che vi sia un confinamento della bentonite in quanto, in caso contrario, il processo di aumento di volume porta quest'ultima a divenire sempre più liquida, fino a perdere le proprietà impermeabilizzanti.

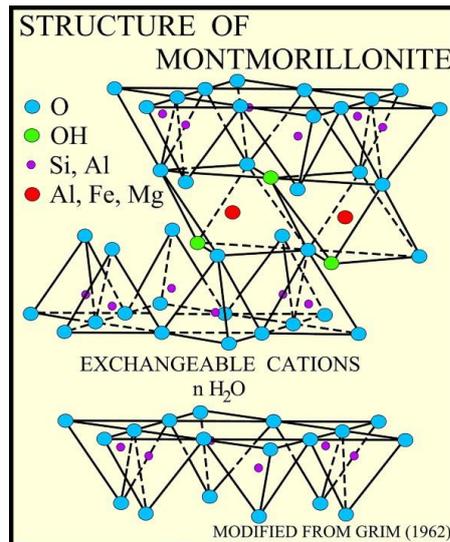


Figura 36: Struttura molecolare bentonite (Fonte / <http://www.bentonite.it/struttura-della-bentonite.php> [02/10/2017])

In Italia l'utilizzo della bentonite in edilizia, per l'impermeabilizzazione di opere interrato, sia per parti verticali che orizzontali, è data da circa un decennio. Essa viene prodotta sotto forma di pannelli, di cordoli, di profilati o di teli, questi ultimi anche di grandi dimensioni. In genere la bentonite è rivestita con altro materiale sia per un semplice confinamento legato al trasporto e messa in opera, sia per variarne alcune proprietà. I pannelli sono prodotti, fra gli altri, con rivestimento in cartone, con pellicole in HPDE o con tessuti non tessuti di varia grammatura, con spessori di pochi centimetri.

I teli possono essere realizzati anche con filo di poliestere che viene inserito nella massa bentonitica per migliorare le caratteristiche meccaniche. Gli spessori sono, in genere, di alcuni millimetri. I cordoli vengono prodotti soprattutto con funzioni di giunto di ripresa o sigillatura di piccoli interspazi.

Le principali famiglie di prodotti utilizzati sono:

- bentonite allo stato naturale;
- bentonite trattata mediante polimeri e resistente agli inquinanti chimici;
- bentonite pre-idratata e resistente agli inquinanti chimici.

Come si può evincere dalla terminologia, le ultime due famiglie derivano dalla prima ma hanno una prestazione aggiuntiva, quella di resistenza ad alcuni agenti chimici (sostanzialmente ioni calcio) che implicherebbero, sostanzialmente, una difettosità nella tenuta all'acqua.

La bentonite trattata mediante polimeri, nasce dalla bentonite allo stato naturale alla quale vengono aggiunti alcuni polimeri (la cui composizione è, in genere, coperta da brevetto) che prevengono l'azione degli ioni "inquinanti". La bentonite pre-idratata nasce anch'essa dalla bentonite allo stato naturale, ma subisce una serie di fasi principali fra le quali una prima fase di idratazione, dove vengono aggiunti, alla

bentonite, polimeri in soluzione acquosa che la stabilizzano. La bentonite si trova così allo stato di gel. Successivamente essa viene addensata ed acquisisce quindi una propria auto-portanza. L'ultima operazione è, in genere, l'applicazione di un rivestimento.

È possibile, ai fini della resistenza agli agenti chimici, utilizzare anche bentonite allo stato naturale, cioè secca, ed effettuare una pre-idratazione a piè d'opera, con acqua pulita.

Uno specifico utilizzo della bentonite consiste nella possibilità di operare in situazioni con presenza di "oggetti", quali barre di armatura o tubazioni, che attraversano l'elemento di tenuta.

Infatti, la bentonite, a contatto con acqua, aumenta di volume ed occlude in maniera completa lo spazio fra sé stessa e l'oggetto attraversato. In questo modo viene garantita la tenuta. In questo senso, l'eventuale presenza di lesioni dovute, per esempio, ad assestamento o a ritiro di pareti in calcestruzzo, entro alcuni millimetri, viene "assorbita" dalla bentonite, che si introduce nell'interspazio formatosi e crea nuovamente la continuità di tenuta.

Anche la presenza di particolari geometrie (elementi curvi, per esempio) non crea problemi di tenuta in quanto è possibile ritagliare i pannelli/teli, in maniera molto semplice, adattandoli per quanto possibile: l'interspazio che dovesse rimanere si può, successivamente, completare con iniezioni localizzate di bentonite.

5.5. Prodotti e sistemi da applicare in situ

La definizione esatta, riguardante gli impermeabilizzanti da applicare in situ, è estremamente complessa, per l'insieme innumerevole di prodotti che compongono questa categoria, impiegati sin dalle origini delle costruzioni create dall'uomo.

Nel corso dei secoli i supporti e quindi i materiali impiegati hanno subito notevoli cambiamenti. L'elenco delle materie impiegate per la formulazione dei prodotti impermeabilizzanti è veramente ampio; di seguito sono indicati solo alcuni prodotti che negli ultimi decenni sono stati utilizzati per risolvere le problematiche inerenti all'impermeabilizzazione degli edifici interrati.

Una doverosa precisazione, è la distinzione tra prodotti e sistemi. I prodotti sono i singoli formulati, ma per meglio curare tutti i dettagli di una costruzione bisogna affidarsi a dei sistemi, in altre parole ad una serie di prodotti progettati per unirsi tra loro.

I prodotti impermeabilizzanti di questa categoria comprendono varie tipologie di formulati, partendo dalle materie prime che le compongono si possono così dividere:

- prodotti a base di resine termoindurenti: epossidiche, poliuretaniche, poliestere, con varie combinazioni di cariche ed additivi (es. epossicatrame);
- prodotti a base di resine termoplastiche: acriliche, viniliche, poliuretaniche, a volte denominate commercialmente “guaine liquide”;
- prodotti a base bituminosa: formulati come prodotti liquidi od in pasta, combinati con altre resine o additivi;
- prodotti a base cementizia: monocomponenti, bicomponenti, pronti all’uso, oppure partendo da miscele di cemento ed inerti confezionati sul posto con l’ausilio di additivi specifici;
- additivi: idrofobi, in polvere, cristallini;
- profilati per giunti e riprese di getto;
- profili idroespansivi.

I formulati per la realizzazione di questi prodotti hanno avuto negli anni estreme variazioni, legati essenzialmente alle ricerche tecnologiche svolte sul calcestruzzo, che rimane il materiale che ha la più alta diffusione per la costruzione in ambito interrato, per questa ragione si è passati da sistemi completamente resinosi come le epossidiche a sistemi misti come i formulati cementizi-polimerici, seguendo la teoria del basso modulo elastico, sviluppando quindi prodotti in grado d’adattarsi alle deformazioni del supporto.

La caratteristica fondamentale è che questi materiali impermeabilizzanti si possono adattare alla struttura esistente in modo da seguirne ogni modulazione.

Di basilare importanza, come per tutti i sistemi impermeabilizzanti, è la considerazione che la struttura deve essere in grado di resistere strutturalmente alla spinta idraulica, mentre il sistema impermeabilizzante la rende ermetica all’acqua.

Accade che, nell’utilizzo di prodotti da “applicare in situ”, la loro semplicità d’uso e il fatto che a volte si applicano internamente, portino a dimenticare quest’importantissima e basilare regola di comportamento.

Gli ambiti d’impiego dei sistemi impermeabilizzanti di questa categoria sono l’impermeabilizzazione sia in presenza di falda e sia “d’acqua non in pressione”, con particolare propensione all’impermeabilizzazione a “sacchetto interno” ed alla riparazione o sistemazione interna di sistemi impermeabilizzanti esterni; l’interesse nell’applicazione di questi sistemi nasce dalle seguenti peculiarità:

- possibilità d’impermeabilizzare sia in spinta positiva sia in controspinta;
- essere compatibile con altri prodotti impermeabilizzanti oppure di complemento nella realizzazione d’alcuni particolari esecutivi;
- essere facilmente utilizzabili dagli operatori edili senza l’ausilio di particolari attrezzature;
- possibilità di realizzare l’impermeabilizzazione in tempi successivi ed a distanza di tempo;
- contenere l’onere delle opere accessorie all’impermeabilizzazione.

Alcune caratteristiche di questi prodotti d'impermeabilizzazione sono:

- **RESINE TERMOINDURENTI**
 - adesione al calcestruzzo;
 - necessitano a volte di primer e l'umidità del supporto può essere discriminante per l'adesione;
 - la preparazione del supporto deve essere eseguita in relazione al tipo di formulato;
 - la riparazione delle eventuali perdite potrebbe essere localizzata agevolmente, e riparata con altri prodotti dall'interno.

- **RESINE TERMOPLASTICHE**
 - in adesione al calcestruzzo:
 - normalmente hanno il pregio di poter essere applicate anche su supporti umidi, senza l'ausilio di primer;
 - possono avere dei tempi relativamente lunghi d'indurimento soprattutto in presenza d'elevata umidità e temperature basse;

la riparazione delle eventuali perdite potrebbe essere localizzata agevolmente, e riparata con altri prodotti dall'interno.

- **PRODOTTI BITUMINOSI**
 - non sempre hanno un'ottima adesione al calcestruzzo;
 - alcuni formulati non garantiscono la “non trasmigrazione” dell'acqua;
 - normalmente hanno il pregio di poter essere applicate anche su supporti umidi, l'utilizzo di primer può essere richiesto;
 - possono avere dei tempi relativamente lunghi d'indurimento soprattutto in presenza di elevata umidità e temperature basse;
 - la riparazione delle eventuali perdite potrebbe essere localizzata agevolmente, e riparata con altri prodotti dall'interno;
 - i prodotti in pasta se applicati con spessori adeguati hanno la caratteristica di avere un buon bridging.

- **PRODOTTI CEMENTIZI**
 - ottima adesione al calcestruzzo; alcune formulazioni sono studiate per avere una penetrazione all'interno della struttura porosa del calcestruzzo;
 - la preparazione dei supporti deve essere eseguita normalmente con un semplice idrolavaggio in pressione;
 - la riparabilità, soprattutto nelle applicazioni interne, un'estrema economicità: infatti, l'ispezione della fuoriuscita d'acqua è totale e diretta, quindi si può intervenire localmente ripristinando solo la zona interessata, senza avere nessun problema d'adesione tra vecchio prodotto e l'applicazione corrente;

- la completa aderenza dei prodotti cementizi e la loro compatibilità con il calcestruzzo hanno poi dimostrato che non sussistono fenomeni di trasmigrazione dell’acqua, né tanto meno fenomeni di deformazione del prodotto;
 - il contatto con acque aggressive generalmente, se non particolarmente acide, non provoca nessun’alterazione del sistema d’impermeabilizzazione cementizio;
 - nelle applicazioni interne si possa ridurre in modo considerevole il fenomeno della carbonatazione;
 - i prodotti cementizi ad elevata deformabilità hanno vantaggio di poter superare il crack-bridging se applicati in spessori adeguati;
 - i prodotti a base cementizia possono essere utilizzati, seguendo le opportune specifiche anche nelle ristrutturazioni interne di edifici esistenti.
- **ADDITIVI**
 - *idrofobi*, a base di saponi o catene lunghe di derivati degli acidi grassi, oli vegetali e petrolio, che garantiscono una azione idro-repellente lungo le pareti delle porosità aperte, lasciandole comunque tali;
 - *in polvere*, sia inerti sia chimicamente attivi (fra i quali possono essere inclusi i materiali sostitutivi del cemento), che agiscono quali “densificanti” della struttura porosa del calcestruzzo, limitando in tal modo l’ingresso ed il movimento dell’acqua;
 - *cristallini*, composti da materiali inorganici veicolati da una miscela di cemento e sabbia, che, a motivo della loro natura altamente idrofila, reagiscono con l’acqua e con i prodotti di idratazione del cemento per formare cristalli di idrosilicati di calcio, che vanno ad aumentare la densità della relativa fase, ed altri precipitati in grado di depositarsi nelle porosità e nelle microfessure esistenti richiudendole. I meccanismi di reazione di tali additivi sono i medesimi che governano la idratazione del cemento e dunque la formazione degli idrosilicati di calcio: ciò fa sì che i prodotti di tali reazioni possano integralmente legarsi con la struttura della pasta cementizia idratata, contribuendo in maniera significativa ad aumentare la resistenza del conglomerato alla penetrazione dell’acqua, anche sotto significativo gradiente idraulico. Tale effetto impermeabilizzante può conseguirsi sia mescolando l’additivo in polvere direttamente alla miscela dei componenti del calcestruzzo sia utilizzando l’additivo stesso per il confezionamento di una “boiaccia”, da applicarsi quindi agli elementi in calcestruzzo come un “convenzionale” trattamento idrorepellente che ha caratteristiche di adesione e fusione con il supporto estremamente interessanti.

- PROFILATI PER GIUNTI E RIPRESE DI GETTO
 - elevata resistenza alla trazione e all’allungamento;
 - flessibilità permanente;
 - adatti in presenza di pressione idrostatica;
 - resistenti a numerosi agenti chimici;
 - possibilità di saldatura mediante aria calda;
 - disponibili in diverse sezioni geometriche e dimensioni per soddisfare qualsiasi esigenza.

- PROFILI IDROESPANSIVI
 - rigonfia a contatto con l’acqua assicurando una perfetta tenuta;
 - resiste permanentemente all’acqua, nessuna disgregazione o dilavamento;
 - pellicola protettiva che ne impedisce un prematuro rigonfiamento;
 - facile da applicare;
 - ideale per combaciare con qualsiasi dettaglio costruttivo;
 - resistente all’acqua in pressione;
 - non sono richiesti tempi di indurimento o saldature;
 - può essere applicato su substrati irregolari o con diverse geometrie;
 - gamma diversificata di sezioni per le diverse esigenze;
 - nessun tempo di attesa tra la posa del profilato e il getto di calcestruzzo;
 - mantiene nel tempo le caratteristiche espansive.

Bibliografia essenziale

- CROCE S., FIORI M., *“Sistemi di impermeabilizzazione, guida alla progettazione”*, BEMA EDITRICE, Milano, 2005;
- BRAC E. M. G., FERRARA L., *“Impermeabilizzazione del calcestruzzo integro e fessurato mediante additivi cristallizzanti”*, POLITECNICO DI MILANO, Milano, 2016;
- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., *“Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione”*, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- INDEX, *“Guida all'impermeabilizzazione: i materiali per l'impermeabilizzazione, loro caratteristiche, cenni storici”*, 2014;

Capitolo 6

APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI IMPERMEABILIZZAZIONE TIPO A

6.1. Considerazioni generali

In questo capitolo viene sviluppata l'applicazione dei sistemi di tenuta a "sacchetto", ovvero di Tipo A, descritta nel cap. 4.2.

Le ragioni che hanno spinto a dedicare un intero capitolo a questo argomento, e quindi a dare un maggiore approfondimento al sistema Tipo A rispetto agli altri sistemi (B protezione strutturalmente integrata e C, protezione a cavità drenata), si possono così sintetizzare:

- La protezione a sacchetto è il sistema di gran lunga più frequentemente impiegato per sotterranei profondi o comunque con un'immersione permanente o frequente in falda; tale maggiore diffusione giustifica pertanto il maggiore spazio dedicato al sistema.
- Mentre per i sistemi B e C esistono di fatto dei riferimenti normativi precisi (regolamento per le strutture in c.a. e norme UNICEMENTO; standard progettuali per le reti di drenaggio e gli impianti di sollevamento acque), per la protezione a "sacchetto", si ha una lacuna normativa. Il presente capitolo intende pertanto, per quanto possibile, colmare questa lacuna normativa, classificando i principali sistemi di impermeabilizzazione e, per ciascuno, fornendo una matrice di applicabilità ai diversi sistemi di protezione (Ae, Aer, As, Ai).

6.2. Membrane prefabbricate non in adesione alla struttura

Per l'impermeabilizzazione di strutture interrato, con manti non in adesione alla struttura, si utilizzano oggi manti impermeabili sintetici a base di PVC-P (PoliVinilCloruro Plastificato) o TPO (Poliolfine Termoplastiche).

Per facilitare le operazioni di posa in opera si richiede a questi manti impermeabili sintetici un'adeguata flessibilità. La flessibilità si può ottenere intervenendo direttamente nella catena molecolare.

Nei manti impermeabili in PVC-P, il plastificante è inserito tra una catena molecolare e l'altra del polimero ed il legame è di tipo fisico. In questo caso si parla di "flessibilizzazione esterna". Nei manti impermeabili TPO si utilizza come elemento flessibilizzante un co-monomero, che è parte integrante della catena molecolare del polimero. Il legame è di tipo chimico. In questo caso si parla di "flessibilizzazione interna".

Il manto sintetico viene posato a secco e successivamente saldato. I manti vengono saldati per termo-fusione, cioè i due lembi della sovrapposizione vengono portati a temperatura di fusione molecolare e saldati tra loro, ottenendo così la perfetta continuità tra i vari teli. La saldatura ad aria calda può essere realizzata secondo due diverse metodologie:

- sistema automatico per saldature standard e di prefabbricazione;
- sistema manuale per saldature standard e per i dettagli.

Il metodo di posa è a secco e ciò permette al manto impermeabile di essere totalmente indipendente dal supporto e dagli strati di controspinta sovrastanti. I movimenti e le conseguenti fessurazioni delle strutture di supporto e degli strati di controspinta, dovuti principalmente agli assestamenti, ai carichi dinamici ed alle dilatazioni termiche non si ripercuotono sul telo impermeabile che ha la possibilità di uno scorrimento relativo. Questo fenomeno è maggiormente evidente in strutture soggette ad assestamenti strutturali e a carichi dinamici.

Caratteristiche specifiche

I manti impermeabili in PVC-T e TPO possiedono entrambi ottime proprietà meccaniche, ad esempio elevata resistenza alla perforazione ed eccellente allungamento biassiale.

I manti impermeabili TPO vantano inoltre ulteriori vantaggi. Sono dimensionalmente stabili anche se sottoposti a pressione continua, ed a diretto contatto con eventuali liquidi aggressivi presenti nell'acqua di falda non modificano la propria struttura molecolare. Ne conseguono caratteristiche di resistenza all'invecchiamento molto elevate. La flessibilità dei manti impermeabili sintetici consente una posa in opera sicura e razionale.

Contro acqua in pressione

In presenza di acqua in pressione, anche i più impercettibili difetti dell'impermeabilizzazione comportano infiltrazioni d'acqua. Le infiltrazioni non sono solo antiestetiche, ma possono anche limitare la funzionalità della costruzione e causare elevati danni. In presenza di acqua in pressione si dovrebbero perciò utilizzare solo sistemi d'impermeabilizzazione che consentano di localizzare rapidamente le perdite e di ripristinare in modo semplice e sicuro l'impermeabilità.

6.2.1. Sistema monostrato semplice

Il sistema d'impermeabilizzazione monostrato è realizzato utilizzando vari materiali. Il sistema consente di adattare perfettamente l'impermeabilizzazione alle condizioni specifiche locali ed all'utilizzazione finale della costruzione. È diffusamente utilizzato, per evidenti ragioni di vantaggio economico.

Eventuali difetti dell'impermeabilizzazione, infatti, possono manifestarsi anche con notevole ritardo rispetto alla conclusione dei lavori (ad esempio per la risalita della falda e conseguente aumento delle pressioni), e non sono in genere eliminabili in modo semplice. Le particolari caratteristiche di questo sistema lo rendono viceversa idoneo per applicazioni in presenza di acqua non in pressione.

SISTEMA	Orizzontale	Verticale
(AE) Sistema Esterno	Non consigliato	Non consigliato
(AER) Sistema Rovescio	Non consigliato	Non consigliato
(AS) Sistema Sandwich	Non consigliato	Non consigliato
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 11: Applicabilità sistema monostrato semplice

6.2.2. Sistema monostrato compartimentato con dispositivi di controllo ed iniezione

In questo sistema d'impermeabilizzazione si realizza un'intercapedine tra il manto sintetico e la superficie in calcestruzzo. L'intera superficie impermeabilizzata viene suddivisa in singoli settori (dimensione fino a 180 m² per l'orizzontale e metrature inferiori per il verticale) con particolari nastri di separazione, che verranno conglobati nel successivo getto (waterstop).

Degli elementi di controllo collegano ogni settore con l'interno dell'edificio e consentono una tempestiva individuazione delle infiltrazioni d'acqua.

Grazie alla suddivisione in settori, le perdite sono confinate e localizzate rapidamente. Iniettando nell'intercapedine danneggiata, attraverso gli elementi di controllo, una specifica sostanza reagente, la perdita può essere riparata in modo semplice e sicuro.

SISTEMA	Orizzontale	Verticale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Adatto
(AER) Sistema Rovescio	Adatto	Adatto
(AS) Sistema Sandwich	Adatto	Adatto
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 12: Applicabilità sistema monostrato compartimentato

6.2.3. Sistema doppio strato con controllo ed iniezione

Questo sistema di impermeabilizzazione si basa sullo stesso principio del sistema monostrato compartimentato con sistema di controllo ed iniezione, consentendo inoltre di individuare un danneggiamento dell'impermeabilizzazione durante la fase di costruzione grazie all'impermeabilizzazione continua in doppio strato, con formazione di campiture realizzate mediante saldature a tenuta stagna dei manti impermeabili. L'impiego di un manto impermeabile sintetico con la faccia inferiore bugnata crea un'intercapedine tra i due strati dell'impermeabilizzazione.

L'ermeticità di queste intercapedini (dimensione fino a 80 m² per l'orizzontale, e metrature inferiori per il verticale) può essere verificata in qualsiasi momento con la creazione di un vacuum. È possibile realizzare un collaudo oggettivo del sistema impermeabile, verbalizzando i risultati delle prove di tenuta. L'impermeabilità dei singoli settori può all'occorrenza essere ripristinata con l'iniezione di una specifica sostanza reagente attraverso gli elementi di controllo ed iniezione.

SISTEMA	Orizzontale	Verticale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Adatto
(AER) Sistema Rovescio	Adatto	Adatto
(AS) Sistema Sandwich	Adatto	Adatto
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 13: Applicabilità sistema doppio strato compartimentato

6.3. Membrane prefabbricate in completa adesione alla struttura

Questi tipi di membrane esistono da più di trent'anni e si sono affermate soprattutto nei paesi anglosassoni, in America e nel nord Europa, mentre è solamente recentemente che hanno iniziato a diffondersi sul mercato italiano.

La caratteristica di questi materiali è quella di essere applicati alla superficie della struttura in maniera da realizzare una completa adesione alla struttura stessa. L'applicazione avviene a freddo senza l'utilizzo di fiamme, sfruttando l'autoadesività della membrana al supporto; anche i sormonti dei teli successivi vengono realizzati per semplice sovrapposizione autoadesiva.

Questo loro particolare sistema di applicazione li rendono particolarmente sicuri e stanno diventando sempre più popolari dopo la messa in vigore delle nuove leggi sulla sicurezza nei cantieri.

La capacità propria di questi prodotti di realizzare una completa adesione alla struttura da proteggere, è una caratteristica estremamente importante, perché impedisce di fatto, in caso di infiltrazione, che l'acqua possa scorrere tra la membrana stessa e la superficie della struttura, rendendo praticamente impossibile l'individuazione e localizzazione della rottura.

Considerando che la struttura è interrata, risulta veramente non agevole, anzi, praticamente impossibile, ispezionare le superfici esterne interrate per riparare l'eventuale danneggiamento.

La completa adesione riduce di fatto il rischio perché, se il danneggiamento avviene, esso è facilmente localizzabile ed è pertanto possibile eseguire una riparazione dall'interno della struttura con un intervento localizzato. Il sistema di impermeabilizzazione diventa quindi come una vera e propria "seconda pelle" della struttura che la avvolge completamente ed uniformemente.

Le membrane autoadesive possono essere suddivise, a loro volta, in due gruppi principali:

- Membrane autoadesive post getto (cioè applicabili a strutture ormai realizzate ed esistenti).
- Membrane autoadesive pre-getto (cioè applicabili ai supporti delle strutture ancora da gettare).

I prodotti appartenenti al primo gruppo sono generalmente costituiti da un composto in bitume mescolato con elastomeri SBR o SBS, il tutto accoppiato ad un film di materiale plastico, generalmente Polietilene ad alta densità o PVC che funge da film superficiale di rinforzo.

Il supporto di applicazione deve essere abbastanza liscio senza particolari protuberanze od avvallamenti che dovranno essere rimossi o regolarizzati con malta cementizia. È consigliabile, per garantire una piena adesione al supporto, l'applicazione di una mano di primer specifici.

Il sistema d'impermeabilizzazione che viene realizzato è generalmente applicato in monostrato anche se, in alcuni casi particolari, è comunque possibile l'applicazione in doppio strato.

Il sistema deve essere protetto dai danneggiamenti che possono derivare dal traffico di cantiere e dal successivo rinterro e generalmente dall'esposizione diretta e permanente ai raggi UV. Esistono dei tipi particolari con film superficiali in alluminio o in rame che quindi possono resistere all'azione dei raggi UV ma non vengono generalmente utilizzati per applicazioni in interrato.

I limiti del prodotto sono generalmente quelli imposti dall'utilizzo di materie prime particolari che, per conferire al prodotto stesso le necessarie caratteristiche di grande elasticità ed elevato allungamento, lo rendono di fatto sensibile all'esposizione ai raggi UV e ne richiedono la protezione meccanica dai danneggiamenti che potrebbero derivare dal successivo rinterro o dalle lavorazioni di cantiere eseguite dopo la loro messa in opera.

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Non consigliato Preferibile il tipo pre-getto
(AER) Sistema Rovescio	Non adatto Preferibile il tipo pre-getto	Non consigliato Preferibile il tipo pre-getto
(AS) Sistema Sandwich	Non adatto Preferibile il tipo pre-getto	Non consigliato Preferibile il tipo pre-getto
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 14: Applicabilità membrane autoadesive post getto

Al secondo gruppo invece appartengono una serie di prodotti, di recente sviluppo, che sfruttano gli stessi concetti di completa adesione sopra descritti, con la differenza che queste membrane vengono applicate ai supporti sia orizzontali che verticali contro i quali verrà successivamente realizzata la struttura. Questi sistemi verranno posati quindi prima che vengano realizzati i getti di calcestruzzo. Per questa particolarità e per una logica differenziazione tale sistema viene appunto definito come "autoadesivo pre-getto".

Esempi classici di applicazione sono:

- 1) applicazione orizzontale su magrone di supporto al successivo getto della platea armata continua (Ae)
- 2) applicazione verticale alle superfici di supporto dei successivi getti dei muri strutturali verticali (Aer, As, Ai), quali ad esempio:
 - muri verticali di edifici confinati esistenti
 - diaframmi e berlinesi
 - paratie
 - palancole

Il sistema è costituito da un accoppiamento di un elemento di supporto con una matrice particolare che garantisce l'adesione continua del supporto della membrana al getto di calcestruzzo fresco, eseguito direttamente contro la membrana stessa.

Il meccanismo di azione si esplica attraverso un legame di tipo fisico-meccanico (interlock), tra la matrice morbida della membrana e la parte rigida del calcestruzzo che si indurisce durante la sua maturazione. L'effetto finale è quello di una adesione continua ed omogenea e particolarmente tenace.

Il sistema viene messo in opera sempre in monostrato. La giunzione tra due teli contigui viene realizzata sempre a freddo, per incollaggio in auto-adesione, lungo una cimosa apposta che corre lungo tutto un lato del rotolo. Per le giunzioni di testa o in assenza di flangia viene utilizzato un nastro apposito sempre autoadesivo a freddo.

Il sistema è autoprotetto e non necessita quindi di protezione meccaniche aggiuntive, non viene quindi interposto nulla tra la membrana e il getto strutturale successivo. Il sistema può rimanere esposto all'ambiente, prima di essere ricoperto dal getto, per periodi abbastanza lunghi, fino a circa 40 giorni, senza che perda le sue caratteristiche.

Il sistema non teme le piogge ma i sormonti in genere devono essere realizzati non in presenza di acqua.

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Non possibile Adottare autoadesive post getto	Adatto Solo con platea continua
(AER) Sistema Rovescio	Adatto	Adatto Solo con platea continua
(AS) Sistema Sandwich	Adatto Solo con contromuri gettati	Adatto Solo con platea continua
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 15: Applicabilità autoadesive pre-getto

6.4. Membrane idroespansive

Le criticità da conoscere in fase di progetto sono legate a:

- composizione delle acque presenti nel sito. Infatti le bentoniti naturali non trattate, incontrano problemi di idratazione e, quindi, di aumento di volume, quando vengono a contatto con alcuni ioni, in particolare lo ione calcio ed i cationi magnesio, ammonio e potassio, quindi con acque ad elevato contenuto di sali. Questi possono trovarsi disciolti in acqua e sostituiscono gli ioni sodio presenti nella bentonite, riducendo così le capacità espandenti. Il problema esiste anche se la bentonite si è già idratata: in questo caso si assiste al suo ritiro, detto anche flocculazione, e, quindi alla perdita delle proprietà di tenuta all'acqua;
- il confinamento della bentonite. Infatti è necessario che l'idratazione sia confinata, cioè che vengano esercitate pressioni sul pannello/telo, in modo tale evitare la sua perdita di densità e, quindi, di impermeabilità all'acqua. Dovranno essere quindi presenti o il terreno oppure elementi in calcestruzzo;
- le condizioni idrostatiche. In presenza di falda (o in previsione di un suo innalzamento sopra il livello delle fondazioni) è necessario prevedere la completa continuità (sia orizzontale che verticale) dell'elemento di tenuta. Sarà quindi necessario prevedere anche una platea di fondazione in grado di resistere, come d'altronde anche le pareti perimetrali, alla spinta dell'acqua. In assenza di falda sarà invece possibile intervenire con semplici giunti a tenuta nelle zone di ripresa di getto (fondazioni/ parete e parete/solaio a terra).

Le principali prestazioni dell'elemento di tenuta da controllare sono:

- contenuto di montmorillonite;
- il contenuto di umidità;
- il rigonfiamento;
- l'assorbimento di acqua;
- la permeabilità all'acqua.

In riferimento al contenuto di montmorillonite, maggiore è il suo contenuto, migliori saranno le proprietà del prodotto; in genere si ha almeno l'80%. Il rigonfiamento (o Swell Index) indica la capacità di aumentare di volume a contatto con acqua. Anche in questo un riferimento importante è quello ASTM: D5890-02 Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. La permeabilità all'acqua è una delle prestazioni principali, che consente di valutare la bontà del prodotto. Minore è la permeabilità all'acqua, migliore sarà il prodotto. È necessario fare attenzione sia ai termini che vengono utilizzati, sia alle unità di misura, sia anche al riferimento normativo. In genere viene utilizzato come dato il "coefficiente di permeabilità", indicato con K.

6.4.1. Applicazione delle membrane idroespansive

I grossi vantaggi dell'uso di queste membrane idroespansive derivano dalla semplicità di posa che avviene per tutte le tipologie per semplice accostamento dei pannelli, con un sormonto di alcuni centimetri (secondo la tipologia di prodotto), con chiodatura diretta al supporto.

La saldatura è affidata alla formazione di un gel coesivo che sigilla fra loro i diversi pannelli e richiude tutte le forature con autosigillatura delle piccole lesioni che possono avvenire in fase di posa. Per la medesima ragione questi tipi di membrane consentono forature tecnologiche quali ferri di chiamata passanti (con pali, diaframmi, strutture esistenti), tubazioni (pozzi, canalizzazioni di adduzione e scarico, impianti elettrici con guaina sigillata) e provvedendo in modo autonomo alla saldatura tra pannello e pannello, anche in presenza di acqua durante la posa.

Da questa peculiarità e dall'insensibilità alla temperatura deriva una fondamentale facilità di posa anche per realizzazioni complesse sia dal punto di vista geometrico (di forme) che tecnologico (presenza di impianti o strutture particolari), che infine per condizioni climatiche difficili.

Oltre ai prodotti principali esistono poi una serie di prodotti accessori quali giunti, stucchi e sigillanti idroespansivi che seguono la stessa filosofia sintetizzata e che finiscono per determinare veri e propri sistemi tecnologici per l'impermeabilizzazione

La durabilità delle membrane idroespansive si basa sul materiale di base (una terra) e sulle condizioni climatiche stabili del sottosuolo che non ne permettono essiccamento o espansione (fatto salvo quanto specificato a tale proposito) anche in caso di assenza di falda o di falda altalenante

Una volta attivata dall'acqua di idratazione la membrana bentonitica risulta infatti idonea alla impermeabilizzazione e protezione da percolati aggressivi e per questo è applicata in discariche, vasche di contenimento di emergenza per raffinerie e impianti chimici.

6.4.2. Impermeabilizzazioni idroespansive a pannelli di cellulosa

Questa tipologia di membrana idroespansiva si compone di contenitori di cellulosa contenenti la bentonite di sodio. La scelta della cellulosa come contenitore è finalizzata alla realizzazione di un manto impermeabilizzante senza soluzione di continuità grazie al degrado del contenitore che viene inglobato nel gel bentonitico all'arrivo dell'acqua (falda o umidità).

I vantaggi di questa scelta tecnologica sono legati alla sigillatura totalmente automatica dei sormonti tra pannelli e pannelli e, soprattutto, all'adesione totale alla

struttura con conseguente assenza di trasmigrazione e riparabilità del sistema a posteriori.

A causa della degradabilità del contenitore si rendono necessarie opere di protezione sia in orizzontale (cappe protettiva in calcestruzzo) prima della posa dei ferri d'armatura, che in verticale (tessuto non tessuto di protezione) prima del rinterro dei muri.

Questo è un sistema appositamente ideato e perfettamente idoneo all'impiego per opere edili.

SISTEMA	Orizzontale	Verticale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Adatto
(AER) Sistema Rovescio	Adatto	Adatto
(AS) Sistema Sandwich	Adatto	Adatto
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 16: Applicabilità pannelli di cellulosa

6.4.3. Membrane idroespansive pre-getto

Questa tipologia di membrana idroespansiva si può interpretare come una innovazione delle geomembrane (un prodotto che trova impiego prevalentemente nell'impermeabilizzazione di opere di campagna quali laghi, canali, bacini di raccolta) e si compone di un feltro (TNT) contenitivo esterno agugliato con un tessuto a trama aperta interno e contenenti la bentonite di sodio.

Il processo di agugliatura tra feltro e tessuto utilizza fibre del TNT esterno per cucire il tutto lasciando fuoriuscire delle fibre dal lato interno rispetto al posizionamento della membrana.

L'utilizzo di un tessuto a trama aperta consente l'estrusione del gel bentonitico nell'interfaccia con la struttura e la sigillatura autonoma dei sormonti senza necessità di operazioni aggiuntive.

La posa deve essere effettuata sempre prima dei getti orizzontali (sottoplatea) e verticali (dentro cassero). Dopo la sua stesura vengono infatti effettuati i getti di conglomerato che finiscono per inglobare ed agganciare le fibre con conseguente autoconfinamento della bentonite tramite azione meccanica diretta. Il sistema non risente di cedimenti differenziali del terreno circostante.

Da qui la definizione "pre-getto", per analogia con le membrane prefabbricate che aderiscono al getto eseguito contro la membrana precedentemente posata.

I vantaggi di questa scelta tecnologica sono legati alla sigillatura totalmente automatica dei sormonti, autoconfinamento del sistema e, soprattutto, all'adesione totale alla struttura con conseguente assenza di trasmigrazione e riparabilità del sistema a posteriori.

Non si rendono necessarie opere di protezione sia in orizzontale (i ferri d'armatura possono essere posati direttamente con gli opportuni distanziali) che in verticale. Sono altresì inutili opere di regolarizzazione di diaframmi o palificate e si possono realizzare pose anche direttamente sui terreni opportunamente rullati (per consentire l'operatività di cantiere).

Questo è un sistema appositamente ideato e perfettamente idoneo all'impiego per opere edili.

SISTEMA	Orizzontale	Verticale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Adatto
(AER) Sistema Rovescio	Adatto	Adatto
(AS) Sistema Sandwich	Adatto	Adatto
(AI) Sistema Interno	Non adatto Richiede struttura di controspinta	Non adatto Richiede struttura di controspinta

Tabella 17: Applicabilità membrane idroespansive pre-getto

6.5. Prodotti e sistemi da applicare in situ

Poiché le caratteristiche dei singoli formulati possono variare in modo notevole, secondo la loro composizione, di seguito sono dettagliati non i comportamenti intrinseci, ma le caratteristiche reologiche in fase applicativa.

È sicuramente difficile comparare con precisione tutti i prodotti sul mercato: negli anni sicuramente alcuni prodotti hanno avuto più diffusione degli altri, anche in base al loro comportamento ed alla loro affidabilità e semplicità d'uso.

6.5.1. Prodotti a base di resine termoindurenti

Questi prodotti generalmente hanno un modulo elastico più elevato del calcestruzzo, ed una propensione in fase di catalizzazione a sollecitare a strappo il supporto, perciò necessitano d'ottima preparazione del calcestruzzo; trovano ancora un certo impiego quando si vuole creare una barriera al vapore acqueo o ai gas, oppure quando la presenza d'aggressivi è notevole.

Utilizzo: prevalentemente esterno e con alcuni formulati anche interno.

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Non consigliato
(AER) Sistema Rovescio	Non adatto	Non adatto
(AS) Sistema Sandwich	Non adatto	Non adatto
(AI) Sistema Interno	Non consigliato	Non consigliato

Tabella 18: Applicabilità prodotti a base di resine termoindurenti

6.5.2. Prodotti a base di resine termoplastiche

Questi prodotti sono normalmente catalogati nelle “membrane liquide” hanno un modulo elastico a volte più basso del calcestruzzo e una certa permeabilità al vapore, il loro impiego si è però diffuso soprattutto nelle applicazioni “fuori terra” per la capacità di impermeabilizzare solitamente a basso spessore, oppure con particolari formulazioni catalizzate per applicazioni con airless che consentono un'economica e pratica applicazione.

Utilizzo: esterno.

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Non consigliato
(AER) Sistema Rovescio	Non adatto	Non adatto
(AS) Sistema Sandwich	Non consigliato	Non consigliato
(AI) Sistema Interno	Non adatto	Non adatto

Tabella 19: Applicabilità prodotti a base di resine termoplastiche

6.5.3. Prodotti a base bituminosa

All'interno di questa categoria di prodotti, sussistono enormi differenze; i prodotti liquidi sono impiegati per la protezione degli interrati senza presenza d'acqua in pressione, mentre quelli in pasta con particolari formulazioni sono applicabili anche in presenza d'acqua di falda, le caratteristiche applicative sono diverse, il comportamento rispetto a supporti in calcestruzzo è ottimo soprattutto per i prodotti in pasta.

Utilizzo: esterno.

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Adatto
(AER) Sistema Rovescio	Non adatto	Non adatto
(AS) Sistema Sandwich	Non consigliato	Non consigliato
(AI) Sistema Interno	Non adatto	Non adatto

Tabella 20: Applicabilità prodotti a base bituminosa

6.5.4. Prodotti a base cementizia

Questi prodotti si suddividono per la loro applicazione in prodotti con capacità o meno di bridging (capacità di far da ponte alle lesioni), in altre parole se nel supporto si presume che successivamente all'applicazione si possono formare delle fessurazioni nel supporto, si utilizzerà un prodotto con un buon bridging. L'esperienza applicativa e tecnologica ha portato a formulare essenzialmente due tipologie di prodotto:

- **I prodotti cementizi**, monocomponenti detti anche “osmotici”, per la loro capacità di far migrare sostanze nel supporto, sono formulati per ottenere un modulo elastico inferiore a quello del calcestruzzo, una buona permeabilità al vapore d'acqua e di rendere possibile una loro ricopertura con altre malte

(intonaco termico, intonaco deumidificante, adesivi per piastrelle, rasanti di finitura, pitture pigmentate).

Utilizzo: interno, con acqua non in pressione l'utilizzo maggiore è quello esterno.

- **I prodotti cementizi ad alta deformabilità**, generalmente bicomponenti, sviluppati nell'ultimo decennio, si sono affermati nelle applicazioni dove sussistono delle sollecitazioni nella struttura da impermeabilizzare, in questa categoria di prodotti esistono a basso modulo elastico e con capacità anche di resistere a spinte idrostatiche negative. Generalmente hanno la proprietà di poter essere ricoperti con altre malte come per gli altri prodotti cementizi.

Utilizzo: interno ed esterno, rispetto agli altri prodotti cementizi hanno un'ottima capacità di bridging, quindi sono più affidabili nelle applicazioni esterne.

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Non consigliato
(AER) Sistema Rovescio	Non adatto	Non adatto
(AS) Sistema Sandwich	Adatto	Non consigliato Adatto (con prodotti deformabili)
(AI) Sistema Interno	Adatto	Adatto

Tabella 21: Applicabilità prodotti a base cementizia

6.5.5. Profili sigillanti

Nei manufatti in calcestruzzo in genere, ed in quelli posti sotto il livello del piano di campagna o in prossimità di falde acquifere, un dettaglio costruttivo, come il distanziatore di cassero, costituito da lame d'acciaio o da tubolari in PVC, costituisce un pericoloso punto di discontinuità ermetica, spesso all'origine di permeazioni ed infiltrazioni.

L'acqua infatti trova, sia in corrispondenza dell'interfaccia calcestruzzo-distanziatore (sede di ritiri differenziali e di frequenti nidi di ghiaia) che all'interno degli elementi tubolari (anche in presenza degli usuali tappi di chiusura di efficacia problematica), una facile via di accesso e di infiltrazione in grado di pregiudicare gravemente la tenuta ermetica del manufatto.

La peculiare caratteristica delle gomme idroespansive che, a contatto con l'acqua aumentano il proprio volume, consentono di realizzare un efficace presidio ermetizzante, attraverso l'impiego delle guarnizioni idroespansive e dei tappi a tenuta idraulica, di agevole installazione ed economicamente sostenibili.

Le riprese di getto, anche se correttamente realizzate e strutturalmente funzionali, possono rappresentare punti critici per la tenuta ermetica poiché, l'adesione tra il calcestruzzo fresco e quello preesistente, determina, in assenza di tecniche e dispositivi specifici, un'aderenza di tipo essenzialmente meccanico, in corrispondenza delle sezioni di "ripresa". Per le opere in calcestruzzo, comunque interessate dal contatto con sostanze liquide (acqua ovviamente compresa), e quasi sempre necessario predisporre presidi specifici in grado di assicurare la conveniente tenuta idraulica.

I profilati waterstop, in PVC o, in gomma idroespansiva sono fra i presidi sigillanti più utilizzati nelle riprese di getto. Mentre l'efficacia dei profilati in PVC è di tipo geometrico (deviano l'acqua in più lunghi e difficili percorsi) i profilati in gomma o in bentonite idroespansiva grazie alle proprietà intrinseche di aumentare il proprio volume, a contatto con l'acqua, svolgono un'azione sigillante che rimane attiva e riattivabile nel tempo.

Utilizzo: interno ed esterno

SISTEMA	Verticale	Orizzontale
(AE) Sistema Esterno	Adatto	Adatto
(AER) Sistema Rovescio	Adatto	Adatto
(AS) Sistema Sandwich	Adatto	Adatto
(AI) Sistema Interno	Adatto	Adatto

Tabella 22: Applicabilità profili sigillanti

Bibliografia essenziale

- BRAC E. M. G., FERRARA L., “Impermeabilizzazione del calcestruzzo integro e fessurato mediante additivi cristallizzanti”, POLITECNICO DI MILANO, Milano, 2016;
- BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., “Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione”, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;
- CROCE S., FIORI M., “Sistemi di impermeabilizzazione, guida alla progettazione”, BEMA EDITRICE, Milano, 2005;
- INDEX, “Guida all'impermeabilizzazione: i materiali per l'impermeabilizzazione, loro caratteristiche, cenni storici”, 2014;
- MOCCO E., “Calcestruzzo impermeabile & presidi di ermetizzazione: domande e risposte”, AZICHEM S.r.l, INGENIO N.44, 2016.

Capitolo 7

PROGETTAZIONE STRUTTURE INTERRATE NUOVA COSTRUZIONE

7.1. Considerazioni generali

In questo capitolo verranno affrontate le soluzioni tecniche da adottare, i prodotti da impiegare e le relative modalità di posa degli stessi, per l'impermeabilizzazione delle strutture interrato di nuova costruzione in calcestruzzo. Il tutto sarà corredato da 9 schede tecniche che rappresentano le soluzioni maggiormente utilizzate.

7.2. Classificazione e scomposizione del sistema edilizio

DEFINIZIONE

Il sistema edilizio, inteso come sovrastruttura dei sistemi ambientale e tecnologico, si esplica attraverso un insieme strutturato di unità ambientali/elementi spaziali e di unità tecnologiche/elementi tecnici corrispondenti.

L'unità ambientale si identifica con un raggruppamento di attività compatibili spazialmente e temporalmente, definite in relazione a determinati modelli di comportamento dell'utenza; l'unità tecnologica si identifica invece, con un raggruppamento di funzioni, compatibili tecnologicamente, necessarie per l'ottenimento di prestazioni ambientali.

Un elemento spaziale si identifica con una porzione di spazio fruibile destinata ad accogliere, interamente o parzialmente, una o più unità ambientali; l'elemento tecnico, infine, è un elemento che s'identifica con un prodotto edilizio, più o meno complesso, capace di svolgere, completamente o parzialmente, funzioni proprie di una o più unità tecnologiche.

L'insieme strutturato di unità ambientali (fase metaprogettuale) o di elementi spaziali (fase progettuale) determina un sistema ambientale riferito alla corrispondente fase operativa del processo edilizio; l'insieme strutturato di unità tecnologiche o di elementi tecnici, rispettivamente secondo la fase operativa

metaprogettuale o progettuale del processo edilizio, determina un sistema tecnologico (UNI 10838).

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

L'insieme organizzato di elementi spaziali e di elementi tecnici di un sistema edilizio, concepiti e progettati unitariamente, avente caratteristiche di continuità fisica e di autonomia funzionale, dà luogo a un organismo edilizio: l'edificio.

Il sistema tecnologico si articola a più livelli a cui corrispondono specifici gradi di complessità delle parti costituenti ciascuno di essi: il primo livello riguarda le *classi di unità tecnologica* (per esempio: chiusura), il secondo livello riguarda le *unità tecnologiche* (per esempio: chiusura verticale), il terzo livello riguarda le *classi di elementi tecnici* (per esempio: infissi esterni verticali), il quarto livello è quello degli *elementi tecnici* (per esempio: finestra). Gli elementi appartenenti a ciascun livello sono selezionati in base a criteri di omogeneità.

La tabella seguente riporta una classificazione del sistema tecnologico con riferimento all'edilizia residenziale proposta dalla norma UNI 8290 Parte I, articolata in tre livelli:

- classi di unità tecnologiche;
- unità tecnologiche;
- classi di elementi tecnici.

Benché tale classificazione sia riferita all'edilizia residenziale, si ritiene possibile utilizzarla anche per organismi edilizi di altre destinazioni d'uso. La tabella riporta una parte del SISTEMA TECNOLOGICO e precisamente: la struttura di fondazione, la struttura di elevazione, la struttura di contenimento, la chiusura verticale, la chiusura orizzontale inferiore, la chiusura superiore, la partizione interna verticale, la partizione interna orizzontale, le partizioni esterne. Sono esclusi i subsistemi tecnologici non trattati, e in particolare quelli relativi agli impianti di fornitura servizi e agli impianti di sicurezza.

CLASSE DI UNITA' TECNOLOGICA	UNITA' TECNOLOGICA	CLASSE DI ELEMENTI TECNICI
Struttura portante	Struttura di fondazione	Strutture di fondazione dirette Strutture di fondazione indirette
	Struttura di elevazione	Strutture di elevazione verticali Strutture di elevazione orizzontali e inclinate Strutture di elevazione spaziali
	Struttura di contenimento	Strutture di contenimento verticali Strutture di contenimento orizzontali
Chiusura	Chiusura verticale	Pareti perimetrali verticali Infissi esterni verticali
	Chiusura orizzontale inferiore	Solai a terra Infissi orizzontali
	Chiusura orizzontale su spazi esterni	Solai su spazi aperti
	Chiusura superiore	Coperture Infissi esterni orizzontali
Partizione interna	Partizione interna verticale	Pareti interne verticali Infissi interni verticali Elementi di protezione
	Partizione interna orizzontale	Solai Soppalchi Infissi interni orizzontali
	Partizione interna inclinata	Scale interne Rampe interne
Partizione esterna	Partizione esterna verticale	Elementi di protezione Elementi di separazione
	Partizione esterna orizzontale	Balconi e logge Passerelle
	Partizione esterna inclinata	Scale esterne Rampe esterne

Tabella 23: Schema di classificazione del sistema tecnologico (Fonte/ UNI 8290 Parte I)

La classificazione si fonda su un criterio di definizione dei termini basato sulla funzione attribuita all'oggetto, considerato come parte dell'organismo edilizio. Ciò non preclude la possibilità di attribuire agli oggetti stesso altre funzioni complementari, di volta in volta messe in evidenza. Per esempio: una parete portante collocata tra due elementi spaziali appartiene alla classe di elementi tecnici struttura di elevazione verticale; in seconda battuta fa parte anche della classe di elementi tecnici pareti interne verticali. L'appartenenza di un oggetto a più sottosistemi tecnologici implica la necessità di progettare tale oggetto in base ai pacchetti di requisiti che li connotano.

7.2.1. Elementi e strati

L'elenco qui di seguito riportato non è esaustivo ed è desunto da diversi documenti a partire dalla norma UNI.

Sistema di impermeabilizzazione

Per sistema di impermeabilizzazione si intende l'insieme di strati ed elementi funzionali che compongono una struttura di confinamento (elemento portante, supporto di base, elemento termoisolante, elemento di tenuta, elemento di protezione, ecc.), in cui tra le varie funzioni vi sia quella di impermeabilizzare e quindi impedire la trasmigrazione di acqua da un ambiente (di solito esterno) all'altro (di solito interno).

Elemento portante

Elemento strutturale avente la funzione di sopportare i carichi permanenti ed i sovraccarichi delle strutture sovrastanti.

Supporto di base

Elemento predisposto a costituire la base su cui viene applicato il sistema di impermeabilizzazione. Esso può coincidere con l'elemento portante, lo strato di regolarizzazione, lo strato di pendenza ecc.

Elemento di tenuta

Elemento realizzato in uno o più strati avente la funzione di conferire la impermeabilità all'acqua meteorica, di falda, d'uso resistendo alle previste sollecitazioni fisiche, meccaniche e chimiche, indotte dall'ambiente interno ed esterno e dall'uso.

Elemento di protezione

Elemento realizzato in uno o più strati avente la funzione di controllare le alterazioni conseguenti alle previste sollecitazioni meccaniche, fisiche, chimiche e con eventuale funzione decorativa

Strato di controllo alla diffusione del vapore

Strato avente il fine di ridurre a livelli non significativi l'ingresso del vapor d'acqua all'interno del sistema di impermeabilizzazione.

Strato di imprimitura

Strato avente la funzione di modificare le caratteristiche superficiali fisico-chimiche dello strato sottostante, al fine di favorire il consolidamento corticale del piano di posa e l'aggrappaggio dell'elemento di tenuta o della barriera al vapore. Per tale aggrappaggio è necessario che la superficie del supporto sia liscia e planare. Spesso una eccessiva rugosità dei supporti cementizi, nonostante la posa di un abbondante strato di primer, impedisce un efficiente ancoraggio della membrana che viene vincolata per punti.

Strato di irrigidimento e/o ripartizione dei carichi

Strato avente la funzione di permettere all'elemento o strato sottostante di sopportare i carichi di progetto.

Strato di regolarizzazione

Strato avente la funzione di ridurre e/o compensare geometricamente le irregolarità superficiali dello strato sottostante a quello su cui si sta operando. Può essere necessario non solo per una corretta posa dell'elemento di tenuta, ma anche per la posa di pannelli isolanti che debbono appoggiare in modo continuo al supporto. Lo strato di regolarizzazione, ad esempio, potrà essere realizzato con: calcestruzzo, membrane flessibili in bitume polimero, pannelli non aventi necessariamente la funzione di elemento termoisolante, teli non tessuti sintetici.

Strato di separazione e/o scorrimento

Strato avente la funzione di evitare interazioni di carattere meccanico e fisico e/o chimico tra strati e/o elementi sovrapposti e quando vi siano rischi di fessurazione dell'elemento di supporto. La funzione di separazione si esplica quando lo strato viene progettato per evitare il contatto dei materiali tra di loro per incompatibilità fisica o chimica. La funzione di scorrimento si esplica quando lo strato viene progettato per evitare il trasferimento di tensioni dovute a mobilità inerenti continue o differenziali (termiche, umide, da ritiro o instabilità geometrica) tra uno strato ed un altro. Lo strato di separazione e/o scorrimento, naturalmente valutando attentamente la scelta per non aggiungere altre condizioni di incompatibilità, può essere realizzato mediante sabbia vagliata di fiume, film di polietilene, teli organici di poliestere o polipropilene, teli inorganici.

Strato drenante

Strato avente la funzione di favorire la raccolta e lo smaltimento dell'acqua pervenuta a ridosso di superfici verticali entroterra.

Strato filtrante

Strato avente la funzione di trattenere materiale polverulento, pur lasciando libero il passaggio delle acque meteoriche.

Elemento di collegamento

Elemento o insieme integrato di elementi avente la funzione di assicurare il collegamento tra strati e/o elementi contigui (ad esempio ad evitare frecce differenziali tra elementi portanti prefabbricati).

Strato di semindipendenza

Strato avente la funzione di consentire un'adesione in semindipendenza, regolare ed uniforme, tra strati e/o elementi contigui (ad esempio fogli multiforati).

Strato di continuità

Strato di continuità avente la funzione di eliminare le discontinuità dell'elemento di supporto.

7.3. Palo di fondazione

Spesso il progettista si trova a dover progettare strutture di fondazione su terreni con scarsa portanza ed è quindi costretto ad adottare sistemi di fondazioni profonde come i pali in calcestruzzo armato. I pali collaborano con la platea nel consentire il soddisfacimento di tutti i requisiti di progetto.

Nel caso di impermeabilizzazione di una platea di fondazione disposta su pali, è necessario distinguere due diverse tipologie applicative, differenziate unicamente dalla metodologia di posa della membrana che può essere attraversata o meno dalla testa del palo.

7.3.1. Palo passante il telo

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (9) in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel terreno sottostante.

FASE II

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (8) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto, sagomando il telo intorno alla testa del palo, posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa. Evitare la formazione di pieghe causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone.

FASE III

Chiodare il waterstop (4), giunto bentonitico idroespandente, di dimensioni 20x25 mm, intorno alla testa del palo; le giunzioni dei capi avverranno per semplice accostamento di almeno 6 cm.

FASE IV

Stendere la membrana bentonitica (7), sagomando il telo intorno alla testa del palo. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione.

FASE V

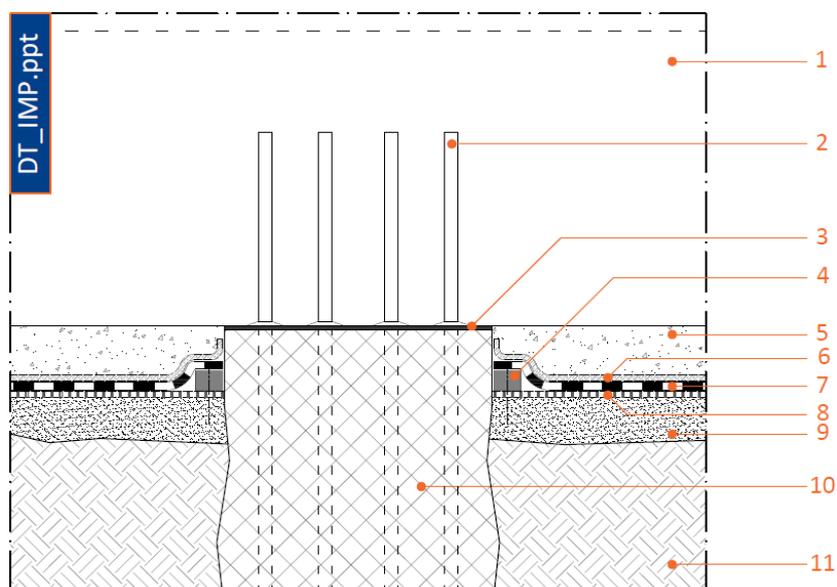
Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (6) con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente.

FASE VI

Gettare la cappa di calcestruzzo (5) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dagli strati sovrastanti. Il calcestruzzo deve essere adeguatamente progettato per resistere alla sottospinta idraulica.

FASE VII

Sigillare la testa del palo, raccordando in prossimità dei ferri di armatura, mediante applicazione a spatola di stucco bentonitico (3) a base di bentonite sodica naturale e additivi plastificanti.

PALO PASSANTE IL TELO


	Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1	<i>Elemento portante:</i> successiva platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
2	<i>Elemento portante:</i> tondino di armatura	resistenza meccanica	legislazione vigente
3	<i>Elemento di tenuta:</i> stucco bentonitico	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
4	<i>Elemento di tenuta:</i> waterstop bentonitico	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
5	<i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
6	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
7	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana bentonitica	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
8	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punzonamento statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
9	<i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
10	<i>Elemento portante:</i> palo di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
11	Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 1: DT_IMP.ppt

7.3.2. Palo non passante il telo

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (8), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel terreno sottostante.

FASE II

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (7) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto, sagomando il telo intorno alla testa del palo, posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa. Evitare la formazione di pieghe causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone.

FASE III

Stendere la membrana bentonitica (6), forando il telo per consentire l'attraversamento dei ferri d'armatura della testa del palo, rispettando un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene, ogni 50 cm circa.

FASE IV

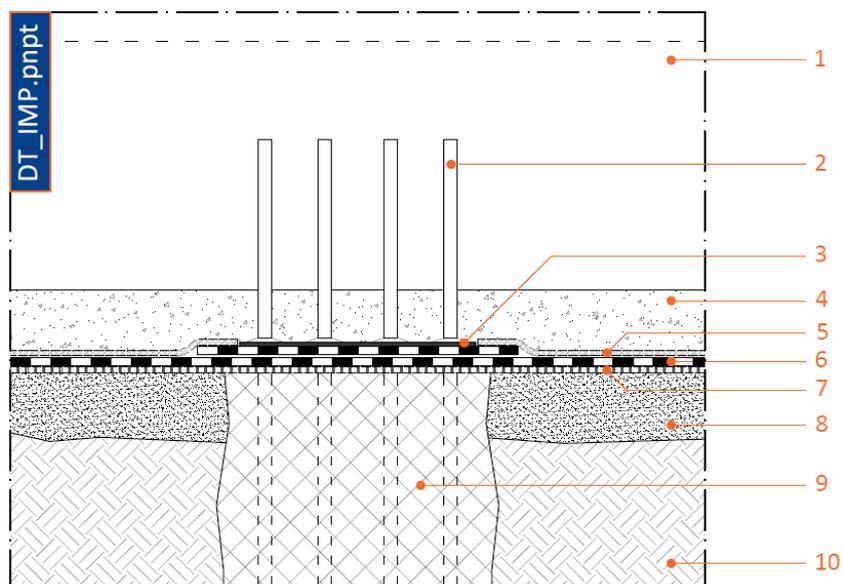
Applicare uno spezzone di membrana in bitume polimero su ciascun ferro, stuccando ulteriormente il raccordo tra spezzone e armatura, prima di sigillare la testa del palo con stucco bentonitico (3) a base di bentonite sodica naturale e additivi plastificanti,

FASE V

Posare lo strato di separazione, costituito da un film in LDPE (5), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo.

FASE VI

Gettare la cappa di calcestruzzo (4) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dagli strati sovrastanti. Il calcestruzzo deve essere adeguatamente progettato per resistere alla sottospinta idraulica.

PALO NON PASSANTE IL TELO


	Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1	<i>Elemento portante:</i> successiva platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
2	<i>Elemento portante:</i> tondino di armatura	resistenza meccanica	legislazione vigente
3	<i>Elemento di tenuta:</i> stucco bentonitico	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
4	<i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
5	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
6	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana bentonitica	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
7	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punzonamento statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
8	<i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
9	<i>Elemento portante:</i> palo di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
10	Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 2: DT_IMP.pnpt

7.4. Giunto strutturale

Nell'ambito dell'ingegneria civile il giunto strutturale è l'interruzione della continuità di un'opera. Tale distacco si rivela indispensabile:

- per evitare che una variazione di temperatura provochi stati di coazione; in questi casi, favorire la libera dilatazione di una struttura lunga anche decine di metri evita danneggiamenti e fessurazioni nelle strutture;
- Per evitare un danneggiamento sismico; durante un sisma, due zone adiacenti della stessa struttura, con un comportamento sismico sensibilmente diverso, rischiano di lesionarsi nella zona di collegamento ed urtare fra loro (fenomeno detto di martellamento), se il giunto tra le due strutture non è sufficientemente ampio da consentirne la libera oscillazione.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008, § 7.2.2 Caratteristiche generali delle costruzioni), per ovviare a questo pericoloso fenomeno, stabiliscono che la distanza tra due costruzioni contigue non deve essere inferiore alla somma degli spostamenti massimi orizzontali calcolati per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e, in ogni caso, non inferiore a un valore stabilito dalla norma stessa.

Quindi, un giunto strutturale ben progettato consente un movimento sufficiente delle parti oscillanti permettendo alla struttura di rimanere illesa dal sisma ma, ai fini della tenuta idraulica, il giunto rappresenta un punto da trattare con particolare cura. La sua ermeticità e tenuta all'acqua sono garantite mediante l'impiego di speciali profilati idroespansivi da inserire nei getti in calcestruzzo.

7.4.1. Giunto strutturale con profilato idroespansivo interno

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (8), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel terreno sottostante.

FASE II

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (7) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa. Evitare la formazione di pieghe causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone.

FASE III

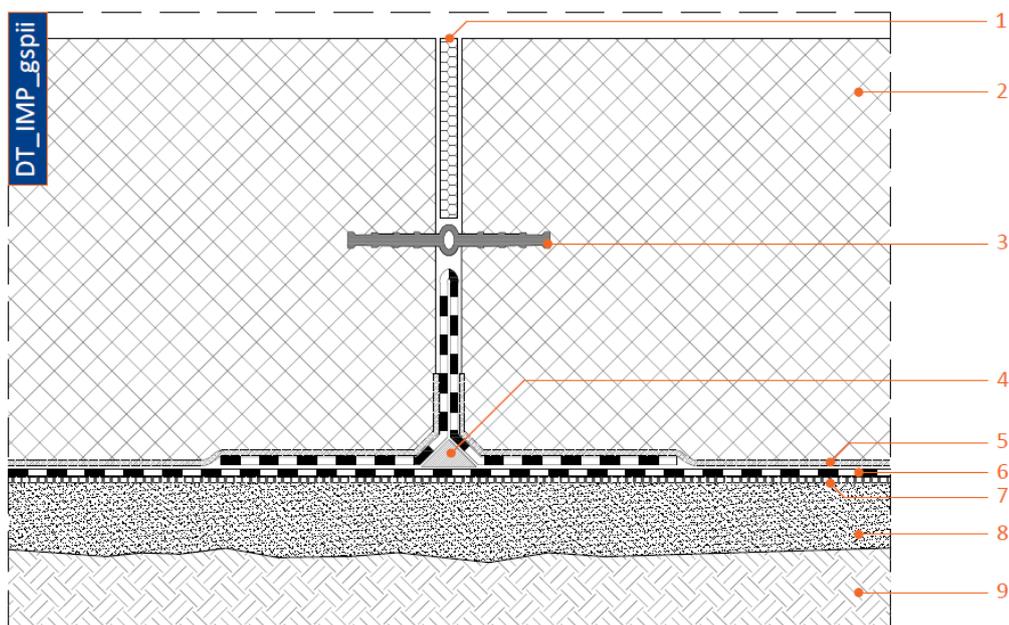
Stendere la membrana sintetica in PVC (6) in modo tale da avere in corrispondenza del giunto un doppio strato di telo di larghezza pari a 1 m, che deve essere risvoltato ad omega all'interno del giunto stesso. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione. Per evitare la formazione di pieghe, causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone e per facilitare il risvolto in verticale del telo, posizionare in corrispondenza degli angoli un profilo di raccordo in legno (4).

FASE IV

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (5), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo.

FASE V

Annegare totalmente nel getto il profilo waterstop (3) in TPO-FPO, precedentemente fissato alle armature della platea con del filo di ferro, in corrispondenza del giunto strutturale, circa a metà altezza dello spessore della platea.

GIUNTO STRUTTURALE PROFILATO IDROESPANSIVO INTERNO


	Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1	<i>Elemento di separazione:</i> giunto di dilatazione	resistenza a compressione	legislazione vigente
2	<i>Elemento portante:</i> platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
3	<i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in TPO-FPO	resistenza alla trazione e allungamento, resistenza a lacerazione	EN ISO 527-2, ISO 34-1
4	<i>Elemento di raccordo:</i> profilo in legno	resistenza alla degradazione	
5	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
6	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana in PVC	resistenza al carico statico, resistenza all'urto, flessibilità a freddo, invecchiamento	UNI EN 12730, UNI EN 12691
7	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punzonamento statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
8	<i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
9	Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 3: DT_IMP.gspii

7.4.2. Giunto strutturale con profilato idroespansivo esterno

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (8), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Sempre a tale scopo il getto dovrà essere privo di lesioni da ritiro o da assestamento. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel terreno sottostante.

FASE II

Regolarizzare ed eliminare le protuberanze o i grossi vuoti dalle superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (7). I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa. Evitare la formazione di pieghe causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone.

FASE III

Stendere la membrana in PVC (6) in modo tale da avere in corrispondenza del giunto un doppio strato di telo di larghezza pari a 1 m. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione.

FASE IV

Applicare, al di sopra del telo di tenuta all'acqua e in corrispondenza del giunto, mediante chiodatura il profilo waterstop (3) in TPO-FPO, il quale dovrà essere annegato all'interno del getto.

FASE V

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (5), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo.

FASE VI

Realizzare una cappa in calcestruzzo (4) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dagli strati sovrastanti.

GIUNTO STRUTTURALE PROFILATO IDROESPANSIVO ESTERNO		
Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1 <i>Elemento di separazione:</i> giunto di dilatazione	resistenza a compressione, elevata resistenza all'invecchiamento	legislazione vigente
2 <i>Elemento portante:</i> platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
3 <i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in TPO-FPO	resistenza alla trazione e allungamento, resistenza a lacerazione	EN ISO 527-2, ISO 34-1
4 <i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
5 <i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
6 <i>Elemento di tenuta:</i> membrana in PVC	resistenza al carico statico, resistenza all'urto, flessibilità a freddo, invecchiamento	UNI EN 12730, UNI EN 12691
7 <i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punzonamento statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
8 <i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
9 Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 4: DT_IMP.gspie

7.5. Sigillatura tubazione passante

Le tubazioni passanti presenti sulle pareti verticali o in platea rappresentano una via preferenziale per il passaggio dell'acqua ed è per questo che è buona norma prendere opportune precauzioni che ne garantiscano una perfetta tenuta idraulica. I teli devono essere ritagliati fino a sagomare perfettamente i corpi passanti.

In fase di pre-getto, è necessario annegare nel calcestruzzo un manicotto per consentire lo sfilamento delle tubazioni in caso di manutenzione. L'elemento deve essere vincolato all'armatura della parete con delle zanche. Intorno alla tubazione, in corrispondenza della mezzeria della parete, per una perfetta sigillatura è necessario installare un cordolo idroespansivo.

7.5.1. Tubazione passante parete verticale

FASE I

Il dispositivo di raccordo al manto impermeabile potrà essere costituito da un manicotto metallico munito di una larga flangia (8) e bulloni saldati (9), che verrà annegato nel getto (11) e ancorato con delle zanche (12).

FASE II

Collocare il waterstop (7) sull'anello metallico del manicotto, in corrispondenza della mezzeria della parete. Successivamente serrare il premistoppa (6).

FASE III

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (1) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto, sagomando il telo intorno alla tubazione, posizionando a ridosso della parete verticale il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al supporto sottostante mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa. Evitare la formazione di pieghe causate da una non corretta stesura dei rotoli sulla parete.

FASE IV

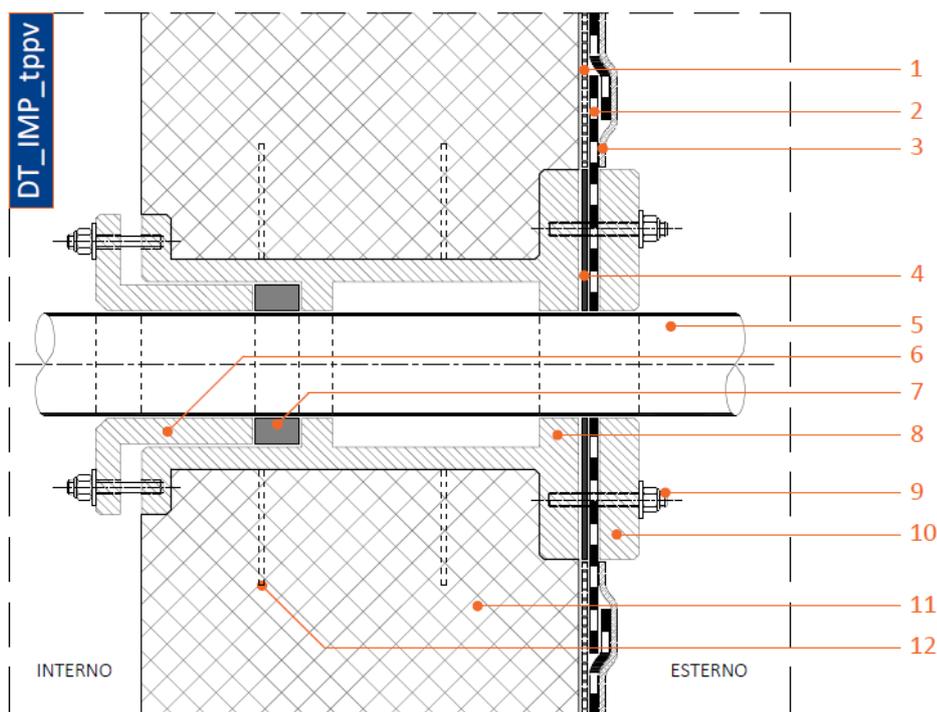
Stendere la membrana in bentonite (2) su superficie pulita e asciutta. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire verticalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata orizzontalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta orizzontale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione. Sulla flangia verniciata di primer verrà incollata uno spezzone di membrana che servirà da raccordo con l'elemento di tenuta impermeabile.

FASE V

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (3), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto orizzontale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti orizzontalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dagli strati sovrastanti.

FASE VI

Posizionare la contro-flangia (10) e serrare i bulloni per una perfetta adesione tra i teli.

TUBAZIONE PASSANTE PARETE VERTICALE


	Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punzonamento statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
2	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana bentonitica	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
3	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
4	<i>Elemento di tenuta:</i> guarnizione piatta		
5	<i>Elemento passante:</i> tubazione		
6	<i>Elemento di supporto:</i> premistoppa		
7	<i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in bentonite	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
8	<i>Elemento di raccordo:</i> flangia		
9	<i>Elemento di giunzione:</i> bullone-dado		
10	<i>Elemento di raccordo:</i> contro-flangia		
11	<i>Elemento portante:</i> muro contro-terra	resistenza meccanica	legislazione vigente
12	<i>Elemento di ancoraggio:</i> zanche		

Scheda 5: DT_IMP.tppv

7.5.2. Tubazione passante la platea

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (10), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Sempre a tale scopo il getto dovrà essere privo di lesioni da ritiro o da assestamento. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel terreno sottostante.

FASE II

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (9) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto, sagomando il telo intorno alla tubazione, posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa. Evitare la formazione di pieghe causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone.

FASE III

Chiodare, intorno al corpo passante, il waterstop (6), di dimensioni 20x25 mm; le giunzioni dei capi avverranno per semplice accostamento di almeno 6 cm. Successivamente sigillare il cordolo mediante applicazione a spatola di stucco bentonitico (5) a base di bentonite sodica naturale e additivi plastificanti.

FASE IV

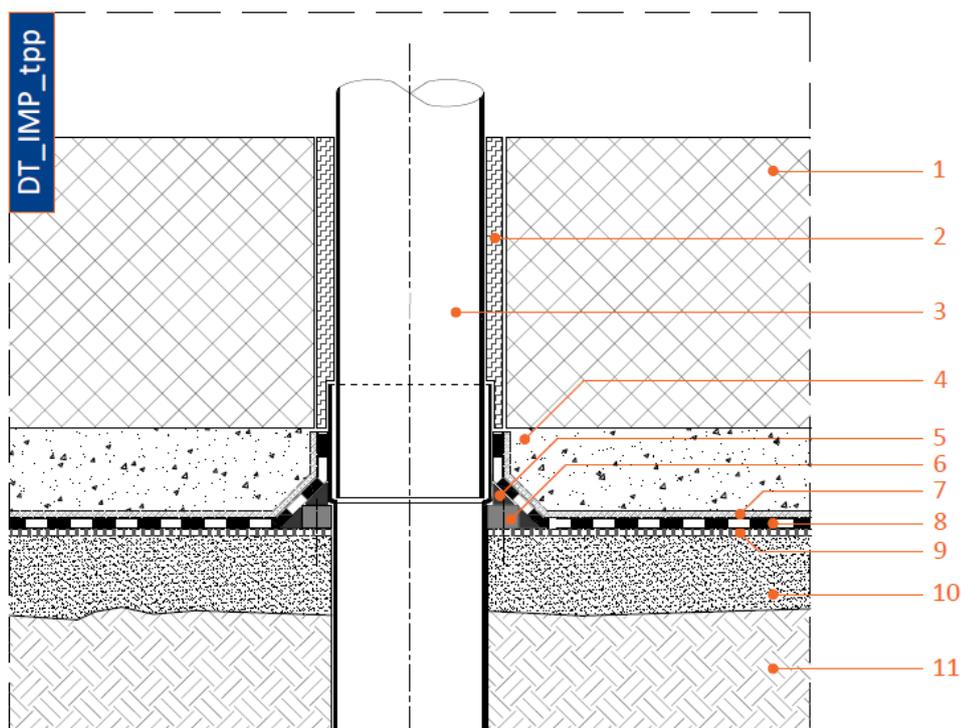
Stendere la membrana a base bentonitica (8) su superficie pulita e asciutta. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione.

FASE V

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (7), polietilene a bassa densità, con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo (4).

FASE VI

Realizzare una cappa in calcestruzzo (4) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dagli strati sovrastanti.

TUBAZIONE PASSANTE LA PLATEA


	Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1	<i>Elemento portante:</i> platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
2	<i>Elemento di separazione:</i> distanziatore	resistenza all'invecchiamento, resistenza all'usura	
3	<i>Elemento passante:</i> tubazione		
4	<i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
5	<i>Elemento di tenuta:</i> stucco bentonitico	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
6	<i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in bentonite	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
7	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
8	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana bentonitica	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
9	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punzonamento statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
10	<i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
11	Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 6: DT_IMP.tpp

7.6. Superfici verticali

Risulta spesso necessario realizzare delle opere provvisorie, in funzione dell'esigenza di contenere il terreno o per abbattere la piezometrica della falda, al fine di consentire le normali lavorazioni di edificazione delle strutture all'interno dello scavo. In molti casi le opere provvisorie sono tutte o in parte incorporate nella struttura definitiva.

Si possono avere due distinte possibilità: se lo scavo realizzato è confinato, si procederà alla posa dell'impermeabilizzazione verticale in fase di pre-getto; se lo scavo non è confinato, si realizzeranno le pareti verticali in calcestruzzo armato per poi impermeabilizzarle in fase di post-getto.

Lo scavo non confinato, ovvero lo sbancamento generale dell'area di edificazione, che resta contornata da scarpate di pendenza adeguata, è la metodologia più semplice ed economica per la realizzazione di strutture sottoquota e sfrutta la resistenza del terreno (in genere il suo angolo di attrito interno) ai fini della stabilità delle scarpate dello scavo.

In tutti i casi di scavo confinato l'opera di sostegno delle pareti perimetrali è costruita (almeno nella sua parte più profonda) prima che si esegua il corrispondente scavo, evitando quindi i volumi di scavo esterni all'opera di sostegno ed i corrispondenti successivi rinfiocchi. I tipi costruttivi impiegati per la costruzione preventiva dell'opera di sostegno possono essere diversi: paratie di pali o di micropali, diaframmi continui, palancolate metalliche, strutture composte da jet grouting colonnari armati e non, combinazione di più tipi diversi.

7.6.1. Superfici verticali con scavo confinato

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (2), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Sempre a tale scopo il getto dovrà essere privo di lesioni da ritiro o da assestamento. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel supporto sottostante. La prima operazione da eseguire è l'idrolavaggio a pressione (150-180 atm) di tutte le superfici per eliminare le parti incoerenti.

FASE II

Effettuare l'imprimatura (3), dopo accurata pulizia del supporto, in modo omogeneo su tutte le porzioni delle superfici da trattare per consentire di eliminare eventuali polveri e ottenere una perfetta aderenza delle membrane superiori. Prima di procedere alla posa dello strato successivo è necessario attendere la completa essiccazione.

FASE III

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (8) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa e lungo le pareti verticali ogni 30 cm circa. Per evitare la formazione di pieghe, causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone e per facilitare il risvolto in verticale del telo, posizionare negli angoli un profilo di raccordo in legno (12).

FASE IV

Stendere la membrana in bitume polimero (9) su superficie pulita e asciutta. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione.

FASE V

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (10), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo.

FASE VI

Gettare la cappa di calcestruzzo (11) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dalla posa delle armature per il getto della successiva platea di fondazione. Il calcestruzzo deve essere adeguatamente progettato per resistere alla sotto-spinta idraulica.

FASE VII

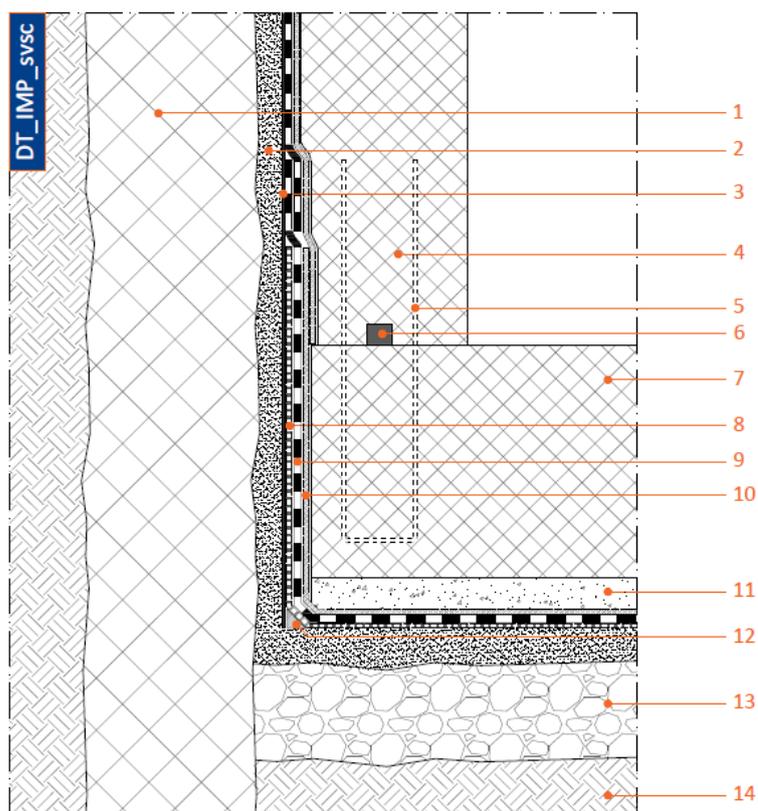
Eseguire il getto di calcestruzzo della platea di fondazione (7), calcolato per rispondere ai carichi di esercizio e alla spinta idraulica della falda.

FASE VIII

Sigillare la ripresa di getto tra la platea (7) e il muro contro-terra (4), mediante l'impiego di un profilo waterstop in bentonite (6), di dimensioni 20x25 mm. Prima dell'applicazione del waterstop, procedere ad un'accurata pulizia delle superfici, eliminando i residui delle lavorazioni precedenti e soprattutto la boiaccia derivante dal fenomeno di bleeding superficiale che generalmente si crea durante il costipamento del conglomerato cementizio. Quindi chiodare il profilo (6) (1 chiodo ogni 25 cm) nella mezzera della sezione delle pareti verticali tra i ferri di chiamata (5). Le giunzioni dei capi avverranno per semplice accostamento di almeno 6 cm.

FASE IX

Eseguire il getto di calcestruzzo per la realizzazione delle pareti verticali (4) che, ai fini della durabilità, dovrà essere progettato per rispondere ai carichi di esercizio e alla spinta idraulica della falda.

SUPERFICI VERTICALI CON SCAVO CONFINATO


Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1 <i>Elemento di confinamento:</i> diaframma	resistenza meccanica	legislazione vigente
2 <i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
3 <i>Strato di imprimitura:</i> primer bituminoso	resistenza all'usura, alla lacerazione	
4 <i>Elemento portante:</i> muro contro-terra	resistenza meccanica	legislazione vigente
5 <i>Elemento portante:</i> ferri di chiamata	resistenza meccanica	legislazione vigente
6 <i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in bentonite	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
7 <i>Elemento portante:</i> platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
8 <i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
9 <i>Elemento di tenuta:</i> membrana bitume polimero	flessibilità a freddo, stabilità dim. a caldo, carico di rottura, punz. statico e dinamico	UNI EN 1109, 1107, 12311-1
10 <i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punz. statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
11 <i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
12 <i>Elemento di raccordo:</i> profilo in legno	resistenza all'usura	
13 <i>Strato controllo risalita capillare:</i> vespaio in ghiaia	resistenza alla deformazione a pressione, granulometria	
14 Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 7: DT_IMP.svsc

7.6.2. Superfici verticali con scavo libero

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (14), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Sempre a tale scopo il getto dovrà essere privo di lesioni da ritiro o da assestamento. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel supporto sottostante.

FASE II

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessile TNT (13) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessile posizionando a ridosso del magrone il lato inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa e lungo le pareti verticali ogni 30 cm circa. Per evitare la formazione di pieghe, causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone e per facilitare il risvolto in verticale del telo, posizionare negli angoli un profilo di raccordo in legno (4).

FASE III

Stendere la membrana in bitume polimero (12) su superficie pulita e asciutta. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione.

FASE IV

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (11), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo.

FASE V

Gettare la cappa di calcestruzzo (10) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dalla posa delle armature per il getto della successiva platea di fondazione. Il calcestruzzo deve essere adeguatamente progettato per resistere alla sotto-spinta idraulica.

FASE VI

Eseguire il getto di calcestruzzo della platea di fondazione (9), calcolato per rispondere ai carichi di esercizio e alla spinta idraulica della falda.

FASE VII

Sigillare la ripresa di getto tra la platea (9) e il muro contro-terra (3), mediante l'impiego di un profilo waterstop in bentonite (6), di dimensioni 20x25 mm. Prima dell'applicazione del waterstop, procedere ad un'accurata pulizia delle superfici, eliminando i residui delle lavorazioni precedenti e soprattutto la boiaccia derivante dal fenomeno di bleeding superficiale che generalmente si crea durante il costipamento del conglomerato cementizio. Quindi chiodare il profilo (6) (1 chiodo ogni 25 cm) nella mezzeria della sezione delle pareti verticali tra i ferri di chiamata (5). Le giunzioni dei capi avverranno per semplice accostamento di almeno 6 cm.

FASE VIII

Eeguire il getto di calcestruzzo per la realizzazione delle pareti contro-terra (3) che, ai fini della durabilità, dovrà essere progettato per rispondere ai carichi di esercizio e alla spinta idraulica della falda.

FASE IX

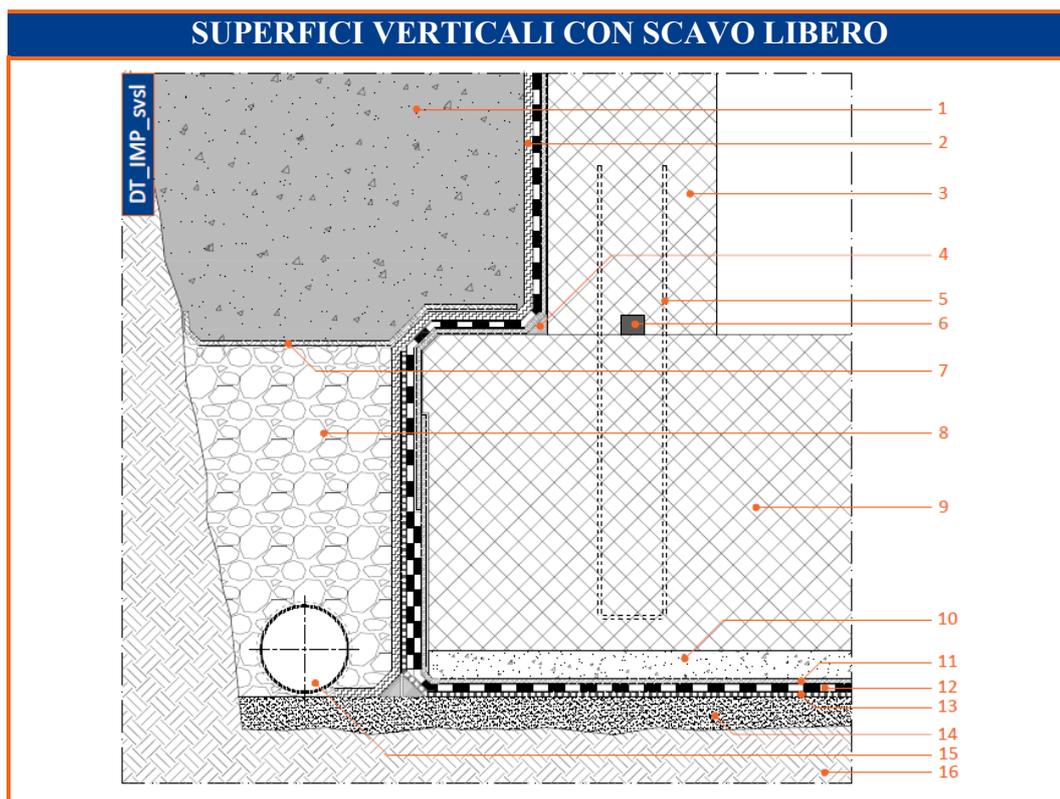
Eliminare le parti incoerenti mediante l'idrolavaggio a pressione (150-180 atm), prima di procedere alla posa dei teli sulle pareti verticali. Successivamente si dovrà procedere all'eliminazione di tutte le irregolarità dei supporti e alla rasatura dei nidi di ghiaia eventualmente presenti mediante l'applicazione di malta a ritiro controllato, fibro-rinforzata, a presa ed indurimento rapidi per il risanamento del calcestruzzo.

FASE X

Posare lo strato di protezione e drenaggio (2) per evitare il danneggiamento delle membrane dalle asperità presenti nel rinterro (1) e nel vespaio in ghiaia (7). La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 20 cm.

FASE XI

Eeguire il rinterro (1) avendo cura che gli aggregati non presentino grosse asperità. La permeabilità all'acqua dovrà essere congruente con quella del terreno circostante ed omogenea, al fine di evitare la formazione di battenti idrici a ridosso dell'edificio.



Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi	
1	Terreno di riporto	resistenza meccanica, permeabilità, granulometria	
2	<i>Strato di protezione/drenaggio:</i> telo in geocomposito	resistenza al punz. statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
3	<i>Elemento portante:</i> muro contro-terra	resistenza meccanica	legislazione vigente
4	<i>Elemento di raccordo:</i> profilo in legno	resistenza all'usura	
5	<i>Elemento portante:</i> ferri di chiamata	resistenza meccanica	legislazione vigente
6	<i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in bentonite	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
7	<i>Strato di filtrazione:</i> telo in geotessile	resistenza al punz. statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
8	<i>Strato di drenaggio:</i> vespaio in ghiaia	resistenza alla deformazione a pressione, granulometria	
9	<i>Elemento portante:</i> platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
10	<i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
11	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
12	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana bitume polimero	flessibilità a freddo, stabilità dim. a caldo, carico di rottura, punz. statico e dinamico	UNI EN 1109, 1107, 12311-1
13	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punz. statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
14	<i>Strato di supporto:</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
15	<i>Elemento di drenaggio:</i> tubo	resistenza al deterioramento	
16	Terreno esistente	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 8: DT_IMP.svsl

7.7. Fossa ascensore

La fossa ascensore è senza dubbio quella porzione di fabbricato che più facilmente viene a contatto con la falda acquifera. Capita spesso, infatti, di assistere ad interventi postumi di impermeabilizzazione per far fronte a problemi di infiltrazioni di acqua nel vano dell'ascensore e mettere in sicurezza la centralina elettrica dell'impianto. Si tratta quindi di una parte di struttura che, prima di ogni altra, deve essere oggetto di un intervento mirato di protezione delle strutture dall'aggressione dell'acqua.

FASE I

Realizzare lo strato di supporto e regolarizzazione (9), costituito da magrone in calcestruzzo, in maniera tale da evitare il più possibile asperità che potrebbero provocare punzonamenti dell'elemento di tenuta. Gli aggregati dovranno essere a ridotta granulometria. Sempre a tale scopo il getto dovrà essere privo di lesioni da ritiro o da assestamento. Il suo spessore, connesso alle caratteristiche meccaniche, dovrà essere commisurato alle asperità presenti nel terreno sottostante.

FASE II

Le superfici sulle quali deve essere applicato il geotessuto (6) devono essere regolari e prive di grosse protuberanze o grossi vuoti. I supporti possono essere anche umidi, ma privi di acqua stagnante. Stendere il geotessuto posizionando a ridosso del magrone il geotessile inferiore in polipropilene. Rispettare un sormonto minimo di 10 cm tra i teli che dovranno essere fissati al sottofondo mediante chiodi e rondelle in polietilene ogni 50 cm circa e lungo le pareti verticali ogni 30 cm circa. Per evitare la formazione di pieghe, causate da una non corretta stesura dei rotoli sul magrone e per facilitare il risvolto in verticale del telo, si posiziona negli angoli un profilo di raccordo in legno (7).

FASE III

Stendere la membrana in FPO (5), poliolefine flessibili, su superficie pulita e asciutta. La sovrapposizione fra i teli dovrà essere di 10 cm in senso trasversale e 15 in senso longitudinale. L'impermeabilizzazione dovrà proseguire orizzontalmente oltre al filo esterno della muratura, in modo da potere essere successivamente ripiegata verticalmente e consentire la sua saldatura con l'elemento di tenuta verticale. I teli dovranno essere saldati con particolare attenzione in quanto l'elemento può essere soggetto ad acqua in forte pressione.

FASE IV

Posare lo strato di separazione costituito da un film in LDPE (4), con una sovrapposizione fra i teli di 20 cm ed un risvolto verticale tale da potere consentire una adeguata sovrapposizione con i teli posti verticalmente. La sua funzione è quella di evitare il contatto diretto tra l'elemento di tenuta e il successivo getto di calcestruzzo.

FASE V

Gettare la cappa di calcestruzzo (8) al fine di garantire una protezione meccanica della membrana dalla posa delle armature per il getto della successiva platea di fondazione della fossa ascensore. Il calcestruzzo deve essere adeguatamente progettato per resistere alla sotto-spinta idraulica.

FASE VI

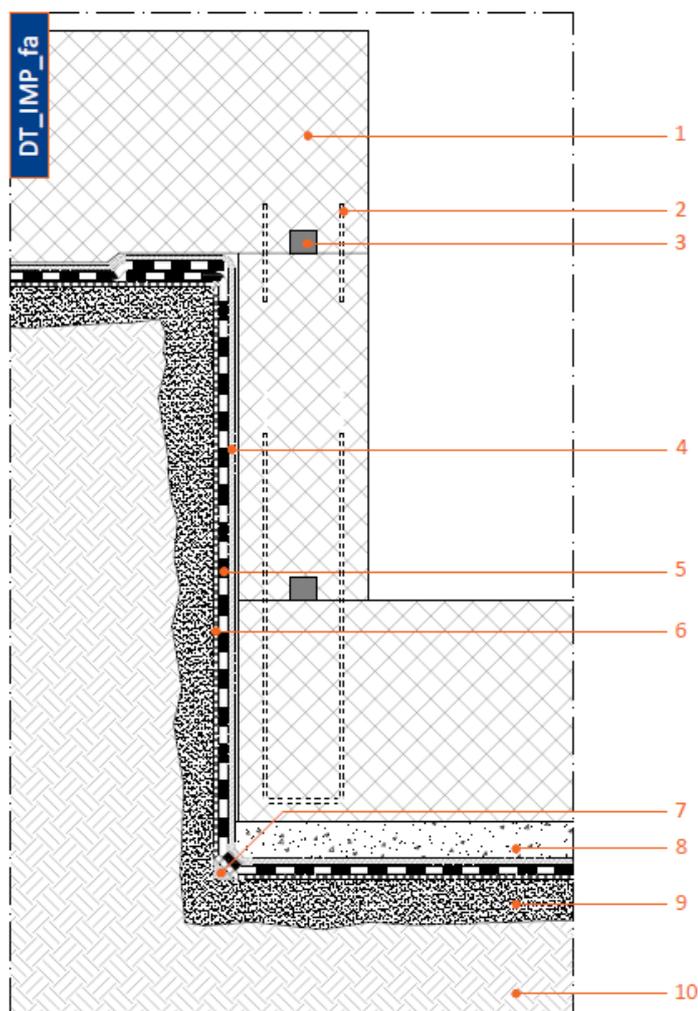
Eseguire il getto di calcestruzzo della platea di fondazione (1) della fossa ascensore, calcolato per rispondere ai carichi di esercizio e alla spinta idraulica della falda.

FASE VII

Sigillare la ripresa di getto tra la platea della fossa e le pareti verticali, mediante l'impiego di un profilo waterstop in bentonite (3), di dimensioni 20x25 mm. Prima dell'applicazione del waterstop, procedere ad un'accurata pulizia delle superfici, eliminando i residui delle lavorazioni precedenti e soprattutto la boiaccia derivante dal fenomeno di bleeding superficiale che generalmente si crea durante il costipamento del conglomerato cementizio. Quindi chiodare il profilo (3) (1 chiodo ogni 25 cm) nella mezzeria della sezione delle pareti verticali tra i ferri di chiamata (2). Le giunzioni dei capi avverranno per semplice accostamento di almeno 6 cm.

FASE VIII

Eseguire il getto di calcestruzzo per la realizzazione delle pareti verticali della fossa che, ai fini della durabilità, dovrà essere progettato per rispondere ai carichi di esercizio e alla spinta idraulica della falda.

FOSSA ASCENSORE


	Elemento/Strato	Caratteristiche funzionali	Rif. normativi
1	<i>Elemento portante:</i> platea di fondazione	resistenza meccanica	legislazione vigente
2	<i>Elemento portante:</i> ferri di chiamata	resistenza meccanica	legislazione vigente
3	<i>Elemento di tenuta:</i> waterstop in bentonite	rigonfiamento, assorbimento acqua, permeabilità all'acqua	DIN 53521, DIN 18121, DIN 18130
4	<i>Strato di protezione/separazione:</i> film in LDPE	resistenza al punzonamento statico, resistenza a trazione	
5	<i>Elemento di tenuta:</i> membrana in FPO	resistenza alla trazione e allungamento, resistenza a lacerazione	EN ISO 527-2, ISO 34-1
6	<i>Strato di separazione:</i> geotessile TNT	resistenza al punz. statico e dinamico, resistenza alla degradazione microbiologica	EN ISO 12236, EN 919, EN 12225
7	<i>Elemento di raccordo:</i> profilo in legno	resistenza all'usura	
8	<i>Strato di protezione:</i> cappa in cls	resistenza al punzonamento statico, resistenza a compressione	legislazione vigente
9	<i>Strato di supporto/regolarizzazione</i> sottofondo di pulizia in cls	planarità, regolarità superficiale	legislazione vigente
10	Terreno	resistenza meccanica, permeabilità	

Scheda 9: DT_IMP_fa

Bibliografia essenziale

- CROCE S., FIORI M., *“Sistemi di impermeabilizzazione, guida alla progettazione”*, BEMA EDITRICE, Milano, 2005;
- MAPEI, *“Impermeabilizzazione di strutture interrato”*, QUADERNO TECNICO;
- STICH H-J., *“System Information and Method Statement Corporate Construction, Basement waterproofing with membranes”*, SIKA, N° 850 64 03, aprile 2008.

Capitolo 8

CONFRONTO DELLE SOLUZIONI

8.1. Considerazioni generali

In quest'ultimo capitolo vengono raccolte e presentate tutte le analisi fino ad ora svolte per la stesura della presente tesi. Al fine di avere un quadro generale, più chiaro e rapido, delle diverse soluzioni tecnologiche per i sistemi di tenuta all'acqua, è stata costruita una matrice di confronto.

8.2. Requisiti fondamentali dei sistemi di impermeabilizzazione

Per sistema di impermeabilizzazione si intende l'insieme di strati ed elementi funzionali che compongono una struttura di confinamento idrico. L'elenco dei requisiti del sistema di impermeabilizzazione ha il compito di definire gli obiettivi generali della operazione progettuale e costruttiva.

Tale elenco, pur definendo genericamente gli obiettivi da raggiungere, rappresenta un utile riferimento per impostare il progetto e per definire le basi su cui stabilire i livelli di qualità attesa.

Vita utile

La vita utile attesa costituisce una entità convenzionale di riferimento per la progettazione e va commisurata alla specifica situazione. Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti, devono mantenere le loro prestazioni fondamentali fino al termine della vita utile programmata. Il concetto di vita utile è strettamente collegato a quello di manutenzione. La sua programmazione in fase di progettazione richiede conseguenti decisioni sul versante della qualità. La vita utile in ogni caso non dovrebbe essere inferiore a quella che, in un determinato momento di sviluppo, la tecnologia è mediamente in grado di attivare. Risulta evidente che, per ciò che attiene alle parti od elementi non ispezionabili e non manutenibili, si dovrà operare con livelli di qualità particolarmente elevati. In alcuni casi la vita utile programmata per il sistema di

impermeabilizzazione può coincidere con la vita utile della costruzione nel suo complesso: è il caso ad esempio di sistemi di impermeabilizzazione non manutenibili realizzati in falda. La durata di vita utile non va confusa con quanto previsto dalle leggi vigenti in termini di responsabilità decennale.

Impermeabilità

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti, devono essere realizzati in modo tale da evitare fino al termine di vita utile infiltrazioni di acqua verso l'ambiente da proteggere o verso strati o elementi non progettati per venire a contatto con acqua. Tutto ciò dovrebbe svilupparsi all'interno di un piano programmato di manutenzione ordinaria e straordinaria. L'impossibilità di interventi manutentivi, dovuta a difficoltà o impossibilità di accesso per necessità di scavi e demolizioni, richiede naturalmente una specifica attenzione alla durabilità dell'elemento di tenuta e alla eventuale messa in atto di dispositivi di governo e controllo delle acque esterne o di accidentale infiltrazione (drenaggi). La struttura del sistema di impermeabilizzazione deve essere organizzata in modo da mantenere nel tempo il suo assetto geometrico e funzionale sotto l'azione di forze esterne naturali o artificiali, fisiche o meccaniche, che possano provocare dislocazioni, scivolamenti, spostamenti o variazioni della configurazione iniziale.

- *Impermeabilità all'acqua capillare o in pressione positiva*: si tratta della capacità di un rivestimento, in adesione al supporto, di resistere alla risalita capillare UNI EN 1062-3 o ad una definita pressione idraulica esercitata direttamente sul rivestimento stesso. è il caso tipico di una vasca o di un contenitore. La valutazione della performance (resistenza alla pressione idraulica positiva) può essere effettuata attraverso un test specifico dei calcestruzzi (UNI EN 12390/8) utilizzando la pressione standard prevista di 5 bar (pari ad una colonna d'acqua di 50 m) oppure un valore differente specifico per il caso in questione. La prova è da ritenersi superata se alla fine del ciclo di carico piezometrico non vi è alcun passaggio di acqua nel supporto attraverso il rivestimento.
- *Impermeabilità all'acqua in pressione negativa*: si tratta della capacità di un rivestimento, in adesione al supporto, di resistere ad una definita pressione idraulica esercitata all'estradosso del supporto (di caratteristiche note). La valutazione della performance (resistenza alla pressione idraulica inversa) può essere effettuata attraverso un test specifico dei rivestimenti resinosi UNI 8298/8. La prova è da ritenersi superata ad una pressione definita se alla fine del ciclo di carico piezometrico non vi è alcun passaggio di acqua dal rivestimento.

Resistenza meccanica

Nel sistema di impermeabilizzazione la trasmissione dei carichi (statici o dinamici), dalla superficie di applicazione, attraverso eventuali strati intermedi, al supporto strutturale, deve avvenire, durante la costruzione e dal tempo zero fino al tempo di vita utile attesa, in modo tale da non determinare deformazioni o stati tensionali tali da dare luogo ad alterazioni funzionali dell'elemento di tenuta o di

altri strati o elementi sensibili. Lo stesso deve valere per ciò che attiene a stati tensionali derivanti da mobilità inerenti (cicliche o permanenti) dell'elemento di tenuta o provenienti da altri elementi o strati che compongono il sistema di impermeabilizzazione. Carico di rottura (UNI EN 12311-1), allungamento a rottura (UNI EN 12311-1).

Caratteristiche elastiche o di Crack Bridging Ability (CBA)

Si tratta della capacità di un rivestimento, in adesione al supporto, di resistere senza presentare delle lesioni, a movimenti di fessure di una data apertura. Si parla di CBA (UNI EN 1062-7) statica se la prova è di tipo statico o dinamico CBD se il test prevede dei cicli. In linea generale la CBA è funzione direttamente proporzionale a:

- resistenza a trazione del rivestimento;
- spessore del rivestimento;
- caratteristiche elastiche del rivestimento.

Nei rivestimenti flessibili (ossia quelli a basse caratteristiche elastiche, 10-30% di allungamento a rottura, ma capaci comunque di resistere alle sollecitazioni flettenti o torcenti) di ausilio può essere l'interposizione di rete in fibra di vetro che aumenta la resistenza a trazione con positivi effetti sulla CBA.

Resistenza all'urto e al punzonamento

L'elemento di impermeabilizzazione deve resistere agli urti e alle azioni punzonanti (punzonamento statico UNI EN 12730 e dinamico UNI EN 12691), prevedibili senza alterazioni funzionali, ciò sia durante le varie fasi di costruzione che durante l'esercizio. Tale funzione può richiedere analisi di compatibilità meccanica con gli strati sottostanti o adiacenti.

Resistenza alle radici

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti, laddove possano venire a contatto con apparati radicali, non devono subire danni funzionali conseguenti all'azione meccanica e chimica delle radici.

Resistenza all'attacco biologico

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti non devono subire alterazioni funzionali conseguenti alle azioni di funghi e batteri.

Resistenza all'attacco chimico

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti non devono subire alterazioni funzionali sotto l'azione degli agenti chimici, (naturali/artificiali esterni o interni al sistema di impermeabilizzazione), che prevedibilmente possano essere presenti o svilupparsi od essere trasportati dall'acqua verso il sistema di impermeabilizzazione durante la fase di costruzione e di esercizio.

Resistenza all'azione termica

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti non devono subire modificazioni fisiche, geometriche o corrispondenti stati tensionali tali da dare luogo sugli strati o elementi componenti ad alterazioni funzionali sotto l'azione termica prevedibile in rapporto a procedure costruttive, di manutenzione, di esercizio (UNI EN 1296:2002).

Resistenza all'acqua

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti non devono subire danni o alterazioni funzionali conseguenti all'azione dell'acqua. Ciò vale naturalmente per gli elementi esposti direttamente, ma dovrebbe valere anche per elementi e strati che accidentalmente potessero essere nel tempo esposti a tali azioni.

Resistenza ai roditori ed insetti

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti, laddove siano esposti a tali presenze, non devono subire danni o alterazioni funzionali derivanti dall'azione dei roditori ed insetti.

Permeabilità al vapore acqueo

Si tratta della capacità o meno del rivestimento di farsi attraversare da un flusso di vapore (UNI EN 1931:2002). Più basso è tale valore maggiore sarà la propensione a lasciarsi permeare.

Individuabilità dei punti di filtrazione

Il sistema di impermeabilizzazione dovrebbe essere organizzato in modo da definire campi compartimentati atti a consentire di individuare facilmente le zone interessate da possibili difetti di tenuta.

Non trasmigrabilità di acqua infiltrata

Il sistema di impermeabilizzazione dovrebbe essere organizzato (ad esempio mediante compartimentazioni integrali) in modo tale da evitare o controllare la trasmigrazione incontrollata e generalizzata dell'acqua eventualmente infiltratasi attraverso l'elemento di tenuta e una estensione dei danni all'intero sistema di impermeabilizzazione.

Resistenza all'irraggiamento UV

Si tratta della capacità o meno del materiale di resistere all'esposizione dei raggi UV. Questo potrebbe compromettere le caratteristiche fisiche-funzionali dell'elemento.

Drenaggio ed evacuazione idrica

Il sistema di drenaggio ed evacuazione ed i suoi elementi componenti devono essere conformati in modo da convogliare ed evacuare l'acqua piovana in tempi rapidi, senza determinare battenti idrici, ristagni e danni al sistema stesso. Il sistema nel tempo non deve essere sottoposto ad intasamenti.

Drenaggio di sicurezza

Il sistema di impermeabilizzazione, quando non sia possibile effettuare ispezioni e opere di manutenzione, deve essere predisposto con opportuni dispositivi atti a consentire un "drenaggio di sicurezza" dell'acqua che potrebbe infiltrarsi nel sistema di impermeabilizzazione per eventuali anomalie funzionali dell'elemento di tenuta che dovessero registrarsi nel tempo.

Collaudabilità

Il sistema di impermeabilizzazione e le procedure di costruzioni debbono favorire la collaudabilità della funzione di tenuta idrica, opzionalmente il requisito potrà essere richiesto anche per la fase di esercizio. Ciò è auspicabile, soprattutto nel caso di elementi di tenuta sottoposti a pavimentazioni massive o comunque in posizioni tali da escludere qualsiasi ispezionabilità durante la fase di esercizio, adottare soluzioni di tenuta idrica dotati di più sistemi di sicurezza o di dispositivi costruttivi in grado di consentire il collaudo della tenuta in corrispondenza delle sormonte.

Manutenibilità

Il sistema di impermeabilizzazione ed i suoi elementi componenti, quando possibile, devono poter essere ispezionati e sottoposti a manutenzione in particolare nelle parti più critiche (dispositivi di evacuazione, giunti di dilatazione, ecc.), o comunque nelle parti per le quali la vita utile attesa sia inferiore a quella del sistema complessivo. L'impossibilità o l'onerosità di procedere ad opere di manutenzione ordinaria o straordinaria determina la necessità di prestare una particolare attenzione alla affidabilità dell'elemento di tenuta e all'adozione di dispositivi di sicurezza (vedi drenaggio di sicurezza, collaudabilità).

8.3. MATRICE DI CONFRONTO

L'attività di progettazione mette in continua relazione tre fattori fondamentali:

- ESIGENZE
- REQUISITI
- PRESTAZIONI

La norma UNI 10838 definisce la **qualità edilizia** come *“l'insieme delle proprietà e delle caratteristiche dell'organismo edilizio o di sue parti che conferiscono ad essi la capacità di soddisfare, attraverso prestazioni, esigenze espresse o implicite”*.

Infatti, la qualità edilizia è la misura del grado di rispondenza delle prestazioni dell'organismo edilizio e/o delle sue parti alle esigenze, espresse attraverso i requisiti ambientali e tecnologici che ne hanno guidato la progettazione e la costruzione. La qualità ambientale è la misura del grado di rispondenza delle prestazioni dell'organismo edilizio e/o delle sue parti ai requisiti ambientali. La qualità tecnologica la misura del grado di rispondenza delle prestazioni ai requisiti tecnologici.

Le prescrizioni relative al sistema edilizio hanno dunque l'obiettivo di garantire la qualità delle costruzioni in relazione alle esigenze degli utilizzatori.

Al fine di definire le basi su cui stabilire i livelli di qualità attesa, è stata realizzata una matrice comparativa. Tale operazione non ha lo scopo di individuare la soluzione migliore ma consentire una più chiara e rapida comprensione di quale sia la tipologia di sistema tecnologico che più soddisfa quel determinato requisito.

Va sottolineato infatti che ogni cantiere è un sistema a sé. Le variabili che condizionano la progettazione di strutture interrato possono essere esogene: ubicazione del cantiere, ambito di realizzazione, opere provvisorie, analisi di carichi aggiuntivi sismici e dinamici, portanza e natura del terreno qualità dell'acqua e livello di falda; - ed endogene: destinazione d'uso, durabilità delle opere, tecnologia costruttiva e condizioni al contorno.

Il sistema di valutazione scelto è basato su segni grafici stilizzati cui corrispondono, in funzione della tipologia e del colore, i livelli di rispondenza rispetto a determinati requisiti.

VALUTAZIONE



Positiva rispondenza alle caratteristiche in esame



Media rispondenza alle caratteristiche in esame



Negativa rispondenza alle caratteristiche in esame

I requisiti ambientali-tecnologici considerati per confrontare i diversi sistemi sono:

- Facilità di posa;
- Tempo di posa;
- Durabilità;
- Reversibilità;
- Vita utile;
- Sostenibilità;
- Manutenibilità;
- Costi.

MATRICE DI CONFRONTO									
Tipologia di materiale	Facilità di posa	Tempo di posa	Durabilità	Reversibilità	Vita utile	Sostenibilità	Manutenibilità	Costi	
membrane bitume-polimero	😊	😐	😞	😐	😐	😞	😐	😊	
membrane sintetiche - PVC	😐	😐	😊	😐	😊	😊	😊	😐	
membrane sintetiche - FPO	😐	😐	😊	😐	😊	😊	😊	😐	
membrane sintetiche - EPDM	😊	😐	😊	😐	😐	😊	😐	😊	
membrane bentonitiche	😊	😊	😐	😊	😐	😊	😐	😐	
membrane liquide	😐	😊	😞	😞	😐	😞	😊	😊	
membrane autoadesive	😊	😊	😞	😊	😞	😐	😞	😊	
resine termoindurenti	😐	😐	😊	😊	😊	😞	😊	😞	
additivi per cls	😊	😊	😊	😊	😊	😐	😊	😊	
malte cementizie	😊	😐	😐	😊	😊	😐	😊	😊	
profilati PVC	😐	😞	😊	😐	😊	😊	😐	😐	
profilati bentonitici	😐	😞	😊	😐	😊	😊	😞	😊	

Tabella 24: Matrice di confronto

Bibliografia essenziale

- UNI 8290:1981 Parte I Edilizia residenziale - Sistema tecnologico - Classificazione e terminologia;
- UNI 8290:1983 Parte II Edilizia residenziale - Sistema tecnologico - Analisi dei requisiti;
- UNI 8290:1987 Parte III Edilizia residenziale - Sistema tecnologico - Analisi degli agenti;
- UNI 10838:1999 Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia;
- NTC, Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. del 14 gennaio 2008.

CONCLUSIONI

In questi ultimi anni le aziende produttrici hanno migliorato le prestazioni dei prodotti di impermeabilizzazione, ma il successo di un sistema di impermeabilizzazione, oltre che dalla coerenza del sistema stesso rispetto al modello d'uso e al contesto tecnico e ambientale, dipende in larga parte dal progetto e dalla sua realizzazione.

Una recente ricerca, sui contenziosi giudiziari per difetti costruttivi in edilizia, ha dimostrato come i difetti inerenti le infiltrazioni idriche rappresentano il maggior numero di vertenze legali. Inoltre da questo studio emerge come gli errori di progettazione in rapporto a quelli di costruzione, assumono una rilevanza molto importante.

È facile constatare come sussista un divario fra le potenzialità dei sistemi impermeabilizzanti in termini di qualità dei prodotti e gli esiti finali legati alla loro applicazione. C'è l'illusione che il "prodotto speciale" possa supplire alle manchevolezze del progetto, al quale si richiede troppo spesso il soddisfacimento dei soli aspetti estetici e commerciali.

L'aspetto estetico di un edificio ha superato purtroppo per importanza gli aspetti essenziali e funzionali dell'edificio stesso, ponendo "l'impermeabilizzazione", che spesso non è direttamente visibile all'Utilizzatore finale, come un elemento marginale e quasi trascurabile nella progettazione e nell'esecuzione dell'opera edile.

Ciò si aggiunge al fatto che difficilmente è dato di osservare la presenza di un vero e proprio progetto del sistema di impermeabilizzazione. Frequentemente i documenti di appalto, snodo fondamentale del processo di costruzione, si limitano a richieste generiche.

È necessario che venga progettata e formulata una specifica tecnica di capitolato molto precisa e dettagliata, corredata da dettagli costruttivi che descrivano tutti i punti singolari che devono essere impermeabilizzati. Il progetto del sistema d'impermeabilizzazione deve diventare parte integrante del progetto della costruzione stessa.

Diventa essenziale, in fase di progetto, che le parti interessate sia alla costruzione della struttura che alla realizzazione del sistema d'impermeabilizzazione, abbiano frequenti contatti e collaborino in maniera completa.

A fronte di questa situazione, la presente tesi si propone come una guida alla progettazione e alla realizzazione a regola d'arte dei sistemi di tenuta all'acqua per l'impermeabilizzazione di strutture interrate di nuova costruzione in calcestruzzo.

L'approccio sistemico al problema ha consentito di analizzare nel dettaglio le soluzioni tecnologiche compatibili, nell'ottica di definire un insieme di metodi e procedure operative che possano costituire la base per redigere un manuale, corredato da elaborati grafici e schede operative, finalizzato ad assistere i progettisti, direttori dei lavori e manutentori nella stesura dei documenti di appalto e nel controllo della qualità del processo di costruzione e di gestione manutentiva.

BIBLIOGRAFIA

BIGGINS T., “*Waterproofing underground concrete structures*”, UNIVERSITY OF FLORIDA, Florida, 1990;

BIG MAT, “*Impermeabilizzazione*”, QUADERNO TECNICO, n° 5;

BRAC E. M. G., FERRARA L., “*Impermeabilizzazione del calcestruzzo integro e fessurato mediante additivi cristallizzanti*”, POLITECNICO DI MILANO, Milano, 2016;

BRAMBILLA F., BRINGHENTI G.F., CANETTA G., CEREDA P., MASCARDI C., TOGNA A., VARESI L., “*Guida alla Progettazione degli Ambienti Interrati e Metodi di Impermeabilizzazione*”, LIBRERIA CLUP, Milano, 2002;

BROCCOLINO A., “*Impermeabilizzazione di fondazioni in falda con utilizzo di membrane polimeriche prefabbricate (tpo e pvc-p)*”, INGENIO N. 43, 2016;

BS 8102-2009, “*Code of practice for protection of below ground structures against water from the ground*”, BRITISH STANDARDS;

CALDERA C., “*Appunti del corso di Progettazione Integrale*”, POLITECNICO DI TORINO, Torino, 2015;

CALDERA C., “*Appunti del corso di Architettura Tecnica*”, POLITECNICO DI TORINO, Torino, 2013;

CROCE S., FIORI M., “*Sistemi di impermeabilizzazione, guida alla progettazione*”, BEMA EDITRICE, Milano, 2005;

INDEX, “*Fondazioni: impermeabilizzazione e protezione delle opere contro-terra nuove dall’acqua e dal radon, anche in zona sismica*”, CAPITOLATO TECNICO;

INDEX, “*Guida all’impermeabilizzazione: i materiali per l’impermeabilizzazione, loro caratteristiche, cenni storici*”, 2014;

MAPEI, “*Impermeabilizzazione di strutture interrato*”, QUADERNO TECNICO;

MENDES P., LOPES J. G., DE BRITO J., FEITEIRA J., “*Waterproofing of Concrete Foundations*”, JOURNAL OF PERFORMANCE OF CONSTRUCTED FACILITIES, Lisbona, 2014;

MOCCO E., “*Calcestruzzo impermeabile & presidi di ermetizzazione: domande e risposte*”, INGENIO N.44, 2016;

MORDAGÀ M., “*Consolidamento e impermeabilizzazione con betoncino additivato*”, DESTEC – UNIVERSITÀ DI PISA, Pisa, 2015;

NELVA R., “*Appunti del corso di Architettura Tecnica*”, POLITECNICO DI TORINO, Torino, 2012;

NTC, Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. del 14 gennaio 2008;

RAILSYSTEM, “*Construction Methodology*”;

SCALCON O., STOPPA C., “*Il crack bridging nelle guaine impermeabilizzanti*”, TECNO PIEMONTE, Vercelli, 2016;

SCHVARCZ R., “*L’impermeabilizzazione delle strutture interrato ai fini del buon isolamento: quali garanzie e forme di controllo?*”, IL GIORNALE DELL’INGEGNERE, n° 4, aprile 2015;

SIKA, “*Soluzioni per strutture interrato in calcestruzzo*”;

STICH H-J., “*System Information and Method Statement Corporate Construction, Basement waterproofing with membranes*”, SIKA, N° 850 64 03, aprile 2008;

TENAX, “*Drenaggio e Protezione*”;

TOVEY ALAN, “*Simplifying design and construction*”;

UFSP, “*Radon: Guida tecnica*”, UFFICIO FEDERALE DELLA SANITÀ PUBBLICA, SERVIZIO TECNICO E D’INFORMAZIONE SUL RADON, Berna;

UNICAL, “*Guida alla prescrizione della durabilità delle strutture in cemento armato*”;

WASCOTEC, “*Sistema vasca bianca: Tecnologia per l’impermeabilizzazione delle costruzioni in calcestruzzo*”;

SITOGRAFIA

www.mapei.com [06/10/2017]
www.ita.sika.com [02/08/2017]
www.penetron.it [20/09/2017]
www.indexspa.it [04/10/2017]
www.volteco.it [02/10/2017]
www.harpogroup.it [11/10/2017]
www.wascotec.it [08/10/2017]
www.bigmat.it [02/06/2017]
www.diasen.com [08/10/2017]
www.ita.arpalombardia.it [02/10/2017]
www.uni.com [20/09/2017]
www.ingenio-web.it [06/10/2017]
www.railsystem.net/cut-and-cover/ [02/10/2017]
www.carblat.ru/scavi-di-sbancamento/ [06/10/2017]
www.negropal.com/servizi/berlinesi-di-micropali-e-protezione-scavi/,
[20/09/2017]
www.bertoia.it/lavorazioni/pali-trivellati-per-fondazioni-e-consolidamento-terreni/, [20/07/2017]
www.railsystem.net/jet-grouting/, [02/10/2017]
www.elto.it/site/palancole_acciaio_gallery.php, [03/10/2017]
www.trevispa.com/en/Technologies/diaphragm-walls-hydromill, [03/10/2017]
www.en.klaudia.eu/wellpoints-wellpoints_application.html, [08/10/2017]
www.fisproducts.co.uk/our-solutions/structural-waterproofing/cavity-drain-systems/ [05/10/2017]
www.bentonite.it/struttura-della-bentonite.php [02/10/2017]