

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI
DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Pavimentazioni di Calcestruzzo



CNR-DT 211/2014

Proprietà letteraria riservata
del
Consiglio Nazionale delle Ricerche

CNR-DT 211/2014

INDICE

1	PREMESSA.....	5
2	CLASSIFICAZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI.....	7
2.1	DEFINIZIONI.....	7
2.2	CLASSIFICAZIONE PER TIPOLOGIA E PER USO.....	7
2.2.1	Classificazione per tipologia del supporto.....	7
2.2.2	Classificazione per destinazione d'uso.....	9
2.2.3	Classificazione in base alla resistenza all'abrasione.....	9
2.2.4	Classificazione in base al grado di planarità.....	10
3	MASSICCIATA E SOTTOFONDO.....	14
3.1	PREMESSA.....	14
3.2	MASSICCIATA.....	14
3.3	SOTTOFONDO.....	15
3.4	INDAGINI SPERIMENTALI.....	16
3.5	CRITERI DI VALUTAZIONE E CONTROLLO DELLA COSTANTE ELASTICA DI PROGETTO DEL SUPPORTO.....	16
4	MATERIALI.....	18
4.1	CALCESTRUZZO.....	18
4.1.1	Cemento.....	18
4.1.2	Aggregati.....	18
4.1.3	Acqua di impasto.....	18
4.1.4	Additivi.....	18
4.1.5	Superfluidificanti o riduttori d'acqua.....	19
4.1.6	Ritardanti o acceleranti.....	19
4.1.7	Additivi ad azione mista.....	19
4.1.8	Aeranti.....	19
4.1.9	Riduttori di ritiro.....	19
4.1.10	Fibre per il controllo della fessurazione da ritiro.....	20
4.1.11	Espansivi non metallici.....	20
4.1.12	Aggiunte minerali.....	20
4.2	CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO.....	21
4.2.1	Fibre.....	21
4.2.2	Comportamento a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato.....	22
4.2.3	Comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato.....	22
4.2.4	Classi prestazionali per la tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato.....	23
4.2.5	Prestazioni minime.....	24
4.3	PROGETTO DEL CALCESTRUZZO PER PAVIMENTAZIONI.....	24
4.3.1	Generalità.....	24
4.3.2	Classe di resistenza.....	25
4.3.3	Classe di esposizione ambientale.....	25
4.3.4	Scelta della consistenza.....	25
4.3.5	Prescrizioni aggiuntive.....	26

4.3.6	Reazione alcali/aggregato	27
4.4	ACCIAIO	27
4.5	STRATO DI FINITURA E TRATTAMENTI SUPERFICIALI	27
4.5.1	Resistenza all'abrasione e all'usura	27
4.5.2	Resistenza all'urto	28
4.5.3	Resistenza chimica.....	28
4.5.4	Scivolosità.....	28
4.5.5	Funzione estetica	28
4.5.6	Antistaticità.....	29
4.5.7	Protezione dalle azioni ambientali.....	29
5	CRITERI DI PROGETTAZIONE, AZIONI E PROBLEMATICHE SPECIALI.....	30
5.1	BASI DELLA PROGETTAZIONE	30
5.2	AZIONI MECCANICHE ED AMBIENTALI.....	30
5.2.1	Vita nominale di una pavimentazione	30
5.2.2	Azioni dirette	30
5.2.3	Azioni indirette	31
5.2.4	Combinazioni delle azioni	32
5.3	MODELLI E METODI DI CALCOLO.....	33
5.3.1	Calcolo elastico lineare.....	34
5.3.2	Calcolo a rottura	35
5.3.3	Analisi incrementale non lineare	36
6	PROGETTAZIONE DEI GIUNTI NELLE PAVIMENTAZIONI	38
6.1	GIUNTI DI ISOLAMENTO	38
6.2	GIUNTI DI COSTRUZIONE	38
6.3	GIUNTI DI CONTRAZIONE O CONTROLLO.....	39
6.4	GIUNTI DI DILATAZIONE	39
6.5	CARATTERISTICHE DEI SIGILLANTI.....	40
7	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI	41
7.1	PAVIMENTAZIONI SENZA ARMATURA.....	41
7.2	PAVIMENTAZIONI CON ARMATURA TRADIZIONALE.....	41
7.2.1	Verifica con analisi elastica lineare	41
7.2.2	Armatura solo all'intradosso.....	42
7.2.3	Verifica con analisi plastica.....	42
7.2.4	Verifica con analisi non lineare	42
7.3	PAVIMENTAZIONI DI CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO	42
7.3.1	Verifica con analisi elastica lineare	43
7.3.2	Verifica con analisi plastica.....	43
7.3.3	Verifica con analisi non lineare	43
7.4	PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO CON ARMATURA TRADIZIONALE	43
7.4.1	Verifica con analisi elastica lineare	43
7.4.2	Verifica con analisi non lineare	44
8	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO	45
8.1	STATI LIMITE DI ESERCIZIO NELLE PAVIMENTAZIONI	45
8.1.1	Verifica di deformabilità.....	45
8.1.2	Verifica di fessurazione	45
8.1.3	Limitazione delle tensioni di esercizio	46
8.2	REQUISITI DI DURABILITÀ.....	46

9	PRESCRIZIONI RELATIVE ALL'ESECUZIONE	47
9.1	PIANIFICAZIONE DELLE OPERAZIONI.....	47
9.1.1	Controllo generale del cantiere.....	47
9.1.2	Norme di sicurezza.....	47
9.2	CONDIZIONI AMBIENTALI.....	47
9.3	DOCUMENTAZIONE TECNICO/CONTRATTUALE.....	47
9.4	FASI OPERATIVE DELL'ESECUZIONE.....	48
9.4.1	Isolamento di strutture e spiccati verticali.....	48
9.4.2	Barriera al vapore e strato di scorrimento.....	48
9.4.3	Posa delle armature (reti, fibre, barrotti).....	48
9.4.4	Fornitura del calcestruzzo a piè d'opera.....	49
9.4.5	Tempi di lavorazione del calcestruzzo.....	49
9.4.6	Sequenza delle campiture di posa.....	49
9.4.7	Posa in opera del calcestruzzo.....	50
9.4.8	Applicazione dello strato di usura.....	50
9.4.9	Protezione e stagionatura.....	51
9.4.10	Giunti.....	52
9.4.11	Riempimenti e sigillature.....	52
9.5	INDAGINI PRELIMINARI.....	53
9.5.1	Indagini sul terreno.....	53
9.5.2	Prequalifica del calcestruzzo.....	54
9.6	PREPARAZIONE E TOLLERANZE NELLA MASSICCIATA.....	55
9.7	TIPO DI FINITURA.....	55
9.8	INFLUENZA DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI SULLA POSA DEL CALCESTRUZZO.....	56
9.9	PROTEZIONE A LAVORO ESEGUITO.....	57
9.10	IMPIANTISTICA.....	57
9.11	IMPIANTI DI RISCALDAMENTO/RAFFRESCAMENTO A PAVIMENTO.....	57
10	INDAGINI PRELIMINARI, CONTROLLI E PROVE IN SITU	58
10.1	VERIFICHE E CONTROLLI SUI MATERIALI.....	58
10.1.1	Verifiche sui materiali componenti.....	58
10.1.2	Controlli sul calcestruzzo.....	58
10.1.3	Controlli sul calcestruzzo fresco.....	58
10.1.4	Controlli sul calcestruzzo indurito.....	59
10.1.5	Verifiche e controllo sull'armatura.....	61
10.1.6	Determinazione delle caratteristiche dei materiali per lo strato di usura.....	61
10.2	CONTROLLI SULLA PAVIMENTAZIONE FINITA.....	61
10.2.1	Regolarità geometrica e finitura della superficie.....	61
10.2.2	Qualità dello strato superficiale.....	63
10.2.3	Qualità del calcestruzzo in opera.....	64
11	CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLE DIFETTOSITÀ	66
11.1	PLANARITÀ.....	66
11.2	CURLING.....	66
11.3	CAVILLATURE E FESSURE.....	66
11.3.1	Cavillature e/o microfessure.....	66
11.3.2	Fessure.....	67
11.4	DELAMINAZIONE.....	67
11.5	DIFFERENZE CROMATICHE.....	68
12	PIANO DI USO E MANUTENZIONE	69

12.1	INTRODUZIONE	69
12.2	OSSERVAZIONI SULLA DURATA DELLE PAVIMENTAZIONI	69
12.3	TIPOLOGIA DI MANUTENZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI	69
12.4	PROGRAMMA DI MANUTENZIONE.....	70
13	RUOLI DEGLI ATTORI NELLA PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELLA PAVIMENTAZIONE	72
13.1	PROGETTISTA	72
13.2	DIRETTORE DEI LAVORI	72
13.3	PRODUTTORE DEL CALCESTRUZZO.....	72
13.4	IMPRESA APPALTATRICE	72
13.5	CERTIFICATORE	72
APPENDICE A: ESEMPIO DI PAVIMENTAZIONE IN CALCESTRUZZO ARMATO:		
	INDAGINE PRELIMINARE, VERIFICHE E SPECIFICHE DI PROGETTO.....	74
A.1	INDAGINE PRELIMINARE	74
A.2	DATI DI BASE.....	75
A.3	PROCEDIMENTO OPERATIVO.....	75
A.3.1	Resistenza di progetto a trazione nel calcestruzzo	75
A.3.2	Verifica della pavimentazione a punzonamento.....	76
A.3.3	Sollecitazioni nella pavimentazione per flessione e combinazione delle azioni	77
A.4	PROGETTO DEL CALCESTRUZZO	79
A.5	PROGETTO DEI GIUNTI	80
A.6	PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO PER LA REALIZZAZIONE DELLA PAVIMENTAZIONE	81
A.7	PIANO D'USO E PROGRAMMA DI MANUTENZIONE.....	82
APPENDICE B: ESEMPIO DI PAVIMENTAZIONE IN CALCESTRUZZO ARMATO FIBRORINFORZATO.....		
	FIBRORINFORZATO.....	84
B.1	PROPRIETÀ MECCANICHE DEI MATERIALI.....	84
B.1.1	Comportamento a compressione del calcestruzzo	85
B.1.2	Comportamento a trazione del calcestruzzo	85
B.1.3	Comportamento dell'acciaio per cemento armato (B450C)	87
B.2	ANALISI STRUTTURALE	87
B.2.1	Modellazione della pavimentazione	89
B.2.2	Modellazione del terreno	91
B.2.3	Azioni.....	91
B.3	RISULTATI DELL'ANALISI STRUTTURALE	93
B.3.1	Comportamento allo Stato Limite Ultimo di flessione	93
B.3.2	Verifica a punzonamento	94
B.3.3	Comportamento allo Stato Limite di Esercizio.....	98
APPENDICE C: SIMBOLOGIA.....		
	APPENDICE C: SIMBOLOGIA.....	101
APPENDICE D - NORMATIVA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO		
	APPENDICE D - NORMATIVA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO	104

1 PREMESSA

Le pavimentazioni in calcestruzzo sono molto utilizzate in aree industriali, sia interne (ad esempio magazzini o aree di lavorazione industriale in genere) che esterne (aree di stoccaggio o di movimentazione merci), ma anche per la realizzazione di vie di transito quali piste aeroportuali e, soprattutto all'estero, di vie stradali per il traffico su ruota.

Inoltre, in questi ultimi anni l'evoluzione tecnologica negli ambienti industriali e nelle logistiche ha richiesto prestazioni sempre più importanti alle pavimentazioni, evidenziate anche nella stessa evoluzione normativa.

Le pavimentazioni di calcestruzzo sono spesso realizzate unicamente sulla base di voci di capitolato, senza alcuna progettazione preliminare. Il risultato della scarsa attenzione progettuale ed esecutiva è spesso causa di vari difetti, tra i quali fessurazioni, deformazioni, rotture e disomogeneità che possono compromettere la funzionalità della pavimentazione.

Dal punto di vista strutturale, le pavimentazioni sono piastre su appoggio continuo cedevole.

La progettazione delle pavimentazioni in calcestruzzo è di grande importanza ed attualità, malgrado tale settore sia sempre stato considerato non di competenza ingegneristica. Ciò è palesemente in contrasto con i numerosi aspetti tecnici coinvolti, a partire dalle caratteristiche del supporto, per continuare con la tecnologia del calcestruzzo e per finire con lo strato di finitura superficiale.

Le verifiche devono essere condotte soprattutto nei confronti dello Stato Limite di Esercizio (SLE) senza però trascurare lo Stato Limite Ultimo (SLU). In condizioni di esercizio rivestono particolare importanza lo stato limite di formazione delle fessure e quello di deformazione in quanto un'eccessiva deformazione potrebbe creare problemi, ad esempio alle scaffalature, al transito dei mezzi e, in generale, alla funzionalità della stessa pavimentazione.

Una pavimentazione può essere realizzata adottando differenti tecniche costruttive, quali ad esempio:

1. pavimentazione in calcestruzzo non armato;
2. pavimentazione in calcestruzzo armato;
3. pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) con armatura convenzionale;
4. pavimentazione in FRC senza armatura convenzionale.

A seconda delle tecniche costruttive adottate, l'armatura di una pavimentazione è costituita da uno o più strati di rete e/o da fibre "strutturali"; altre tipologie di fibre "non strutturali" possono essere aggiunte per contrastare la fessurazione da ritiro. In presenza di carichi sismici, quali quelli trasmessi da scaffalature porta-pallet o similari, fissate alla pavimentazione con tasselli di tipo meccanico o chimico, la tipologia di cui al punto 1 non può essere adottata ma occorrerà utilizzare una pavimentazione dotata di armatura convenzionale (il progettista verificherà l'eventuale necessità di disporre l'armatura sia all'intradosso sia all'estradosso) o, in alternativa, una pavimentazione in FRC, con o senza armatura tradizionale integrativa.

Le azioni agenti sulle pavimentazioni di calcestruzzo comportano stati di sollecitazione piuttosto complessi. Ad esempio, i carichi mobili provocano azioni cicliche variabili, per cui la pavimentazione risulta sottoposta ad azioni flettenti con tensioni di trazione sia all'intradosso sia all'estradosso della piastra. Quando le tensioni di trazione superano la resistenza a trazione del calcestruzzo (nelle condizioni di esercizio), risulta necessaria una attenta valutazione dei fenomeni fessurativi e l'utilizzo di un'armatura tradizionale e/o l'impiego di FRC (vedi documento CNR DT 204/2006).

È sembrato pertanto importante per il CNR, per il tramite della propria Commissione incaricata della predisposizione e analisi di norme tecniche relative alle costruzioni, promuovere la redazione di Istruzioni sulle pavimentazioni di calcestruzzo, che non solo forniscano i criteri per la progettazione, esecuzione e controllo, ma anche criteri con i quali verificare l'accettabilità o meno di certe difettosità inevitabili nel caso di pavimentazioni estese, utili anche per la predisposizione di capitolati prestazionali e per la definizione di piani di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Il tema è trattato ad ampio spettro, dalle tipologie costruttive e materiali utilizzati per la loro realizzazione, alla definizione delle azioni e dei criteri di progetto e di verifica, alle prescrizioni relative all'esecuzione ed alle possibili difettosità, alle prove in situ, queste ultime sia nel caso di progettazione di nuove pavimentazioni che di valutazione delle prestazioni di pavimentazioni esistenti.

Il presente documento tratta le pavimentazioni in calcestruzzo senza armatura, con armatura tradizionale (rete o barre) e in calcestruzzo fibrorinforzato; non sono incluse le pavimentazioni armate con cavi da precompressione post-tesi.

Il documento è corredato di Appendici che approfondiscono alcuni aspetti teorici, richiamati sinteticamente nel corpo delle Istruzioni, ma meritevoli, per il loro carattere innovativo, di una trattazione più estesa, con finalità tipicamente divulgative.

Le istruzioni contenute nel presente documento tecnico non hanno valore cogente ma possono costituire un utile riferimento non solo dal punto di vista tecnico per i progettisti ed appaltatori, ma anche nella redazione dei capitolati tecnici per la realizzazione di tali opere, e si applicano alle pavimentazioni di edifici industriali e delle relative pertinenze, con l'esclusione di vie stradali ed aeroportuali.

2 CLASSIFICAZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI

2.1 Definizioni

Nelle presenti istruzioni si utilizzano i seguenti termini e definizioni:

- (1) La tipologia di pavimentazione trattata nel presente documento è rappresentata da una piastra di calcestruzzo appoggiata su un supporto continuo. Sulla superficie estradossale può essere presente uno strato di usura.
- (2) Il supporto di una pavimentazione di calcestruzzo è l'insieme integrato degli strati presenti sotto di essa. In particolare, il supporto può essere costituito da un sottofondo o da una soletta.
- (3) Il sottofondo di una pavimentazione su terreno è costituito da un sistema di strati di materiale granulare, eventualmente stabilizzato con leganti ed inclusioni, da materiali provenienti da demolizioni e scarti industriali corretti e miscelati con terre granulari.
- (4) La massicciata è lo strato di supporto posto a contatto con la piastra con eventuale interposizione di strato isolante. Essa può essere costituita da terre granulari naturalmente stabilizzate ed eventualmente additivate con leganti, rinforzate con inclusioni. Possono essere utilizzati materiali provenienti da demolizioni e scarti industriali corretti e miscelati con terreni granulari.
- (5) Lo strato di scorrimento si interpone fra la pavimentazione di calcestruzzo e il supporto per favorire le libere deformazioni della piastra.
- (6) Lo strato di impermeabilizzazione e la barriera al vapore hanno la funzione di impedire o limitare il passaggio rispettivamente di acqua (o gas) e vapore d'acqua tra la pavimentazione e il supporto.
- (7) Lo strato isolante ha lo scopo di isolare termicamente la pavimentazione dal supporto.
- (8) Lo strato di usura (o di finitura) ha lo scopo di migliorare le prestazioni chimico-fisico-meccaniche o estetiche della superficie della pavimentazione.
- (9) I giunti sono discontinuità nella pavimentazione o tra essa e altri elementi costruttivi. Si possono distinguere quattro tipologie di giunto: di isolamento, di costruzione, di contrazione e di dilatazione.

2.2 Classificazione per tipologia e per uso

2.2.1 Classificazione per tipologia del supporto

Le pavimentazioni di calcestruzzo possono essere suddivise nelle seguenti tipologie:

- Pavimentazioni su terreno;
- Pavimentazioni su soletta;
- Pavimentazioni su pavimentazione esistente.

Nella Figura 2.1 è illustrata la sequenza tipica degli strati che completano la pavimentazione di calcestruzzo:

1. Strato di usura;

2. Piastra di calcestruzzo;
3. Strato di separazione (barriera al vapore, barriere ai liquidi, barriere di scorrimento ecc.).

In tutte le tipologie descritte nel seguito può essere presente uno strato di isolamento termico, e/o di alleggerimento o ventilazione, per i quali deformabilità e grado di vincolo devono essere considerati nella valutazione della rigidità del supporto.

2.2.1.1 Pavimentazioni su terreno

Nella Figura 2.1 è illustrata la sequenza tipica di strati che costituisce una pavimentazione di calcestruzzo realizzata su terreno. Il supporto è costituito da (Figura 2.1):

4. Massiccata;
5. Sottofondo.

La natura e lo spessore della massiccata e degli strati di sottofondo dipendono dalle caratteristiche geometriche, strutturali, geotecniche e idrauliche del sistema. Per le specifiche sulla massiccata e sul sottofondo si rimanda al Capitolo 3.

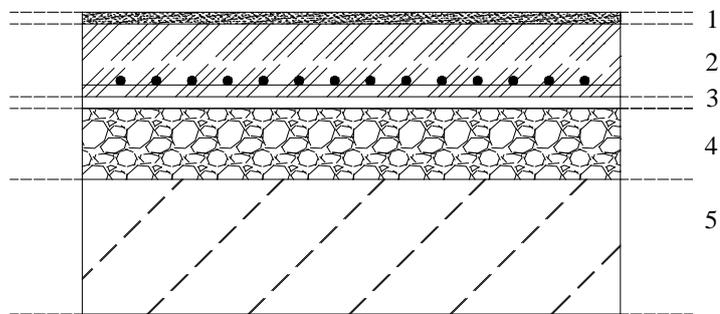


Figura 2.1. Pavimentazione su terreno.

2.2.1.2 Pavimentazioni su soletta

Nella Figura 2.2 è illustrata la sequenza tipica di strati che costituisce una pavimentazione di calcestruzzo realizzata su soletta.

Il supporto è costituito da:

4. Soletta strutturale;
5. Elemento prefabbricato (ove presente).

La pavimentazione può essere collaborante o meno con la soletta; nel primo caso non esiste alcuna separazione fra il getto della pavimentazione ed il getto della soletta.

La pavimentazione collaborante con la soletta è in genere una soluzione sconsigliata in quanto rende più difficoltoso il controllo della fessurazione e richiede misure che assicurino l'assenza di scorrimento tra soletta e piastra.

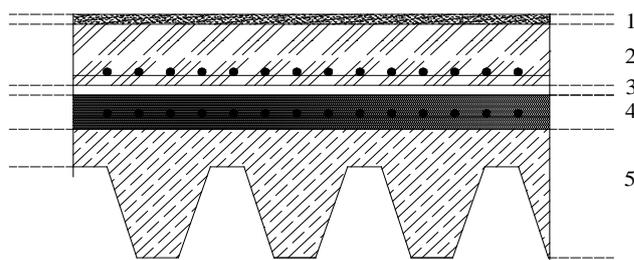


Figura 2.2. Pavimentazione su soletta non collaborante.

2.2.1.3 Pavimentazioni su pavimentazione esistente

Nella Figura 2.3 è illustrata la sequenza tipica di strati che costituisce una pavimentazione di calcestruzzo realizzata su una pavimentazione esistente.

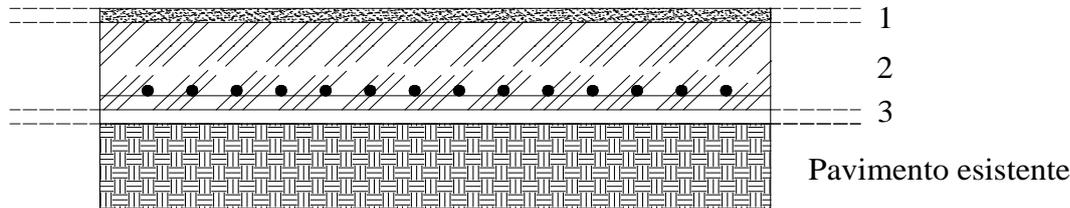


Figura 2.3. Pavimentazione su pavimentazione esistente.

2.2.2 Classificazione per destinazione d'uso

Le pavimentazioni di calcestruzzo possono essere classificate, in funzione dell'uso previsto, secondo lo schema riportato nella Tabella 2.1; tale classificazione fa particolare riferimento alle pavimentazioni per uso industriale. Nella stessa tabella sono descritte le tipologie di carico più significative.

Tabella 2.1. Classificazione delle pavimentazioni industriali in funzione dell'uso.

Tipo	Campi di utilizzo prevalente	Tipologie di carico più significative
L1	- Uffici, marciapiedi, cantine, disimpegni. - Autorimesse, box, corselli	- Carichi statici e dinamici non compresi nei tipi successivi. - Automezzi su pneumatici di peso totale ≤ 35 kN
L2	- Magazzini industriali con uso occasionale di transpallet e con scaffalature leggere - Piazzali di autorimesse	- Carrelli elevatori con carico per asse ≤ 35 kN - Scaffalature aventi carico massimo ≤ 10 kN/appoggio - Automezzi su pneumatici di peso totale ≤ 120 kN
L3	- Magazzini industriali con uso continuo di carrelli elevatori - Depositi	- Carrelli elevatori con pneumatici, peso totale > 35 kN - Transpallet di peso totale > 10 kN - Carrelli elevatori con ruote piene, peso totale < 30 kN - Scaffalature aventi carico massimo ≤ 30 kN/appoggio - Automezzi su pneumatici di peso totale ≤ 300 kN
L4	- Magazzini per la grande distribuzione e industria con uso intensivo di carrelli elevatori e con presenza di scaffalature alte	- Carrelli elevatori con pneumatici, peso totale > 60 kN - Transpallet con peso totale > 20 kN - Scaffalature aventi carico massimo > 30 kN/appoggio - Automezzi su pneumatici di peso totale > 300 kN
L5	- Industria pesante, moli e banchine portuali e carichi speciali, piazzali di interporti	- Carrelli elevatori con ruote piene, peso totale > 90 kN - Scaffalature aventi carico massimo > 50 kN/appoggio - Carrelli con pneumatici di peso totale > 180 kN - Automezzi su pneumatici di peso totale > 400 kN

2.2.3 Classificazione in base alla resistenza all'abrasione

Le pavimentazioni di calcestruzzo possono essere classificate, in funzione della richiesta prestazionale in termini di resistenza all'abrasione dello strato di usura, secondo lo schema riportato nella Tabella 2.2; nella stessa tabella sono descritte le tipologie di carico più frequenti per la pavimentazione in base alla sua classificazione. La resistenza all'abrasione viene misurata attraverso la prova descritta dalla norma UNI EN 13892-4:2005, che prevede quattro classi di resistenza all'abrasione.

La resistenza all'abrasione è un requisito importante della pavimentazione e il Progettista dovrà specificare la classe prescelta. L'abrasione è un fenomeno molto complesso in quanto dipende da numerosi fattori, quali il tipo di ruote, il trascinarsi di oggetti, urti e cadute, la presenza di impurità sulla pavimentazione, la presenza di prodotti di lavorazioni particolari, la frequenza d'uso.

È importante ricordare che la resistenza all'abrasione dipende dalle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo utilizzato, dalle caratteristiche dello strato di usura e dalle condizioni di lavoro e di stagionatura della pavimentazione.

La classificazione AR (Abrasion Resistance) indica l'abrasione della superficie del campione di prodotto sottoposto a prova, secondo il metodo BCA, espressa come profondità massima di materiale asportato in millimetri. La UNI EN 13892-4 indica le seguenti quattro classi di abrasione:

- AR 4 = 0.40 mm
- AR 2 = 0.20 mm
- AR 1 = 0.10 mm
- AR 0.5 = 0.05 mm

Le classi AR 2 e AR 1 sono generalmente le più indicate nelle pavimentazioni industriali di magazzini e produzioni di tipo standard.

Tabella 2.2. Classificazione delle pavimentazioni industriali di calcestruzzo in base alla resistenza all'abrasione, AR secondo UNI EN 13813:2004.

Classe	Tipologie di carico più frequenti
AR 4	- Pedonale - Occasionale uso di automezzi su pneumatici di peso totale < 300 kN - Carrelli elevatori su pneumatici
AR 2	- Carrelli elevatori, con ruote piene, di peso totale < 45 kN - Transpallets con peso totale < 10 kN - Automezzi su pneumatici di peso totale > 300 kN - Carrelli elevatori con ruote dure, nylon o neoprene
AR 1	- Carrelli elevatori, con ruote piene, di peso totale > 45 kN - Transpallets con peso totale > 10 kN - Automezzi di peso totale > 300 kN - Ruote in acciaio, nylon e neoprene con forte abrasione - Presenza di materiali abrasivi sulla pavimentazione - Sollecitazioni da urto
AR 0.5	- Abrasione molto severa - Caduta di oggetti molto pesanti - Usi speciali, diversi dai precedenti

Nota: Nell'impossibilità di conoscere con certezza l'effettiva intensità di traffico, è consigliabile adottare la classe superiore a quella di riferimento.

2.2.4 Classificazione in base al grado di planarità

La scelta del grado di planarità è strettamente correlata alla destinazione d'uso prevista ed in particolare al tipo di movimentazione e di stoccaggio delle merci previste.

Le tolleranze di planarità e di orizzontalità dovranno essere prescritte in fase progettuale in relazione all'altezza delle scaffalature e al tipo di carrelli utilizzati nella movimentazione delle

merci. Inoltre diverse sono le esigenze nelle zone libere della pavimentazione, con movimentazione random, rispetto a quelle presenti nelle corsie delle scaffalature.

Si noti che grado di planarità e di orizzontalità più restrittivi richiedono particolari accorgimenti progettuali ed esecutivi. In assenza di prescrizioni progettuali, il grado di planarità contrattuale è da intendersi il Gruppo P2 della Tabella 2.4.

Le normative di riferimento sono la UNI 11146-2005, DIN 15185, DIN 18202-2005, UNI EN 15620-2009.

In presenza di scaffalature nei magazzini di stoccaggio, le tolleranze di posa relative alle pavimentazioni industriali sono riportate nella norma UNI EN 15620:2009, che stabilisce le tolleranze relative alla pavimentazione in relazione all'altezza delle scaffalature e al tipo di movimentazione del carico.

La differenza di quota in millimetri tra 2 punti della pavimentazione su una distanza di 3 m, E_{SD} , misurata nelle due direzioni ortogonali, per pavimentazioni orizzontali interne non deve superare il valore indicato nella Tabella 2.3.

Tabella 2.3. Tolleranze di planarità secondo le UNI EN 15620:2009 - Valori limite di E_{SD} .

Classificazione	Altezza massima di carico [m]	Valore di E_{SD} [mm]
FM1 Carrelli senza spostamento laterale	maggiore di 13	2.25
FM2 Carrelli senza spostamento laterale	da 8 a 13	3.25
FM3 Carrelli senza spostamento laterale	inferiore a 8	4.0
FM4 Carrelli con spostamento laterale	inferiore a 13	4.0

Per quanto riguarda le tolleranze relative alla tipologia di movimentazione delle merci in base alle altezze di carico e alla modalità, si riportano le seguenti indicazioni delle norme DIN, a seconda che la movimentazione avvenga su superfici libere, oppure in corsie predefinite:

Tabella 2.4. Tolleranze in base al grado di planarità con movimentazione su superfici libere (DIN 18202)

		Tolleranza accettabile (mm) per distanze fra i due punti di misurazione (m) fino a				
Gruppo		0.1	1	4	10	15 ^(a)
P2	Pavimentazioni prive di finitura superficiale, sottofondi e piastre di calcestruzzo soggette a successivo trattamento per ottenere requisiti più stringenti (ad es. per ricevere ulteriori finiture quali rivestimenti a spessore, pavimentazioni industriali, piastrelle e strati in aderenza) o per pavimentazioni con minori prestazioni (ad es. zone di deposito, cantine)	5	8	12	15	20
P3	Pavimentazioni con finitura superficiale (ad es. per corsie stradali, o pronti per ricevere una finitura successiva, piastrelle, rifiniti con strati o altre finiture lisciate o spatolate posate in aderenza)	2	4	10	12	15
P4	Analogo al gruppo 3, ma soggetti a requisiti più stringenti	1	3	9	12	15
(a) Il valore in questa colonna è applicato anche alla distanza fra i punti di misura maggiore di 15 m						

Salvo esigenze molto particolari, la numerazione P2, P3 e P4 riguarda il caso di pavimentazioni industriali con zone libere da vincoli, dove la movimentazione avviene in modo casuale.

Nel caso di movimentazione vincolata, come ad esempio in presenza di scaffalature e relative corsie di transito dei carrelli, tra i requisiti di planarità si dovrà considerare anche l'altezza delle scaffalature e la distanza tra le ruote del carrello, così come riportato nelle Tabelle 2.5, 2.6.

Tabella 2.5. Tolleranze in direzione trasversale alle corsie per carrelli - Differenza di quota fra le ruote dei carrelli (DIN 15185).

	Valore limite della tolleranza del dislivello tra le due ruote esterne del carrello rispetto alla loro distanza in metri			
	$x < 1\text{ m}$	$1\text{ m} < x < 1.5\text{ m}$	$1.5\text{ m} < x < 2.0\text{ m}$	$2\text{ m} < x < 2.5\text{ m}$
Altezza di sollevamento del carrello $\leq 6.00\text{ m}$	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm	3.5 mm
Altezza di sollevamento del carrello $> 6.00\text{ m}$ e operazioni meccanizzate	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm

Per altezze delle scaffalature superiori a 10 m, i valori possono essere ancora più restrittivi in relazione al tipo di carrello utilizzato. Per altezze superiori a 13 m dovranno essere utilizzati accorgimenti particolari da stabilire in fase di progetto.

Tabella 2.6. Tolleranze per la planarità longitudinale delle corsie.

Misure prefissate dei valori limite (in mm) rispetto alla distanza dei punti di misura (in m)				
	1 m	2 m	3 m	4 m
Per tutti i tipi di applicazione	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
La misura della planarità viene condotta in accordo con DIN 18202				

In Tabella 2.7 si riportano le tolleranze sull'orizzontalità della pavimentazione in base alla distanza fra i punti di controllo.

La pavimentazione industriale viene normalmente raccordata agli elementi circostanti già posizionati in quota (soglie, chiusini, basamenti, piani di scarico, ecc.); in questi casi l'orizzontalità non è un requisito applicabile.

Tabella 2.7. Tolleranze sull'orizzontalità.

Distanza fra i punti di controllo	≤ 10 m	≤ 25 m	≤ 50 m	≤ 100 m
Tolleranze	± 15 mm	± 20 mm	± 25 mm	± 35 mm

Pendenze

Per le pavimentazioni esterne è possibile ottenere il regolare deflusso dei liquidi con pendenze generalmente del 1.5%. A fronte di motivate esigenze specifiche, definite in fase progettuale, si possono adottare pendenze minori (anche 0.8-1%) ma utilizzando opportuni accorgimenti procedurali e di controllo in corso d'opera, rivolti a consentire sempre un regolare deflusso dei liquidi.

3 MASSICCIAIA E SOTTOFONDO

3.1 Premessa

Il supporto della pavimentazione su terreno è costituito da massicciata e sottofondo.

La massicciata costituisce la fondazione della pavimentazione: essa ha la funzione di raccordo tra la piastra di calcestruzzo e il sottofondo, normalmente caratterizzati da rigidezze molto diverse.

Il sottofondo, generalmente costituito da più strati, ha la funzione di assorbire le sollecitazioni trasferite dalla piastra in calcestruzzo attraverso la massicciata, mantenendo livelli deformativi coerenti con il prefissato stato limite di esercizio.

La progettazione delle pavimentazioni su terreno deve comprendere le indagini preliminari e le prove necessarie ad individuare la composizione litostratigrafica ed i valori caratteristici dei parametri geotecnici del volume del sottosuolo interessato dalla diffusione dei carichi presenti sulla pavimentazione.

3.2 Massicciata

La massicciata deve essere progettata in modo da poter trasferire al sottofondo le sollecitazioni indotte dalle azioni distribuite e concentrate sulla pavimentazione, limitando le deformazioni del sottofondo stesso. A tal fine è necessario dimensionare lo spessore della massicciata per le caratteristiche prestazionali richieste.

Il volume interessato dalla diffusione dei carichi è quella parte di sottofondo che risente in modo significativo, in termini tensionali e deformativi, delle sollecitazioni indotte dai carichi sulla pavimentazione, ad esso trasmesse attraverso la massicciata. Il volume significativo ha dimensioni diverse, da caso a caso, in funzione della estensione della pavimentazione, del tipo e della intensità delle azioni applicate e dalle stesse caratteristiche litologiche, strutturali ed idrauliche del sottosuolo. La massicciata può essere realizzata con i seguenti materiali:

- Misto granulare naturalmente stabilizzato;
- Misto granulare cementato;
- Terra o misto granulare stabilizzato artificialmente;
- Materiali provenienti da demolizioni e scarti industriali, corretti e miscelati con terreni granulari.

Il “*misto granulare naturalmente stabilizzato*” è una terra con granulometria opportunamente assortita, eventualmente corretta, in modo da ottenere la stabilizzazione dello strato mediante compattazione meccanica (CNR 139/92).

Il “*misto granulare cementato*” è una terra con granulometria opportunamente assortita, additivata con legante cementizio per incrementare la resistenza e la rigidezza (CNR 29/72).

La “*terra o misto granulare stabilizzato artificialmente*” è una miscela di terra a granulometria fine o grossolana, eventualmente corretta granulometricamente, trattata con leganti come calce idrata o ossido di calcio, cemento e altre miscele ambientalmente e tecnicamente compatibili (CNR 169/94). La calce può essere impiegata solo nel caso di terre che presentano un indice plastico superiore a 10 (CNR 36/73). In caso contrario, si può essere impiegare del legante cementizio o altri leganti compatibili, omologati e certificati.

I “*materiali provenienti da demolizioni e scarti industriali corretti e miscelati con terreni granulari*” sono i materiali provenienti da lavorazioni di recupero e trattamenti atti a realizzare

miscele granulometricamente compatibili con le norme che disciplinano i criteri di qualificazione dei materiali granulari naturali.

3.3 SOTTOFONDO

Il sottofondo può essere costituito da:

1. Rilevato;
2. Strato di bonifica;
3. Terreno naturale (compattato o stabilizzato).

Il *rilevato* è costituito da uno strato di terreno, sovrastante ad uno strato di bonifica o direttamente al terreno naturale, collocato artificialmente al fine di raggiungere la quota desiderata. Il rilevato può essere realizzato con terreno naturale o stabilizzato, costipato per strati, oppure con terreno rinforzato con l'introduzione di inclusioni (geosintetici, elementi metallici, ecc.).

Lo *strato di bonifica* viene realizzato in sostituzione di una porzione del terreno naturale esistente solo nel caso in cui tale terreno non presenti le caratteristiche meccaniche adeguate e non possa essere migliorato tramite stabilizzazione (come nel caso di terreni vegetali con inclusioni organiche).

Il *terreno naturale* può essere utilizzato per costituire il rilevato o come sottofondo a seguito di un semplice costipamento meccanico oppure a seguito di una preventiva stabilizzazione con calce e/o cemento o con altri leganti e la successiva compattazione meccanica con rulli adeguati, fino all'ottenimento dei valori previsti da progetto, segnatamente per quanto riguarda le caratteristiche di planarità, omogeneità, resistenza meccanica, rigidità, permeabilità.

Nel complesso, il sottofondo deve essere realizzato in modo tale che sia assicurata la stabilità dell'insieme pavimentazione – fondazione.

Nelle Figure 3.1 e 3.2 si riportano due ricorrenti stratigrafie del supporto.

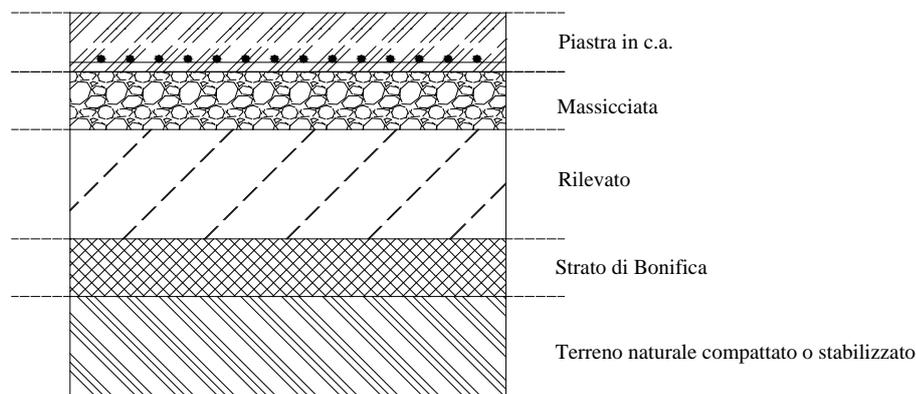


Figura 3.1. Sottofondo costituito da rilevato, strato di bonifica, terreno naturale.

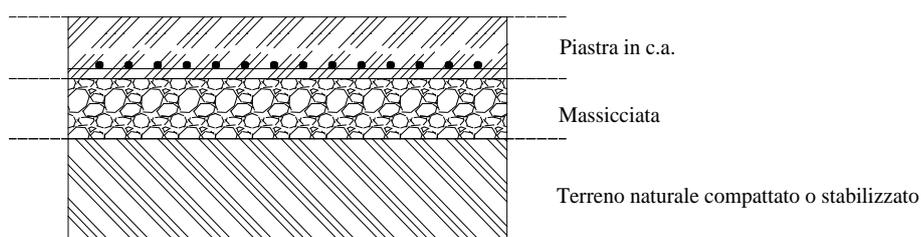


Figura 3.2. Sottofondo costituito da terreno naturale.

3.4 Indagini sperimentali

Le indagini sperimentali sul supporto costituito dalla massicciata e dal sottofondo si distinguono in due categorie:

1. indagini preliminari per la elaborazione del progetto;
2. indagini di verifica e controllo in corso d'opera e finali.

Le indagini preliminari sono rivolte a definire le caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo e consentono di ottenere i valori caratteristici dei parametri geotecnici (resistenza meccanica, rigidità) fino alla profondità del terreno influenzato dal manufatto. Esse comprendono la definizione dei caratteri geologici e morfologici del sito, la ricerca storica sull'evoluzione dell'area per la acquisizione di dati e documenti relativi ad eventuali presenze, anche antiche, di fossi, vallecicole, marcite, impianti sotterranei, bonifiche, trappole idriche, antichi scavi e successivi riempimenti, ecc.

Le indagini sperimentali, in corso d'opera e al termine della realizzazione, sono finalizzate alla verifica dei materiali utilizzati ed al processo realizzativo in cantiere. In tal senso, oltre alla qualità dei materiali, si verifica l'efficacia dei processi di costruzione e posa in opera adottati, delle attrezzature utilizzate, del "curing" effettuato sui materiali durante la stesura e la relativa compattazione. Quando necessario la verifica del processo realizzativo potrà comprendere misure degli assestamenti del rilevato e del terreno di fondazione e misure piezometriche per il controllo dei processi di consolidazione indotti dalla costruzione del manufatto.

I controlli e le verifiche dell'omogeneità, della planarità e delle caratteristiche meccaniche e di rigidità degli strati che costituiscono il sottofondo e la stessa massicciata devono essere condotti eseguendo un numero di indagini e prove sufficienti a qualificare le sottostrutture rispetto alla caratteristiche di progetto attese. Qualora si evidenzino zone in cui i valori delle caratteristiche fisiche e meccaniche non rispondono a quanto richiesto dal progetto, si dovrà procedere a bonifica di tale aree, per la profondità e l'estensione necessarie ed intervenire con i provvedimenti costruttivi opportuni.

3.5 Criteri di valutazione e controllo della costante elastica di progetto del supporto

La costante elastica, o modulo di reazione del terreno (costante di Winkler) k [F/L^3], non è una proprietà geotecnica del "supporto" (massicciata e sottofondo); essa rappresenta la rigidità del suolo idealizzato elastico alla Winkler per l'analisi strutturale della pavimentazione. Nell'ipotesi più realistica che il terreno sia descrivibile come un continuo elastico, in prima approssimazione, la costante k può essere espressa in funzione del modulo di rigidità del supporto stesso, per esempio utilizzando il modulo edometrico.

Nella fase preliminare della progettazione, una stima della possibile costante elastica può essere condotta con riferimento alle caratteristiche geotecniche generali del supporto ed elaborando i risultati di indagini e prove quali:

- prove di carico con piastra rigida eseguite sul piano di posa previsto per la massicciata,
- prove penetrometriche statiche e/o dinamiche condotte per i primi 2.0÷5.0 m di profondità;
- prove di laboratorio su campioni di terreno indisturbato;
- prove di tipo geofisico.

Per quanto riguarda le prove di carico è opportuno utilizzare, in sede di progettazione della struttura della pavimentazione, la piastra con diametro $D=760$ mm. Essa consente di ricavare la reazione del

terreno indagando una profondità di almeno 1.20 m. La prova di carico con piastra da 760 mm è standardizzata e da essa si ricava il “modulo di reazione del terreno” per sottofondi e fondazioni in misto granulare” (CNR N.T. 146/1992, B.U. n.92 Anno XVII).

$$k = \frac{0.07}{(L - L_0)} \text{ [N/mm}^3\text{]} \quad (1)$$

essendo:

k [N/mm³]: il modulo di reazione del terreno;

L [mm]: il valore medio delle letture del cedimento della piastra a deformazione esaurita sotto una pressione di contatto della piastra sul terreno di 0.08 N/mm²;

L_0 [mm]: il valore medio delle letture del cedimento della piastra a deformazione esaurita sotto un pressione di contatto della piastra sul terreno di 0.01 N/mm².

Il modulo di reazione del terreno è determinato in un intervallo di pressione di 0.07 N/mm², essendo esso un intervallo all'interno del quale si ipotizza che il terreno indagato sia sollecitato in campo elastico.

Anche in sede di controllo e verifica della portanza e della risposta del terreno realmente ottenuta in situ, è opportuno utilizzare la prova con piastra rigida di diametro $D=760$ mm, adottando i criteri di prova di cui alla citata norma tecnica.

Qualora si conduca la prova con piastra rigida di diametro $D=300$ mm, fatto salvo che il volume di terreno interessato dalla prova è sensibilmente inferiore a quello relativo alla piastra di diametro maggiore, è sempre possibile stimare la costante k attraverso relazioni analitiche che collegano il valore della costante misurata con quello ottenibile con una piastra di lato maggiore. Tali relazioni dipendono però dalle caratteristiche del modello che idealizza il terreno e per il loro impiego è bene fare riferimento alla letteratura del settore.

Le prove su piastra possono essere integrate con altri metodi di prova purché supportati da qualificata normativa (nazionale o internazionale) e/o consolidata letteratura tecnica.

Le prove geotecniche in sito e di laboratorio e le prove di tipo geofisico consentono di ottenere una stima diretta delle proprietà elastiche del sottofondo quali modulo elastico di Young e coefficiente di Poisson e del modulo edometrico. Dai valori delle grandezze determinate sperimentalmente è possibile anche stimare la reazione di sottofondo per l'impiego nelle analisi strutturali della pavimentazione.

4 MATERIALI

4.1 Calcestruzzo

4.1.1 Cemento

I cementi utilizzati nel confezionamento dei calcestruzzi per pavimentazioni dovranno essere dotati di marcatura CE ai sensi della UNI EN 197/1:2011.

4.1.2 Aggregati

Gli aggregati da utilizzare nel confezionamento dei calcestruzzi per pavimentazioni devono essere dotati di marcatura CE ai sensi della norma UNI EN 12620, con criterio di conformità di tipo 2+ e nel rispetto dei requisiti previsti dalla norma UNI 8520/2.

Particolare attenzione deve essere posta alla verifica della presenza di minerali nocivi quali solfati, solfuri ossidabili e, soprattutto, di minerali potenzialmente reattivi con gli alcali, i quali possono provocare danni funzionali alle pavimentazioni, anche se presenti in minima quantità.

Nel caso in cui l'analisi petrografica avesse evidenziato la presenza di minerali potenzialmente reattivi con gli alcali, come la selce, l'opale, il calcedonio, il quarzo microcristallino, ai sensi della norma UNI 8520/2 gli aggregati possono essere utilizzati se conformi alla UNI 8520/22. Data la pericolosità che riveste la presenza di minerali effettivamente reattivi con gli alcali in una pavimentazione in calcestruzzo, è opportuno che la marcatura CE di tali aggregati sia stata ottenuta con superamento della seconda prova (a lungo termine) che risulta più accurata e attendibile della prima.

Particolare attenzione deve essere posta, inoltre, al contenuto di contaminanti leggeri (elementi lignei e vegetali) per i quali la norma UNI 8520/2 prevede, nel caso di aggregati da utilizzare per pavimentazioni, un limite massimo di queste sostanze pari alla metà di quello consentito per gli aggregati per utilizzo ordinario.

Nel caso di pavimentazioni esterne in zone esposte a cicli di gelo-disgelo (classi di esposizione XF3 o XF4), devono essere impiegati aggregati in categoria \leq F2 e \leq MS25 per quanto attiene al requisito di resistenza al gelo.

Nelle pavimentazioni appartenenti alle classi B, C e D della Tabella 2.2, soggette a intenso traffico e usura superficiale, si dovranno impiegare aggregati caratterizzati da coefficiente di Los Angeles inferiore o uguale a 30 (categoria LS₃₀ o inferiori) secondo la UNI EN 12620.

4.1.3 Acqua di impasto

L'acqua d'impasto deve ottemperare alle prescrizioni della norma UNI EN 1008. L'eventuale utilizzo di acque di riciclo dovrà essere attentamente valutato in relazione ad eventuali effetti negativi nella lavorazione e nella finitura delle pavimentazioni.

4.1.4 Additivi

In funzione delle caratteristiche della pavimentazione da realizzare e delle condizioni ambientali al momento del getto possono essere impiegate, nel calcestruzzo, le seguenti tipologie di additivi:

- 1) superfluidificanti o riduttori d'acqua;
- 2) ritardanti o acceleranti;
- 3) additivi ad azione mista;

- 4) aeranti;
- 5) riduttori di ritiro (SRA - “Shrinkage Reducing Admixtures”);
- 6) espansivi non metallici.

4.1.5 Superfluidificanti o riduttori d’acqua

Sono additivi che, aggiunti in quantità dell’ordine dello 0.5÷5% sul peso del cemento, migliorano la lavorabilità del calcestruzzo (a parità di quantità di acqua introdotta) ovvero consentono una riduzione della quantità d’acqua necessaria per conseguire una data lavorabilità. L’impiego di additivi superfluidificanti nei calcestruzzi per pavimentazioni è essenziale per ottenere conglomerati fluidi ma, nel contempo, caratterizzati da buone caratteristiche meccaniche, bassa porosità e basso ritiro igrometrico.

Gli additivi superfluidificanti per calcestruzzo devono essere dotati di marchio CE ai sensi della norma UNI EN 934-2.

4.1.6 Ritardanti o acceleranti

Additivi ritardanti della presa possono essere utilizzati, soprattutto in condizioni climatiche caratterizzate da elevate temperature, al fine di ridurre la perdita di lavorabilità del conglomerato nel periodo di tempo che va dal confezionamento alla messa in opera. Tali additivi devono essere conformi alle UNI EN 934-2 e vanno utilizzati in aggiunta (non in sostituzione) ad un normale additivo superfluidificante.

Gli additivi acceleranti si dividono in acceleranti di presa e acceleranti di indurimento. Acceleranti di indurimento e leggeri acceleranti di presa possono essere utilizzati nei calcestruzzi destinati alle pavimentazioni industriali al fine di abbreviare i tempi di lavorazione in presenza di basse temperature. Tali additivi devono essere conformi alla UNI EN 934-2 e vanno utilizzati in aggiunta (non in sostituzione) ad un normale additivo superfluidificante.

4.1.7 Additivi ad azione mista

Nel settore del calcestruzzo e, in particolare, in quello delle pavimentazioni, è diffuso l’utilizzo di additivi misti che combinano, all’azione superfluidificante, un effetto ritardante o accelerante. Entrambi devono essere conformi alla norma UNI EN 934-2.

4.1.8 Aeranti

Gli additivi aeranti, utilizzati per la produzione di calcestruzzi resistenti al gelo, da impiegare in pavimentazioni in classe di esposizione XF3 o XF4, devono essere conformi al Prospetto 5 della UNI EN 934-2.

4.1.9 Riduttori di ritiro

I riduttori di ritiro (SRA) sono additivi in grado di ridurre il ritiro igrometrico in percentuale differente a seconda della tipologia di additivo e del dosaggio impiegato.

L’impiego di questi additivi si è dimostrato particolarmente efficace, nelle pavimentazioni di calcestruzzo, nel ridurre sia i fenomeni fessurativi causati dal ritiro igrometrico impedito che il *curling* dovuto alla variazione del ritiro igrometrico nello spessore della pavimentazione.

4.1.10 Fibre per il controllo della fessurazione da ritiro

Premesso che un efficace contrasto alla formazione di fessure da ritiro igrometrico deve essere eseguito definendo opportunamente la geometria dei giunti, adottando un calcestruzzo a ritiro ridotto e controllando l'efficacia dello strato di scorrimento, è opportuno evidenziare che l'utilizzo di fibre (polimeriche, metalliche, di vetro, etc.), con dosaggi adeguati, può essere di aiuto a contrastare la propagazione delle microfessure prodotte dal ritiro in fase plastica e dal ritiro igrometrico impedito. Nella scelta del tipo più idoneo di fibre occorre distinguere i casi in cui sia necessario ridurre il ritiro plastico e/o quello igrometrico.

Sperimentalmente si è osservato che l'aggiunta al calcestruzzo di micro-fibre (con diametro di 10÷100 µm) può essere di aiuto nel contrastare la formazione di cavillature dovute al ritiro plastico del calcestruzzo. Tale precauzione va comunque affiancata con l'adozione di opportune misure di stagionatura umida poste in essere il più precocemente possibile, compatibilmente con le operazioni di finitura della pavimentazione.

Al fine di mitigare gli effetti fessurativi dovuti al ritiro, risulta comunque essenziale la stagionatura protetta della pavimentazione in calcestruzzo.

4.1.11 Espansivi non metallici

Gli espansivi non metallici sono additivi in polvere utilizzati per produrre, all'interno del calcestruzzo, una reazione chimica espansiva controllata. Questa espansione, se adeguatamente contrastata, viene trasformata in uno stato coattivo di compressione che serve a compensare le deformazioni successivamente prodotte dal ritiro igrometrico. Mediante l'impiego di agenti espansivi non metallici è possibile produrre calcestruzzi a ritiro compensato.

Gli espansivi non metallici devono essere conformi alla norma UNI 8146.

Le prestazioni di un calcestruzzo a ritiro compensato, in termini di espansione/ritiro nel tempo, devono essere valutati mediante la procedura descritta nella norma UNI 8148.

Per contrastare l'aumento di volume dovuto agli agenti espansivi e sfruttarlo adeguatamente ai fini della compensazione del ritiro, è necessario utilizzare un'armatura metallica "continua", in forma di barre di piccolo diametro distribuite omogeneamente nella pavimentazione; a tale scopo non risulta invece sufficiente l'impiego esclusivo di un'armatura discontinua (fibre). Per garantire un'omogenea distribuzione del contrasto all'espansione lungo tutto lo spessore della piastra, è opportuno ricorrere all'impiego di un doppio livello di armatura costituito da barre e/o rete elettrosaldata in acciaio da c.a.

4.1.12 Aggiunte minerali

Le aggiunte minerali sono materiali inorganici, finemente suddivisi, utilizzati nel calcestruzzo allo scopo di migliorarne alcune proprietà o di ottenere proprietà speciali. Sono possibili due tipologie di aggiunte minerali:

- aggiunte praticamente inerti (Tipo I);
- aggiunte pozzolaniche o ad attività idraulica latente (Tipo II).

Le aggiunte di Tipo I devono essere dotate di marcatura CE ai sensi della UNI EN 12620 e rispettare i requisiti previsti per i filler nella UNI 8520/2.

Le aggiunte di Tipo II, utilizzabili nei calcestruzzi per pavimentazioni, possono essere:

- ceneri volanti conformi alla norma UNI EN 450;
- fumi di silice conformi alle norme UNI EN 13263/1 e UNI EN 13263/2;
- loppe d'altoforno conformi alla UNI EN 15167-1.

4.2 Calcestruzzo fibrorinforzato

Il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è un materiale composito basato su una matrice di calcestruzzo alla quale sono aggiunte delle fibre. L'impiego di tale composito è particolarmente adatto negli elementi iperstatici, come le piastre su appoggio continuo, in quanto la resistenza residua a trazione in fase fessurata, dovuta alla presenza delle fibre aumenta la capacità portante complessiva della struttura.

I diversi componenti del calcestruzzo fibrorinforzato (cemento, acqua, aggregati, fibre ed eventuali additivi) devono essere opportunamente combinati per ottenere le prestazioni richieste dal Progettista, sia allo stato fresco sia allo stato indurito.

Nelle pavimentazioni di calcestruzzo, l'impiego delle fibre risulta particolarmente efficace per:

1. ridurre la fessurazione da ritiro;
2. sostituire, parzialmente o totalmente, l'armatura convenzionale (solitamente la rete elettrosaldata).

Questi due obiettivi non sono necessariamente in alternativa, in quanto una o più tipologie di fibra potrebbero essere utilizzate contemporaneamente per ridurre la fessurazione da ritiro e per sostituire l'armatura convenzionale.

Le proprietà del calcestruzzo fresco, la sua reologia e il trattamento superficiale della pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato dovranno garantire una finitura omogenea in modo da limitare affioramenti di fibre.

Le tipologie di carico normalmente agenti sulle pavimentazioni in calcestruzzo comportano stati di sollecitazione particolarmente complessi. I carichi mobili, ad esempio, esercitano azioni cicliche variabili nei diversi punti della pavimentazione che risulta così sottoposta ad azioni flettenti con trazioni sia nella parte superiore sia in quella inferiore. In questo contesto il fibrorinforzo, distribuendosi uniformemente nel volume della piastra, rappresenta un'armatura ideale, tanto da non richiedere mano d'opera per la posa e da non creare problemi durante la fase di getto.

Per la progettazione esecuzione e controllo delle strutture realizzate con calcestruzzi fibrorinforzati si rimanda alle Istruzioni C.N.R. DT204/2006.

4.2.1 Fibre

Le fibre risultano caratterizzate, oltre che dal tipo di materiale, da parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d'aspetto e la forma (fibre lisce, uncinato, ecc.).

I principali parametri geometrici della fibra sono riportati nel seguito:

- la lunghezza della fibra (l_f) è la distanza tra le estremità della fibra e deve essere misurata in accordo con le norme di riferimento specifiche;
- la lunghezza in sviluppo della fibra (l_d) è la lunghezza della linea d'asse della fibra;
- il diametro equivalente (d_f) è il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra;
- il rapporto d'aspetto è definito come quoziente tra la lunghezza e il diametro equivalente della fibra.

Le fibre devono garantire nel tempo le prestazioni richieste al calcestruzzo fibrorinforzato.

4.2.2 Comportamento a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato

La presenza di fibre non modifica in modo significativo la resistenza a compressione del calcestruzzo.

4.2.3 Comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato

Il comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato può essere caratterizzato con la determinazione sperimentale della tensione nominale post-fessurazione (resistenza residua), attraverso una prova di flessione su una travetta intagliata, in accordo alla norma UNI EN 14651. La resistenza residua è espressa in termini di tensione nominale, corrispondente a specifici valori dell'apertura della base dell'intaglio ($CMOD$), pari a 0.5, 1.5, 2.5 e 3.5 mm. Un tipico diagramma della forza applicata al provino (F) in funzione del $CMOD$ è riportato in Figura 4.1.

Il valore della tensione nominale, f_{Rj} , rappresentativa del comportamento post-fessurativo, è determinato assumendo convenzionalmente una distribuzione lineare delle tensioni nella sezione reagente sopra l'intaglio:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (2)$$

La resistenza a trazione convenzionale è data:

$$f_L = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (3)$$

dove:

f_L [MPa] è la resistenza convenzionale di trazione alla fessurazione

f_{Rj} [MPa] è la resistenza residua del composito corrispondente ad un valore $CMOD = CMOD_j$

F_j [N] è la forza residua corrispondente a $CMOD = CMOD_j$

F_L [N] è il valore massimo del carico nell'intervallo $0 \leq CMOD \leq 0.05$ mm.

l [mm] è la distanza tra gli appoggi della travetta (500 mm);

b [mm] è la larghezza della sezione trasversale della travetta (150 mm);

h_{sp} [mm] è la distanza tra l'apice dell'intaglio e la superficie superiore del provino (125 mm).

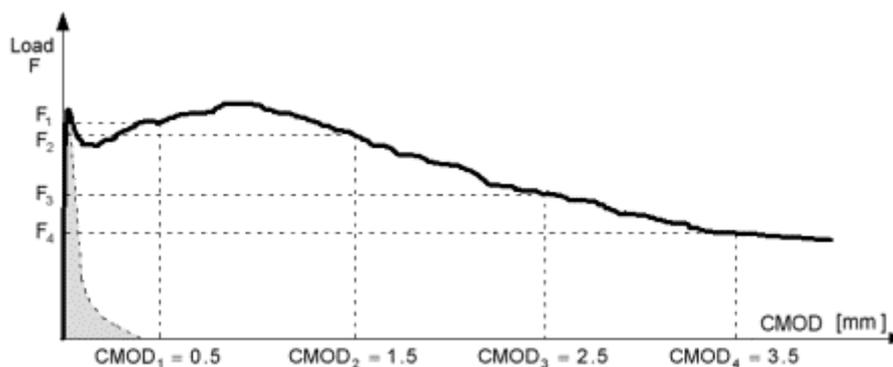


Figura 4.1. Tipica curva $F - CMOD$ determinata da una prova di flessione UNI EN 14651 su un provino di calcestruzzo fibrorinforzato, posta a confronto con l'analogo risultato in assenza di fibre.

La resistenza residua del calcestruzzo fibrorinforzato, cioè la capacità del materiale di opporsi allo sviluppo della fessura, viene convenzionalmente definita “tenacità”.

Il comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato può anche essere determinato con altre tipologie di prova, purché rientrino tra i metodi standard previsti dalle normative nazionali o internazionali e si dimostrino i fattori di correlazione con i parametri della norma UNI EN 14651.

Per fibre con comportamento a lungo termine sensibilmente influenzato da fenomeni di viscosità, i valori della tensione nominale post-fessurazione, descritti in precedenza, devono essere verificati con prove di lunga durata.

4.2.4 Classi prestazionali per la tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato

Le principali prestazioni che devono essere specificate in fase progettuale sono:

- classe di resistenza a compressione (minimo C25/30);
- classe di tenacità;
- prestazioni allo stato fresco, inclusa la consistenza, che dovranno essere misurate dopo l’aggiunta di fibre;
- distribuzione uniforme delle fibre nell’impasto che dovrà essere verificata al momento del getto.

Con riferimento alla tenacità, poiché le pavimentazioni sono governate prevalentemente dalle condizioni di esercizio, la resistenza che influenza maggiormente il comportamento globale della pavimentazione è quella relativa alle piccole aperture di fessura (rappresentata dal parametro $f_{R,1}$ della UNI EN 14651). Per caratterizzare il comportamento allo Stato Limite Ultimo, si fa riferimento alla resistenza residua $f_{R,3}$. La classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato per la tenacità si basa sui valori caratteristici della tensione nominale, $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, determinati in corrispondenza dei valori $CMOD_1$ (0.5 mm) e $CMOD_3$ (2.5 mm), rispettivamente. Il valore $f_{R,1k}$ è significativo per aperture di fessura rappresentative delle condizioni di esercizio, mentre $f_{R,3k}$ è significativo per aperture di fessura rappresentative delle condizioni ultime.

Le classi prestazionali per la tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato sono qui individuate con un numero e una lettera: il numero rappresenta il valore minimo nell’intervallo all’interno del quale si trova il parametro $f_{R,1k}$, mentre la lettera rappresenta il rapporto tra i valori dei parametri $f_{R,3k}$ e $f_{R,1k}$.

Gli intervalli di resistenza di $f_{R,1k}$ sono rappresentati da due numeri consecutivi della successione seguente:

$$1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, \dots \text{ (MPa)} \quad (4)$$

mentre le lettere a, b, c, d, e corrispondono ai seguenti intervalli del rapporto $f_{R,3k}/f_{R,1k}$:

$$\begin{array}{lll} a & \text{se} & 0.5 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} < 0.7 \\ b & \text{se} & 0.7 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} < 0.9 \\ c & \text{se} & 0.9 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} < 1.1 \\ d & \text{se} & 1.1 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} < 1.3 \\ e & \text{se} & 1.3 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} \end{array} \quad (5)$$

4.2.5 Prestazioni minime

La possibilità di utilizzare il calcestruzzo fibrorinforzato in sostituzione (anche parziale) dell'armatura convenzionale (rete o barre) richiede che il composito raggiunga livelli prestazionali minimi. I requisiti minimi per le pavimentazioni sono riportati nel seguito:

$$f_{R1m} / f_{Lm} \geq 0.35 \quad (6)$$

$$f_{R3m} / f_{Lm} \geq 0.25 \quad (7)$$

dove:

f_{R1m} rappresenta il valore medio della resistenza residua a trazione valutata per $CMOD_1 = 0.5$ mm con la UNI EN 14651;

f_{R3m} rappresenta il valore medio della resistenza residua a trazione valutata per $CMOD_1 = 2.5$ mm;

f_{Lm} rappresenta il valore medio della tensione di picco rilevata nell'intervallo di apertura di fessura $0 \div 0.05$ mm (UNI EN 14651) (Figura 4.1).

Le prestazioni minime definite in precedenza non sono richieste al calcestruzzo fibrorinforzato per impieghi diversi da quello strutturale (cioè quando le fibre sono un rinforzo aggiuntivo che non sostituisce l'armatura tradizionale).

4.3 Progetto del calcestruzzo per pavimentazioni

4.3.1 Generalità

Il calcestruzzo dovrà essere prodotto in impianti dotati di un Sistema di Controllo della Produzione (FPC) predisposto in conformità a quanto previsto dalle Linee Guida Ministeriali e certificato da un organismo terzo indipendente autorizzato.

Il Progettista dovrà prescrivere il calcestruzzo specificandone, quantomeno, le seguenti caratteristiche principali:

- Classe di resistenza;
- Classe di esposizione ambientale;
- Diametro massimo nominale dell'aggregato;
- Classe di consistenza.

Per garantire la durabilità, corrispondente ad una vita nominale prefissata (vedi paragrafo 5.2.1), delle pavimentazioni di calcestruzzo, esposte all'azione dell'ambiente interno ed esterno, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico, dai cicli di gelo e disgelo, dai sali disgelanti e, per le pavimentazioni con armatura metallica strutturale, quelli derivanti dalla corrosione delle armature.

Al fine di ottenere le prestazioni richieste, in fase di progetto, valutate le condizioni ambientali di posa e servizio, si devono fissare le caratteristiche del calcestruzzo, le procedure di posa e le prescrizioni in merito ai processi di maturazione.

Per la valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi, ad esempio si può tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo; a tal fine può essere determinato il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione in mm.

Allo scopo di ottenere la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali, per la definizione della relativa classe di esposizione, si deve fare riferimento a quanto contenuto nelle

norme UNI EN 206-1 ed UNI 11104. Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito vale quanto indicato nella norma UNI EN 12390-8.

4.3.2 Classe di resistenza

La classe di resistenza da prescrivere per una pavimentazione di calcestruzzo è quella che soddisfa, contemporaneamente, le esigenze statiche, derivanti dal progetto strutturale, e le esigenze di durabilità con il rispetto della classe di resistenza minima corrispondente alla classe di esposizione ambientale prescelta (prospetto F.1 della UNI EN 206-1, ovvero prospetto 4 della UNI 11104). La classe di resistenza prescritta per le pavimentazioni non può essere inferiore alla C25/30. Le classi di resistenza sono definite al punto 3.1 di UNI EN 1992-1-1.

4.3.3 Classe di esposizione ambientale

Il calcestruzzo utilizzato per la realizzazione di una pavimentazione può essere soggetto ad azioni di degrado in funzione delle condizioni ambientali alle quali è sottoposto. A seconda di queste azioni, la UNI EN 206-1 e la UNI 11104 individuano le classi esposizione ambientale del calcestruzzo.

Per pavimentazioni esterne, esposte ad un clima rigido, esiste il rischio di aggressione del calcestruzzo ad opera sia dei cicli di gelo-disgelo che dei sali disgelanti. Per queste pavimentazioni, in classe di esposizione XF4 (in accordo alla UNI 11104), occorre impiegare calcestruzzo con classe di resistenza minima di C28/35, confezionati con additivi aeranti e aggregati non gelivi.

Si fa notare che, in caso di utilizzo di calcestruzzi inglobanti aria per migliorare la resistenza al gelo, è consigliabile evitare una finitura delle pavimentazioni con semina di indurenti superficiali e successiva frattazzatura meccanica, in quanto tale lavorazione provoca l'espulsione dell'aria inglobata in corrispondenza della parte corticale della pavimentazione; tale fenomeno vanifica il beneficio derivante dall'introduzione dell'aria nel calcestruzzo proprio laddove la pavimentazione risulta maggiormente esposta al gelo. Inoltre, è stato segnalato un incremento della probabilità di innesco di fenomeni di delaminazione in pavimentazioni in calcestruzzo realizzate con conglomerati inglobanti aria ai fini della resistenza al gelo e sottoposte ad una finitura mediante aspersione di indurenti superficiali e successiva frattazzatura meccanica.

Qualora l'utilizzo di una finitura con semina di indurenti superficiali e successiva frattazzatura meccanica sia irrinunciabile in una pavimentazione esposta al gelo e ai sali disgelanti, è consigliabile evitare l'impiego di un calcestruzzo aerato. Ciò è possibile, per le classi di esposizione XF3 e XF4, ai sensi della UNI EN 206-1 e della UNI 11104, se si dimostra che il calcestruzzo prescritto, privo di aria inglobata, abbia una resistenza al gelo comparabile con quella di un analogo calcestruzzo per il quale tale requisito è già stato provato (si veda la nota "a" del Prospetto 4 della UNI 11104).

In aggiunta, dal momento che i cicli di gelo e disgelo provocano degrado nel calcestruzzo solo se questo è saturo o prossimo alla saturazione, è opportuno prendere tutte le precauzioni atte ad evitare il ristagno di acqua sulla superficie della pavimentazione (organizzazione di adeguate pendenze verso le caditoie, rispetto dei requisiti di planarità, sigillatura dei giunti con resina, eccetera) e una eccessiva risalita capillare di umidità dal sottofondo.

4.3.4 Scelta della consistenza

La scelta della consistenza del calcestruzzo per pavimentazioni dipende dalle modalità di realizzazione della piastra.

Quando la stesura del conglomerato cementizio avviene manualmente è opportuno utilizzare un calcestruzzo con slump di riferimento (UNI EN 12350-2) variabile fra 180 e 250 mm in funzione

della composizione del calcestruzzo e delle condizioni operative ed ambientali, accertata l'assenza di segregazioni e fenomeni secondari. Al fine di una corretta determinazione delle caratteristiche reologiche del calcestruzzo, in sostituzione alla misura dello slump si consiglia di utilizzare la classe di spandimento misurata attraverso la tavola a scosse, prescrivendo conglomerati di classe di spandimento F5 o F6 (UNI EN 12350-5).

Se la realizzazione della pavimentazione avviene con macchine vibro-finitrici, è opportuno utilizzare un calcestruzzo con slump di riferimento (UNI EN 12350-2) variabile fra 110 e 170 mm. In alternativa, è possibile di utilizzare la classe di spandimento misurata attraverso la tavola a scosse, prescrivendo conglomerati di classe di spandimento F3 (UNI EN 12350-5).

Per le pavimentazioni a casseri scorrevoli la classe di consistenza da prescrivere per il calcestruzzo è la S1 o, più correttamente, dovrà essere determinarla con la prova Vébé (UNI EN 12350-3).

4.3.5 Prescrizioni aggiuntive

4.3.5.1 Bleeding

Nei calcestruzzi per pavimentazioni occorre diminuire il fenomeno di bleeding per evitare che la resistenza all'abrasione superficiale della piastra venga compromessa. Allo scopo è opportuno che il volume di acqua di bleeding, misurato secondo la procedura riportata nella norma UNI 7122, risulti inferiore allo 0.1% (oppure a $0.5 \text{ l/m}^2/\text{h}$).

4.3.5.2 Ritiro igrometrico

Il ritiro igrometrico è una contrazione di volume che si verifica nel calcestruzzo indurito esposto ad ambiente insaturo d'acqua. Dal momento che il ritiro è, in genere, impedito dalla presenza di vincoli interni ed esterni, esso comporta l'innescò di sollecitazioni di trazione che, laddove superano la resistenza a trazione posseduta dal materiale, causano la formazione di fessure. Il ritiro non contrastato del calcestruzzo viene misurato secondo la UNI 11307. È opportuno che il progettista stabilisca il valore del ritiro igrometrico di un calcestruzzo per pavimentazioni, misurato a 28 gg con la procedura sopra indicata, e che il limite sia uguale o inferiore a $500 \mu\text{m/m}$, misurato nelle condizioni definite dalla norma UNI 11307. È opportuno far notare che il ritiro effettivo della pavimentazione sarà generalmente diverso da quello misurato nelle condizioni standard definite dalla norma. Per ridurre notevolmente il valore del ritiro potrebbe risultare necessario l'impiego di additivi riduttori del ritiro (SRA) e/o agenti espansivi.

4.3.5.3 Contenuto di aria

Un eccessivo contenuto di aria nel calcestruzzo può essere causa o concausa di fenomeni di delaminazione. A tal proposito occorre distinguere tra aria intrappolata e aria inglobata o aggiunta ai fini della resistenza ai cicli di gelo e disgelo.

- Aria intrappolata

Il calcestruzzo dovrà avere allo stato fresco un contenuto di aria intrappolata inferiore al 3%, misurata in base alla norma UNI EN 12350-7 sul calcestruzzo fresco. È opportuno segnalare che quella descritta nella UNI EN 12350-7 è l'unica procedura attendibile per valutare il contenuto d'aria in un calcestruzzo.

- Aria inglobata

Nel caso di calcestruzzi esposti a cicli di gelo-disgelo, il contenuto di aria inglobata (mediante l'utilizzo nelle miscele di additivi areanti) dovrà rispettare quanto specificato dalla UNI 11104.

Qualora si utilizzassero calcestruzzi confezionati con additivo aerante, è opportuno evitare l'applicazione dello strato superficiale a spolvero e pastina.

Si precisa che la prova descritta nella norma UNI EN 480-11 è adeguata per la misurazione dell'area inglobata (e non per l'aria intrappolata).

4.3.5.4 Pompabilità del calcestruzzo fibrorinforzato

Nel caso fosse necessario garantire la pompabilità del calcestruzzo fibrorinforzato, occorre specificarlo nella prescrizione del calcestruzzo. Il produttore dovrà proporzionare conseguentemente le materie prime, in funzione delle loro caratteristiche, in modo da mantenere la conformità del prodotto agli altri parametri progettuali.

4.3.6 Reazione alcali/aggregato

Deve essere posta particolare attenzione ad evitare che si inneschi una reazione alcali/aggregati nel calcestruzzo della pavimentazione. Questo aspetto può richiedere una particolare attenzione ad esempio quando è previsto l'utilizzo di uno spolvero indurente superficiale applicati al calcestruzzo fresco sottostante, che deve essere preparato con prodotti di qualità ed una corretta proporzione dei componenti in modo da evitare l'innesco e/o l'alimentazione di tale reazione.

4.4 Acciaio

L'acciaio deve essere conforme alle indicazioni della Normativa Tecnica vigente.

4.5 Strato di finitura e trattamenti superficiali

I principali requisiti prestazionali richiesti allo strato di finitura sono riportati nel seguito e potranno essere soddisfatti con la scelta appropriata del prodotto da applicare:

- Resistenza all'usura;
- Resistenza all'abrasione;
- Resistenza all'urto;
- Resistenza chimica;
- Pulibilità;
- Scivolosità;
- Funzione estetica;
- Antistaticità;
- Protezione dalle azioni ambientali;
- Neutralità nella reazione alcali/aggregato.

4.5.1 Resistenza all'abrasione e all'usura

I premiscelati pronti all'uso in commercio, utilizzabili per lo strato di finitura applicati con il metodo a spolvero o a pastina, o con il riporto successivo, sono classificabili in base al tipo di indurente che ne caratterizza il comportamento fisico-chimico (vedere EN 13813):

- indurenti minerali, ricavati da macinazione di rocce dure (silice, quarzo, basalto, corindone, porfido) o da loppe d'altoforno;
- indurenti metallici, ricavati da pezzi di materiale ferroso;
- indurenti metallurgici, ricavati da pezzi di carburo di silicio o corindone sintetico.

In alternativa all'impiego di premiscelati, possono essere utilizzate altre tecnologie per migliorare la resistenza all'abrasione e all'usura della pavimentazione. Tra queste si segnala l'impregnazione

della parte superficiale del calcestruzzo tal quale, dopo opportuna levigatura, mediante l'impiego di prodotti fluidi a effetto consolidante. Tali prodotti sono composti generalmente da soluzioni acquose di sali inorganici (es. silicati, in forma pura o modificati) che vengono fatte penetrare nelle porosità superficiali della pavimentazione e, ad avvenuta reazione, aumentano le caratteristiche fisico-meccaniche della parte impregnata.

La resistenza all'abrasione e all'usura può essere ottenuta anche mediante l'applicazione di sistemi resinosi ma solo se in malta fortemente caricata con indurenti duri.

4.5.2 Resistenza all'urto

La resistenza all'urto può essere solo parzialmente modificata dallo strato di finitura in quanto dipende soprattutto dalle caratteristiche del calcestruzzo utilizzato.

L'impiego di un elevato spessore (maggiore di 10 mm) migliora proporzionalmente la resistenza all'urto della pavimentazione.

Una migliore resistenza può essere ottenuta utilizzando prodotti caratterizzati da un'alta duttilità quali, ad esempio, prodotti con inerti a base di ferro e ghisa, malte ad alta resistenza a flessione, quali quelle a base di prodotti resinosi oppure incorporando nell'indurente delle fibre di rinforzo.

4.5.3 Resistenza chimica

La resistenza chimica dello strato di finitura dipende dalla natura chimica del prodotto utilizzato.

In linea di massima lo strato di finitura diminuisce fortemente (o annulla) la permeabilità della parte superficiale rispetto a quella del calcestruzzo sottostante e, pertanto, la sola presenza di tale strato migliora complessivamente la resistenza chimica della pavimentazione. Tuttavia, se il prodotto utilizzato è a base di cemento, pur caratterizzato da permeabilità estremamente bassa, potrà essere attaccato dai prodotti chimici, soprattutto se di natura acida.

Qualora venisse richiesta una specifica resistenza chimica dovranno essere utilizzati sistemi specifici, generalmente a base di resine, da scegliere in relazione agli agenti aggressivi presenti.

4.5.4 Scivolosità

La scivolosità di una pavimentazione dipende dalla sua conformazione fisica superficiale ma anche dalle condizioni di utilizzo. La presenza di acqua o prodotti di altra natura sulla superficie, ad esempio, modifica le condizioni della pavimentazione, diminuendo l'effetto antisdrucchiolo dello strato finale.

Le pavimentazioni di calcestruzzo con strato di finitura realizzato con prodotti premiscelati a base di cemento presentano generalmente un adeguato effetto antisdrucchiolo.

I prodotti applicati per impregnazione, e ancor più i rivestimenti resinosi, diminuiscono fortemente l'effetto antisdrucchiolo, se non vengono prescritti ed applicati specifici prodotti superficiali.

4.5.5 Funzione estetica

Lo strato di finitura può consentire il raggiungimento di una funzione estetica solo se ciò è oggetto di requisito ed espressamente progettato anche per tale scopo.

I prodotti premiscelati a base di cemento possono assumere differenti colorazioni localizzate che dipendono proprio dalla stessa disomogeneità del calcestruzzo sottostante. Le fasi di lavorazione avvengono generalmente sul calcestruzzo fresco e sono quindi influenzate dalle caratteristiche del supporto in calcestruzzo e dalle condizioni ambientali.

Un migliore effetto estetico può essere ottenuto mediante l'utilizzo di prodotti ad elevato spessore. E' anche possibile garantire una funzione estetica della pavimentazione applicando successivamente una finitura cementizia o a base di resina.

4.5.6 Antistaticità

I prodotti di finitura a base di cemento possono essere considerati antistatici, pertanto non permettono l'accumulo di cariche elettrostatiche pericolose.

Diverso comportamento possiedono invece i prodotti di finitura a base resinosa in quanto le resine utilizzate sono generalmente caratterizzate da buone capacità isolanti o addirittura dielettriche. In quest'ultimo caso l'effetto antistatico dipenderà dal tipo di prodotto utilizzato, dallo spessore applicato, dalla sua formulazione, dalle condizioni ambientali.

Una pavimentazione antistatica deve essere espressamente progettata.

4.5.7 Protezione dalle azioni ambientali

Così come trattato al Paragrafo 4.5.3, il trattamento di finitura può migliorare e proteggere la pavimentazione dagli effetti negativi dell'ambiente. La diminuzione della permeabilità superficiale limita l'assorbimento di acqua e dei prodotti inquinanti in essa disciolti e, conseguentemente, ne limita l'azione aggressiva.

Essendo l'azione chimica direttamente dipendente dal tempo di contatto, si dovranno progettare correttamente le pendenze della pavimentazione per facilitare il deflusso dell'acqua.

La protezione nei confronti del fenomeno del gelo, coinvolgendo anche gli strati sottostanti del calcestruzzo, dovrà essere oggetto di specifica progettazione.

5 CRITERI DI PROGETTAZIONE, AZIONI E PROBLEMATICHE SPECIALI

5.1 Basi della progettazione

Il dimensionamento, l'esecuzione ed il controllo delle pavimentazioni industriali devono essere effettuati nel rispetto dei principi e metodi indicati nelle presenti istruzioni.

5.2 Azioni meccaniche ed ambientali

5.2.1 Vita nominale di una pavimentazione

Il concetto di vita nominale (V_n) di una struttura può essere esteso alle pavimentazioni in accordo con gli Eurocodici. Si tratta di un concetto che, seppur nel suo aspetto convenzionale, rappresenta un riferimento per la definizione delle azioni variabili e per conferire un significato operativo alla durabilità dell'opera. Infatti il progetto deve assicurare la conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture durante la vita nominale dell'opera. Quest'ultima è il periodo di tempo (misurato in anni) nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione prevista in fase di progetto, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata e con lo stesso livello di sicurezza.

Con riferimento alla valutazione dei "livelli di sicurezza", la vita nominale della piastra e della massiciata, da adottare in fase progettuale, deve essere non inferiore a 50 anni o comunque alla Vita Nominale dell'edificio (salvo esplicita richiesta del Committente).

Tale richiesta non si estende ai giunti ed alla finitura superficiale. In fase di progettazione si dovrà definire un piano di manutenzione ordinaria per la conservazione della struttura attraverso la manutenzione dei giunti e dello strato di finitura.

5.2.2 Azioni dirette

Le azioni dirette da considerarsi per la verifica della pavimentazione possono essere classificate in:

- Azioni distribuite $[F][L]^{-2}$:
 - a. Azioni permanenti;
 - b. Azioni variabili (generalmente materiali sciolti in cumuli o altri materiali fittamente accatastati).
- Azioni distribuite linearmente $[F][L]^{-1}$:
 - c. Azioni permanenti;
 - d. Azioni variabili (ad esempio azioni trasmesse alla pavimentazione da un cordolo o da una rotaia).
- Azioni isolate $[F]$:
 - e. Azioni permanenti;
 - f. Azioni variabili:
 - mobili isolate o a disposizione prestabilita (veicoli, mezzi d'opera, carrelli elevatori);

- fisse (scaffalature, macchine, ecc.).

Le azioni a), c) ed e) saranno calcolate dal Progettista in base alla geometria del sistema. Le azioni b), d) ed f) dovranno essere indicate dal Committente che dovrà altresì comunicare al Progettista, oltre all'intensità del sovraccarico, le dimensioni in pianta del dispositivo di appoggio del carico e le distanze fra i vari carichi (layout). Il Progettista è comunque tenuto a considerare le azioni concentrate e distribuite in pianta nella combinazioni più sfavorevoli.

In caso di azioni dinamiche, il Committente (o, per lui, il fornitore delle apparecchiature meccaniche), dovrà indicare il campo di variabilità dell'azione, la relativa frequenza ed il numero delle ripetizioni (per eventuali verifiche a fatica).

Per le azioni f) dovranno essere specificati, oltre al tipo di veicolo, il numero delle ruote e degli assi, il passo e la carreggiata, la natura delle ruote (ad esempio pneumatiche, gomma piena, Vulkollan®).

Il peso indicato dai produttori dei veicoli o dei carrelli sarà considerato come valore caratteristico Q_k .

In assenza di indicazioni specifiche, per i veicoli si potrà fare riferimento alle norme sui sovraccarichi nei parcheggi o nei ponti, mentre per i carrelli si potranno indicare i valori riportati nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1. Valori caratteristici delle azioni trasmesse dai carrelli in funzione della loro portata.

Portata (kN)	Gomma piena		Poliuretano		Super elastico		Vulkollan®	
	Carico max/asse (kN)	Carreg- giata (m)	Carico max/asse (kN)	Carreg- giata (m)	Carico max/asse (kN)	Carreg- giata (m)	Carico max/asse (kN)	Carreg- giata (m)
10	100	0.9	10	0.4 – 1.0	40	0.9	25	0.9
25			20	0.5 – 1.2	80	1.0	40	0.9
50	150	1.3			100	1.2	60	0.9
75	180	1.5			150	1.4		
100	250	1.6			250	1.6		

In presenza di scaffalature (o similari) connesse alla pavimentazione, occorrerà considerare anche le eventuali azioni sismiche trasmesse alla pavimentazione.

5.2.3 Azioni indirette

Le azioni indirette sono determinanti nella progettazione e nella verifica delle pavimentazioni. Le più significative sono:

- Ritiro del calcestruzzo;
- Variazioni termiche naturali o indotte dall'utilizzo della pavimentazione (es. magazzini frigoriferi, forni per trattamenti termici, serpentine per il riscaldamento invernale, ecc.);
- Azioni ambientali.

Con riferimento alla normativa vigente, le variazioni di temperatura uniformi per strutture in c.a. e c.a.p. da assumersi alla base del calcolo sono:

$$\Delta T = \pm 15 \text{ }^\circ\text{C per le strutture esposte;}$$

$$\Delta T = \pm 10 \text{ }^\circ\text{C per le strutture non esposte.}$$

Per una esaustiva definizione di tali azioni si può fare riferimento a quanto riportato nell'Eurocodice 2.

Le variazioni di temperatura, se uniformi nello spessore della pavimentazione, comportano dilatazioni e contrazioni uniformi della piastra di calcestruzzo, impedito in maggiore o minore misura dall'attrito col supporto. Mentre nel primo caso le dilatazioni impedito generano compressioni (nel caso delle pavimentazioni generalmente di entità non significativa), nel caso di contrazioni impedito possono sorgere sollecitazioni di trazione della stessa natura di quelle indotte dal ritiro.

In assenza di informazioni specifiche, per le variazioni di temperatura lungo lo spessore ($T_s - T_i$) si potranno adottare i valori riportati in Tabella 5.2; si noti che le variazioni termiche differenziali comportano spostamenti orizzontali e verticali anche non uniformi della piastra di calcestruzzo.

Tabella 5.2. Gradienti attesi di temperatura nello spessore h della piastra di pavimentazione ($10 < h < 25$ cm).

Ambiente	$T_s - T_i$ (°C)
Interno	± 5
Esterno	+0.8 h -0.2 h

Tra le azioni ambientali che potrebbero influenzare la progettazione di una pavimentazione si dovranno considerare quelle che possono indurre il degrado dei materiali. A tal proposito, nella progettazione si dovrà fare riferimento alle classi di esposizione previste dalla norma UNI EN 206. La classe di esposizione potrà influenzare anche la scelta della tipologia di strato di finitura e trattamento superficiale.

5.2.4 Combinazioni delle azioni

Nella progettazione delle pavimentazioni di calcestruzzo riveste particolare importanza la verifica allo Stato Limite di Esercizio ed in particolare allo stato limite di formazione delle fessure.

Le combinazioni delle azioni da considerare per la verifica allo Stato Limite di Esercizio, sono le combinazioni caratteristiche, frequenti e quasi permanenti

Combinazione caratteristica:

$$F_d = G_{k1} + G_{k2} + Q_{k1} + \sum_{i=2}^N \psi_{0i} Q_{ki} ; \quad (8)$$

Combinazione frequente:

$$F_d = G_{k1} + G_{k2} + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i=2}^N \psi_{2i} Q_{ki} ; \quad (9)$$

Combinazione quasi permanente:

$$F_d = G_{k1} + G_{k2} + \sum_{i=1}^N \psi_{2i} Q_{ki} ; \quad (10)$$

dove:

- G_{1k} = valore caratteristico delle azioni permanenti strutturali;
- G_{2k} = valore caratteristico delle azioni permanenti non strutturali;
- Q_{k1} = valore caratteristico dell'azione variabile dominante;

Q_{ki} = valore caratteristico delle altre azioni variabili;
 Ψ_{ij} = coefficienti di combinazione.

La pavimentazione dovrà essere verificata anche nei riguardi degli Stati Limite Ultimi (anche nei riguardi meccanismi di collasso locali), mediante la combinazione fondamentale:

$$F_d = \gamma_{G1}G_{1k} + \gamma_{G2}G_{2k} + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \sum_{i=2}^n \Psi_{0i}Q_{ki} \quad (11)$$

dove:

γ_{Gi} = coefficienti parziali per le azioni permanenti;
 γ_{Qi} = coefficienti parziali per le azioni variabili.

Ne caso di azioni sismiche trasmesse alla pavimentazione, questa dovrà essere verificata anche nei riguardi dello Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) mediante la combinazione sismica:

$$F_d = E + G_{k1} + G_{k2} + \sum_{i=1}^n \Psi_{2i}Q_{ki} ; \quad (12)$$

dove E rappresenta l'azione sismica.

Nel caso in cui la caratterizzazione stocastica dell'azione considerata non sia disponibile, si può assumere il valore nominale. Ciò vale in particolare per le azioni permanenti.

I valori dei coefficienti parziali e dei coefficienti di combinazione possono essere desunti dalla normativa tecnica vigente o dall'Appendice A di UNI EN 1990 e UNI EN 1992-1-1. I valori caratteristici delle azioni possono essere desunti da UNI EN 1991.

5.3 Modelli e metodi di calcolo

Generalmente le pavimentazioni industriali sono schematizzabili come una piastra su supporto continuo. Le caratteristiche del supporto sono definite nel Capitolo 3. È possibile modellare il terreno come un insieme di elementi elastici indipendenti (Winkler) o come un semispazio elastico indefinito (Boussinesq); sono possibili altre modellazioni purché supportate da documenti di comprovata validità.

Per la determinazione degli stati tensionali dovuti ad azioni causate da variazioni volumetriche e da azioni ambientali, è necessario modellare anche il contatto fra piastra e supporto, considerando l'eventuale presenza di uno strato di scorrimento. Per la maggior parte dei casi è sufficiente considerare la tensione tangenziale di attrito con il classico modello:

$$\tau_{attr} = \mu \cdot p \quad (13)$$

dove:

τ_{attr} = tensione tangenziale all'intradosso della piastra;
 μ = coefficiente di attrito (vedi Tabella 5.3);
 p = pressione normale alla superficie di contatto piastra - supporto (derivante dal peso proprio e da eventuali carichi permanenti).

I valori riportati in Tabella 5.3 sono tipici per la pratica progettuale; valutazioni diverse possono essere motivatamente fatte per casi particolari, anche su base sperimentale.

Tabella 5.3. Coefficiente di attrito in funzione delle diverse superfici di contatto.

Superfici di contatto	Coefficiente di attrito [μ]
Sabbia pulita e ghiaia	1.6
Emulsione di asfalto	2.0
Sottofondo granulare	1.3
Terreno plastico (argilla)	1.7
Doppio foglio di polietilene	0.5
Singolo foglio di polietilene	0.7
Strato di sabbia	0.9
Manto di asfalto	3.2
Calcestruzzo	>2.0

Per la verifica della resistenza della piastra sotto carichi isolati, si utilizzano normalmente i metodi di calcolo riportati di seguito:

- Calcolo elastico lineare, con il metodo di Westergaard, che fornisce le tensioni massime per lo schema di piastra infinita sotto il carico concentrato, oppure tramite analisi elastica agli elementi finiti di piastra su appoggio elastico continuo.
- Calcolo a rottura, con il metodo semplificato di Meyerhof, che fornisce il carico in equilibrio con un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile (linee di rottura). Può essere utilizzato quando le condizioni di carico risultano semplici e quando il meccanismo di collasso risulta definibile con sufficiente certezza. In alternativa può essere impiegata l'analisi non lineare agli elementi finiti (elasto-plastica o altro). Nel caso di pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato, la maggior energia di frattura fornita dal fibrorinforzo può essere considerata appropriatamente utilizzando metodi basati sulla meccanica non lineare della frattura.
- Analisi incrementale non lineare, da condursi tipicamente con l'utilizzo di modelli agli elementi finiti, adottando opportune leggi costitutive per i materiali.

Il calcolo degli effetti delle distorsioni può essere condotto con i metodi di analisi numerica agli elementi finiti (FEM) in regime lineare o non lineare, tenendo conto dell'attrito fra piastra e terreno ed includendo nello schema il terreno di sottofondo fino alla profondità alla quale le deformazioni possono essere ritenute trascurabili.

Viste le limitate deformazioni che caratterizzano le pavimentazioni, il sottofondo può essere assimilato, nelle analisi, ad un continuo elastico lineare, con caratteristiche costanti o variabili con la profondità, in dipendenza della natura del terreno e delle sue proprietà.

5.3.1 Calcolo elastico lineare

Il calcolo elastico può essere svolto utilizzando le soluzioni in forma chiusa fornite dalla teoria di Westergaard. Tale teoria consente di calcolare la massima tensione di trazione indotta dall'applicazione di un carico distribuito su una superficie circolare, posizionato lungo il bordo, al centro oppure in corrispondenza dello spigolo di una piastra su suolo elastico alla Winkler. Dato che la teoria si basa sull'ipotesi del comportamento elastico-lineare del materiale, essa consente l'individuazione del carico di prima fessurazione della pavimentazione. In accordo con quanto indicato dalla teoria Westergaard, le suddette tensioni di trazione massime sono calcolabili mediante le seguenti equazioni:

- per un carico P al centro:

$$\sigma_0 = 1.264 \frac{P}{h^2} \left(\log \frac{l}{b} + 0.267 \right) \quad (14)$$

- per carico P lungo il bordo:

$$\sigma_l = 2.288 \frac{P}{h^2} \left(\log \frac{l}{b} + 0.090 \right) \quad (15)$$

- per carico P su uno spigolo:

$$\sigma_a = 3 \frac{P}{h^2} \left(1 - 1.23 \left(\frac{r_r}{l} \right)^{0.6} \right) \quad (16)$$

dove:

l = raggio di rigidezza relativa:

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (17)$$

h = spessore della piastra;

k = costante di Winkler;

E = modulo elastico del calcestruzzo;

ν = coefficiente di Poisson del calcestruzzo (0.2 per calcestruzzo integro, 0.0 per calcestruzzo fessurato);

P = carico concentrato applicato;

$r_r = (A_c/\pi)^{1/2}$ raggio equivalente dell'area di contatto A_c ;

b = raggio d'impronta fittizio, così definito:

$$b = \sqrt{1.6r_r^2 + h^2} - 0.675h \quad \text{per} \quad r_r/h < 1.724 \quad (18)$$

$$b = r_r \quad \text{per} \quad r_r/h > 1.724 \quad (19)$$

5.3.2 Calcolo a rottura

Il Calcolo a rottura (secondo Meyerhof) fornisce una stima per eccesso, nello spirito del metodo cinematico) del carico in equilibrio con un meccanismo di collasso per un carico isolato P al centro della piastra.

Per un carico applicato al centro della piastra, il carico ultimo è dato da:

$$P_u = \frac{4\pi M_0}{\left(1 - \frac{4r_r}{3b}\right)} \quad (20)$$

dove:

P_u = carico associato al cinematismo di collasso;

b = raggio della fessura circolare esterna $b = 3.9 l$;

$M_0 = |M^+| + |M^-|$ somma dei valori assoluti dei momenti resistenti di progetto riferiti alle fibre superiori $|M^+|$ ed alle fibre inferiori $|M^-|$.

Nel caso di più carichi o di carichi in posizioni particolari (bordo, spigolo), si dovrà individuare il cinematico compatibile con la geometria assegnata (metodo delle linee di rottura) e valutare il moltiplicatore del sistema di carichi applicati.

5.3.3 Analisi incrementale non lineare

L'analisi incrementale non lineare è basata sui principi della meccanica della frattura con l'impiego di modelli agli elementi finiti: questo metodo è particolarmente indicato per le pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato, per le quali si possono utilizzare le regole incluse nel CNR DT 204/2006.

Tale metodo può essere utilizzato anche per valutare gli effetti delle distorsioni in presenza di attrito tra piastra e terreno. In via semplificativa si possono valutare gli effetti delle distorsioni mediante le Tabelle 5.1-3.

Tabella 5.4. Massima sollecitazione di trazione dovuta al ritiro (UNI 11146).

	Massima tensione di trazione
Centro	$\sigma_{sh,0} = \frac{\psi E_c \varepsilon_{sh}}{1 + \phi}$
Lato	$\sigma_{sh,l} = \frac{\sigma_{sh,0}}{2}$
Angolo	$\sigma_{sh,a} = 0$
dove: ψ è il fattore di vincolo funzione della distanza fra i giunti, dello spessore della lastra e dell'attrito del sottofondo, definito in Tabella 5.5; ϕ è il coefficiente di rilassamento.	

Tabella 5.5. Fattore di vincolo ψ (UNI 11146).

Coefficiente di attrito μ	Distanza fra i giunti/spessore pavimentazione				
	10	20	30	50	>100
< 0.5	0.05	0.15	0.25	0.5	1
1	0.1	0.3	0.5	1	1
2	0.2	0.6	1	1	1

Tabella 5.6. Massima sollecitazione di trazione dovuta ad un gradiente termico (UNI 11146).

	Massima tensione di trazione
Centro	$\sigma_{T,0} = \frac{E_c \alpha \Delta T}{1 + \phi}$
Lato	$\sigma_{T,l} = \frac{\sigma_{T,0}}{2}$
Angolo	$\sigma_{T,a} = \frac{E_c \alpha \Delta T}{1.5}$
dove: α è il coefficiente di dilatazione termica lineare ($10 \cdot 10^{-6}$); ϕ è il coefficiente di rilassamento.	

Con riferimento al caso tipico di armature disposte in due direzioni perpendicolari, x e y , i momenti resistenti corrispondenti alle armature a_x e a_y (armatura per unità di larghezza della pavimentazione) saranno indicati come $m_{rd,x}$ e $m_{rd,y}$. Questi momenti dovranno risultare maggiori od uguali ai momenti sollecitanti $m_{ud,x}$ ed $m_{ud,y}$ determinati secondo il diagramma di flusso indicato sotto, dove i momenti m_x , m_y e m_{xy} si calcolano con un'analisi elastica della struttura.

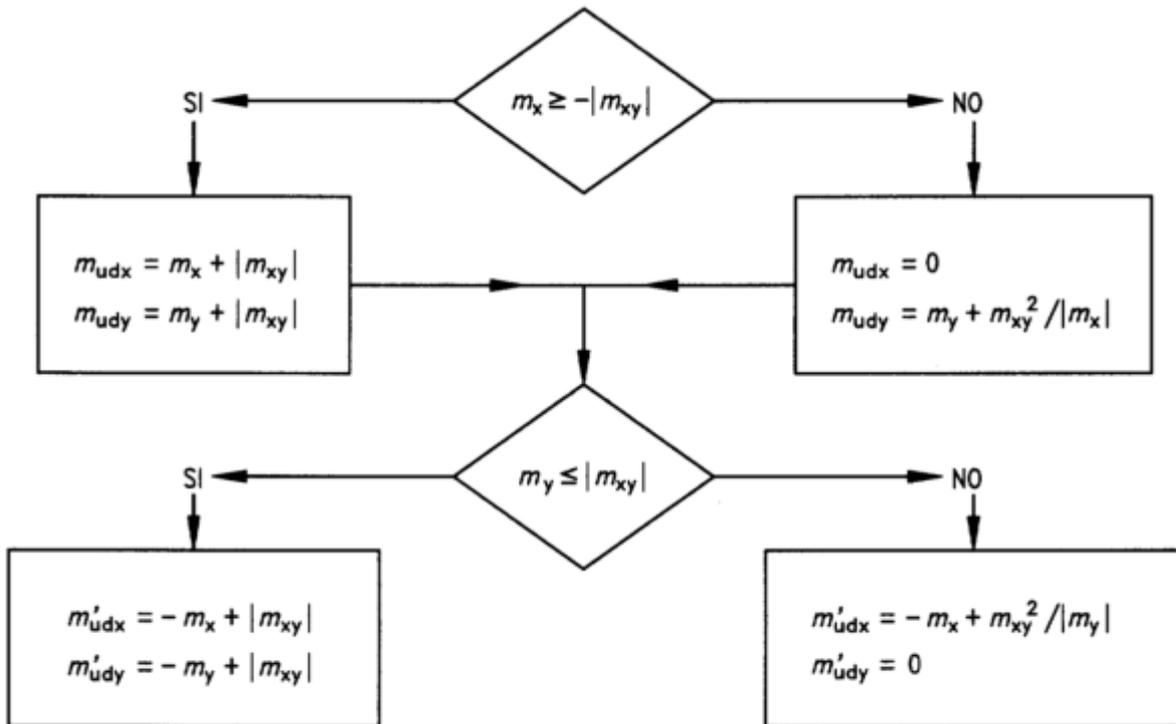


Figura 5.1. Diagramma di flusso per la valutazione di momenti sollecitanti $m_{ud,x}$ ed $m_{ud,y}$.

6 PROGETTAZIONE DEI GIUNTI NELLE PAVIMENTAZIONI

La pavimentazione è una piastra di calcestruzzo che deve essere libera di manifestare le proprie dilatazioni senza interagire con gli elementi verticali presenti nell'edificio. Il corretto funzionamento delle pavimentazioni richiede quindi la presenza dei giunti descritti nel seguito.

La disposizione dei giunti, in generale, è determinata dal tipo di supporto della pavimentazione, dalla conformazione delle superfici, da esigenze funzionali, dalla presenza di interruzioni ed irregolarità (pozzetti, griglie, basamenti), dallo spessore della piastra, dal ritiro del calcestruzzo e dalla sua armatura, e viene stabilita dal Progettista.

Eventuali piccoli sbrecciamenti causati dal taglio meccanico del giunto non costituiscono difetto, se limitati nella quantità e nell'ampiezza

Gli accorgimenti adottati per proteggere la pavimentazione durante la stagionatura, temporaneamente rimossi per permettere le operazioni di taglio, devono essere ripristinati immediatamente dopo il completamento delle operazioni stesse.

6.1 Giunti di isolamento

Estesi a tutto lo spessore della pavimentazione, sono realizzati ponendo, prima del getto, una striscia continua di materiale deformabile di adeguato spessore lungo lo sviluppo dell'elemento da isolare.

Lo spessore del giunto dipenderà dalle deformazioni previste, in relazione alle dimensioni della pavimentazione e delle deformazioni della stessa. Generalmente lo spessore può essere compreso tra 5 e 20 mm.

6.2 Giunti di costruzione

I giunti di costruzione si realizzano, di fatto, con l'accostamento di due lastre gettate in tempi diversi. Se non previsto in fase progettuale in modo diverso, l'accostamento dei getti deve essere rettilineo e a tutta sezione verticale.

L'interruzione del getto di calcestruzzo comporta che le sollecitazioni in tali zone assumano valori particolarmente elevati; per questi giunti, rappresentando quindi la parte della pavimentazione più soggetta a prematuri deterioramenti, si consiglia di prevedere un opportuno rinforzo della parte superficiale in fase di posa, ad esempio predisponendo dei profili metallici oppure, a stagionatura avvenuta, con la formazione di travetti di resina o con particolari riempimenti.

I giunti di costruzione devono coincidere con quelli di dilatazione.

La distanza tra i giunti di costruzione dipende dalla geometria della pavimentazione, dalla superficie giornaliera realizzata, dal ritiro igrometrico del calcestruzzo, dall'attrito con il supporto e dalle condizioni ambientali.

I riquadri che si vengono così a formare tra i giunti di costruzione devono avere la forma più regolare possibile ed il rapporto dei lati, a e b , deve preferibilmente rispettare la condizione:

$$\frac{a}{b} \leq 1.5 \quad (\text{con } a > b) \quad (21)$$

Al fine di limitare gli spostamenti verticali differenziali tra campi di pavimentazione diversi separati da giunti di costruzione, è necessario impiegare sistemi di trasferimento del taglio, quali i barrotti o i sistemi prefabbricati in acciaio. Tali collegamenti a taglio devono però consentire il libero scorrimento tra i diversi campi della piastra.

6.3 Giunti di contrazione o controllo

Tali giunti interessano solamente una parte superficiale della piastra (all'incirca 1/4-1/5 dello spessore).

I tagli per i giunti devono essere realizzati prima possibile, sempre in funzione delle condizioni climatiche ambientali, del tipo di calcestruzzo utilizzato e della sua velocità di indurimento, allo scopo di prevenire fessurazioni indesiderate dovute al ritiro impedito del calcestruzzo. Generalmente dovrebbero essere eseguiti entro le 24 ore dal getto e non oltre le 48 ore, salvo condizioni di stagionatura particolari.

La distanza tra i giunti (tagli) deve consentire la limitazione dei fenomeni fessurativi da ritiro e l'innalzamento della pavimentazione causata dal ritiro differenziale tra estradosso e intradosso. Generalmente la distanza tra i giunti di contrazione varia da un minimo di 20 fino a un massimo di 35 volte lo spessore della piastra, in funzione del ritiro del calcestruzzo, delle condizioni ambientali, delle condizioni di maturazione e del gradiente di umidità tra estradosso e intradosso e della presenza di vincoli (spigoli, pozzetti, locali, etc).

I riquadri che si vengono così a formare devono avere la forma più regolare possibile ed il rapporto dei lati, a e b , deve preferibilmente rispettare la condizione:

$$\frac{a}{b} \leq 1.2 \quad (\text{con } a > b) \quad (22)$$

Giunti particolari, ad esempio lungo il perimetro interno dell'edificio oppure da realizzare per limitare le deformazioni in una zona ritenuta a rischio, devono essere indicati nel progetto.

Le protezioni antinfortunistiche della macchina taglia-giunti normalmente non consentono di prolungare i tagli oltre 15 centimetri dagli spiccati in elevazione; è da ritenersi pertanto accettabile la conseguente relativa fessurazione di prolungamento del taglio.

6.4 Giunti di dilatazione

I giunti di dilatazione servono per consentire le libere dilatazioni delle pavimentazioni. Ove possibile, per ragioni di economia di lavoro e di riduzione delle discontinuità, è bene fare coincidere i giunti di dilatazione con quelli di costruzione. Le modalità di esecuzione sono analoghe ai giunti di costruzione stessi.

L'ampiezza ΔL del giunto può essere calcolata cautelativamente con la relazione:

$$\Delta L = \pm \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (23)$$

dove:

L è la lunghezza della piastra fra due giunti;

$\alpha = 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ è il coefficiente di dilatazione lineare del calcestruzzo;

ΔT è l'escursione termica media a livello baricentrico.

Tra le piastre che formano il giunto deve essere inserito un materiale comprimibile il cui spessore possa consentire la dilatazione delle stesse senza che vengano a contatto diretto tra loro, dimensionato in relazione alle deformazioni previste a partire dalla fase di realizzazione delle stesse piastre (considerando sia il ritiro che le variazioni termiche).

La dimensione del giunto deve essere determinata verificando che, nella massima fase di chiusura, il materiale di riempimento (soggetto a pressioni elevate) non fuoriesca dal giunto stesso.

In caso di contrazioni particolarmente ampie si consiglia di prendere accorgimenti tali da evitare aperture del giunto eccessive all'estradosso della piastra, inserendo giunti a pettine o altri accorgimenti opportuni.

La profondità dell'eventuale taglio, da realizzarsi in fase successiva per l'inserimento del riempitivo, è ininfluente ai fini delle prestazioni del giunto.

6.5 Caratteristiche dei sigillanti

I sigillanti sono caratterizzati da specifiche prestazioni indicate dai produttori che ne identificheranno il campo d'impiego.

Tra le altre, in particolare, dovrà essere valutato il valore di allungamento in relazione alle deformazioni previste. A titolo di esempio, in Tabella 6.1 si riportano le caratteristiche principali di alcuni prodotti utilizzati come sigillanti.

Tabella 6.1. Materiali impiegabili come sigillanti dei giunti.

Tipo	Allungamento di lavoro	Durezza shore A
Poluretano	10-25%	25-35
Polisolfurico	10-25%	25-45
Epossipoliuretano	10-15%	40-70

Possono essere utilizzati anche altri tipi di materiali, tra i quali prodotti siliconici, acrilici, o epossidici.

7 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI

7.1 Pavimentazioni senza armatura

La verifica delle pavimentazioni senza armatura tradizionale va effettuata nei riguardi del raggiungimento del limite di resistenza a trazione del calcestruzzo.

La verifica può essere eseguita attraverso un'analisi elastica lineare. Essa si basa sul confronto tra i valori delle sollecitazioni prodotte dalle azioni nella combinazione caratteristica (Eq. 8), ed i corrispondenti limiti di resistenza.

Il valore di progetto del momento resistente per unità di larghezza (m_{rd}) si calcola come:

$$m_{rd} = \frac{f_{cfd} \cdot t^2}{6} \quad (24)$$

dove:

t è lo spessore della pavimentazione;

$f_{cfd} = \frac{f_{cfk}}{\gamma_c}$ è il valore di progetto della resistenza a trazione per flessione del calcestruzzo;

f_{cfk} è il valore caratteristico della resistenza a trazione per flessione;

$\gamma_c = 1.5$ è il coefficiente di sicurezza parziale del calcestruzzo.

Il valore di progetto del taglio resistente per unità di larghezza, v_{rd} , si determina come:

$$v_{rd} = f_{ctd} \cdot t \quad (25)$$

dove:

$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$ è il valore di progetto della resistenza a trazione del calcestruzzo;

f_{ctk} è la resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo.

e va posto a confronto con il massimo valore del taglio agente sulla pavimentazione. Vanno chiaramente anche condotte le verifiche a punzonamento per carichi localizzati, nella quale si trascura la resistenza offerta dal sottofondo in quanto si attiva solo con grandi valori dello spostamento.

Il calcolo delle sollecitazioni può essere svolto in modo semplificato utilizzando approcci analitici formulati sulla base della teoria dell'elasticità, come ad esempio la teoria di Westergaard (vedi Paragrafo 5.3)

7.2 Pavimentazioni con armatura tradizionale

La verifica agli stati limite ultimi delle pavimentazioni con armatura tradizionale si basa sulle usuali regole per le strutture in calcestruzzo armato.

7.2.1 Verifica con analisi elastica lineare

La verifica si basa sul confronto tra i valori di progetto delle sollecitazioni prodotte dalle azioni, nella combinazione fondamentale (Eq. 11), determinati con un'analisi in cui si ipotizza che la piastra abbia un comportamento elastico lineare, e i valori di progetto delle corrispondenti resistenze. In particolare, le pavimentazioni devono essere verificate a flessione, a taglio e a punzonamento.

Per il calcestruzzo e l'acciaio si utilizzano i legami costitutivi indicati dalle UNI EN 1992-1-1.

Per la verifica a flessione, con riferimento al caso tipico di armature disposte in due direzioni perpendicolari (x e y), i momenti resistenti corrispondenti alle armature a_x e a_y (armatura per unità di larghezza della pavimentazione) saranno indicati come $m_{rd,x}$ e $m_{rd,y}$. Questi momenti dovranno risultare maggiori od uguali ai momenti sollecitanti $m_{ud,x}$ ed $m_{ud,y}$, determinati tenendo conto dei momenti flettenti m_x ed m_y e dei momenti torcenti m_{xy} .

Al Paragrafo 5.3.1 sono riportate in dettaglio le formule di Westergaard per l'analisi elastica di una piastra su suolo elastico insieme ad altri metodi di analisi.

I momenti resistenti $m_{rd,x}$ e $m_{rd,y}$ possono essere valutati utilizzando l'ipotesi di variazione lineare delle deformazioni lungo lo spessore, trascurando la resistenza a trazione del calcestruzzo e ipotizzando la perfetta aderenza tra calcestruzzo ed armatura.

Per la verifica a taglio e a punzonamento si utilizzano le formule contenute in UNI EN 1992-1-1. Tradizionalmente, nelle pavimentazioni non è presente una specifica armatura trasversale per resistere alla sollecitazione tagliante o di punzonamento. Nella determinazione della capacità resistente a taglio e a punzonamento non deve essere considerato il contributo del sottofondo.

7.2.2 Armatura solo all'intradosso

Nel caso tipico in cui vi sia armatura solo all'intradosso, i momenti resistenti per azioni che tendono le fibre superiori possono essere valutati limitando le tensioni di trazione nel calcestruzzo, in maniera analoga a quanto presentato al Paragrafo 7.1 per pavimentazioni senza armatura.

Una soluzione alternativa è quella di utilizzare calcestruzzo fibrorinforzato posando uno strato di armatura al solo intradosso. In questo caso, in presenza di momenti che tendono le fibre superiori, le verifiche possono essere eseguite utilizzando le regole per il calcestruzzo fibrorinforzato.

7.2.3 Verifica con analisi plastica

La verifica può essere eseguita utilizzando il metodo delle linee di rottura. Il metodo ipotizza la formazione di meccanismi di collasso in cui la piastra (pavimentazione) viene divisa in elementi rigidi collegati tra loro da linee di rottura o di plasticizzazione. Il momento limite che attiva la linea di rottura è il momento resistente m_{rd} di cui ai Paragrafi 7.1 e 7.2.1. Tra i possibili meccanismi cinematicamente ammissibili, verrà preso in considerazione quello legato alla minore capacità portante.

Nel caso si utilizzino metodi di calcolo basati sull'analisi plastica, occorre verificare che in corrispondenza delle linee di rottura si abbia una adeguata capacità rotazionale.

In ogni caso deve essere effettuata anche la verifica per azioni taglianti e a punzonamento.

7.2.4 Verifica con analisi non lineare

La verifica con metodi di analisi non lineare può essere eseguita con l'ausilio di programmi di calcolo generalmente basati sul metodo agli elementi finiti, in grado di trattare il comportamento non lineare dei materiali.

7.3 Pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato

La verifica agli stati limite ultimi delle pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato può essere eseguita facendo riferimento al documento CNR-DT 204/2006.

7.3.1 Verifica con analisi elastica lineare

La verifica si basa sul confronto tra i valori di progetto delle azioni sollecitanti, determinate con un'analisi in cui si ipotizza che la piastra abbia un comportamento elastico lineare, e quelli resistenti.

Il valore di progetto del momento resistente per unità di larghezza $m_{rd,F}$ si calcola come:

$$m_{rd,F} = \frac{f_{Ftud} \cdot t^2}{2} \quad (26)$$

con:

t spessore della pavimentazione

$$f_{Ftud} = \frac{f_{R3k}}{3 \cdot \gamma_F} \quad (27)$$

dove:

f_{R3k} resistenza caratteristica residua a flessione misurata secondo UNI EN 14651;
 γ_F coefficiente di sicurezza pari a 1.5.

Poiché la resistenza residua f_{R3k} è generalmente inferiore alla resistenza a trazione del calcestruzzo, questo metodo di verifica può sottostimare la resistenza effettiva della pavimentazione.

7.3.2 Verifica con analisi plastica

I meccanismi di collasso che si hanno nelle pavimentazioni in calcestruzzo fibrorinforzato possono essere diversi da quelli che si hanno nelle pavimentazioni di calcestruzzo armato e sono in genere influenzati dalla presenza dei giunti.

7.3.3 Verifica con analisi non lineare

La verifica con analisi non lineari di pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato può essere eseguita con metodi agli elementi finiti basati sulla meccanica non lineare della frattura (Hillerborg, 1976). Il legame costitutivo del calcestruzzo in trazione è fornito dal CNR DT 204/2006.

7.4 Pavimentazioni in calcestruzzo fibrorinforzato con armatura tradizionale

La verifica agli stati limite ultimi delle pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato con armatura tradizionale può essere eseguita considerando che il contributo resistente del fibrorinforzo si aggiunge a quello dell'armatura. La compatibilità delle deformazioni dell'acciaio e del calcestruzzo fibrorinforzato deve essere opportunamente considerata.

7.4.1 Verifica con analisi elastica lineare

La verifica si basa sul confronto tra il valore di progetto delle azioni sollecitanti, determinate con un'analisi in cui si ipotizza che la piastra abbia un comportamento elastico lineare, ed i corrispondenti valori delle resistenze.

I momenti resistenti ($m_{rd,x}$ e $m_{rd,y}$) possono essere valutati utilizzando l'ipotesi di variazione lineare delle deformazioni lungo lo spessore, e di perfetta aderenza tra calcestruzzo ed armatura.

Per tener conto del contributo a trazione del calcestruzzo si può assumere un andamento costante delle tensioni, pari a f_{Ftud} , nella parte tesa. In alternativa, si può considerare una variazione lineare delle tensioni di trazione, come previsto dalle CNR-DT 204/2006.

Nel caso tipico in cui vi sia armatura solo all'intradosso, i momenti resistenti per azioni che tendono le fibre superiori possono essere valutati come descritto al Paragrafo 7.3.1 per le pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato.

7.4.2 Verifica con analisi non lineare

Valgono le stesse considerazioni fatte al Paragrafo 7.3.3 per il calcestruzzo fibrorinforzato.

8 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile. Le azioni da prendere in conto devono essere assunte in accordo con quanto stabilito nel relativo Capitolo 5 delle presenti Istruzioni.

I principali Stati Limite di Esercizio sono originati dai seguenti fenomeni:

- a) fessurazioni e/o danneggiamenti locali che possano ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto;
- b) cedimenti e deformazioni che possano limitare l'uso della pavimentazione, la sua efficienza e il suo aspetto;
- c) cedimenti e deformazioni che possano compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari;
- d) vibrazioni che possano compromettere l'uso della pavimentazione;
- e) corrosione delle barre di armatura e/o eccessivo degrado dei materiali in funzione dell'ambiente di esposizione.

8.1 Stati Limite di Esercizio nelle pavimentazioni

Per le seguenti verifiche:

- verifiche di deformabilità;
- verifiche di fessurazione;
- verifiche delle tensioni di esercizio

sono riportate nel seguito le specifiche regole di calcolo allo Stato Limite di Esercizio.

8.1.1 Verifica di deformabilità

Per quanto riguarda i limiti di deformabilità, essi devono essere congruenti con le prestazioni richieste alla pavimentazione, anche in relazione alla destinazione d'uso, alle esigenze statiche, funzionali ed estetiche. Potranno essere concordati con il Committente o dedotti da documentazione tecnica di comprovata validità.

Ai fini della valutazione dell'evoluzione dello stato deformativo delle pavimentazioni nel tempo, è necessario considerare il comportamento differito del supporto. Da questo punto di vista, risultano particolarmente sensibili i terreni normal-consolidati ed i sottofondi scarsamente compattati. Un ulteriore fattore significativo è rappresentato da una distribuzione di azioni permanenti sulla pavimentazione significativamente disomogenea (aree di stoccaggio e corsie di movimentazione, etc.).

8.1.2 Verifica di fessurazione

Per assicurare la funzionalità e la durabilità delle pavimentazioni di calcestruzzo è necessario controllare il rispetto dello stato limite di formazione delle fessure all'estradosso della pavimentazione. In termini più generali, in sede di progetto è necessario operare per far sì che non si verifichi la formazione di fessure in tale porzione. A tal fine, per la combinazione di azioni prescelta, la massima tensione normale di trazione all'estradosso delle pavimentazioni deve soddisfare la condizione:

$$\sigma_t \leq \frac{f_{ctm}}{1.2} \quad (28)$$

dove f_{ctm} è la resistenza a trazione media del calcestruzzo, valutata secondo UNI EN 1992-1-1.

In mancanza di indicazioni specifiche diverse, la combinazione delle azioni da considerare è quella frequente. Il calcolo delle tensioni sollecitanti viene svolto facendo uso delle caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione omogeneizzata non fessurata. Inoltre, l'analisi strutturale della pavimentazione avviene seguendo le classiche regole del calcolo elastico per il quale si possono utilizzare le formule di Westergaard (1926).

8.1.2.1 Controllo della fessurazione da ritiro

La fessurazione da ritiro in fase plastica è legata principalmente al comportamento della matrice cementizia e alle condizioni ambientali; il fenomeno può essere contrastato con l'utilizzo di un basso rapporto acqua/cemento, con agenti antiritiro SRA e/o di microfibre. Il contributo offerto dalle microfibre alla fessurazione da ritiro può essere valutato attraverso prove sperimentali di ritiro impedito, come specificato da ASTM C1579-06 e da AASHTO PP34.

Al fine di contenere i rischi della fessurazione da ritiro plastico in fase di indurimento, rivestono particolare importanza le modalità di maturazione del calcestruzzo, per le quali si può far ricorso all'utilizzo di agenti di stagionatura.

Il ritiro igrometrico del calcestruzzo, misurato secondo la norma UNI 11307 a 28 giorni di maturazione, in pavimentazioni con giunti di contrazione non può essere superiore a 500 $\mu\text{m}/\text{m}$; nel caso di pavimentazioni senza giunti (di contrazione), il ritiro massimo dovrà essere prescritto dal Progettista in funzione delle condizioni ambientali e dell'attrito tra la piastra e la massicciata. In assenza di specifiche prescrizioni progettuali, il ritiro massimo non potrà essere superiore a 350 $\mu\text{m}/\text{m}$.

8.1.3 Limitazione delle tensioni di esercizio

Valutate le azioni interne nelle varie parti della pavimentazione, dovute alle combinazioni caratteristica e quasi permanente delle azioni, si calcolano le massime tensioni di compressione nel calcestruzzo e quelle di trazione e di compressione nelle armature; tali tensioni dovranno essere inferiori ai massimi valori consentiti da UNI EN 1992-1-1.

8.2 Requisiti di durabilità

In merito alla definizione delle caratteristiche del calcestruzzo per pavimentazioni, a fini della durabilità, valgono regole simili a quelle delle strutture in calcestruzzo, come previsto dalla UNI EN 206-1, considerando la classe di esposizione, la tipologia del rivestimento superficiale, la presenza di armature tradizionali e/o l'eventuale presenza di un fibrorinforzo.

9 PRESCRIZIONI RELATIVE ALL'ESECUZIONE

9.1 Pianificazione delle operazioni

9.1.1 Controllo generale del cantiere

È necessario effettuare un controllo generale del cantiere prima dell'inizio dei lavori, per verificare il rispetto delle norme di sicurezza. Deve essere posta particolare attenzione al controllo di situazioni che possano pregiudicare la buona esecuzione della pavimentazione o ridurre la sua durabilità. In particolare, il controllo generale deve insistere, sulle condizioni del sottofondo della pavimentazione, sulle condizioni ambientali e sulla documentazione relativa al cantiere. A tal proposito, si raccomanda di predisporre una riunione collegiale in cantiere con il Direttore Lavori e tutti i soggetti interessati all'esecuzione della pavimentazione prima dell'inizio dei lavori.

In fase di getto, è obbligo del Direttore Lavori effettuare i controlli di accettazione dei materiali utilizzati, previsti dalle normative vigenti, vigilando anche sull'esecuzione dei lavori (condizioni ambientali, particolari esecutivi, tempistiche, stagionatura).

9.1.2 Norme di sicurezza

Deve essere verificata l'attuazione delle norme antinfortunistiche, con particolare riguardo ai collegamenti elettrici, ai carichi sospesi, alle caditoie e chiusini sporgenti o di pericolosa dimensione, secondo quanto previsto dalla legislazione vigente. Buche e fosse devono essere opportunamente segnalate e protette, il percorso dei mezzi deve essere indicato e opportunamente delimitato.

Durata delle lavorazioni, organizzazione del lavoro, problematiche del lavoro notturno, vengono ottimizzate con la scelta dei materiali adeguati per i pavimentazioni e con tempi di presa del calcestruzzo dedicati e controllati.

9.2 Condizioni ambientali

Si deve assicurare l'esistenza di adeguate protezioni degli ambienti contro condizioni climatiche avverse (vento, sole, pioggia, gelo) durante le fasi di getto, di lavorazione di indurimento e maturazione. Prima del getto è opportuno verificare le previsioni meteo della zona.

9.3 Documentazione tecnico/contrattuale

Dovrebbe essere accertata e annotata la presenza o meno del contratto, del progetto esecutivo e del piano di sicurezza.

Il progetto esecutivo dovrebbe contenere, in particolare, i seguenti documenti redatti in forma esaustiva:

- relazione tecnica illustrativa;
- relazione geotecnica inclusiva dei risultati delle prove preliminari;
- relazione sulla qualità dei materiali;
- relazione di calcolo; specifiche tecniche (capitolato tecnico);
- specifiche sulle modalità di getto;
- specifiche sulle modalità di stagionatura e protezione del getto durante la fase esecutiva;
- piano di manutenzione;
- elaborati grafici in opportuna scala (planimetrie e sezioni quotate, particolari, fasi costruttive, ecc.).

9.4 Fasi operative dell'esecuzione

È compito della Direzione Lavori verificare il progetto esecutivo e la rispondenza dell'esecuzione con quanto stabilito nel progetto, con particolare riferimento alla qualità dei materiali e alla esecuzione dei lavori.

Le fasi operative in cui si articola la posa della pavimentazione industriale debbono essere descritte nel progetto esecutivo. Esse sono di seguito cronologicamente riassunte:

- isolamento delle strutture verticali;
- posizionamento della barriera al vapore *e/o* dello strato di scorrimento;
- posa dell'armatura;
- fornitura e posa in opera del calcestruzzo;
- applicazione e lavorazione dello strato di usura;
- protezione del getto e stagionatura protetta;
- esecuzione dei giunti;
- riempimenti e sigillature;
- messa in esercizio della pavimentazione.

9.4.1 Isolamento di strutture e spiccati verticali

Tutte le strutture verticali a contatto con la pavimentazione (bicchieri di plinti, fondazioni, basamenti, pilastri, muri, strutture prefabbricate di tamponamento, ecc.) necessitano di opportuno isolamento per garantire la massima indipendenza di comportamento della pavimentazione.

Il materiale (col relativo spessore) deve aderire perfettamente alla parete della struttura verticale. L'altezza dell'isolamento deve essere superiore allo spessore del getto e interessare tutta la sezione dello stesso.

9.4.2 Barriera al vapore e strato di scorrimento

Durante la posa si devono adottare gli opportuni accorgimenti per non danneggiare la barriera al vapore o lo strato di scorrimento.

Nel caso di strato di sabbia, accertarsi che sia ben compattato e livellato. Nel caso di impiego di fogli di polietilene o tessuto non tessuto, accertarsi che i sormonti siano adeguati (non inferiori a 15cm) senza grinze evidenti e posizionati in relazione alla prevista direzione del getto.

Nel caso debba essere realizzato uno strato di separazione con permeabilità scarsa o nulla, si deve tener presente che vengono accentuati i fenomeni di bleeding e di ritiro differenziale che possono facilitare possibili fessurazioni e l'imbarcamento delle lastre sui bordi. È possibile ridurre in modo significativo tale deformazione adottando degli specifici accorgimenti.

Per quanto riguarda la messa in opera del calcestruzzo, si devono utilizzare i metodi idonei al fine evitare di danneggiare massiciata, strato di scorrimento, barriera al vapore, particolari esecutivi già predisposti prima delle operazione di getto.

9.4.3 Posa delle armature (reti, fibre, barrotti)

La posa dell'armatura deve essere effettuata secondo le prescrizioni di progetto. Il ricoprimento dell'armatura all'estradosso deve essere di almeno 4 cm, e comunque superiore alla profondità del taglio dei giunti di contrazione. Nel caso in cui l'armatura posizionata nella parte alta del getto debba consentire il calpestio degli operatori, il suo diametro non potrà essere minore di 8 mm e dovrà essere appoggiata su opportuni distanziatori.

L'utilizzo di una rete elettrosaldata richiede particolari attenzioni in quanto:

- le sovrapposizioni dei pannelli di rete elettrosaldati o delle singole barre di acciaio dovranno rispettare le prescrizioni progettuali.
- durante le operazioni di getto, la rete superiore potrebbe essere schiacciata sul fondo della pavimentazione, sia pur in presenza di distanziatori.

Si dovrà prestare la cura necessaria nel dare continuità alla rete elettrosaldata, utilizzando opportuni fogli di sovrapposizione o affiancare i singoli pannelli di rete, effettuando le sovrapposizioni con barre singole. Tutto ciò al fine di evitare sovrapposizioni che creino stratificazioni di rete con elevato spessore. L'esatta posizione dell'armatura nella piastra può essere ottenuta esclusivamente mediante l'utilizzo di appositi distanziatori che dovranno essere indicati in fase progettuale. L'eventuale collegamento di messa a terra dell'armatura e l'armatura suppletiva, costituita da barrotti o ferri di rinforzo attorno a chiusini e pilastri, devono essere previsti in fase progettuale.

Nel caso di aggiunta di fibre all'impasto di calcestruzzo, la quantità e le modalità di distribuzione nell'impasto dovranno consentire un'uniforme dispersione delle stesse evitando inoltre la formazione di grumi.

Nei giunti di costruzione verranno predisposti idonei sistemi di ripartizione dei carichi (incastrati, barrotti, piastre, ecc.) che dovranno essere previsti, in fase di progetto, per tipologia, dimensione, distribuzione, in relazione alle sollecitazioni previste.

9.4.4 Fornitura del calcestruzzo a piè d'opera

È consentita la fornitura a piè d'opera del calcestruzzo esclusivamente con mezzi o sistemi adeguati alla quantità necessaria al getto e, soprattutto, tali da non favorire la segregazione ed influenzare negativamente l'omogeneità degli impasti. La fornitura a piè d'opera del calcestruzzo, nella quantità e nei tempi concordati, deve avvenire in modo uniforme, continuo e costante, al fine di evitare riprese di getto o interferire negativamente nelle operazioni di finitura. In condizioni ordinarie, il tempo di attesa tra le diverse autobetoniere non dovrebbe superare i 30 minuti.

Tempi superiori a 90 minuti tra il confezionamento dell'impasto e la posa possono essere accettati solo se preventivamente concordati con il produttore di calcestruzzo ed in relazione alle caratteristiche del calcestruzzo e alle condizioni termo-igrometriche.

Si raccomanda, per una buona esecuzione della pavimentazione, che tutti gli operatori coinvolti (Direzione Lavori, Fornitore ed Esecutore) concordino preventivamente le quantità dei materiali occorrenti, la frequenza di consegna, le caratteristiche reologiche del calcestruzzo ed i relativi tempi di frattazzabilità, affinché il medesimo consenta, dopo la stesura, le successive fasi di lavorazione nei tempi di normale attività delle maestranze presenti.

9.4.5 Tempi di lavorazione del calcestruzzo

Il tempo di inizio e di fine frattazzabilità è un fattore importante in materia di sicurezza e salute nei luoghi di lavoro, per non esporre le maestranze ad orari di lavoro eccessivi.

9.4.6 Sequenza delle campiture di posa

Al fine di ottimizzare le operazioni di messa in opera del calcestruzzo è opportuno che, prima dell'inizio della fase di getto, venga stabilita una sequenza di esecuzione delle campiture di posa; ciò allo scopo di limitare le interazioni, durante le varie fasi operative, tra movimentazione dei mezzi, operatori, posa di materiali allo stato fresco rispetto a zone con lavorazioni di altra natura in fase di esecuzione su zone già indurite.

9.4.7 Posa in opera del calcestruzzo

La posa deve avvenire in presenza di adeguate protezioni contro condizioni climatiche avverse. Il calcestruzzo può essere livellato con staggiatura semplice manuale, con vibro-staggiatura manuale o con sistema di vibro-stesura automatizzata.

In corrispondenza dei giunti di costruzione, e comunque sempre contro cassero, deve essere curata la costipazione del calcestruzzo al fine di limitare la formazione di macrocavità o nidi di ghiaia che facilmente si formano in tali posizioni. Se non previsto diversamente in fase progettuale, l'accostamento dei getti deve essere effettuato a tutta sezione verticale.

9.4.8 Applicazione dello strato di usura

Le operazioni di applicazione e lavorazione dello strato di usura devono essere eseguite su calcestruzzo fresco, prima che sia completato il fenomeno della presa. È opportuno utilizzare esclusivamente prodotti premiscelati dove sia accertata la provenienza, la classificazione, le caratteristiche prestazionali, la marcatura CE.

9.4.8.1 Metodo a spolvero

Il prodotto deve essere applicato anidro con spolveratura su calcestruzzo fresco e steso in almeno due fasi alternate da lavorazione meccanica, in quantità complessiva non minore di 2 daN/m^2 . Per la finitura del manto d'usura si deve limitare al minimo indispensabile la quantità d'acqua eventualmente aggiunta. Tale metodo non è applicabile quando si utilizzano calcestruzzi areati (XF3 e XF4).

9.4.8.2 Metodo a pastina

Prima dell'applicazione della malta di riporto (o pastina) deve essere eliminato ogni deposito residuo portato in superficie dall'acqua di affioramento del calcestruzzo. Deve essere applicata una quantità di prodotto (premiscelato anidro) indicativamente non minore di 10 daN/m^2 (pastina rasata) o 15 daN/m^2 (pastina), se a base di aggregati lapidei, oppure 30 daN/m^2 , se a base di aggregati metallici. Tale metodo non è applicabile quando si utilizzano calcestruzzi areati (XF3 e XF4).

Per la finitura del manto d'usura si deve limitare al minimo indispensabile la quantità d'acqua eventualmente aggiunta.

9.4.8.3 Metodo a riporto

Posa di miscela indurente a forte spessore (10-30 mm) applicata sul calcestruzzo precedentemente indurito e stagionato.

La superficie del calcestruzzo deve essere finita in modo che presenti una forte rugosità superficiale e, ad avvenuta stagionatura, deve essere preparata con estrema cura allo scopo di ottenere la massima adesione della miscela al supporto.

L'aderenza del sistema riportato al supporto può essere ottenuta mediante l'applicazione di un primer a base cementizia, resinosa o mista. Sul primer ancora fresco viene applicato il materiale di riporto in uno strato unico.

9.4.8.4 Metodo senza indurente superficiale riportato

È possibile eseguire la finitura della pavimentazione senza applicare sulla parte superficiale un prodotto cementizio indurente nella fase finale della lavorazione, che viene eseguita solo con adeguato sistema di densificazione e lisciatura della parte superiore del calcestruzzo, curando particolarmente la chiusura e la successiva stagionatura.

In alcuni casi, ad avvenuto indurimento, si procederà ad eseguire una levigatura superficiale mediante utensili diamantati che permetterà di ottenere una superficie finale chiusa e planare, lasciando a vista la grana della miscela di calcestruzzo.

Allo scopo di ottenere un miglioramento delle caratteristiche superficiali della pavimentazione, è suggerito applicare un prodotto impregnante a forte azione indurente, dando alla parte superiore della pavimentazione una resistenza meccanica migliore.

9.4.9 Protezione e stagionatura

Per raggiungere le potenziali prestazioni attese dal calcestruzzo, soprattutto nella zona corticale, occorre proteggerlo a stagionarlo accuratamente. La stagionatura e protezione della pavimentazione deve iniziare appena possibile dopo la fase di lisciatura con frattazzatrice meccanica.

La protezione è volta a prevenire gli effetti derivanti da:

- esposizione, anche durante il getto e la lavorazione, a condizioni climatiche avverse nonché all'irraggiamento solare, vento e ad aria radente, con la conseguente evaporazione repentina di acqua dalla superficie e formazione di fessure da ritiro o sfarinamenti;
- dilavamento per pioggia o ruscellamento dell'acqua;
- rapido raffreddamento durante i primi giorni dal getto;
- elevati gradienti di temperatura tra il centro e la superficie della pavimentazione;
- congelamento.

I principali sistemi di protezione per la stagionatura della pavimentazione, utilizzabili singolarmente o in combinazione fra loro, sono elencati di seguito:

- coprire la pavimentazione con teli di polietilene o con fogli e/o pannelli coibenti nel caso di basse temperature;
- rivestire con teli umidi (geotessuto mantenuto costantemente umido);
- nebulizzare acqua sulla superficie in maniera uniforme ed ininterrotta;
- applicare prodotti stagionanti che formano pellicole protettive. A tal proposito si consiglia di utilizzare prodotti che siano caratterizzati da indici di efficienza adeguati rispetto alle condizioni termo-igrometriche presenti, tenendo presente anche il problema dell'aderenza di eventuali sovrapplicazioni previste o future di rivestimenti resinosi.

Fattori importanti nei processi di protezione e stagionatura sono:

- tipo/classe di cemento;
- rapporto acqua/cemento;
- condizioni termo-igrometriche e di ventilazione.

L'obbligo della stagionatura deve essere prescritto dal Progettista. I metodi e la durata della stagionatura devono essere prescritti in relazione alle condizioni ambientali e operative al momento della realizzazione. La corretta stagionatura deve essere garantita preferibilmente per circa 15 giorni e comunque, in ogni caso, per un tempo non inferiore a 7 giorni.

Alcuni tipi di stagionatura possono modificare l'aspetto della pavimentazione lasciando alcune differenze cromatiche superficiali. Generalmente tali differenze tendono a diminuire nel tempo. Se rappresentano un requisito essenziale per la pavimentazione, dovranno essere dettagliatamente specificate in fase progettuale.

In caso di pericolo di gelo dovranno essere poste in atto specifiche protezioni che isolino la superficie del getto dalla possibile formazione di ghiaccio negli strati superficiali durante la fase iniziale dell'indurimento.

9.4.10 Giunti

La disposizione dei giunti, in generale, è determinata dal tipo di supporto della pavimentazione, dalla conformazione delle superfici, dal lay out eventuale, dalla presenza di interruzioni ed irregolarità (pozzetti, griglie, basamenti), dallo spessore della piastra, dal ritiro del calcestruzzo e dalla sua armatura; essa viene stabilita dal Progettista.

Il taglio meccanico del giunto di contrazione può causare piccoli sbracciamenti localizzati.

Gli accorgimenti adottati per proteggere la stagionatura, dopo il taglio, devono essere ripristinati.

Se non previsto diversamente in fase progettuale, l'accostamento dei getti separati da un giunto di costruzione deve essere rettilineo e a tutta sezione verticale. Il taglio meccanico, se previsto, viene effettuato con il solo scopo di realizzare una traccia per l'inserimento dei materiali di riempimento. La necessità di esecuzione, i tempi e la profondità di questo taglio sono pertanto del tutto ininfluenti rispetto alle caratteristiche prestazionali del giunto. L'interruzione della piastra di calcestruzzo, in tali punti, comporta che le sollecitazioni nelle zone limitrofe possano assumere valori particolarmente elevati. Per tali giunti, rappresentando quindi la parte della pavimentazione più soggetta a prematuri deterioramenti, si deve prevedere, in fase progettuale, un opportuno rinforzo della parte superficiale, in fase di posa o a stagionatura avvenuta.

Tra le lastre che formano i giunti di costruzione e di dilatazione deve essere inserito un materiale comprimibile il cui spessore possa consentire l'allungamento delle stesse senza che vengano a contatto diretto tra loro.

In condizioni ambientali particolarmente sfavorevoli, al fine di prevenire il rischio di fessurazione, è possibile anticipare l'esecuzione dei giunti, anche se questa potrebbe comportare la formazione di leggeri sbracciamenti del bordo del taglio.

Appena realizzato, il giunto va protetto con un "profilo preformato", che potrà essere successivamente rimosso per l'eventuale sigillatura.

9.4.11 Riempimenti e sigillature

I giunti delle pavimentazioni sono generalmente chiusi mediante riempimenti eseguiti con materiali preformati o indurenti; nel caso venga richiesta una sigillatura questa dovrà essere prescritta in fase progettuale tenendo presente anche i tempi di esecuzione delle operazioni in relazione alle previste deformazioni delle lastre. Le funzioni di riempimento e/o di sigillatura, a seconda delle prestazioni richieste alla pavimentazione, possono presentarsi congiunte o disgiunte.

I riempimenti hanno la funzione di colmare le cavità formatesi a seguito del taglio dei giunti; particolari accorgimenti consentono anche di migliorare la resistenza dello spigolo del giunto nei confronti dello sbracciamento da urti. Per garantire nel tempo tali funzioni si richiede al materiale di riempimento un buon ancoraggio alle pareti del giunto e la capacità di sostenere i movimenti reciproci delle superfici affiancate. Sono consentiti distacchi parziali del materiale dalle pareti purché non comportino la caduta o la fuoriuscita del riempimento. È opportuno posizionare elementi preformati comprimibili a cellule chiuse tra le due superfici del giunto per ottenere la sezione idonea a garantire al riempimento la sua capacità di lavoro; ciò previene anche l'eventuale adesione del ricoprimento al fondo del taglio.

Come riempimento temporaneo, ove non specificato in fase progettuale, si possono utilizzare semplici profili morbidi in PVC o similari, semplicemente inseriti a pressione.

La sigillatura deve permettere la tenuta del giunto al passaggio di liquidi. Il materiale costituente la sigillatura deve possedere adeguata resistenza chimica nei confronti dei liquidi con i quali verrà a contatto ed essere in grado di sostenere, senza lacerarsi e senza distaccarsi dal supporto, i movimenti previsti per il giunto. Inoltre, il materiale deve avere caratteristiche meccaniche tali da

rimanere integro ed aderente, alle temperature di esercizio previste, anche in presenza di grandi deformazioni. In ogni caso, le specifiche di realizzazione e del materiale da impiegare devono essere prescritte dal Progettista.

La sede del giunto deve avere larghezza tale da ridurre l'allungamento specifico del materiale sigillante. Si tenga però presente che giunti larghi sigillati con materiale deformabile tendono a sbrecciarsi più rapidamente, soprattutto se in presenza di azioni concentrate elevate (ad esempio ruote piccole e dure).

L'ampiezza della sede del materiale sigillante può essere indicativamente calcolata come:

$$b = e/a \quad (29)$$

dove:

e è il movimento della piastra, espresso in millimetri;

b è l'ampiezza della sede del materiale, espressa in millimetri;

a è la capacità di lavoro del materiale, espressa in percentuale.

Le prescrizioni generali indicate non assicurano automaticamente la tenuta all'acqua della pavimentazione, ma solo l'impermeabilità del giunto.

Data la sollecitazione di natura fisico-meccanica del giunto posto all'estradosso della lastra di calcestruzzo, si possono prevedere distacchi o degradi localizzati che dovranno essere oggetto di specifico programma di manutenzione.

In ogni caso, il sistema sigillante non potrà sostituire una corretta impermeabilizzazione della pavimentazione.

9.5 Indagini preliminari

9.5.1 Indagini sul terreno

Le indagini sperimentali da eseguire in fase preliminare per qualificare il sottosuolo possono essere individuate tra le seguenti, o tra altre aventi lo stesso grado di attendibilità nella determinazione delle rispettive risultanze:

- Prove penetrometriche statiche (meccaniche, elettriche, con piezocono, con cono sismico ecc.);
- Prove penetrometriche dinamiche (adatte solo alle terre incoerenti);
- Prove dilatometriche;
- Sondaggi meccanici a carotaggio continuo e redazione di stratigrafia;
- Prove speditive di consistenza sui carotaggi;
- Pozzetti esplorativi e campionamento dei terreni;
- Prelievo di campioni di terreno per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio.
- Prove di carico con piastra (preferibilmente con diametro $D=760$ mm);
- Piezometri per il controllo delle falde (piezometri a tubo aperto, elettrici, a corda vibrante, pneumatici ecc.);
- Prove geotecniche di laboratorio sui campioni prelevati, finalizzate alla determinazione della caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni indagati;
- Prove geofisiche.

In fase preliminare si devono eseguire almeno le seguenti prove di prequalifica dei materiali da utilizzare per la formazione degli eventuali rilevati e della stessa massicciata.

- Analisi granulometriche;
- Prove di classificazione (CNR UNI 10006);
- Prove di compattazione (Proctor, Proctor modificato);
- Prove CBR.

Nel caso di rilevati stabilizzati, a calce o a cemento, dovranno essere inoltre eseguite tutte le prove necessarie a stabilire le caratteristiche dell'impasto quali: quantità di acqua e di calce ovvero di cemento per i diversi casi.

I risultati delle prove consentono di qualificare i materiali e stabilire il grado di addensamento, e la risposta in termini di resistenza meccanica e deformabilità ottenibili con il materiale tal quale e/o con l'additivazione di leganti e/o con l'inserimento di rinforzi, ove necessario.

Le indagini sperimentali da eseguire in corso d'opera e a controllo finale sono elencate nel seguito:

- Prove di carico con piastra (CNR 92/83): orientativamente 1 ogni 400 m². Le prove di controllo devono essere intensificate in corrispondenza delle zone critiche (es. in prossimità dei pilastri, pozzetti, sottoservizi);
- Prove di densità in situ (CNR 69/78): orientativamente 1 ogni 400 m²;
- Prova di controllo dell'uniformità della risposta attraverso uso di rulli compattatori, piastre dinamiche e indagini superficiali di tipo sismico.

9.5.2 Prequalifica del calcestruzzo

Si tratta dello studio preliminare che dovrà essere condotto prima dell'inizio dei getti per ogni classe di conglomerato cementizio previsto negli elaborati progettuali.

Tale studio dovrà comprovare la conformità del conglomerato cementizio e dei singoli materiali componenti. In particolare, nella relazione di qualificazione dovrà essere fatto esplicito riferimento a:

- Tipo, provenienza e caratteristiche dei componenti;
- Studio granulometrico;
- Tipo, classe e dosaggio di cemento e dosaggi minimi ammessi;
- Rapporto acqua/cemento;
- Classe di esposizione ambientale a cui è destinata la miscela;
- Tipo e dosaggio degli eventuali additivi e aggiunte;
- Resistenza caratteristica a compressione R_{ck} ;
- Resistenza residua media a trazione per flessione, ove previsto dal Progettista;
- Classe di consistenza;
- Resistenza ai cicli gelo disgelo, se necessario, in funzione della classe di esposizione ambientale;
- Classe di tenacità (per calcestruzzi fibrorinforzati).

Il calcestruzzo dovrà avere le caratteristiche reologiche adeguate per una corretta successiva lavorazione in opera.

L'autorizzazione all'inizio dei getti potrà avvenire solo dopo l'approvazione, da parte della Direzione Lavori, della documentazione relativa agli studi di prequalifica ed eventualmente dopo la valutazione dei risultati ottenuti su campioni prelevati direttamente su impasti della miscela di prequalifica.

9.6 Preparazione e tolleranze nella massicciata

Prima del getto della piastra di calcestruzzo dovrà essere effettuato un controllo del supporto, al fine di:

- Verificare la planarità che, in assenza di specifiche, può essere assunta pari a 20 mm su una stadia di 4 metri.
- Eseguire un controllo generale per determinare eventuali zone difformi dal livello minimo previsto per la pavimentazione.
- Verificare l'assenza di avvallamenti e di ristagni d'acqua.
- Verificare l'assenza di ghiaccio.
- Rilevare eventuali possibili riduzioni di quota dovute a detriti, tubi o quant'altro riduca lo spessore della pavimentazione.
- Individuare la presenza di cunicoli, fondazioni, plinti, travi che riducano lo spessore della piastra e che comunque rappresentino punti a rischio di fessurazioni indotte da differenziata rigidezza del supporto.
- Costipare tutti gli scavi ed i rinterrati fino a rifiuto, utilizzando strumenti e macchine idonee alle condizioni di cantiere e alle caratteristiche del materiale di riempimento. I rinterrati nelle vicinanze di pilastri, basamenti, cunicoli, canaline, muri, scavi per impiantistica, ecc., vanno realizzati con particolare attenzione essendo questi i punti più soggetti a cedimenti.
- Verificare che chiusini, soglie, angolari, ecc., siano murati a sezione verticale; verificare i piani con il controllo delle quote degli elementi di raccordo (chiusini, soglie angolari, guide, ecc.) che dovranno rientrare nella tolleranza di orizzontalità riferita alla quota di riferimento prefissata nel progetto. Nel caso siano previste, in fase progettuale, delle pendenze, verificare che le quote di posa dei vari elementi predisposti sia congrua e coordinata. La presenza di pendenze non deve inficiare lo spessore minimo della piastra, previsto in fase progettuale.
- rimuovere sassi di grosse dimensioni, macerie e materiali leggeri eventualmente presenti.

Nel caso in cui il transito delle autobetoniere abbia lasciato tracce profonde nella massicciata, è opportuno sospendere i lavori e ripristinare la massicciata in modo che rispetti le tolleranze di progetto.

9.7 Tipo di finitura

Il tipo di finitura di una pavimentazione industriale è in relazione alla sua destinazione d'uso e alla richiesta prestazionale o estetica richiesta.

In linea di massima la finitura di una pavimentazione industriale può essere così suddivisa:

- *Finitura liscia*

La parte superficiale della pavimentazione si presenta chiusa e compatta, generalmente indicata per pavimentazioni all'interno e generalmente asciutte.

Tale finitura risulta essere meno sporchevole e sufficientemente antisdrucchiole, salvo utilizzi della pavimentazione in condizioni bagnate o con inquinanti sulla superficie.

La gradazione della finitura può essere calibrata dall'operatore nelle operazioni di finitura, considerando la possibile disomogeneità del risultato dovuta alla manualità dell'operazione.

- *Finitura ruvida (es. scopato)*

La parte finale della pavimentazione ha un aspetto ruvido, anche rugoso se necessario, con un forte effetto antisdrucchiole.

Viene utilizzata generalmente all'esterno o dove il grip della finitura assume un ruolo determinante, ad esempio nelle rampe con leggera pendenza, in zone molto bagnate, ecc.

- Calcestruzzo stampato

È una tipologia di pavimentazione ad effetto decorativo che presenta in abbinamento alle prestazioni meccaniche di una piastra in calcestruzzo, un aspetto estetico particolare, con un profilo superficiale che ricorda, ad esempio, una pavimentazione in pietra, in masselli, in cotto, ecc.

- Calcestruzzo decorativo

È una ulteriore lavorazione che viene eseguita su una pavimentazione in calcestruzzo di tipo tradizionale per conferirle un aspetto estetico particolare quale, ad esempio, una forma anticata, dei disegni o delle colorazioni particolari (ottenuti mediante specifici trattamenti chimici superficiali), etc.

- Calcestruzzo lavato

È costituito da una finitura superficiale particolare che lascia evidenziata a vista la grana dell'inerte, ottenuta mediante specifici trattamenti da applicare durante le operazioni di finitura della pavimentazione.

9.8 Influenza delle condizioni ambientali sulla posa del calcestruzzo

La messa in opera di pavimentazioni industriali in calcestruzzo durante il periodo invernale, o in presenza di alte temperature, come pure in presenza di calcestruzzi caratterizzati da un valore di bleeding particolarmente accentuato, deve essere effettuata con attenzione, adottando accorgimenti specifici nella scelta dei materiali e/o nelle modalità di messa in opera.

Le basse temperature ritardano tutti i processi di presa e d'indurimento del calcestruzzo e di conseguenza le operazioni di lavorazione e finitura vengono differite. Inoltre le condizioni dell'evaporazione dell'acqua risultano modificate.

Dovranno quindi essere presi alcuni accorgimenti tra i quali: utilizzare cementi a più alto calore di idratazione ed eventualmente dosaggi maggiori, utilizzare additivi invernali, diminuire il rapporto acqua/cemento, aumentare la temperatura del calcestruzzo con particolari accorgimenti allo scopo di diminuire gli effetti negativi della bassa temperatura e permettere le corrette operazioni di lavorazione in tempi adeguati, nel rispetto delle norme sul lavoro e del piano di sicurezza e coordinamento ai sensi delle vigenti disposizioni.

Le operazioni di finitura possono essere migliorate mediante la protezione dei locali, il possibile riscaldamento degli stessi (senza l'immissione di aria secca), l'impiego di attrezzature che facilitino le operazioni.

In presenza di gelo, durante le operazioni di posa e nei primi periodi di indurimento, ed in assenza di specifici accorgimenti, le operazioni di getto devono essere sospese.

Nella stagione calda, al contrario, le reazioni vengono accelerate e anche le operazioni di getto e finitura dovranno essere conseguentemente accelerate. In questo caso si consiglia l'impiego di cementi a presa più lenta e, ove possibile, minori contenuti di cemento, come pure l'impiego di prodotti ed additivi dedicati per temperature medio-alte.

Le operazioni di finitura dovranno essere anticipate e il numero del personale adeguato ai tempi previsti per tali operazioni, in relazione alle campiture di getto previste.

In alcuni casi, è preferibile iniziare le operazioni nei periodi meno caldi della giornata, evitando in ogni caso operazioni di finitura all'esterno in presenza di sole diretto nelle ore più calde. Si dovranno in questo caso adottare particolari modalità di stagionatura e, in generale, un adeguato prodotto stagionante dovrà essere applicato immediatamente alla fine delle operazioni di getto. Con temperature particolarmente elevate (30-35°C) si sconsiglia di effettuare il getto di pavimentazioni di calcestruzzo, specialmente all'esterno, a meno che non si adottino accorgimenti particolari.

Nel caso di calcestruzzi caratterizzati da alto bleeding si dovrà rimuovere l'acqua superficiale in eccesso, cercando di non rovinare eccessivamente la superficie e, se necessario, verificare i controlli sui requisiti di bleeding.

9.9 Protezione a lavoro eseguito

Le caratteristiche prestazionali della pavimentazione raggiungono il loro massimo valore in relazione al tempo di stagionatura e delle condizioni termo-igrometriche presenti.

Per tale motivo, fino al raggiungimento dei valori prestazionali prestabiliti, la pavimentazione deve essere protetta e non sollecitata. Sono possibili deroghe solo se espressamente autorizzate dal Direttore dei Lavori dopo opportuna verifica delle caratteristiche prestazionali raggiunte e dopo l'esecuzione delle prove complementari.

In assenza di specifiche indicazioni, la pavimentazione non potrà essere sollecitata completamente prima di 28 giorni di stagionatura, accertando l'esito positivo delle prove previste.

Traffico pedonale o limitato potrà essere autorizzato espressamente in relazione alle condizioni ambientali e prestazionali della pavimentazione, comunque indicativamente non prima di 7 giorni di maturazione.

9.10 Impiantistica

Poiché lo spessore della pavimentazione deve essere costante per tutta la superficie, va evitato il passaggio di impianti (tubazioni, cablaggi) sopra la massiciata e di altri elementi che possono ridurre lo spessore o impediscano lo scorrimento della piastra.

9.11 Impianti di riscaldamento/raffrescamento a pavimento

In presenza di impianti di riscaldamento a pavimento è obbligatorio effettuare, prima della operazioni di posa di acciaio e calcestruzzo, tutte le prove di tenuta idraulica, alla presenza del Direttore Lavori. I tubi del riscaldamento a pavimento devono essere adeguatamente fissati e bloccati. La presenza di elementi dell'impianto, all'interno della lastra in calcestruzzo, potrebbe innescare fenomeni fessurativi quindi, richiede l'adozione di opportuni accorgimenti per contrastare la nascita del fenomeno (per esempio l'uso di rete elettrosaldata). È bene osservare che la presenza di strati di isolamento termico potrebbe favorire l'innescare di fessurazioni e deformazioni, accentuate dai gradienti termici indotti dal riscaldamento. Nella progettazione e nella successiva messa in opera dell'impianto di riscaldamento si dovrà verificare la compatibilità con i giunti di costruzione e di dilatazione della pavimentazione. Lo spessore di progetto va garantito dal lembo superiore di tali tubi. Inoltre, durante l'esecuzione dei getti, l'impianto va mantenuto in pressione al fine di individuare qualsiasi perdita dovuta alle operazioni di posa.

Ad avvenuta stagionatura del calcestruzzo deve essere effettuato un ciclo di accensione progressiva dell'impianto in modalità riscaldamento, per verificare la funzionalità dell'impianto oltre che rendere la pavimentazione stabile.

Di norma il ciclo di accensione si esegue mettendo in funzione l'impianto al minimo e aumentando la temperatura di 5°C al giorno fino al raggiungimento del regime massimo previsto in esercizio. Mantenuta la temperatura massima per minimo 5 giorni, si procede a ritroso, diminuendola la temperatura di 5 °C al giorno fino al raggiungimento della temperatura ambiente. La pavimentazione, sottoposta a questo ciclo, subisce uno shock termico che, frequentemente, provoca la comparsa di fessurazioni che devono essere valutate.

Il processo di avviamento del riscaldamento deve essere documentato.

10 INDAGINI PRELIMINARI, CONTROLLI E PROVE IN SITU

10.1 Verifiche e controlli sui materiali

I materiali componenti, l'esecuzione e la pavimentazione finita possono essere oggetto di verifica. Tali verifiche sono realizzate secondo quanto riportato nel presente paragrafo.

10.1.1 Verifiche sui materiali componenti

Le verifiche sui componenti della pavimentazione industriale sono quelle indicate nel Capitolo 4, integrate da quelle descritte nei successivi Paragrafi da 10.2.2 a 10.2.6.

10.1.2 Controlli sul calcestruzzo

Sono quei controlli sistematici da eseguire in corso d'opera per verificare la conformità tra le caratteristiche del conglomerato messo in opera a quello stabilito dal progetto e garantito in sede di valutazione preliminare.

10.1.3 Controlli sul calcestruzzo fresco

Verifica del Documento Di Trasporto (DDT).

Deve essere verificata la corrispondenza fra il tipo di calcestruzzo ordinato con quanto riportato nel DDT, che deve essere redatto secondo la UNI EN 206-1 (punto 7.3).

Il controllo dei DDT permette di verificare inoltre i tempi di trasporto e di getto.

Controllo del volume delle consegne

La rispondenza del volume di calcestruzzo dichiarato nel DDT si verifica mediante la seguente procedura:

- determinare il peso del calcestruzzo e del mezzo che lo trasporta (peso lordo) M_L (in daN);
- determinare il peso del mezzo (tara) M_T (in daN);
- il peso del calcestruzzo M_C consegnato sarà uguale a: $M_C = M_L - M_T$ (in daN);
- determinare il peso per unità di volume del calcestruzzo M_V (in daN/m³) secondo la UNI EN 12350-6;
- il volume del calcestruzzo consegnato V_C in m³ è uguale a: $V_C = M_C / M_V$.

Un ulteriore confronto riguarda il peso per unità di volume dichiarato dal confezionatore nel dossier di prequalifica.

Ulteriori verifiche e relative procedure normalizzate

- Campionamento del calcestruzzo, secondo la UNI EN 12350-1 (prelievo di campioni in cantiere);
- Preparazione e stagionatura dei provini in calcestruzzo, secondo la UNI EN 12390-2;
- Forme, dimensioni dei provini ed altri requisiti per provini e per casseforme, secondo la UNI EN 12390-1;
- Controllo della composizione del calcestruzzo fresco (limitatamente al rapporto acqua-cemento), secondo la UNI 11201;
- Determinazione della consistenza - prova di abbassamento al cono (slump test), secondo la UNI EN 12350-2;
- Determinazione della consistenza - spandimento con tavola a scosse, secondo la UNI EN 12350-5 (metodo B, limitatamente alla consistenza S5);
- Determinazione della massa volumica, secondo la UNI EN 12350-6;

- Determinazione volumetrica per pressione del contenuto di aria, secondo UNI EN 12350-7;
- Determinazione della quantità di acqua essudata, secondo la UNI 7122;
- Determinazione dei tempi di inizio e fine presa mediante la misura della resistenza alla penetrazione, secondo la norma UNI 7123.

Naturalmente devono essere eseguiti, a cura del Direttore dei Lavori, i controlli di accettazione sul calcestruzzo come previsto dalle Norme Tecniche vigenti.

Per il calcestruzzo fibrorinforzato è necessario valutare l'effettiva presenza del quantitativo di fibre richiesto e l'omogeneità della loro distribuzione del calcestruzzo indurito.

10.1.4 Controlli sul calcestruzzo indurito

- Determinazione della resistenza a compressione dei provini secondo le UNI EN 12390-3 e UNI EN 12390-4;
- Determinazione del modulo elastico secante (prEN 12390-13);
- Determinazione della resistenza a trazione mediante prova di flessione (UNI EN 12390-5) o indiretta per spacco (UNI EN 12390-6);
- Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento d'acqua del calcestruzzo indurito, secondo la UNI EN 12390-7;
- Determinazione del ritiro igrometrico, secondo la UNI 11307;
- Determinazione della resistenza alla degradazione per cicli gelo-disgelo secondo la UNI 7087.

Per il calcestruzzo fibrorinforzato è importante la caratterizzazione del comportamento a trazione in fase fessurata secondo UNI EN 14651.

10.1.4.1 Controlli sul calcestruzzo fibrorinforzato strutturale

La realizzazione di pavimentazioni di calcestruzzo fibrorinforzato va sottoposta costantemente a controlli che assicurino la conformità dei prodotti ai requisiti di funzionalità, durabilità e di resistenza richiesti.

Poiché la resistenza a compressione del calcestruzzo rinforzato con modesti dosaggi di fibre ($V_f < 0.5\%$) è poco influenzata dalla presenza del fibrorinforzo, per la resistenza a compressione si può fare riferimento alle modalità utilizzate per il calcestruzzo ordinario (senza fibre). Per la valutazione della tenacità del materiale fibrorinforzato si fa invece riferimento alle prove di frattura su campioni di trave, come specificato nelle presenti Istruzioni e nella UNI EN 14651.

È previsto il prelievo di due campioni da sottoporre a prova di compressione (UNI EN 12390-3) ogni 100 m³ di pavimentazione e comunque ogni giorno in cui è previsto un getto.

Quando prodotto da confezionatore in possesso di prove di prequalifica certificate, per la valutazione della tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato in cantiere, il controllo di conformità prevede un prelievo di almeno due campioni di travetto (UNI EN 14651) ogni 300 m³, con un minimo di tre prelievi (sei campioni). In assenza di prove di prequalifica, il controllo di conformità prevede un prelievo di almeno due campioni di travetto (UNI EN 14651) ogni 200 m³, sempre con un minimo di tre prelievi (sei campioni).

I controlli relativi alla tenacità del materiale sono da intendersi obbligatori per pavimentazioni appartenenti alle classi 3-4-5 indicate nella Tabella 2.1.

Dovrà essere redatto un verbale di prelievo a cura del Direttore dei Lavori, sul quale dovranno essere registrati i seguenti dati:

- tutte le determinazioni da eseguirsi sulla base del campione prelevato;
- il numero e la dimensione dei provini confezionati;
- il tipo di casseforme utilizzate;
- l'identificazione dei provini;
- l'indicazione delle condizioni di stagionatura.

Il prelievo si considererà in contraddittorio nel caso sia sottoscritto da rappresentanti del Fornitore e dell'Acquirente. Copia del verbale di prelievo, sottoscritto dalle Parti, deve essere consegnata all'altra Parte.

La rispondenza delle caratteristiche di resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato strutturale è determinata secondo le modalità previste dalla UNI 14651.

Il controllo di conformità è soddisfatto se, per ogni prelievo, risultano verificate tutte le condizioni riportate nel seguito:

- 1) $f_{R1m} / f_{Lm} \geq 0.35$;
- 2) $f_{R3m} / f_{Lm} \geq 0.25$;
- 3) $f_{R1m} \geq f_{R1k} \cdot K_A$.

avendo indicato con:

f_{R1m} la resistenza residua media corrispondente ad un'apertura di fessura pari a $CMOD_1$ (UNI EN 14651);

f_{R3m} la resistenza residua media corrispondente ad un'apertura di fessura pari a $CMOD_3$ (UNI EN 14651);

f_{Lm} il valore medio della resistenza di picco rilevata nell'intervallo di apertura di fessura $0 \div 0.05$ mm (UNI EN 14651);

f_{R1k} la resistenza residua caratteristica corrispondente ad un'apertura di fessura pari a $CMOD_1$ (UNI EN 14651), prescritta dal Progettista;

K_A il coefficiente che tiene conto della dispersione dei risultati sperimentali da assumersi pari a 1.20.

Per la valutazione dell'omogeneità delle fibre sono previsti due prelievi (ciascuno di due campioni, uno al versamento di 1/3 ed uno al versamento completo del calcestruzzo dell'autobetoniera) ogni 100 m^3 di getto e comunque ogni giorno in cui è previsto un getto. Il controllo del contenuto di fibre nel calcestruzzo fresco avviene pesando con una bilancia (avente precisione almeno di 1.0 N^{-3}) il quantitativo di fibre presenti all'interno di un volume standard di 10 litri di calcestruzzo allo stato fresco.

La metodologia di prova consiste nel compattare il calcestruzzo fibrorinforzato subito dopo averlo posto nel contenitore, nel dilavare con acqua il volume campione, nel raccogliere le fibre ed infine pesarle solo dopo averle lasciate asciugare. Il contenuto di fibre sarà quindi calcolato come:

$$C = m / V \quad (30)$$

dove:

C : contenuto di fibre (daN/m^3);

m : peso delle fibre (daN);

V : volume del campione (m^3).

In alternativa al controllo del dosaggio di fibre nel calcestruzzo fresco, si può raddoppiare il numero dei campioni da sottoporre alle prove di tenacità.

Le verifiche sulle fibre metalliche devono essere eseguite secondo le prescrizioni della UNI EN 14889-1.

Le verifiche sulle fibre polimeriche devono essere eseguite secondo le prescrizioni della UNI EN 14889-2.

10.1.5 Verifiche e controllo sull'armatura

Le verifiche ed il controllo sull'armatura in acciaio devono essere eseguite, a cura del Direttore dei Lavori, secondo le prescrizioni della Normativa Vigente.

10.1.6 Determinazione delle caratteristiche dei materiali per lo strato di usura

I materiali devono essere sottoposti alle prove previste dalla UNI EN 13813.

10.2 Controlli sulla pavimentazione finita

I controlli sulla pavimentazione finita riguardano la verifica dell'effettivo soddisfacimento dei requisiti di progetto della pavimentazione con riferimento al normale esercizio, alla sicurezza e alla durabilità. Tale verifica comporta una serie di rilievi sulla regolarità geometrica della superficie, i dettagli costruttivi, la qualità dei materiali e la risposta alle sollecitazioni.

Per la maggior parte dei requisiti citati, non è possibile fissare dei criteri generali di accettazione, che andranno invece concordati preventivamente tra il Committente e l'Impresa Appaltatrice, sulla base delle effettive necessità di utilizzo e della fattibilità. Nei paragrafi seguenti vengono illustrate le caratteristiche principali delle pavimentazioni industriali ed i riferimenti normativi utili per una quantificazione di tali variabili.

10.2.1 Regolarità geometrica e finitura della superficie

Il primo passo per il controllo della qualità di una pavimentazione è l'ispezione visiva che permette una prima verifica generale sull'opera e l'individuazione di eventuali criticità che richiedano opportuni approfondimenti mediante rilievi strumentali. Occorre tener presente che eventuali difetti geometrici della superficie possono essere il risultato sia della posa del calcestruzzo fresco che delle successive deformazioni dovute al ritiro (imbarcamento) o all'esercizio della struttura. In genere viene fissato il termine massimo di 72 ore dal getto per le verifiche riguardanti la sola posa del conglomerato.

10.2.1.1 Planarità

Questo requisito riguarda la sicurezza delle persone (inciampo e caduta), il comfort di guida e la sicurezza dei veicoli per la movimentazione delle merci. Il rilievo viene normalmente effettuato mediante un regolo rettilineo e rigido di lunghezza assegnata e dei tasselli di spessore pari alla tolleranza assegnata. Possono essere impiegati metodi alternativi, eventualmente automatizzati, purché di accuratezza non inferiore.

10.2.1.2 Orizzontalità o pendenza

Si tratta di due requisiti alternativi, a seconda che per la pavimentazione siano previste o meno pendenze per il deflusso delle acque. Il controllo può essere effettuato con strumenti topografici mediante triangolazioni chiuse, o con strumenti alternativi la cui precisione risulti non inferiore al 10% della tolleranza concessa.

In assenza di specifiche prescrizioni, la tolleranza in quota della pavimentazione, riferita al suo piano ideale, è riportata nella tabella seguente:

- ≤ 10 m ± 15 mm

- ≤ 25 m ± 20 mm
- ≤ 50 m ± 25 mm
- ≤ 100 m ± 35 mm

10.2.1.3 Resistenza allo scivolamento

Non vi è ancora un diffuso consenso circa la definizione della resistenza allo scivolamento e dei relativi metodi di prova, che risentono in maniera variabile del materiale posto a contatto con la pavimentazione e dell'eventuale bagnatura della superficie. Tra i metodi più diffusi, orientati principalmente verso la sicurezza dei pedoni, possono essere citati quello basato su dispositivi automatizzati (metodo della British Ceramic Research Association indicato nel D.M. 236 del 14 giugno 1989), o con la prova del pendolo (UNI EN 13036 e UNI EN 14231).

10.2.1.4 Spessore

La determinazione dello spessore totale della pavimentazione può essere effettuata mediante rilievo diretto su carote (UNI EN 13863-3). Una tecnica di facile realizzazione è quella di eseguire fori di piccolo diametro e di verificare lo spessore, in casi particolari con un'ispezione endoscopica. Il numero dei sondaggi dovrà essere adeguato alle superfici ispezionate per essere statisticamente significativo e dovrà essere correlato, ove possibile, alla verifica dei DDT del calcestruzzo.

Esistono inoltre altre tecniche di controllo non distruttive (UNI EN 13863-1, ASTM D4748, ASTM 1383) da valutare nel caso di specifiche situazioni.

La norma UNI EN 13877-2 classifica le tolleranze dello spessore delle pavimentazioni come riportato in Tabella 10.1.

Tabella 10.1. Tolleranze per lo spessore delle pavimentazioni.

Categoria di tolleranza	Riduzione massima dello spessore nominale della pavimentazione per ogni singolo prelievo (mm)
T1	< 25
T2	< 20
T3	< 15
T4	< 10
T5	< 5

N.B. La media aritmetica delle misurazioni non dovrà essere inferiore allo spessore di progetto.

In assenza di specifiche progettuali, ogni singola misura rilevata non deve essere inferiore allo spessore di progetto ridotta della quantità indicata in tabella in relazione alla categoria di tolleranza, né superiore a 15 mm rispetto allo spessore di progetto.

10.2.1.5 Fessurazione

La formazione di fessure visibili sulla superficie della pavimentazione è da interpretare in relazione alla loro apertura ed estensione.

La misura dell'apertura può essere effettuata anche mediante semplici fessurimetri o con microscopi dotati di reticolo di riferimento. L'eventuale rilievo della stabilità nel tempo richiede una ripetizione sistematica delle misure, che può essere ottenuta mediante comparatori meccanici di precisione, o trasduttori di spostamento.

10.2.1.6 Rilievo delle armature

Il rilievo delle armature in una pavimentazione indurita mediante prove non distruttive (es. pacometro) non è di facile realizzazione. La verifica mediante l'esecuzione di carote permette di ottenere valori attendibili relativamente al diametro dei ferri e informazioni generali sulla presenza di armature (ad esempio 1 o 2 reti).

Eventuali valutazioni sulla loro esatta posizione all'interno della piastra possono essere effettuate in modo empirico anche se scarsamente attendibile a causa della loro naturale deformazione nella posa e in fase di getto.

10.2.1.7 Verifiche sui giunti

Nella sostanza, gran parte dei controlli sui giunti può essere ricondotta all'ispezione visiva e al rilievo geometrico di queste discontinuità strutturali. Vengono qui richiamati alcuni degli aspetti salienti che possono essere oggetto di indagini diagnostiche più approfondite.

La profondità dei giunti di contrazione può essere verificata per via diretta, mediante calibro o asta graduata, previa pulizia accurata dell'intaglio e prima che ne sia effettuata la sigillatura. Se la misura diretta non fosse praticabile, è possibile ricorrere al carotaggio o al metodo ultrasonico indiretto, sfruttando la diffrazione delle onde elastiche all'apice dell'intaglio. La profondità deve essere tale da garantire la localizzazione delle deformazioni da ritiro. Nel caso di un taglio passante (giunti di isolamento e di deformazione), l'effettiva separazione può essere valutata con semplici righelli oppure osservando l'intensità delle onde elastiche trasmesse (metodo ultrasonico o risposta agli impulsi).

L'apertura del giunto e la sua evoluzione nel tempo sono aspetti importanti per determinare l'effetto sul transito dei carrelli, la durabilità e il tipo più idoneo di sigillatura. Se soggetti all'azione di ruote e in assenza di paraspigoli, l'apertura non dovrebbe superare i 6 mm, per il pericolo di sbrecciamento. Eventuali sigillature rigide permettono deformazioni più modeste e vanno applicate quando buona parte dell'effetto del ritiro è già stato sviluppato (maturazione dell'ordine di un anno) e le temperature sono relativamente più basse. Inizialmente, la necessaria protezione contro l'accumulo di detriti e l'infiltrazione di liquidi viene ottenuta con una sigillatura temporanea con polimeri più deformabili o con profili preformati in materiale espanso. L'evoluzione temporale dell'apertura può essere osservata con le stesse tecniche indicate per il controllo della fessurazione, con la possibilità di individuare eventuali giunti dominanti o dormienti, di verificare la stabilizzazione del ritiro e l'effetto delle variazioni termiche stagionali o legate alle particolari condizioni di esercizio.

L'effettivo posizionamento dei barrotti (o dei sistemi prefabbricati) per il trasferimento delle azioni trasversali può essere verificato con i metodi già discussi per il rilievo delle armature, purché la configurazione non sia troppo complessa ed altri componenti metallici (per esempio i paraspigoli) non interferiscano con i rilievi. L'efficacia meccanica di tali dispositivi può essere verificata mediante le prove di carico discusse in seguito.

10.2.2 Qualità dello strato superficiale

Nel seguito vengono riassunte le principali proprietà che caratterizzano la resistenza e la durevolezza dello strato superficiale della pavimentazione. In presenza di uno strato di usura non strutturale, un utile riferimento di carattere generale è rappresentato dalla norma UNI EN 13813.

10.2.2.1 Resistenza all'usura

I requisiti di resistenza all'usura da verificare sull'opera finita sono di difficile definizione, data la forte dipendenza dal tipo di materiale, dal calcestruzzo e dalle modalità di posa e dalle condizioni

generali e ambientali di realizzazione e stagionatura. Nel caso che contrattualmente sia prevista una verifica in opera è opportuno stabilire preventivamente il metodo di prova e le modalità di valutazione. Per le prove sui singoli materiali possono essere utilizzati in laboratorio il metodo Bohme (UNI EN 13813) e la prova BCA (EN 13892-1 e EN 13892-4).

10.2.2.2 Adesione tra gli strati

La resistenza a trazione dell'interfaccia tra gli strati può essere valutata in opera mediante la prova di strappo su di una porzione della pavimentazione delimitata da un intaglio (UNI EN 13892-8). La trazione viene applicata tramite un piattello metallico di adeguato spessore, incollato con resina (epossidica, metilmetacrilato, poliestere) e azionata mediante un attuatore. L'intaglio può essere realizzato con corona diamantata (diametro = 50 mm), consentendo un controllo accurato della profondità e una maggiore uniformità tensionale, ma producendo sollecitazioni eccessive nel caso di scarsa adesione tra gli strati. In tal caso possono essere praticati intagli rettilinei mediante sega a disco, utilizzando una piastra di trazione quadrata. Un'alternativa è rappresentata dalla prova di trazione diretta eseguita in laboratorio su una carota che comprende gli strati oggetto della prova di adesione (UNI EN 13863-2).

10.2.3 Qualità del calcestruzzo in opera

Al fine di verificare la qualità del calcestruzzo impiegato e della sua messa in opera sarà possibile effettuare, oltre ai controlli di accettazione, di cui al paragrafo 10.2.3, obbligatori in corso d'opera, delle indagini mediante prove distruttive e non-distruttive. Le prime (carotaggi) sono sicuramente le più affidabili e consentono ulteriori valutazioni sullo spessore della pavimentazione, il grado di compattazione (densità, porosità, segregazione, vespai), ecc. Le seconde hanno il pregio della minore invasività e della maggiore economia, ma l'interpretazione dei risultati richiede particolare cautela. L'esito delle indagini con metodi non distruttivi, infatti, è sicuramente valido ai fini della verifica dell'uniformità della pavimentazione e della individuazione di zone con minori prestazioni meccaniche. Sono quindi molto utili per la scelta dei punti più rappresentativi nei quali effettuare i prelievi delle carote. Viceversa, per la stima della resistenza a compressione è necessario calibrare specifiche curve di correlazione sulla base delle prove di compressione, secondo le procedure indicate dalle norme europee (EN 13791:2008) o nelle "Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive" pubblicate dal Ministero dei Lavori Pubblici nel 2008.

10.2.3.1 Prove distruttive

Le modalità di estrazione delle carote, la scelta del diametro (almeno 3 volte la dimensione massima dell'aggregato), la preparazione delle estremità (molatura o lisciatura) e l'esecuzione delle prove meccaniche (compressione, trazione indiretta) sono discusse approfonditamente nella letteratura specifica e in normativa (UNI EN 12504-1, UNI EN 12390-1, UNI EN 12390-3, UNI EN 12390-6). L'esame visivo permette l'identificazione di eventuali barre d'armatura ed una prima classificazione delle macroporosità, anche col supporto di fotografie di riferimento (BS1881-120).

Nella scelta della lunghezza finale L dei campioni rispetto al diametro D è preferibile considerare fin da subito se la valutazione mira a verificare la resistenza cubica ($L/D = 1$) o cilindrica ($L/D = 2$), piuttosto che ricorrere a coefficienti correttivi.

Occorre infine ricordare che la resistenza del calcestruzzo in situ è necessariamente inferiore a quella ottenuta da prelievi effettuati in corso d'opera ai fini del controllo di accettazione. Infatti, nel confezionamento di questi ultimi il conglomerato viene compattato a rifiuto e maturato in camera umida climatizzata, ottenendo risultati rappresentativi della massima resistenza potenziale dell'impasto. Tale differenza giustifica il fatto che, per convalidare una determinata classe di

calcestruzzo, sia sufficiente il raggiungimento di una resistenza inferiore (pari all'85% secondo EN 13791, escludendo l'effetto del disturbo provocato dal carotaggio). Nello stesso riferimento normativo viene anche affrontato il problema della conversione del valore medio sperimentale nella resistenza caratteristica in situ, sulla base di valori noti di deviazione standard relativi al calcestruzzo messo in opera o di un suo calcolo esplicito a seconda della numerosità dei campioni estratti.

10.2.3.2 Prove non distruttive

Le indagini sul calcestruzzo mediante prove non distruttive mirano ad una valutazione indiretta della qualità del conglomerato attraverso la sua risposta a sollecitazioni fisico-meccaniche. L'accessibilità alla pavimentazione dal solo piano di calpestio limita il numero di tecniche utilizzabili e l'informazione ottenuta spesso è rappresentativa solo dello strato più superficiale del manufatto.

Durezza superficiale

Un'indicazione sulla durezza superficiale è fornita dall'indice di rimbalzo misurato con un comune sclerometro per calcestruzzi (UNI EN 12504-2). Il risultato è influenzato da un gran numero di parametri (tipo di aggregato, contenuto di cemento, stagionatura, umidità, carbonatazione, ecc.) e si presta meglio a valutazioni sull'omogeneità del calcestruzzo che non della sua resistenza. In particolare, la lisciatura superficiale con frattazzo meccanico e l'eventuale aggiunta di spolvero o pastina contribuiscono ad aumentare la durezza superficiale e quindi la risposta dello strumento.

Estrazione di inserti (Cut and Pull-Out test)

Si tratta di una prova semi-distruttiva, nella quale uno speciale ancoraggio meccanico sottosquadro viene installato nel manufatto ed estratto mediante un attuatore idraulico ad azionamento manuale (UNI EN 12504-3). La rottura inizia con il distacco di un elemento tronco-conico di calcestruzzo, che viene successivamente schiacciato tra la testa dell'ancoraggio e l'anello di riscontro dell'attuatore. La forza massima di estrazione ha quindi un'ottima correlazione con la resistenza a compressione dello strato coinvolto (25 mm di spessore).

Altro utile metodo d'indagine è la prova di pull-off, dove un disco di alluminio viene incollato sulla superficie della pavimentazione, opportunamente incisa in precedenza, e successivamente sollecitato a trazione mediante un dinamometro, determinando in tal modo la resistenza a trazione diretta del conglomerato e individuando in tal modo anche la presenza di zone deboli nella stratigrafia.

Risposta agli impulsi

È una tecnica basata sulla risposta dinamica della pavimentazione sollecitata con un martello relativamente pesante (massa = 1 kg) dotato di testa in plastica o gomma dura (ASTM C1740). Il martello può essere anche strumentato con una cella di carico dinamica e la vibrazione della superficie della pavimentazione in prossimità del punto di impatto viene rilevata con un sensore di velocità (geofono). Il risultato viene espresso attraverso il diagramma della mobilità, ottenuto normalizzando lo spettro della risposta in velocità rispetto allo spettro della forza di contatto. Il diagramma fornisce indicazioni sulla deformabilità flessionale della piastra, lo spessore, la presenza di fessure, vespai e difetti nel sottofondo.

11 CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLE DIFETTOSITÀ

11.1 Planarità

La planarità di una pavimentazione è requisito fondamentale e pertanto è importante una corretta scelta progettuale iniziale e una successiva realizzazione che rispetti le tolleranze richieste.

La classificazione relativa al grado di planarità è riportata al Paragrafo 2.2.4 e i metodi di misurazione e verifica dovranno essere coerenti con la scelta fatta inizialmente.

In alcuni casi è possibile che i valori delle tolleranze di planarità eccedano i limiti previsti contrattualmente già alla consegna della pavimentazione, oppure che i valori siano entro la tolleranza indicata nelle verifiche iniziali (entro le 72 ore, lontano dagli spiccati in elevazione, dalle caditoie, dalle zone che necessitano in particolare di una lavorazione manuale) ma si possano modificare nel tempo a causa di deformazioni differite delle piastre.

In tal caso, sarà possibile intervenire localmente mediante levigature superficiali o interventi parziali.

L'eventuale correzione della planarità, ottenuta con metodi adeguati a mantenere le altre caratteristiche prestazionali della pavimentazione (resistenze, abrasione, ecc.) comporta sempre un inestetismo più o meno evidente; pertanto, se l'aspetto estetico risulta essere una caratteristica prestazionale determinante della pavimentazione, dovrà essere chiaramente specificata allo scopo di ottimizzare tutti gli accorgimenti utili per ottenere il risultato voluto senza operare successive correzioni.

11.2 Curling

Il curling è un fenomeno intrinseco delle pavimentazioni di calcestruzzo, consistente nell'incurvamento della pavimentazione soprattutto evidente negli spigoli in corrispondenza dei giunti, causato dal maggiore ritiro del calcestruzzo in corrispondenza della superficie a contatto con l'aria. A causa di tale sollevamento, la pavimentazione si può fratturare in prossimità degli spigoli per il passaggio di carichi mobili. Tale fenomeno può essere limitato, ma solitamente non completamente annullato.

Per tale motivo si dovranno adottare tutti gli accorgimenti progettuali ed esecutivi, necessari a limitare tale fenomeno. In particolare, è fortemente sconsigliato realizzare pavimentazioni di calcestruzzo con spessori inferiori a 15 cm. Inoltre, una opportuna scelta delle prestazioni del calcestruzzo, dell'armatura, delle tecniche di maturazione contribuiscono al contenimento del fenomeno del curling.

Per quanto riguarda l'accettazione del fenomeno, le tolleranze devono essere coerenti con i limiti imposti per la planarità e per gli eventuali interventi correttivi vale quanto riportato al paragrafo precedente. Al curling si può porre rimedio concordando preventivamente eventuali rimedi basati sulle caratteristiche del materiale e le modalità di maturazione.

11.3 Cavillature e fessure

11.3.1 Cavillature e/o microfessure

Le cavillature e/o microfessure sono una caratteristica frequente in una pavimentazione industriale in calcestruzzo rifinita con spolvero cementizio in quanto possono dipendere dalle naturali operazioni di finitura e dalle condizioni termo-igrometriche presenti al momento delle lavorazioni e

nei primi periodi di indurimento. Possono essere contenute eliminando l'azione diretta del sole e le correnti d'aria. Una corretta stagionatura diminuisce tale fenomeno.

Normalmente sono estremamente piccole, tanto da essere spesso individuate solo dopo una preventiva leggera bagnatura della pavimentazione.

Le cavillature e/o microfessure a ragnatela non possono essere considerate un difetto, soprattutto se interessano alcune parti limitate della superficie, salvo che tale fenomeno sia accompagnato da distacchi parziali dello strato di finitura. Se tali possibili microcavillature non risultano accettabili per l'uso previsto, si dovrà prevedere un trattamento superficiale di riporto (ad esempio una verniciatura, ecc.).

11.3.2 Fessure

Le fessure si differenziano dalle microfessure per la forma, ampiezza e distribuzione sulla superficie della pavimentazione. Le fessure sono spesso evidenti ad occhio nudo, con un'ampiezza da qualche centinaio di micron fino a qualche millimetro. Normalmente presentano un andamento lineare irregolare o possono suddividere un riquadro di calcestruzzo in due o più zone distinte. A volte possono presentare uno scalino tra i due lembi.

Le cause della fessurazione sono molteplici, ad esempio il ritiro del calcestruzzo, la presenza di pilastri, spigoli, vertici, spiccati in elevazione in genere, carichi eccessivi sulla pavimentazione rispetto alle previsioni progettuali, rotture dei bordi delle lastre di calcestruzzo imbarcate a causa del fenomeno del curling, assestamenti differiti nel tempo del supporto.

La presenza di eventuali fessure può essere classificata come difetto lieve, medio o grave in relazione soprattutto alla loro estensione e alla loro ampiezza, o anche rispetto alla specifica destinazione d'uso della pavimentazione.

Al fine di garantire la funzionalità della pavimentazione, fessure sottili, con ampiezza inferiore a 0,3 mm, possono essere considerate accettabili, mentre fessure più ampie potranno essere oggetto di verifica puntuale con un semplice controllo del loro andamento e del loro deterioramento nel tempo e di puntuale manutenzione nel caso si verifichi una progressione del degrado dei cigli della fessura.

Particolari esigenze estetiche devono essere specificate dal Committente in fase di progetto.

Salvo specifiche richieste del Committente, per i pavimenti Tipo L3, L4 e L5 (vedi Tabella 2.1) si considera accettabile la presenza di circa 10 m di fessura con ampiezza maggiore di 0.3 mm ogni 1000 m² di pavimentazione (equivalente a 1 cm/m² di fessura ammessa), valutata entro il primo anno dalla realizzazione. In ogni caso è suggerito un intervento di ripristino locale.

In tal caso si dovrà provvedere a un intervento di sigillatura con sistemi resinosi adeguati, o prodotti specifici per l'intervento. Nel caso di fessure ancora attive si dovranno utilizzare dei sistemi flessibili o elastici.

La presenza di spiccati in elevazione sono un potenziale pericolo per l'innescare delle fessurazioni. Per tale motivo in corrispondenza di tali particolari, dovranno essere prescritti tutti gli accorgimenti necessari per contrastare tale fenomeno.

Le fessure che si creano tra la fine taglio e gli spiccati in elevazione, causate dalla necessaria distanza di sicurezza delle attrezzature di taglio, non sono da considerarsi difetto.

11.4 Delaminazione

La delaminazione è un fenomeno particolare che può interessare una pavimentazione in calcestruzzo che consiste nel distacco localizzato della parte corticale della piastra di porzioni, tali da interessare spessori variabili da pochi millimetri a 1-2 cm e oltre.

Il fenomeno può essere suddiviso in due distinte modalità: delaminazione adesiva, con il distacco netto della parte di finitura riportata nelle operazioni terminali della lavorazione del calcestruzzo; delaminazione coesiva, con il distacco all'interno della matrice di calcestruzzo, nella sua parte superficiale, con spessori variabili fino a qualche centimetro.

Fenomeni di delaminazione localizzata possono essere accettati purché si proceda al ripristino delle condizioni originali.

La delaminazione coesiva può essere ripristinata mediante la rimozione della parte ammalorata e il suo ripristino con sistemi resinosi o cementizi modificati, ricostruendo i volumi originari. Tale intervento deve essere valutato sotto il profilo tecnico e della sua durabilità, mentre rimarrà una differenza estetica tra le zone ripristinate e il resto della pavimentazione. Nel caso l'aspetto estetico dovesse assumere un'importanza particolare, questa dovrà essere espressamente prescritta in fase progettuale.

Nel caso di delaminazione adesiva che interessi alcune limitate zone della pavimentazione, si dovrà procedere alla scarifica della zona interessata fino al raggiungimento della parte sana del calcestruzzo e procedere in seguito al ripristino mediante sistemi resinosi o cementizi adeguati.

Se i riquadri interessati dal fenomeno della delaminazione riguardano zone estese, o il recupero superficiale risulta essere difficile o incerto nel suo risultato tecnico, si può valutare la demolizione totale della zona interessata.

11.5 Differenze cromatiche

A causa delle naturali differenze cromatiche dei vari materiali utilizzati, delle variabili nelle lavorazioni e delle condizioni ambientali durante la posa, l'aspetto superficiale della pavimentazione potrà presentare differenze cromatiche e colorazioni non uniformi. La colorazione iniziale inoltre tende a variare nel tempo con l'evoluzione del processo di idratazione. Le differenze cromatiche, all'interno di una scala di grigi o crema, possono dunque essere considerate accettabili, purché siano limitate alle caratteristiche dei materiali e non conseguenze di vizi di costruzione (per esempio macchie di umidità di risalita). A tale scopo, anche la scelta del metodo di maturazione deve essere fatto in funzione del livello di omogeneità cromatica richiesto.

L'omogeneità e la persistenza della colorazione iniziale desiderata potrà essere ottenuta solo mediante successivo trattamento verniciante o in spessore.

Tale requisito, se ritenuto importante, dovrà quindi essere chiaramente specificato nelle prescrizioni progettuali.

12 PIANO DI USO E MANUTENZIONE

12.1 Introduzione

Anche per le pavimentazioni di calcestruzzo deve essere predisposto un “Piano di uso e manutenzione”, allo scopo di garantire la durabilità e la funzionalità nell’arco della vita nominale della pavimentazione.

12.2 Osservazioni sulla durata delle pavimentazioni

La vita nominale della pavimentazione di calcestruzzo e della massicciata, da adottare in fase progettuale, è non inferiore a 50 anni, ma per quanto riguarda gli elementi della pavimentazione: giunti di costruzione, strato di usura, sigillature dei giunti, la vita di servizio è ovviamente minore e dipenderà dai prodotti utilizzati, dalla tipologia di traffico, dall’uso e dalle condizioni ambientali a cui è soggetta la pavimentazione.

Il “Piano di uso e manutenzione” dovrà comprendere la manutenzione dei giunti, in particolare di costruzione e di contrazione, dello strato di usura, dei particolari esecutivi soggetti a maggior sollecitazione (individuati dal Progettista).

Nel caso venga cambiato l’uso e/o la destinazione, oppure nel caso vengano modificati alcuni parametri della sollecitazione, posto che la pavimentazione dovrà essere soggetta a nuove verifiche, dovrà anche essere ridefinito il “piano d’uso e manutenzione”.

Si riportano nel seguito alcune indicazioni per un corretto uso della pavimentazione:

Ruote dei carrelli: Le ruote dei carrelli sollecitano particolarmente la pavimentazione soprattutto ad abrasione, a trazione e a taglio. Devono essere pertanto verificate e, se deteriorate, dovranno essere sostituite.

Carico dei carrelli: Il carico dei carrelli non deve superare quello massimo previsto dal fabbricante. Vanno evitati i disallineamenti del carico o la movimentazione dello stesso con altezze eccessive.

Prodotti per la pulizia: Devono essere utilizzati prodotti neutri o leggermente basici, con mezzi adeguati e cicli opportuni (lavaggio, risciacquo).

Rimozione di liquidi: Alcuni prodotti presenti sulla pavimentazione possono presentare una azione aggressiva nei confronti dello strato di finitura e pertanto devono essere rimossi il prima possibile.

Agenti disgelanti: L’impiego di agenti disgelanti produce azioni aggressive nei confronti delle pavimentazioni che possono portare a fenomeni di rottura e distacco dello strato finale della stessa. Pertanto l’uso di agenti disgelanti dovrà essere evitato con opportuni accorgimenti progettuali o limitato a interventi eccezionali di particolare gravità.

Gelo/disgelo: Al fine di limitare i cicli di gelo/disgelo si dovranno evitare i cumuli di neve o la permanenza di ristagni d’acqua.

12.3 Tipologia di manutenzione delle pavimentazioni

La “Manutenzione ordinaria”, da eseguire durante la vita nominale della pavimentazione, sarà prescritta dal Progettista in concerto con il Committente e si suddivide in:

- pulitura;
- ripristino puntuale della sigillatura dei giunti;
- ripristino localizzato dell’eventuale trattamento superficiale e dello strato di finitura;

- ripristino puntuale del giunto di costruzione, di espansione e di contrazione in presenza di patologie di degrado evidenti;
- controllo e verifica dello stato fessurativo e della sua evoluzione, in presenza di patologie di degrado particolarmente pronunciate;
- verifica delle patologie di degrado funzioni delle deformazioni spontanee della piastra.

Uno dei particolari più sollecitati, durante la vita di servizio, è il giunto di costruzione (e/o dilatazione). A sostegno delle valutazioni del progettista nella scelta di questo particolare esecutivo, in Tabella 12.1 si riporta un'ipotesi di durata indicativa dei giunti in funzione del tipo di giunto e del tipo di ruota dei mezzi di trasporto delle merci. Il tutto in relazione al tipo di giunto utilizzato ed a una tipologia di sollecitazione come la rigidità delle ruote.

Tabella 12.1. Durata indicativa dei giunti di costruzione.

Tipologia di giunto di costruzione	<i>RUOTE MORBIDE</i>	<i>RUOTE DURE</i>
	<i>durata</i>	<i>durata</i>
Rifiniti con taglio meccanico	limitata	scarsa
Sigillatura con sigillante	limitata	scarsa
Giunti a travetto di resina	molto buona	buona
Giunti metallici preformati semplici	buona	mediocre
Giunti metallici preformati rinforzati	eccellente	molto buona

La Tabella 12.1 è da intendersi puramente indicativa al solo scopo di porre l'attenzione del Progettista a questo importante particolare esecutivo affinché, sulla base delle specifiche condizioni, possa trovare la tipologia più appropriata tra quelle offerte dal mercato. Questo perché la durata nel tempo di un giunto dipende da svariati fattori tra i quali certamente le sollecitazioni e la loro frequenza, ma anche dall'ampiezza dell'apertura del giunto stesso, dall'ambiente (esterno, interno), dalla deformazione lineare della piastra e dall'imbarco derivante dalla escursione termica ed igrometrica, dalla natura e dalle dimensioni delle ruote.

La sigillatura con sigillanti elastici non migliora le prestazioni meccaniche del giunto.

La corretta manutenzione dei giunti permette di ottenere una adeguata funzionalità nel tempo se accompagnate da una corretta manutenzione.

12.4 Programma di manutenzione

Il soggetto responsabile della manutenzione è il Committente.

Il programma di manutenzione si basa su una serie di sopralluoghi che verranno effettuati con la seguente cronologia:

- Dopo 6 mesi o 1 anno dall'entrata in esercizio della pavimentazione, in funzione della sollecitazione prevista;
- I successivi sopralluoghi avranno una cadenza temporale stabilita dal Progettista in funzione delle sollecitazioni previste (1- 3 anni).

Al primo sopralluogo è opportuno che siano presenti:

- Il Committente;
- Un tecnico dell'impresa esecutrice dei lavori;

- Il Direttore Lavori che dovrà redigere il “verbale di sopralluogo”.

I successivi sopralluoghi saranno organizzati dal Committente o dal Concessionario con il supporto di un tecnico del settore, a seguito dei quali verrà redatta una “Relazione tecnica riassuntiva sullo stato della pavimentazione e degli eventuali interventi da effettuare”, da conservare ed allegare al “Piano di manutenzione dell’opera.”

In occasione del sopralluogo dovranno essere esaminati:

- Lo stato dei giunti di costruzione e/o dilatazione, isolamento e contrazione;
- Lo stato della pavimentazione in corrispondenza dei punti di contatto con le canaline di raccolta dell’acqua, pozzetti di vario genere, intersezione con strutture esistenti e strutture perimetrali;
- Lo stato dei giunti di controllo e del riempitivo temporaneo e/o sigillatura;
- Lo stato dello strato di finitura;
- Lo stato fessurativo della pavimentazione;
- Lo stato dell’eventuale trattamento protettivo con eventuali patologie di degrado dello stesso o degli strati presenti inferiormente;
- Patologie di degrado riconducibili alle deformazioni della piastra.

13 RUOLI DEGLI ATTORI NELLA PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELLA PAVIMENTAZIONE

Nel caso di opere rilevanti, sia dal punto di vista del valore economico che delle possibili conseguenze (anche di sicurezza in taluni casi), l'iter di progettazione, realizzazione e controllo dell'opera dovrà essere sviluppato con particolare cura ed, in tale caso, il ruolo e le responsabilità dei diversi attori sono qui definiti, nel rispetto della legislazione vigente, in analogia a quanto previsto in altre procedure realizzative.

13.1 Progettista

Il Progettista ha la responsabilità diretta della progettazione della pavimentazione ed ha il compito di dimensionare e verificare la pavimentazione agli Stati Limite di Esercizio e Ultimi.

Il Progettista dovrà produrre le specifiche di capitolato, gli elaborati grafici di progetto nei quali dovrà essere riportato lo spessore, la posizione dei giunti di costruzione, di dilatazione e di contrazione, i dettagli costruttivi e quanto altro occorre per definire l'opera e per consentire la sua corretta esecuzione.

Il Progettista dovrà produrre anche una relazione di calcolo dalla quale risultino, in modo chiaro ed esauriente, i calcoli eseguiti, le caratteristiche, le qualità dei materiali che verranno impiegati in aggiunta alla vita utile della pavimentazione.

13.2 Direttore dei Lavori

Il Direttore dei Lavori ha la responsabilità dell'osservanza delle prescrizioni di esecuzione del progetto e del controllo di qualità dei materiali impiegati, anche durante le eventuali fasi di prequalifica, ed ha il compito di verificare la rispondenza dell'opera al progetto.

Nei cantieri, dal giorno di inizio a quello di ultimazione dei lavori, devono essere conservati gli elaborati di progetto, datati e firmati anche dall'impresa esecutrice e dal direttore dei lavori, nonché un apposito giornale dei lavori. Della conservazione e regolare tenuta di tali documenti è responsabile il Direttore dei Lavori, che è anche tenuto a visitare periodicamente, ed in particolare nelle fasi più importanti dell'esecuzione, il giornale dei lavori.

13.3 Produttore del calcestruzzo

Il Produttore ha il compito di garantire le caratteristiche e le specifiche richieste in fase di contratto e presenti nel progetto e dalla marcatura CE, ove prevista.

13.4 Impresa Appaltatrice

L'Impresa Appaltatrice ha il compito di realizzare l'opera in modo conforme alle specifiche ed alle prescrizioni del Progettista. Ha inoltre la responsabilità della corretta preparazione e gestione del cantiere, dell'osservanza delle prescrizioni di esecuzione del progetto, della scelta dei materiali impiegati, della sussistenza delle regolari condizioni per l'esecuzione, della posa in opera e della maturazione.

13.5 Certificatore

A titolo volontario, il Committente può richiedere che la realizzazione dell'opera sia soggetta ad una procedura di certificazione, da svolgersi nel rispetto di quanto previsto dalla norma EN 13670.

Detta procedura è raccomandata per i pavimentazioni con superficie superiore a 5.000 m² e in classe 4-5.

La scelta dell'Ente certificatore spetta al Committente che preciserà altresì i termini di tempo entro i quali dovranno essere completate le operazioni di certificazione.

Il Certificatore, un tecnico che non abbia avuto alcun ruolo nel processo progettuale e costruttivo, dovrà controllare:

- La regolarità della documentazione tecnica-amministrativa;
- La regolarità del progetto della pavimentazione;
- La corretta esecuzione dei lavori.

APPENDICE A: ESEMPIO DI PAVIMENTAZIONE IN CALCESTRUZZO ARMATO: INDAGINE PRELIMINARE, VERIFICHE E SPECIFICHE DI PROGETTO

L'esempio riportato nel seguito si riferisce al caso di una pavimentazione in calcestruzzo, il cui studio e dimensionamento è stato svolto attraverso una semplice analisi lineare basata sulla teoria classica di Westergaard. In particolare, l'esempio si focalizza sull'insieme degli aspetti progettuali indicati nelle classificazioni per la destinazione d'uso, con particolare riferimento alla resistenza all'abrasione, al grado di planarità, al dimensionamento dei giunti, alle prescrizioni per l'esecuzione, ecc.

A.1 Indagine preliminare

La prima indagine da effettuare riguarda la ricerca di tutte le informazioni possibili da reperire presso il committente e a livello normativo per inquadrare il livello prestazionale complessivo della pavimentazione rispetto al suo futuro utilizzo.

Tutte le informazioni reperite dovranno corrispondere a specifiche descrizioni progettuali in relazione alle sollecitazioni previste, di carattere meccanico, fisico, chimico, di fatica, ecc.

Esempio di informazioni da raccogliere nell'indagine preliminare

Specifiche generali

Informazioni sull'attività
Superfici
Ubicazione (interno/esterno)
Maglia strutturale
Requisiti antisismici
Layout impianti e organizzazione
Planarità
Pendenze
Azioni aggressive, urti, abrasione, ecc.
Intensità di traffico
Aggressioni chimiche
Temperature di esercizio

Caratteristiche sottofondo

Natura, stratigrafia, caratteristiche geomeccaniche (con determinazione, ad esempio, di rigidezza "k" o modulo elastico "E"),

Sollecitazioni statiche

Azioni uniformemente distribuite
Azioni linearmente distribuite
Azioni concentrate
Scaffalature: portata su piedino di appoggio, interasse delle corsie, altezza di carico, ecc.
Muri appoggiati sulla pavimentazione (senza fondazione)

Sollecitazioni dinamiche

Carrelli elevatori: modello, specifiche, portata, interasse, tipo di ruote, ecc.

Automezzi: tipo, portata, pressione di gonfiaggio, ecc.

Macchine operatrici: funzione, masse eccentriche, frequenza di funzionamento, ecc.

A.2 Dati di base

Ipotizziamo che dalla indagine preliminare emergano (vedi §5.2.2, azioni dirette) le seguenti sollecitazioni:

- presenza di bancali sovrapposti appoggiati alla pavimentazione per un carico totale di 20 kN/m²;
- scaffalature metalliche con piedini di appoggio di 100×100 mm, con un carico applicato di 40 kN su ogni piedino generico (tra due scaffali adiacenti) e di 20 kN sul piedino esterno scaffale di estremità piedino vicino al bordo o allo spigolo della pavimentazione. La larghezza corsia è pari a 1800 mm mentre le scaffalature hanno altezza di 6.5 m;
- carrello elevatore con pneumatici (pressione 10 atm) con carico su una ruota di 25 kN.

Per il tipo di lavorazioni ipotizzate si richiede una resistenza all'abrasione della pavimentazione adeguata ad un medio impiego di transpallet manuali con ruote in Vulkollan per la normale movimentazione giornaliera di parte delle merci. I giunti dovranno conseguentemente presentare una sufficiente resistenza al passaggio di ruote dure e di piccole dimensioni.

Classificazione per destinazione d'uso (§2.2.2)

La pavimentazione industriale riportata in esempio è classificabile tra i “Magazzini e industria con uso continuo di carrelli elevatori” e, pertanto, di classe **L3**.

A.3 Procedimento operativo

Individuati i dati di progetto dalla indagine preliminare, si procede al calcolo del raggio equivalente dell'area di contatto (paragrafo 5.3.1) e del raggio di rigidità relativa che dipende dal tipo di carico e dall'impronta (area di contatto piedino/pavimentazione, tipo di carrello elevatore e natura delle ruote, pressione di gonfiaggio, assi, ecc.).

Per il calcestruzzo si stabilisce una resistenza di progetto C30/37.

Le condizioni di carico considerate prevedono il posizionamento del carico nella zona centrale, lungo il bordo e sull'angolo della piastra (Westergaard).

Per il modulo di reazione della massicciata si assume il valore $k= 0.08 \text{ N/mm}^3$.

Si ipotizza uno spessore h della pavimentazione di 250 mm.

A.3.1 Resistenza di progetto a trazione nel calcestruzzo

In base alla classe di resistenza e al fattore di sicurezza si individua il valore di progetto della resistenza a trazione per flessione (f_{ctd}) utilizzando l'Eurocodice 2:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{2.43}{1.5} = 1.62 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A1})$$

A.3.2 Verifica della pavimentazione a punzonamento

La verifica in oggetto può essere svolta in accordo con quanto indicato dall'Eurocodice 2 [Par. 6.4] per quanto concerne la verifica a punzonamento delle piastre sottili, trascurando a favore di sicurezza il contributo della massicciata che, come noto, assume valori significativi solo per elevati spostamenti della porzione di piastra punzonata.

Nella pavimentazione considerata, il maggior rischio di punzonamento si verifica in corrispondenza dei supporti delle scaffalature ($100 \times 100 \text{ mm}^2$) soggetti ad un carico massimo in esercizio di 40 kN.

Il procedimento per la verifica a punzonamento si basa sul calcolo delle sollecitazioni agenti lungo il perimetro di controllo u_1 e lungo il perimetro della superficie caricata; in particolare è necessario verificare che:

- lungo il perimetro dell'area caricata la massima tensione di taglio-punzonamento non sia superata:

$$v_{Ed} < v_{Rd,max};$$

- l'armatura per il taglio-punzonamento non è necessaria se:

$$v_{Ed} < v_{Rd,c}$$

dove v_{Ed} è lo sforzo di taglio sollecitante di progetto mentre v_{Rd} è la resistenza di progetto a punzonamento.

Se si trascura cautelativamente il contributo dell'armatura longitudinale, la resistenza di progetto a punzonamento può essere calcolata con la seguente formula:

$$v_{Rd,c} = v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0.53 \text{ MPa} \quad (\text{A2})$$

dove:

$$k = 1 + \sqrt{200/d} = 1.89 < 2;$$

$d = h = 250 \text{ mm}$ = spessore pavimentazione;

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}.$$

La resistenza di progetto massima può essere stimata attraverso la seguente formula:

$$v_{Rd,max} = 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} = 5.28 \text{ MPa} \quad (\text{A3})$$

dove:

$$v = 0.6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0.528;$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 20 \text{ MPa}.$$

La verifica deve essere svolta considerando le posizioni più critiche del carico applicato alla pavimentazione, coerentemente con quanto suggerito dall'Eurocodice 2 (Par. 6.4.2 – Figura 6.15). Nel presente esempio si suppone che la condizione più critica si realizzi quanto il piedino dello scaffale è posto in prossimità di uno spigolo (di un campo delimitato da giunti di costruzione) della pavimentazione, ad una distanza di 200 mm dai due lati della piastra che convergono nello spigolo stesso.

In tal caso, lo sforzo sollecitante di progetto valutato lungo il perimetro di controllo u_1 è pari a:

$$v_{Ed} = \frac{V_{sd}}{u_1 \cdot d} = 0.173 \text{ MPa} < v_{Rd,c} \quad (\text{A4})$$

dove:

V_{sd} = carico sollecitante di progetto = $1.5 \times 20 \text{ kN} = 30 \text{ kN}$ (per il carico dello scaffale sullo spigolo);

$u_1 = 2 \times 200 + 2 \times 100 + 250 \pi = 1385 \text{ mm}$ (vedi Figura A.1.).

Lungo il perimetro dell'area caricata, la massima tensione tangenziale è invece data dalla seguente formula:

$$v_{Ed} = \frac{V_{sd}}{4 \cdot 100 \cdot d} = 0.6 \text{ MPa} < v_{Rd,max} \quad (\text{A5})$$

Entrambe le precedenti verifiche risultano essere soddisfatte e, di conseguenza, nella piastra considerata non sussiste rischio di punzonamento.

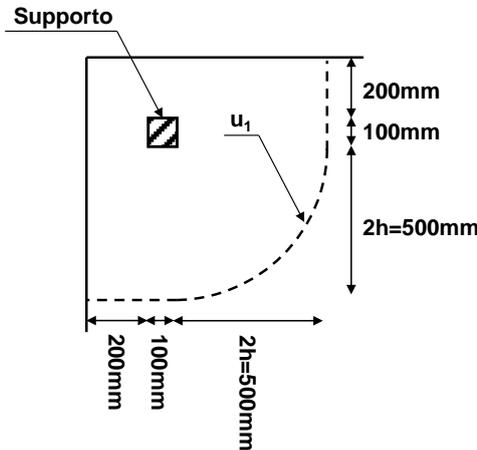


Figura A.1. Schematizzazione del perimetro di controllo u_1 considerato nella verifica a punzonamento.

A.3.3 Sollecitazioni nella pavimentazione per flessione e combinazione delle azioni

Applicando la teoria di Westergaard, è possibile calcolare innanzitutto il raggio di rigidità relativa (l), applicando l'Eq. (17):

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} = \sqrt[4]{\frac{30836 \times 250^3}{12 \times (1-0.2^2) \times 0.08}} = 850 \text{ mm} \quad (\text{A6})$$

e raggio d'impronta fittizio (b), il cui valore è calcolabile mediante l'Eq. (18).

Per il piede dello scaffale,

$$b = \sqrt{1.6 \times r_r^2 + h^2} - 0.675 \times h = \sqrt{1.6 \times 56.57^2 + 250^2} - 0.675 \times 250 = 91 \text{ mm} \quad \text{per } r_r/h < 1.724$$

dove r_r rappresenta il raggio dell'area circolare di impronta di carico, pari a 56.57 mm.

Per la ruota del carrello,

$$b = \sqrt{1.6 \times r_r^2 + h^2} - 0.675 \times h = \sqrt{1.6 \times 108.57^2 + 250^2} - 0.675 \times 250 = 116 \text{ mm} \quad \text{per } r_r/h < 1.724$$

dove r_r rappresenta il raggio dell'area circolare di impronta di carico, pari a 108.57 mm.

Si procede quindi al calcolo delle tensioni massime di trazione nei tre casi indicati:

- per azione concentrata con carico P trasmesso dallo scaffale (già incrementato per il coefficiente parziale dei carichi, $\gamma_Q=1,5$) al centro (vedi Eq. (14)):

$$\sigma_0 = 1.264 \frac{P}{h^2} \left(\log \frac{l}{b} + 0.267 \right) = 1.264 \frac{60000}{62500} \left(\log \frac{850}{91} + 0.267 \right) = 1.50 \text{ MPa} < 1.62 \text{ MPa} \quad (\text{A7})$$

- per azione concentrata con carico P trasmesso dallo scaffale (già incrementato per il coefficiente parziale dei carichi, $\gamma_Q=1,5$) sul bordo della pavimentazione (vedi Eq. (15)), più sfavorevole rispetto al carico trasmesso dalla ruota del carrello:

$$\sigma_l = 2.288 \frac{P}{h^2} \left(\log \frac{l}{b} + 0.090 \right) = 2.288 \frac{30000}{62500} \left(\log \frac{850}{91} + 0.090 \right) = 1.16 \text{ MPa} < 1.62 \text{ MPa} \quad (\text{A8})$$

- per azione concentrata con carico P trasmesso dallo scaffale (già incrementato per il coefficiente parziale dei carichi, $\gamma_Q=1,5$) sul bordo (vedi Eq. (16)):

$$\sigma_a = 3 \frac{P}{h^2} \left(1 - 1.23 \left(\frac{r_r}{l} \right)^{0.6} \right) = 3 \frac{30000}{62500} \left(1 - 1.23 \left(\frac{56,57}{850} \right)^{0.6} \right) = 1.10 \text{ MPa} < 1.62 \text{ MPa} \quad (\text{A9})$$

dove:

h = spessore della piastra (250 mm);

k = costante di Winkler (0.08 N/mm^3);

E = modulo elastico del calcestruzzo (30.836 N/mm^2);

ν = coefficiente di Poisson del calcestruzzo non fessurato (0.2);

P = carico applicato (40 kN).

Si sottolinea che il metodo di Westergaard fornisce, nel caso di applicazione di un'unica forza, il valore della massima tensione in corrispondenza del punto di applicazione della suddetta. In presenza di più forze applicate, lo stato tensionale deve essere determinato con differenti formule. La formula utilizzata è comunque utilizzabile per un dimensionamento di massima della pavimentazione.

Nel caso specifico, ove si è ipotizzato l'impiego di un calcestruzzo con classe di resistenza C30/37, con un sottofondo avente costante $k = 0.08 \text{ N/mm}^3$, tutte le verifiche sono soddisfatte con uno spessore della pavimentazione di 250 mm.

Stabilito lo spessore della piastra in calcestruzzo, si determinano le altre caratteristiche prestazionali della pavimentazione, in relazione alla sua classificazione.

Classificazione in base alla resistenza all'abrasione (§2.2.3)

La movimentazione di parte delle merci con transpallet dotati di ruote in Vulkollan, e peso totale inferiore a 10 kN classifica la pavimentazione in base alla resistenza all'abrasione in **A2**.

La tipologia di lavorazione e posa in opera della pavimentazione è compatibile con una quantità media di spolvero indurente e pertanto si prescrive una quantità di materiale applicato di 3–5 daN/m².

Classificazione in base al grado di planarità (§2.2.4)

In relazione alla presenza di scaffalature e della altezza di carico prevista, la classificazione in base al grado di planarità, secondo UNI EN 15620:2009, è **FM3**.

La classificazione per le superfici libere, con movimentazione random dei mezzi, secondo la Tabella 2.4 (in accordo alle norme DIN 18202) è **P3**.

Nell'area vincolata dalle corsie di marcia tra le scaffalature, considerando che la corsia indicata dal layout ha una larghezza di 1800 mm, il limite della tolleranza del dislivello tra le due ruote esterne del carrello (Tabella 2.5) è di 2.5 mm.

Viene scelta in progetto la tolleranza più restrittiva tra le normative esistenti e pertanto si stabilisce la classe indicata in Tabella 2.5: 2.5 mm per la larghezza della corsia compresa tra 1.5 e 2.0 m nella zona scaffali e corsie, la classe **P3** per tutte le altre zone con movimentazione libera.

Ulteriori requisiti progettuali

La pavimentazione in calcestruzzo deve presentare una superficie con bassa emissione di polvere e pertanto, ad avvenuto indurimento, la superficie finale dovrà essere trattata con un prodotto indurente antipolvere.

A.4 Progetto del calcestruzzo

La resistenza caratteristica del calcestruzzo e gli altri parametri prestazionali devono essere scelti, oltre che in funzione della resistenza meccanica, anche in funzione della classe di esposizione ambientale (UNI EN206-1) e degli altri parametri fondamentali per la sua messa in opera (lavorabilità, diametro massimo dell'aggregato, ecc.).

Nell'esempio specifico non sono previste particolari difficoltà nella fornitura e nella posa del calcestruzzo in quanto le operazioni di getto potranno essere effettuate direttamente a piè d'opera mediante canale, senza l'ausilio di pompa.

Quindi oltre alla classe di resistenza C25/30 richiesta dal calcolo si indicano:

- La classe di spandimento che, in relazione alle modalità di posa, viene stabilita in 140 ± 20 mm nel caso di posa con macchina laser-screed, oppure 220 ± 20 mm (oppure classe di spandimento F5 o F6) nel caso di posa manuale.
- Trattandosi di pavimentazione interna e quindi in ambiente asciutto, la classe di esposizione ambientale richiesta è XC1 (UNI EN 206);
- Diametro massimo nominale dell'aggregato di 32 mm.
- Il ritiro igrometrico massimo del calcestruzzo non deve essere superiore a 500 micron/metro, secondo norma UNI 11307.
- Il contenuto di aria intrappolata non deve essere superiore al 2.5%, misurata in base alla norma UNI EN 12350-7 sul calcestruzzo fresco.
- Il valore di acqua di bleeding, misurato secondo la procedura riportata nella norma UNI 7122, deve essere inferiore a $0.5 \text{ l/m}^2/\text{h}$.
- Il rapporto acqua/cemento non deve essere superiore a 0.65 (UNI –EN 206);
- Classe di contenuto di cloruri del calcestruzzo: Cl 0.4;

Si noti che, in presenza di difformità nei valori limite delle singole prescrizioni, si assume il valore più performante.

Il calcestruzzo deve essere a prestazione garantita in conformità alla UNI EN 206-1.

A.5 Progetto dei giunti

Definito lo spessore h della pavimentazione, per una corretta progettazione occorre anche individuare tipo e posizione dei giunti, che nelle pavimentazioni non armate possono essere:

Giunti di isolamento

La pavimentazione deve essere completamente desolidarizzata da elementi fissi e/o singolari (muri, pilastri, travi di fondazione, pozzetti ecc.) allo scopo di evitare o limitare l'innesco di fessure dovute alla impedita deformabilità della pavimentazione in prossimità di tali elementi.

I giunti interesseranno tutto lo spessore della pavimentazione e devono essere realizzati posando una striscia continua di materiale deformabile lungo lo sviluppo dell'elemento da isolare, di spessore non inferiore a:

- 5 mm lungo il perimetro, in corrispondenza dei muri;
- 10 mm in corrispondenza dei pilastri.

Giunti di costruzione

Nell'esempio si ipotizza che maglia dei pilastri sia 14×14 metri, che delimitano quindi riquadri di circa 200 m^2 . Si stabilisce pertanto di realizzare campiture giornaliere di getto corrispondenti a 800 m^2 , realizzando i giunti di costruzione in corrispondenza dei pilastri presenti.

Il giunto di costruzione deve essere realizzato a tutto spessore, predisponendo apposite cassetture che delimitano le campiture di getto mediante un rinforzo metallico preformato a cassero a perdere, completo di elementi per la trasmissione degli sforzi di taglio e flessione, con interasse 330 mm, secondo i particolari esecutivi di progetto e approvato dalla D.L.

Giunti di dilatazione

Trattandosi di pavimentazione posta all'interno, di dimensioni contenute e con rapporto larghezza – lunghezza abbastanza regolare non sono previsti giunti di dilatazione.

Giunti di contrazione o controllo

La dimensione della maglia dei tagli è prescelta pari a circa $4.70 \text{ m} \times 4.70 \text{ m}$, in coerenza alla maglia dei pilastri. In corrispondenza del taglio il giunto deve essere armato con una striscia di rete elettrosaldata posta immediatamente sotto la zona di taglio.

Per la realizzazione dei giunti di contrazione/controllo, il taglio viene eseguito mediante sega a disco diamantato entro alcune ore dal termine delle operazioni di spolvero. Per quanto riguarda i tempi, il taglio va attuato indicativamente entro 18 - 24 ore se la temperatura dell'ambiente è di circa $15\text{-}20^\circ\text{C}$, entro 12 ore nel periodo caldo, entro massimo 48 ore nel periodo invernale.

La profondità dei tagli dovrà risultare pari a $\frac{1}{4}$ dello spessore della pavimentazione e gli stessi dovranno essere realizzati a formare campiture quadrate come indicato dal progettista.

Il taglio, per la realizzazione dei giunti di contrazione/controllo, sarà sempre interrotto a distanze di circa $15/20 \text{ cm}$ dagli elementi laterali, pozzetti, pilastri ed altri elementi emergenti per evitare che la lama circolare diamantata, tagli anche gli elementi stessi.

Riempimenti e/o sigillatura dei giunti

Il giunto sarà soggetto a riempimento temporaneo con profilo in preformato in PVC. Ad avvenuto indurimento del calcestruzzo e del suo massimo ritiro possibile con i tempi di consegna, si provvederà alla rimozione dei profili in PVC, sigillando successivamente gli stessi con sigillanti elastomerici a medio modulo elastico a base di resine poliuretaniche, opportunamente dimensionati.

A.6 Prescrizioni di capitolato per la realizzazione della pavimentazione

Verifica della massiciata

Prima dell'inizio di tutte le operazioni di realizzazione della pavimentazione è necessario:

- verificare la planarità con tolleranze ± 1 cm rispetto al valore prescritto pari a 2 cm su una stadia di 4 metri;
- eseguire un controllo generale per determinare eventuali zone difformi dal livello minimo previsto per la pavimentazione;
- verificare l'assenza di avvallamenti e di ristagni d'acqua;
- verificare l'assenza di ghiaccio;
- verificare che non siano presenti riduzioni di spessore dovute a detriti, tubi o quant'altro riduca lo spessore della pavimentazione;
- individuare la presenza di cunicoli, fondazioni, plinti, travi che riducano lo spessore della piastra e che comunque rappresentino punti a rischio di fessurazioni indotte da differenziata rigidità del supporto;
- costipare tutti gli scavi e i rinterri fino a rifiuto, utilizzando strumenti e macchine idonee alle condizioni di cantiere e alle caratteristiche del materiale di riempimento. I rinterri nelle vicinanze di pilastri, basamenti, cunicoli, canaline, muri, scavi per impiantistica, ecc., devono essere realizzati con particolare attenzione essendo questi i punti più soggetti a cedimenti;
- verificare che chiusini, soglie, angolari, ecc.; siano "fissati" a sezione verticale e non implicino delle riduzioni di sezione nella lastra;
- verificare che le quote degli elementi di raccordo (chiusini, soglie angolari, guide, ecc.) rispettino le quote di progetto inoltre, verificare che le quote di posa dei vari elementi predisposti sia congrua e coordinata con le pendenze previste;
- rimuovere sassi di grosse dimensioni, macerie e materiali leggeri eventualmente presenti.

È inoltre fortemente raccomandato eseguire indagini sperimentali alla fine della preparazione della massiciata, ed in particolare:

- 1 prova di carico con piastra (CNR N.92/83) ogni 400 m².

Durante la realizzazione, è necessario controllare l'uniformità della risposta dei rulli compattatori, degli automezzi presenti ed effettuare eventuali verifiche con piastre dinamiche o prove superficiali.

Strato di separazione e barriera vapore

Si prevede la realizzazione di una barriera vapore con fogli di polietilene con sovrapposizione degli stessi per circa 15 cm (uniti tra di loro a mezzo di nastro adesivo), posata su fogli di geotessuto (con i singoli fogli sormontati di 15 cm) e protetta superiormente da fogli di geotessuto con i singoli fogli sormontati di 15 cm.

Rete elettrosaldata e/o barre di armatura

Ai fini di ottenere un miglioramento del contrasto del ritiro, si prescrive la posa di una rete elettrosaldata B450C, $\Phi 6/15 \times 15$ cm, posata ad una distanza dall'estradosso pari a 1/3 dello spessore della pavimentazione, appoggiata su opportuni distanziatori di dimensioni e caratteristiche opportune. La rete non è sovrapposta ma opportunamente affiancata; al fine di garantire la continuità, è prevista la posa di spezzoni di pari diametro ($l = 80$ cm). La rete non dovrà essere tagliata durante le operazioni di formazione dei giunti di contrazione.

Rinforzi puntuali

Si prevede un rinforzo nei vertici degli spiccati verticali, chiusini, griglie di raccolta acque e altri elementi presenti nella pavimentazione mediante posa di una gabbia di armatura con n° 4 barre di diametro 12 mm e lunghezza di 100 cm.

Strato superficiale antipolvere

Si prevede la realizzazione di uno strato di finitura antipolvere con prodotto indurente superficiale a base di silicati, da sottoporre all'accettazione della D.L., in ragione di 200 g/m^2 , steso a rifiuto sulla superficie opportunamente pulita e preparata, stagionata per almeno 15 giorni dalla sua esecuzione.

Protezione dei lavori

Si prevede la chiusura totale dell'edificio e la protezione dalle condizioni climatiche avverse durante l'esecuzione dei lavori, con sigillatura delle aperture dell'edificio, al fine di evitare che all'interno si formino delle correnti d'aria tali da alterare la maturazione durante le prime ore dal getto.

Stagionatura

Si prevede la stagionatura del calcestruzzo, da mantenere per 15 giorni mediante posa di geotessuto mantenuto costantemente umido nell'arco delle 24 ore o, in alternativa, mediante copertura con fogli di polietilene. La stagionatura va interrotta nel momento dell'esecuzione dei tagli per l'esecuzione dei giunti di controllo e ripresa immediatamente dopo.

Messa in esercizio della pavimentazione

Non sovraccaricare l'opera nei 28 giorni successivi all'esecuzione, salvo esito positivo delle prove di compressione dei provini del controllo di accettazione del calcestruzzo. Qualora fosse necessario sovraccaricare prima l'opera il progettista prescriverà il valore di resistenza minima a compressione necessario per nei riguardi della azioni di servizio. Tale resistenza deve essere verificata tramite le prove complementari secondo quanto previsto dalle Norme tecniche vigenti.

A.7 Piano d'uso e programma di manutenzione

La pavimentazione è realizzata sulla base delle indicazioni fornite dal Committente nell'indagine preliminare. Eventuali variazioni dell'uso inizialmente previsto, con particolare riferimento al tipo di movimentazione o alla presenza di prodotti aggressivi, dovranno essere segnalati e sottoposti a verifica.

Le modalità di pulizia devono essere realizzate secondo le prescrizioni, i prodotti e i cicli prestabiliti.

Il programma di manutenzione generale si basa su una serie di sopralluoghi che verranno effettuati con la seguente cronologia:

- dopo 1 anno dall'entrata in esercizio della pavimentazione, in funzione della sollecitazione prevista;
- i successivi sopralluoghi avranno una cadenza temporale ogni 3 anni.

In occasione del sopralluogo dovranno essere esaminati:

- lo stato dei giunti di costruzione e/o dilatazione, isolamento e contrazione;
- lo stato della pavimentazione in corrispondenza dei punti di contatto con le canaline di raccolta dell'acqua, pozzetti di vario genere, intersezione con strutture esistenti e strutture perimetrali;
- lo stato dei giunti di controllo e del riempitivo temporaneo e/o sigillatura;
- lo stato dello strato di finitura;
- lo stato fessurativo della pavimentazione;
- lo stato dell'eventuale trattamento protettivo con eventuali patologie di degrado dello stesso o degli strati presenti inferiormente;
- la presenza di eventuali patologie di degrado riconducibili alle deformazioni della piastra.

APPENDICE B: ESEMPIO DI PAVIMENTAZIONE IN CALCESTRUZZO ARMATO FIBRORINFORZATO

L'esempio riportato nell'Appendice A è focalizzato sulla progettazione delle pavimentazioni in calcestruzzo armato, partendo dai risultati ottenuti da un'analisi lineare svolta attraverso il classico approccio proposto da Westergaard. In questo secondo esempio è invece considerato il caso di una pavimentazione industriale in calcestruzzo fibrorinforzato, le cui verifiche strutturali sono state svolte a partire dai risultati forniti da opportune simulazioni numeriche agli elementi finiti condotte in campo non-lineare.

L'uso delle fibre è spesso economicamente conveniente rispetto all'armatura ordinaria per l'eliminazione dei tempi di posa dell'armatura, e per la garanzia di avere un rinforzo anche in quei punti dove la rete elettrosaldata difficilmente può rimanere nella corretta posizione durante le operazioni di getto.

Come evidenziato in precedenza, la determinazione dei parametri prestazionali relativi alla tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato non può essere basata solo sulle caratteristiche meccaniche delle fibre o della matrice di calcestruzzo in quanto i due materiali interagiscono per dare origine ad un composito le cui proprietà meccaniche devono essere appositamente valutate con specifiche prove di frattura.

B.1 Proprietà meccaniche dei materiali

Il calcestruzzo adottato per l'analisi strutturale appartiene alla classe di resistenza C32/40. Le principali caratteristiche meccaniche cui si è fatto riferimento sono state ottenute dall'Eurocodice 2 [Par. 3.1.3], dal quale si sono dedotte le resistenze elencate nel seguito:

- resistenza a compressione caratteristica (cilindrica): $f_{ck} = 32 \text{ MPa}$;
- resistenza a compressione di progetto: $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C = 21.33 \text{ MPa}$;
- resistenza a trazione caratteristica: $f_{ctk} = 0.21 f_{ck}^{2/3} = 2.12 \text{ MPa}$;
- resistenza a trazione di progetto: $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_C = 1.41 \text{ MPa}$;
- modulo elastico medio: $E_{cm} = 22 [(f_{ck} + 8) / 10]^{0.3} = 33.345 \text{ MPa}$.

Si noti che è stato assunto un valore unitario di α_{cc} trattandosi di una struttura che non mette a rischio la pubblica incolumità.

Nelle analisi numeriche si è impiegato un calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio (SFRC – Steel Fibre Reinforced Concrete) aventi le seguenti caratteristiche geometriche e meccaniche di riferimento:

- diametro equivalente $d = 0.8 \text{ mm}$;
- lunghezza $l = 60 \text{ mm}$;
- rapporto d'aspetto $l/d = 75$;
- estremità uncinata;
- resistenza a trazione del filo = 1200 MPa (minimo).

Per quanto riguarda l'armatura tradizionale adottata come rinforzo locale della struttura, le principali caratteristiche sono:

- acciaio per armature B450C ad aderenza migliorata;

- $f_{yk} = 450$ MPa; $f_{tk} = 540$ MPa; $f_{yd} = 391$ MPa;
- $A_{gtk} = 7.5\%$;
- $E_s = 210000$ MPa.

Le analisi numeriche sono state condotte studiando sia il comportamento allo Stato Limite di Esercizio (verifica della deformabilità e controllo dello stato fessurativo della pavimentazione in presenza delle azioni di esercizio) sia quello allo Stato Limite Ultimo della pavimentazione (verifica della capacità portante). Per tali stati limite, si fa riferimento alla seguente scelta delle caratteristiche meccaniche dei materiali:

- SLE: si è fatto riferimento ai valori caratteristici delle resistenze dei materiali;
- SLU: si è fatto riferimento ai valori di progetto delle resistenze dei materiali, ottenuti dividendo i valori caratteristici per i coefficiente parziali di sicurezza dei materiali (γ_m), pari a 1.5 per la resistenza a trazione (γ_F) e per la resistenza a compressione (γ_C) del calcestruzzo fibrorinforzato, e 1.15 per la resistenza a trazione dell'acciaio (γ_s). Questa procedura potrebbe non essere del tutto cautelativa in quanto potrebbe sovrastimare la duttilità.

B.1.1 Comportamento a compressione del calcestruzzo

La modellazione del comportamento non-lineare a compressione del calcestruzzo è stata ottenuta adottando la curva tensione-deformazione proposta dall'Eurocodice 2 [Par.3.1.5]; le curve ottenute utilizzando i valori di resistenza a compressione caratteristico (f_{ck}) e di progetto (f_{cd}) indicati in precedenza, sono riportate nel diagramma di Figura B.1.

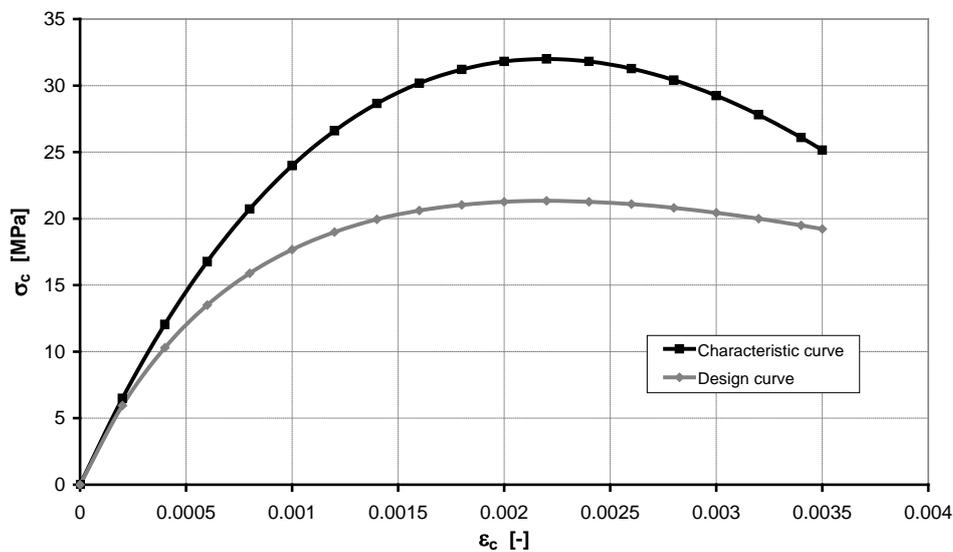


Figura B.1. Legame tensione-deformazione a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato (calcestruzzo C32/40).

B.1.2 Comportamento a trazione del calcestruzzo

Nelle analisi numeriche svolte si è previsto l'utilizzo di un legame costitutivo a trazione post-fessurazione determinato sulla base di prove sperimentali sul materiale, condotte in accordo con la normativa EN 14651. Tale Normativa prevede lo svolgimento di prove sperimentali di flessione su tre punti di carico, condotte su travette intagliate di dimensione $500 \times 150 \times 150$ mm³, mediante le quali è possibile la determinazione di due resistenze post-fessurazione: la prima, tipica per le condizioni di esercizio, è la tensione residua (f_{R1}) raggiunta in corrispondenza di un'apertura alla

base dell'intaglio (*CMOD*) pari a 0.5 mm; la seconda, tipica per lo stato limite ultimo, è la tensione residua (f_{R3}) individuata in corrispondenza di un *CMOD* pari a 2.5 mm.

I valori caratteristici delle tensioni residue sopracitate sono riportati nella Tabella B.1.

Tabella B.1. Valori caratteristici minimi delle resistenze residue richieste per il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio.

$f_{R1,k}$	$f_{R3,k}$	Classe SFRC
[MPa]	[MPa]	
2.18	1.90	2b

Attraverso i valori caratteristici delle resistenze residue è possibile determinare (vedi Figura B.2) i legami costitutivi post-fessurazione necessari allo svolgimento delle analisi numeriche non lineari.

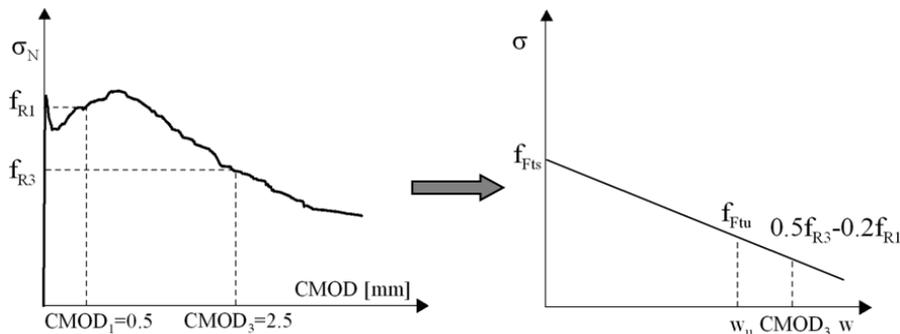


Figura B.2. Legge lineare impiegata per descrivere il comportamento a trazione post-fessurazione del calcestruzzo fibrorinforzato.

Il legame lineare di Figura B.2 è identificato da due parametri di riferimento, f_{Fts} ed f_{Ftu} , definiti nel seguente modo:

$$f_{Fts} = 0.45 \cdot f_{R1} \tag{B1}$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} \cdot (f_{Fts} - 0.5 \cdot f_{R3} + 0.2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \tag{B2}$$

dove $CMOD_3 = 2.5$ mm.

Tabella B.2. Parametri di frattura, caratteristici e di progetto.

f_{Ftsk}	f_{Ftuk}	f_{Ftsd}	f_{Ftud}
Valori caratteristici		Valori di progetto	
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0.98	0.51	0.65	0.34

Impiegando i valori caratteristici delle resistenze residue f_{R1} e f_{R3} , definiti in precedenza, è possibile determinare le resistenze caratteristiche f_{Ftsk} ed f_{Ftuk} e i valori delle corrispondenti resistenze di progetto, ottenuti applicando il coefficiente di sicurezza del materiale $\gamma_F=1.5$; i valori così ottenuti sono riassunti nella Tabella B.2.

La Figura B.3 mostra il legame costitutivo di progetto a trazione (post-fessurazione) considerato nelle analisi numeriche svolte.

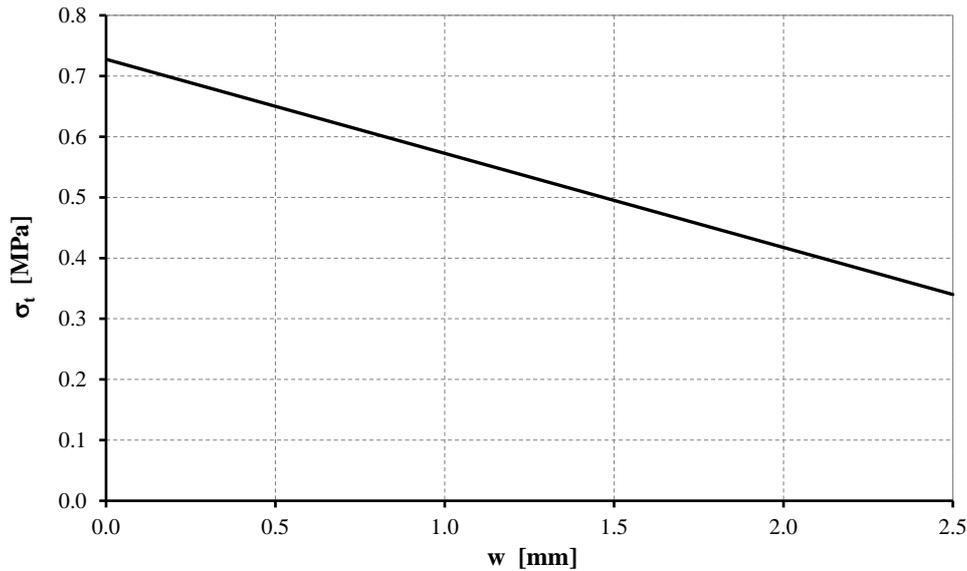


Figura B.3. Legame tensione-apertura di fessura di progetto.

B.1.3 Comportamento dell'acciaio per cemento armato (B450C)

Il comportamento a compressione e a trazione dell'acciaio per armature B450C, è stato modellato adottando la curva tensione-deformazione proposta dall'Eurocodice 2 [Par. 3.2.7]; si tratta di un legame tensione-deformazione di tipo bi-lineare nel quale è ammessa l'adozione di una sovra resistenza (incrudimento), pari al rapporto fra la resistenza ultima caratteristica (f_{tk}) e la resistenza di snervamento caratteristica (f_{yk}). I legami costitutivi caratteristici e di progetto adottati sono riportati in Figura B.4.

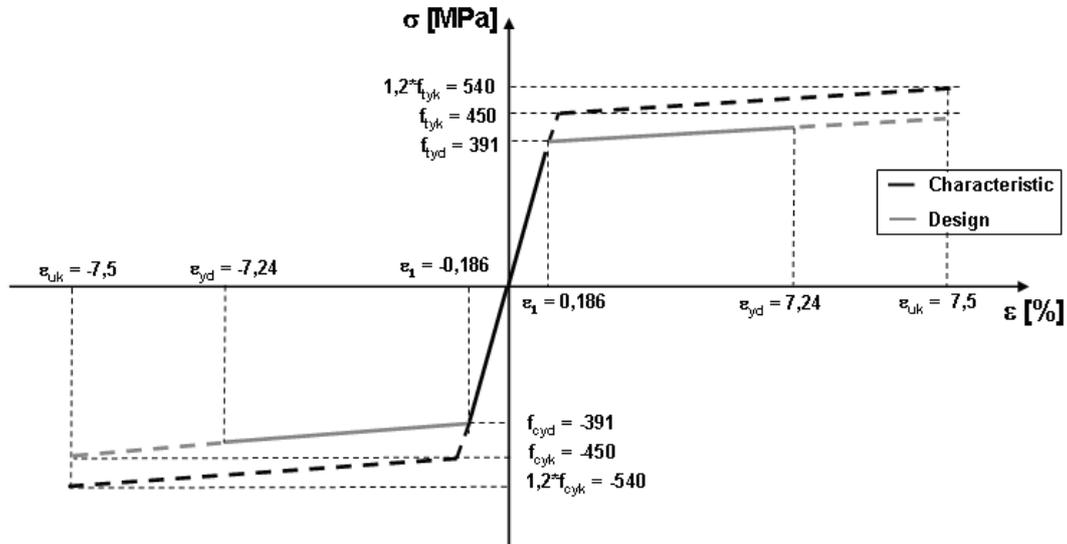


Figura B.4. Diagramma tensione-deformazione adottato per l'acciaio, classe B450C.

B.2 Analisi strutturale

La pavimentazione oggetto di studio è collocata all'interno di un capannone industriale prefabbricato, adibito principalmente al deposito e allo smistamento merci, che si estende su una superficie complessiva di circa 38075 m²; tale fabbricato è suddiviso in tre blocchi distinti caratterizzati dalle seguenti estensioni complessive:

- Blocco 1: superficie coperta 6975 m²;

- Blocco 2: superficie coperta 15550 m²;
- Blocco 3: superficie coperta 15550 m².

L'esempio progettuale riportato è stato formulato con particolare riferimento al blocco 2. Nella fattispecie, si prevede di realizzare una pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio di tipo "jointless", costituita da più campi di forma rettangolare opportunamente interconnessi attraverso giunti di costruzione prefabbricati realizzati mediante l'impiego di barrotti metallici (diametro =20 mm; interasse barrotti= 500 mm) posizionati lungo i bordi della pavimentazione prima del getto della stessa.

Nelle analisi numeriche svolte per verificare il comportamento della pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato è stato considerato il campo di pavimentazione n°1 (Campo 1) collocato nel blocco 2 del magazzino. Come evidenziato nello schema di Figura B.5, il Campo 1 presenta dimensioni pari a 21,2 × 30,9 m² ed è caratterizzato dalla presenza di bordi "liberi", cioè senza giunti di costruzione, e di bordi contigui ai campi di pavimentazione adiacenti, collegati a quest'ultimi mediante i barrotti metallici.

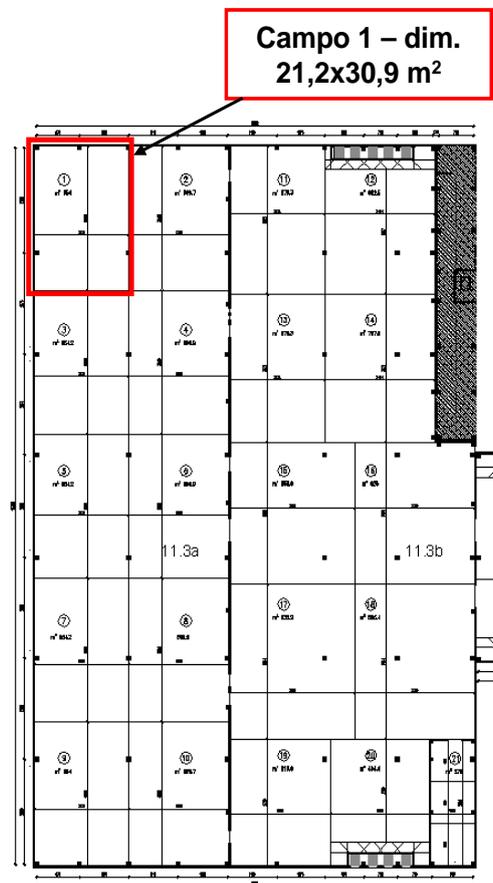


Figura B.5. Pianta della pavimentazione oggetto studio; in evidenza il campo di pavimentazione (Campo 1) considerato nell'ambito dello studio numerico svolto.

La soluzione progettuale proposta prevede l'impiego di un calcestruzzo fibrorinforzato, avente le caratteristiche meccaniche minime descritte in precedenza (vedi par. B.1.1 e B.1.2), rinforzato con una rete in acciaio elettrosaldato disposta esclusivamente nei punti della pavimentazione nei quali si verifica la presenza di sforzi localizzati; lo spessore totale della pavimentazione è stato assunto pari a 230 mm.

Lo schema di calcolo adottato è quello di pavimentazione su suolo elastico, modellato con molle alla Winkler reagenti solo a compressione.

B.2.1 Modellazione della pavimentazione

Il campo di pavimentazione considerato è stato studiato attraverso un modello tridimensionale ad elementi finiti costituito da elementi "Shell".

I giunti di costruzione prefabbricati (Figura B.6) sono costituiti da barre metalliche di diametro 20 mm disposte con passo di 500 mm lungo il bordo della pavimentazione.

In corrispondenza dei bordi liberi è previsto il posizionamento di armature integrative (rete elettrosaldata B450C $\Phi 8/200 \times 200$ mm) necessarie a garantire alla struttura una sufficiente capacità portante in presenza di sforzi localizzati. Per modellare il comportamento a trazione e a compressione del calcestruzzo e delle armature tradizionali, sono stati impiegati i legami costitutivi riportati nei paragrafi B.1.1, B.1.2 e B.1.3.

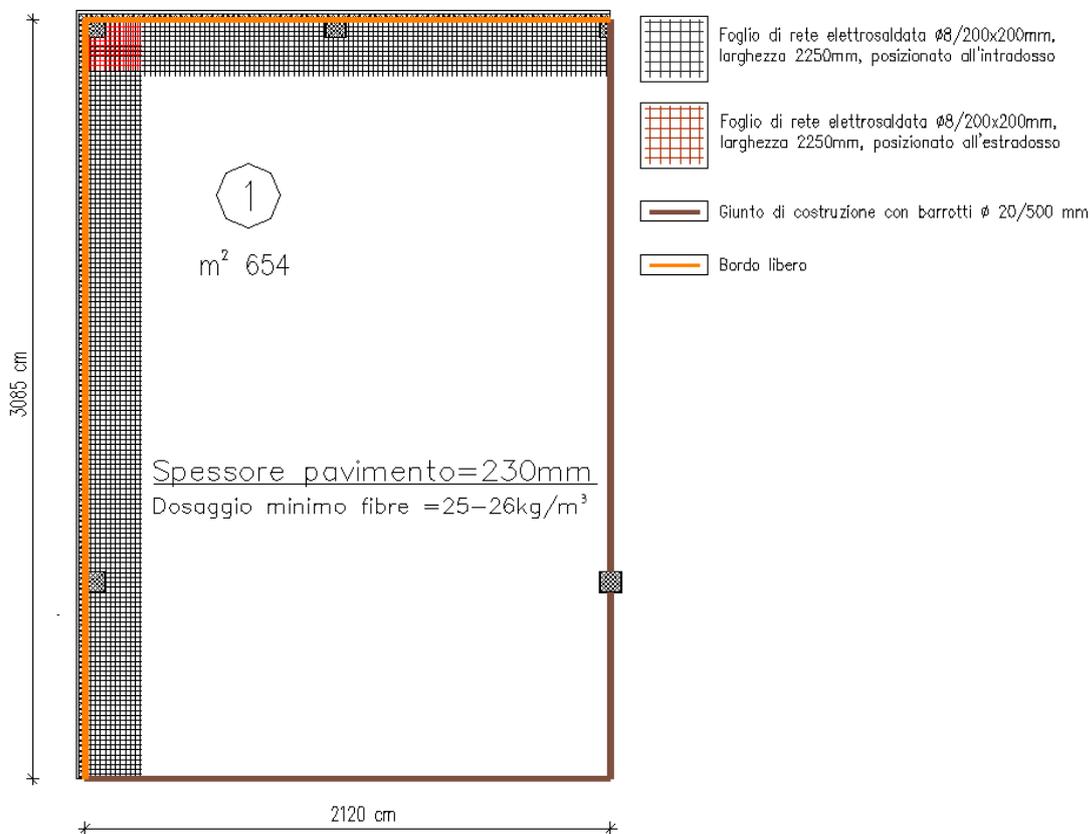
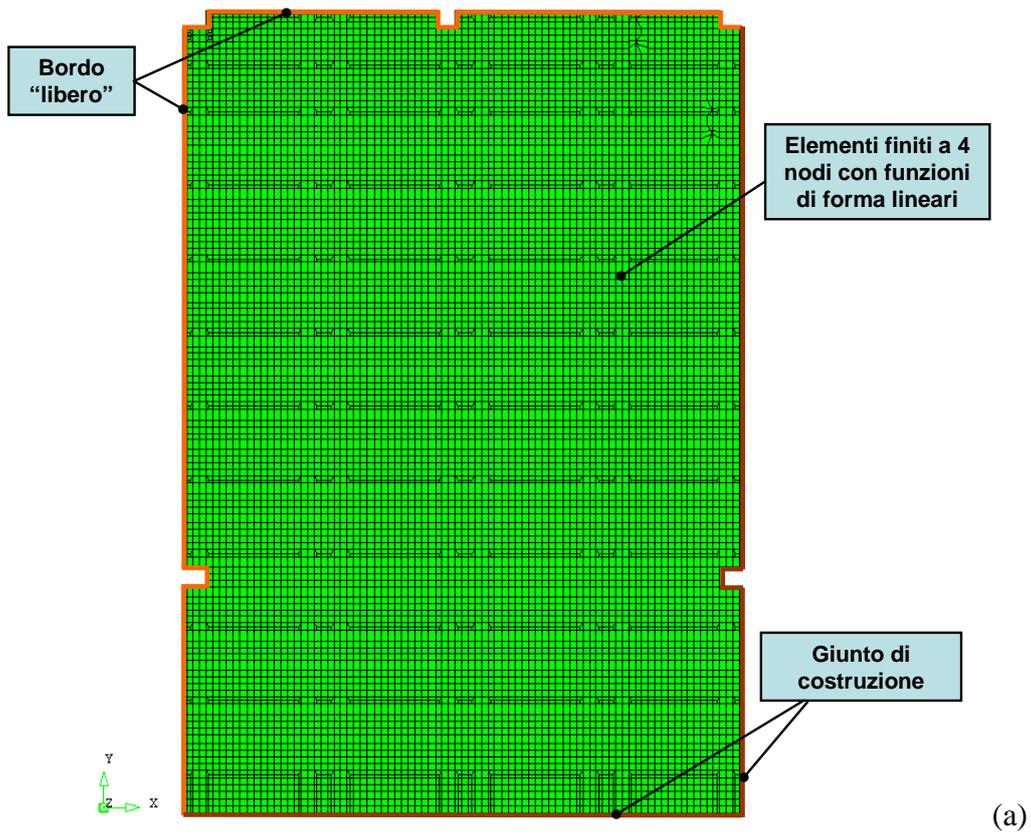
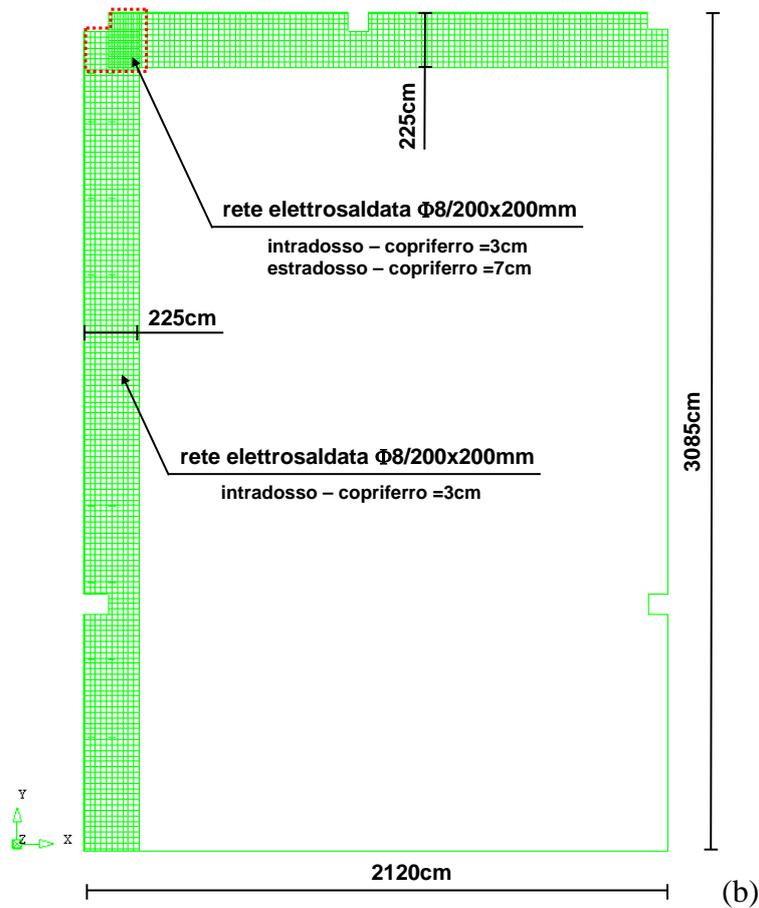


Figura B.6. Principali caratteristiche del Campo 1 di pavimentazione.



(a)



(b)

Figura B.7. Mesh adottata nelle simulazioni numeriche (a) e posizione degli “embedded reinforcement elements” utilizzati per modellare l’armatura integrativa (b).

La mesh utilizzata per l'analisi numerica non-lineare (vedi Figura B.7) è complessivamente costituita da:

- 10503 elementi piastra (“Shell”) a 4 nodi, isoparametrici, con funzioni di forma lineari;
- 10822 elementi molla (“Spring elements”), impiegati per simulare il comportamento del sottofondo (modellazione alla Winkler del terreno);
- 221 elementi molla (“Spring elements”), impiegati per simulare il comportamento strutturale dei giunti di costruzione;
- “embedded reinforcement elements” utilizzati per simulare il comportamento dell'armatura convenzionale. La posizione degli elementi armatura considerati nell'analisi numerica è schematizzata in Figura B.7b.

B.2.2 Modellazione del terreno

Il terreno è stato modellato con molle verticali (con asse ortogonale al piano medio della piastra) disposte sull'intera superficie della pavimentazione. Il legame assegnato è rappresentato in Figura B.8 ed è di tipo non lineare. Il terreno infatti presenta una rigidezza solo a compressione (con rigidezza pari alla costante di sottofondo), mentre a trazione la rigidezza è nulla. La costante di sottofondo è stata assunta pari a $k = 0.06 \text{ N/mm}^3$, corrispondente al valore caratteristico del coefficiente di reazione ottenuto attraverso prove di carico su piastra. Le molle, posizionate negli angoli degli elementi finiti a 4 nodi, sono quindi modellate con un legame forza – spostamento, ove la forza è pari alla pressione sul terreno moltiplicata per l'area di influenza.

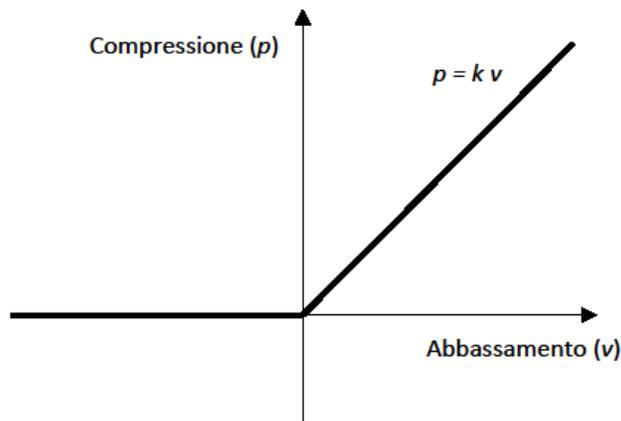


Figura B.8. Legame non lineare pressione-spostamento utilizzato per simulare il comportamento del terreno.

B.2.3 Azioni

Sulla pavimentazione in oggetto è previsto il posizionamento di scaffali metallici per lo stoccaggio di merci varie, la cui movimentazione all'interno del magazzino avviene mediante l'impiego di carrelli elevatori dotati di ruote in Vulkollan.

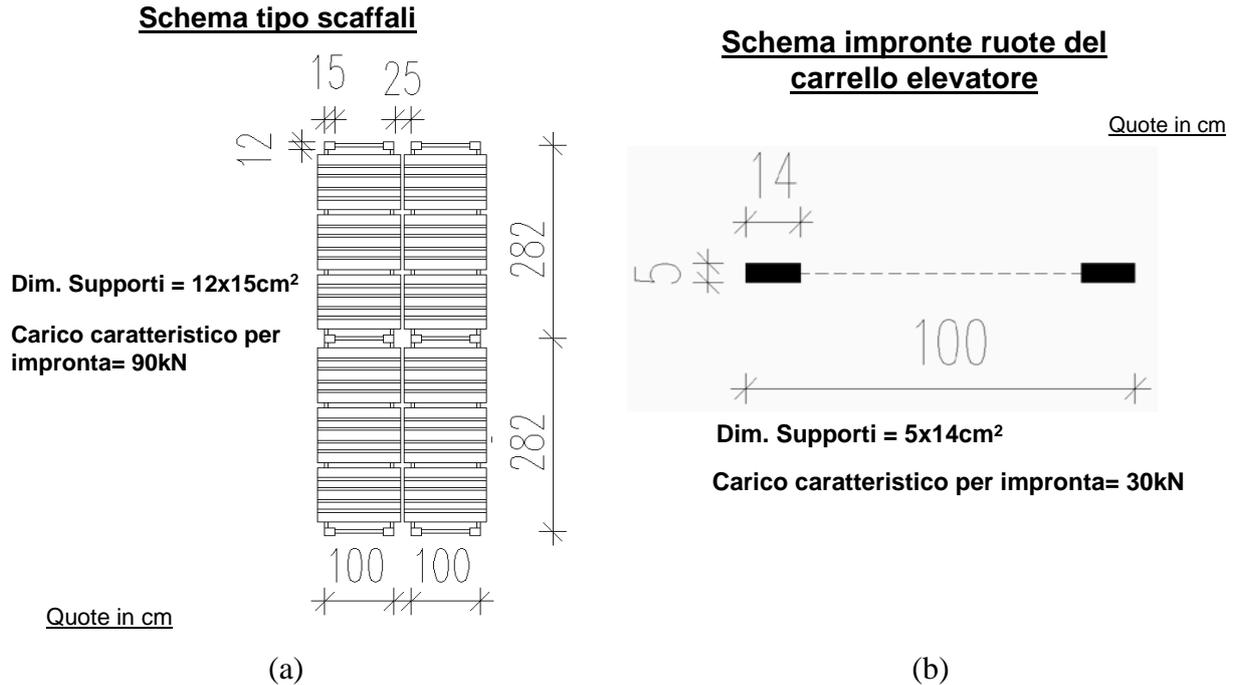


Figura B.9. Schematizzazione dei carichi applicati alla pavimentazione: supporti degli scaffali (a); singolo asse di carico del carrello elevatore (b).

Gli scaffali sono costituiti da montanti verticali poggianti su supporti di forma rettangolare aventi dimensioni pari a $15 \times 12 \text{ cm}^2$ (vedi Figura B.9a); dallo schema di Figura B.9b si evince che tali supporti sono soggetti ad un carico massimo di esercizio pari a 90 kN e sono disposti secondo una maglia geometrica di dimensioni $X = 100 + 25 + 100 \text{ cm}$ e $Y=283 \text{ cm}$.

Allo scopo di considerare gli effetti prodotti sulla pavimentazione dal passaggio dei carrelli elevatori per la movimentazione delle merci, l'analisi numerica è stata svolta posizionando in modo opportuno le ruote in Vulkollan dei carrelli elevatori, aventi dimensioni in pianta pari a $5 \times 14 \text{ cm}^2$, poste ad interasse di 100 cm secondo lo schema di Figura B.9b; il carico massimo ipotizzato per ogni singola ruota in condizioni di esercizio è pari a 30 kN. Le impronte di carico degli scaffali e dei carrelli elevatori sono state collocate in modo da realizzare le condizioni di sollecitazione più critiche per i campi di pavimentazione considerati nello studio numerico (vedi Figura B.10).

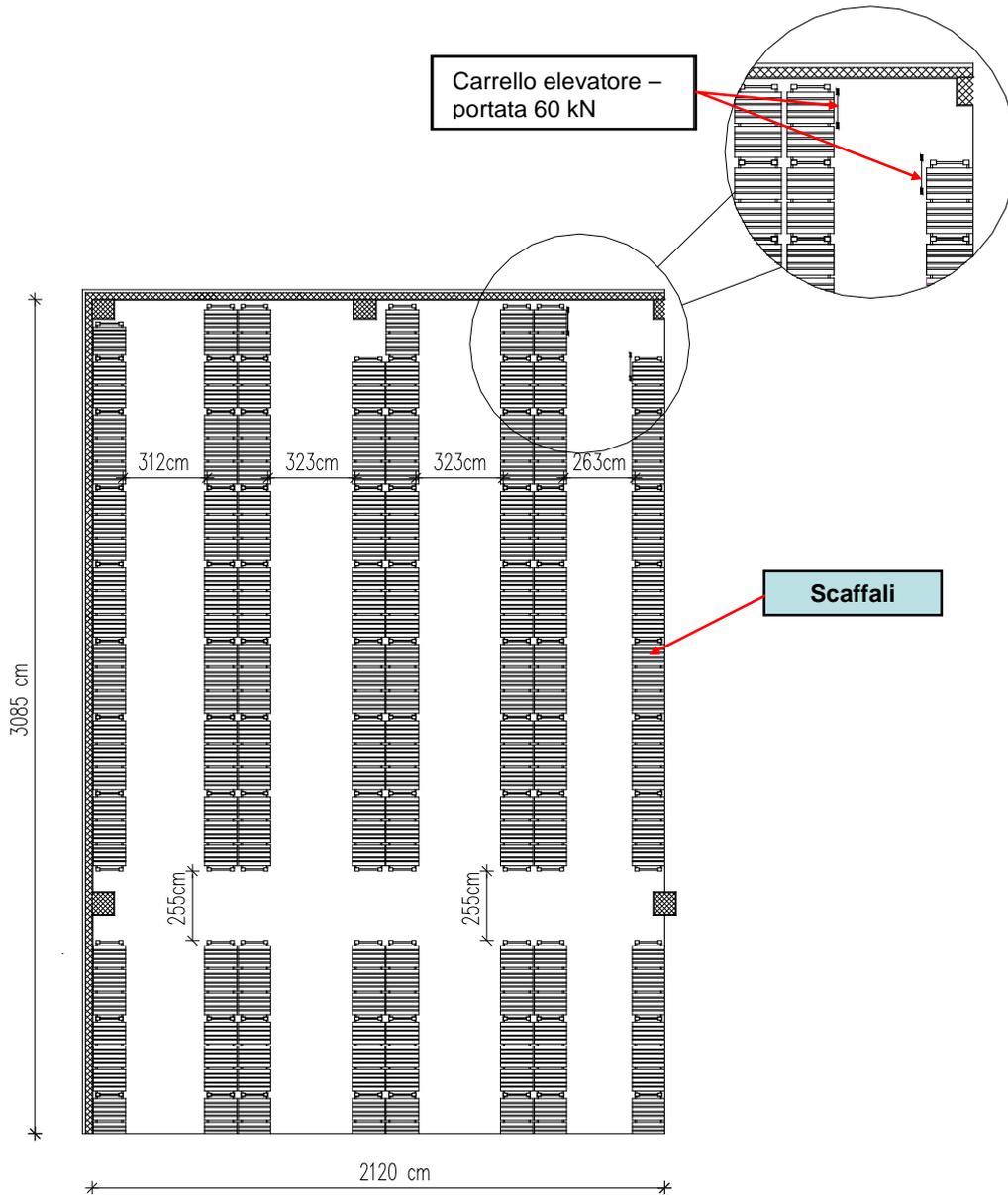


Figura B.10. Disposizione dei carichi considerati nell'analisi numerica.

B.3 Risultati dell'analisi strutturale

B.3.1 Comportamento allo Stato Limite Ultimo di flessione

L'analisi del comportamento allo stato limite ultimo (SLU) della pavimentazione in oggetto si basa su analisi numeriche in campo non-lineare (NLFM-Non Linear Fracture Mechanics), nelle quali sono stati considerati i legami di progetto previsti dal Codice Modello 2010. Nelle simulazioni si è fatto crescere il carico monotonamente (attraverso un moltiplicatore "λ"), fino al raggiungimento del carico di collasso della pavimentazione. L'interruzione delle analisi è avvenuta quando si è raggiunta una capacità portante pari al minimo indispensabile per la verifica agli SLU (continuando le analisi, il carico sarebbe aumentato ulteriormente). In particolare, al termine di ciascuna analisi numerica non-lineare, sono state svolte le seguenti verifiche:

- verifica della capacità portante della pavimentazione. Il carico massimo applicato alla pavimentazione, nel corso dell'analisi numerica, non deve essere inferiore a 1.5 volte il

carico previsto per le condizioni di esercizio ($\lambda_{min}=1.5$), corrispondente al coefficiente di sicurezza parziale per i carichi variabili ($\gamma_Q=1.5$; Eurocodice 2);

- verifica degli sforzi di compressione massimi nel calcestruzzo. Come ulteriore verifica della capacità portante della pavimentazione è necessario accertare che, in corrispondenza di un carico applicato pari a 1.5 volte il carico d'esercizio, gli sforzi di compressione massimi agenti nel calcestruzzo siano inferiori alla resistenza a compressione di progetto f_{cd} prevista;
- verifica degli sforzi massimi agenti nelle armature localizzate. Quando il carico applicato alla pavimentazione è pari a 1.5 volte il carico d'esercizio, gli sforzi di trazione agenti nelle armature localizzate devono essere inferiori a f_{yd} .

La mappa degli spostamenti riportata in Figura B.11 mette in evidenza gli spostamenti verticali presenti nella pavimentazione in corrispondenza del moltiplicatore massimo dei carichi $\lambda=2.4$ raggiunto nel corso dell'analisi numerica del campo di pavimentazione n°1; in tale situazione, il carico totale applicato ad ogni supporto degli scaffali è pari a 216 kN mentre quello relativo alle ruote dei carrelli elevatori è pari a 72 kN. Da tale mappa si evince che il punto della pavimentazione soggetto al massimo abbassamento è situato lungo il bordo esterno della pavimentazione, in prossimità del pilastro posto in corrispondenza della mezzeria del lato corto del campo considerato.

Il diagramma di Figura B.12 mostra invece l'andamento del moltiplicatore dei carichi applicati alla pavimentazione, in funzione dell'abbassamento massimo in corrispondenza della zona della pavimentazione descritta in precedenza. Dai risultati ottenuti si evince che, nonostante l'analisi numerica sia stata interrotta prima del collasso effettivo della struttura (l'interruzione è avvenuta esclusivamente per ragioni di tempo computazionale), la pavimentazione si è mostrata in grado di raggiungere un carico massimo pari a 2.4 volte il valore caratteristico del carico previsto per le condizioni d'esercizio; di conseguenza, il margine di sicurezza minimo garantito dalla pavimentazione è superiore al coefficiente parziale γ_{Qi} (=1.5) delle azioni variabili fissato dalla normativa vigente.

Le mappe riportate in Figura B.13 mostrano l'andamento degli sforzi principali minimi agenti nella pavimentazione in presenza di un carico applicato pari a 1,6 volte il carico previsto per le condizioni di esercizio ($\lambda=1.6$). Le aree soggette ai massimi sforzi di compressione sono collocate all'estradosso della pavimentazione, in corrispondenza dei supporti degli scaffali (Figura B.13a); gli sforzi di compressione massimi in tali zone sono risultati pari a circa 13.7 MPa, inferiori quindi rispetto alla resistenza cilindrica di progetto ($f_{cd} = 21.3\text{MPa}$) prevista per il calcestruzzo adottato. Gli sforzi di compressione massimi all'intradosso (Figura B.13b) sono risultati al più pari a circa 10 MPa. Dato che le verifiche svolte considerando un moltiplicatore dei carichi pari a 1.6 risultano essere soddisfatte, lo saranno a maggior ragione anche per un moltiplicatore dei carichi pari a 1.5.

B.3.2 Verifica a punzonamento

I carichi considerati nella progettazione della pavimentazione in oggetto sono applicati su superfici di dimensioni limitate in rapporto allo spessore totale della pavimentazione stessa; gli sforzi localizzati che si generano nella zona di diffusione del carico posta al di sotto delle superfici caricate, possono dar luogo ad un fenomeno di collasso locale per taglio noto con il termine di "punzonamento".

Data la mancanza di precise indicazioni in materia nella normativa tecnica vigente, le verifiche a punzonamento sono state svolte con riferimento alle disposizioni riportate nel Eurocodice 2 [Par. 6.4] inerenti la verifica di solette/piastre in c.a. piene soggette ad elevati carichi concentrati. A favore della sicurezza strutturale, nella verifica non si è considerato l'incremento della resistenza a punzonamento derivante dall'azione di sostegno del terreno posto al di sotto della pavimentazione.

Inoltre, nella verifica si trascura il contributo resistente offerto dalle fibre in acciaio nei confronti del comportamento a trazione post-fessura del calcestruzzo fibrorinforzato.

Il procedimento per la verifica a punzonamento di una piastra in c.a. si basa sul controllo delle sollecitazioni agenti lungo il perimetro della superficie caricata e lungo il perimetro di verifica u_1 ; in particolare si raccomandano le seguenti verifiche:

- lungo il perimetro dell'area caricata si raccomanda che la massima tensione di taglio-punzonamento non sia superata:

$$v_{Ed} < v_{Rd,max};$$

- l'armatura per il taglio-punzonamento non è necessaria se:

$$v_{Ed} < v_{Rd,c}$$

dove v_{Ed} è lo sforzo di taglio sollecitante di progetto mentre v_{Rd} è la resistenza di progetto a punzonamento.

Nell'ipotesi cautelativa, per altro sostanzialmente realistica, che la pavimentazione in oggetto non contenga alcuna armatura longitudinale disposta all'intradosso, la resistenza di progetto a punzonamento può essere calcolata con la seguente formula:

$$v_{Rd,c} = v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0.53 \text{ MPa} \quad (B3)$$

dove:

$$k = 1 + \sqrt{200/d} = 1.93;$$

$d = 230 \text{ mm}$ = spessore pavimentazione;

$$f_{ck} = 32 \text{ MPa}.$$

La resistenza di progetto massima può essere stimata attraverso la seguente formula:

$$v_{Rd,max} = 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} = 5.58 \text{ MPa} \quad (B4)$$

dove:

$$v = 0.6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0.523;$$

$$f_{cd} = 21.3 \text{ MPa}.$$

La verifica è condotta considerando le seguenti due condizioni di carico critiche:

1. Singolo supporto dello scaffale posto in prossimità di un "bordo libero" della pavimentazione.

Qualora il singolo supporto di base dello scaffale fosse posizionato in prossimità di uno dei "bordi liberi" della pavimentazione, lo sforzo di taglio di progetto risulterebbe essere pari a:

$$v_{Ed} = \frac{V_{sd}}{u_1 \cdot d} = 0.315 \text{ MPa} < v_{Rd,c} \quad (B5)$$

dove:

$$V_{sd} = \text{carico sollecitante di progetto} = 1.5 \times 90 \text{ kN} = 135 \text{ kN};$$

$$u_1 = 120 + 300 + 460 \pi = 1864 \text{ mm (vedi Figura B.14a)}.$$

Si è supposto, a favore della sicurezza strutturale, che il bordo della pavimentazione considerato nella precedente verifica non sia dotato di armatura localizzata.

Lungo il perimetro dell'area caricata, la massima sollecitazione di taglio è invece data dalla seguente formula:

$$v_{Ed} = \frac{V_{sd}}{(120 + 300) \cdot d} = 1.40 \text{ MPa} < v_{Rd,max} \quad (\text{B6})$$

L'Eq. (B5) evidenzia che lo sforzo di taglio sollecitante agente lungo la superficie critica è inferiore al taglio resistente di progetto calcolato mediante l'Eq. (B3); inoltre, lo sforzo di taglio sollecitante agente lungo il perimetro dell'impronta di carico è inferiore alla resistenza a taglio di progetto massima, ottenuta attraverso l'Eq. (B4). Si può quindi concludere che, nella condizione di carico considerata, la pavimentazione non è soggetta a rischio di collasso per punzonamento.

2. Ruota del carrello elevatore posta prossimità di un bordo libero della pavimentazione.

Se la singola ruota del carrello elevatore fosse posizionata in prossimità di uno dei "bordi liberi" della pavimentazione, lo sforzo di taglio sollecitante di progetto sarebbe pari a:

$$v_{Ed} = \frac{V_{sd}}{u_1 \cdot d} = 0.11 \text{ MPa} < v_{Rd,c} \quad (\text{B7})$$

dove:

V_{sd} = carico sollecitante di progetto = $1.5 \times 30 \text{ kN} = 45 \text{ kN}$;

$u_1 = 50 + 280 + 460 \pi = 1774 \text{ mm}$ (vedi Figura B.14b).

Anche in questo caso si è supposto, a favore della sicurezza strutturale, che il bordo della pavimentazione considerato nella precedente verifica non sia dotato di armatura localizzata.

Lungo il perimetro dell'area caricata, la massima sollecitazione di taglio è invece data dalla seguente formula:

$$v_{Ed} = \frac{V_{sd}}{(50 + 280) \cdot d} = 0.59 \text{ MPa} < v_{Rd,max} \quad (\text{B8})$$

L'Eq. (B7) evidenzia che lo sforzo di taglio sollecitante agente lungo la superficie critica è inferiore al taglio resistente di progetto calcolato mediante l'Eq. (B3); inoltre, lo sforzo di taglio sollecitante agente lungo il perimetro dell'impronta di carico è inferiore alla resistenza a taglio di progetto massima calcolata con l'Eq. (B4). Si può quindi concludere che, anche nella condizione di carico critica qui considerata, la pavimentazione non è soggetta a rischio di collasso per punzonamento.

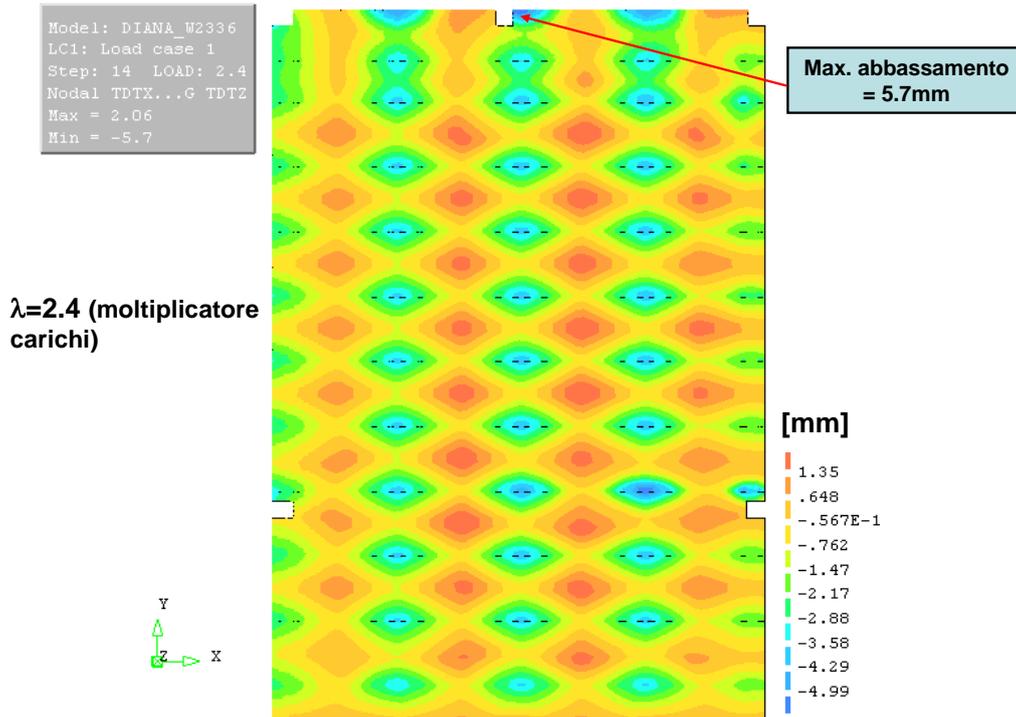


Figura B.11. Mappa degli spostamenti verticali della pavimentazione in corrispondenza del carico massimo raggiunto ($\lambda=2.4$).

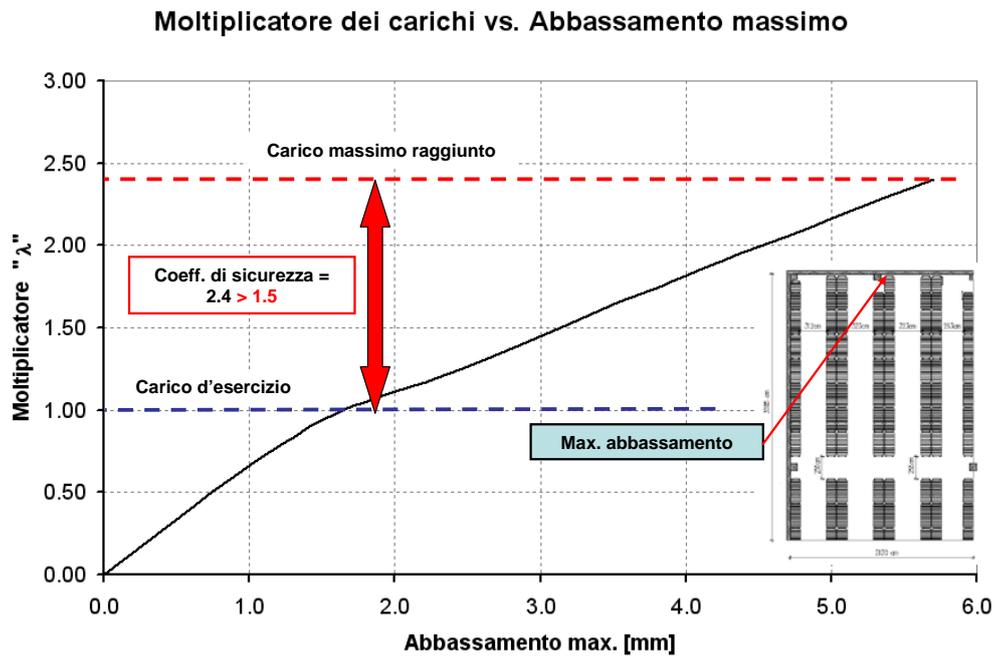


Figura B.12. Andamento del carico in funzione dell'abbassamento massimo.

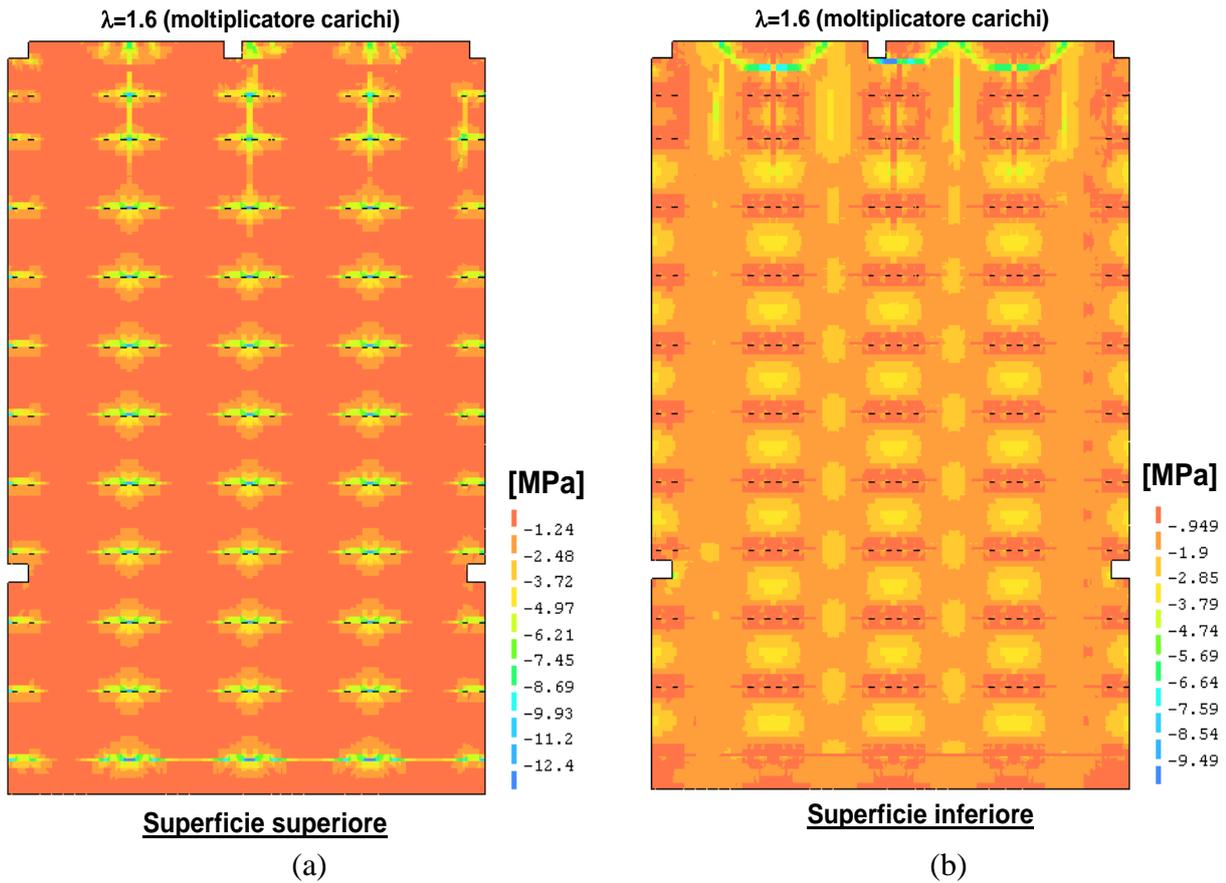


Figura B.13. Mappa degli sforzi principali minimi sulla superficie superiore (a) e inferiore (b) della pavimentazione in corrispondenza di un moltiplicatore dei carichi $\lambda=1.6$.

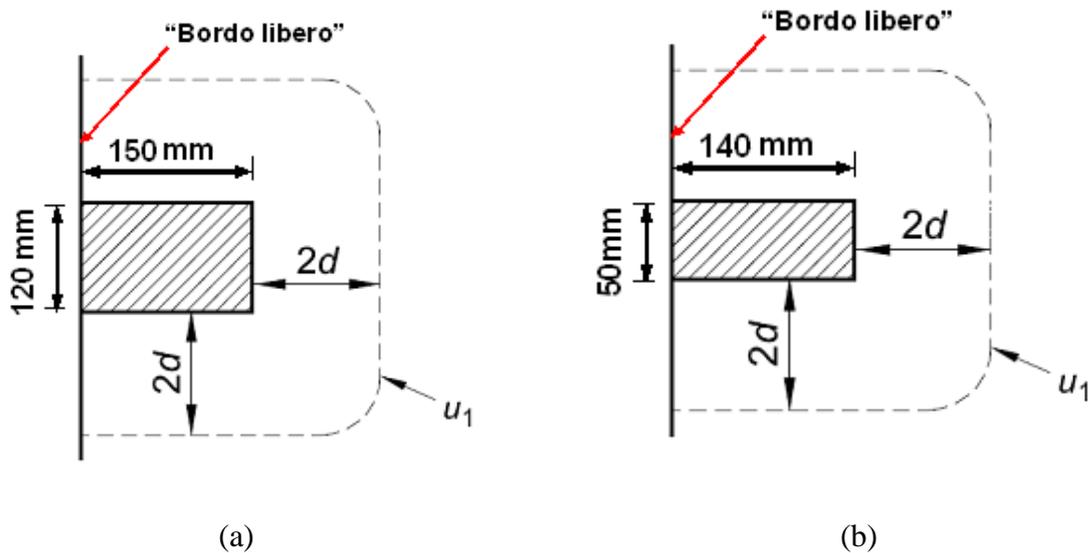


Figura B.14. Perimetro di verifica u_1 considerato per i supporti degli scaffali (a) e per le ruote del carrello elevatore (b).

B.3.3 Comportamento allo Stato Limite di Esercizio

L'analisi del comportamento in esercizio della pavimentazione ha riguardato due principali aspetti identificativi del buon comportamento in esercizio di un elemento strutturale:

- verifica della deformabilità. E' necessario verificare che l'abbassamento massimo presente nella pavimentazione, in presenza della azioni di esercizio, non sia tale da pregiudicare la corretta funzionalità dell'opera nelle condizioni di normale esercizio;
- verifica del quadro fessurativo. Le aperture di fessura massime sulle superfici della pavimentazione devono essere compatibili con l'ambiente in cui si colloca l'elemento strutturale.

Lo stato tensionale ottenuto dalle analisi del presente esempio non include gli effetti del ritiro in quanto tale fenomeno richiede la conoscenza di un insieme di fattori relativi all'ambiente circostante (temperatura, umidità) e al materiale, che non sono stati considerati.

La mappa riportata in Figura B.15 evidenzia gli spostamenti in direzione verticale della pavimentazione in presenza dei carichi d'esercizio disposti secondo lo schema di carico descritto nel paragrafo B.2.3. Come si può osservare, l'abbassamento maggiore si riscontra in prossimità dei "bordi liberi", mentre la zona della pavimentazione soggetta al massimo sollevamento è collocata lungo il bordo più corto dotato del giunto di costruzione. I risultati ottenuti evidenziano che gli spostamenti massimi non sono tali da compromettere la corretta funzionalità dell'opera nelle condizioni di normale esercizio.

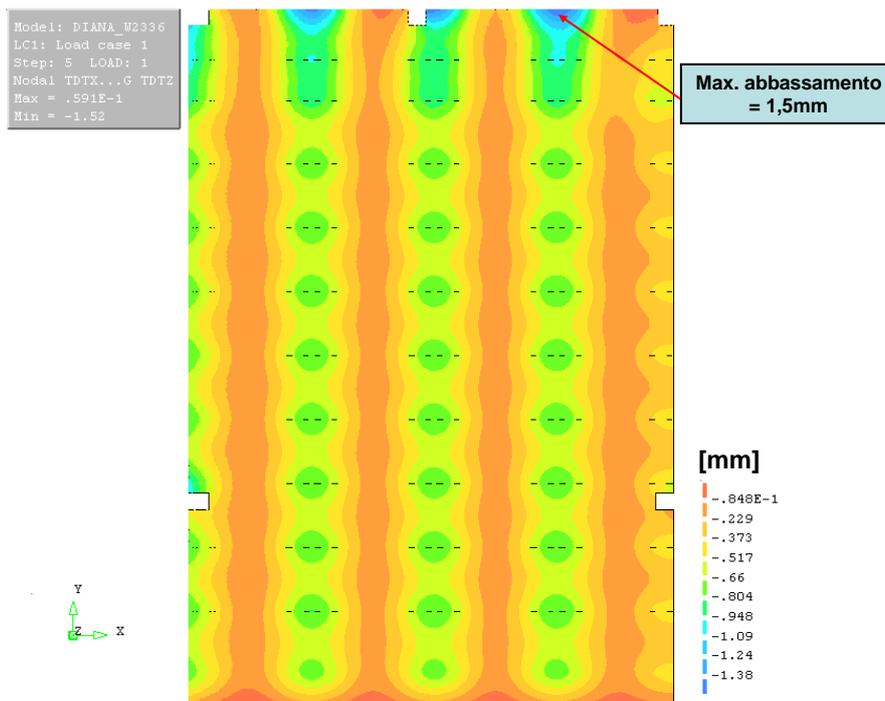


Figura B.15. Mappa degli spostamenti verticali della pavimentazione in corrispondenza del carico d'esercizio.

In Figura B.16a e b, sono rispettivamente riportate le mappe delle fessure sulla superficie superiore e inferiore della pavimentazione, in corrispondenza del carico d'esercizio. La mappa delle fessure riportata in Figura B.16a mostra chiaramente che la superficie superiore della pavimentazione è interessata dalla formazione di fessure prevalentemente nelle aree poste lungo i "bordi liberi" del campo considerato; in particolare, le fessure con ampiezza massima (0.045 mm) si riscontrano in prossimità del pilastro posto in corrispondenza della mezzeria del "bordo libero" più corto della pavimentazione. La mappa delle fessurazioni riportata in Figura B.16b consente invece di apprezzare il quadro fessurativo in corrispondenza del carico d'esercizio sulla superficie inferiore della pavimentazione; come si può osservare le fessure sono concentrate in corrispondenza delle impronte di carico degli scaffali e presentano aperture mediamente non superiori a 0.05 mm.

Solamente in alcuni punti posti in prossimità dei giunti di costruzione, si è rilevata la formazione di fessure con ampiezza massima pari a 0.07 mm. Dato che la pavimentazione è collocata all'interno di un edificio, le condizioni ambientali alle quali la struttura è soggetta, possono essere considerate di tipo "ordinario" (classe di esposizione XC1); di conseguenza, le ampiezze massime delle fessure sia all'intradosso che all'estradosso della pavimentazione sono in generale inferiori rispetto all'apertura di fessura limite $w_2=0.3$ mm prevista dalla normativa per le strutture dotate di armature "poco sensibili".

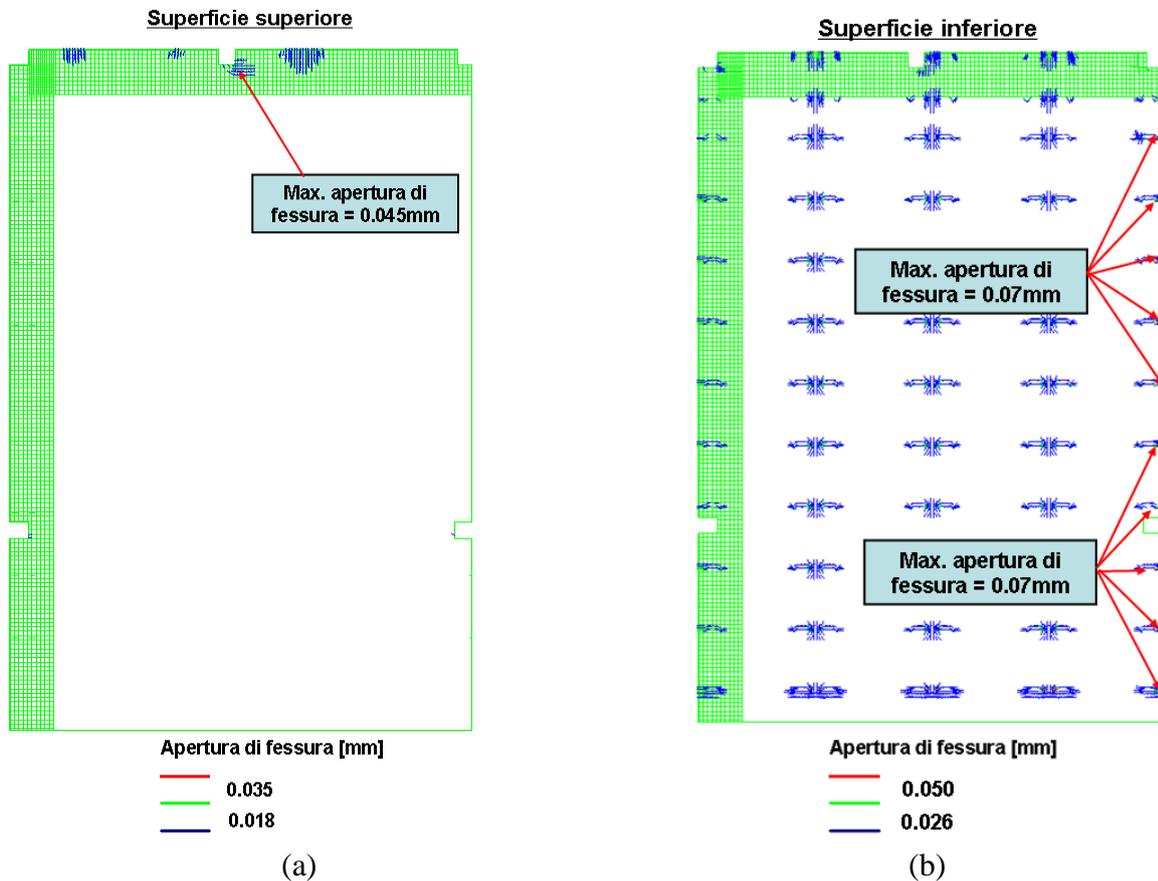


Figura B.16. Mappa delle fessure sulla superficie superiore (a) e inferiore (b) della pavimentazione, in corrispondenza del carico di esercizio.

APPENDICE C: SIMBOLOGIA

Notazioni generali

- (.)_c valore della grandezza (.) riferita al calcestruzzo;
- (.)_d valore di progetto (o di calcolo) della grandezza (.);
- (.)_{exp} valore della grandezza (.) dedotto da prove sperimentali;
- (.)_F valore della grandezza (.) riferita al composito fibrorinforzato;
- (.)_k valore caratteristico della grandezza (.);
- (.)_m valore medio della grandezza (.);
- (.)_R valore della grandezza (.) vista come resistenza;
- (.)_s valore della grandezza (.) riferita all'acciaio;
- (.)_S valore della grandezza (.) vista come sollecitazione;
- (.)_u valore ultimo della grandezza (.).

Lettere romane minuscole

- b* diametro della piastra – prova su piastra (CNR B.U. A.XVII n.92);
- b* larghezza della sezione trasversale della travetta (150 mm) (UNI EN 14651);
- b* raggio efficace - Calcolo elastico (Westergaard);
- b* raggio della fessura circolare esterna $b = 3.9 l$ - Calcolo a rottura (Meyerhof);
- d_f* diametro equivalente della fibra – diametro del cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra;
- f_{ctk}* resistenza caratteristica a trazione;
- f_{ctm}* resistenza a trazione media del calcestruzzo;
- f_L* resistenza convenzionale di trazione alla fessurazione (UNI EN 14651);
- f_{Lm}* valore medio della tensione di picco rilevata nell'intervallo di apertura di fessura $0 \div 0.05$ mm (UNI EN 14651 - Codice Modello del *fib*, 2010);
- f_{rd,F}* resistenza a trazione ultima della pavimentazione o del fibrorinforzato o del composito;
- f_{Rj}* resistenza residua del composito corrispondente ad un valore $CMOD = CMOD_j$ (UNI EN 14651);
- f_{R,jk}* tensione nominale determinata in corrispondenza dei valori $CMOD_j$ (UNI EN 14651 - Codice Modello *fib*, 2010);
- f_{R,jm}* valore medio della resistenza residua a trazione valutata per $CMOD_j$ (UNI EN 14651 - Codice Modello *fib*, 2010);
- h* spessore della piastra - Calcolo elastico (Westergaard);
- h_{sp}* distanza tra l'apice dell'intaglio e la superficie superiore del provino (125 mm) (UNI EN 14651);
- k* costante di Winkler - Calcolo elastico (Westergaard);
- k₁* valore del modulo di deformazione ottenuto da una piastra con $b = 300$ mm – Prova su piastra (CNR B.U. A.XVII n.92);
- l* distanza tra gli appoggi della travetta (500 mm) (UNI EN 14651);
- l* raggio di rigidità relativa - Calcolo elastico (Westergaard);
- l_f* lunghezza della fibra – distanza tra le estremità;
- l_d* lunghezza in sviluppo della fibra;
- m_{rd}* momento resistente ultimo per unità di larghezza;
- m_{rd,x}* momento resistente ultimo per unità di larghezza in direzione *x*;
- m_{rd,y}* momento resistente ultimo per unità di larghezza in direzione *y*;
- m_{rd,F}* momento resistente ultimo della pavimentazione o del fibrorinforzato o del composito per unità di larghezza;

- $m_{ud,x}$ momento sollecitante per unità di larghezza in direzione x, determinato tenendo conto del momento flettente m_x e del momento torcente m_{xy} ;
- $m_{ud,y}$ momento sollecitante per unità di larghezza in direzione y, determinato tenendo conto del momento flettente m_y e del momento torcente m_{xy} ;
- p pressione normale alla piastra (generalmente il peso proprio);
- r_r raggio equivalente dell'area di contatto A_c - Calcolo elastico (Westergaard);
- t spessore della pavimentazione.

Lettere romane maiuscole

- B** larghezza della struttura reale – prova su piastra (CNR B.U. A.XVII n.92);
- CEM II-B** cemento Portland composito seguito da una delle lettere, che rappresentano i costituenti principali del cemento, che sono presenti insieme al clinker nella percentuale, in massa, di 21-35%. (UNI EN 197-1);
- CEM III** cemento d'altoforno (UNI EN 197-1);
- CEM IV** cemento pozzolanico (UNI EN 197-1);
- CEM V** cemento composito (UNI EN 197-1);
- CMOD** Crack Mouth Opening Displacement - misura dell'apertura di fessura alla bocca dell'intaglio (UNI EN 14651);
- CMOD_j** valori prefissati di **CMOD** e derivati dal carico F_j con $j = (0.5; 1.5; 2.5; 3.5)$ (UNI EN 14651);
- E** modulo elastico del calcestruzzo;
- F2** resistenza al gelo/disgelo dell'aggregato grosso – metodo diretto con cicli di gelo/disgelo (UNI 8520-1 e 2 e EN 12620 - UNI EN 1367-1);
- F5/F6** classi di consistenza - misurate attraverso la tavola a scosse: classi di spandimento (UNI EN 12350-5),
- F_j** forza residua corrispondente a **CMOD** = **CMOD_j** (UNI EN 14651);
- F_L** valore massimo del carico nell'intervallo $0 \leq \text{CMOD} \leq 0.05$ mm (UNI EN 14651);
- FRC** calcestruzzo fibrorinforzato;
- K** costante elastica o modulo di reazione del terreno – Prova su piastra (CNR B.U. A.XVII n.92);
- K_A** coefficiente che tiene conto della dispersione dei risultati sperimentali, da assumersi pari a 1.20 – Controlli sul calcestruzzo fibrorinforzato;
- L** valore medio delle letture del cedimento della piastra a deformazione esaurita sotto una pressione di contatto della piastra sul terreno di 80 kPa – Prova su piastra (CNR B.U. A.XVII n.92);
- L_o** valore medio delle letture del cedimento della piastra a deformazione esaurita sotto una pressione di contatto della piastra sul terreno di 10 kPa – Prova su piastra (CNR B.U. A.XVII n.92);
- M₀** $|M^+| + |M^-|$ somma dei valori assoluti dei momenti resistenti di progetto riferiti alle fibre superiori $|M^+|$ ed alle fibre inferiori $|M^-|$ - Calcolo a rottura (Meyerhof);
- M_C** peso del calcestruzzo consegnato (in daN) – Controllo del volume di consegna;
- M_L** peso del calcestruzzo e del mezzo che lo trasporta, peso lordo (in daN) – Controllo del volume di consegna;
- M_V** peso per unità di volume del calcestruzzo (in daN/m³) secondo la UNI EN 12350-6 – Controllo del volume di consegna;
- M_T** peso del mezzo (tara in daN) – Controllo del volume di consegna;
- MS25** resistenza al gelo/disgelo dell'aggregato grosso – metodo indiretto resistenza al solfato di magnesio (resistenza al gelo/disgelo dell'aggregato grosso – metodo diretto con cicli di gelo/disgelo (UNI 8520-1 e 2 e EN 12620 - UNI EN 1367-2);

P	pozzolana naturale (UNI EN 197-1);
P_u	carico associato al cinematismo di collasso - Calcolo a rottura (Meyerhof);
Q	pozzolana calcinata (UNI EN 197-1);
SRA	riduttori di ritiro;
S1-S5	classi di consistenza misurate mediante lo Slump – test (UNI EN 12350-2);
T_i	temperatura interna;
T_s	temperatura esterna;
T1-T5	categorie di tolleranza dello spessore;
V	cenere volante silicea (UNI EN 197-1);
V_C	volume del calcestruzzo consegnato (in m ³) – Controllo del volume di consegna;
W	cenere volante calcica (UNI EN 197-1);
XF3	classe di esposizione per pavimentazioni esterne esposte a cicli di gelo-disgelo: elevata saturazione di acqua in assenza di agente disgelante (UNI EN 206-1 e UNI 11104);
XF4	classe di esposizione per pavimentazioni esterne esposte a cicli di gelo-disgelo: elevata saturazione di acqua in presenza di agente disgelante oppure acqua di mare (UNI EN 206-1 e UNI 11104).

Lettere greche minuscole/maiuscole

α	coefficiente di dilatazione lineare del calcestruzzo (1×10^{-5} 1/K);
ΔT	escursione termica media a livello baricentrico;
γ_{ct}	coefficiente di sicurezza per il calcestruzzo teso, da assumersi pari a 1.5;
γ_F	coefficiente di sicurezza del fibrorinforzato, da assumersi pari a 1.5;
μ	coefficiente di attrito;
v_{rd}	taglio resistente ultimo per unità di larghezza;
σ_t	tensione normale di trazione;
σ_0	tensione massima per carico al centro - Calcolo elastico (Westergaard);
σ_l	tensione massima per carico lungo il bordo - Calcolo elastico (Westergaard);
σ_a	tensione massima per carico su uno spigolo/vertice - Calcolo elastico (Westergaard);
$\sigma_{sh,0}$	massima tensione di trazione dovuta al ritiro al centro;
$\sigma_{sh,l}$	massima tensione di trazione dovuta al ritiro a lato;
$\sigma_{sh,a}$	massima tensione di trazione dovuta al ritiro all'angolo;
$\sigma_{T,0}$	massima tensione di trazione dovuta al gradiente termico al centro;
$\sigma_{T,l}$	massima tensione di trazione dovuta al gradiente termico a lato;
$\sigma_{T,a}$	massima tensione di trazione dovuta al gradiente termico all'angolo;
τ_{attr}	tensione tangenziale applicata all'intradosso della piastra;
ν	coefficiente di Poisson del calcestruzzo (normalmente 0.2 per il calcestruzzo integro);
ϕ	coefficiente di rilassamento;
ψ	fattore di vincolo, funzione della distanza fra i giunti, dello spessore della lastra e dell'attrito del sottofondo - Calcolo a rottura (Meyerhof).

APPENDICE D - NORMATIVA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO

In aggiunta alla Normativa Tecnica per le Costruzioni, costituiscono un utile riferimento le norme volontarie, le linee guida ed i documenti tecnici elencati nel seguito:

Terreno e massicciata

- CNR 29: 72. “Norme sui misti cementati”. Ristampa 1992.
- CNR 36: 73. “Stabilizzazione delle terre con calce”. Ristampa 1992.
- CNR 92: 83. “Determinazione del modulo di reazione "K" dei sottofondi e delle fondazioni in misto granulare”.
- CNR.69: 78. “Norme sui materiali stradali. Prova di costipamento di una terra”. Ristampa 2002.
- CNR 139: 92. “Norme sugli aggregati: criteri e requisiti di accettazione degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali”.
- CNR UNI 10006: 1963. “Costruzione e manutenzione delle strade - Tecnica di impiego delle terre”.
- CNR UNI 10014: 1964. “Prove sulle terre -Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra”.
- C.N.R. N. 146: 1992. “Determinazione dei moduli di deformazione Md e Md1 mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare”. Sostituisce la Norma Tecnica n. 9 del 1967.
- C.N.R. 22: 1972. “Peso specifico apparente di una terra in sito”, Ristampa 1992.

Materie prime per il calcestruzzo

- UNI EN 197/1:2011 “Cemento. Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni”.
- UNI EN 15167-1: 2006. “Loppa d’altoforno granulata macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.
- UNI EN 450-1:2007. “Ceneri volanti per calcestruzzo- Parte 1: Definizione, specificazioni e criteri di conformità”.
- UNI EN 450-2:2005. “Ceneri volanti per calcestruzzo - Parte 2: Valutazione della conformità”.
- UNI EN 13263-1: 2009. “Fumi di silice per calcestruzzo - Parte 1: Definizioni, requisiti e criteri di conformità
- UNI EN 13263-2: 2009. “Fumi di silice per calcestruzzo - Parte 2: Valutazione della conformità”.
- UNI EN 12620: 2013 “Aggregati per calcestruzzo”
- UNI 8520 – 2: 2005.” Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 12620 – Requisiti”.
- UNI 8520-22:2002. “Aggregati per confezioni di calcestruzzi - Determinazione della potenziale reattività degli aggregati in presenza di alcali”.
- UNI EN 934-2: 2009.” Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura”.
- UNI EN 480-11: 2006. “Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 11: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di aria nel calcestruzzo indurito”.
- UNI 8146: 2008. “Agenti espansivi non metallici per impasti cementizi - Idoneità e relativi metodi di controllo”.

- UNI 8148: 2008. “Agenti espansivi non metallici per impasti cementizi - Determinazione dell’espansione contrastata del calcestruzzo”.
- UNI EN 14889-1: 2006. “Fibre per calcestruzzo - Parte 1: Fibre di acciaio - Definizioni, specificazioni e conformità”.
- UNI EN 14889-2: 2006. “Fibre per calcestruzzo - Parte 2: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità”.

Calcestruzzo fresco ed indurito

- UNI EN 206-1 :2006, “Calcestruzzo: 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 12350-1: 2009. “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 1: Campionamento”.
- UNI EN 12350-2:2009. “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 2: Prova di abbassamento al cono”.
- UNI EN 12350-3: 2009. “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 3: Prova Vébé”.
- UNI EN 12350-5: 2009. “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 5: Prova di spandimento alla tavola a scosse”.
- UNI EN 12350-6: 2009. “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 6: Massa volumica”.
- UNI EN 12350-7: 2009. “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 7: Contenuto d’aria - Metodo per pressione”.
- UNI 7122: 2008. “Prova sul calcestruzzo fresco - Determinazione della quantità d’acqua di impasto essudata”.
- UNI 7123:1972.” Calcestruzzo. Determinazione dei tempi di inizio e fine presa mediante la misura della resistenza alla penetrazione.”
- UNI EN 12390-1: 2002. “Prova sul calcestruzzo indurito - Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme”.
- UNI EN 12390-2: 2009. “Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza”.
- UNI EN 12390-3: 2009. “Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini”.
- UNI EN 12390-5: 2009. “Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 5: Resistenza a flessione dei provini”.
- UNI EN 12390-6: 2010. “Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 6: Resistenza a trazione indiretta dei provini”.
- UNI EN 12390-7: 2009. “Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 7: Massa volumica del calcestruzzo indurito”.
- UNI 7087: 2002. “Calcestruzzo - Determinazione della resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo”.
- UNI CEN/TS 12390-9:2006. “Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 9: Resistenza al gelo-disgelo – Scagliatura”.
- UNI 11307: 2008. “Prova sul calcestruzzo indurito - Determinazione del ritiro”.
- UNI EN 12504-1: 2009. “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione”.
- UNI EN 12504-2: 2001. “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell’indice sclerometrico”.
- UNI EN 12504-3: 2005. “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 3: Determinazione della forza di estrazione”.
- UNI EN 12504-4: 2005. “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici”.

- UNI EN 14651: 2007. “Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua]”.

Piastra di calcestruzzo e strato di finitura

- UNI EN 13813: 2004. “Massetti e materiali per massetti - Materiali per massetti - Proprietà e requisiti”.
- UNI EN 13863-1: 2004. “Pavimentazioni di calcestruzzo - Metodo di prova per la determinazione dello spessore di una pavimentazione di calcestruzzo mediante controllo delle quote”.
- UNI EN 13863-3: 2005. “Pavimentazioni di calcestruzzo - Parte 3: Metodo di prova per la determinazione dello spessore di una pavimentazione di calcestruzzo a partire dall'utilizzo di carote”.
- UNI EN 13892-2: 2005. “Metodi di prova dei materiali per massetti - Parte 2: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione”.
- UNI EN 13892-3: 2004. “Metodi di prova per materiali per massetti - Parte 3: Determinazione della resistenza all'usura con il metodo Böhme”.
- UNI EN 13892-4:2005 “Metodi di prova dei materiali per massetti – determinazione della resistenza all'usura BCA”.
- UNI EN 13892-5: 2004. “Metodi di prova dei materiali per massetti - Parte 5: Determinazione della resistenza all'usura dovuta alle ruote orientabili dei materiali per massetti per lo strato di usura”.
- UNI EN 13892-8: 2004. “Metodi di prova dei materiali per massetti - Parte 8: Determinazione della forza di adesione”.
- UNI EN 13036: 2011. “Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali”.
- UNI EN 1081: 2001. “Rivestimenti resilienti per pavimentazioni - Determinazione della resistenza elettrica”.
- UNI EN 13529: 2004. “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Resistenza agli attacchi chimici severi”.
- UNI EN 13687-2: 2003. “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Determinazione della compatibilità termica - Cicli temporaleschi (shock termico)”.
- 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 ISO 4628. “Pitture e vernici - Valutazione del degrado dei rivestimenti - Indicazione della quantità e dimensione dei difetti, e dell'intensità di variazioni uniformi dell'aspetto”.
- UNI EN 15620: 2009. “Sistemi di stoccaggio statici di acciaio - Scaffalature portapallet - Tolleranze, deformazioni e interspazi”.
- DIN 15185: 1991. “Warehouse systems with guided industrial trucks; requirements on the ground, the warehouse and other requirements”.
- DIN 18202: 2005. “Tolerances in building construction – Structures”.
- British Standard 8204: 2002. “Screeds, bases and in-situ floorings. Concrete bases and cement sand levelling screeds to receive floorings. Code of practice”.
- D.M. - Ministero dei Lavori Pubblici 14 giugno 1989, n. 236. "Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica sovvenzionata e agevolata, ai fini del superamento e dell'eliminazione delle barriere architettoniche."

- UNI EN 14158: 2005. “Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione dell’energia di rottura”.
- UNI EN 14231: 2004. “Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza allo scivolamento tramite l’apparecchiatura di prova a pendolo”.

Norme ed istruzioni sulle pavimentazioni

- UNI 11146 (2005). “Pavimentazioni di calcestruzzo ad uso industriale”.
- CNR 169: 94. “Istruzioni sull’uso della terminologia relativa alle pavimentazioni ed ai materiali stradali”.
- UNI EN 13877-1:2013. “Pavimentazioni a base di calcestruzzo - Parte 1: Materiali”.
- UNI EN 13877-2:2013. “Pavimentazioni a base di calcestruzzo - Parte 2: Requisiti funzionali per pavimentazioni a base di calcestruzzo”.
- UNI EN 13877-3:2005. “Pavimentazioni a base di calcestruzzo - Parte 3: Specifiche per elementi di collegamento da utilizzare nelle pavimentazioni a base di calcestruzzo”.

Norme ed istruzioni di riferimento sulla progettazione

- UNI EN 1991-1-1: 2004. “Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-1: Azioni in generale - Pesi per unità di volume, pesi propri e sovraccarichi per gli edifici”.
- UNI ENV 1991-5:2002 “Eurocodice 1 - Basi di calcolo ed azioni sulle strutture - Parte 5: Azioni indotte da gru e altre macchine”.
- UNI EN 1992-1-1:2005. “Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”.

NOTA BENE: Gli Eurocodici citati vanno sempre intesi nella forma comprensiva delle Appendici Nazionali (Gazzetta Ufficiale n.73 del 27-3-2013).

- CNR DT204: 2006. “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”.
- Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2 febbraio 2009 n. 617 C.S.LL.PP. “Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008”.

Documenti tecnici e referenze internazionali

- AASHTO PP 34-99: 2005. “Standard Practice for Estimating the Cracking Tendency of Concrete”.
- ACI 302.1R-04: 2004. “Guide for Concrete Floor and Slab Construction”, American Concrete Institute.
- ACI 360: 2007. “Design of Slabs-on-Ground”, American Concrete Institute.
- ASTM C1028: 2007. “Standard Test Method for Determining the Static Coefficient of Friction of Ceramic Tile and Other Like Surfaces by the Horizontal Dynamometer Pull-Meter Method”.
- ASTM C1383:2004. “Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method”.
- ASTM C1740: 2010. “Standard practice for evaluating the condition of concrete plates using the impulse-response method”.
- ASTM D4748: 2010. “Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar”.
- ASTM F609: 2005. “Standard test method for using a Horizontal Pull Slipmeter (HPS)”.

- Beckett, D., 'A comparison of thickness design methods for concrete industrial ground floors', *4th International Colloquium on Industrial Floor*, January 1999, 12-16.
- The Concrete Society Technical Report n. 34: 2003. *Concrete industrial ground floors: A guide to design and construction*. Third Edition.
- *fib Model Code 2010 for concrete structures*. Ernst & sons, 2013.
- Falkner, H., Huang, Z. and Teutsch, M, 'Comparative study of plain and steel Fiber Reinforced concrete ground slabs', *Concrete International*, 17 (1), (1995), 45-51.
- Hillerborg, A., Mod er, M., and Petersson, P. E. (1976). "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements." *Cement and Concrete Research*, 6, 773-782.
- Kukreja, C.B., 'Ultimate strength of Fiber Reinforced Concrete slabs', In *Proceedings of International Symposium on Fiber Reinforced Concrete*, 16-19 December 1987, Madras, 237-255.
- Johansen K.W. (1962) - *Yield line theory* - William Clowes and Sons Ltd - London.
- Johansen K.W. (1968) - *Yield line formulae for slabs* - Cement and Concrete Association.
- Meda, A. and Plizzari, G.A., (2004). "New design approach for Steel Fibre Reinforced Concrete slabs-on-ground based on fracture mechanics", *ACI Structural Journal*, 101(3), pp. 298-303.
- Sorelli, L., Meda, A., Plizzari, G., (1997). "Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter". *ACI Structural Journal*, 103 (4), pp. 551-558.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. Mc Graw-Hill Company.
- Viggiani, C. (2003). *Fondazioni*. Hevelius Edizioni.
- Walker, W.W., and Holland, J.A., 'Design of unreinforced slabs-on-ground: made easy', *Concrete International*, 23 (5), (2001), pp.37-42.
- Westergaard, H. M. (1926). "Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis", *Public Roads*, 7(2), pp. 25-35.

Documenti tecnici nazionali

- CONPAVIPER: 2003. "Codice di Buona Pratica". III Edizione.
- CONPAVIPER: 2009. "Capitolato PAVICAL per calcestruzzo specifico per le pavimentazioni industriali". IV Edizione.
- CONPAVIPER: 2010. "Linee Guida CONPAVIPER per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni".

Il presente Documento Tecnico è stato predisposto da un Gruppo di studio così composto:

COMASTRI Prof. Claudio	– Università di Ferrara
FELICETTI Prof. Roberto	– Politecnico di Milano
FERRACUTI Ing. Barbara	– Università Nicolò Cusano, Roma
MARIANO Ing. Antonio	– ATECAP
MAZZOTTI Prof. Claudio	– Università di Bologna
MEDA Prof. Alberto	– Università di Roma “Tor Vergata”
PAGAZZI Ing. Gianluca	– ATECAP
PIROVANO Ing. Gian Luigi	– CONPAVIPER
PLIZZARI Prof. Giovanni, coordinatore	– Università di Brescia
SAVOIA Prof. Marco, coordinatore	– Università di Bologna
TATTONI Prof. Sergio	– Università di Cagliari
TROLI Ing. Roberto	– Enco S.r.L.

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione preliminare il 16 ottobre 2014 e messo in inchiesta pubblica dal 24 ottobre 2014 al 22 aprile 2015, dalla “Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni” del Consiglio Nazionale delle Ricerche, così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
AURICCHIO Prof. Ferdinando	- Università di Pavia
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
COSENZA Prof. Edoardo	- Università “Federico II”- Napoli
MACERI Prof. Franco, Presidente	- Università “Tor Vergata” - Roma
MANCINI Prof. Giuseppe	- Politecnico di Torino
MAZZOLANI Prof. Federico Massimo	- Università “Federico II”- Napoli
OCCHIUZZI Prof. Antonio	- Consiglio Nazionale delle Ricerche
PINTO Prof. Paolo Emilio	- Università “La Sapienza” - Roma
POGGI Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
ROYER CARFAGNI Prof. Gianni	- Università di Parma
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
SCARPELLI Prof. Giuseppe	- Università di Politecnica delle Marche
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento

Il documento è stato quindi approvato in versione definitiva in data 16/6/2016, a conclusione dell’inchiesta pubblica con le modificazioni che ne sono derivate, dalla “Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni”, così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
AURICCHIO Prof. Ferdinando	- Università di Pavia
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli

COSENZA Prof. Edoardo	- Università "Federico II"- Napoli
DI PRISCO Prof. Marco	- Politecnico di Milano
LAGOMARSINO Prof. Sergio	- Università di Genova
MACERI Prof. Franco, Presidente	- Università "Tor Vergata" - Roma
MANCINI Prof. Giuseppe	- Politecnico di Torino
MAZZOLANI Prof. Federico Massimo	- Università "Federico II" - Napoli
OCCHIUZZI Prof. Antonio	- Consiglio Nazionale delle Ricerche
PINTO Prof. Paolo Emilio	- Università "La Sapienza" - Roma
POGGI Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
PROTA Prof. Andrea	- Università "Federico II" - Napoli
ROYER CARFAGNI Prof. Gianni	- Università di Parma
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
SCARPELLI Prof. Giuseppe	- Università di Politecnica delle Marche
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento