POLITECNICO DI TORINO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Sovrastrutture prefabbricate ed ecocompatibili per piste ciclabili

Relatore:
Giuseppe CHIAPPINELLI
Correlatore:
Ezio SANTAGATA

Candidato:
Francesca GABALLO

Marzo 2021

A nonno Pippi e nonna Ada…

Indice

Indice delle figure ..... *III*

Indice delle tabelle ..... *IX*

Normative di riferimento ..... *XI*

Normative di supporto alla progettazione ..... **XI**

Introduzione *1*

1 Smart City *3*

1.1 Sostenibilità **6**

1.2 Riciclo materiali **7**

1.2.1 Fresato di pavimentazioni stradali 9

1.2.2 Materiale di Costruzione e Demolizione 12

1.2.3 Plastica riciclata 20

1.3 Mobilità sostenibile **26**

1.3.1 Piste ciclabili 27

2 Smart road *33*

2.1 Sistemi di sensoristica **34**

2.2 Arredo urbano Smart **38**

3 Strutture prefabbricate *43*

4 Caso studio *47*

4.1 Tipologie strutturali adottate per le piste ciclabili **48**

4.2 Dimensionamento del sistema di raccolta dell'acqua piovana **51**

4.2.1 Analisi pluviometrica 51

4.2.2 Altezza modulo di raccolta acqua 56

4.2.3 Dimensionamento caditoia 58

4.3 Caratteristiche della sotto-struttura (sottofondo e fondazione) **60**

4.3.1 Sottofondo 62

4.3.2 Fondazione 63

4.4 Dimensionamento strutturale della pavimentazione (criteri di analisi e verifica) **66**

4.4.1 Verifiche agli Stati Limite Ultimi per strutture in calcestruzzo non armato 67

4.4.2 Verifiche agli Stati Limite d'Esercizio per strutture in calcestruzzo non armato 69

4.4.3 Verifica agli Stati Limite Ultimi per strutture in plastica 69
4.4.4 Verifica agli Stati Limite d'Esercizio per strutture in plastica 70
4.4.5 Verifiche geotecniche 70
4.4.6 Analisi dei carichi 72
4.4.7 Combinazioni delle azioni 76
4.4.8 Combinazioni di carico adottate 79
4.4.9 Modello di calcolo e teoria delle piastre 80
4.4.10 Codice di calcolo e tipo di analisi 82
4.5 Tipologia A - Principali risultati delle analisi numeriche 87
4.5.1 Materiali 90
4.5.2 Analisi numerica della piastra 90
4.5.3 Risultati e verifiche della piastra 93
4.5.4 Analisi numerica della sella di sostegno della piastra 104
4.5.5 Risultati e verifiche della sella 107
4.6 Tipologia B - Principali risultati delle analisi numeriche 114
4.6.1 Materiali 114
4.6.2 Analisi numerica della sovrastruttura 115
4.6.3 Risultati e verifiche della sovrastruttura 118
4.7 Costruzione della sovrastruttura 124
4.7.1 Preparazione della fondazione 124
4.7.2 Trasporto blocchi e posa in opera 125
4.7.3 Giunti 129
4.7.4 Superficie 130
Conclusione 133
Bibliografia 135
Allegato 01
Allegato 02
Allegato 03
Allegato 04

Indice delle figure

Figura 1-1: Definizioni di Smart City da parte di differenti autori 4
Figura 1-2: Esempio di città tradizionale (sinistra), esempio di Smart City (destra) 4
Figura 1-3: Gerarchia del piano di gestione dei rifiuti definiti dalla direttiva 2008/98/EC 8
Figura 1-4: Rappresentazione di economia lineare (sinistra) ed economia circolare (destra) 9
Figura 1-5: Produzioni di conglometato bituminoso e conglomerato bituminoso di recupero (Anno 2006) 10
Figura 1-6: Schema rappresentate il concetto di Partial Blending 12
Figura 1-7: Ciclo di vita di un calcestruzzo convenzionale (sinistra) e di un calcestruzzo con aggregati riciclati (destra) 13
Figura 1-8: Quantità prodotte e precentuali medie di riciclaggio di rifiuti da C&D nei singoli paesi membri della UE (1999-2010) 14
Figura 1-9: Impianto mobile (sinistra), impinato fisso (destra) 15
Figura 1-10: Legge costitutiva del calcestruzzo 18
Figura 1-11: Modelli σ-ε per il calcestruzzo 19
Figura 1-12: Consumo plastica in Italia 20
Figura 1-13: Layout generale di un impianto per la selezione del materiale 21
Figura 1-14: Diagramma di flusso del reciclaggio della plastica 22
Figura 1-15: Case eco-friendly realizzate da Armacell 23
Figura 1-16: Dettaglio pista ciclabile di Zwolle (Olanda) 24
Figura 1-17: Comportamento a creep del polietilene 25
Figura 1-18: Rappresentazione schematica di una curva di carico per il polietilene 26
Figura 1-19: Paesi europei che utilizzano la bici per un maggior numero di spostamenti 28
Figura 2-1: Schema della prova del deflettometro a massa battente (FWD) 36
Figura 2-2: Intallazione dei sensori a fibra ottica (FOS) sotto la pavimentazione 36
Figura 2-3: Configurazioni di rete dei sensori wireless: (a) tipologia a stella, in cui tutti i nodi comunicano direttamente al gateway; (b) tipologia a maglie, dove i nodi comunicano tra loro 37

Figura 2-4: Esempi di sensori MEM: (a) inclinometro; (b) accellerometro 38
Figura 2-5: Esempi di panchine Smart 40
Figura 2-6: Esempi di dispositivi per manutenzione straordinaria per biciclette 40
Figura 2-7: Esempio di rastrelliera per ricarica e-bike 41
Figura 2-8: Esempio di Info-point smart 41
Figura 3-1: Esempi piste cicalbili prefabbricate: a sinistra Pista ciclabile “mOOve”; a destra Pista ciclabile a Krommenie (Olanda) 45
Figura 3-2: Esempi piste cicalbili prefabbricate: a sinistra Pista ciclabile a Zwolle (Olanda); a destra Copenhagenize Current 45
Figura 4-1: Pista ciclabile in sede propria in affiancamento al corpo stradale 48
Figura 4-2: Pista ciclabile in sede propria non in affiancamento al corpo stradale 48
Figura 4-3: Sezione tipo struttura Scenario A (misure in mm) 49
Figura 4-4: Sezione tipo struttura Scenario B (misure in mm) 51
Figura 4-5: Curve di probabilità pluviometrica 54
Figura 4-6: Slot per la raccolta acque piovane (misure in mm) - Scenario A 58
Figura 4-7: Slot per la raccolta acque piovane (misure in mm) - Scenario B 58
Figura 4-8: Dati perforazione e descrizione stratigrafia individuata 61
Figura 4-9: Definizione modulo k della fondazione 66
Figura 4-10: Momenti flettenti agenti su un concio di piastra 67
Figura 4-11: Parete soggetta a sforzo N_{Ed} 68
Figura 4-12: Ripartizione della temperatura in una lastra in presenza di gradiente termico 74
Figura 4-13: Deformazioni delle lastra dovute a variazioni giornaliere di temperatura 75
Figura 4-14: Rappresentazione carico accidentale 76
Figura 4-15: Stato tensionale della pavimentazione 81
Figura 4-16: Mappa dele tensioni 85
Figura 4-17: Mappa delle deformazioni 85
Figura 4-18: Esempio di processo non lineare che utilizza il processo incrementale 86
Figura 4-19: Convenzione dei segni per spostamenti e rotazioni (sinistra); 87
Figura 4-20: Tipologia A - configurazione 1 88
Figura 4-21: Tipologia A - configurazione 2 89

Figura 4-22: Tipologia A - configurazione 3 89
Figura 4-23: Immagine FEM elemento piastra 91
Figura 4-24: Applicazione sovraccarico distribuito 91
Figura 4-25: Applicazione sovraccarico puntuale 92
Figura 4-26: Applicazione azione della neve 92
Figura 4-27: Applicazione azione accidentale 92
Figura 4-28: Applicazione azione della temperatura 93
Figura 4-29: Mappa momenti sollecitanti dati dal sovraccarico 97
Figura 4-30: Mappa momenti sollecitanti dati da azione della temperatura 97
Figura 4-31: Mappa momenti sollecitanti dati da carico accidentale 98
Figura 4-32: Mappa taglio sollecitante dato da sovraccarico 98
Figura 4-33: Mappa taglio sollecitante dato da azione della temperatura 99
Figura 4-34: Mappa taglio sollecitante dato da carico accidentale 99
Figura 4-35: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore 100
Figura 4-36: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore 100
Figura 4-37: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello superiore 100
Figura 4-38: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello inferiore 101
Figura 4-39: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello superiore 101
Figura 4-40: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello inferiore. 101
Figura 4-41: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore 102
Figura 4-42: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore 102
Figura 4-43: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello superiore 103
Figura 4-44: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello inferiore 103
Figura 4-45: Mappa deformazioni relativi all'effetto d'imbarcamento 104
Figura 4-46: Immagine FEM Caso 1 105
Figura 4-47: Immagine FEM Caso 2 105
Figura 4-48: Immagine FEM Caso 3 105

Figura 4-49: Applicazione carichi permanenti, Caso 1 106
Figura 4-50: Applicazione carichi permanenti, Caso 2 106
Figura 4-51: Applicazione carichi permanenti, Caso 3 106
Figura 4-52: Mappa momenti sollecitanti dati da sovraccarico 107
Figura 4-53: Mappa momenti sollecitanti dati da carico accidentale 108
Figura 4-54: Mappa taglio sollecitante dato da sovraccarico 108
Figura 4-55: Mappa taglio sollecitante dato da carico accidentale 109
Figura 4-56: Mappa sforzo normaale sollecitante dato da sovraccarico 109
Figura 4-57: Mappa sforzo normale sollecitante dato da carico accidentale 110
Figura 4-58: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore 110
Figura 4-59: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore 111
Figura 4-60: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello superiore 111
Figura 4-61: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello inferiore. 111
Figura 4-62: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore 112
Figura 4-63: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore 112
Figura 4-64: Mappa reazioni del terreno sotto le combinazioni delle azioni 113
Figura 4-65: Mappa dei cedimenti..... 114
Figura 4-66: Immagine FEM – spessore 20 mm 116
Figura 4-67: Immagine FEM – spessore 30 mm 116
Figura 4-68: Applicazione carico permanente..... 117
Figura 4-69: Applicazione sovraccarico distribuito 117
Figura 4-70: Applicazione sovraccarico puntuale 117
Figura 4-71: Applicazione carico neve..... 118
Figura 4-72: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico distribuito..... 120
Figura 4-73: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico puntuale..... 120
Figura 4-74: Deformazioni indotte da sovraccarico distribuito..... 121
Figura 4-75: Deformazioni indotte da sovraccarico puntuale 121
Figura 4-76: Azioni agenti sui bulloni di collegamento 122
Figura 4-77: Verifica del bullone 122
Figura 4-78: Mappa reazioni del terreno sotto le combinazioni delle azioni 123

Figura 4-79: Mappa dei cedimenti..... 123
Figura 4-80: Predisposizione strato di fondazione 125
Figura 4-81: Rappresentazione movimentazione elementi in calcestruzzo..... 125
Figura 4-82: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello superiore 126
Figura 4-83: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello inferiore 126
Figura 4-84: Deformazioni indotte dal peso proprio 127
Figura 4-85: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello superiore 127
Figura 4-86: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello inferiore 128
Figura 4-87: Deformazioni indotte dal peso proprio 128
Figura 4-88: Giunto di dilatazione da adottare per la tipologia A 130
Figura 4-89: Giunto di dilatazione da adottare per la tipologia B 130

Indice delle tabelle

Tabella 1-1: Limiti uso di aggregati di riciclo in calcestruzzo 16

Tabella 1-2: Composizione della miscela di calcestruzzo riciclato rispetto a quello convenzionale di pari classe di resistenza 17

Tabella 1-3: Classificazione del PE in funzione della densità..... 25

Tabella 4-1: Precipitazioni di pioggia (mm) per le varie durate..... 52

Tabella 4-2: Valori tipici del tempo di ritorno 53

Tabella 4-3: Valori dei coefficienti di deflusso 55

Tabella 4-4:Portata di pioggia di progetto 56

Tabella 4-5: Coefficienti di scabrezza n di Manning 57

Tabella 4-6: Altezza minima da garantire per la canaletta 57

Tabella 4-7: Correlazione Modulo resiliente, CBR, Modulo di reazione del terreno 63

Tabella 4-8: Fuso granulometrico misto granulare..... 64

Tabella 4-9: Caratteristiche meccaniche miscela di misto granulare 65

Tabella 4-10: Effetto del sottofondo non trattato sul valore k..... 65

Tabella 4-11: Coefficienti di capacità portante 70

Tabella 4-12: Valore di pressione massima al piede in direzione perpendicolare alle pareti 73

Tabella 4-13: Gradienti di temperatura attesi nello spessore *h* della piastra di pavimentazione (10<*h*>25)..... 75

Tabella 4-14: Valori dei coefficienti ϒ da assumersi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi 77

Tabella 4-15: Valori dei coefficienti ci combinazione ψ per ponti ciclo/pedonali..... 78

Tabella 4-16: Definizione carichi applicati 79

Tabella 4-17: Definizione delle combinazioni di carico adottate..... 79

Tabella 4-18: Dati input per la formula di Westergaard..... 84

Tabella 4-19: Proprietà meccaniche Cls..... 90

Tabella 4-20: Valori di resistenza a compressione e trazione per le classi di calcestruzzo considerate 93

Tabella 4-21: Tensioni agenti sulla piastra, modulo E=28 GPa 94

Tabella 4-22: Tensioni agenti sulla piastra, modulo E=32 GPa 94
Tabella 4-23: Tensioni agenti sulla piastra, modulo E=35 GPa 95
Tabella 4-24: Deformazioni indotte dai carichi sulla piastra, modulo E= 28 GPa..... 95
Tabella 4-25: Deformazioni indotte dai carichi sulla piastra, modulo E=32 GPa..... 96
Tabella 4-26: Deformazioni indotte dai carichi sulla piastra, modulo E= 35GPa..... 96
Tabella 4-27: Proprietà meccaniche polietilene 115
Tabella 4-28: Tensioni agenti sulla struttura, modulo E=700 MPa..... 118
Tabella 4-29: Tensioni agenti sulla struttura, modulo E=1200 MPa..... 118
Tabella 4-30: Tensioni agenti sulla struttura, modulo E=2000 MPa..... 118
Tabella 4-31: Deformazioni indotte dai carichi sulla struttura, modulo E= 700 MPa . 119
Tabella 4-32: Deformazioni indotte dai carichi sulla struttura, modulo E= 1200 MPa 119
Tabella 4-33: Deformazioni indotte dai carichi sulla struttura, modulo E= 2000 MPa 119

Normative di riferimento

- Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008, relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive (Testo rilevante ai fini del SEE);
- DECRETO 28 marzo 2018, n. 69 - Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.
- ISO 15270: 2008 Plastics - Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste;
- UNI EN 13108-8 - Miscele bituminose – Specifiche del materiale: conglomerato bituminoso di recupero;
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale, di seguito "T.U. Ambientale 152/06";
- Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22;
- UNI EN ISO 14040:2006 - Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento;
- UNI EN 12620:2008 - Aggregati per calcestruzzo;
- AASHTO T274-82: "Resilient modulus of subgrade soils", 1982;

Normative di supporto alla progettazione

- D.M. 17.1.2018 – Norme tecniche per le costruzioni, di seguito "NTC"
- Circolare n.7, 21.1.2019 – Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M.17-01-2018;
- UNI EN1990 Eurocodice 0 – Criteri generali di progettazione strutturale;
- UNI EN1991-1- Eurocodice 1 – Parte 1: Azioni sulle strutture;
- UNI EN1991-2- Eurocodice 1 – Parte 2: Carichi da traffico sui ponti;
- UNI EN1992-1- Eurocodice 2 – Parte 1: Progettazione delle strutture in calcestruzzo;
- UNI EN1993-1 - Eurocodice 3 – Parte 1: Progettazione delle strutture di acciaio;
- CNR-DT 211/2014 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Pavimentazioni di Calcestruzzo (di seguito CNR);
- DM 30 novembre 1999, n. 557 "Regolamento recante norme per la definizione delle caratteristiche tecniche delle piste ciclabili";
- Istruzioni tecniche per la progettazione delle reti ciclabili – bozza Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture - Aprile 2014;

Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito ad una migrazione di massa delle popolazioni, dalle campagne verso le grandi città. Quest'urbanizzazione ha dato si la possibilità di crescita e sviluppo ai cittadini, ma al contempo ha portato dei problemi all'interno delle città come traffico, congestione dei trasporti, inquinamento ambientale e deterioramento delle infrastrutture. Le autorità competenti hanno quindi ritenuto necessario incentrare le risorse affinché la vita nella città potesse rispondere qualitativamente a queste problematiche, concentrandosi su tematiche quali la riqualificazione urbana, il corretto utilizzo delle risorse, la sostenibilità ambientale, etc.

Lo sviluppo sociale, ambientale ed economico delle città è stato possibile grazie al diffondersi della "Smart City", letteralmente la città intelligente, che ha permesso ai cittadini di migliorare la propria condizione, grazie alla maggiore attenzione prestata alla qualità della vita e ai bisogni dei singoli cittadini.

Si è presentata quindi la necessità di focalizzarsi sulla realizzazione di nuove infrastrutture stradali per la mobilità ecologica all'interno del centro abitato, che possano essere al contempo funzionali e al passo con lo sviluppo tecnologico. A questi requisiti rispondono le piste ciclabili che negli ultimi anni si sono ampiamente sviluppate principalmente nei paesi del nord Europa, in particolare in città come Copenaghen e Amsterdam.

Il crescente incremento del traffico, e quindi dell'utilizzo delle infrastrutture stradali, è causa di un deterioramento precoce delle pavimentazioni. È necessario quindi gestire questo problema mediante sistemi innovativi che possano prevederlo, ed ideare delle tecniche di manutenzione locale e speditiva prima che il danno si possa estendere a tutta la pavimentazione.

La crescita demografica ha inoltre causato quella che viene definita "emergenza rifiuti" derivante della grande quantità conferita in discarica. Questa preoccupazione ha attirato l'attenzione del mondo della progettazione civile, che ha risposto cercando di trovare il modo di implementare materie riciclabili, all'interno di miscele innovative, andando a sostituire parzialmente o totalmente i materiali tradizionali usati nelle costruzioni.

Lo scopo del presente lavoro di tesi è progettare una sovrastruttura stradale che possa implementare i concetti precedentemente esposti in un unico sistema, ovvero la progettazione di un sistema prefabbricato, partendo dallo studio di miscele con materiali sostenibili. L'idea è realizzare moduli dotati dallo spazio necessario per il passaggio di cavi, tubazioni e per la raccolta e smaltimento dell'acqua piovana; realizzare moduli pensati per facilitare la manutenzione ordinaria; dotare la struttura di un sistema di sensoristica avanzata utilizzabile per la gestione e la manutenzione predittiva della sovrastruttura e dei sottoservizi.

Si tratta di una multipla innovazione:

- Innovazione di miscela: realizzazione di una miscela composta da rifiuti che se non utilizzati verrebbero conferiti in discarica;
- Innovazione di processo: la realizzazione di moduli prefabbricati permette di creare in stabilimento moduli tutti uguali eliminando quindi gli errori di messa in opera.
- Innovazione nella manutenzione: i moduli posso essere ispezionati singolarmente ed eventualmente sostituiti eliminando il problema delle manutenzioni invasive effettuate su una normale pavimentazione;
- Innovazione tecnologica: applicazione del sistema sensoristico che rende la pavimentazione un sistema intelligente.

L'idea della tesi è stata avvallata dal progetto, finanziato dalla Regione Piemonte, ECOSMART 2.0, che ha come obiettivo la realizzazione di una sovrastruttura stradale da utilizzare per la realizzazione di una pista ciclabile. L'idea è quella di realizzare una sovrastruttura in moduli prefabbricati realizzati con tecniche che prevedono l'uso di miscele ecocompatibili con materiali di riciclo quali plastica, fresato di pavimentazioni, calcestruzzo di recupero, da inserire nell'area urbana della provincia di Cuneo.

In questo contesto, il presente elaborato ha come obiettivo il dimensionamento strutturale e funzionale della sovrastruttura in sinergia con l'idea progettuale di ECO SMARTROAD 2.0. Al fine di proporre più soluzioni progettuali, da impiegare in base all'area di posa, verranno analizzati due scenari:

- Scenario A da utilizzare per la realizzazione di una pista ciclabile in sede propria in affiancamento al corpo stradale;
- Scenario B: da utilizzare per la realizzazione di piste ciclabili in sede propria non in affiancamento.

1 Smart City

La città assume sempre più un ruolo chiave nello sviluppo della società. Il 55% della popolazione mondiale vive in aree urbane. Nel 1950 questa percentuale era pari al 30%, ma si stima che nel 2050 arriverà ad essere il 68%; inoltre l'ONU stima che la popolazione mondiale, tra il 2017 e il 2050, aumenterà del 29%. (Marzouk e Othman 2020). Da un lato, l'urbanizzazione ha dato la possibilità di crescita e sviluppo ai cittadini, ma di contro, con l'espansione delle popolazioni nelle città, ci sono esigenze sempre più crescenti legate alla vita urbana, come la governance ambientale, la sicurezza pubblica, la pianificazione urbana, l'utilizzo delle risorse, il risparmio energetico, l'assistenza domiciliare, le comunicazioni interpersonali, attività sociali, oltre a problemi legati alla salute, al traffico, alla congestione dei trasporti, all'inquinamento e al deterioramento delle infrastrutture (He, et al. 2014). Tali problemi devono essere affrontati in modo intelligente e sostenibile affinché non venga ostacolata la crescita delle città. Per gestire questi problemi, lo sviluppo tecnico ha cercato di accelerare nella ricerca di soluzioni energetiche sostenibili, tecnologie di costruzione, IoT, robotica e scienza dei dati. Le città si trovano quindi al centro dello sviluppo dell'innovazione. È in questo scenario la percezione che le tecnologie dell'era digitale possano fornire un aiuto nella risoluzione di problematiche che affliggono i centri urbani (Srivastava e Mostafavi 2018) (Kankaala, et al. 2018).

La soluzione è quella che viene identificata come *Smart City,* letteralmente "la città intelligente", resa tale grazie all'utilizzo di tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni (ICT-*Information and Communication Technologies*). Questi sensori monitorano l'ambiente urbano in tempo reale, ed è possibile quindi reagire in tempo, è possibile stabilire un controllo automatico, raccogliere informazioni, facilitare vari servizi e migliorare quindi la vita urbana. (He, et al. 2014).

Ad oggi il termine Smart City è ampiamente utilizzato ma non esiste una definizione univoca, certo è che a questo concetto si legano termini quali "città futura", "città digitale" (Laufs, Borrion e Bradford 2020). Uno studio pubblicato su Technological Forecasting & Social Change (2019), ci mostra come molti autori e associazioni si sono interessati all'argomento dando definizioni diverse tra loro (Figura 1-1).

Authors/institution/organization	Smart city definition
Achaerrondo et al. (2011, p. 1)	A finite unit of a local entity (district, city, or even region or small country), which declares and makes a conscious effort to have a comprehensive approach to the use of information and communication technologies for the analysis in real time, in order to transform its essential modus operandi into one or more of the following areas: generation, supply and use of energy, environment, government, mobility and construction.
AMETIC (2012)	The term smart city refers to a concept of sustainable city, which offers a series of services and benefits that raise the quality of life of its inhabitants, and at the same time allows the city to increase its competitiveness and its ability to grow economically "And that" the common element that allows developing each of these axes is the use and application of Information and Communication Technologies (ICT).
Ben-Letaifa (2015, p. 141)	A city is "smart" when that city can integrate and synchronize formal leadership and endogenous democratic participation in the IT-based urban ecosystem. Smart cities are both creative and intelligent.
European Commission (2014)	"A smart city is a place where the traditional networks and services are made more efficient with the use of digital and telecommunication technologies, for the benefit of its inhabitants and businesses. With this vision in mind, the European Union is investing in ICT research and innovation and developing policies to improve the quality of life of citizens and make cities more sustainable in view of Europe's 20-20-20 targets."
Fundación Telefónica (2011)	Smart city is a city that uses information and communication technologies to make the critical infrastructure, components and public services it provides more interactive and efficient for its inhabitants.
Giffinger et al. (2007)	That city in which Information and Communication Technologies play a major role in one or several sectors.
Holland (2008, p. 306)	Smart cities "…are territories with a high capacity for learning and innovation, which is built-in to the creativity of their population, their institutions of knowledge creation and their digital infrastructure for communication. …. [and are concerned] with people and the human capital side of the equation, rather than blindly believing that **IT** by itself can automatically transform and improve cities."
Kondepudi et al. (2014)	A smart sustainable city is an innovative city that uses information and communication technologies (ICTs) and other means to improve quality of life, efficiency of urban operation and services, and competitiveness, while ensuring that it meets the needs of present and future generations with respect to economic, social and environmental aspects.
Richter et al. (2015, p. 214)	"A smart city is an agglomerated area affected by a high concentration of learning and innovation as a result of creative citizens and institutions as well as the implementation of a digital infrastructure with the overall objective of achieving economic growth and a high quality of life while keeping in mind the scarcity of natural resources."

Figura 1-1: Definizioni di Smart City da parte di differenti autori

Alcuni sostengono però che il concetto di città intelligente sia la naturale evoluzione di quelle che erano le iniziative precedenti, ovvero la città digitale, la città dell'informazione e la città sostenibile (Marzouk e Othman 2020).

Ma qual è la differenza sostanziale tra "città tradizionale" e "città intelligente"? Nel primo caso abbiamo un sistema costituito da sottosistemi che sono in grado di interagire solo con il loro ambiente, quindi i sistemi sono per lo più autonomi e non collaborativi con altri, a differenza delle città intelligenti, in cui il principale obiettivo è quello di interconnettere diversi sistemi e sottosistemi tra loro, per aumentare la qualità della vita, ma anche il risparmio energetico o ridurre le emissioni (Loma e Pribyl 2020). Quindi la gestione delle città tradizionali si basava solo sulla pianificazione urbana, invece la gestione delle città intelligenti prevede il coordinamento tra vari parti interessate, quali istruzione, sanità, traffico, ambiente, etc.. Si vive quindi in un unico macrosistema in cui viene utilizzata la tecnologia in base al carattere della città, bisogni e risorse (Marzouk e Othman 2020). Lo sviluppo deriva da una migliore connessione, più efficiente e sostenibile per l'ambiente, dando vita a una città più attraente per l'uomo in cui vivere e lavorare.

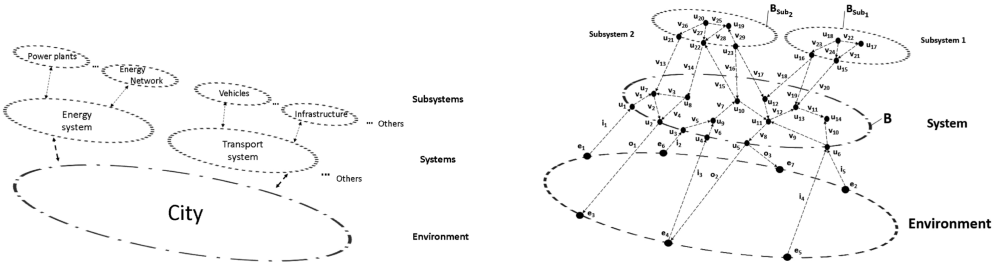


Figura 1-2: Esempio di città tradizionale (sinistra), esempio di Smart City (destra)

La nascita del fenomeno Smart City si può ricondurre al 2010, anno in cui l'azienda di consulenza Frost & Sullivan ha identificato 40 città in cui era in corso la trasformazione verso un mondo intelligente, ma già dopo due anni la cifra è notevolmente aumentata. Nel 2012 le città in cui era stato avviato il processo di innovazione erano ca. 140 (Srivastava e Mostafavi 2018). È stato necessario sviluppare le Smart Cities per alleviare i problemi delle città moderne andando incontro ai bisogni dei cittadini, non basta quindi dotare la città di ICT, ma bisogna anche aggiungere valore sociale attraverso innovazione e creatività (Barba-Sànchez, Arias-Artùnez e Orozco-Barbosa 2019). La Smart City porta ad avere città sicure, sostenibili, inclusive e di facile utilizzo, nella quale i concetti chiave sono innovazione, partecipazione, collaborazione e coordinamento (Hennelly, Öberg e Graham 2015).

"La Commissione europea (CE) definisce le città intelligenti come luoghi in cui le reti e i servizi tradizionali sono resi più efficienti con l'uso delle tecnologie digitali e di telecomunicazione a beneficio dei suoi abitanti e delle loro attività. Adottando le ITC come parte della loro fornitura di servizi, le città sono state in grado di migliorare le proprie strutture di smaltimento dell'acqua, adottare modi efficienti di illuminazione e riscaldamento degli edifici e migliorare le reti di trasporto urbano. Dato il significato della visione tecnologica, diversi stati nazionali hanno messo in atto nuove politiche con un piano ambizioso per trasformare le loro città in città intelligenti" (Kummitha 2019). Le città intelligenti adottano quindi l'infrastruttura di rete, che comprende diverse tecnologie quali sensori per semplificare il traffico, tecnologie domestiche per l'efficienza energetica e la sicurezza avanzata; le ICT non sono utili solo allo sviluppo sociale, culturale e urbano delle città, ma d'aiuto anche per le imprese grazie ai sensori utilizzati.

"L'UE ha proposto sei parametri smart: la promozione e il rafforzamento del recupero edilizio, la produzione e la gestione integrata delle diverse fonti energetiche rinnovabili (smart environment); la promozione del proprio territorio attraverso una virtualizzazione del patrimonio culturale, delle tradizioni e la restituzione in rete come bene comune per i propri cittadini e visitatori (smart living); lo sviluppo di tecnologie e sistemi funzionali per la mobilità, urbana e interurbana a basso impatto ambientale (smart mobility); il potenziamento delle opportunità di condivisione della conoscenza e dell'accesso al mondo del lavoro, attraverso la partecipazione dei cittadini alla promozione del territorio (smart people); la visione strategica del proprio sviluppo e la definizione in base a questo delle scelte e linee di azione in grado di coinvolgere i cittadini nei temi di rilevanza pubblica, nella promozione di azioni di sensibilizzazione ed utilizzazione delle tecnologie (smart governance); gli investimenti nella ricerca, la spesa pubblica efficiente e lo sviluppo dell'imprenditoria (smart economy)" (Vattano 2013).

Per sviluppare città intelligenti e sostenibili, la fase di pianificazione urbana è fondamentale. Questo prevede la collaborazione tra BIM (Building Information Modelling) e GIS (Geographic information system), per pianificare e prevedere i

requisiti dell'infrastruttura. Ciò aiuta gli urbanisti e manager a prendere decisioni circa le fasi di sviluppo e espansione delle città, poiché la modellazione influenza le prestazioni della città (Marzouk e Othman 2020).

Ma da cosa è costituita effettivamente la Smart city? Una rete di sensori intelligenti, che captano le informazioni da trasferire ai data center/clouds, in cui i dati vengono memorizzati, gestiti e analizzati. Questo costituisce il nucleo della città intelligente (Hennelly, Öberg e Graham 2015) (He, et al. 2014). Il rilevamento dei dati non deriva solo dai sensori inseriti nelle infrastrutture, ma anche dai cittadini: la proliferazione dei dispositivi mobili ha reso possibile il rilevamento partecipativo. L'interazione dei cittadini nello sviluppo dei nuovi sistemi è parte integrante dell'iniziativa Smart, i cittadini agiscono come co-creatori e utenti delle ICT. Come ci presentano Srivastava e Mostafavi (2018) nel loro studio, le persone possono interagire ad esempio caricando le foto di un qualsiasi problema in strada, questi dati vengono indirizzati alle autorità competenti per un'azione adeguata e tempestiva; l'illuminazione della strada è resa intelligente mediante dei sensori che rilevano la presenza di persone e/o veicoli, e si accendono solo quando vi sono questi passaggi, in questo modo si gioca anche sul concetto di risparmio energetico ed economico; un altro aspetto potrebbe essere l'installazione di sensori all'interno di parcheggi, in modo da dichiarare se vi è spazio libero mediante una piattaforma online, in questo modo le persone risparmiano tempo, denaro nel cercare parcheggio.

In definitiva le città intelligenti mirano a fornire ai cittadini servizi migliori, grazie alla loro facilità di utilizzo e accessibilità. Un impegno costante delle Smart city è quello di incoraggiare la partecipazione dei residenti all'uso di questi sistemi per fornire soluzioni alla vita di ogni giorno. È quindi un risolvere problemi reali mediante persone reali.

1.1 Sostenibilità

Secondo una definizione recente dell'Osservatorio Nazionale delle Smart City, la città intelligente è una "*proiezione astratta di comunità del futuro, un perimetro applicativo e concettuale definito da un insieme di bisogni che trovano risposte in tecnologie, servizi e applicazioni riconducibili a domini diversi, quali smart building, inclusion, energy, environment, government, living, mobility, education, health, people e molto altro ancora*"; pertanto una città intelligente deve anche includere interventi a livello sociale, ambientale ed economico volti alla riduzione degli impatti ambientali e la risoluzione delle emergenze ambientali ritenute prioritarie (ad esempio il consumo di suolo, la riqualificazione urbana ed energetica, la mobilità, la gestione dei rifiuti) con i correlati benefici economici.

Lo sviluppo della "città intelligente" ha permesso agli abitanti di migliorare la propria condizione sociale ed economica, prestando una maggiore attenzione alla qualità della vita e ai bisogni dei singoli cittadini, tuttavia, a questo miglioramento individuale non si

è affiancata una crescente qualità della vita collettiva (Stelluti Scala, Soliveri e Testa 2020).

Il concetto di Smart City è spesso erroneamente riferito esclusivamente alla tecnologia, tralasciando i temi dell'ambiente e della sostenibilità. Rendere intelligente una città però significa sottoporla a interventi di sviluppo volti al miglioramento della sostenibilità, della qualità dei servizi offerti ai cittadini, tali da garantire la partecipazione attiva dei cittadini (Facciolla).

Le città devono puntare a integrare lo sviluppo tecnologico con diverse funzioni/componenti quali: mobilità, gestione delle risorse energetiche, naturali, idriche e del ciclo di rifiuti, qualità dell'aria, uso del territorio, rete di servizi, edilizia ma anche economia, partecipazione sociale, aumento di occupazione e sicurezza del cittadino.

Sostenibilità urbana significa sia qualità del territorio che risparmio energetico. Con il primo concetto ci si orienta verso un ambiente urbano più pulito e più sano, mentre con il secondo ci si orienta verso scelte in termini di composizione delle fonti e di uso consapevole delle energie, soprattutto quelle in esaurimento o pericolose (Mazzeo e Calenda 2011).

Una città sarà quindi più sostenibile se riuscirà a garantire bassi impatti economici, sociali ed ambientali, per tutta la sua comunità presente e futura, quindi se sarà più resiliente. La resilienza diventa perciò una caratteristica fondamentale che contribuisce alla sostenibilità della citta (Asprone e Manfredi 2018).

La rigenerazione urbana ha volto lo sguardo verso una città più verde, la cosiddetta *Green City* basata su aspetti fondamentali (Stelluti Scala, Soliveri e Testa 2020):

- Qualità urbanistica e architettonica delle città;
- Infrastrutture verdi;
- Buona qualità dell'aria;
- Mobilità urbana più sostenibile;
- Incentivi per la mobilità sostenibile;
- Utilizzo delle risorse in modo efficiente e circolare;
- Tecnologie applicate al risparmio energetico;
- Regolamentazione del consumo del suolo.

1.2 Riciclo materiali

Quando si parla di ambiente in una Smart City si toccano tantissimi temi, come il verde urbano, l'uso di energie rinnovabili e anche la gestione dei rifiuti, che oggi è spesso un tema problematico in moltissime città, e che risulta appunto essere una delle sfide più importanti nella riuscita dello sviluppo della Smart City (Costa 2017).

Sebbene possa sembrare una contraddizione, i rifiuti rappresentano una delle maggiori opportunità di crescita sostenibile per l'ambiente, carente di risorse primarie. I rifiuti

costituiscono infatti una enorme riserva di risorse che, se opportunamente gestita e valorizzata, può garantire un approvvigionamento sostenibile e continuo di materiali ed energia. Le risorse naturali non sono infinite, così come non lo è la capacità di smaltimento dei rifiuti.

Secondo l'International Solid Waste Association, l'associazione mondiale di operatori del settore trattamento e smaltimento rifiuti, ogni anno vengono prodotti circa 5 miliardi di tonnellate di rifiuti, di cui metà rappresentata da rifiuti urbani, quindi prodotti dai singoli cittadini, e l'altra metà rappresenta i rifiuti "speciali" provenienti da attività industriali (2016).

La Direttiva 2008/98 del Parlamento Europeo e del Consiglio indica un ordine gerarchico per la gestione dei rifiuti, di qualsiasi tipologia essi siano. Come mostrato in figura, la priorità è limitare la quantità di rifiuti partendo da una prevenzione, successivamente preferire riuso, riciclaggio o recupero del rifiuto. Lo smaltimento in discarica risulta essere lo step ultimo, nel caso in cui nessuna delle opzioni prima citate possa essere attuata.

Figura 1-3: Gerarchia del piano di gestione dei rifiuti definiti dalla direttiva 2008/98/EC

È di grande valore, ambientale ed economico, il recupero e il riutilizzo dei materiali al fine di preservare le risorse naturali. È per questo che a questo pensiero è strettamente collegato il concetto di un modello economico che viene definito circolare: punta alla riduzione dello scarto e, quindi, dei rifiuti da conferire in discarica. Si contrappone pertanto al tradizionale modello lineare che prevede un inizio, con l'estrazione ed uso di una risorsa, e una fine con generazione di un rifiuto.

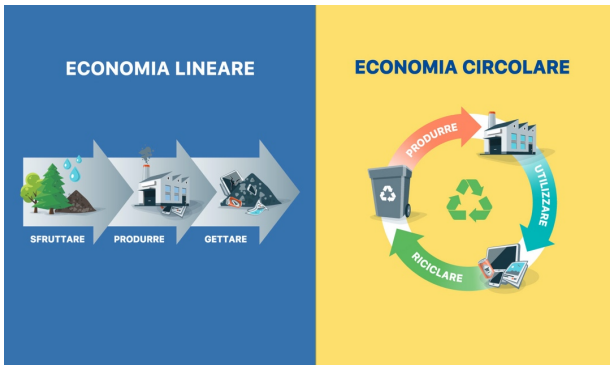


Figura 1-4: Rappresentazione di economia lineare (sinistra) ed economia circolare (destra)

L'economia circolare implica il passaggio da un'economia lineare "make-take-dispose" a un'economia circolare basata su "reduce, reuse and recycle ". L'economia circolare è un modello di sistema chiuso che promuove il riutilizzo dei prodotti, genera valore dai rifiuti ed evita il conferimento di materiale recuperabile in discarica. Questo processo punta alla trasformazione degli scarti e dei rifiuti in nuove risorse da reintrodurre nel ciclo, dando loro una seconda vita. Si riducono così sia la quantità di "nuove" risorse necessarie sia la quantità di rifiuti da smaltire. Questo concetto è sempre più presente nell'ambito delle costruzioni civili. Esempi sono (Carra 2019):

- Circular House a Londra, un edificio nato dall'idea che lo smantellare possa essere l'origine di un nuovo edificio, dimostra quindi che i materiali utilizzati nelle costruzioni mantengono un valore nel tempo;
- People's Pavillion ad Amsterdam, una struttura costituita esclusivamente da materiali di scarto, sviluppata con una logica modulare che permette lo smontaggio e riuso dei materiali per altre funzioni.

Si parla di riciclo ovvero l'insieme di strategie e metodologie volte a recuperare materiali utili dai rifiuti, al fine di riutilizzarli anziché smaltirli direttamente in discarica. Il materiale riciclato previene dunque lo spreco di materiali potenzialmente utili, garantisce maggiore sostenibilità, riduce il consumo di materie prime, l'utilizzo di energia e l'emissione di gas serra associati.

1.2.1 Fresato di pavimentazioni stradali

La realizzazione di sistemi stradali ecosostenibili parte dall'impiego di materiali di scarto, destinati alla discarica, poiché ritenuti materiale pericoloso e quindi difficile da riciclare. Tra questi materiali vi è sicuramente il fresato di pavimentazioni, ovvero il risultante delle operazioni di fresatura realizzate sulle pavimentazioni esistenti.

Il conglomerato bituminoso da recupero (noto anche come Fresato o RAP - Reclaimed Asphalt Pavement) è costituito da aggregati, bitume e filler uniti tra loro, che formano insieme elementi di diverse dimensioni e composizione.

Dagli anni '90 si è visto un incremento dei volumi di traffico, che ha contribuito al rapido degrado delle pavimentazioni; le amministrazioni stradali interessate nel rifacimento delle pavimentazioni, si sono trovate dinanzi a un doppio problema: da una parte il troppo materiale di scarto derivante dalla fresatura, dall'altra la riduzione delle materie prime utilizzate nella realizzazione del conglomerato bituminoso. A causa di questi problemi è stato necessario pensare a nuove tecnologie tali da riutilizzare le vecchie e ormai ammalorate pavimentazioni, al fine di produrne delle nuove (Ungureanu, et al. 2020).

I precursori nel riutilizzo del fresato sono stati gli Stati Uniti, il primo utilizzo di questa metodologia risale ai primi anni del 1900, ma divenne popolare negli anni Sessanta, principalmente a causa dell'aumento del costo del greggio da parte dei Paesi Arabi. In America sono prodotti circa 68 milioni di tonnellate di fresato ogni anno, e il 95% dello stesso è riutilizzato nella produzione di nuove pavimentazioni. In Europa si è iniziato ad utilizzare questa pratica negli ultimi anni, nonostante le quantità di fresato prodotto fossero comunque molto ingenti. In Italia, in particolare, nell'anno 2016, sono state prodotte circa 9 milioni di tonnellate di fresato, ma le quantità riutilizzate sono circa il 20-30% di quello prodotto annualmente (Venturini 2017).

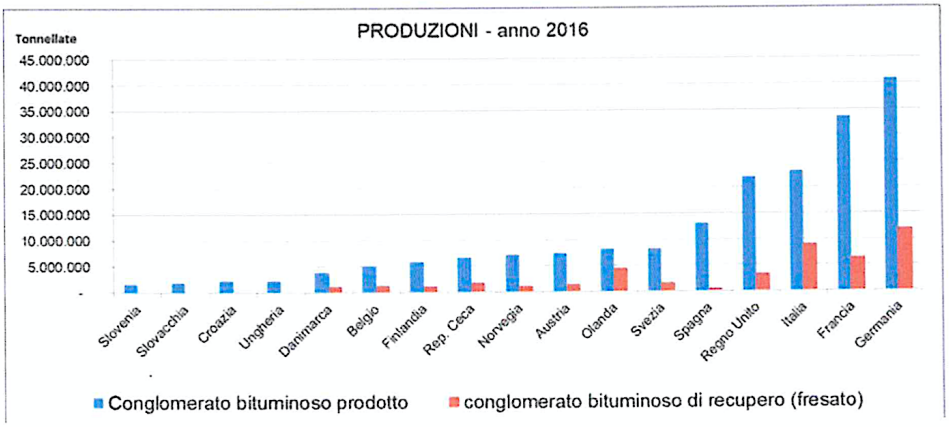


Figura 1-5: Produzioni di conglometato bituminoso e conglomerato bituminoso di recupero (Anno 2006)

Grazie all'utilizzo del fresato si ha una ripetizione perpetua del ciclo "produzione – distribuzione – consumo – riuso/riparazione/riciclo" e i quantitativi destinati a discarica sono praticamente nulli (Modello dell'economia circolare) (Venturini 2019)

Per produrre nuove miscele contenenti RAP, questo deve essere trattato, gestito e poi reinserito all'interno del ciclo produttivo, tutto secondo Normativa.

Il riutilizzo del RAP è regolamentato dalle Normative vigenti tra cui il D.M. dell'Ambiente del 28 Marzo 2018, n° 69, in vigore dal 3 Luglio 2018, UNI/TS 11688 (Criteri di qualificazione e impiego del conglomerato bituminoso di recupero proveniente dalla rimozione di pavimentazioni esistenti) e la UNI EN 13108-8 (Miscele bituminose – Specifiche del materiale: conglomerato bituminoso di recupero).

L'impiego del RAP deve rispondere a quanto prescritto dal TU Ambientale 152/06. In particolare, la messa in riserva e l'impiego di fresato per gli usi sopra descritti, al di fuori dei conglomerati bituminosi, è legato all'esecuzione del "test di cessione" sul rifiuto eseguito sul materiale tal quale, secondo il metodo riportato in allegato n° 3 al Decreto Ministeriale del Ministero dell'Ambiente n° 72 del 5 febbraio 1998 (Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del DL n° 22 del 5 febbraio 1997).

I materiali risultanti positivi o vengono inertizzati prima dell'uso (per lavaggio o per rivestimento con calce) o devono essere inviati a discarica autorizzata. La durata della messa a riserva provvisoria non deve mai superare un anno, ed il suo utilizzo al di fuori dei conglomerati bituminosi deve essere accompagnato da un progetto da presentare con la richiesta di sistemazione definitiva.

Le fasi di gestione del fresato sono le seguenti:

- demolizione della pavimentazione;
- controllo;
- trattamento di frantumazione e/o vagliatura;
- stoccaggio e gestione dei cumuli;
- utilizzo.

Le tecnologie di riciclaggio del fresato possono essere classificate in funzione del luogo in cui avvengono (in situ col treno di riciclaggio, in impianto fisso, in cantiere con impianti mobili o semoventi), delle temperature di produzione (caldo, tiepido e freddo) e del tipo di leganti utilizzati (bituminosi o idraulici). Ogni tecnologia comporta la necessità di integrare le nuove miscele con prodotti e/o additivi per il raggiungimento delle adeguate prestazioni finali e per la garanzia della vita utile della pavimentazione.

La produzione di conglomerati bituminosi a caldo (HMA – Hot Mix Asphalt) è il metodo più utilizzato nel mondo, è prevede solitamente il riscaldamento del fresato, che consente il rammollimento del bitume e quindi una miscelazione con le materie prime aggiunte.

La produzione di conglomerati bituminosi a freddo (CMA – Cold Mix Asphalt) non prevede un riscaldamento del fresato, può avvenire in situ o in impianto. Il metodo prevede l'utilizzo di diversi leganti, la cui quantità deve essere determinata in laboratorio.

L'assenza della fase di riscaldamento fa si che il riciclaggio a freddo sia la metodologia più rispettosa dell'ambiente, rispetto al riciclaggio a caldo, poiché si utilizza solo RAP frantumato miscelato con agenti di riciclo e acqua (Venturini 2017) (Wang, et al. 2018).

Ci sono diverse teorie che spiegano il reale comportamento del bitume contenuto nel RAP e di conseguenza del RAP stesso:

- Black Rock: il bitume che ricopre gli aggregati del RAP, ormai invecchiato, è totalmente inertizzato, il materiale si comporta come un aggregato;
- Total Blending: il bitume del RAP si miscela completamente con il legante vergine: il legante risultante dalla miscelazione possiederà delle caratteristiche meccaniche uniformi in ogni suo punto;
- Partial Blending: una parte del bitume che ricopre gli aggregati del RAP si lega col legante vergine. Vi sarà dunque una pellicola di bitume (ottenuta dalla miscelazione del legante invecchiato e del legante vergine) che possiede caratteristiche meccaniche che variano con continuità da quelle del bitume vergine a quelle del bitume invecchiato, muovendosi dalla parte più esterna verso l'interno. La parte di legante invecchiato che non si lega avrà dunque un comportamento da black rock.

Numerosi studi mostrano che la teoria del "Partial blending" risulti essere quella più idonea per descrivere il reale comportamento del RAP incluso all'interno di conglomerati bituminosi di nuova produzione (Scanu 2019).

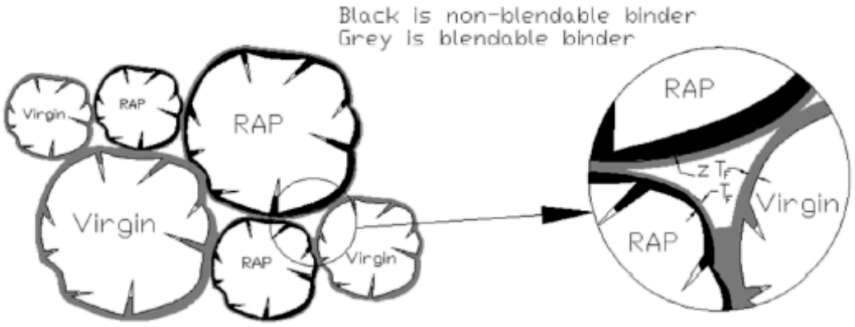


Figura 1-6: Schema rappresentate il concetto di Partial Blending

1.2.2 Materiale di Costruzione e Demolizione

Da molti anni la letteratura inerente alle costruzioni stradali affronta il tema dell'impiego di materiale di riciclo come aggregato all'interno delle miscele, poiché gli aggregati costituiscono più dell'80% in peso di una miscela tipo di calcestruzzo.

Le principali tipologie di materie prime secondarie utilizzate come inerti per le pavimentazioni stradali sono:

- Materiale proveniente da costruzione e demolizione (C&D);
- Materiale proveniente da terre e rocce da scavo;
- Materiale in situ.

Focalizzando l'attenzione sugli inerti da C&D, questi comprendono tutti i rifiuti derivanti da rifiuti generati da attività di demolizione, costruzione, manutenzione di edifici e opere civili in generale o da residui di produzione (Di Lauro, et al. 2017). Lo smaltimento di questi materiali rappresenta una quantità significativa di rifiuti da conferire annualmente in discarica, inoltre comporta un notevole uso di risorse economiche al fine di realizzare discariche apposite, e al trasporto in questi siti. Il riciclaggio risulta quindi la strada migliore da adottare, sia dal punto di vista economico, che da quello ambientale.

La norma UNI EN ISO 14040:2006 considera gli aspetti ambientali e l'impatto ambientale durante il ciclo di vita di un prodotto, dall'ottenimento delle materie prime, all'uso, al trattamento a fine vita di servizio, al riciclaggio e allo smaltimento finale.

Il concetto di LCA (Life Cycle Assessment) applicato al calcestruzzo, lascia immaginare come sia possibile chiudere il ciclo di vita riciclando il calcestruzzo ormai al termine della sua vita in servizio, come aggregato all'interno della nuova miscela di calcestruzzo. (Figura 1-7)

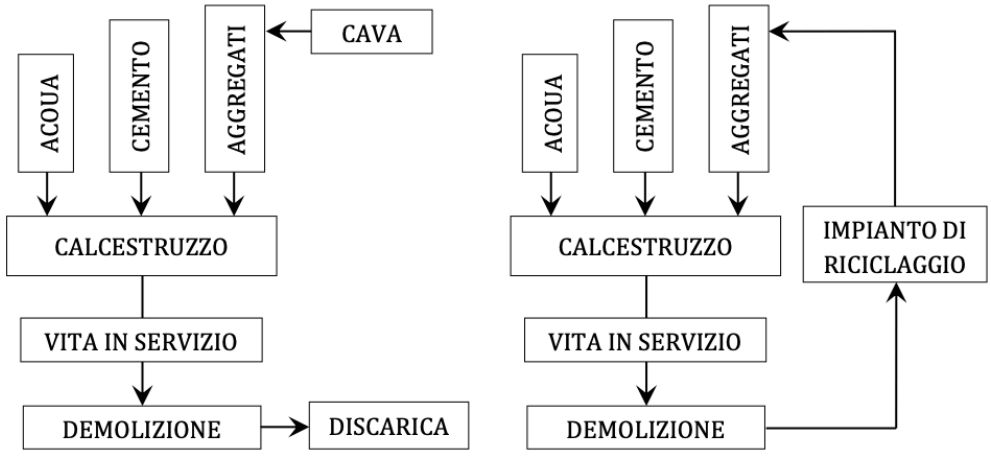


Figura 1-7: Ciclo di vita di un calcestruzzo convenzionale (sinistra) e di un calcestruzzo con aggregati riciclati (destra)

Questo processo permette di ridurre non solo l'impatto ambientale dovuto all'estrazione di materiali vergini, ma anche al conferimento di macerie in discarica.

La produzione di aggregati da materiale naturale prevede l'utilizzo di quantità ingenti di energia utilizzata per l'estrazione e la frantumazione, per la demolizione delle strutture in calcestruzzo al termine della loro vita di servizio e la frantumazione, per pari quantità finale di aggregato, si consumerebbe circa il 70% di energia in meno.

Inoltre l'utilizzo di calcestruzzo riciclato permette di limitare il consumo di risorse naturali, che risultano essere sempre più scarse (Corinaldesi e Moriconi 2014).

Il volume di utilizzo degli aggregati riciclati varia da Stato a Stato a causa di diverse direttive politiche sulla gestione dei rifiuti e sulle restrizioni relative lo sfruttamento di risorse naturali.

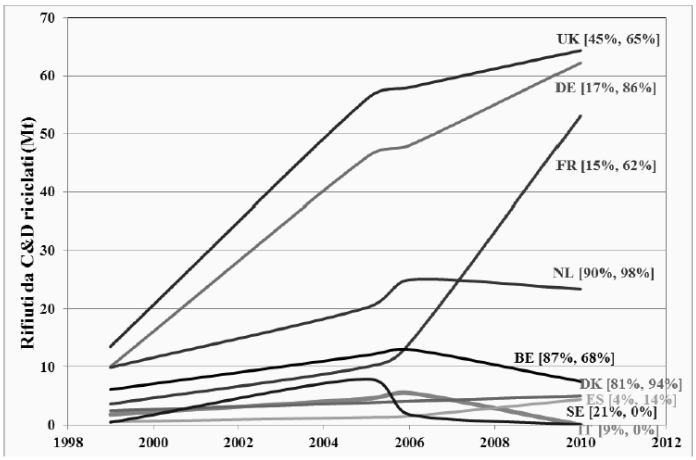


Figura 1-8: Quantità prodotte e precentuali medie di riciclaggio di rifiuti da C&D nei singoli paesi membri della UE (1999-2010)

Come si evince dalla Figura 1-8, in Italia il riciclo di materiali C&D ha tardato a prendere il volo, nonostante è dimostrato che il riciclo e il riuso dei materiali C&D comporta molti benefici per l'ambiente, e al tempo stesso non comporta peggioramenti in termini di proprietà meccaniche della miscela finale.

Per poter reinserire nel ciclo produttivo delle miscele, i rifiuti derivanti da costruzioni e demolizioni devono essere trattati in appositi impianti, che possono essere:

- Impianti mobili di frantumazione;
- Impianti fissi di trattamento e riciclaggio.

La scelta di utilizzo di un impianto piuttosto che l'altro deriva da due principali fattori (Di Lauro, et al. 2017):

- Costo: l'utilizzo di impianti mobili ha un costo inferiore rispetto agli impianti fissi, sia per quanto riguarda la realizzazione degli stessi, che per quanto riguarda il costo del trasporto del materiale;
- Qualità finale dei granuli: gli impianti fissi presentano una tecnologia più completa, è possibile quindi ottenere un materiale finale qualitativamente migliore grazie alla possibilità di separare i materiali costituenti le macerie, e non solo una riduzione di granulometria come avviene negli impianti mobili.

Figura 1-9: Impianto mobile (sinistra), impinato fisso (destra)

Il processo produttivo, indipendentemente dalla tipologia di impianto utilizzato, è simile a quello con cui si ottengono inerti di origine naturale:

- Controllo qualità dei materiali;
- Stoccaggio provvisorio dei rifiuti, in modo da separare i materiali di diversa tipologia come calcestruzzi, tegole, laterizi, materiale leggero, ecc;
- Separazione magnetica o manuale degli elementi ferrosi eventualmente presenti;
- Frantumazione;
- Vagliatura;
- Stoccaggio dei prodotti riciclati.

La fase di frantumazione è costituita da una serie di processi volti a sgretolare i corpi solidi in frammenti di dimensioni minore.

La vagliatura prevede la separazione delle diverse frazioni granulometriche grazie all'utilizzo di setacci. Il materiale viene quindi separato in diverse classi granulometriche.

Uno dei problemi riscontrati durante gli anni è causato dalle tecnologie di demolizione, che non consentono di ottenere materiali di recupero puliti e pronti all'uso. La natura dei materiali C&D è molto variabile e quindi la conoscenza delle loro caratteristiche è uno dei maggiori temi da affrontare.

Il problema della qualità dei granuli di C&D è un argomento delicato da trattare, questa è garantita non sono dalle caratteristiche meccaniche ma anche da alcuni fattori da rispettare quali: l'assenza di frazioni pericolose; l'omogeneità del rifiuto; carattere dell'intervento di demolizione (Kasai 1988).

Normalmente, la demolizione di una costruzione non prevedere una preventiva eliminazione di elementi che non posso essere riutilizzati come aggregati, e ci si trova quindi davanti a macerie con diversi materiali mescolati insieme che necessitano di attente operazioni di vagliatura prima di essere riutilizzati. Questo problema però si sta man mano risolvendo: nelle nuove costruzioni si opera con un duplice approccio, progettando in funzione del riciclaggio al termine della vita in servizio e adottando

tecniche di demolizione/smontaggio selettive; nelle costruzioni esistenti si ricorrere esclusivamente alla demolizione selettiva.

Calcestruzzo con aggregati di riciclo

Per anni, l'utilizzo di rifiuti da C&D è stato conferito quasi esclusivamente alla realizzazione di sottofondi stradali, rinterri e rilevati. Attualmente, grazie ai tanti studi condotti sulla materia, è possibile impiegare questi rifiuti per confezionare calcestruzzo strutturale. Diversi studi (Kasai 1988) (Dhir, Henderson e Limbachiya 1998) hanno però dimostrato che l'utilizzo della parte fine delle macerie potrebbe intaccare le prestazioni meccaniche del conglomerato in particolare per quanto riguarda la durabilità.

L'obiettivo è il riciclo del 100% di C&D per la produzione di calcestruzzo, dimostrando che anche il rifiuto del rifiuto può essere utile, integrando anche la parte più fine (<0,150 mm), ottenuta dalla frantumazione delle macerie, che verrebbe utilizzata come materiale minerale nel confezionamento di calcestruzzi autocompattanti (Corinaldesi e Moriconi 2003) (Corinaldesi e Moriconi 2011). È stato infatti accertato che l'aggiunta di questa frazione, se preventivamente trattata, produce un miglioramento della resistenza a compressione equiparabile a quello prodotto dalla cenere volante ottenuta dalla combustione del carbone (Loo 1998).

In ambito nazionale, le NTC affermano: "È consentito l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti di cui alla Tabella 1-1, a condizione che la miscela di calcestruzzo confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente qualificata e documentata attraverso idonee prove di laboratorio."

Tabella 1-1: Limiti uso di aggregati di riciclo in calcestruzzo

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	percentuale di impiego
demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100%
demolizioni di solo calcestruzzo e c.a. (frammenti di calcestruzzo ≥ 90%, UNI EN 933-11:2009)	≤ C20/25	fino al 60%
	≤ C30/37	≤ 30%
	≤ C45/55	≤ 20%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	Classe minore del calcestruzzo di origine	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 10%

In Italia dal 2006, gli aggregati riciclati sono sottoposti a controlli qualitativi, secondo la norma UNI EN 12620, relativi alle proprietà chimiche, fisiche e geometriche, al fine di ottenere la marcatura CE e poter quindi essere inseriti come inerti all'interno delle miscele. Le miscele, una volta confezionate, devono essere sottoposte a test per

verificare che la presenza di materiali riciclati non abbia causato un abbassamento delle proprietà meccaniche del prodotto finale (Loprencipe e Drago 2006).

Come noto, il calcestruzzo è un conglomerato costituito da legante, aggregato grosso e fino ed acqua, con l'aggiunta eventuale di additivi o aggiunte minerali. Per valutare come l'apporto di materiale riciclato comporta variazione sulla composizione della miscela del calcestruzzo, a titolo d'esempio si riporta un confronto tra una miscela tradizionale e una ottenuta sostituendo il 30% di aggregati naturali con materiali riciclati della stessa granulometria.

Tabella 1-2: Composizione della miscela di calcestruzzo riciclato rispetto a quello convenzionale di pari classe di resistenza

Calcestruzzo	Convenzionale	Riciclato
acqua/cemento	0,55	0,53
Acqua, kg	185	185
Cemento CEM II-B/L, kg	335	350
Sabbia (0-5 mm), kg (% in volume sull'inerte)	690 (40)	690 (40)
Pietrischetto (6-12 mm), kg (% in volume sull'inerte)	525 (30)	-
Aggregato riciclato (6-12 mm), kg (% in volume sull'inerte)	-	500 (30)
Pietrisco (11-22 mm), kg (% in volume sull'inerte)	525 (30)	525 (30)
Superfluidificante, kg (% in peso sul cemento)	3,3 (1,0)	3,5 (1,0)
Additivo aerante, kg (% in peso sul cemento)	0,2 (0,06)	0,2 (0,06)

Come si evince, al fine di raggiungere la stessa classi di resistenza, nella miscela contenente aggregati riciclati, è richiesto un minor rapporto acqua/cemento, che però può risultare più vantaggioso per aumentare la vita in servizio delle strutture in calcestruzzo.

Il calcestruzzo viene identificato in funzione della classe di resistenza la quale è espressa come $C\,[f_{ck}]/[R_{ck}]$, dove R_{ck} rappresenta il valore della resistenza caratteristica a compressione di un provino cubico e f_{ck} individua il valore della resistenza caratteristica a compressione di un provino cilindrico. I valori di resistenza a compressione sono legati dalla seguente formula:

$$f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} \quad [1]$$

Nota la classe di resistenza del calcestruzzo, le NTC forniscono delle formule standardizzate per ricavare le altre proprietà meccaniche del materiale:

- resistenza di progetto a compressione: $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{1.5}$ [2]
- valore medio di resistenza a compressione: $f_{cm} = f_{ck} + 8$ [3]

- modulo elastico: $E_{cm}[GPa] = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$ [4]
- resistenza media a trazione semplice: $f_{ctm} \begin{cases} 0.3 \cdot {f_{ck}}^{2/3} & fino\ a\ C50/60 \\ 2.12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) & da\ C55/67 \end{cases}$ [5]
- resistenza a trazione caratteristica: $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm}$ [6]
- resistenza di progetto a trazione: $f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{f_{ctk}}{1.5}$ [7]
- coefficiente di dilatazione termica: $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}\ [°C^{-1}]$ [8]

Il calcestruzzo presenta legge costitutiva valutata in compressone, con comportamento non lineare:

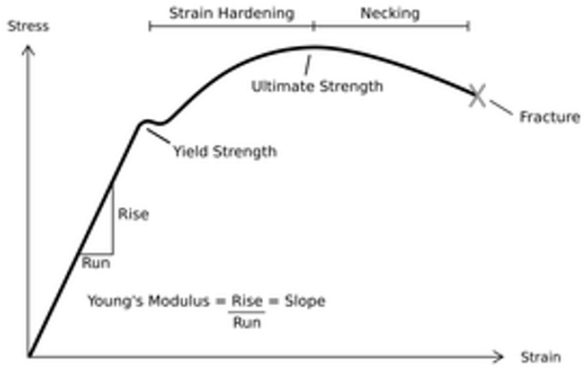


Figura 1-10: Legge costitutiva del calcestruzzo

La curva rappresenta nel piano tensione-deformazione il comportamento di un elemento in calcestruzzo sottoposto ad una prova monoassiale di compressione. Il legame costitutivo presenta un ramo crescente fino al valore della resistenza f_{cd}, a cui corrisponde la deformazione ε_{c0}, e un ramo decrescente fino alla deformazione ultima (rottura) ε_{cu}.

Le NTC propongono di adottare modelli semplificativi del diagramma tensione-deformazione, rappresentativi del reale comportamento del materiale:

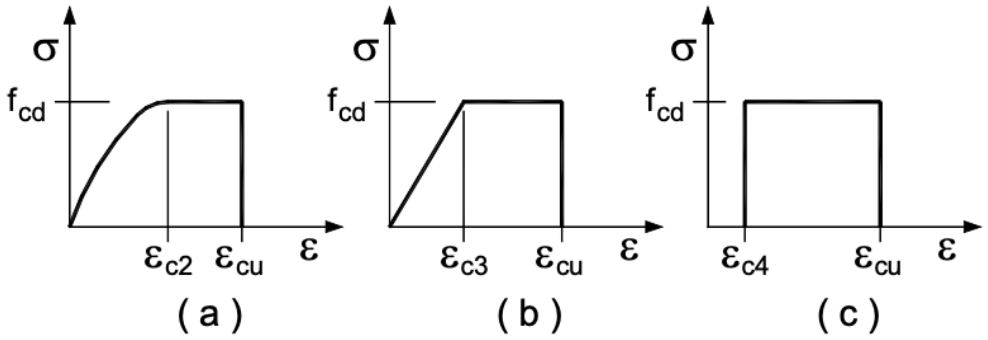


Figura 1-11: Modelli σ-ε per il calcestruzzo

In figura vengono rappresentati i modelli σ-ε per il calcestruzzo, in particolare:

(a) parabola-rettangolo; (b) triangolo-rettangolo; (c) rettangolo (*stress block*).
Nelle analisi strutturali di seguito, verrà considerato il solo modello non lineare, parabola-rettangolo.

L'utilizzo di aggregati riciclati non comporta modifiche dei legami costitutivi, come presentato da Moriconi (2014), diversi studi condotti nel corso degli anni, hanno portato a definire che il calcestruzzo con aggregati riciclati è idoneo per l'uso strutturale, dopo trattamento in idonei impianti di riciclaggio.

Con i risultati di questi studi, è possibile effettuare un confronto tra le prestazioni di un calcestruzzo ordinario e uno con aggregati di riciclo, appartenenti alla stessa classe di resistenza (Di Lauro, et al. 2017) (Loprencipe e Drago 2006):

- la sostituzione di inerti riciclati per un 20% rispetto agli inerti naturali ha effetti limitati nei valori di resistenza a compressione del calcestruzzo. Una sostituzione totale porta invece a una riduzione della resistenza a compressione del 20%;
- il modulo elastico con una sostituzione del 20% non subisce riduzioni significanti, nel caso di una sostituzione totale è necessario considerare un valore di riduzione di circa il 20%;
- una resistenza a trazione inferiore (10% circa);
- caratteristiche di durabilità almeno equivalenti in termini di resistenza a cicli di gelo e disgelo, resistenza all'attacco solfatico, resistenza alla penetrazione di agenti aggressivi per le armature metalliche;
- con la sostituzione del 20% la lavorabilità non viene modificata, la sostituzione di inerti naturali con inerti riciclati in percentuali superiori al 20% porta ad una sensibile riduzione della lavorabilità e ad una maggior richiesta di acqua, a causa della sezione irregolare degli inerti, del maggior assorbimento dell'inerte frantumato e dalla presenza di particelle di cemento non idratate.

L'utilizzo di aggregati riciclati può quindi contribuire efficacemente alla riduzione dell'impatto ambientale pur mantenendo quasi del tutto inalterate la qualità, la durabilità e la sicurezza del calcestruzzo tradizionale.

1.2.3 Plastica riciclata

Le materie plastiche sono diventata parte indispensabile delle nostre vite, basti pensare a quanti imballaggi, contenitori per bevande e cibo, buste etc. utilizziamo ogni giorno. Grazie alla sua bassa densità, alla buona capacità di lavorazione, alla lunga durata e al basso costo, l'utilizzo di questo materiale è cresciuto in maniera esponenziale. Negli anni '50 il consumo annuo mondiale era di circa 5 tonnellate, nei primi anni 2000 è arrivato a 100 tonnellate. Da un'indagine è risultato che per gli Italiana la presenza della plastica è fondamentale e insostituibile quando si parla di imballaggi, conservazione degli alimenti, articoli per la casa, dispositivi sanitari, arredamento, etc (Censis 2018).

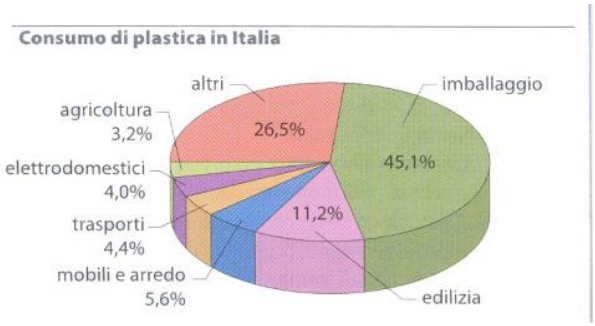


Figura 1-12: Consumo plastica in Italia

Le materie plastiche rientrano nella famiglia dei polimeri, che in relazione alle dimensioni e alla struttura molecolare presentano diverse proprietà. I polimeri maggiormente utilizzati per l'imballaggio sono: polietilene ad alta (HDPE) e bassa densità (LDPE), polipropilene (PP), polistirene rigido (PS), espando (EPS), polivinilcloruro (PVC), polietilentereftalato (PET).

L'alto consumo delle plastiche è stato però accompagnato da un grosso problema ambientale, il cosiddetto "inquinamento da plastica", causato dalla presenza di troppo materiale da dover smaltire. La maggior parte della plastica utilizzata per imballaggi diventa rifiuto nel giro di un anno dalla sua produzione, fattore in crescita sia per mano dell'alto uso di plastica per imballaggi sia per l'utilizzo di prodotti "usa e getta".

Lo smaltimento della plastica, a causa della sua lenta degradazione solleva non poche preoccupazioni. Riciclare diventa quindi fondamentale per sopperire alla crescente presenza di questi rifiuti. Si stima però che circa il 30% del totale dei rifiuti plastici prodotti viene riciclato e tutto il resto è conferito in discarica.

La riciclabilità delle materie plastiche e il reimpiego nella produzione di nuove materie prime secondarie utilizzabili è il presupposto della sua potenziale collocazione sulla frontiera più avanzata dell'economia circolare.

Il riciclo consiste nella raccolta dei rifiuti plastici, e separazione da materiali inerti, additivi o altri elementi che possono pregiudicare la processabilità. La separazione può avvenire per effetto magnetico, per flottazione, galleggiamento, soffio d'aria, ecc. Una volta effettuata la separazione si procede con operazione di macinazione, lavaggio ed in alcuni casi di rigranulazione (Corepla s.d.).

Il riciclo meccanico della plastica richiede un elevato grado di purezza del polimero da sperare, ne consegue che circa il 45% del materiale riciclato diventa residuo. Questo materiale è composto da misto poliolefinico contaminato da scarti alimentari, carta, vetro, ecc., in Italia è noto come "*plasmix",* (Cossu, et al. 2017) il quale è generalmente composto delle seguenti percentuali in base al peso umido: plastica (57%), principalmente PP, HDPE, LDPE, carta e cartone (10%), legno (3%), tessuti (3%), inerti e altri (compresi i metalli) (27%). Il Plasmix è una miscela che contiene numerose impurezze problematiche, e la sua composizione è variabile, stagionalmente e con l'area geografica (Pepe 2019). La proposta di legge presentata il 18 maggio 2017 da Stefano Vignaroli (Atto Camera n°4502, art.1), definisce il plasmix come un "insieme di plastiche eterogenee incluse negli imballaggi post-consumo e non recuperate come singoli polimeri" che possono essere usate per produrre granuli da riciclo a base poliolefinica.

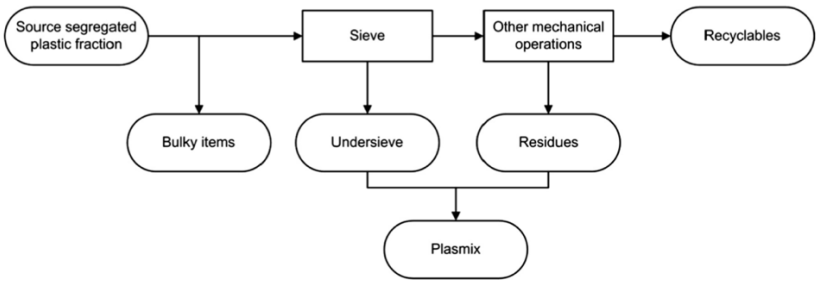


Figura 1-13: Layout generale di un impianto per la selezione del materiale derivato dal riciclo della plastica

Il materiale che deriva dal riciclaggio della plastica è prodotto in scaglie e granuli, il riciclo trasforma la materia prima in materia seconda pronta per essere immessa in un nuovo processo produttivo.

Il campo delle costruzioni ha mostrato, già da qualche anno, grande interesse nell'utilizzo di questo materiale, inizialmente solo per quanto riguarda i componenti d'arredo quali mobili, piastrelle, tubazioni, griglie. Ma negli ultimi anni le diverse sperimentazioni hanno fatto sì che si potesse arrivare ad inglobare la plastica all'interno di miscele di calcestruzzo o bitume, mediante processo a secco o umido. Nel primo caso

la plastica riciclata viene utilizzata per la sostituzione parziale di aggregati vergini, nel secondo per la sostituzione parziale di legante.

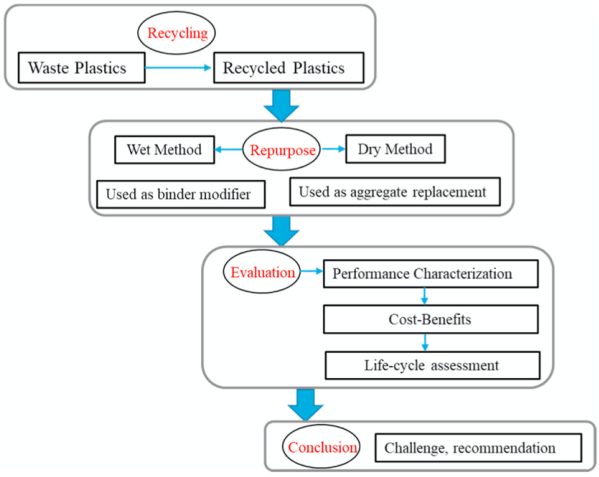


Figura 1-14: Diagramma di flusso del reciclaggio della plastica

Negli anni sono state condotte diverse sperimentazioni al fine di riciclare la plastica all'interno di miscele per le costruzioni. Viste le proprietà che questo materiale è capace di garantire, sono state provate miscele contenenti granuli di plastica in sostituzione di aggregati, sono state realizzate miscele con sostituzione parziale di legante, ed è stato testato ed è in corso di sperimentazione l'uso della plastica in sostituzione totale del legante.

Lo studio condotto da Zoorob e Suparama (2000) ha dimostrato che l'uso di plastica riciclata, costituita prevalentemente da polipropilene e polietilene a bassa densità, come sostituto parziale del legante in miscele bituminose, comporta un aumento della stabilità, circa 2.5 volte maggiore rispetto ai bitumi non modificati, un aumento della durata e una diminuzione del suo grado di densità, inoltre dai risultati si deduce che grazie alla presenza di polimeri aumenta anche la resistenza a fatica.

Un altro esempio può essere rappresentato dall'utilizzo dei granuli di PET di scarto come sostituto dell'aggregato fine nelle miscele bituminose. La miscela analizzata da (Hassan, Ganjidoust e Abedin Maghanaki 2005) è stata prodotta con un bitume classificato 60/70, e aggregati che seguono le dimensioni di una granulometria tradizionale, a cui è stata sostituita la parte fine con granuli di plastica. I test di laboratorio condotti, in particolare Marshall Stability test, mostrano che l'utilizzo di granuli di PET in sostituzione dell'aggregato in quantità pari al 20% dell'aggregato fine (2,36-4,75 mm), corrispondente al 5% del peso totale della miscela di conglomerato bituminoso, è la quantità giusta per ottenere un valore di stabilità Marshall più alto rispetto ad una miscela tradizionale con le stesse caratteristiche.

L’obiettivo della ricerca di (Arulrajah, et al. 2017) è stato valutare la fattibilità dell'uso di granuli di plastica di scarto in combinazione con rifiuti di demolizione. I materiali utilizzati sono granuli di plastica rigida (LDCAL, HDPE o LDPE) uniti a materiali derivanti dalle demolizioni quali Crushed Brick (CB) e Fresato di pavimentazione (RAP). Dall’analisi del Modulo di Young sulle miscele prodotte, è stato osservato che l’aggiunta di LDCAL comporta un aumento del modulo di rigidezza rispetto alla stessa miscela con l’aggiunta di HDPE. È importante però constatare che l’aggiunta di granuli polimeri provoca una riduzione del modulo di rigidezza rispetto alla miscela tradizionale dalle stesse caratteristiche.

Grazie alla sua lunga durata, alla resistenza alle corrosioni, alla sostenibilità, alle tecniche di innovazione, alla facilità di installazione, uso e manutenzione, negli ultimi anni, l’utilizzo della plastica riciclata nel del settore dell’edilizia e delle costruzioni ha preso il sopravvento.

L’interesse verso il PET riciclato, da parte di (Armacell) ha portato non poche innovazioni nel settore delle costruzioni. Grazie ai loro studi sono state prodotte pale di turbine eoliche, strutture di trani ad alta velocità, ed anche le prime case eco-friendly in Canada, costituite da lastre in schiuma di PET.

Figura 1-15: Case eco-friendly realizzate da Armacell

Nell'ambito delle pavimentazioni stradali, i primi esperimenti sulla realizzazione di sovrastrutture interamente in plastica sono stati condotti in Olanda. A Zwolle (VolkerWessels 2018) è stato realizzato un primo tratto di pista ciclabile costituita interamente da plastica riciclata. Seguendo questo stesso percorso, anche in Italia è stata realizzata la prima pista ciclabile green. A Follonica (GR), nel 2019, sono stati installati 20 metri di pista ciclo-pedonale costituita da listelli in plastica riciclata, per i quali è stato necessario il riciclo di 60.000 bottiglie di plastica (Comune di Follonica 2019).

Figura 1-16: Dettaglio pista ciclabile di Zwolle (Olanda)

Materiali polimerici

I polimeri sono materiali composti da macromolecole, ovvero molecole molto grandi formate dalla ripetizione di un piccolo gruppo molecolare. Le macromolecole si ottengono attraverso reazioni chimiche di polimerizzazione, che producono l'unione dei monomeri con legami chimici forti. Le proprietà di un polimero dipendono dal tipo di struttura molecolare con cui è composto, questo permette anche di determinare il tipo di polimero, se termoplastico o termoindurente.

Ai fini applicativi, le proprietà da considerare sono la combustibilità (comportamento al fuoco), la resistenza meccanica, la dilatazione termina, la resistenza agli agenti chimici e atmosferici, la conducibilità termica: in caso di incendio alcuni polimeri non propagano la fiamma ma si deteriorano anche a basse temperature, mentre altri si infiammano facilmente; le proprietà meccaniche delle materie plastiche non sono confrontabili con quelle della maggior parte dei materiali di costruzione, in quanto i moduli di rigidezza sono molto bassi (Bano 2012).

In particolare, il polietilene è un polimero termoplastico costituito da molecole che possono essere di tipo lineare o ramificato. La lunghezza delle macromolecole è proporzionale al suo peso molecolare. Il polietilene si classifica in base alla densità, troviamo infatti tre diversi tipi di polietilene, come mostrato in tabella:

Tabella 1-3: Classificazione del PE in funzione della densità

PE	Densità [kg/dm³]	Grado di cristallinità [%]
HDPE	0,940 – 0,965	60 – 80
MDPE	0,930 – 0,940	50 – 60
LDPE	0,915 – 0,930	35 – 50

Il comportamento meccanico del polietilene è diverso da quello degli altri materiali da costruzione. È caratterizzato da una risposta elastica istantanea, a cui si associa anche un comportamento viscoso, dovuto alla sua natura polimerica, a cui corrisponde una risposta elastica "ritardata". Si ha quindi una risposta meccanica dipendente dal tempo, come indicato in Figura 1-17:

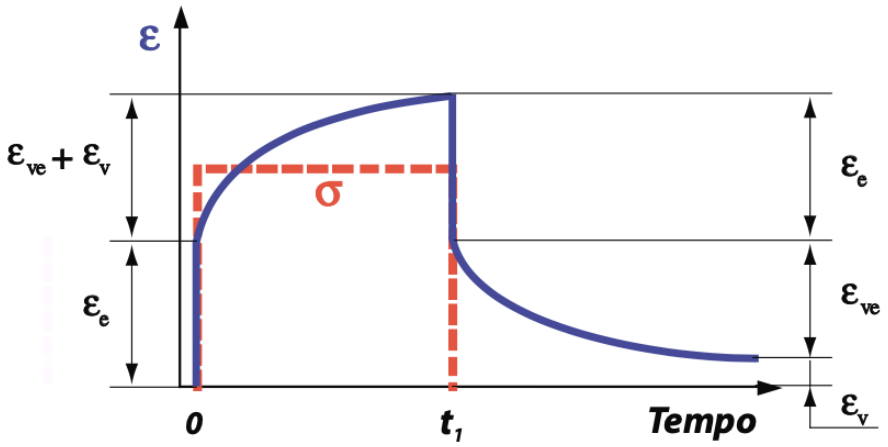


Figura 1-17: Comportamento a creep del polietilene

Applicando uno sforzo σ costante nel tempo (creep), si osserva che:

- All'istante di applicazione del carico il materiale si deforma istantaneamente di un valore ε_e;
- La deformazione aumenta gradualmente nel tempo per effetto del comportamento viscoelastico ε_{ve};
- Per sforzi molto elevati e/o per tempi molto lunghi, è possibile osservare una deformazione irreversibile associata allo snervamento del materiale per scorrimento plastico ε_v.

Al momento della rimozione del carico, la deformazione ε_e è recuperabile istantaneamente, la deformazione ε_{ve} è recuperata gradualmente, la deformazione ε_v è irreversibile.

Viene riportata di seguito la rappresentazione di una curva di carico per il polietilene, ottenuta da una prova di trazione monoassiale:

Figura 1-18: Rappresentazione schematica di una curva di carico per il polietilene

Si può osservare:

- A piccole deformazioni il comportamento è pseudo-elastico;
- Per deformazioni oltre il 9-10% si manifesta lo snervamento del materiale, con formazione di strizione del provino. Da questo momento le deformazioni imposte sono irreversibili;
- La strizione si propaga per tutta la lunghezza del provino, le molecole si orientano in direzione di applicazione del carico;
- L'elevata orientazione delle molecole provoca una maggiore resistenza meccanica, bisogna quindi aumentare il carico imposto per portare a rottura il provino.

1.3 Mobilità sostenibile

Nelle aree urbane è concentrato il 72% della popolazione residente, questo è uno dei motivi per i quali la mobilità urbana è una preoccupazione per amministrazioni competenti, e risulta anche essere un settore in cui è necessario un miglioramento decisivo della situazione.

Il concetto di sostenibilità è strettamente collegato alla mobilità, un sistema di trasporto è ritenuto sostenibile se è in grado di utilizzare risorse disponibili in modo efficiente durante il ciclo di vita; tutela le necessità della società, sostenendo uno standard di vita migliore; assicura servizi di mobilità, sicurezza e confort grazie a una corretta

progettazione, realizzazione e manutenzione delle infrastrutture (Muromachi e Vincent 2008).

La mobilità rivisitata in chiave "green" punta sulla presenza di parcheggi intelligenti situati fuori dalla città, ben collegati con il centro urbano, permettendo una diminuzione dell'inquinamento cittadino; sull'amplificazione del car sharing; sulla realizzazione di una buona rete ciclabile; sull'utilizzo di veicoli green di ogni tipo; su tecnologie non inquinanti.

Nello sviluppo urbano delle città, la mobilità viene infatti considerato uno dei collanti tra l'ambiente urbano e i cittadini, quindi un miglioramento e rinnovamento è fondamentale. A partire dai primi anni del 2000, l'Unione Europea ha compiuto passi verso forme di mobilità sempre più sostenibili mediante iniziative che prevedono la promozione di forme di mobilità sostenibile a fronte del trasporto individuale su gomma (Galderisi 2011).

Un esempio di mobilità sostenibile arriva sicuramente dal Nord Europa, città come Stoccolma, Copenaghen, Amburgo, Amsterdam, etc. hanno investito sull'utilizzo di autobus urbani che operano con biogas o etanolo, ma hanno anche puntato sulla realizzazione di nuove ed innovative piste ciclabili, al fine di promuovere sia il benessere fisico ma anche e soprattutto il benessere ambientale.

Un sistema di mobilità sostenibile, come la rete ciclabile, deve garantire una serie di requisiti (Regione autonoma della Sardegna 2018):

- Trasportistico, in chiave green, per rendere possibile il collegamento in modo ecologicamente corretto e non impattante per l'ambiente, promuovendo alternative all'utilizzo di veicoli motorizzati e riequilibrando gli spazi stradali a favore di modalità collettive;
- Turistico, consentendo la valorizzazione del turismo, mediante la fruizione di percorsi green come le ciclovie, che consentono il raggiungimento di diversi luoghi di interesse culturale e di pregio ambientale;
- Economico, consentendo lo sviluppo di attività connesse agli itinerari ciclabili;
- Ambientale e di valorizzazione del paesaggio, interconnettendo tra loro aree naturali, siti archeologici, mediante la fruizione di corridoi verdi che consentono una presenza ecologica dell'utenza e quindi non degenerativa sul territorio;
- Salvaguardia e valorizzazione dei centri urbani, attraverso un'ecologia accessibilità agli spazi urbani, considerandoli come luoghi d'incontro, aggregazione e socializzazione.

1.3.1 Piste ciclabili

Il tema dell'integrazione tra mobilità, ambiente e trasformazioni urbane e territoriali risulta negli ultimi decenni un'urgenza sia in ambito accademico che nella pratica delle amministrazioni locali.

Dal momento della sua invenzione, la bicicletta è entrata a far parte del progresso sociale. Con il susseguirsi degli anni c'è stato sempre più un crescente riconoscimento del potenziale della bicicletta come mezzo di trasporto per una mobilità più sostenibile.

In Europa, la bicicletta ha avuto il suo picco d'utilizzo nei momenti di crisi economica: una prima diffusione in periodo post bellico e la grande diffusione durante la seconda guerra mondiale. Ha subito un declino nei decenni del boom economico per riprendere durante la crisi degli anni Settanta, fino ad oggi in cui l'incremento del suo utilizzo è dovuto all'aumento dei costi sociali ed economici (Vettori 2016).

L'incremento di utilizzo della biciletta ha prodotto un miglioramento delle condizioni di inquinamento acustico e ambientale, nonché una riduzione di traffico veicolare (Papa, Carpentieri e Santarpia 2011). Basti pensare che il 30% dei tragitti effettuati in automobile copre distanze inferiori a 3km, distanza che può essere percorsa in bicicletta in modo più vantaggioso. Infatti è statisticamente il mezzo più funzionale per ricoprire brevi distanze, poiché non vincolata a problemi di parcheggio o di attraversamento di aree chiuse al traffico, è più ecologica ed economica, inoltre rende la città più vivibile. Dimostrazione di ciò deriva da numerose città europee, in cui vengono attuate misure a favore della riduzione dell'uso individuale dell'automobile, in particolare nei centri città. Un esempio sicuramente rilevante è il caso della città di Copenaghen in cui la prima pista ciclabile della città è stata realizzata nel 1910, e ad oggi conta circa 400km di infrastrutture ciclabile percorsi giornalmente da circa il 50% della popolazione. Lo sviluppo della rete ciclabile, e delle dotazioni ad esse connesse, quali parcheggi, aree di sosta e di attrezzatura tecnica, ha visto uno sviluppo continuo, andando ad adattarsi al sistema viario esistente, andando ad integrarlo e delle volte sostituendolo (Vettori 2016). Copenaghen risulta infatti essere, insieme ad Amsterdam, la metropoli con il maggior numero di spostamenti in bici (Figura 1-19).

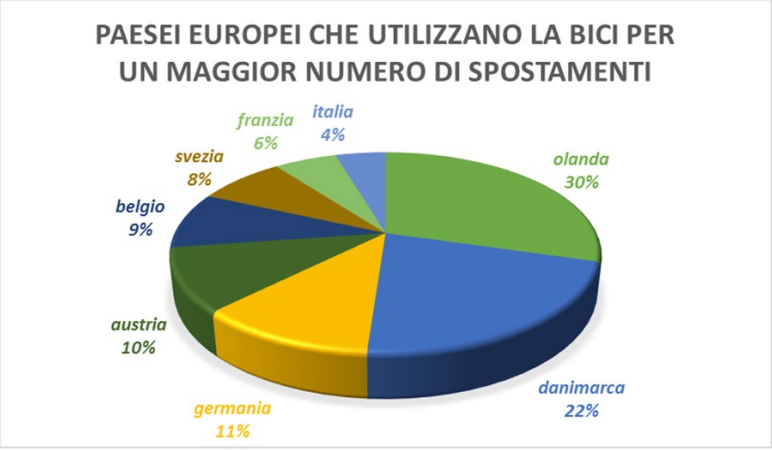


Figura 1-19: Paesi europei che utilizzano la bici per un maggior numero di spostamenti

Le piste ciclabili rappresentano a prima vista un elemento marginale nella struttura della mobilità urbana, anche se la bicicletta rappresenta un mezzo di trasporto estremamente versatile, tanti sono i vantaggi ad essa collegati: nessun inquinamento acustico ed ambientale, minor occupazione del suolo per parcheggi, minor deterioramento della rete stradale, maggior attrattività del centro città, riduzione di congestioni con relativa diminuzione di tempo usato per gli spostamenti, ottimo esercizio fisico giornaliero, ecc.

C'è una stretta connessione tra percorsi ciclabili e paesaggi, la mobilità lenta ci permette infatti di entrare in contatto con la natura. È di recente ideazione quello dei percorsi ecocompatibili, le cosiddette *greenway*. Tradotto letteralmente come *via verde*, unisce due concetti: *way* che identifica non solo le vie di comunicazione ma anche l'idea di movimento, comunicazione e attività; *green* che assimila al concetto di natura, tutto ciò che può essere rappresentato come risorsa ambientale. Questa concezione di percorsi verdi nasce con l'idea di connettere la popolazione alle risorse offerte dal territorio valorizzandolo.

In Europa, negli ultimi anni, si è sviluppato un tipo di turismo che non solo privilegia la scoperta di territori con mezzi ecologici, ma promuove una cultura ciclo-pedestre, viene da sé che la realizzazione di percorsi ciclabili è diventata un'esigenza sempre più sentita dalle amministrazioni, che necessitano di valorizzare i propri territori all'insegna della sostenibilità (Rotilio, Taballione e De Berardinis 2016). Il cicloturismo prevedere il contatto stretto tra il ciclista e il territorio, è quindi necessita intrinseca trovare lungo il percorso tutto ciò che chi viaggia in bicicletta ha bisogno, come assistenza tecnica per bicicletta, pernottamento e punti ristoro, punti informativi con annesse cartografie degli itinerari adibiti ai ciclisti, etc.

Alla luce di quanto esposto, la realizzazione di piste ciclabili è necessaria per attuare percorsi separati e riservati esclusivamente alle biciclette, al fine di garantire loro una maggiore sicurezza. La caratteristica fondamentale per la realizzazione di piste ciclabili risiede nell'interconnessione, poiché è necessario formare una rete e non piste ciclabili isolate e non collegate tra loro.

La differenza tra spazi carrabili e spazi pedonali non ha il solo scopo di generare una gerarchia tra gli stessi, bensì garantire confort, sicurezza e qualità ambientale. È importante sviluppare una rete ciclabile ben individuabile.

Gli itinerari ciclabili, con riferimento alle linee guida del DM 30 novembre 1999, n. 557, si suddividono in:

- **Pista ciclabile in sede propria**, ad unico o doppio senso di marcia, sulla quale non è consentito l'accesso al traffico veicolare, deve essere quindi delimitata da idonei spartitraffico invalicabili. Questa tipologia può essere ulteriormente divisa in:
    - Pista ciclabile in affiancamento al corpo stradale esistente;
    - Pista ciclabile in affiancamento al marciapiede, ubicata sul lato adiacente alla careggiata;

  - Pista ciclabile non in affiancamento, lontana da strade a traffico motorizzato;
  - Pista ciclabile e pedonale non in affiancamento, di norma realizzata all'interno di parchi o aree verdi
- **Pista ciclabile su corsia riservata**, ricavata su carreggiata stradale, posta a destra della corsia riservata al traffico motorizzato ed a unico senso di marcia concorde con quello veicolare, determinata da strisce di delimitazione longitudinale o da delimitatori di corsia;
- **Percorso promiscuo ciclabile e veicolare** che comprende:
  - Itinerari ciclopedonali, definiti da strade locali, urbane, extraurbane o vicinali, destinate prevalentemente alla percorrenza pedonale e ciclabile;
  - Strade senza traffico o con traffico motorizzato inferiore a 50 veicoli/giorno su media annua;
  - Strade a basso traffico con una media di 500 veicoli/giorno su media annua;
  - Strade 30 ovvero strade urbane e extraurbane con limite di velocità pari a 30km/h.

La progettazione di un'infrastruttura ciclabile deve prendere in considerazione lo spazio fisico necessario alla circolazione delle biciclette. Le dimensioni da considerare per determinare lo spazio libero sono quindi quelle del ciclista e della bicicletta, nonché lo spazio necessario per la pedalata considerando anche fattori come la stabilità, l'andatura ed eventuali ostacoli sulla sede. Si deve considerare quindi, per il singolo ciclista, una larghezza minima di 0,9 m/ciclista. Al fine di consentire ai ciclisti di pedalare affiancati, o per permettere il sorpasso, il D.M. 30 novembre 1999, n. 557 impone una larghezza minima della corsia pari a 1,5 m.

La normativa italiana quindi impone dei valori minimi di larghezza di una pista ciclabile, considerando come standard una larghezza minima di 1,5 m; tale larghezza può essere ridotta a 1,25 m nel caso di corsie contigue per una larghezza complessiva di 2,5 m. Per piste ciclabili in sede propria o su corsie riservate, la larghezza della corsia può essere ridotta, per un tratto limitato, eccezionalmente a 1 m, purché tale circostanza sia opportunatamente segnalata.

Le corsie in sede propria in affiancamento alla sede stradale, devono essere delimitate da uno spartitraffico invalicabile di una larghezza maggiore o uguale a 0,5 m.

Il fondo stradale dei percorsi può essere costituito da asfalto, calcestruzzo, mattonelle autobloccanti, o da terra battuta livellata mediante posa di ghiaia, purché la superficie risulti regolare e curata al fine di garantire la fruibilità agevole e la sicurezza del percorso. Per una migliore accessibilità e percezione del percorso ciclabile è necessario segnalarlo con apposita segnaletica e identificare l'area ciclabile mediante colorazione diversificata dagli altri percorsi. Inoltre, in accordo con il D.M. n 557, non è consentita la presenza di griglie per la raccolta dell'acqua con elementi paralleli all'asse delle piste o con elementi trasversali che possono determinare difficolta di transito.

Per soddisfare le eventuali richieste degli utilizzatori delle piste ciclabili, devono essere garantiti i servizi necessari per un adeguata fruizione, come aree di sosta per biciclette, servizi igienici, punti di approvvigionamento di acqua potabile, aree ristoro, aree per la manutenzione straordinaria dei mezzi.

2 Smart road

L'esodo verso le città ha prodotto un incremento del numero di cittadini capaci di spostarsi con mezzo proprio, ciò si è tradotto in un grande investimento, da parte dei governi, sui sistemi di trasporto, prestando grande attenzione alle infrastrutture, infatti il potenziale economico e il benessere sociale fa molto affidamento sulle infrastrutture. Ad oggi si contano circa 100 milioni di km di strada a livello mondiale.

D'altro canto l'aumento del traffico coincide anche con un maggiore utilizzo del manto stradale. Anche se le strade vengono costruite per durare a lungo (100 anni ed oltre), l'usura della pavimentazione può essere causata da diversi fattori, traffico, condizioni metereologiche, materiali utilizzati, ecc.

Per gestire questo problema ci viene incontro la tecnologia, che si sta evolvendo sempre di più, andando a ricoprire sempre più settori. Parliamo quindi di "Smart Road" che può essere definita come un'infrastruttura intelligente integrata con tecnologie di rete e comunicazione avanzate (Sun, et al. 2018).

Il concetto di "Smart Road" si riferisce in particolar modo a quelle strade, progettate e costruite in modo da poter sopportare le tecnologie IT del 21° secolo.

"La pavimentazione intelligente offre ogni tipo di possibilità sia agli utenti della strada che a dipartimenti che costruiscono e mantengono queste strade", ha dichiarato Brian Burger. Questi servizi intelligenti quindi non solo portano del benessere al cittadino che usufruisce un sistema migliore, ma aiuta le agenzie addette alla costruzione e manutenzione della pavimentazione (D'Angelo 2020).

Infatti Lynch ha definito il termine "struttura intelligente" come *"rilevamento e/o attuazione tecnologie integrate nel sistema per fornire informazioni sulla risposta della struttura e un'opportunità per limitare le risposte"* (Yang 2014).

La strada intelligente è composta da strutture con materiali avanzati, centri d'informazione e comunicazione, e possiede capacità di percezione attiva e continua, interazione dinamica e fornitura di energia (Sun, et al. 2018). Le nuove tecnologie sono in grado di creare connessioni tra strada, veicoli, i passeggeri e conducenti, e i servizi web adeguati, si è perciò strettamente integrati nell'Internet of Things, un mondo nel quale c'è una comunicazione reciproca tra computer e cose/persone (Vagan, Kaykova e Zhovtobryukh 2010).

A differenza di una strada tradizionale, quella "intelligente" dovrebbe garantire un periodo di vita di servizio maggiore, un aumento delle prestazioni, un aumento della sicurezza e quindi un generale miglioramento della qualità del servizio offerto.

La Smart Road si basa su sensori, che dovrebbero essere di dimensioni ridotte, muniti di funzione wireless, di basso costo e dotati di un'unità centrale di elaborazione, creati per monitorare attivamente il proprio stato di vita, le prestazioni e l'ambiente, quindi è

capace automaticamente di raccogliere dati, gestirli, analizzarli e valutarli. In base ai risultati dovrebbe adattarsi ai cambi di temperatura, umidità, traffico, ecc. e dovrebbe essere in grado di percepire uno stato dannoso, tale da permettere l'intervento tempestivo.

Sun & co (2018) nel loro articolo definiscono le infrastrutture del futuro come un sistema "cinque-zero" con zero vittime, zero ritardi, zero manutenzione, zero emissioni e zero guasti.

2.1 Sistemi di sensoristica

Il deterioramento delle infrastrutture causato dall'invecchiamento, e accelerato dalla ripetuta applicazione di carichi, o dalle condizioni ambientali, è una della più grandi preoccupazioni della gestione delle infrastrutture stradali, infatti un'infrastruttura di buona qualità è una chiave fondamentale per lo sviluppo sostenibile, fornendo le basi sia per la crescita economica sia per il benessere sociale (Morimoto 2013).

Conoscere lo stato della pavimentazione è di estrema importanza per preservare e estendere la vita nominale di progetto della stessa, ma anche per redigere un programma di gestione della manutenzione di tutte le infrastrutture.

Quando si parla di danno alle strutture e infrastrutture è importante conoscere tutte le sue fasi, per questo è utilizzato un metodo conosciuto come Structural Health Monitoring (SHM): si riferisce al processo di implementazione di una strategia di rilevamento (Yang 2014).

Le autorità che gestiscono la manutenzione delle infrastrutture stradali necessitano continuamente di dati, i quali derivano da continui controlli effettuati con l'utilizzo di profilati laser. Questa metodologia risulta però essere molto dispendiosa in termini di tempo e di denaro, quindi ci si affida sempre più spesso a metodi manuali come il deflettometro a massa battente (FWD), che ha però lo svantaggio di essere considerato un metodo soggettivo e quindi inaccurato. Ciò ha portato alla ricerca di nuovi metodi che possano essere economici ma allo stesso tempo dare risultati accurati, il risultato è stato l'utilizzo di sistemi basati su laser o tecnologie di imaging, ma nonostante questi sistemi portano risultati più accurati rispetto ai precedenti metodi, è sempre necessaria la presenza di un operatore e la sospensione del traffico sul tratto interessato dai controlli, ciò si traduce in un incremento dei costi della gestione delle infrastrutture. Inoltre i metodi di valutazione tradizionale risultano non essere proattivi per quanto riguarda il rilevamento dei disservizi, poiché sono capaci di identificare solo i danni superficiali, non captando quindi eventuali danni strutturali dei livelli più interni.

Le ricerche moderne si sono quindi indirizzate verso delle soluzioni che potessero essere più economiche e più facilmente gestibili, identificati con i sensori in situ, un uso efficace del monitoraggio di strutture nuove o esistenti, porterebbe alla realizzazione di sistemi infrastrutturali a lungo termine. Tali sistemi consentono il monitoraggio remoto

e continuo del ciclo di vita della pavimentazione stradale, inoltre non richiedono sondaggi frequenti e lo stato dell'infrastruttura può essere monitorato senza la sospensione del traffico. Con queste tecnologie è possibile un rilevamento precoce dei danni e quindi una manutenzione preventiva al posto di manutenzione correttiva (U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration 2013) (Manosalvas-Paredes, Nizar, et al. 2019) (Manosalvas-Paredes, Roberts, et al. 2019).

Ciò porterebbe alla realizzazione di sistemi infrastrutturali a lungo termine, dirigendosi verso quella che viene definita pavimentazione Smart, che dovrebbe essere a lungo termine ed economica, e mediante l'implementazione di "sensori intelligenti" questo è possibile: hanno caratteristiche di dimensioni ridotte, basso costo di montaggio e gestione (Yang 2014).

La tecnologia dei sensori consente di monitorare l'infrastruttura in modo efficace e in tempo reale; le reti di sensori hanno il vantaggio di essere strumenti convenienti e che possono essere distribuiti su tutta la rete, inoltre grazie alla loro versatilità è possibile implementare questo strumento in molte parti dell'infrastruttura quali ponti, tubi del servizio idrico, ecc., oltre ovviamente alla pavimentazione (Morimoto 2013).

La valutazione dello stato di salute della pavimentazione stradale è molto importante per determinare la durata della stessa, molti sono i metodi utilizzati per il monitoraggio, tra i metodi convenzionali ricordiamo il carotaggio, il taglio della pavimentazione, il deflettometro automatico, il deflettometro a massa battente (FWD), ecc. ma queste metodologie non permettono di comprendere completamente la risposta meccanica della pavimentazione, poiché sono meccanismi più superficiali e soprattutto la monitorizzazione avviene solo per brevi periodi.

Come riportato su Smart Pavement Monitoring (2013) l'approccio più utilizzato per monitorare lo stato di salute delle pavimentazioni stradali è il deflettometro a massa battente (FWD), si tratta di una prova di carico non distruttiva, e permettere di misurare la risposta alla deflessione della pavimentazione in più posizioni in un determinato momento (Figura 2-1). I risultati ottenuti vengono poi utilizzati per il calcolo delle proprietà dei materiali. Queste proprietà sono considerate rappresentative della risposta della pavimentazione soggetta a un carico, e possono essere utilizzate per valutare le sollecitazioni e sforzi validi per l'analisi a fatica della pavimentazione. Tuttavia non risulta essere un metodo molto scrupoloso, poiché la precisione dei risultati dipende dalla ipotesi utilizzate per l'analisi (De Maeijer, et al. 2019).

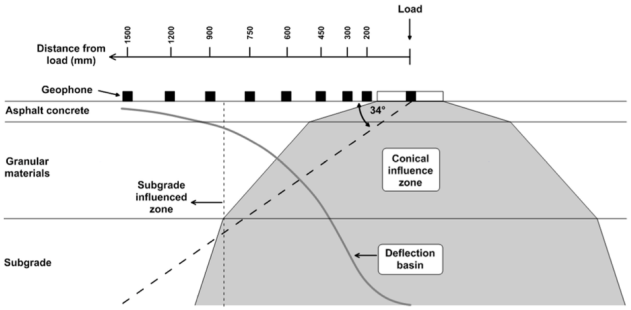


Figura 2-1: Schema della prova del deflettometro a massa battente (FWD)

È difficile escogitare un metodo univoco ed efficace per determinare le proprietà meccaniche della pavimentazione, per questo sono stati sviluppati, grazie alle molte innovazioni tecnologiche che si sono osservate nel corso degli ultimi anni, diverse metodologie per il monitoraggio delle infrastrutture. La vita utile dei sistemi di monitoraggio dovrebbe essere quasi in corrispondenza con la vita di un'infrastruttura, c'è necessità quindi di un sistema di sensori a lunga durata o facilmente sostituibile. Non si può non fare riferimento ai sensori a fibra ottica, che utilizzano dei materiali di vetro di lunga durata come sensore stesso, e immagini digitali per la mappatura dei danni. Il rilevamento mediante sensori a fibra ottica (FOS) usa la risposta del sensore ai parametri quali temperatura, tensione, vibrazione ecc. L'innovazione di questa metodologia sta nel fatto che la fibra diventa il sensore e decine di chilometri di fibra sono utili a rilevare contemporaneamente le variazioni dei parametri. Inoltre l'installazione è semplice e rapida, e il suo costo è molto più basso rispetto ai sensori standard (Soga e Schooling 2016) (Figura 2-2).

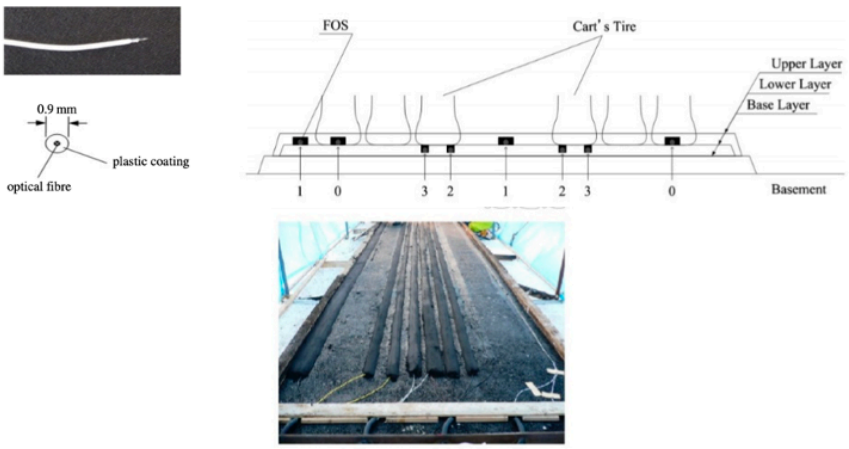


Figura 2-2: Intallazione dei sensori a fibra ottica (FOS) sotto la pavimentazione

Un'alternativa sta nell'uso di sensori wireless (WSN), ovvero un sistema di monitoraggio costituito da sensori che trasmettono le informazioni al centro di comando mediante onde radio. Questa tecnologia risulta più facile da installare e più economica rispetto ad un sensore tradizionale. Tra i vantaggi dell'utilizzo dei sistemi WSN vi è l'ampio numero di sensori che possono essere distribuiti nel tratto di interesse e la possibilità del monitoraggio in siti difficili da raggiungere (Soga e Schooling 2016).

I ricercatori dell'università di Cambridge e Imperial Collage di Londra (Hoult, et al. 2009) hanno studiato l'uso di sensori wireless per vedere se questi potessero offrire un'alternativa vantaggiosa in termini economici ai sistemi tradizionali. I WSN sono costituiti, come i sistemi di monitoraggio convenzionali, da una rete di sensori e da registratori di dati (gateway), la differenza è che i fili sono sostituiti da connessioni radio. La connessione tra questi elementi può avvenire secondo due disposizioni: a stella, in cui i nodi comunicano direttamente con il registratore di dati (Figura 2-3(a)); a maglie in cui i sensori sono collegati tra di loro e successivamente comunicano con il gateway (Figura 2-3(b)). La scelta della tipologia del modello da utilizzare dipende dal luogo in cui viene installata la rete di sensori.

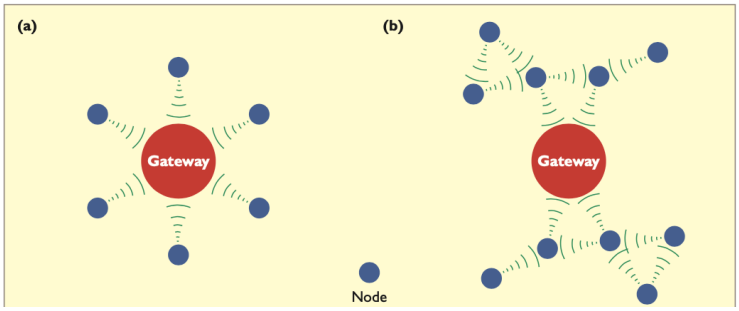


Figura 2-3: Configurazioni di rete dei sensori wireless: (a) tipologia a stella, in cui tutti i nodi comunicano direttamente al gateway; (b) tipologia a maglie, dove i nodi comunicano tra loro

Una grande limitazione nell'uso dei sensori wireless sta nell'utilizzo di batterie, alcuni ricercatori si sono quindi impegnati nel trovare una soluzione ottimale. È così che nascono i sensori di identificazione a radiofrequenza (RFID), sono una tecnologia radio passiva: cattura l'energia radio emanata da un lettore remoto e mediante la stessa comunica i dati della misura (Lynch e Loh 2006).

I sensori wireless possono essere implementati con un sistema MEMS (micro-elettromeccanico), che da la possibilità di un risparmio dei costi di montaggio significativo. Sono dei piccoli sistemi che combinano componenti elettriche e meccaniche di piccole dimensioni, variano da micrometri a millimetri. La dimensione così piccola non è l'unico dei vantaggi di questi sensori, infatti vengono utilizzati anche grazie ai consumi energetici ridotti, grazie alla alta sensibilità, e alla maggiore durata rispetto ai sistemi convenzionali. Inoltre sono dotati di un accumulatore di energia, che permette di ridurre o addirittura azzerare la sostituzione delle batterie, riducendo così i

costi della manutenzione e dello smaltimento di rifiuti pericolosi. Sono in grado di misurare accelerazione, inclinazione, temperatura, pressione, deformazione (Soga e Schooling 2016).

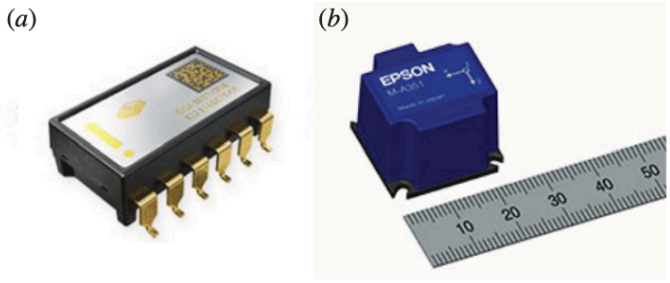


Figura 2-4: Esempi di sensori MEM: (a) inclinometro; (b) accellerometro

I principali vantaggi nell'utilizzo dei sensori wireless sono le prestazioni affidabili e a basso costo, il monitoraggio rapido e in tempo reale, e la possibilità di raggiungere anche aree più difficili. Se il costo iniziale potrebbe risultare elevato, questo verrà con il tempo ammortizzato, poiché non sarà più necessaria la presenza di tanti operatori, e di tante attrezzature per l'indagine. Inoltre i dati disponibili a distanza permetterebbero agli ingegneri di programmare tempestivamente interventi di manutenzione: la scoperta di danni, prima che questi siano visibili in superficie, risulta essere un'ulteriore fonte di risparmio (Morimoto 2013) (Careless 2020).

2.2 Arredo urbano Smart

La realizzazione di infrastrutture "intelligenti" non dipende solo dall'applicazione di sensori atti a valutare lo stato di salute della pavimentazione, ma anche dall'integrazione della tecnologia in tutto ciò che la circonda.

Gli arredi urbani costituiscono parte integrante dell'infrastruttura stessa e può contribuire a rendere più agevole l'utilizzo della stessa da parte degli utenti. In un mondo che si dirige sempre di più verso la totale tecnologizzazione è importante che anche questi elementi si indirizzino verso questo ambito. Il ruolo che gioca l'innovazione di questi sistemi è legato a due ambiti principali: la definizione di servizi Smart da essere consegnati ai cittadini e la definizione dei requisiti relativi alla sostenibilità dei materiali per la costruzione di questi arredi.

L'arredo urbano Smart rende possibile:

- razionalizzare le risorse disponibile, integrando molteplici servizi in un'unica infrastruttura;
- promuovere efficienza energetica e sostenibile;

- aumentare la sicurezza pubblica, aggiungendo videocamere intelligenti agli elementi di arredo urbano;
- comunicare meglio con il cittadino includendo schermi digitali;
- raccogliere dati per ottimizzare i servizi quali mobilità, turismo e sicurezza;
- garantire un'estetica curata, adattabili al contesto urbano circostante.

Un'infrastruttura connessa e sensibile permette l'utilizzo di più soluzioni per l'erogazione di servizi volti a incrementare l'efficienza dei supporti stradali/cittadini, e a supportare il monitoraggio del territorio. La città è in grado di comunicare e distribuire informazioni, di ricevere feedback sui malfunzionamenti o suggerimenti per migliorare il servizio (Ratti s.d.).

Il progetto presentato da (Ciaramella, et al. 2018) mira a creare un sistema di arredi urbani intelligenti collegati tra loro atti ad aumentare il benessere urbano dei cittadini includendo efficienza, accessibilità e funzionalità dei servizi pubblici, con il fine di permettere al cittadino di vivere in uno spazio funzionale e confortevole.

L'impegno di molte case produttrici è infatti quello di rendere tecnologico e applicare più funzionalità anche all'elemento che da sempre è considerato come una "risorsa morta", coniugando in un unico elemento le tecnologie più moderne, la tutela dell'ambiente e il risparmio energetico (Ratti s.d.).

Progettare l'arredo urbano a misura di ciclista è una prerogativa fondamentale nella realizzazione o nell'ammodernamento di piste ciclabili. L'attrezzatura necessaria per l'utenza in bicicletta (ciclo posteggi, postazioni di riparo, panchine, punti informativi, etc.) deve essere progettata con uno sguardo smart, per una più maggiore fruizione da parte degli utenti, e al fine di integrare più funzionalità in un unico elemento.

Nascono le prime panchine Smart, non più semplici sedute, ma elementi di design che integrano servizi utili al ciclista. Ad esempio le bike bench, sistemi di seduta che fungono anche da ciclo-parcheggio. Ed ancora panchine dotate di un servizio energeticamente autonomo grazie alla presenza di pannelli solari, con le funzioni di hotspot wi-fi, prese elettriche per la ricarica di dispositivi personali, sensori ambientali, display interattivo per pubblicità e informazioni di servizio, consultazione mappe elettroniche, etc.

Figura 2-5: Esempi di panchine Smart

Le aree di servizio per biciclette, dislocate lungo il percorso, sono dotate di distributori automatici di camere d'aria, lucchetti, kit d'intervento, e altri accessori utili al riparo delle biciclette in caso di emergenza e di postazioni per il gonfiaggio delle ruote. Una vera e propria officina per biciclette a porta di mano, grazie alla quale è possibile effettuare operazioni di manutenzione straordinaria durante la passeggiata in bicicletta.

Figura 2-6: Esempi di dispositivi per manutenzione straordinaria per biciclette

Anche le rastrelliere per biciclette diventano vere e proprie ciclo-stazioni, dotate di pannelli solari che producono energia utile per ricaricare le biciclette elettriche, private e di condivisione. Le postazioni più spaziose e posizionate in luoghi appositi, permettono la ricarica di diversi veicoli elettrici in contemporanea, come scooter, auto, e-bike.

Figura 2-7: Esempio di rastrelliera per ricarica e-bike

Tutti questi servizi possono anche essere integrati in un'unica area, solitamente collocata in corrispondenza di punti di attrazione di turisti, in un luogo che rappresenti la porta di accesso a un territorio. Le aree di sosta, sono infatti piccole strutture multifunzione, dotate di punti informativi con connessione wi-fi, di punti ricarica dei dispositivi, di ciclofficine per la manutenzione autonoma della bicicletta, di punti di ricarica per le e-bike, servizi igienici, etc.

Figura 2-8: Esempio di Info-point smart

3 Strutture prefabbricate

Con l'avvento dell'industrializzazione, anche il mondo delle costruzioni ha iniziato ad interessarsi a migliorare i processi produttivi, introducendo nuove tecniche costruttive e nuovi materiali, tra questi quello che sicuramente ha preso il sopravvento è stata la prefabbricazione. Alcuni degli elementi costruttivi venivano costruiti in officina per poi essere trasportati in cantiere. Da allora fino ad oggi, abbiamo assistito ad uno sviluppo delle tecniche utilizzate per la produzione prefabbricata, incentivate dal miglioramento dei macchinari industriali e da quelli di trasporto. Il boom di questo fenomeno si è avuto a partire dal secondo dopo guerra a causa dell'esigenza di grandi volumi di costruzioni nel minor tempo possibile. Due fattori predominanti hanno quindi permesso lo sviluppo di questa metodologia di costruzione: da una parte l'evoluzione delle tecniche di lavorazione, dall'altra la necessità di ottimizzare i tempi di costruzione (Civiero 2012).

La prefabbricazione può essere divisa per:

- **Luogo di esecuzione:**
  - In stabilimento o officina, l'elemento viene prodotto, depositato in magazzino e successivamente trasportato in cantiere per essere assemblato;
  - In cantiere o a piè d'opera, l'elemento è prodotto nei pressi del cantiere e depositato fino al suo utilizzo.
- **Materiale usato:**
  - Calcestruzzo/calcestruzzo armato;
  - Acciaio;
  - Legno;
  - Polimeri;
  - Altri materiali ad alta resistenza.
- **Geometria:**
  - Elementi lineari come travi e pilastri;
  - Elementi piani per solai, pavimentazioni, o elementi di facciata.
- **Portanza:**
  - Elementi portanti;
  - Elementi autoportanti;
  - Elementi portati.

Il settore dell'industria di strutture prefabbricate è ad oggi molto variegato, è possibile trovare ditte che lavorano su prefabbricati industriali quali capannoni, depositi, etc., o prefabbricati per l'edilizia pubblica e privata con strutture come infopoint, bagni pubblici, moduli abitativi, etc. oppure ancora con elementi costruttivi prefabbricati quali travi, pilastri, etc.

L'utilizzo di strutture prefabbricate, oltre alla possibilità di adattarsi ad una moltitudine di circostanze, ha molti altri vantaggi: innanzitutto la velocità, non è necessario

l'allestimento e disarmo delle casseforme, inoltre essendo prodotti in serie solitamente con dimensioni standard, i moduli possono essere facilmente adattabili a tutte le strutture in costruzione, quindi a seconda delle esigenze si può ricorrere a moduli già confezionati; maggiore sicurezza, negli stabilimenti tutte le fasi della realizzazione degli elementi sono scrupolosamente controllate e avvengono in un ambiente ottimale per garantire la massima qualità di ogni elemento, dalla preparazione del materiale, al getto, alla maturazione, etc.

La realizzazione di elementi prefabbricati permette un abbattimento dei costi, infatti trattandosi di prodotti di fabbrica, seguono processi automatizzati. L'unico fattore che potrebbe incrementare il costo totale dell'opera è il trasporto, che deve avvenire in sicurezza e con mezzi idonei. Nonostante ciò il bilancio totale della costruzione è positivo rispetto ad una realizzazione totalmente in cantiere.

Un altro motivo positivo nell'utilizzo di elementi prefabbricati è di carattere ecologico: non richiedendo grosse lavorazioni in cantiere ci sono meno scarti e quindi meno rifiuti speciali da smaltire. Inoltre le strutture così create, sono facilmente smontabili a fine ciclo di vita, con la possibilità di riciclaggio.

L'utilizzo di elementi prefabbricati, come anticipato precedentemente, non interessa esclusivamente il campo dell'edilizia, l'applicazione di questo sistema anche nel mondo delle pavimentazioni stradali ha visto un suo sviluppo nel corso degli anni. In questo campo l'innovazione ha visto la sua crescita soprattutto nell'ambito delle pavimentazioni soggetta a leggero carico veicolare, infatti gli esempi presenti interessano principalmente realizzazioni di piste ciclabili:

- Pista ciclabile "mOOve", ideata come una struttura prefabbricata interamente in plastica, dotata di sensori intelligenti per il monitoraggio della struttura e dell'aria (Figura 3-1(sinistra));
- Pista ciclabile a Krommenie (Olanda), realizzata con una lastra prefabbricata in calcestruzzo ricoperta da celle solari che generano elettricità (Figura 3-1(destra));
- Pista ciclabile a Zwolle (Olanda), consiste in una struttura stradale prefabbricata e modulare realizzata in plastica riciclata, è dotata di cavità tale da poter contenere i sotto servizi urbani oltre che fungere come raccoglitore per l'acqua piovana (Figura 3-2(sinistra));
- Copenhagenize Current è costituita da due elementi prefabbricati, la piastra in calcestruzzo armato prefabbricato è ideata in modo da rendere più agibile la manutenzione e quindi l'accesso alla trincea sottostante, anch'essa in calcestruzzo prefabbricato (Figura 3-2(destra)).

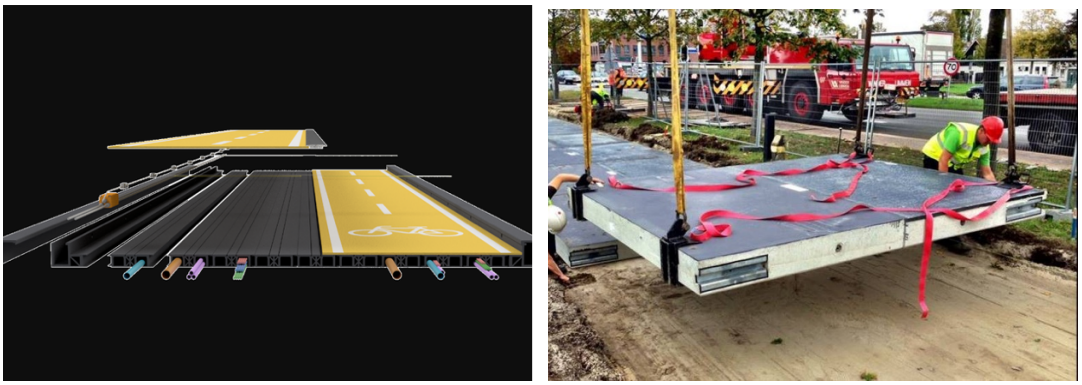


Figura 3-1: Esempi piste cicalbili prefabbricate: a sinistra Pista ciclabile “mOOve”; a destra Pista ciclabile a Krommenie (Olanda)

Figura 3-2: Esempi piste cicalbili prefabbricate: a sinistra Pista ciclabile a Zwolle (Olanda); a destra Copenhagenize Current

4 Caso studio

Il progetto ECO-SMARTROAD2.0 ha come obiettivo la realizzazione di un sistema stradale innovativo, ovvero una pista ciclabile formata da moduli prefabbricati composti da materiale riciclato e/o di recupero come plastica (PE), fresato di conglomerato bituminoso (RAP) o calcestruzzo di riciclo, da inserire in un'area sia urbana che extra urbana nella provincia di Cuneo.

La struttura modulare è composta da due elementi separati: una piastra e una sella.

L'elemento piastra rappresenta la superficie percorribile. La sella, dal punto di vista funzionale dovrà contenere i sotto servizi (cavi e tubazioni) e fungere da raccoglitore delle acque piovane, mentre dal punto di vista strutturale ha funzione di sostegno della piastra, mediante setti e/o pilastrini, e di trasferimento dei carichi alla fondazione, mediante la piastra di base. Inoltre la struttura prevede l'applicazione di un sistema di sensoristica avanzata atta alla manutenzione predittiva della struttura. I sensori restituiscono dati sulla quantità e tipologia di traffico veicolare, dati sullo stato deformativo della pavimentazione e dati per la localizzazione precoce di eventuali perdite di gas e/o acqua.

Si tratta di una multipla innovazione:

- Innovazione di miscela: realizzazione di una miscela composta da rifiuti che se non utilizzati verrebbero conferiti in discarica;
- Innovazione di processo: la realizzazione di moduli prefabbricati permette di creare in stabilimento moduli tutti uguali eliminando quindi gli errori di messa in opera.
- Innovazione nella manutenzione: i moduli posso essere ispezionati singolarmente ed eventualmente sostituiti eliminando il problema delle manutenzioni invasive effettuate su una normale pavimentazione;
- Innovazione tecnologica: applicazione del sistema sensoristico che rende la pavimentazione un sistema intelligente.

Vengono analizzate due alternative della struttura in funzione dell'area di posa:

- Scenario A: da utilizzare per la realizzazione di una pista ciclabile in sede propria in affiancamento al corpo stradale, come nel caso rappresentato in Figura 4-1;

Figura 4-1: Pista ciclabile in sede propria in affiancamento al corpo stradale

- Scenario B: sistema modulare di dimensioni più contenute, composto da materiale meno rigido, da utilizzare per la realizzazione di piste ciclabili in sede propria non in affiancamento (Figura 4-2).

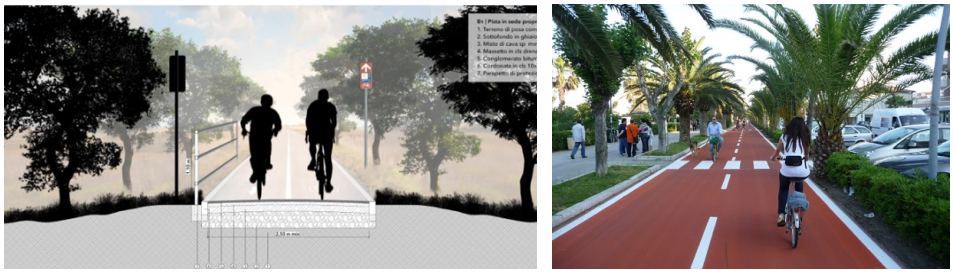


Figura 4-2: Pista ciclabile in sede propria non in affiancamento al corpo stradale

4.1 Tipologie strutturali adottate per le piste ciclabili

Come specificato in precedenza il presente studio verterà nella progettazione di una pista ciclabile di 50 metri composta da moduli prefabbricati.

La pista ciclabile in sede propria, modo o bidirezionale, presenta una sede percorribile separata dalle corsie veicolari. Da normativa, la larghezza minima per la singola corsia è di 1,50 m, compresa la striscia di margine, tale dimensione è riducibile a 1,25 m nel caso di corsie contigue, per un totale di 2,5 m. Partendo da questi limiti dimensionali, è possibile definire le grandezze per la progettazione strutturale degli elementi.

La **tipologia strutturale A** pensata come pista ciclabile bidirezionale da inserire in accostamento con la sede stradale, deve soddisfare quindi i seguenti requisiti:

- Larghezza minima della superficie percorribile di 2,5 m;
- Lunghezza di ogni modulo pari a 2,5 m tale da poter garantire uniformità di costruzione;
- Altezza utile della sella tale da garantire il corretto scolo delle acque piovane, dimensionata a seguito dell'analisi pluviometrica, e l'inserimento dei sottoservizi;

- Struttura robusta per sopportare eventuali carichi dovuti alla presenza accidentale di un veicolo sulla sede.

In base ai vincoli sopra elencati, le dimensioni degli elementi saranno:

- Piastra percorribile di dimensioni 2,7 x 2,5 m, con spessore 0,12 - 0,15 m;
- Sella con uguale superfice, altezza utile pari a 0,3 m, spessore piastra di base 0,10 m e spessore elementi di supporto 0,075 m.

Dato il requisito di robustezza strutturale, oltre agli opportuni spessori degli elementi, il dimensionamento è effettuato considerando un materiale che possa soddisfare tale richiesta, in particolare verrà utilizzato calcestruzzo con inerti riciclati.

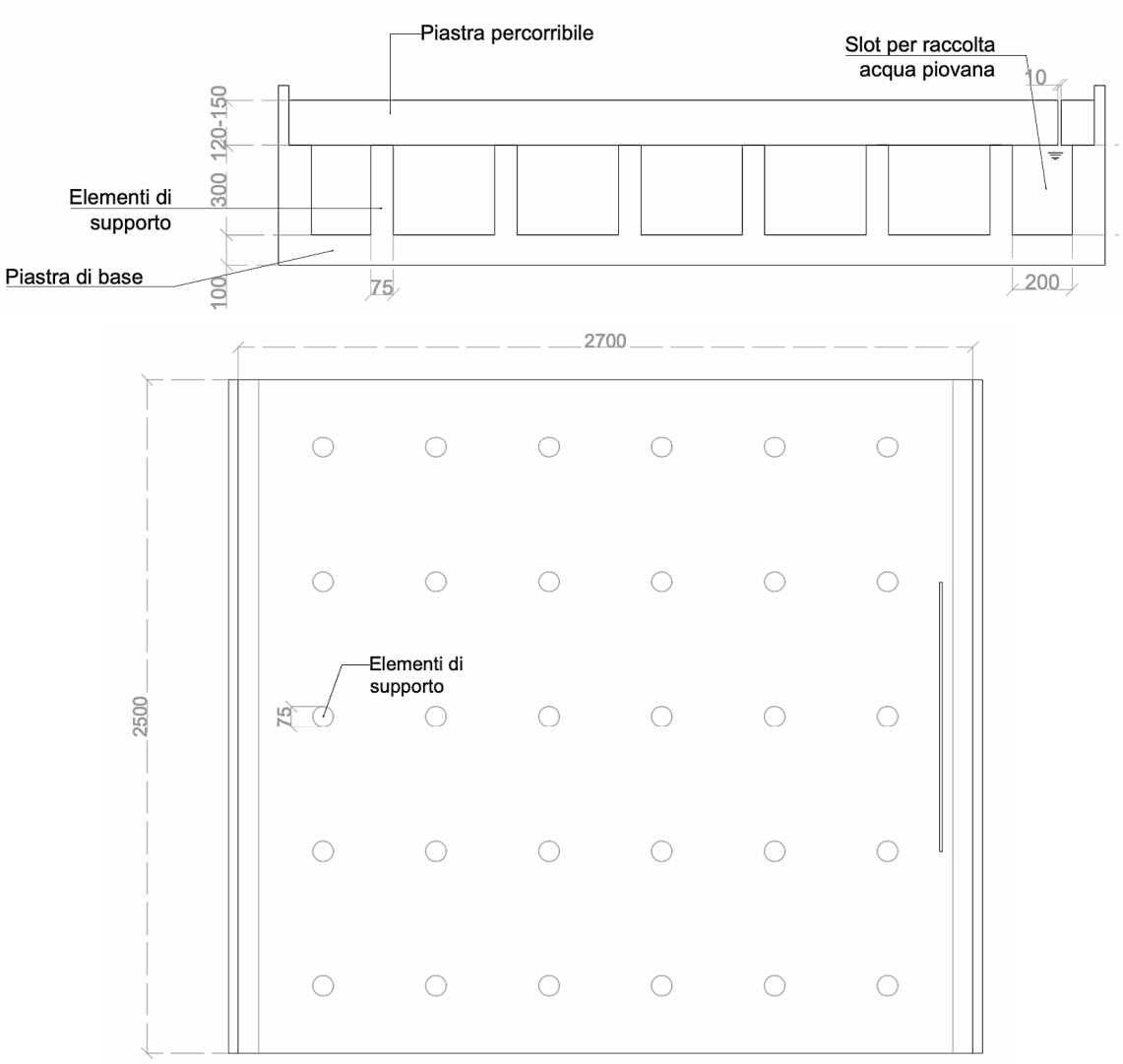


Figura 4-3: Sezione tipo struttura Scenario A (misure in mm)

La **tipologia strutturale B** è pensata per la realizzazione di una pista ciclabile in sede propria, lontana dalla sede stradale, e progettata come insieme di elementi modulari di modeste dimensioni da affiancare uno con l'altro e collegare mediante bulloni M12 cl 8.8, al fine di realizzare diverse configurazioni in relazione al luogo di posa, sempre nel rispetto delle prescrizioni della normativa. Per rendere percorribile la superficie, si prevede di inserire un tappeto di usura. I requisiti da soddisfare sono quindi:

- Larghezza tale da rispettare le dimensioni minime imposte dal decreto;
- Lunghezza di 1,25 m tale da poter creare moduli facilmente maneggevoli;
- Altezza utile della sella tale da garantire il corretto scolo delle acque piovane, dimensionata a seguito dell'analisi pluviometrica;
- Struttura più esile rispetto al caso precedente poiché deve sopportare solo i carichi dovuti dal traffico ciclo-pedonale.

In base ai vincoli sopra elencati, le dimensioni degli elementi saranno:

- piastra di dimensioni 0,25 x 1,25 m;
- sella con uguale superfice, altezza utile pari a 0,15 m;
- elementi con spessori pari a 0,02 – 0,03 m.

Il dimensionamento è effettuato considerando come materiale una miscela composta da polietilene e aggregati provenienti da fresato di pavimentazioni.

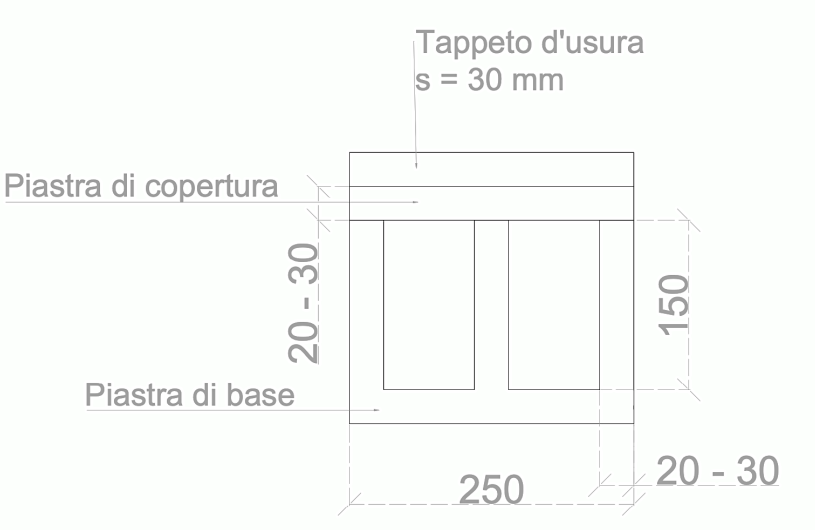


Figura 4-4: Sezione tipo struttura Scenario B (misure in mm)

4.2 Dimensionamento del sistema di raccolta dell'acqua piovana

4.2.1 Analisi pluviometrica

Per il dimensionamento del sistema di raccolta di acqua meteorologica si è proceduto alla definizione della portata di progetto partendo dai dati pluviometrici disponibili, relativi all'area di interesse.

Sono stati utilizzati i dati forniti da ARPA Piemonte (Banca dati metereologica) in particolare le precipitazioni di massima intensità, per brevi e lunghe durate, registrate dalla stazione pluviometrica del Comune di Bra (CN), della quale sono disponibili i dati storici per il periodo 1993-2017. Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori di precipitazione per le durate di 10, 15, 30, 60 minuti e per 1, 3, 6, 12, e 24 ore.

Tabella 4-1: Precipitazioni di pioggia (mm) per le varie durate

Anno	Pioggia (mm) per le varie durate			
	10 min	20 min	30 min	60 min
1993				
1994	7,7	9,4	10,3	12,6
1995	15,7	23	33	61,9
1996	9,5	13,4	16,6	18,4
1997	12,8	18,3	20,5	27,2
1998	10	15,3	20	25
1999	17,2	30,8	40,1	42,9
2000	10,3	13,7	18,7	19,9
2001	12,1	20,3	21,4	21,6
2002	17,3	24,3	27,5	32,8
2003	6,5	7,6	7,8	7,8
2004				9
2005	8,5	13	14	19,3
2006	14,8	19,8	20	20,2
2007	16	25,9	37,4	47,5
2008	11,6	15,3	23,4	31,7
2009	10,7	15,2	17,6	28,6
2010	9,6	13,6	15,7	21,1
2011	19,9	20,7	20,7	27,3
2012	7,8	12,9	15,2	17,6
2013	7	9,6	12,5	15,9
2014	17,6	23,7	26,8	28
2015	11	13,3	17,2	20,8
2016	13,5	18,4	19,4	20,8
2017	12,8	16,3	16,7	18,3

Anno	Pioggia (mm) per le varie durate				
	1h	3h	6h	12h	24h
1993					
1994	12,6	24,6	43,5	72,6	106,9
1995	61,9	81	82,4	84,4	94,3
1996	18,4	23,8	29	35,6	54,3
1997	27,2	28,6	28,6	34,2	37,2
1998	25	27,2	29,2	34,2	51,5
1999	42,9	43,1	43,1	62,8	83,9
2000	19,9	27,3	34,5	54,7	83,5
2001	21,6	21,6	30,2	30,8	30,8
2002	32,8	35,6	39,4	51,7	64,5
2003	7,8	11	17,6	26,6	40
2004	9	12,2	22,9	30,5	39,7
2005	19,3	22,8	32,3	46,1	56,1
2006	20,2	29,9	49,9	60,2	87,4
2007	47,5	58	65	74	74,2
2008	31,7	32,1	32,1	39,9	58,7
2009	28,6	34,4	35,2	52,9	79,6
2010	21,1	28,6	40,6	56,3	77,4
2011	27,3	28,9	29,1	34,1	51,7
2012	17,6	19,2	31,3	47,1	63,6
2013	15,9	17,3	22,6	36,7	51,7
2014	28	30,8	34,8	36,5	53,7
2015	20,8	22,6	30,6	30,8	39,1
2016	20,8	28,3	46,8	65,8	114,6
2017	18,3	22,1	22,1	24,8	25

Esiste una stretta correlazione tra le dimensioni del bacino e la durata di pioggia che può mettere in crisi un sistema di drenaggio. Per bacini molto grandi bisogna considerare piogge di lunga durata, anche della durata di giorni; per bacini estesi occorre considerare piogge intense della durata di alcune ore (1÷24 ore); per i bacini di

dimensioni ridotte, o per opere di raccolta acqua, come le canalette stradali, essendo il tempo corrivazione dell'ordine dei 10 minuti, l'evento critico da considerare sarà uno scroscio di breve durata (10÷60 minuti) (Santagata s.d.).

Si procede quindi il dimensionamento considerando esclusivamente le intensità di pioggia di breve durata sintetizzati in Tabella 4-1.

I valori presentati nelle tabelle precedenti hanno fornito la base per l'analisi probabilistica finalizzata alla determinazione delle curve di probabilità pluviometrica per diversi tempi di ritorno, mediante la legge probabilistica di Gumbel. Tali curve permettono di ricavare l'altezza di pioggia che si abbatte sull'area in esame, assegnato un determinato periodo di ritorno "T_R" corrispondente ad una certa durata dell'evento.

Il periodo di ritorno, associato a un dato valore "x" di una variabile "X", rappresenta il numero medio di anni che bisogna attendere affinché "x" sia superato o eguagliato per la prima volta.

La probabilità di superamento va scelta in funzione della categoria di strada, per le strada di maggiore importanza è richiesta una maggiore affidabilità delle opere di drenaggio.

Tabella 4-2: Valori tipici del tempo di ritorno

Classificazione strada	Probabilità di superamento [%]	Tempo di ritorno [anni]
Extraurbana primaria	2	50
Extraurbana principale	2 – 4	25 – 50
Extraurbana secondaria	4 – 10	25 – 10
Extraurbana locale	20 – 10	5 – 10
Urbana primaria	4 – 2	25 – 50
Urbana principale	4	25
Urbana secondaria	10	10
Urbana locale	20 – 10	5 – 10

Nel caso in esame si fa riferimento a più tempi di ritorno, in particolare, 5, 10, 25 e 50 anni, per poter confrontare eventi comuni con eventi rari.

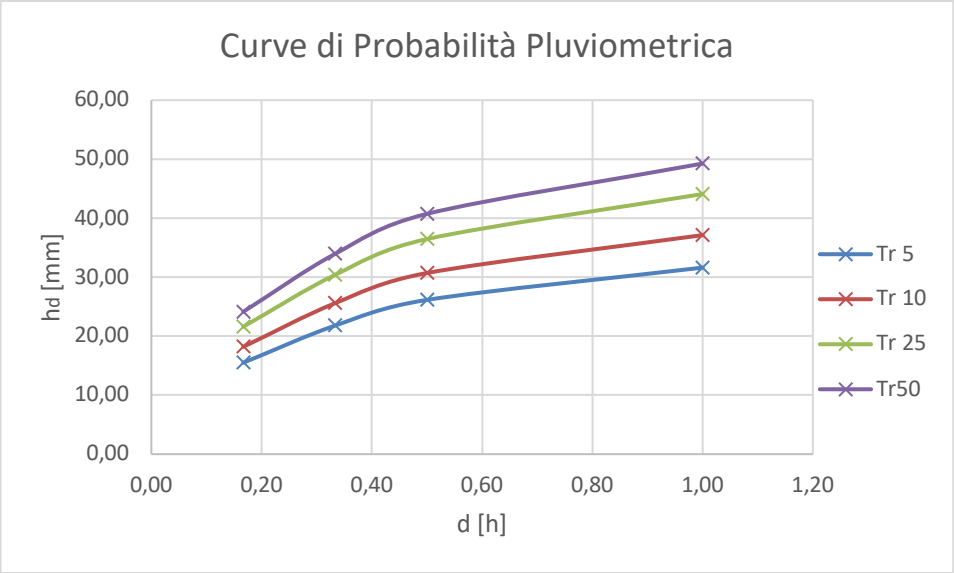


Figura 4-5: Curve di probabilità pluviometrica

Le curve di probabilità pluviometrica sono poi trasferite sul piano b logaritmico, al fine di determinare i parametri *a* e *n* utili nel calcolo dell'intensità di pioggia.

$$i = a * t^n \qquad [9]$$

Una volta assegnato il tempo di ritorno e determinata la curva di possibilità pluviometrica bisogna definire l'intensità critica di precipitazione ovvero, l'intensità costante di quella pioggia, supposta uniformemente distribuita sul bacino. Tale intensità critica si determina considerando una durata *t* pari al tempo di corrivazione "t_c", ovvero il tempo necessario alla goccia di pioggia che cade nel punto idraulicamente più lontano per raggiungere la sezione di chiusura del bacino.

In genere, nel caso di rete di drenaggio artificiale il tempo di corrivazione "t_c" può essere determinato facendo riferimento al percorso idraulico più lungo della rete fino alla sezione di chiusura considerata, facendo riferimento alla somma:

$$t_c = t_a + t_r \qquad [10]$$

dove:

- t_a è il tempo di accesso alla rete e viene generalmente assunto in fase di progettazione a seconda della pendenza dell'area, della sua natura e del livello di realizzazione dei drenaggi minori;
- t_r è il tempo di percorrenza in rete seguendo il percorso più lungo della rete di drenaggio.

Vista le dimensioni modeste dell'area in esame e nell'ipotesi di realizzare un buon numero di caditoie e punti di raccolta dell'acqua si ipotizza un tempo di ingresso in rete

pari a 25 secondi. Per quanto riguarda invece il tempo di percorrenza in rete, si suppone che la velocità con cui la particella d'acqua si muove all'interno del pluviale sia attorno a 0.5 m/s. Considerato che la distanza massima, e dunque più sfavorevole, tra due tubazioni per il convoglio dell'acqua, possa essere di circa 100m, risulta pari a 400 s.

Il tempo di corrivazione risulta cosi pari a 25 s + 400 s = 425 s ≅ 7 min.

Nella valutazione della portata pluviale che il sistema deve smaltire, concorrono un elevato numero di variabili, alcune insite nella morfologia dell'area drenante, come ad esempio la forma, l'estensione, la rugosità e la permeabilità; altre dipendenti dall'evento piovoso quali la durata, l'intensità e le variazioni della stessa durante l'intervallo di tempo considerato.

Generalmente, la portata meteorica netta che affluisce alla rete di raccolta è inferiore rispetto alla portata meteorica lorda poiché una parte dell'acqua evapora o viene intercettata o trattenuta al suolo o addirittura riempie piccole cavità.

La determinazione dell'afflusso meteorico netto avviene tramite la stima del coefficiente d'afflusso φ. Detto coefficiente rappresenta il rapporto tra il volume totale di deflusso e il volume totale di pioggia caduta sul bacino. Da letteratura, si assume φ pari a 0,95. (Tabella 4-3)

Tabella 4-3: Valori dei coefficienti di deflusso

Valori raccomandati per analisi su superfici composite		
Strade	Conglomerato bituminoso	0,70 – 0,95
	Calcestruzzo	0,80 – 0,95
Marciapiedi		0,75 – 0,85
Tetti		0,75 – 0,85

La determinazione della portata di pioggia di progetto viene effettuato tramite l'applicazione della formula razionale, utilizzata nella progettazione di collettori fognari o canali. Sotto determinate ipotesi tale formula permette di calcolare la massima portata che una data pioggia determinerà, per un dato bacino idrologico, in una sezione idraulica di controllo. L'espressione della formula razionale risulta:

$$Q = \varphi * i * A \qquad [11]$$

dove:

- φ è il coefficiente di deflusso;
- i [l/s*ha] è l'intensità media oraria, data dal rapporto di h, altezza d'acqua caduta, su t_c, durata critica di pioggia;
- A [ha] superficie scolante.

La superficie scolante è stata determinata considerando la configurazione più critica:

- Scenario A, ossia in area urbana, con presenza di marciapiede e carreggiata stradale di categoria F, considerati come superficie impermeabile, che defluiscono nel punto di raccolta in progetto. La superficie scolante totale risulta quindi:

$$A = 1{,}5+2*2{,}75+3 = 10 \text{ m}$$

- Scenario B, considerata l'area di progetto come area separata, la superficie scolante risulta pari a:

$$A = 2{,}5 \text{ m}$$

Utilizzando una durata critica di 10 minuti (>7 minuti del tempo di corrivazione, dunque cautelativo), risulta:

Tabella 4-4:Portata di pioggia di progetto

	T_r			
	5 anni	10 anni	25 anni	50 anni
***i* [l/s*ha]**	268	314	373	417
Q_A [m^3/s]	0,0254	0,0299	0,0355	0,0396
Q_B [m^3/s]	0,0064	0,0075	0,0089	0,0099

4.2.2 Altezza modulo di raccolta acqua

Al fine di raccogliere l'acqua meteorica, si immagina di non inserire una canaletta, bensì di sfruttare il modulo di base su cui poggia la piastra. Dati i modesti valori di portata, e quindi per evitare eventuali problemi di ristagno di acqua è stato deciso di convogliare l'acqua esclusivamente nella zona sottostante le caditoie.

Per la tipologia di struttura A, l'area sarà delimitata da setti continui, posti a distanza di 0,20m.

Per la seconda tipologia, per la superficie bagnata si suppone una larghezza di 0,10m.

Per il dimensionamento del "raccoglitore" dell'acqua, è possibile utilizzare la formula di Manning-Strickler:

$$Q = \frac{K}{n} * A * R_H^{\frac{2}{3}} * i_f^{1/2} \qquad [12]$$

dove:

- Q è la portata (m^3/s);
- K =1

- n è il coefficiente di scabrezza di Manning, dipende dalla natura del materiale;
- A è l'area bagnata (m^2);
- R_H è il raggio idraulico (m), definito come rapporto tra area bagnata ed il perimetro bagnato;
- i_f è la pendenza del canale (m/m).

I coefficienti di scabrezza n di Manning sono riportati in Tabella 4-5:

Tabella 4-5: Coefficienti di scabrezza n di Manning

Tipo di canaletta o pavimentazione		n
Canaletta in calcestruzzo		0,012
Pavimentazione bituminosa	Tessitura fine	0,013
	Tessitura grossa	0,016
Pavimentazione in calcestruzzo	Tessitura fine	0,014
	Tessitura grossa	0,015

Posti i vincoli sopra riportati:

- b = 0,20 m per lo scenario A
- b = 0,10 m per lo scenario B

mediante la funzione "Ricerca obiettivo" di Excel, è stato possibile calcolare le dimensioni minime del modulo, al fine di riuscire a far defluire tutta l'acqua raccolta. I risultati sono riportati nella tabella sottostante, per i diversi periodi di ritorno considerati.

Tabella 4-6: Altezza minima da garantire per la canaletta

	Tr			
	5 anni	10 anni	25 anni	50 anni
h_A [m]	0,10	0,11	0,13	0,14
h_b [m]	0,07	0,08	0,09	0,10

Come si evince dai risultati:

- Scenario A:

per eventi metereologici con probabilità di superamento alta (T_r 5-10 anni), è necessaria un'altezza di circa 10 cm, mentre per eventi rari l'altezza dovrebbe essere incrementata di 5 cm.

Cautelativamente si considera un'altezza totale del modulo pari a 20c m. La sezione trasversale dello slot per la raccolta delle acque piovane è rappresentata in Figura 4-6.

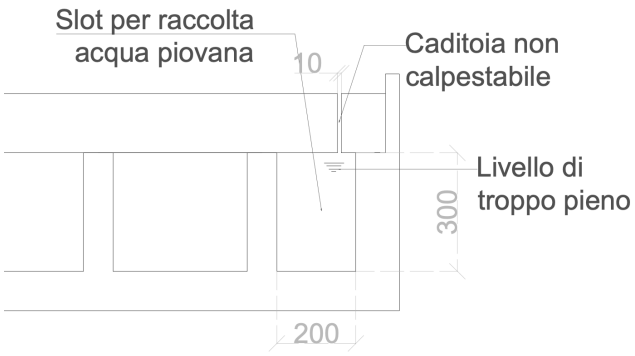


Figura 4-6: Slot per la raccolta acque piovane (misure in mm) - Scenario A

- Scenario B:

per eventi metereologici con probabilità di superamento alta (T_r 5-10 anni), è necessaria un'altezza utile di circa 7 cm, mentre per eventi rari l'altezza dovrebbe essere incrementata di almeno 3 cm.

Cautelativamente si considera un'altezza totale dell'elemento pari a 15cm. La sezione trasversale è rappresentata in Figura 4-7.

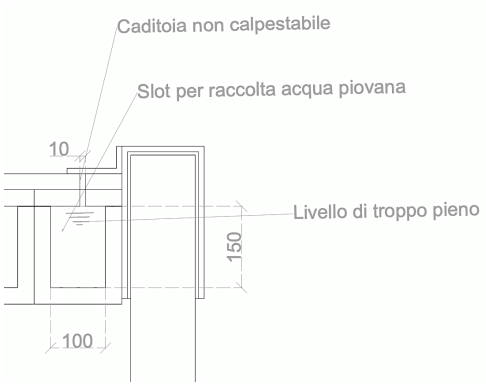


Figura 4-7: Slot per la raccolta acque piovane (misure in mm) - Scenario B

4.2.3 Dimensionamento caditoia

Al fine di dimensionare le caditoie da posizionare in opera nella struttura, per lo smaltimento delle acque meteoriche, si fa riferimento all'equazione per il calcolo della portata nel caso di moto uniforme.

Utilizzando nuovamente la formula di Manning-Strickler, e considerata *B* la larghezza di un canale (m) e *y* l'altezza di moto uniforme (m), se si ipotizza un canale rettangolare infinitamente largo (*B>>y)* il perimetro bagnato P risulta pressoché uguale a *B* invece che *B+2y* poiché la profondità *y* è trascurabile rispetto alla larghezza. Il raggio idraulico è pari a:

$$R_H = \frac{A}{P} = B * \frac{y}{B} = y \quad [13]$$

La portata risulta quindi pari a:

$$Q = K_s * A * y^{2/3} * i_f^{1/2} \quad [14]$$

Uguagliando questa formula con quella del metodo razionale:

$$Q = \varphi * S * i \quad [15]$$

e nota l'intensità critica di precipitazione, il coefficiente di afflusso assunto pari a 0,95, e la superficie scolante S, data dal prodotto tra la larghezza della sede stradale e l'interasse tra le caditorie considerato pari alla lunghezza del singolo modulo, è possibile calcolare l'altezza di moto uniforme.

Il problema relativo alla lunghezza *L* da assegnare alla caditoia per poter assicurare il drenaggio della portata *Q* è stato affrontato nell'ipotesi di moto gradualmente vario con portata decrescente e con energia specifica costante lungo tutto il percorso della grata. Con tali ipotesi, assumendo una grata pianta di larghezza *l* e con carico *y*, l'equazione del moto si può scrivere:

$$H = y + \frac{v^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2g * l^2 * v^2} \quad [16]$$

dalla quale, posto q=Q/l e sapendo che

$$q = y * \sqrt{2 * g * (H - y) * y} \quad [17]$$

Si deduce che l'espressione che consente di determinare, per y=0, la lunghezza *L* da assegnare alla grata:

$$\frac{L}{H} = \frac{1}{2 * C * p} * \left[sin^{-1} * \sqrt{\frac{y_0}{H} + 3} * \sqrt{\frac{y_0}{H} * \left(1 - \frac{y_0}{H}\right)} \right] \quad [18]$$

dove:

- H è l'energia specifica sulla grata (m);
- y_0 è il battente idrico nella sezione iniziale di ingresso alla grata;
- C è il coefficiente di contrazione, assunto pari a 0,5;
- p è la frazione efficace dell'area della griglia, data dal rapporto tra la superficie totale delle fessure e la superficie complessiva della grata.

Si ipotizza di utilizzare caditoie a fessura, poiché si integrano perfettamente nella pavimentazione, e si mimetizzano nel paesaggio urbano.

Dalle equazioni sopra riportate:

- Scenario A:

assumendo l = 0,01 m (larghezza caditoia) e y_0 = 0,065 m, attraverso l'equazione si ottiene H = 0,18 m. Con p = 0,25 dall'equazione per il calcolo della lunghezza L della grata sopra riportata, si ottiene L = 0,79 m.

Per semplicità di applicazione, si decide di utilizzare una grata di dimensioni standard, facilmente reperibile in commercio. Le caratteristiche geometriche saranno quindi:

Equidistanza tra caditoie= 2,5 m

Larghezza della caditoia= 0,01 m

Lunghezza della caditoia= 1 m

- Scenario B:

assumendo l = 0,01 m (larghezza caditoia) e y_0 = 0,048 m, attraverso l'equazione si ottiene H = 0,05 m. Con p = 0,25 dall'equazione per il calcolo della lunghezza L della grata sopra riportata, si ottiene L = 0,36 m.

Si ipotizza di considerare una fessura realizzata direttamente sulla lastra prefabbricata. Le caratteristiche geometriche saranno:

Equidistanza tra caditoie= 1,25 m

Larghezza della caditoia= 0,01 m

Lunghezza della caditoia= 0,40 m

4.3 Caratteristiche della sotto-struttura (sottofondo e fondazione)

Il supporto della pavimentazione su terreno è costituito da fondazione e sottofondo: la fondazione ha la funzione di raccordo tra la pavimentazione e il sottofondo, normalmente caratterizzati da rigidezze molto diverse; il sottofondo ha la funzione di assorbire le sollecitazioni trasferite attraverso la massicciata.

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.

Nel caso in cui non si possano effettuare prove in situ per determinarne la stratigrafia, è possibile utilizzare dati noti delle zone adiacenti. Sono state quindi utilizzate le informazioni fornite da SIGeo di Arpa Piemonte inerenti a una indagine geologica

effettuata nella zona del cimitero comunale della città di Bra. I dati della perforazione e la stratigrafia tipica individuata sono di seguito riportati:

Perforazioni: P11

Codice perforazione	106409
Nome perforazione	P11
Comune	Bra
Codice ISTAT	004029
Provincia	CN
Località	Cimitero comunale
Codice sezione CTR	192110
Nome sezione CTR	BRA
Data inizio perforazione	2/12/2000
Data fine perforazione	5/12/2000
Cantiere	Rete di Monitoraggio Regionale cimitero (00402910001)
Formazione geologica	Depositi fluviali argilloso-sabbioso-ghiaiosi, con paleosuolo giallo rossiccio (Pleistocene)
Quota piano campagna (m s.l.m.)	275,00
Profondità sondaggio (m)	12,00
Livello falda freatica (m)	6,10
Diametro perforazione (mm)	178
Diametro rivestimento (mm)	130
Inclinazione	0
Tecnica di perforazione	rotazione a carotaggio continuo
Tipo materiale	terreno

Codice perforazione	Profondità (m)	Descrizione
106409	0.15	asfalto
106409	0.30	ghiaia medio fine poligenica in matrice sabbiosa
106409	1.60	limo argilloso debolmente sabbioso con ghiaia e ciottoli poligenici
106409	3.70	ghiaia e ciottoli poligenici in matrice sabbiosa localmente debolmente limosa
106409	12.00	argilla limosa

Figura 4-8: Dati perforazione e descrizione stratigrafia individuata

L'indagine è stata effettuata in area urbana e come si nota dai dati presentati i primi 0,30 m sono costituiti da asfalto e materiale di riporto, scendendo in profondità troviamo limo argilloso, fino al livello di 1,60 m.

Essendo la struttura interrata per un massimo di 0,50 m, per la valutazione della stratigrafia si tiene conto di un unico strato, costituito da limo argilloso nel caso in cui l'opera è posizionata in area extraurbana, o da materiale di riporto se l'opera è collocata in area urbana.

In assenza di prove di laboratorio, per la tipologia di terreni individuati si possono desumere i seguenti parametri geotecnici:

Materiale di riporto:

- Peso di volume $\gamma' = 19$ kN/m^3
- Coesione $c' = 0$
- Angolo di attrito $\varphi' = 32°$

Limo argilloso:

- Peso di volume $\gamma' = 18$ kN/m^3
- Coesione $c' = 10$ kPa
- Angolo di attrito $\varphi' = 27°$

4.3.1 Sottofondo

Il sottofondo rappresenta la superficie su cui poggia la sovrastruttura, può essere costituito da terreno naturale (compattato o stabilizzato) o da terreno di riporto.

Il comportamento dello strato di sottofondo è influenzato dalle condizioni climatiche locali, quindi temperatura, umidità e gelo possono influenzare la durabilità della sovrastruttura. È facile intuire che le deformazioni del sottofondo hanno un andamento ciclico annuale, dipendente dalle condizioni metereologiche: le massime deformazioni si hanno nei periodi più piovosi, o durante il disgelo del ghiaccio presente nello strato di sottofondo; invece la minima deformabilità si ha nei periodi freddi grazie alla formazione di lenti di ghiaccio.

In fase di progettazione bisogna quindi tener conto di questi aspetti, valutando i parametri di portanza del sottofondo.

Sul Catalogo Italiano delle Pavimentazioni Stradali (Domenichini, et al. 1995), in presenza di uno strato di fondazione si raccomanda un valore di modulo resiliente del sottofondo pari a 90 N/mm^2 per pavimentazioni di autostrade, strade extraurbane a forte traffico e strade urbane di scorrimento; un valore minimo del modulo resiliente del sottofondo pari a 30 N/mm^2 è richiesto per gli altri tipi di strade.

La portanza del sottofondo è determinata attraverso il modulo di reazione (costante di Winkler) k, derivante dalla prova di carico su piastra, definito come rapporto tra pressione p esercitata durante la prova e la deflessione d del terreno sotto la piastra:

$$k = \frac{p}{d}$$

Il metodo adottato dal CNR prevede l'utilizzo di una piastra di diametro pari a 76 cm, mediante la quale si ricava la deflessione che si produce per una pressione applicata pari a 70 kPa.

Nel caso in cui non è possibile effettuare la prova di carico su piastra, si può ricorrere a correlazioni sperimentali tra il modulo *k* ed altri parametri caratterizzanti la portanza del sottofondo.

Il parametro scelto per caratterizzare la portanza del sottofondo è il "modulo resiliente" Mr, valutabile sperimentalmente utilizzando la norma AASHTO T274-82. Come riportato dal Bollettino CNR n. 178, la scelta di tale parametro è stata dettata dal fatto che esso meglio rappresenta il comportamento del sottofondo, in quanto consente di tener conto anche della componente viscosa reversibile della deformazione. Esso è correlabile ai parametri più comunemente utilizzati quali l'indice di portanza CBR e il modulo di reazione k. Sono state considerate tre categorie di terreno di sottofondo di buona, media e scarsa portanza rappresentate dai valori del modulo resiliente Mr riportati in tabella:

Tabella 4-7: Correlazione Modulo resiliente, CBR, Modulo di reazione del terreno

Modulo resiliente del sottofondo	Indice CBR	Modulo di reazione
M_R = 150 N/mm^2	CBR = 15%	k = 100 [kPa/mm]
M_R = 90 N/mm^2	CBR = 9%	k = 60 [kPa/mm]
M_R = 30 N/mm^2	CBR = 3%	k = 20 [kPa/mm]

4.3.2 Fondazione

La fondazione 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 fondazione per le caratteristiche prestazionali richieste. La presenza di una fondazione, incrementa il valore del modulo *k*. In assenza di prove di carico su piastra, il contributo che la fondazione fornisce alla capacità portante, può essere dedotto attraverso formule riportate in letteratura, le quali mettono in relazione il modulo *k* della fondazione, il suo spessore e l'indice CBR del sottofondo.

La fondazione 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.

Analizzando in particolare il misto granulare, questo è costituito da una miscela di acqua e aggregati ottenuti mediante trattamento di materiale naturale, artificiale o riciclato. Gli aggregati risultano composti dall'insieme di aggregati grossi (trattenuti al

crivello UNI n. 5) e di aggregati fini: l'aggregato grosso è generalmente costituito da elementi ottenuti mediante frantumazione di rocce lapidee o da elementi naturali tondeggianti di provenienza o natura petrografia diversa; l'aggregato fino deve essere costituito da elementi naturali o di frantumazione.

L'acqua utilizzata deve essere esente da impurità dannose quali oli, acidi, alcali, materie organiche od altre sostanze nocive e comunque conforme alla norma UNI EN 1008. La quantità di acqua nella miscela sarà quella corrispondente all'umidità ottima di costipamento con una variazione compresa entro ± 1% del peso della miscela per consentire il raggiungimento delle resistenze appresso indicate.

CARATTERISTICHE DELLA MISCELA

La miscela degli aggregati impiegati per il confezionamento del misto granulare confezionato in centrale per lo strato di fondazione dovrà avere la composizione granulometrica, determinata in conformità alla norma UNI EN 933-1, compresa nei limiti del fuso riportato nella seguente tabella:

Tabella 4-8: Fuso granulometrico misto granulare

Setacci [mm]	Passanti	
	Limite inferiore [%]	Limite superiore [%]
63	100	100
31,5	85	100
16	55	80
8	35	65
4	25	50
2	18	40
1	14	34
0,5	10	28
0,063	4	11

Qualora le caratteristiche del misto non rispondessero a tali indicazioni il D.L. potrà permetterne la correzione mediante aggiunta di inerti di dimensioni e caratteristiche tali da riportare la curva granulometrica nel fuso richiesto e per un massimo del 20% in peso del totale della miscela.

La miscela di misto granulare dovrà presentare le caratteristiche meccaniche (su provini confezionati all'ottimo di umidità secondo la norma UNI EN 13286-50) conformi ai requisiti riportati nella tabella seguente:

Tabella 4-9: Caratteristiche meccaniche miscela di misto granulare

Requisito	Normativa	Valore limite
Modulo di deformazione (intervallo 0,15 - 0,25 N/mm2) a 24 ore dalla compattazione	CNR B.U. 146	>80 [N/mm^2]
Densità in situ (rispetto alla densità massima Proctor)	CNR B.U. 22	>95 [%]
Indice di portanza CBR (4 giorni in acqua)	UNI EN 13286-47	>50 [%]

Lo spessore dello strato di fondazione viene stabilito dal progettista: è opportuno non avere spessori inferiori a 10 cm e superiori a 20 cm. Nel caso in esame, al fine di soddisfare la pendenza trasversale del 2%, necessaria a garantire il deflusso delle acque meteoriche di piattaforma, lo strato di misto granulare verrà compattato con uno spessore variabile.

Noto lo spessore della fondazione e il modulo *k* della reazione del terreno del sottofondo, si passa al calcolo del modulo di reazione *k* incrementato dello strato di fondazione in misto granulare, utilizzando la Tabella 4-10 (Huang 2004).

Tabella 4-10: Effetto del sottofondo non trattato sul valore k

TABLE 12.3 Effect of Untreated Subbase on *k* Values

Subgrade *k* value (pci)	Subbase *k* values (pci)			
	4 in.	6 in.	9 in.	12 in.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Note. 1 in. = 25.4 mm, 1 pci = 271.3 kN/m^3.

Source. After PCA (1984).

I dati sono stati interpolati per avere una migliore visione di come varia il modulo di reazione all'aumentare dell'altezza della fondazione (Figura 4-9):

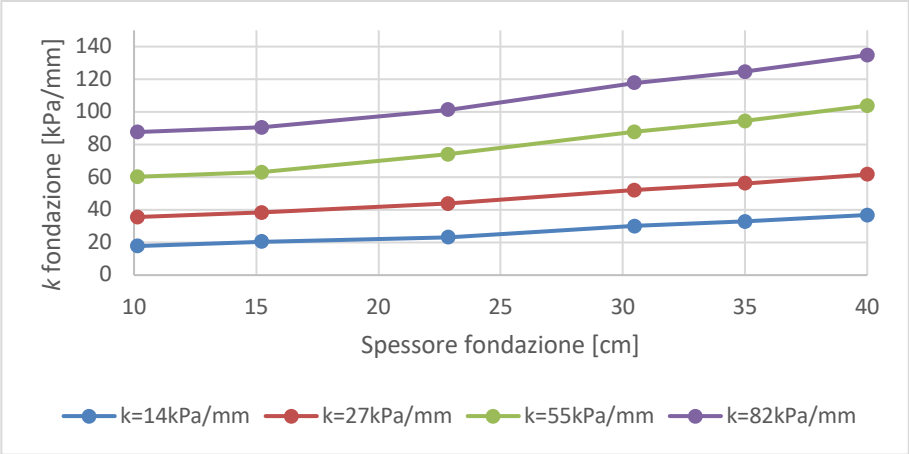


Figura 4-9: Definizione modulo k della fondazione

Considerando un valore di *k* del sottofondo pari a 27 kPa/mm, corrispondente a un terreno con scarsa portanza, come riportato in Tabella 4-7, e attribuendo alla massicciata uno spessore di 15-20 cm, la reazione totale della fondazione sarà pari a 40 kPa/mm.

4.4 Dimensionamento strutturale della pavimentazione (criteri di analisi e verifica)

Il concetto di vita nominale (*Vn*) 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.

In accordo con il CNR, con riferimento alla valutazione dei "livelli di sicurezza", la vita nominale della struttura, da adottare in fase progettuale, deve essere non inferiore a 50 anni.

Ai sensi delle NTC, il metodo di riferimento per la verifica della sicurezza è quello semiprobabilistico agli Stati Limite basato sull'impiego dei coefficienti parziali. La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale di progetto, con cui definisce stato limite una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più

le esigenze elencate nelle presenti norme. In particolare, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU);
- sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE);
- durabilità;
- robustezza.

4.4.1 Verifiche agli Stati Limite Ultimi per strutture in calcestruzzo non armato

Verifica a flessione

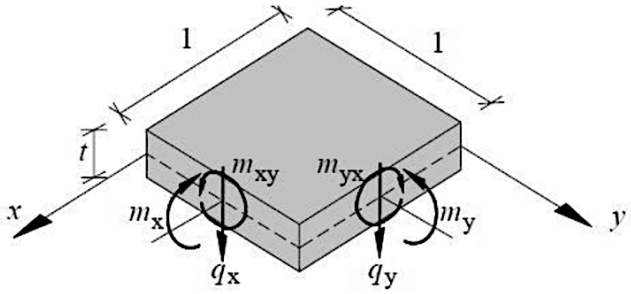


Figura 4-10: Momenti flettenti agenti su un concio di piastra

La pavimentazione deve essere verificata per SLU a flessione semplice. Il momento resistente è ottenuto dall'equilibrio alla rotazione delle forze risultanti di compressione e trazione agenti lungo lo spessore della piastra e governato dalla legge costitutiva del materiale assumendo configurazione di stato limite ultimo.

Seguendo le indicazioni date dal CNR, la verifica delle pavimentazioni senza armatura tradizionale va effettuata nei riguardi del raggiungimento del limite di resistenza a trazione del calcestruzzo. La normativa propone la verifica attraverso un'analisi elastica lineare. Nel caso in esame, avendo effettuato un'analisi non lineare il momento resistente è calcolato in configurazione plastica:

$$m_{rd} = \frac{f_{cfd} \cdot t^2}{4} \qquad [19]$$

dove:

- t è lo spessore della pavimentazione;
- $f_{cfd} = \frac{f_{cfm}}{\gamma_c}$ è il valore di progetto della resistenza a trazione per flessione del calcestruzzo;
- f_{cfm} è il valore medio della resistenza a trazione per flessione;
- γ_c=1,5 è il coefficiente di sicurezza parziale del calcestruzzo.

Verifica a taglio

Secondo il CNR il valore di resistenza a taglio della piastra, nel caso di assenza di armatura longitudinale, è dato dal solo calcestruzzo. Il valore di progetto del taglio resistenza per unità di lunghezza v_{rd}, è definito da:

$$v_{rd} = f_{ctd} \cdot t \qquad [20]$$

dove:

- t è lo spessore della pavimentazione;
- $f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$ è il valore di progetto della resistenza a trazione per flessione del calcestruzzo;
- f_{ctk} è il valore caratteristico della resistenza a trazione per flessione;
- γ_c=1,5 è il coefficiente di sicurezza parziale del calcestruzzo

e va posto a confronto con il massimo valore di taglio agente sulla pavimentazione.

Verifica sforzo normale per setti-pilastri

In accordo con il CNR, per le verifiche di resistenza allo SLU di pareti non armate soggette a sforzi normali N_{Ed} con un'eccentricità *e,* si ha:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot h_w \cdot (1 - \frac{2e}{h_w}) \qquad [21]$$

dove:

- f_{cd} è la resistenza a compressione efficace di progetto;
- b è la larghezza della sezione;
- h_w è lo spessore totale della sezione trasversale;

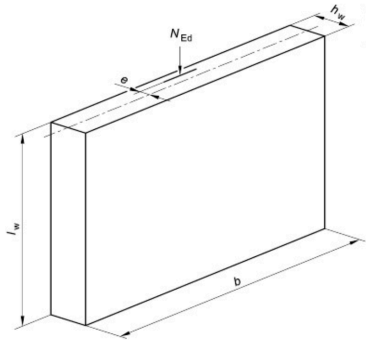


Figura 4-11: Parete soggetta a sforzo N_{Ed}

4.4.2 Verifiche agli Stati Limite d'Esercizio per strutture in calcestruzzo non armato

Verifica di deformabilità

I limiti di deformabilità devono essere congruenti con le prestazioni richiesta alla pavimentazione. Non vengono stabiliti delle limitazioni, ma devo essere concordati con il committente. Per valutare lo stato deformativo nel tempo è necessario considerare il comportamento del supporto. La fondazione potrebbe subire dei cedimenti, quindi è fondamentale garantire una capacità deformativa della struttura commisurata al cedimento.

Verifica a fessurazione

Per assicurare la durabilità e la funzionalità della pavimentazione è necessario controllare la formazione delle fessure all'estradosso della pavimentazione. Per fare ciò la massima tensione normale di trazione all'estradosso della pavimentazione, per la combinazione delle azioni frequente, deve soddisfare la condizione:

$$\sigma_t \leq \frac{f_{ctm}}{1.2} \qquad [22]$$

dove f_{ctm} è la resistenza a trazione media del calcestruzzo.

Verifica delle tensioni

Per la combinazione delle azioni caratteristica le tensioni in esercizio non devono superare i limiti di resistenza a compressione e trazione del calcestruzzo, secondo le condizioni:

$$\sigma_t \leq f_{cfm} \qquad [23]$$

$$\sigma_c \leq 0.6\, f_{ck} \qquad [24]$$

4.4.3 Verifica agli Stati Limite Ultimi per strutture in plastica

La pavimentazione deve essere verificata per SLU a flessione semplice. Il momento resistente è ottenuto dall'equilibrio alla rotazione delle forze risultanti di compressione e trazione agenti lungo lo spessore della piastra e governato dalla legge costitutiva del materiale assumendo configurazione di stato limite ultimo.

La verifica può essere condotta in termini di tensioni, verificando che le tensioni sollecitanti siano inferiori della tensione a snervamento.

4.4.4 Verifica agli Stati Limite d'Esercizio per strutture in plastica

I limiti di deformabilità devono essere congruenti con le prestazioni richieste alla pavimentazione. Non vengono stabiliti delle limitazioni, ma devo essere concordati con il committente. Per valutare lo stato deformativo nel tempo è necessario considerare il comportamento del supporto. La fondazione potrebbe subire dei cedimenti, quindi è fondamentale garantire una capacità deformativa della struttura commisurata al cedimento.

4.4.5 Verifiche geotecniche

Il progetto di una fondazione e/o struttura interrata richiede la definizione del carico di collasso e la valutazione dei cedimenti assoluti e differenziali, la cui entità è da mettere in relazione ai valori tollerabili della sovrastruttura.

Verica di capacità portante

Per il calcolo della capacità portante si fa riferimento alla formula di Brinch-Hansen:

$$q_{lim} = \frac{1}{2}\gamma' B N_\gamma s_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma + c' N_c s_c d_c i_c b_c g_c + q' N_q s_q d_q i_q b_q g_q \quad [25]$$

I coefficienti di capacità portante, riportanti nella seguente tabella, sono ricavati considerando separatamente i contributi dovuti a φ', c', γ'. Sono ricavati nell'ipotesi di fondazione infinitamente lunga.

Tabella 4-11: Coefficienti di capacità portante

$\varphi'(°)$	0	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
N_c	5.14	16.88	19.32	22.25	25.80	30.14	35.49	42.16	50.59	61.35	75.31	93.71
N_q	1.00	7.82	9.60	11.85	14.72	18.40	23.18	29.44	37.75	48.93	64.20	85.38
N_γ	0.00	7.13	9.44	12.54	16.72	22.40	30.22	41.06	56.31	78.03	109.4	155.6

Brinch-Hansen ha però introdotto una serie di coefficienti correttivi che tengono conto di vari fattori:

- Se la fondazione ha dimensioni B e L (con B < L) bisogna correggere i risultati mediante i *coefficienti di forma*:

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1\frac{1 + sin\varphi' B}{1 - sin\varphi' L} \quad [26]$$

$$s_c = 1 + 0.2\frac{1 + sin\varphi' B}{1 - sin\varphi' L} \quad [27]$$

- Se la fondazione è posta a profondità D bisogna introdurre i *coefficienti di profondità*:

$$d_q = 1 + 2tan\varphi'(1 - sin\varphi')^2 \frac{D}{B} \text{ per D≤B;} \quad [28]$$

$$d_q = 1 + 2tan\varphi'(1 - sin\varphi')^2 tan^{-1}\frac{D}{B} \quad \text{per D>B;} \quad [29]$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c tan\varphi'} \quad [30]$$

- In presenza di una componente orizzontale H di elevata intensità:

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{N + BLc'cot\varphi'}\right)^{m+1} \quad [31]$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{N + BLc'cot\varphi'}\right)^{m} \quad [32]$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c tan\varphi'} \quad [33]$$

$$m = \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}} \quad [34]$$

- In presenza di fondazione inclinata:

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha\, tan\varphi')^2 \quad [35]$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c tan\varphi'} \quad [36]$$

- Nel caso di piano campagna inclinato si considera:

$$g_q = g_\gamma = (1 - tan\omega)^2 \quad [37]$$

$$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c tan\varphi'} \quad [38]$$

- In caso di carico eccentrico:

$$B = B_R - 2e \quad [39]$$

4.4.6 Analisi dei carichi

L'analisi dei carichi agenti sulla struttura è stata eseguita in accordo alle prescrizioni delle normative vigenti.

Peso proprio

L'analisi è condotta valutando le reali proprietà geometriche degli elementi, con riferimento alle seguenti densità:

- Calcestruzzo ordinario **$g_1 = 24{,}00$ kN/m^3**
- Miscela con plastica **$g_1 = 9{,}2 - 9{,}6$ kN/m^3**

Carichi permanenti portati

- Peso dell'acqua, in caso di elemento per raccolta pieno: **$g_2 = 0{,}15$ kN/m^2**;
- Peso delle tubazioni atte per i sotto servizi: **$g_2 = 0{,}4$ kN/m**
- Tappeto d'usura: **$g_2 = 0{,}51$ kN/m^3**

Spinta terra

Nella tipologia A la pista ciclabile presenta l'elemento sella totalmente interrato, per cui è necessario determinare la spinta che il terreno esercita lungo le pareti perimetrali. Per fare ciò è necessario conoscere la composizione del terreno nella zona in esame. Si considera la stratigrafia riportata al paragrafo 4.3.

Le pareti perimetrali rappresentano un paramento verticale sul quale la spinta agente del terreno può essere valutata secondo l'applicazione della teoria di Rankine.

Nel caso di piano campagna orizzontale, l'espressione del coefficiente di spinta attiva vale:

$$K_a = \frac{1 - sen\varphi}{1 + sen\varphi} \qquad [40]$$

La pressione esercita dal terreno sulle pareti assume una distribuzione triangolare con retta d'azione parallela al pendio secondo la formula

$$\sigma'_a = \gamma' h K_a \qquad [41]$$

Nel caso di presenza di coesione il valore di pressione di spinta attiva subisce un decremento secondo la formula

$$\sigma'_a = \gamma' h K_a - 2c'\sqrt{K_a} \qquad [42]$$

La presenza di un sovraccarico uniforme sul piano campagna comporta un aumento della tensione verticale efficace della stessa entità, per cui il valore della spinta risulta anch'esso incremento di una quantità pari al sovraccarico (q) moltiplicato per il coefficiente di spinta attiva. Nei due casi presentati precedentemente, la pressione risulta pari a

$$\sigma'_a = \gamma' h K_a + q K_a \quad [43]$$

$$\sigma'_a = \gamma' h K_a - 2c'\sqrt{K_a} + q K_a \quad [44]$$

A favore di sicurezza, si considera la situazione più sfavorevole, ovvero la presenza di una strada urbana che si sviluppa al lato della pista ciclabile, perciò in accordo con EN1991 paragrafo 4.3, si considera un sovraccarico uniforme pari a q = 9 kN/m^2.

Poiché la presenza di coesione porta un contributo contrario alla spinta attiva, a favore di sicurezza, si considera solo la presenza del materiale di riporto.

Il valore di pressione massima al piede in direzione perpendicolare alle pareti verticali vale quindi:

Tabella 4-12: Valore di pressione massima al piede in direzione perpendicolare alle pareti

Tipologia di terreno	K_a [-]	σ'_a [kPa]
Materiale di riporto	0,307	5,70

Sovraccarichi

Per la valutazione dei carichi variabili agenti sulla struttura, è stato fatto riferimento alla EN 1991-1-1 sez. 5 "Actions on footways, cycle tracks and footbridges".

La norma prevede per i ponti ciclo/pedonali l'applicazione di tre modelli di carico mutuamente indipendenti, i cui valori caratteristici sono:

- Un carico distribuito, corrispondente al carico folla compatta: **q_{fk} = 5 kN/m^2**;
- Un carico concentrato **Q_{fwk} = 10 kN**, che agisce su una superficie quadrata di lato 0,10m;
- Un carico rappresentato dai veicoli di servizio Q_{serv}

Nel caso in esame il carico rappresentato dai veicoli di servizio non viene considerato, poiché si prevede che essi lavoreranno dal piano strada adiacente alla struttura.

Azione della neve

La valutazione del carico neve è effettuata in accordo al punto 3.4 delle NTC2018. Poiché La struttura in esame risulta solidale al terreno si considera come carico agente il valore di riferimento del carico della neve al suolo (q_{sk}).

Per la determinazione di tale carico la normativa ha diviso l'Italia in diverse zone in base alla quota sul livello del mare. L'area in esame ricade nella zona I-Alpina: Aosta, Belluno, Bergamo, Biella, Bolzano, Brescia, Como, **Cuneo**, Lecco, Pordenone, Sondrio, Torino, Trento, Udine, Verbano- Cusio-Ossola, Vercelli, Vicenza.

$$q_{sk} = 1{,}50 \text{ kN/m}^2 \text{ con } a_s \leq 200 \text{ m} \quad [45]$$

$$q_{sk} = 1{,}39\,[1 + (a_s/728)2] \text{ kN/m}^2 \quad \text{con } a_s > 200 \quad [46]$$

La località in esame si trova a una quota media di circa 285m s.l.m., per cui il valore caratteristico stimato del carico neve risulta pari a $\boldsymbol{q_{sk} = 1{,}60 \text{ kN/m}^2}$.

Azione della temperatura

Le azioni termiche sono determinanti nella progettazione e nella verifica della pavimentazione.

Le condizioni climatiche agiscono diversamente sulla pavimentazione a seconda del materiale con cui essa è composta. In particolare:

Per la struttura di tipologia A le oscillazioni giornaliere e stagionali della temperatura esterna comportano variazioni della distribuzione della temperatura nello spessore delle lastre composte da calcestruzzo.

L'evoluzione della temperatura all'interno dello spessore della lastra ha un andamento tipico come indicato in figura, valutabile come esito di una temperatura media stagionale ΔT, uniforme su tutto lo spessore h e di una temperatura oraria variabile nello spessore.

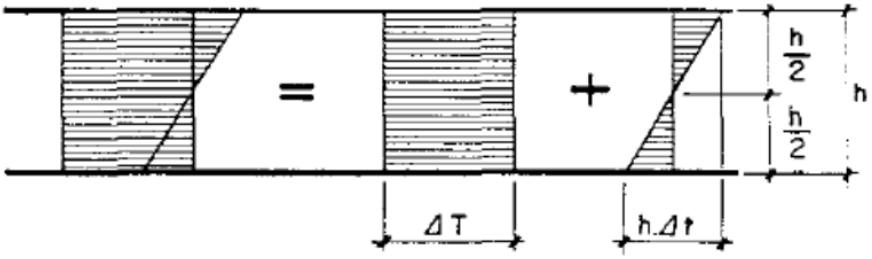


Figura 4-12: Ripartizione della temperatura in una lastra in presenza di gradiente termico

In accordo con quanto prescritto al punto 3.5 delle NTC le variazioni di temperatura uniformi per strutture in calcestruzzo da assumersi alla base del calcolo sono:

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

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

La variazione termica stagionale comporta dilatazioni e contrazioni uniformi della piastra di calcestruzzo, impedite dall'attrito col supporto. Se nel primo caso (situazione tipica estiva) le dilatazioni impedite generano compressioni, nel caso di contrazioni impedite (situazione tipica invernale) possono sorgere sollecitazioni di trazione. Tuttavia gli sforzi che nascono sotto effetto della temperatura uniforme risultano essere trascurabili.

Per quanto riguarda invece le oscillazioni giornaliere, i gradienti termici positivi, tipici delle ore diurne, determinano una deformata con concavità rivolta verso il basso (le fibre tese sono quelle della superficie superiore della lastra); durante la notte, invece, a causa di gradienti termici negativi, la temperatura della superficie superiore è minore di quella della superficie inferiore, ciò si traduce in una deformata che presenta la concavità rivolta verso l'alto (le fibre tese sono quelle della superficie inferiore) Figura 4-13.

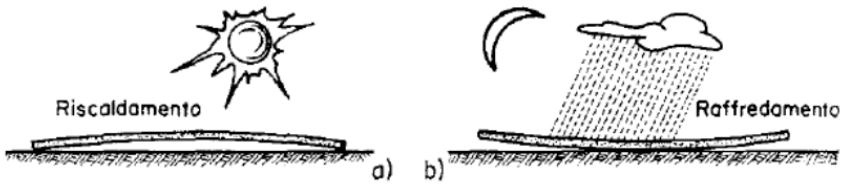


Figura 4-13: Deformazioni delle lastra dovute a variazioni giornaliere di temperatura

In accordo con CNR, paragrafo 5.2.3, per le variazioni di temperatura lungo lo spessore (T_s - T_i), si potranno adottare i valori riportati nella seguente tabella:

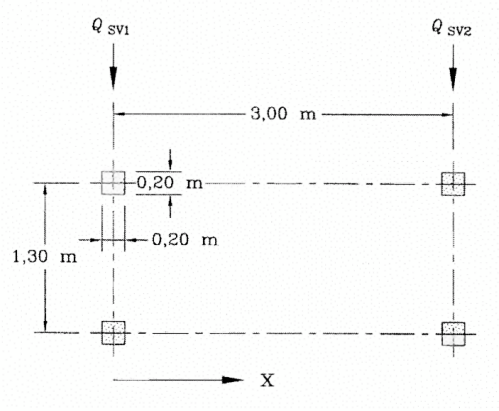
Tabella 4-13: Gradienti di temperatura attesi nello spessore *h* della piastra di pavimentazione (10<*h*>25)

Ambiente	$T_s - T_i$ [°C]
Interno	±5
Esterno	+0.8h -0.2h

Per la struttura di tipologia B essendo il polietilene un materiale che resiste a temperature comprese tra -50 °C e +80 °C, senza subire alterazioni delle proprietà meccaniche, non viene considerato l'azione della temperatura sulla struttura.

Azione eccezionale

In accordo con la EN 1991-1-1 paragrafo 5.6.3, è stata considerata come azione eccezionale la possibile presenza di un veicolo sulla pista ciclabile. Per questa situazione si fa riferimento al seguente modello di carico figura, costituito da carichi concentrati (80 kN e 40 kN) su due assi in tandem, applicati su impronte di pneumatico di forma quadrata di lato 0,2 m, con interasse longitudinale pari a 3 m e interasse trasversale di 1,3 m.



Key
x : Bridge axis direction
Q_{sv1} = 80 kN
Q_{sv2} = 40 kN

Figura 4-14: Rappresentazione carico accidentale

4.4.7 Combinazioni delle azioni

Il metodo di riferimento per la verifica della sicurezza è quello semiprobabilistico agli Stati Limite.

A tal fine, in accordo con la EN1990, si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni:

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad [47]$$

- Combinazione caratteristica, considerata rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} "+" P "+" Q_{k,1} "+" \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad [48]$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} "+" P "+" \psi_{1,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad [49]$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} "+" P "+" \sum_{i\geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad [50]$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} "+" P "+" A_d "+" (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} "+" \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad [51]$$

È opportuno precisare che nelle formule sopra riportate il simbolo "+" vuol dire "combinato con".

La EN1990 restituisce i valori dei coefficienti parziali ϒ da assumersi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi, riportati in Tabella 4-14.

Tabella 4-14: Valori dei coefficienti ϒ da assumersi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi

Carichi permanenti G*	Favorevoli	γ_G	1,0
	Sfavorevoli		1,35
Carichi variabili relativi al traffico stradale o pedonale	Favorevoli	γ_Q	0
	Sfavorevoli		1,35
Altri carichi variabili**	Favorevoli	γ_Q	0
	Sfavorevoli		1,5

* questo valore copre il peso proprio degli elementi strutturali e non strutturali, peso del terreno

** questo valore copre la pressione orizzontale del terreno, azioni termiche e azione della neve

La EN1990 stabilisce poi una serie di coefficienti per consentire combinazioni realistiche da utilizzare per la progettazione. Se non diversamente indicato, viene identificata l'azione variabile che produce il massimo effetto di carico di calcolo e le viene assegnato il pedice 'i'=1 (ovvero $Q_{k,1}$). Questa è chiamata "azione variabile di base". Gli altri valori che rappresentano le azioni variabili sono ridotti di un fattore (ψ) e sono definiti come segue:

- Il valore di combinazione (ψ_0 Q_k) di un'azione ha lo scopo di tenere conto della ridotta probabilità della comparsa simultanea di due o più azioni variabili.
- Il valore frequente (ψ_1 Q_k) è tale che dovrebbe essere superato per un breve periodo di tempo.
- Il valore quasi permanente (ψ_2 Q_k) può essere superato per un periodo di tempo considerevole.

Di seguito sono indicati i valori dei coefficienti ci combinazione ψ per i ponti ciclo/pedonali secondo la EN1990:

Tabella 4-15: Valori dei coefficienti ci combinazione ψ per ponti ciclo/pedonali

Action	Symbol	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Traffic loads	gr1	0,40	0,40	0
	Q_{fwk}	0	0	0
	gr2	0	0	0
Wind forces	F_{Wk}	0,3	0,2	0
Thermal actions	T_k	0,6 [1)]	0,6	0,5
Snow loads	$Q_{Sn,k}$ (during execution)	0,8	-	0
Construction loads	Q_c	1,0	-	1,0
1) The recommended ψ_0 value for thermal actions may in most cases be reduced to 0 for ultimate limit states EQU, STR and GEO. See also the design Eurocodes.				

NOTE 4 For footbridges, the infrequent value of variable actions is not relevant. A1

Per quanto riguarda i ponti ciclo pedonali, in accordo con la EN1990, vengono definite le seguenti precisazioni:

- Il carico concentrato Q_{fwk} non deve essere combinato con nessun'altra azione variabile che non sia data dal traffico;
- L'azione del vento e l'azione termica non devono essere considerate contemporaneamente a meno di specifiche indicazioni;
- L'azione della neve non deve essere combinata con i gruppi di carichi dati dal traffico a meno di specifiche indicazioni.
- L'azione termica non deve essere combinata con nessun'altra azione variabile per le verifiche allo Stato Limite Ultimo.

Infine la EN1991 precisa che nessun'altra azione variabile deve essere presa in considerazione simultaneamente con il carico accidentale precedentemente definito.

4.4.8 Combinazioni di carico adottate

Tabella 4-16: Definizione carichi applicati

Condiz.	Nome della condizione	Natura	Tipo di analisi
1	DL1	Permanenti	Statica non lineare - Grandi spostamenti
2	DL2	Spinta terra	Statica non lineare - Grandi spostamenti
3	LL1	Sovraccarico distribuito	Statica non lineare - Grandi spostamenti
4	LL2	Sovraccarico concentrato	Statica non lineare - Grandi spostamenti
5	SN1	Neve H<1000	Statica non lineare - Grandi spostamenti
6	ACC1	Eccezionali	Statica non lineare - Grandi spostamenti
7	TEMP1	Termiche	Statica non lineare - Grandi spostamenti

Tabella 4-17: Definizione delle combinazioni di carico adottate

Combinazione	Nome	Tipo di analisi	Definizione
100	SLE DL	Combinazione NL PD	(1+2)*1.00
101	SLE LL1	Combinazione NL PD	(1+2+3)*1.00
102	SLE LL2	Combinazione NL PD	(1+2+4)*1.00
103	SLE SN1	Combinazione NL PD	(1+2+5)*1.00
104	SLE TEMP	Combinazione NL PD	(1+2+7)*1.00
105	SLE LL1+TEMP1	Combinazione NL PD	(1+2+3)*1.00+7*0.60
106	SLE TEMP1+LL1	Combinazione NL PD	(1+2+7)*1.00+3*0.40
200	SLU DL	Combinazione NL PD	(1+2)*1.35
201	SLU LL1	Combinazione NL PD	(1+2+3)*1.35
202	SLU LL2	Combinazione NL PD	(1+2+4)*1.35
203	SLU SN1	Combinazione NL PD	(1+2)*1.35+5*1.50
204	SLU TEMP	Combinazione NL PD	(1+2)*1.35+7*1.50
301	SLA ACC1	Combinazione NL PD	(1+2+6)*1.00
401	SLE:FRE LL1	Combinazione NL PD	(1+2)*1.00+3*0.40
402	SLE:FRE LL2	Combinazione NL PD	(1+2)*1.00+4*0.40
403	SLE:FRE TEMP	Combinazione NL PD	(1+2)*1.00+7*0.60
404	SLE:FRE LL1+TEMP	Combinazione NL PD	(1+2)*1.00+3*0.40+7*0.50

4.4.9 Modello di calcolo e teoria delle piastre

In accordo con il CNR, 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). In alternativa può essere impiegata l'analisi non lineare agli elementi finiti (elasto-plastica o altro).
- Analisi incrementale non lineare, da condursi tipicamente con l'utilizzo di modelli agli elementi finiti, adottando opportune leggi costitutive per i materiali.

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. É possibile modellare il terreno come un insieme di elementi elastici indipendenti (Winkler) o come un semispazio elastico indefinito (Boussinesq).

Nei modelli di calcolo utilizzati, le strutture possono essere schematizzate come elementi bidimensionali con comportamento a piastra sottile (struttura superiore) e con comportamento a piastra supportato da un letto di molle aventi rigidezza k (struttura inferiore).

Per definire un primo dimensionamento delle piastre può essere effettuata un'analisi di massima attraverso l'applicazione di un calcolo elastico lineare. Note le azioni verticali agenti sulla piastra, l'analisi atta a calcolare le sollecitazioni è effettuata secondo la teoria delle piastre sottili soggette a piccole deformazioni (abbassamenti) rispetto alle dimensioni della piastra.

L'equazione di Sophie Germain per una piastra sottile soggetta a carico uniforme (q) perpendicolare alla sua superficie risulta:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \qquad [52]$$

dove:

- ω è l'abbassamento di un punto generico della piastra;
- $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ è la rigidezza della piastra;

  con

  - E modulo elastico del materiale;
  - ν coefficiente di Poisson;

- h spessore della piastra.

Nel caso di piastra poggiata su terreno, in accordo con quanto ricavato da J.L. Lagrange, l'equazione [52] diventa:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} - k\omega \qquad [53]$$

dove

- k è il modulo di reazione del sottofondo.

Noti gli spostamenti, per derivazione e integrazione, è possibile definire il campo tenso-deformativo e il campo delle sollecitazioni flessionale.

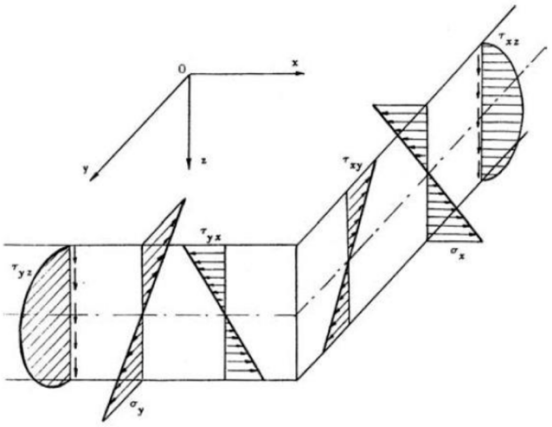


Figura 4-15: Stato tensionale della pavimentazione

Le tensioni si ottengono per doppia derivazione del campo degli spostamenti e sono così definite:

$$\sigma_x = \frac{Ez}{1-\nu^2}\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right) \qquad [54]$$

$$\sigma_y = \frac{Ez}{1-\nu^2}\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right) \qquad [55]$$

$$\sigma_z = 0 \qquad [56]$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{h^2}{8} - \frac{z^2}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}\Delta w \qquad [57]$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{h^2}{8} - \frac{z^2}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}\Delta w \qquad [58]$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{1+\nu}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \qquad [59]$$

Definito stato tensionale, le sollecitazioni sono ottenute per semplice integrazione dello stato tensionale lungo lo spessore della piastra:

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_x z dz = D\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right) \quad [60]$$

$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_y z dz = D\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right) \quad [61]$$

$$M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz = D(1-\nu)\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \quad [62]$$

$$T_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xz} z dz = D\frac{\partial}{\partial x}\Delta w \quad [63]$$

$$T_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{yz} z dz = D\frac{\partial}{\partial x}\Delta w \quad [64]$$

Tuttavia, per ottenere risultati più attendibili del reale comportamento degli elementi piastra, nel presente lavoro di tesi è stata effettuata un'analisi non lineare condotta con l'utilizzo di modelli agli elementi finiti.

4.4.10 Codice di calcolo e tipo di analisi

La struttura è stata analizzata in campo non lineare, con analisi di tipo statico a grandi spostamenti, mediante il programma di calcolo agli elementi finiti Robot Structural Analysis Professional 2021 con licenza ad uso studenti.

Il programma è stato validato attraverso un manuale di verifica che contiene una serie di test "benchmark" statici e dinamici che coprono i comportamenti fondamentali riscontrati nell'analisi strutturale. I risultati dei test derivano da esempi di verifica contenuti in ***"Guide de validation des progiciels de calcul de structures"*** **AFNOR.** L'accuratezza dei risultati raggiunti negli esempi di verifica, confrontati con quelli di Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021 confermano la qualità e l'affidabilità del programma.

I risultati del codice di calcolo oltre ad essere validati tramite test sono stati verificati mediante validazione manuale, confrontando i risultati di tensione e abbassamenti su una piastra, ottenuti attraverso un'analisi lineare condotta con il codice di calcolo, e un'analisi attraverso le formule di Westergaard.

Validazione manuale del codice di calcolo

Nel 1929 *Westergaard* fornì soluzioni per il calcolo delle tensioni e degli abbassamenti in piastre sollecitate da un carico concentrato nelle ipotesi che:

- la lastra in calcestruzzo si comporta come un solido omogeneo, isotropo ed elastico in equilibrio;
- le reazioni del sottofondo sono verticali e proporzionali alla deformazione w della lastra (sottofondo alla Winkler);
- il modulo di reazione del sottofondo k è costante in ogni punto e indipendente dall'abbassamento della lastra;
- la reazione unitaria q del piano di posa è proporzionale al cedimento verticale z secondo il modulo di reazione k

$$q = -k \cdot z \qquad [65]$$

- segmenti rettilinei e perpendicolari al piano medio della lastra si mantengono rettilinei e perpendicolari al piano medio;
- il carico al centro ed all'angolo della lastra è distribuito uniformemente su un'area di contatto circolare; per il carico all'angolo la circonferenza dell'area di contatto sia tangente ai bordi della lastra;
- il carico al bordo della lastra è distribuito uniformemente su un'area di contatto semicircolare, con diametro posto lungo il bordo della lastra stessa;
- nel caso di carico al centro, segmenti rettilinei nella lastra si mantengono rettilinei e perpendicolari al piano medio; nel caso di carico al bordo, tale ipotesi è abbandonata nelle immediate vicinanze del carico.

La teoria di Westergaard fornisce soluzioni in forma chiusa per lastre sottili di dimensioni finite per condizioni di carico al centro, al bordo e all'angolo. Le equazioni consentono il calcolo della tensione massima di trazione indotta dall'applicazione di un carico concentrato sulla superficie della piastra.

Prendendo in esame il caso di carico applicato al centro della piastra, la tensione secondo Westergard risulta:

$$\sigma_c = 0{,}275 \cdot (1+\nu) \cdot \frac{P}{h^2} \cdot \left[4 \cdot log_{10}\left(\frac{l}{b}\right) + 1{,}069\right] \qquad [66]$$

l'abbassamento invece è pari a:

$$w_c = \frac{P}{8kl^2}\left\{1 + \frac{1}{2\pi}\left[ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0{,}673\right]\left(\frac{a}{l}\right)^2\right\} \qquad [67]$$

dove:

- P è il carico concentrato applicato;
- h è lo spessore della piastra;
- a è il raggio della superficie di impronta supposta circolare;
- k è il modulo di reazione della fondazione;

- b è il raggio della distribuzione equivalente della pressione sulla faccia inferiore della lastra, definito da Westergaard "raggio convenzionale", fornito dall'espressione:

$$b = \sqrt{1{,}6a^2 + h^2} - 0{,}675h \qquad \text{per a/h} < 1{,}724 \qquad [68]$$

$$b = a \qquad \text{per a/h} > 1{,}724 \qquad [69]$$

- l è il raggio di rigidezza pari a:

$$l = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \qquad [70]$$

Per effettuare la validazione del corretto funzionamento del codice agli elementi finito, a titolo esemplificativo è stata presa in considerazione una piastra quadrata di calcestruzzo C16/20, con lato 2,5 m e spessore 10 cm, soggetta a un carico concentrato di 10 kN che agisce su un'impronta quadrata di lato 10 cm, posto al centro della piastra.

Nella tabella seguente vengono riportati i dati di input da utilizzare nelle formule di Westergaard:

Tabella 4-18: Dati input per la formula di Westergaard

Spessore piastra [mm]	h	100
Reazione della fondazione [N/mm^3]	k	0,04
Carico concentrato [kN]	P	10
Impronta di carico [mm]	c	100
Raggio equivalente [mm]	a	56,42
Raggio convenzionale [mm]	b	55,35
Raggio d'inerzia [mm]	l	500,1

Il valore di tensione e di abbassamento, calcolati con la formula di Westergard risultano pari a:

$$\sigma_{c-Westergaard} = 1{,}41\ N/mm^2$$

$$w_{c-Westergaard} = 0{,}134\ mm$$

Il valore di tensione e abbassamento derivanti dall'analisi FEM sono riportati di seguito:

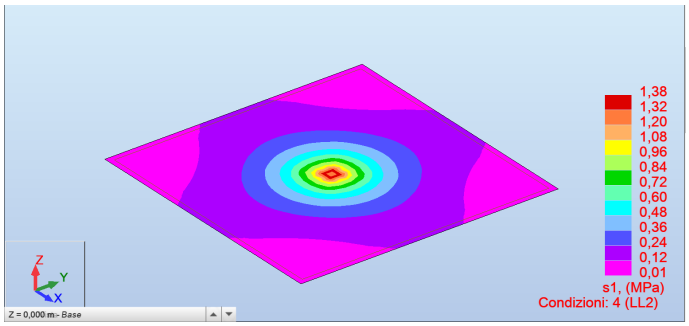


Figura 4-16: Mappa dele tensioni

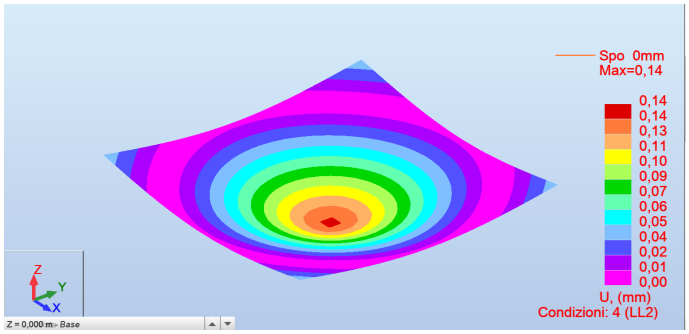


Figura 4-17: Mappa delle deformazioni

$$\sigma_{c-Robot} = 1{,}38\ N/mm^2$$

$$w_{c-Robot} = 0{,}14\ mm$$

Il raffronto coi risultati ottenuti mediante il software non ha mai evidenziato discrepanze superiori al 5%, riconducibili per lo più ad approssimazioni adottate nel calcolo manuale, e i risultati ottenuti sono dunque coerenti ed attendibili.

Tipo di analisi utilizzata per le verifiche

È stata condotta analisi di tipo non lineare P-Delta a grandi spostamenti con aggiornamento della matrice di rigidezza ad ogni passo ed applicazione incrementale dei carichi utilizzando il metodo di Newton-Raphson modificato.

Il comportamento non lineare di una struttura può essere causato da un singolo elemento della struttura (non linearità strutturale o materiale) o da una relazione forza-deformazione non lineare nell'intera struttura (non linearità geometrica). I seguenti elementi non lineari possono causare una non linearità strutturale:

- Elementi di compressione / tensione
- Elementi del cavo
- Vincoli non lineari (cioè vincoli o supporti unilaterali, rilasci, nodi compatibili con il parametro rigido assegnato)
- Legge costitutiva plastica del materiale.

L'analisi P-Delta a grandi spostamenti permette di considerare gli effetti di ordine superiore e migliorare la convergenza del processo di calcolo. Mentre il metodo incrementale viene utilizzato per risolvere il sistema di equazioni non lineari. Durante i calcoli, i carichi non vengono considerati in un momento specifico, ma vengono gradualmente aumentati e ogni incremento di carico consecutivo viene applicato alla struttura una volta raggiunto lo stato di equilibrio per l'incremento precedente. L'immagine seguente mostra un esempio di un processo non lineare che utilizza il processo incrementale. Vengono visualizzati i valori utilizzati per i calcoli non lineari.

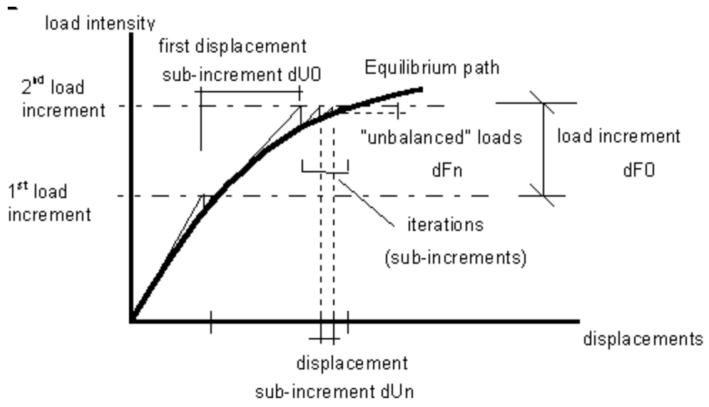


Figura 4-18: Esempio di processo non lineare che utilizza il processo incrementale

L'analisi FEM consiste nel modellare la struttura come un insieme di elementi bidimensionali (Shell), di forma quadrangolare, a 4 nodi e isoparametrici, interconnessi tra di loro e soggetti a dei carichi nodali o carichi distribuiti su tutta la superficie dell'elemento finito.

Per gli elementi finiti piani (Shell), il software introduce la seguente convenzione di segni

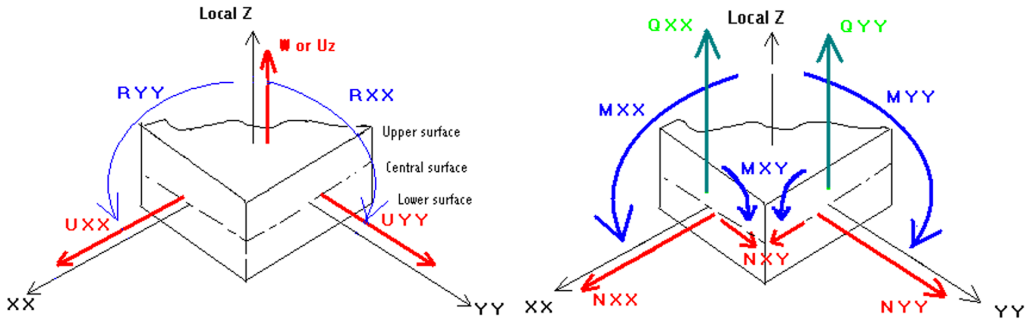


Figura 4-19: Convenzione dei segni per spostamenti e rotazioni (sinistra); convenzione dei segni per forze (destra)

4.5 Tipologia A - Principali risultati delle analisi numeriche

Lo scenario A, come già anticipato, prevede l'applicazione della struttura in aree adiacenti al traffico veicolare. Il dimensionamento, presentato al paragrafo 4.1 è stato infatti effettuato utilizzando come materiale il calcestruzzo con inerti riciclati e configurazioni strutturali tali da poter sopportare eventuali carichi provenienti dalla sede stradale.

Per l'analisi, effettuata seguendo la metodologia esposta al paragrafo 4.4.10, sono stati sviluppati diversi modelli della struttura, combinando parametri di input al fine di ottenere una vasta gamma di possibili modelli da poter adottare. In particolare l'analisi è stato condotta operando in un range di rigidezza del calcestruzzo, di spessori della piastra e di configurazione strutturale della sella. Sono quindi stati considerati:

- Tre valori per il modulo di rigidezza:
  - 28000 MPa
  - 32000 MPa
  - 35000MPa
- Due spessori della piastra:
  - 120mm
  - 150mm
- Tre configurazioni geometrie della sella:
  - Caso 1: due setti laterali di spessore 75 mm, posti a distanza pari a 200 mm dalle pareti laterali; due file di pilastrini di diametro 75 mm con interasse trasversale di 610-620 mm e interasse longitudinale 625 mm.

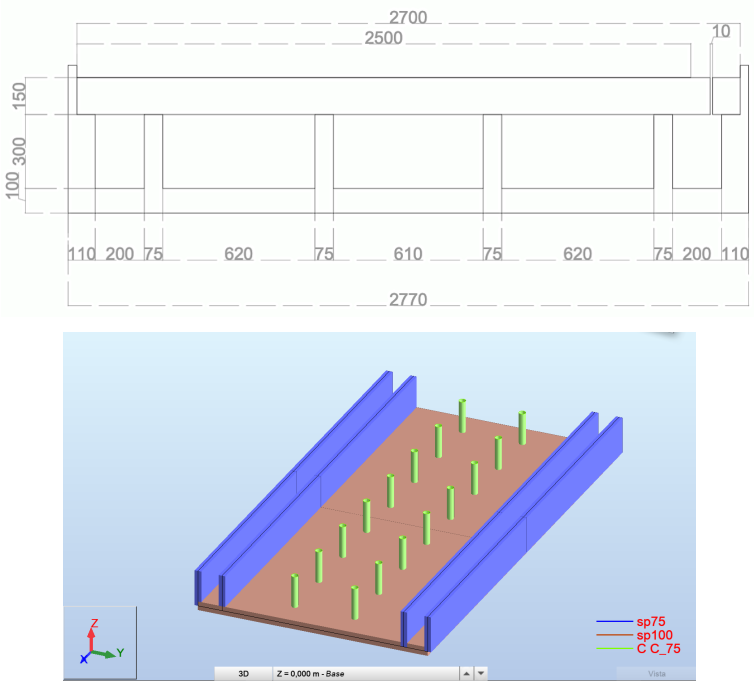
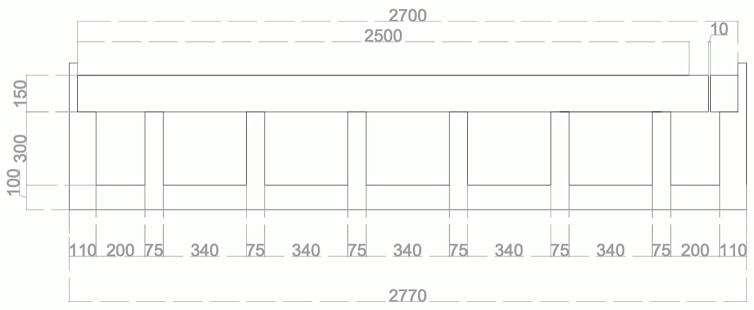


Figura 4-20: Tipologia A - configurazione 1

- Caso 2: due setti laterali di spessore 75 mm, posti a distanza pari a 200 mm dalle pareti laterali; quattro file di pilastrini di diametro 75 mm con interasse trasversale di 415 mm e interasse longitudinale 500 mm.



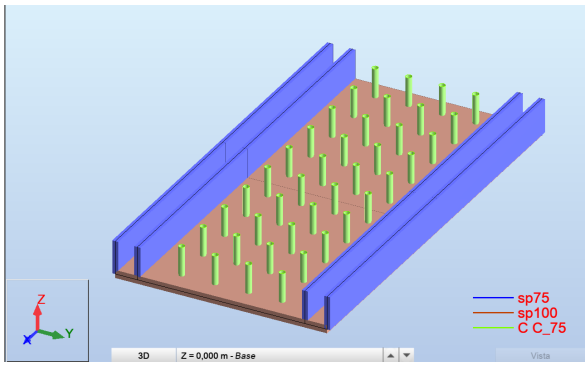
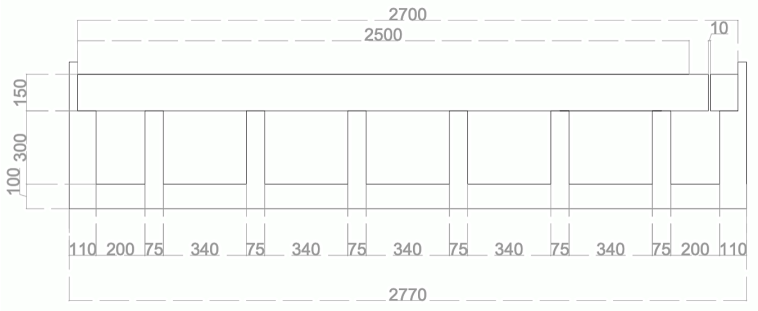


Figura 4-21: Tipologia A - configurazione 2

- Caso3: due setti laterali di spessore 75 mm, posti a distanza pari a 200 mm dalle pareti laterali; quattro file di setti di spessore 75 mm con interasse trasversale di 415 mm.



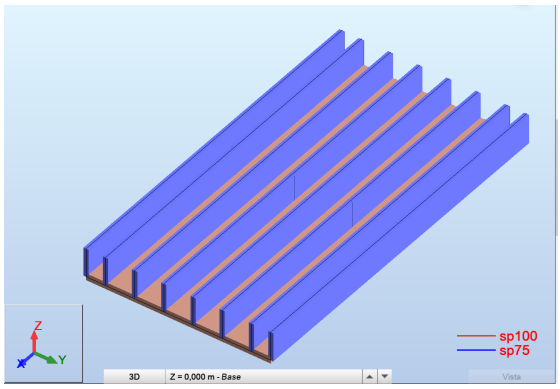


Figura 4-22: Tipologia A - configurazione 3

4.5.1 Materiali

I moduli elastici sopra presentati rappresentano al meglio tre diverse classi di resistenza del calcestruzzo, rispettivamente C16/20, C28/36, C40/50, di cui i parametri delle proprietà meccaniche sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 4-19: Proprietà meccaniche Cls

	C16/20	C 28/36	C40/50
	Cls con aggregati riciclati	Cls con aggregati riciclati	Cls con aggregati riciclati
Rck [MPa]	20	35	50
fck [MPa]	16,60	29,05	41,50
fcd [[MPa]	9,41	16,46	23,52
fcm [MPa]	24,60	37,05	49,50
Ecm [GPa]	28,82	32,59	35,55
fctm [MPa]	1,76	2,55	3,24
fctk [MPa]	1,23	1,79	2,27
fctd [MPa]	0,82	1,19	1,51
fcfm [MPa]	2,11	3,06	3,88
fcfk [MPa]	1,48	2,14	2,72

4.5.2 Analisi numerica della piastra

Viene analizzata separatamente la piastra dall'elemento sottostante per poter indagare al meglio il suo comportamento strutturale sotto le diverse condizioni e combinazione dei carichi.

Schematizzazione della struttura

La struttura e il suo comportamento sotto le azioni statiche è stato adeguatamente valutato, interpretato e trasferito in un modello tridimensionale; tale modello ha consentito di effettuare un'analisi particolarmente reale sia della distribuzione di massa che della effettiva rigidezza. La struttura è stata realizzata come piastra modellata con elementi SHELL quadrangolari con dimensione dell'elemento mesh di 10 cm e a cui sono stati associati gli spessori e le proprietà meccaniche del materiale.

La piastra è modellata in appoggio sui setti e/o pilastrini della sella, tramite inserimento di vincoli elastici unilaterali in compressione. La rigidezza *k* del vincolo è valutata come rigidezza assiale dell'elemento di supporto.

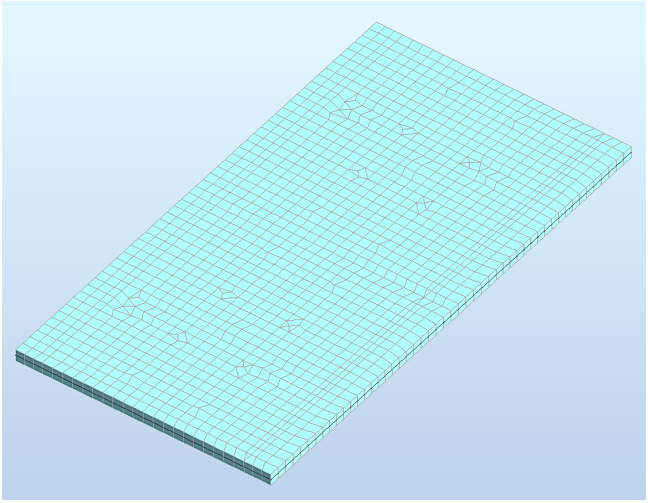


Figura 4-23: Immagine FEM elemento piastra

Carichi applicati

I carichi definiti al paragrafo 4.4.6 sono applicati sull'elemento, in particolare l'analisi è effettuata considerando i carichi variabili derivanti dalle azioni del traffico ciclo-pedonale, azione della neve, l'azione della temperatura, e il carico accidentale, come riportato nelle immagini seguenti.

Il peso proprio è direttamente computato dal programma di calcolo in funzione del peso specifico del materiale e dello spessore dell'elemento.

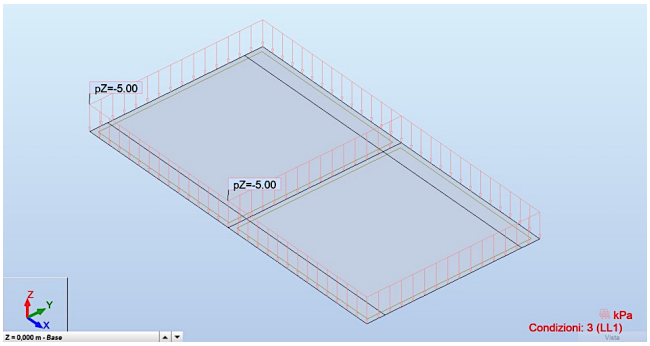


Figura 4-24: Applicazione sovraccarico distribuito

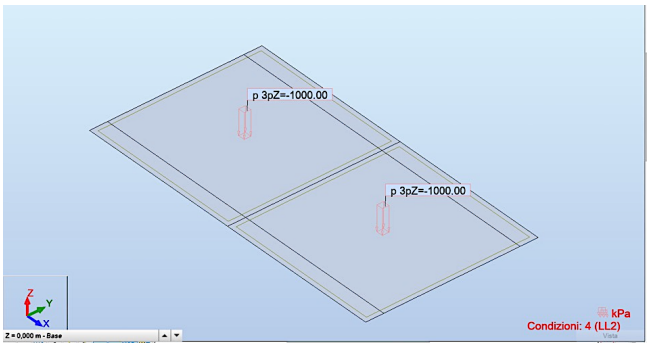


Figura 4-25: Applicazione sovraccarico puntuale

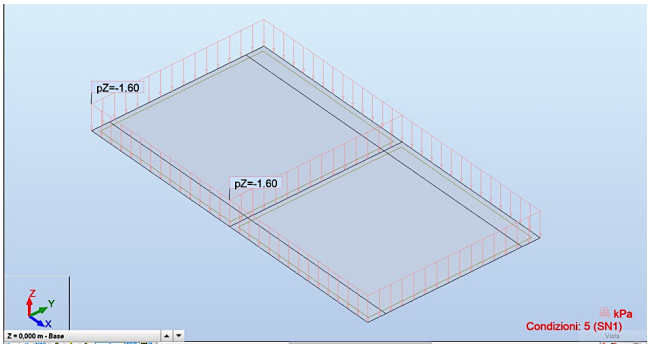


Figura 4-26: Applicazione azione della neve

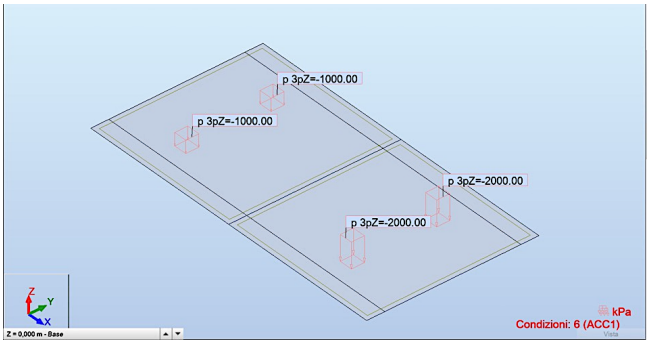


Figura 4-27: Applicazione azione accidentale

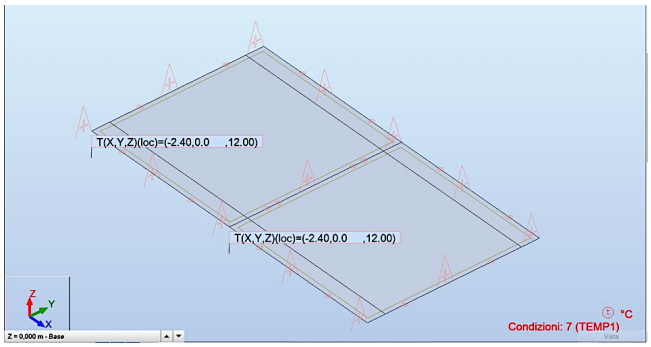


Figura 4-28: Applicazione azione della temperatura

4.5.3 Risultati e verifiche della piastra

In prima analisi viene effettuata la verifica delle tensioni in esercizio, sotto le diverse le combinazioni di carico caratteristiche, per identificare le varie configurazioni della struttura che rispettano i requisiti di sicurezza.

Le sollecitazioni vengono confrontate con le resistenze proprie del materiale, in particolare $\boldsymbol{\sigma}_c$ deve essere confrontato con il valore caratteristico di resistenza a compressione f_{ck}; $\boldsymbol{\sigma}_t$ con la resistenza media a trazione per flessione f_{cfm}.

I valori delle sollecitazioni agenti sono schematizzati nelle tabelle seguenti, per le sole combinazioni di carico più gravose individuate nelle casistiche di carico variabile, carico termico e carico accidentale. Sono state considerate le massime tensioni nelle due direzioni principali, valutate a livello superiore ed inferiore della piastra. Per una più veloce interpretazione dei risultati sono riportati solamente i massimi valori di tensione per le combinazioni considerate.

Nelle tabelle sono evidenziati in verde i valori che soddisfano le verifiche e in rosso quelli per cui le verifiche non sono soddisfatte.

Tabella 4-20: Valori di resistenza a compressione e trazione per le classi di calcestruzzo considerate

	C16/20	C 28/36	C40/50
f_{cfm}	2,11	3,06	3,88
$0,6*f_{ck}$	9,96	17,43	24,9

Tabella 4-21: Tensioni agenti sulla piastra, modulo E=28 GPa

			Sovraccarico		Carico termico		Carico accidentale	
			σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]
E = 28 Gpa	CASO 1	s = 12cm	0,83	0,84	2,23	2,23	6,31	6,31
		s = 15cm	0,56	0,57	2,38	2,38	4,00	3,86
	CASO 2	s = 12cm	0,71	0,71	2,23	2,15	5,37	5,37
		s = 15cm	0,49	0,49	2,38	2,35	3,50	3,50
	CASO 3	s = 12cm	0,59	0,58	2,06	2,06	3,12	3,12
		s = 15cm	0,39	0,40	2,38	2,35	2,15	2,15

Tabella 4-22: Tensioni agenti sulla piastra, modulo E=32 GPa

			Sovraccarico		Carico termico		Carico accidentale	
			σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]
E = 32 Gpa	CASO 1	s = 12cm	0,83	0,84	2,35	2,33	6,38	6,38
		s = 15cm	0,57	0,57	2,70	2,72	4,09	4,00
	CASO 2	s = 12cm	0,70	0,71	2,33	2,35	5,35	5,35
		s = 15cm	0,49	0,49	2,70	2,72	3,62	3,62
	CASO 3	s = 12cm	0,59	0,59	2,28	2,30	3,10	3,05
		s = 15cm	0,40	0,40	2,70	2,72	2,21	2,21

Tabella 4-23: Tensioni agenti sulla piastra, modulo E=35 GPa

			Sovraccarico		Carico termico		Carico accidentale	
			σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]
E = 35 Gpa	CASO 1	s = 12cm	0,84	0,84	2,41	2,41	6,32	6,32
		s = 15cm	0,57	0,57	3,00	3,03	4,10	4,00
	CASO 2	s = 12cm	0,71	0,72	2,41	2,44	5,43	5,37
		s = 15cm	0,50	0,50	3,03	3,00	3,68	3,60
	CASO 3	s = 12cm	0,59	0,59	2,44	2,44	3,15	3,10
		s = 15cm	0,40	0,40	3,00	3,03	2,20	2,24

Nelle tabelle seguenti si riportano invece i valori delle deformazioni massime in valore assoluto, indotte dai carichi verticale agenti e dell'imbarcamento causato dalla temperatura.

Tabella 4-24: Deformazioni indotte dai carichi sulla piastra, modulo E= 28 GPa

			Sovraccarico	Carico termico	Carico accidentale
			u_z[mm]	u_z[mm]	u_z[mm]
E = 28 Gpa	CASO 1	s = 12cm	0,03	0,66	0,18
		s = 15cm	0,02	0,83	0,13
	CASO 2	s = 12cm	0,02	0,66	0,12
		s = 15cm	0,01	0,83	0,09
	CASO 3	s = 12cm	0,01	0,66	0,04
		s = 15cm	0,01	0,83	0,03

Tabella 4-25: Deformazioni indotte dai carichi sulla piastra, modulo E=32 GPa

			Sovraccarico	Carico termico	Carico accidentale
			u_z[mm]	u_z[mm]	u_z[mm]
E = 32 Gpa	CASO 1	s = 12cm	0,03	0,72	0,17
		s = 15cm	0,02	0,87	0,12
	CASO 2	s = 12cm	0,02	0,71	0,11
		s = 15cm	0,01	0,87	0,08
	CASO 3	s = 12cm	0,01	0,72	0,04
		s = 15cm	0,01	0,88	0,03

Tabella 4-26: Deformazioni indotte dai carichi sulla piastra, modulo E= 35GPa

			Sovraccarico	Carico termico	Carico accidentale
			u_z[mm]	u_z[mm]	u_z[mm]
E = 35 Gpa	CASO 1	s = 12cm	0,03	0,74	0,15
		s = 15cm	0,02	0,85	0,11
	CASO 2	s = 12cm	0,02	0,74	0,11
		s = 15cm	0,01	0,85	0,07
	CASO 3	s = 12cm	0,01	0,75	0,04
		s = 15cm	0,01	0,85	0,03

Come si evince dai risultati, l'aggiunta di setti e/o pilastrini comporta una diminuzione della deformazione verticale. L'imbarcamento causato dalla presenza del carico termico, essendo opposto agli elementi di supporto, per le piastre appartenenti allo stesso gruppo di modulo elastico, risulta uguale per i casi di uguale spessore.

Le deformazioni, essendo minori del millimetro, sono comunque compatibili con la funzionalità della struttura.

A titolo d'esempio vengono effettuate le verifiche, seguendo quanto presentato al paragrafo 4.4, per la sola tipologia di piastra che dalle tabelle precedenti risulta essere il primo caso in cui le diverse combinazioni vengono tutte soddisfatte.

Vengono riportati i risultati delle sole combinazioni più gravose per ogni gruppo di casi di carico.

E = 32GPa – CASO3 - s = 12cm

- SLU - Verifica a flessione ($m_{sd} \leq m_{rd}$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe dei momenti sollecitanti valutati nelle due direzioni principali (m1 e m2) come valore massimo assoluto che agisce nello spessore della piastra, per le combinazioni SLU e SLA.

Momento direzione 1 Momento direzione 2

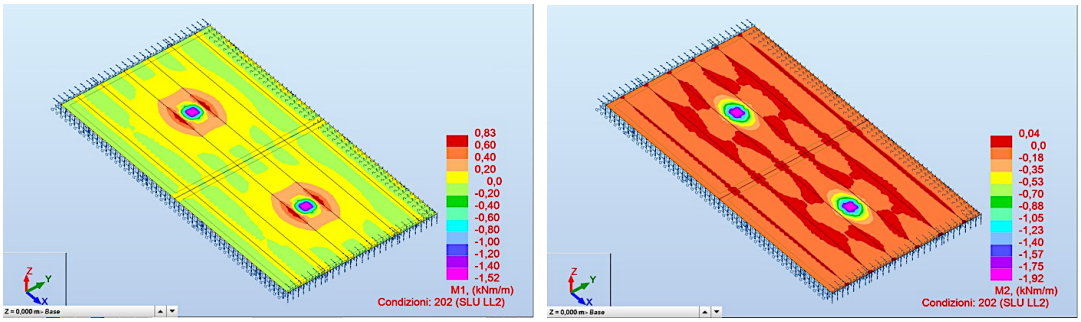


Figura 4-29: Mappa momenti sollecitanti dati dal sovraccarico

Momento direzione 1 Momento direzione 2

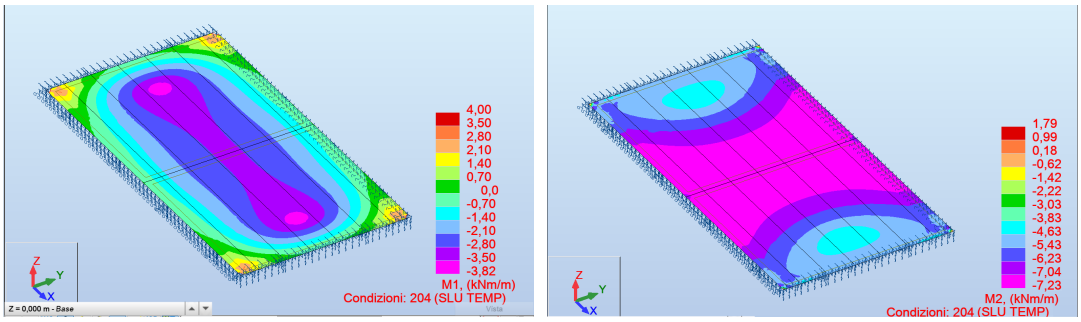


Figura 4-30: Mappa momenti sollecitanti dati da azione della temperatura

Momento direzione 1 Momento direzione 2

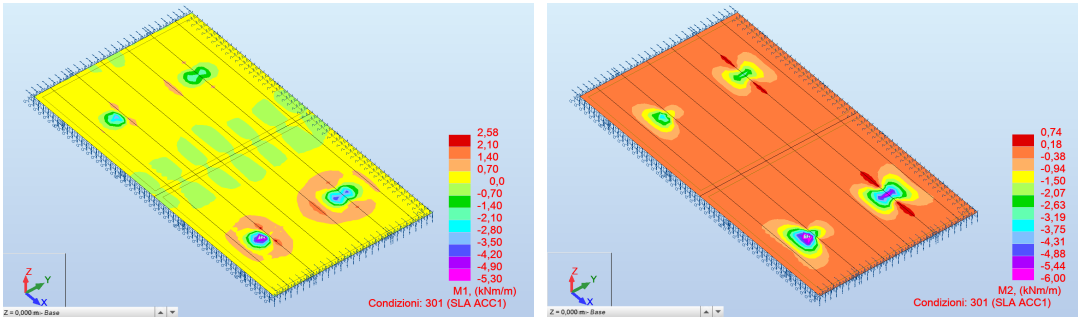


Figura 4-31: Mappa momenti sollecitanti dati da carico accidentale

Il valore di momento resistente, calcolato con l'equazione [19] è pari a 7,35 kNm/m.

Il valore del massimo momento sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico è:

$$m_{sd} = 7{,}23 \text{ kNm/m} < m_{rd} = 7{,}35 \text{ kNm/m}$$ **VERIFICATO**

- SLU - Verifica a taglio ($v_{sd} \leq v_{rd}$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe del taglio sollecitante per unità di lunghezza, valutato come valore massimo assoluto che agisce nello spessore della piastra, per le combinazioni SLU e SLA.

Taglio massimo

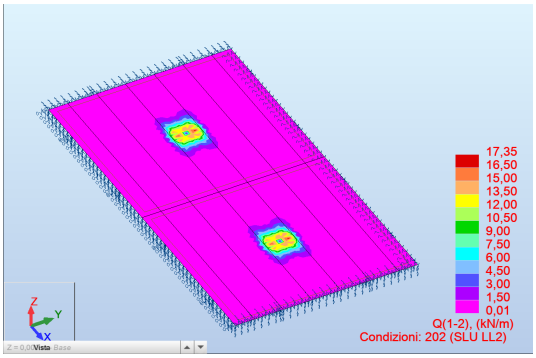


Figura 4-32: Mappa taglio sollecitante dato da sovraccarico

Taglio massimo

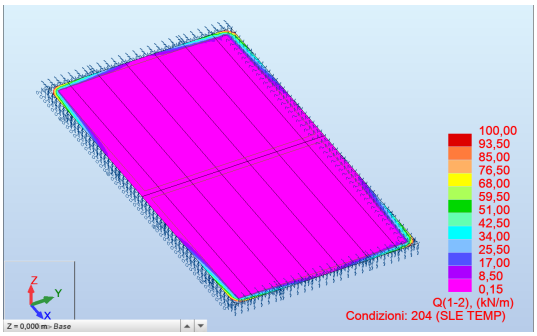


Figura 4-33: Mappa taglio sollecitante dato da azione della temperatura

Taglio massimo

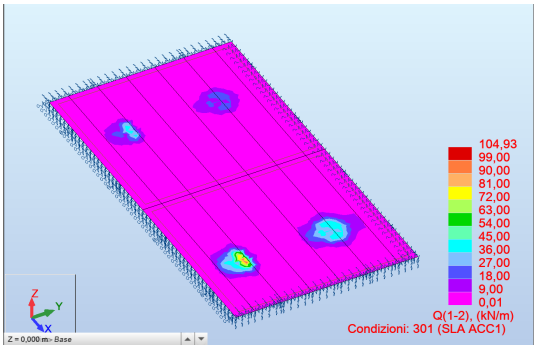


Figura 4-34: Mappa taglio sollecitante dato da carico accidentale

Il valore del taglio resistente, calcolato con l'equazione [20] è pari a 142,88 kNm/m.

Il valore del massimo taglio sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico è:

$$v_{sd} = 104{,}93 \text{ kN/m} < v_{rd} = 142{,}88 \text{ kN/m}$$ **VERIFICATO**

- SLE - Verifica delle tensioni ($\sigma_c \leq 0{,}6 * f_{ck}$; $\sigma_t \leq f_{cfm}$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe delle tensioni nelle due direzioni principali (s1 e s2), valutate sia a livello superiore che inferiore della piastra per le combinazioni SLE caratteristiche e SLA.

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

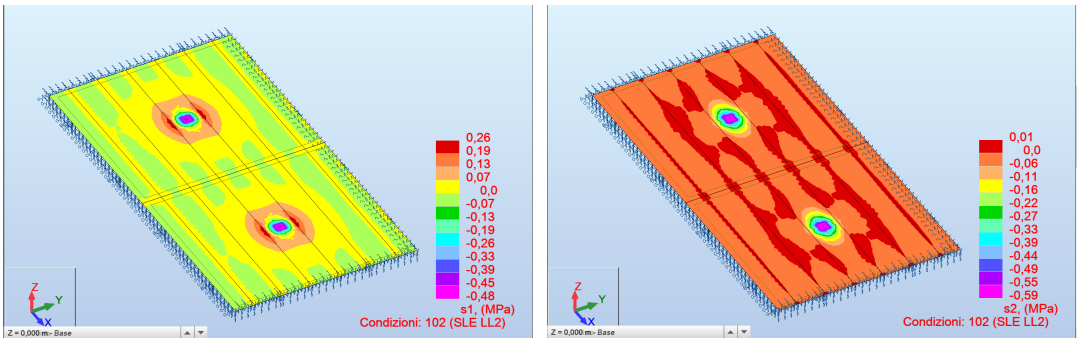


Figura 4-35: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

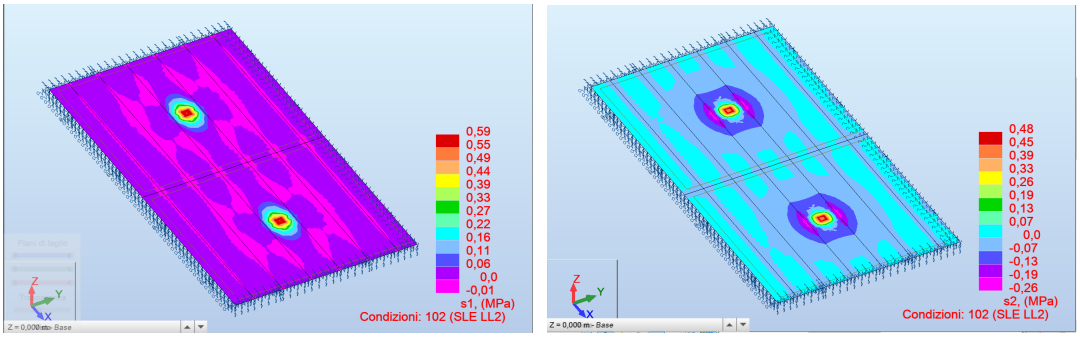


Figura 4-36: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

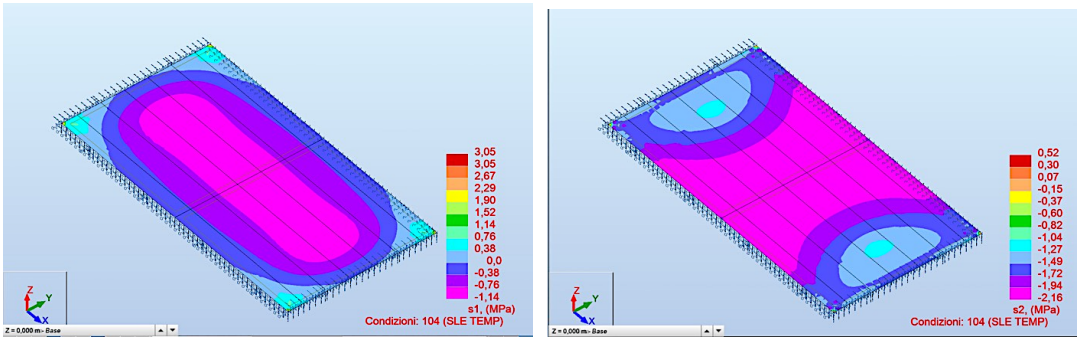


Figura 4-37: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

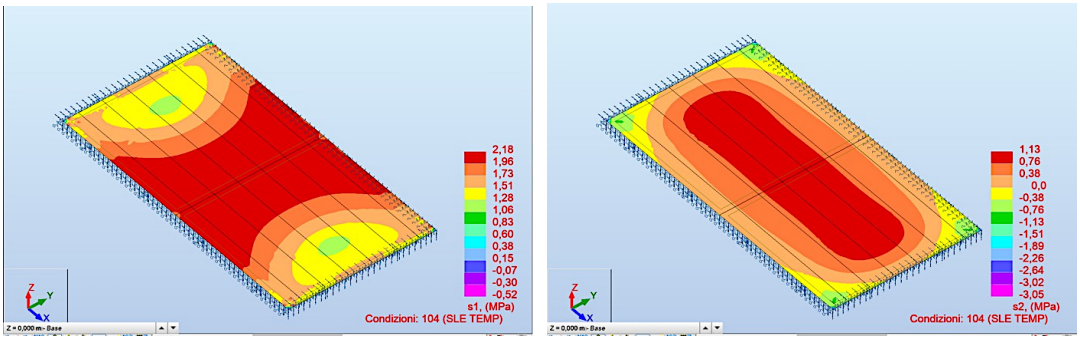


Figura 4-38: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello inferiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

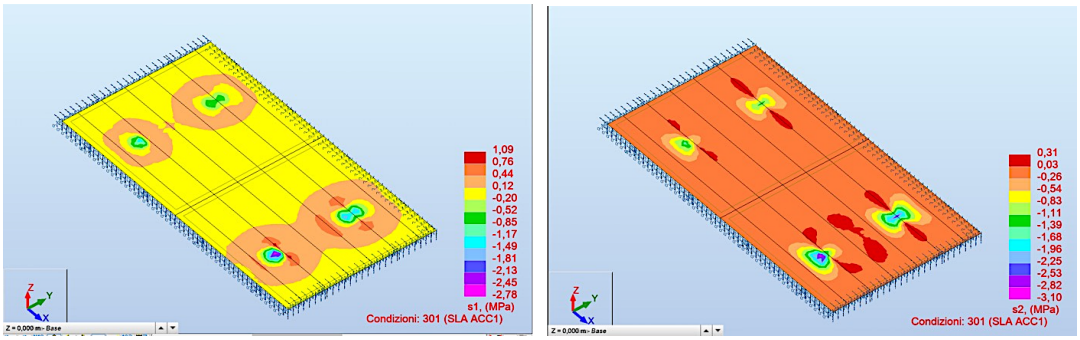


Figura 4-39: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

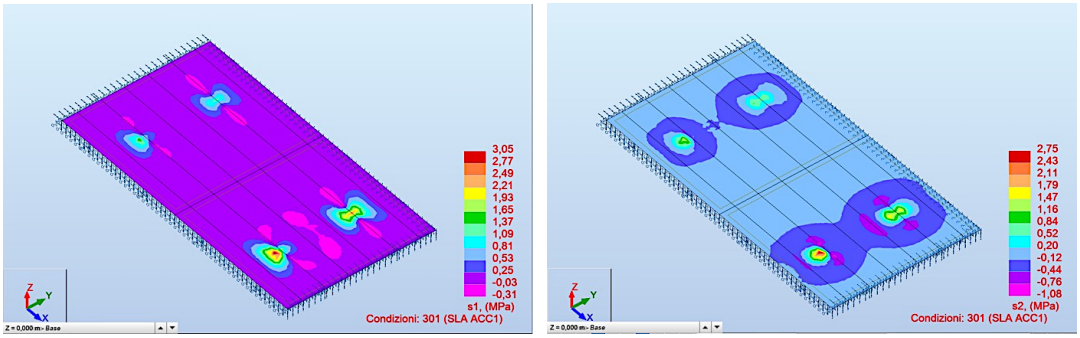


Figura 4-40: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello inferiore

Il valore della massima tensione sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico è:

$$\sigma_c = 3{,}10\text{MPa} \leq 0{,}6 * f_{ck} = 17{,}43\text{MPa}$$ **VERIFICATO**

$$\sigma_t = 3{,}05\ \text{MPa} \leq f_{cfm} = 3{,}06\ \text{MPa}$$ **VERIFICATO**

- SLE – Verifica a fessurazione $\left(\sigma_t \leq \frac{f_{ctm}}{1.2}\right)$

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe delle tensioni nelle due direzioni principali (s1 e s2), valutate sia a livello superiore che inferiore della piastra per le combinazioni SLE frequenti.

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

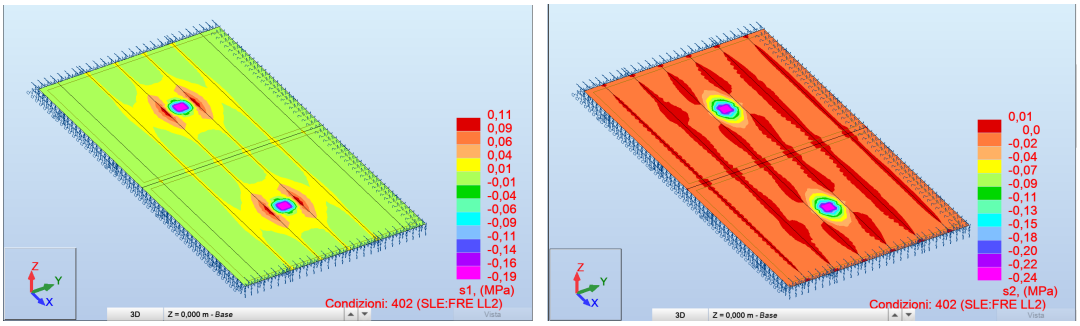


Figura 4-41: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

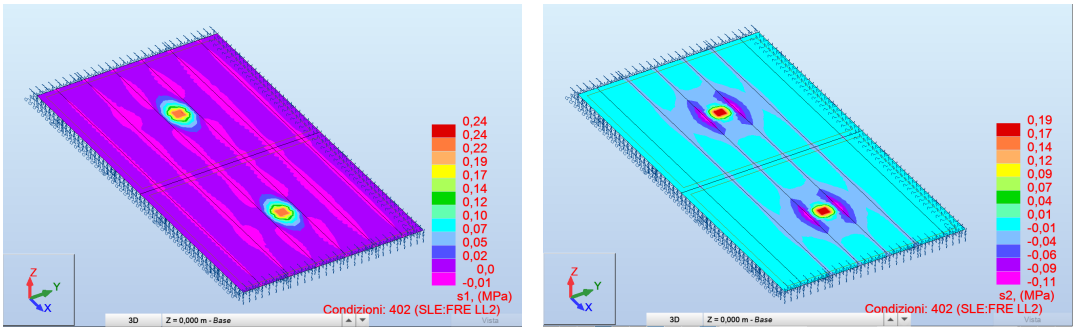


Figura 4-42: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

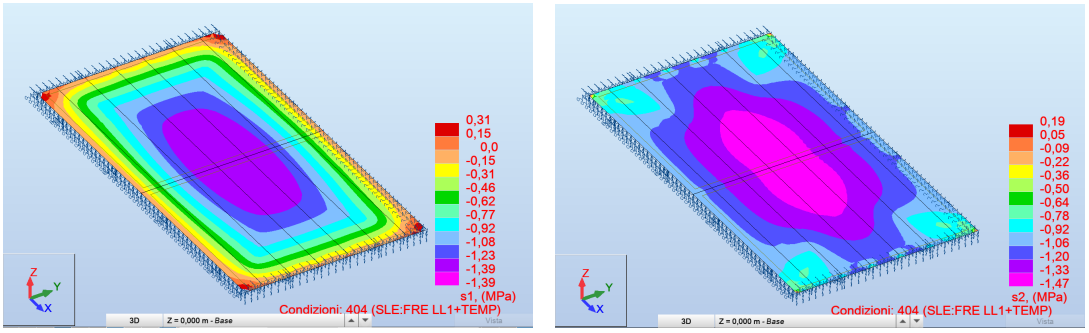


Figura 4-43: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

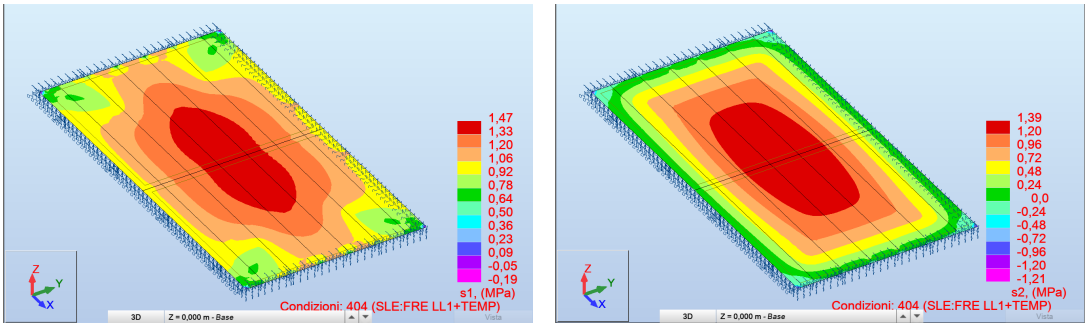


Figura 4-44: Mappa tensioni sollecitanti date da azione della temperatura, livello inferiore

Il valore della massima tensione sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico è:

$$\sigma_t = 1{,}47 \text{ MPa} \leq \frac{f_{ctm}}{1.2} = 2{,}13 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

- SLE – Verifica a deformabilità

Di seguito si riporta la mappa e la deformata relativa agli effetti di imbarcamento (curling) dovuti ad una variazione di temperatura a farfalla che creano il sollevamento della piastra. Il sollevamento deve essere minore di una tolleranza prestabilita dal progettista.

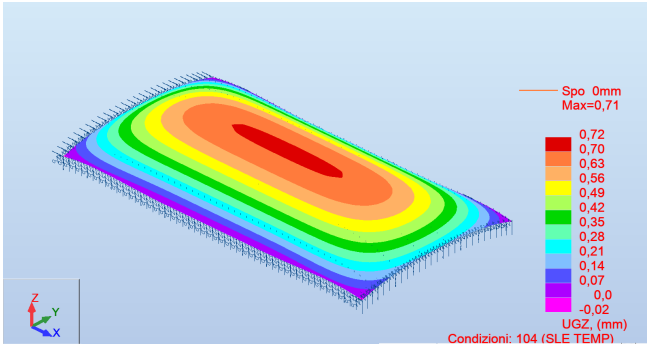


Figura 4-45: Mappa deformazioni relativi all'effetto d'imbarcamento

4.5.4 Analisi numerica della sella di sostegno della piastra

L'elemento è composto da una piastra di base poggiante al suolo di spessore 100 mm, a cui vengono associate le caratteristiche della fondazione, calcolate in precedenza, ovvero un valore di reazione del terreno pari a k = 40 kPa/mm, e da setti di spessore 75 mm, e/o pilastrini di diametro 75 mm.

Schematizzazione della struttura

La struttura e il suo comportamento sotto le azioni statiche è stato adeguatamente valutato, interpretato e trasferito in un modello tridimensionale; tale modello ha consentito di effettuare un'analisi particolarmente reale sia della distribuzione di massa che della effettiva rigidezza. La struttura è stata realizzata come piastra modellata con elementi SHELL quadrangolari, con dimensione dell'elemento mesh di 10 cm e a cui sono stati associati gli spessori e le proprietà meccaniche del materiale, e con barre modellate come elementi BEAM con sezioni aventi caratteristiche corrispondenti ai profili reali.

La sella è modellata come piastra su suolo elastico alla Winkler considerando quindi un comportamento elastico del suolo in cui sussiste una legge lineare che lega gli spostamenti con la reazione del terreno.

Per valutare correttamente il trasferimento dei carichi che dall'elemento piastra si trasferiscono agli elementi di supporto che fanno parte della sella, la struttura è stata modellata nella sua interezza, considerando la piastra in semplice appoggio sugli elementi di supporto, tramite inserimento di opportuni elementi di rilascio lineari o puntuali con comportamento unilaterale in compressione.

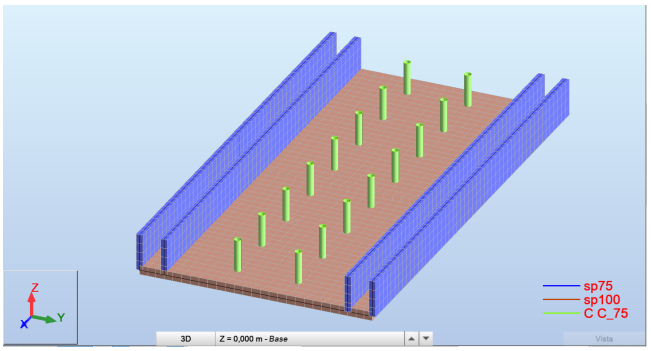


Figura 4-46: Immagine FEM Caso 1

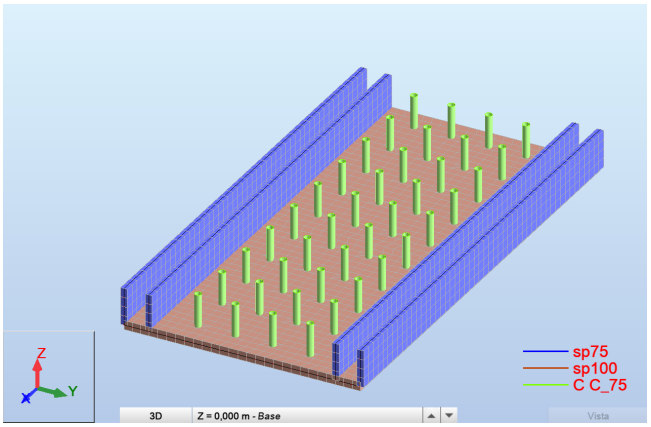


Figura 4-47: Immagine FEM Caso 2

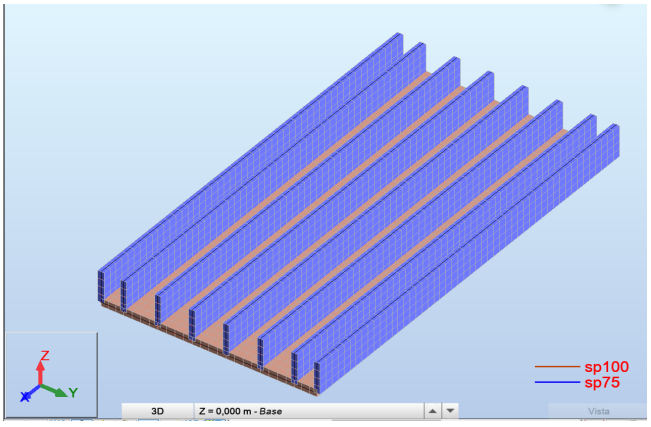


Figura 4-48: Immagine FEM Caso 3

Carichi applicati

L'analisi dell'elemento di base è quindi effettuata tenendo conto dei carichi che agiscono sulla piastra, come spiegato al paragrafo 4.5.2, che vengono trasmessi agli elementi di supporto verticali. Sono stati aggiunti i carichi permanenti portati rappresentanti la presenza delle tubazioni e dell'acqua piovana all'interno del modulo ad essa adibita, disposti come rappresentato nelle immagini seguenti.

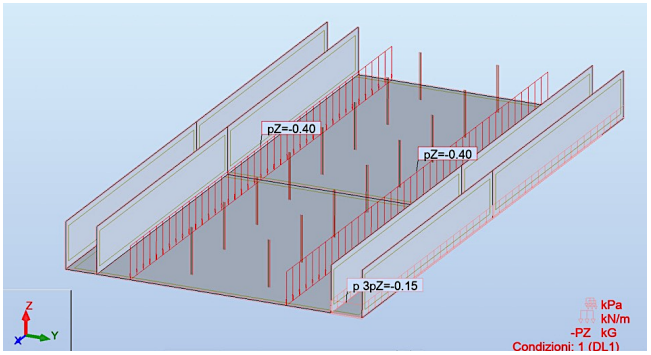


Figura 4-49: Applicazione carichi permanenti, Caso 1

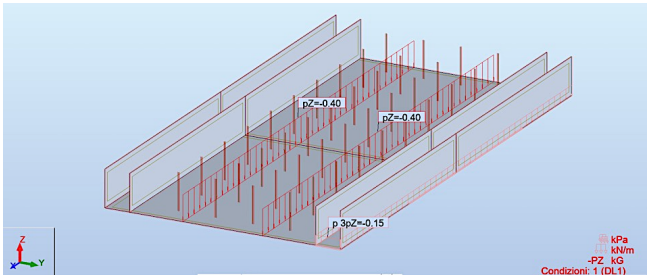


Figura 4-50: Applicazione carichi permanenti, Caso 2

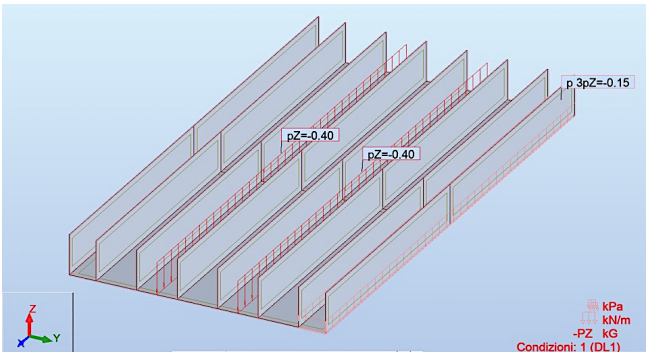


Figura 4-51: Applicazione carichi permanenti, Caso 3

4.5.5 Risultati e verifiche della sella

Da una prima analisi è stato valutato che la struttura sottostante, indipendentemente dalla configurazione geometrica e dallo spessore o materiale della piastra, risulta sempre verificata.

Si ipotizza quindi di utilizzare la configurazione con il modulo elastico più basso, corrispondente al calcestruzzo C16/20.

A titolo d'esempio vengono presentati i risultati dell'analisi della sella appartenente alla configurazione della piastra precedentemente analizzata. Le verifiche sono effettuate seguendo quanto presentato al paragrafo 4.4

Vengono riportati i risultati delle sole combinazioni più gravose per ogni gruppo di combinazione.

E = 28GPa – CASO3 – s = 15cm

- SLU - Verifica a flessione ($m_{sd} \leq m_{rd}$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe dei momenti sollecitanti valutati nelle due direzioni principali (m1 e m2) come valore massimo assoluto che agisce nello spessore della piastra, per le combinazioni SLU e SLA.

Momento direzione 1 Momento direzione 2

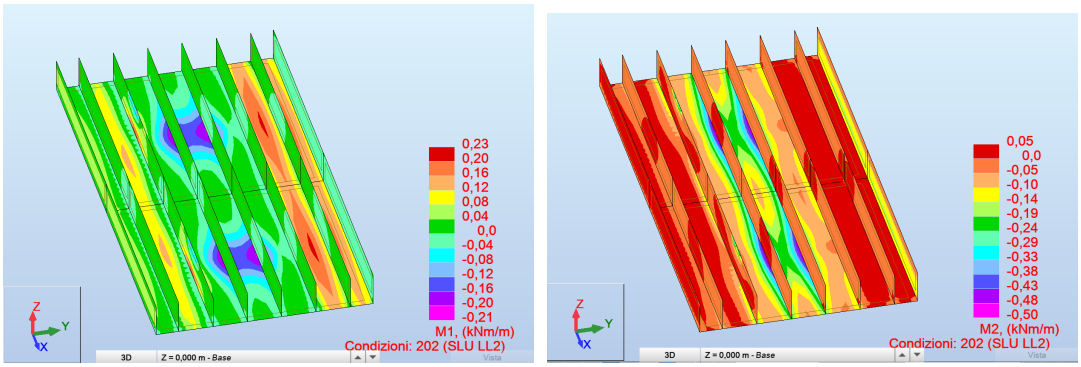


Figura 4-52: Mappa momenti sollecitanti dati da sovraccarico

Momento direzione 1 Momento direzione 2

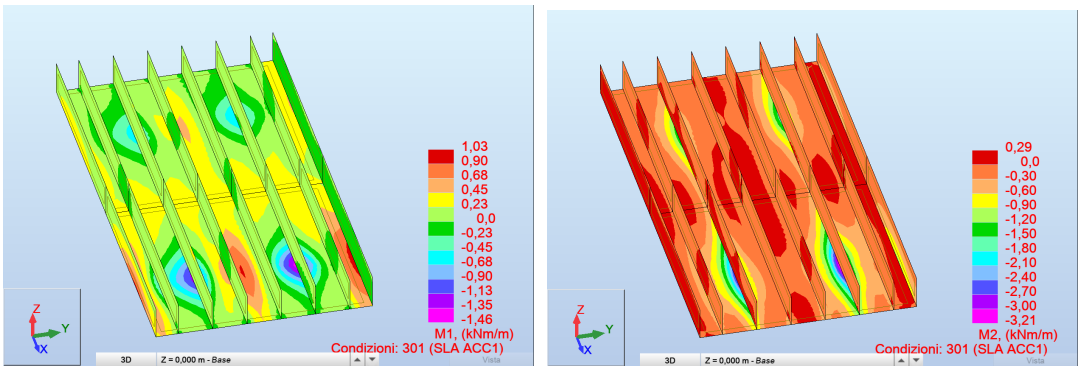


Figura 4-53: Mappa momenti sollecitanti dati da carico accidentale

Il valore di momento resistente, calcolato con l'equazione [19] è pari a 3,51 kNm/m.

Il valore del massimo momento sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico agisce sulla base, la verifica risulta:

$$m_{sd} = 3{,}21 \text{ kNm/m} < m_{rd} = 3{,}51 \text{ kNm/m}$$ **VERIFICATO**

- SLU - Verifica a taglio ($v_{sd} \leq v_{rd}$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe del taglio sollecitante per unità di lunghezza, valutato come valore massimo assoluto che agisce nello spessore della piastra, per le combinazioni SLU e SLA.

Taglio massimo

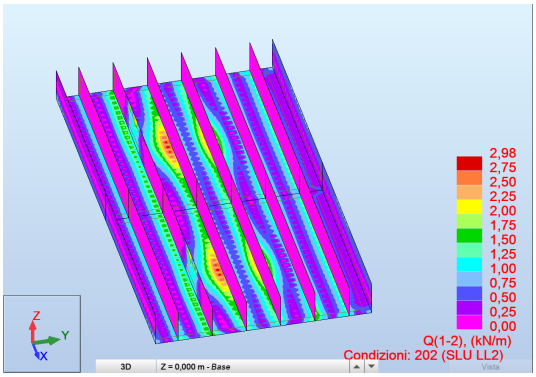


Figura 4-54: Mappa taglio sollecitante dato da sovraccarico

Taglio massimo

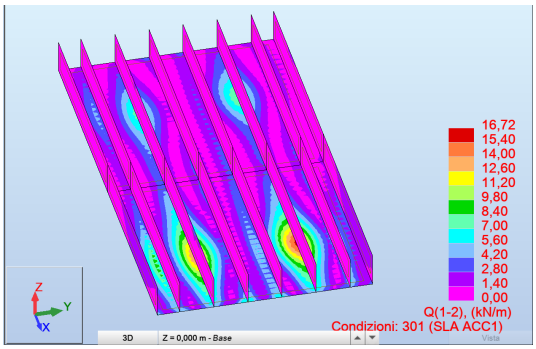


Figura 4-55: Mappa taglio sollecitante dato da carico accidentale

Il valore del taglio resistente, calcolato con l'equazione [20] è pari a 82 kNm/m.

Il valore del massimo taglio sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico agisce sulla base, la verifica risulta:

$$v_{sd} = 16{,}72 \text{ kN/m} < v_{rd} = 82 \text{ kN/m}$$ **VERIFICATO**

- SLU - Verifica sforzo normale per setti-pilastri ($N_{Ed} \leq N_{Rd}$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe dello sforzo normale agente sui setti, valutato come valore massimo assoluto che agisce nello spessore degli stessi, per le combinazioni SLU e SLA.

Sforzo normale massimo

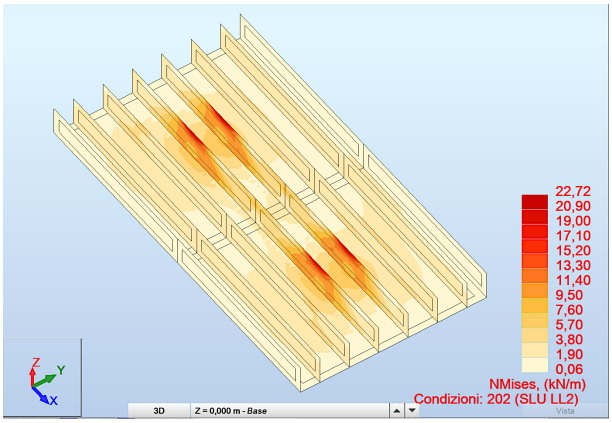


Figura 4-56: Mappa sforzo normaale sollecitante dato da sovraccarico

Sforzo normale massimo

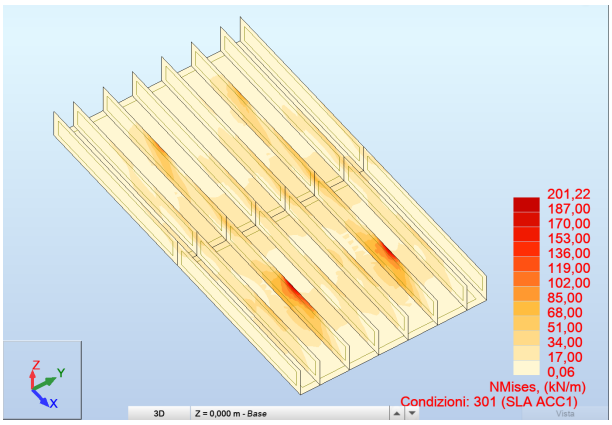


Figura 4-57: Mappa sforzo normale sollecitante dato da carico accidentale

Il valore di sforzo normale resistente, dato dall'equazione [22] è pari a 705,75 kN/m.

Il valore del massimo sforzo normale sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico agisce sulla base, la verifica risulta:

$$N_{Ed} = 201{,}22 \text{ kN/m} < N_{Rd} = 705{,}75 \text{ kN/m}$$ **VERIFICATO**

- SLE - Verifica delle tensioni ($\sigma_c \leq 0{,}6 * f_{ck}$; $\sigma_t \leq f_{cfm}$)

Nelle immagini seguenti sono state riportate le mappe delle tensioni nelle due direzioni principali (s1 e s2), valutate sia a livello superiore che inferiore della piastra per le combinazioni SLE caratteristiche e SLA.

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

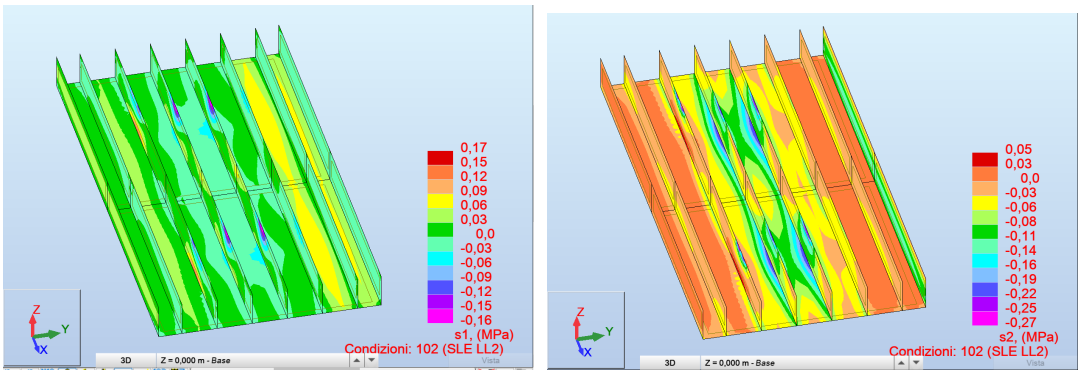


Figura 4-58: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

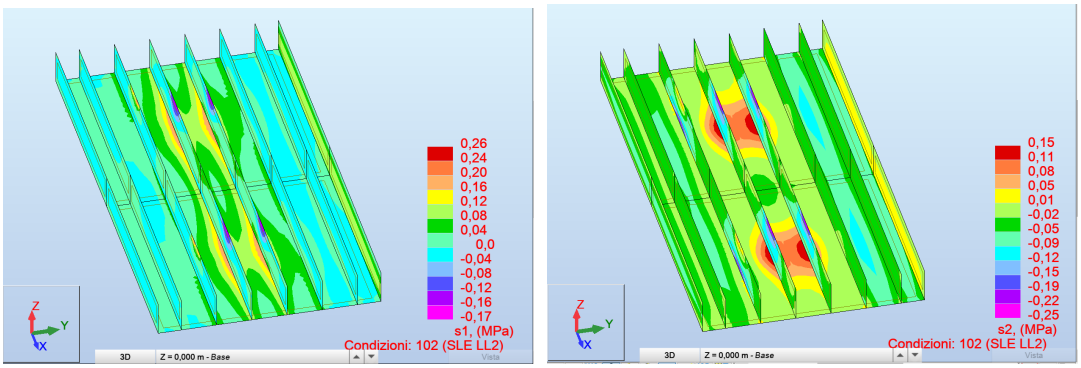


Figura 4-59: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

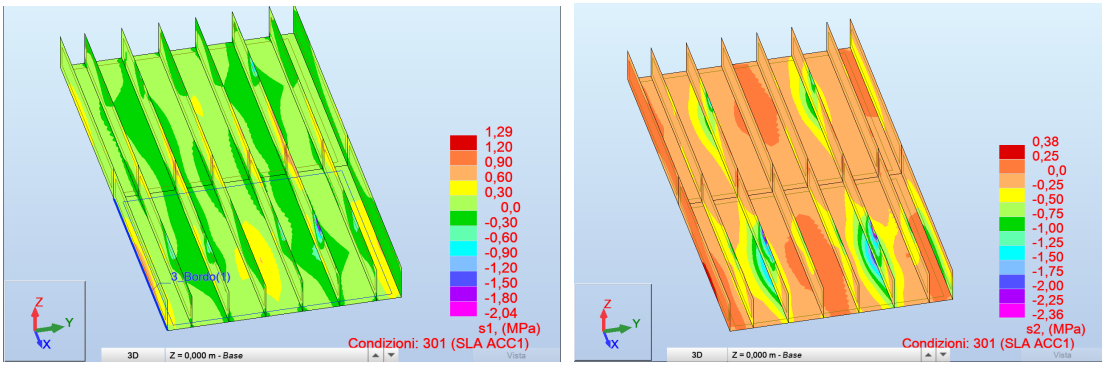


Figura 4-60: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

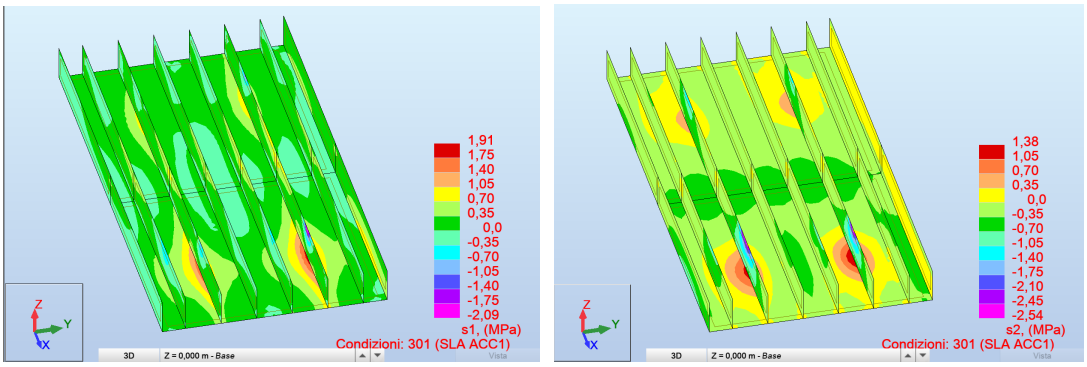


Figura 4-61: Mappa tensioni sollecitanti date da carico accidentale, livello inferiore

Il valore della massima tensione sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico è:

$$\sigma_c = 2{,}54 \text{ MPa} \leq 0{,}6 * f_{ck} = 9{,}96 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

$$\sigma_t = 1{,}91 \text{ MPa} \leq f_{cfm} = 2{,}11 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

- SLE – Verifica a fessurazione $\left(\sigma_t \leq \frac{f_{ctm}}{1.2}\right)$

Nelle immagini seguenti sono state riportate le mappe delle tensioni nelle due direzioni principali (s1 e s2), valutate sia a livello superiore che inferiore della piastra per le combinazioni SLE frequenti.

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

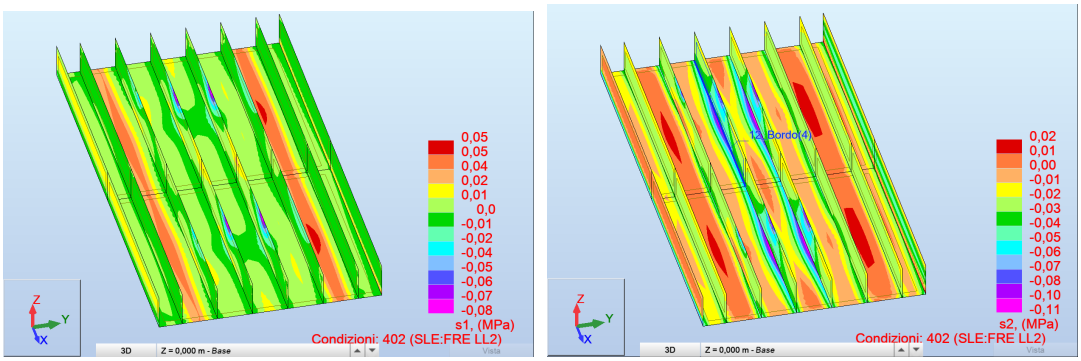


Figura 4-62: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

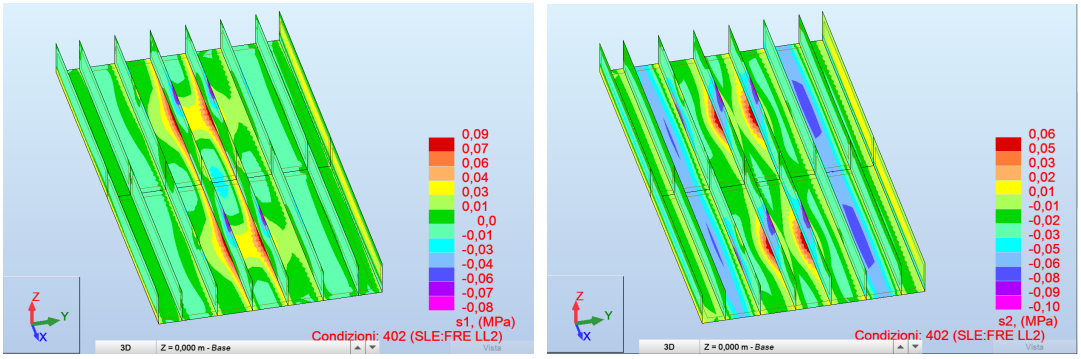


Figura 4-63: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico, livello inferiore

Il valore della massima tensione sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico, che agisce sulla base è:

$$\sigma_t = 0{,}09 = \text{MPa} < \frac{f_{ctm}}{1.2} = 1{,}46 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

- Verifica di capacità portante

Si riporta di seguito in forma grafica, il valore di pressione della spinta passiva del terreno che agisce sulla superficie della struttura, sotto le combinazioni di carico allo SLU:

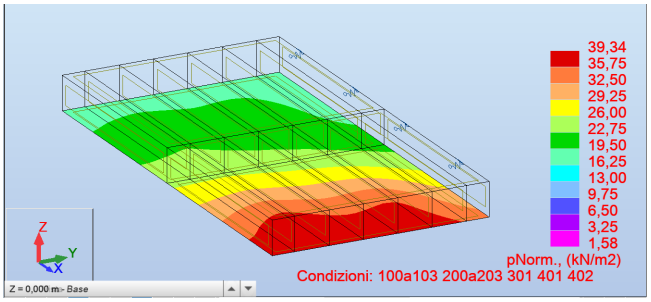


Figura 4-64: Mappa reazioni del terreno sotto le combinazioni delle azioni

il massimo valore di pressione risulta pari a 39,34 kPa.

Noti i parametri meccanici del terreno, presentati al paragrafo 4.3, e geometrici della struttura, la capacità portante del terreno è calcolata con l'equazione [25].

Si ottiene un valore q_{lim} pari a 865,39 kPa. In accordo con le NTC, utilizzando l'Approccio 2 (A1+M1+R3) con coefficiente parziale (R3) γ_R=2,3, il valore di pressione ammissibile risulta:

q_{adm} = 865,39/2,3 = 376,26 kPa

q_{adm} = 376,26 kPa > 39,34 kPa **VERIFICATO**

- Cedimenti

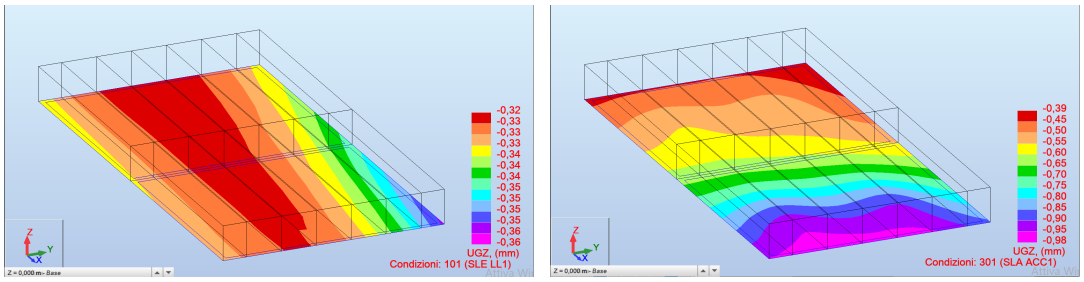


Figura 4-65: Mappa dei cedimenti

Il massimo cedimento per i carichi variabili è di 0,39 mm; per il carico accidentale è di 0,96 mm. Risultano quindi essere compatibili con la funzionalità della struttura.

4.6 Tipologia B - Principali risultati delle analisi numeriche

Lo scenario B, come già anticipato, prevede l'applicazione della struttura in aree non adiacenti al traffico veicolare. Il dimensionamento, presentato al paragrafo **Errore. L 'origine riferimento non è stata trovata.** è stato effettuato utilizzando come materiale una miscela di plastica e fresato, e configurazione strutturale conforme con i carichi applicati.

Per l'analisi, effettuata seguendo la metodologia esposta al paragrafo 0, sono stati sviluppati diversi modelli della struttura, combinando parametri di input al fine di ottenere una vasta gamma di possibili modelli da poter adottare. In particolare l'analisi è stato condotta operando in un range di rigidezza, di spessori degli elementi. Sono stati considerati:

- Tre valori per il modulo di rigidezza:
  - 700 MPa
  - 1200 MPa
  - 2000 MPa
- Due spessori degli elementi:
  - 20 mm
  - 30 mm

4.6.1 Materiali

Il materiale considerato per la configurazione in esame è una miscela formata da circa il 60% da RAP e il 40% da plastica riciclata. Lo studio del corretto comportamento meccanico della miscela è al vaglio, però da una prima analisi è stato valutato che a "comandare" è il comportamento della plastica, per questo si prosegue l'analisi della

struttura considerando la miscela come se fosse interamente costituita da plastica riciclata, in particolare da polietilene.

I moduli elastici sopra citati rappresentano due classi di polietilene: LDPE (polietilene a bassa densità) e HDPE (polietilene ad alta densità), le cui caratteristiche meccaniche sono riportate di seguito:

Tabella 4-27: Proprietà meccaniche polietilene

	HDPE	LDPE
Densità γ [kg/m^3]	940-965	915-930
Resistenza a trazione σt [MPa]	20-37	8-30
Modulo elastico E [MPa]	1200-2000	700-1000
Coefficiente dil. termico α [k^{-1}]	1,8*10^{-4}	1,6*10^{-4}
Tensione snervamento fy [MPa]	25-35	10-20

4.6.2 Analisi numerica della sovrastruttura

L'analisi della struttura è stata condotta modellando sul software di calcolo due moduli contigui, collegati tra loro da elementi BEAM e con vincoli cerniera sulle pareti laterali, che simulano la presenza dei bulloni di collegamento.

Schematizzazione della struttura

La struttura e il suo comportamento sotto le azioni statiche è stato adeguatamente valutato, interpretato e trasferito in un modello tridimensionale; tale modello ha consentito di effettuare un'analisi particolarmente reale sia della distribuzione di massa che della effettiva rigidezza. La struttura è stata realizzata come un insieme di piastre modellate con elementi SHELL quadrangolari con dimensione dell'elemento mesh di 5 cm e a cui sono stati associati gli spessori e le proprietà meccaniche del materiale. La piastra di copertura è stata modellata in semplice appoggio sui setti laterali, gestita tramite l'inserimento di opportuni elementi di rilascio lineare o puntuali con comportamento unilaterale in compressione. La piastra di base è modellata come piastra su suolo elastico alla Winkler considerando quindi un comportamento elastico del suolo in cui sussiste una legge lineare che lega gli spostamenti con la reazione del terreno.

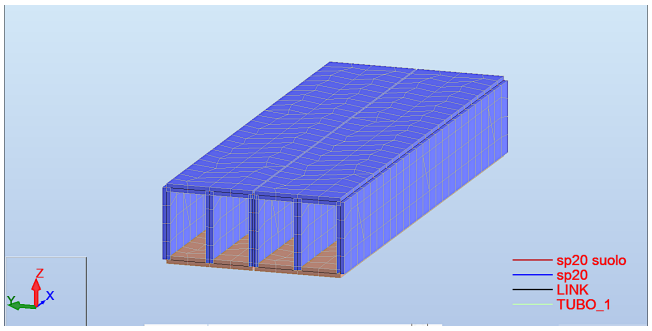


Figura 4-66: Immagine FEM – spessore 20 mm

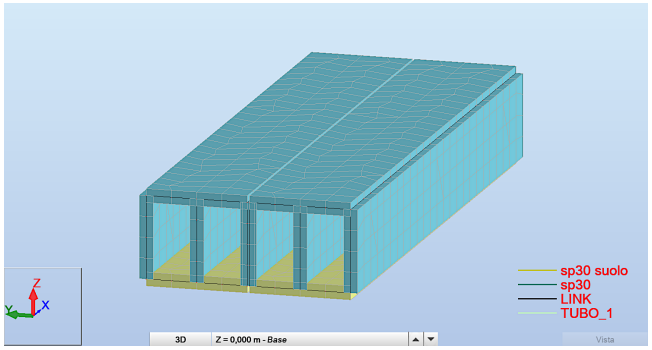


Figura 4-67: Immagine FEM – spessore 30 mm

Carichi applicati

I carichi definiti al paragrafo 4.4.6 sono applicati sull'elemento, in particolare l'analisi è effettuata considerando il carico permanente portato rappresentato dal tappeto di usura, i carichi variabili dati dal traffico ciclo/pedonale e l'azione della neve, come riportato nelle immagini seguenti.

Il peso proprio è direttamente computato dal programma di calcolo in funzione del peso specifico del materiale e dello spessore dell'elemento.

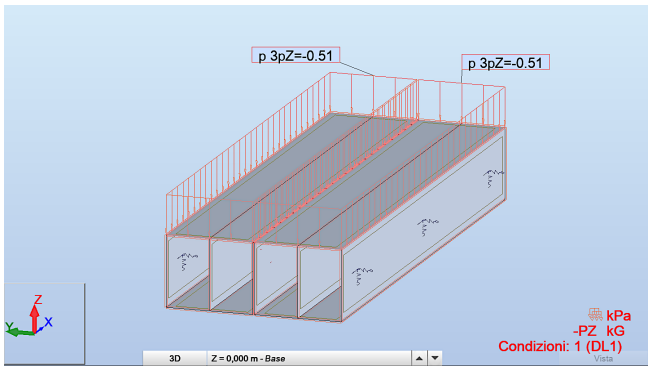


Figura 4-68: Applicazione carico permanente

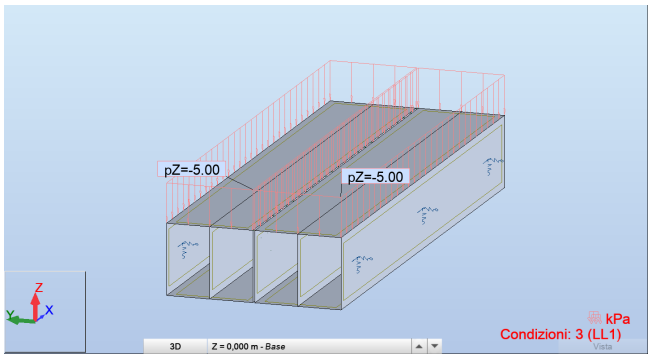


Figura 4-69: Applicazione sovraccarico distribuito

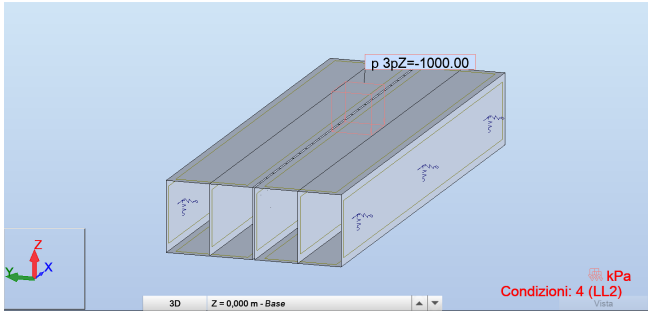


Figura 4-70: Applicazione sovraccarico puntuale

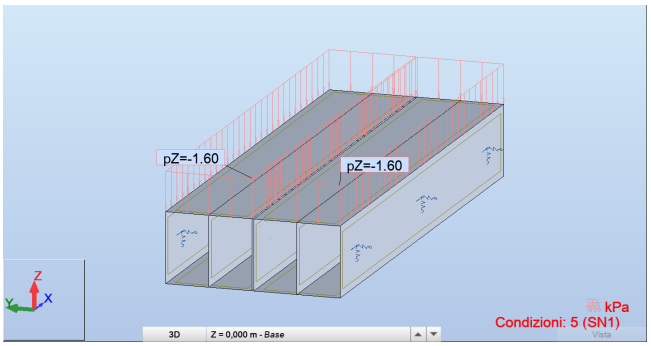


Figura 4-71: Applicazione carico neve

4.6.3 Risultati e verifiche della sovrastruttura

Come riportato al paragrafo 4.4, le verifiche vengono effettuate confrontando i valori di tensioni agenti sotto le diverse combinazioni di carico agli stati limite ultimi, con i valori di tensione di snervamento (f_y) del materiale ridotta di un fattore di sicurezza assunto pari a 1,5.

I valori delle tensioni agenti sono schematizzati nelle seguenti tabelle, vengono riportati i valori delle sole combinazioni più gravose. Sono state considerate le massime tensioni agenti sugli elementi calcolate secondo la teoria di Von Mises:

Tabella 4-28: Tensioni agenti sulla struttura, modulo E=700 MPa

		σ_{sd} [MPa]
E = 700 MPa	s = 2 cm	18,8
	s = 3 cm	8,59

$f_y/1,5 = 10$ [MPa]

Tabella 4-29: Tensioni agenti sulla struttura, modulo E=1200 MPa

		σ_{sd} [MPa]
E = 1200 MPa	s = 2 cm	18,65
	s = 3 cm	8,63

$f_y/1,5 = 16,67$ [MPa]

Tabella 4-30: Tensioni agenti sulla struttura, modulo E=2000 MPa

		σ_{sd} [MPa]
E = 2000 MPa	s = 2 cm	18,2
	s = 3 cm	8,7

$f_y/1,5 = 23,33$ [MPa]

Nelle tabelle seguenti si riportano invece i valori di deformazioni indotte dai carichi verticali, per le sole combinazioni più gravose:

Tabella 4-31: Deformazioni indotte dai carichi sulla struttura, modulo E= 700 MPa

		u_z [mm]
E = 700 MPa	s = 2 cm	3,7
	s = 3 cm	2,29

Tabella 4-32: Deformazioni indotte dai carichi sulla struttura, modulo E= 1200 MPa

		u_z [mm]
E = 1200 MPa	s = 2 cm	2,75
	s = 3 cm	1,70

Tabella 4-33: Deformazioni indotte dai carichi sulla struttura, modulo E= 2000 MPa

		u_z [mm]
E = 2000 MPa	s = 2 cm	2,02
	s = 3 cm	1,31

Per quanto riguarda la verifica a deformazione, il comportamento del polietilene è rappresentato in Figura 1-18, si deduce quindi che finché la tensione sollecitante non supera il valore di tensione di snervamento, tutte le deformazioni indotte dai carichi sono reversibili, quindi conformi con il comportamento del materiale.

A titolo d'esempio vengono presentati i risultati dell'analisi della sovrastruttura in plastica per il caso E = 1200 MPa – s = 3 cm. Le verifiche sono effettuate seguendo quanto presentato al paragrafo 4.4. Vengono riportati i risultati delle sole combinazioni più gravose.

E = 1200MPa – s = 3 cm

- SLU - Verifica a flessione ($\boldsymbol{\sigma}_{sd} \leq f_y$)

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe delle massime tensioni agenti sugli elementi calcolate secondo la teoria di Von Mises:

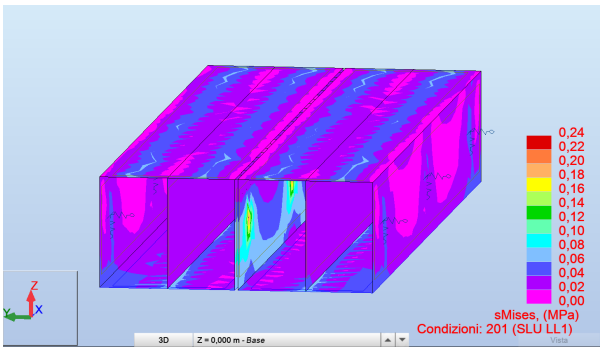


Figura 4-72: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico distribuito

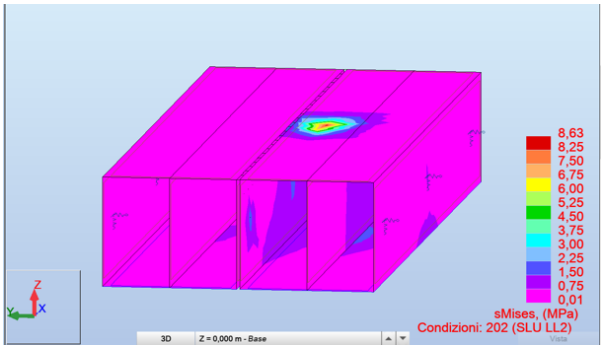


Figura 4-73: Mappa tensioni sollecitanti date da sovraccarico puntuale

Il valore della massima tensione sollecitante derivante dalle diverse combinazioni di carico è:

$$\sigma_{sd} = 8{,}63 \text{ MPa} \leq f_y = 16{,}67 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

- SLE – Verifica a deformabilità

Nelle immagini seguenti sono riportate le mappe delle deformazioni indotte dalle diverse combinazioni di carico:

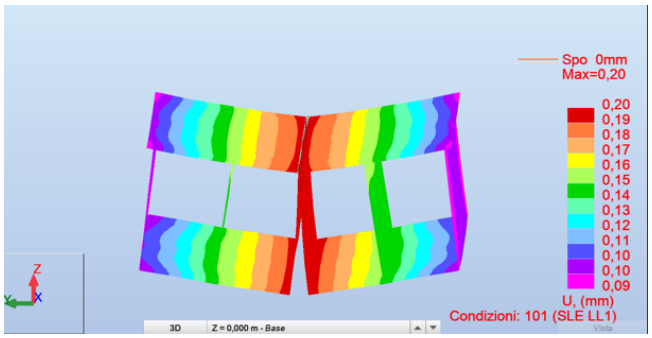


Figura 4-74: Deformazioni indotte da sovraccarico distribuito

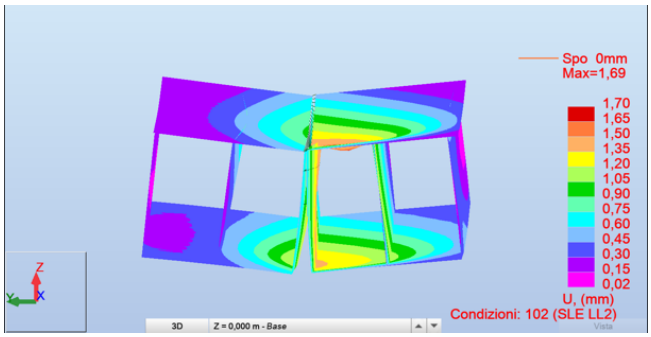


Figura 4-75: Deformazioni indotte da sovraccarico puntuale

Il massimo valore di deformazione sotto l'azione dei carichi è di 1,70 mm. Le deformazioni risultano compatibili con la funzionalità della struttura.

- Verifica bulloni di collegamento

Si riportano di seguito, in forma grafica, le azioni agenti sui bulloni di collegamento per le diverse combinazioni di carico adottate:

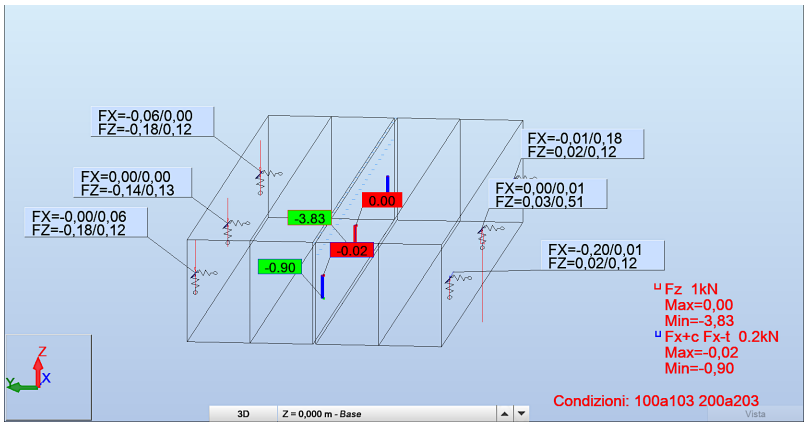


Figura 4-76: Azioni agenti sui bulloni di collegamento

Le massime azioni agenti su ciascun bullone M12 cl.8.8 sono:

- Azioni di taglio: $F_{vsd} = 3,9$ kN
- Azioni di tiro: $F_{tsd} = 1,0$ kN

Di seguito si riporta la verifica del bullone:

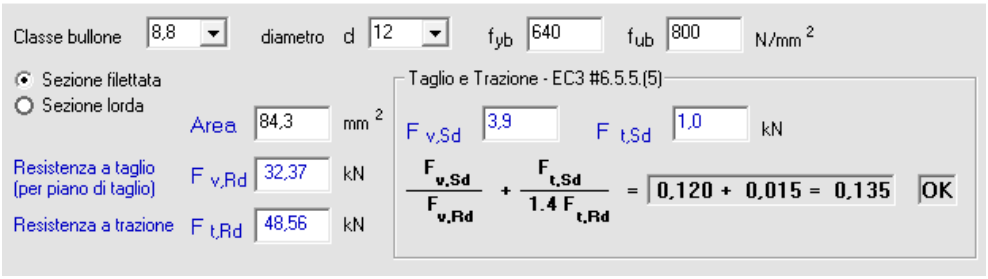


Figura 4-77: Verifica del bullone

- Verifica di capacità portante

Si riporta di seguito in forma grafica, il valore di pressione della spinta passiva del terreno che agisce sulla superficie della struttura, sotto le combinazioni di carico allo SLU:

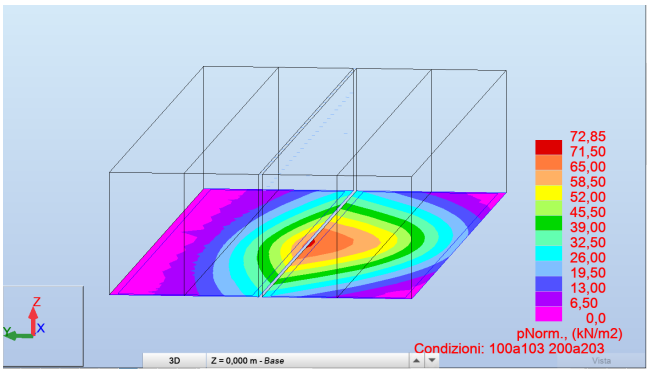


Figura 4-78: Mappa reazioni del terreno sotto le combinazioni delle azioni

Il massimo valore di pressione risulta pari a 72,85 kPa.

Noti i parametri meccanici del terreno, presentati al paragrafo 4.3, e geometrici della struttura, la capacità portante del terreno è calcolata con l'equazione [25].

Si ottiene un valore q_{lim} pari a 622,87 kPa. In accordo con le NTC, utilizzando l'Approccio 2 (A1+M1+R3) con coefficiente parziale (R3) γ_R=2,3, il valore di pressione ammissibile risulta:

q_{adm} = 622,87/2,3 = 270,81 kPa.

$$q_{adm} = 270{,}81 \text{ kPa} > 72{,}85 \text{ kPa}$$ **VERIFICATO**

- Cedimenti

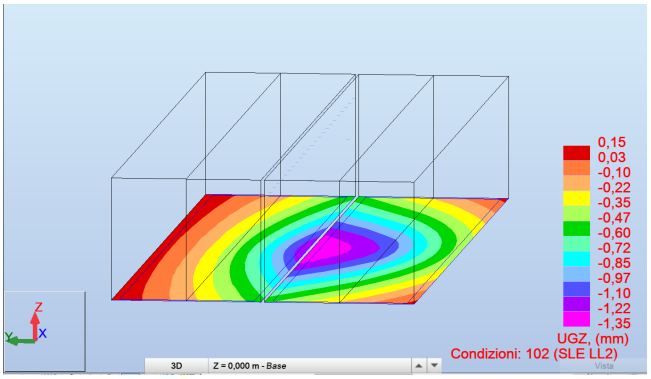


Figura 4-79: Mappa dei cedimenti

Il massimo cedimento sotto l'azione dei carichi è di 0,15 mm. Risulta essere un valore compatibile con la funzionalità della struttura.

4.7 Costruzione della sovrastruttura

4.7.1 Preparazione della fondazione

La realizzazione della pista ciclabile, indipendentemente dal tipo di scenario da adottare, avviene mediante movimenti di materie e con l'apertura di una trincea atta a contenere il modulo prefabbricato. Si susseguono una serie di lavorazioni propedeutiche alla posa della struttura:

- Smacchiamento e scoticamento dell'area;
- Esecuzione dello scavo di sbancamento che prevedere la realizzazione di uno scavo a sezione ristretta, poiché nel caso la struttura si troverà "chiusa" dalle pareti di terreno. Lo scavo deve essere profondo tanto da garantire il completo infossamento della struttura;
- Posizionamento della guaina geotessile, nel caso in cui il terreno sia soggetto ad infiltrazioni d'acqua;
- la predisposizione della fondazione.

Il piano di appoggio della struttura deve presentare una regolarità costruttiva. Uno strato di sottofondo e fondazione ben preparati ed adeguatamente compattati sono essenziali per la durabilità delle strutture. Il sottofondo deve garantire il corretto supporto alla pavimentazione, è quindi prerogativa che soddisfi i requisiti di portanza richiesta in fare progettuale. È possibile realizzare questo strato con materiale naturale presente in situ o con materiale di riporto, nel caso di non soddisfacimento delle richieste, è necessario stabilizzare lo strato. Al fine di evitare eventuali risalite d'acqua, lo strato di fondazione sarà separato dal sottofondo mediante l'utilizzo di uno strato di tessuto non tessuto.

La fondazione attenua le sollecitazioni ed è lo strato di collegamento tra la struttura e il sottofondo. È costituita da una miscela di misto granulare adeguatamente confezionata in stabilimento e stesa in situ mediante la realizzazione di strati. Il costipamento e la rifinitura dello strato di fondazione avvengono mediante l'utilizzo di rulli vibranti. Al fine di garantire la corretta inclinazione della struttura, atta a garantire lo scolo dell'acqua piovana verso le canaline posizionate al bordo della pavimentazione, la stratificazione della fondazione avverrà con altezze variabili, tali da garantire l'inclinazione trasversale pari al 2%.

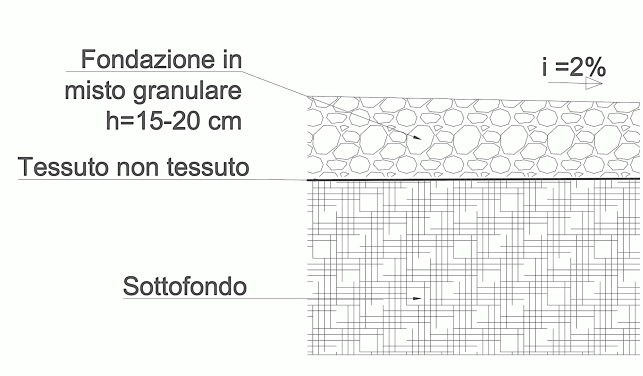


Figura 4-80: Predisposizione strato di fondazione

4.7.2 Trasporto blocchi e posa in opera

Il trasporto dei moduli dallo stabilimento fino al luogo di posa avverrà mediante appositi autocarri, verranno poi posati in sito dopo aver soddisfatto i requisiti richiesti per la fondazione.

La movimentazione degli elementi in calcestruzzo (**tipologia A**) avverrà grazie all'utilizzo di golfari di sollevamento (Figura 4-81), inseriti nei moduli stessi al momento della realizzazione.

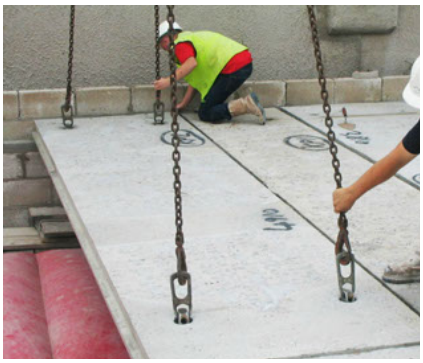


Figura 4-81: Rappresentazione movimentazione elementi in calcestruzzo

Per verificare il funzionamento degli elementi durante la movimentazione, sono state condotte le analisi sui singoli elementi sotto il solo carico del peso proprio. La piastra e la sella di supporto sono schematizzati come elementi bidimensionali modellati con elementi SHELL quadrangolari, a cui sono stati inseriti dei vincoli cerniera nelle vicinanze degli angoli, a simulare la presenza dei golfari.

A favore di sicurezza la verifica è stata condotta considerando la piastra di spessore s = 150 mm, con modulo elastico E = 32 GPa, la sella rappresentate il caso 3, con modulo elastico pari a E = 28 GPa.

Le verifiche sono di seguito riportate:

Verifiche movimentazione della piastra (tipologia A)

- SLE - Verifica delle tensioni ($\sigma_c \leq 0{,}6 * f_{ck}$; $\sigma_t \leq f_{cfm}$)

Nelle immagini seguenti sono state riportate le mappe delle tensioni nelle due direzioni principali (s1 e s2), valutate sia a livello superiore che inferiore della piastra.

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

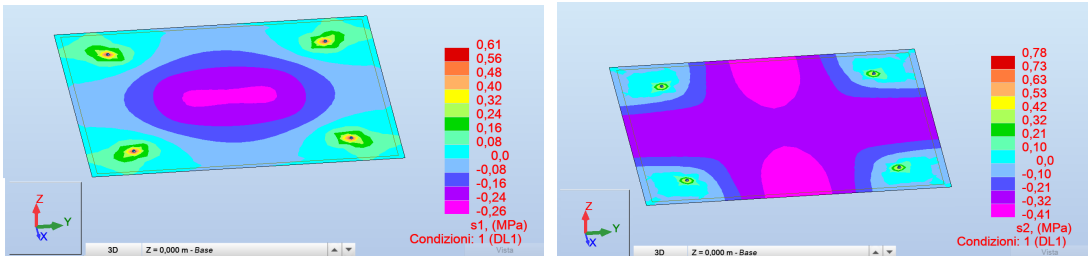


Figura 4-82: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

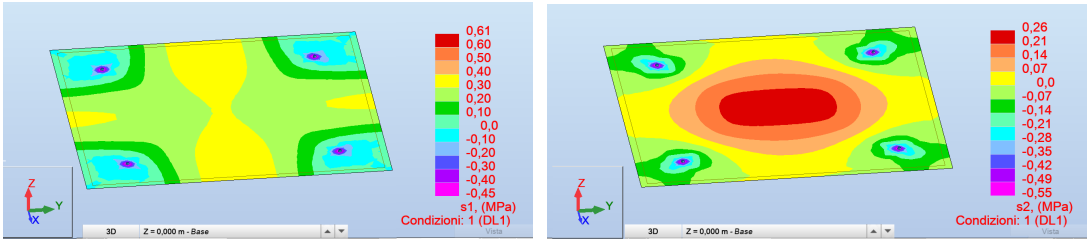


Figura 4-83: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello inferiore

Il valore della massima tensione sollecitante è:

$\sigma_c = 0{,}55$ MPa $\leq 0{,}6 * f_{ck} = 17{,}43$MPa **VERIFICATO**

$\sigma_t = 0{,}78$ MPa $\leq f_{cfm} = 3{,}06$ MPa **VERIFICATO**

- SLE – Verifica a deformabilità

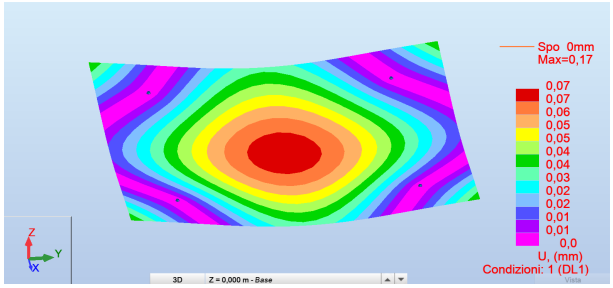


Figura 4-84: Deformazioni indotte dal peso proprio

Il massimo valore di deformazione è di 0,07 mm. La flessione dovuta al peso proprio, durante la movimentazione, risulta non dannosa per l'elemento.

Verifiche movimentazione della sella (tipologia A)

- SLE - Verifica delle tensioni ($\sigma_c \leq 0{,}6 * f_{ck}$; $\sigma_t \leq f_{cfm}$)

Nelle immagini seguenti sono state riportate le mappe delle tensioni nelle due direzioni principali (s1 e s2), valutate sia a livello superiore che inferiore della piastra di base.

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

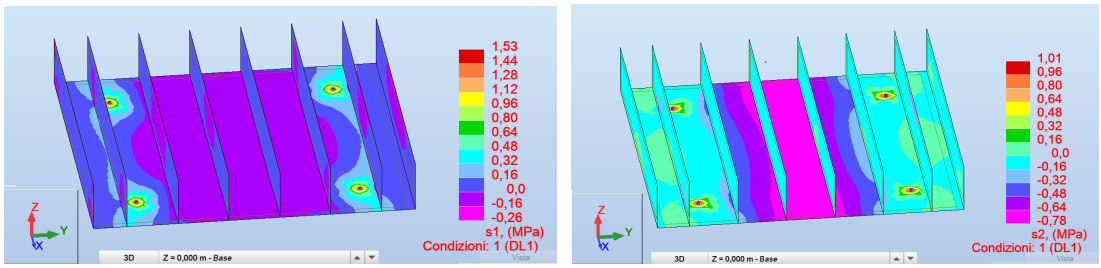


Figura 4-85: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello superiore

Tensione direzione 1 Tensione direzione 2

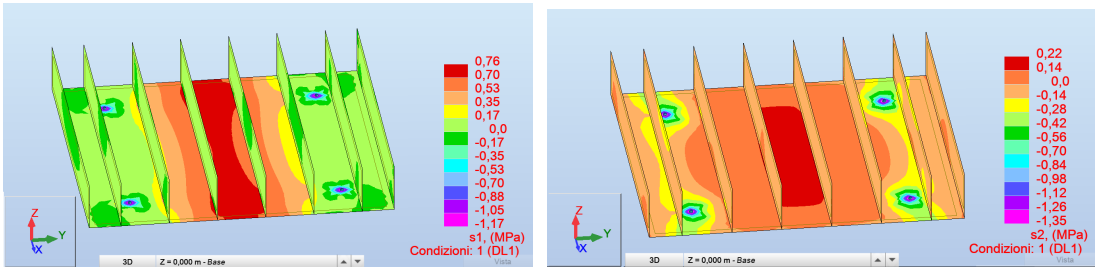


Figura 4-86: Mappa tensioni sollecitanti date dal peso proprio, livello inferiore

Il valore della massima tensione sollecitante è:

$$\sigma_c = 1{,}35 \text{ MPa} \leq 0{,}6 * f_{ck} = 9{,}96 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

$$\sigma_t = 1{,}53 \text{ MPa} \leq f_{cfm} = 2{,}11 \text{ MPa}$$ **VERIFICATO**

- SLE – Verifica a deformabilità

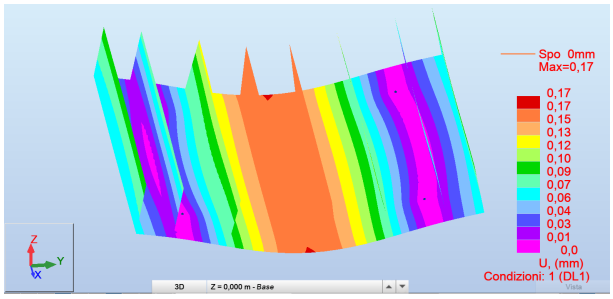


Figura 4-87: Deformazioni indotte dal peso proprio

Il massimo valore di deformazione è di 0,17 mm. La flessione dovuta al peso proprio, durante la movimentazione, risulta non dannosa per l'elemento.

Per quanto riguarda la struttura di **tipologia B**, essendo questa composta da elementi di modeste dimensioni, con un peso totale del singolo modulo di circa 50 kg, la movimentazione avviene mediante l'utilizzo di una pala caricatrice o carrelli elevatori, per cui non è prevista la verifica della movimentazione.

4.7.3 Giunti

I singoli elementi che costituiscono i moduli devono essere liberi di manifestare le proprie dilatazioni, causate dalla temperatura agente sulla pavimentazione, senza ostacolare gli altri elementi della struttura. Per il corretto funzionamento della struttura si prevede il seguente sistema di giunti:

- Giunto di isolamento: è previsto nel punto di contatto tra la piastra e il profilo sagomato a L della sella. Si prevede l'inserimento, durante la messa in opera dei moduli, di una striscia di materiale deformabile lungo tutto lo sviluppo della struttura. Questo giunto avrà il compito di assorbire la dilatazione laterale della piastra e quindi evitare il contatto tra i due elementi.
- Giunto di costruzione: in questo caso il giunto di costruzione, utile a consentire il collegamento di due moduli continui e quindi necessario per la collaborazione tra gli stessi alla presenza di un carico, coincide con il giunto di dilatazione, utile per consentire la libera dilatazione termica degli elementi.

L'ampiezza dei giunti di dilatazione ΔL può essere calcolato secondo la relazione:

$$\Delta L = \pm\alpha \cdot L \cdot \Delta T \qquad [71]$$

dove:

- L è la lunghezza della piastra fra due giunti;
- $\alpha = 10^{-5} \cdot 1/°C$ è il coefficiente di dilatazione lineare del calcestruzzo;
- $\alpha = 1{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot 1/°C$ è il coefficiente di dilatazione lineare della plastica;
- ΔT è l'escursione termica media a livello baricentrico.

Ne deriva quindi che l'ampiezza dei giunti,

- nel caso dei moduli in calcestruzzo è pari a $\boldsymbol{\Delta L = 0{,}5\ mm}$
- nel caso dei moduli in plastica è pari a $\boldsymbol{\Delta L = 4\ mm.}$

Per soddisfare questi requisiti, per la **tipologia A** i giunti di costruzione previsti sono i giunti a pettine, ottenuti mediante la contrapposizione di due elementi metallici aventi configurazione a pettine tra loro complementare. Questi due elementi, fissati ognuno alla relativa testata, garantiscono, grazie ad una idonea compenetrazione, la continuità del piano viabile in presenza delle dilatazioni/contrazioni richieste al giunto. Sono inoltre dotati di una scossalina per la raccolta delle acque piovane, la quale verrà riversata all'interno della canalina collocata all'interno della struttura.

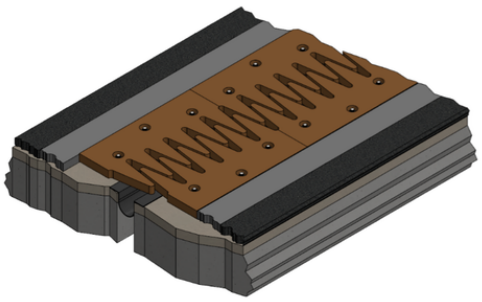


Figura 4-88: Giunto di dilatazione da adottare per la tipologia A

Per la struttura di **tipologia B**, essendo previsto l'utilizzo di una miscela composta da fresato e plastica, ed essendo il fresato meno soggetto alla dilatazione, si presume di dover gestire una dilatazione di ca. 2 mm. Al fine di soddisfare questi requisiti, e dato lo spessore degli elementi, si suppone di utilizzare un sigillante chimico che possa rispondere adeguatamente a questi valori di dilatazione.

Figura 4-89: Giunto di dilatazione da adottare per la tipologia B

4.7.4 Superficie

La superficie di una pista ciclabile deve soddisfare idonei standard di confort del ciclista, gioca quindi un ruolo fondamentale la regolarità della stessa. La pavimentazione deve garantire scorrevolezza ma al tempo stesso una buona aderenza in fase di frenatura ed in caso di pioggia bagnata.

Nel caso di realizzazione dello scenario A, per una migliore percezione del percorso ciclabile, la superficie della piastra deve essere trattata in situ con apposita resina colorata.

Nel caso di applicazione della tipologia strutturale di tipo B, si prevede di coprire i moduli prefabbricati mediante l'utilizzo di un tappeto d'usura. Anche per esso è prevista la prefabbricazione, e si prevedere di utilizzare una miscela composta da fresato e

plastica riciclata, al quale aggiungere inerti colorati per definire la corretta colorazione della pavimentazione.

Ad ogni modo, indipendentemente della struttura da utilizzare, e quindi della copertura della stessa, è necessario garantire sempre aderenza, durabilità, resistenza e stabilità della struttura, per garantire agli utilizzatori un percorso sicuro e confortevole.

Conclusione

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato il dimensionamento strutturale e funzionale di una sovrastruttura in sinergia con l'idea progettuale di ECO SMARTROAD 2.0. Il progetto prevede di creare una sovrastruttura stradale da utilizzare per la costruzione di una pista ciclabile. L'idea è stata quella di realizzare una sovrastruttura in moduli prefabbricati con l'utilizzo di miscele ecocompatibili composte da materiali di riciclo quali plastica, fresato di pavimentazioni, calcestruzzo di recupero. Oltre a questi requisiti la soluzione deve essere in grado di adattarsi ai diversi contesti nei quali va ad inserirsi. Per rispondere a queste richieste sono stati analizzati due scenari al fine di proporre diverse soluzioni strutturali. Il primo parte dall'idea di realizzare una "pista ciclabile in sede propria adiacente alla sede stradale"; per il secondo l'idea è quella di inserire la sovrastruttura in un'area separata dal traffico veicolare, realizzare quindi quella che la normativa definisce "pista ciclabile in sede propria non adiacente la sede stradale".

La sovrastruttura è stata progettata come l'unione di moduli prefabbricati composti da due elementi separati: una piastra e una sella. La piastra rappresenta la superficie percorribile ed è dimensionata in base a i carichi verticali agenti su di essa. La sella, dal punto di vista funzionale dovrà contenere i sotto servizi e fungere da raccoglitore delle acque piovane, mentre dal punto di vista strutturale ha la funzione di sostegno della piastra, mediante l'inserimento di setti e/o pilastrini, e di trasferimento dei carichi alla fondazione, mediante la piastra di base. L'idea di utilizzare dei moduli prefabbricati ed in particolare degli elementi separati che li costituiscono, nasce con il pensiero rivolto verso una facile e predittiva manutenzione della sovrastruttura e dei sottoservizi, poiché ogni modulo è dotato di sensori utili per la precoce riconoscenza dei danni, ed è ispezionabile singolarmente, ed eventualmente sostituibile.

Il fattore predominante per la differenziazione degli scenari, dal punto di vista strutturale, è stata la diversità dei carichi che agiscono sulla sovrastruttura.

Nello scenario A, data la vicinanza con la sede stradale, è necessario tenere in considerazione l'eventuale invasione di corsia da parte di autovetture, per questo il dimensionamento è stato effettuato partendo dall'idea di una struttura massiccia costituita da un materiale, quale il calcestruzzo non armato con inerti riciclati, capace di sopportare questi carichi.

La struttura dello scenario B è pensata come un insieme di elementi più esili, e di piccole dimensioni che possono essere adattati per realizzare diverse combinazioni di sezione trasversale, comunque in accordo con le prescrizioni della normativa. Grazie alla presenza di uno spartitraffico invalicabile, o comunque pensando di inserire la struttura in un'area lontana dal traffico veicolare, i carichi da considerare nella progettazione di questa tipologia strutturale, sono esclusivamente quelli dati dalla presenza dei ciclisti. La sovrastruttura può essere quindi realizzata con materiali meno

rigidi, in particolare è stata utilizzata una miscela costituita da plastica riciclata e granuli di fresato di pavimentazioni.

La sovrastruttura, sotto l'azione dei carichi agenti, è stata analizzata utilizzando il programma di calcolo Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021. I singoli componenti della sovrastruttura sono stati schematizzati come elementi bidimensionali con comportamento a piastra sottile (elemento piastra) e con comportamento a piastra supportato da un letto di molle aventi rigidezza *k* (elemento sella).

I modelli sono stati sviluppati operando in un range di rigidezza del materiale, di configurazione strutturale della sella e spessore degli elementi. Le analisi sono state effettuate incrociando ed interscambiando i dati di input in modo da definire diverse soluzioni strutturali per le due tipologie previste.

Dopo aver analizzato e interpretato i risultati ricavati dall'analisi agli elementi finiti, al fine di soddisfare i requisiti strutturali richiesti alle due tipologie, è necessario che:

- per lo scenario A, si preveda la realizzazione della piastra percorribile di spessore minimo 150 mm, utilizzando un calcestruzzo con rigidezza nell'intorno dei 32000MPa, oppure una diminuzione dello spessore, fino ad un massimo di 120 mm, utilizzando un calcestruzzo con una rigidezza maggiore. Per quanto riguarda l'elemento sella, per garantire un corretto sostegno della piastra, è necessario dotarla di pilastrini di diametro 75 mm, posti con interasse di circa 450 mm. A favore di sicurezza, possono essere sostituiti con setti del medesimo spessore, posti a uguale interasse. La rigidezza del calcestruzzo costituente la sella non influisce ai fini dimensionali, poiché si è visto che i carichi agenti vengono principalmente assorbiti dalla piastra;
- per la tipologia strutturale B, l'utilizzo di una miscela in larga parte di matrice polimerica, a cui sono associati valori di resistenza più alti rispetto ai tradizionali materiali da costruzione, permette la realizzazione della sovrastruttura con spessori degli elementi di 2-3 cm. In particolare l'analisi è stata condotta utilizzando il polietilene, con modulo di rigidezza dell'intorno di 1700-2000 MPa.

Il lavoro di tesi rappresenta un esempio di approccio multidisciplinare, all'interno del testo è stato svolto un excursus concettuale, andando ad indagare su diversi campi tematici quali Smart city e Smart Road, sostenibilità e riciclaggio, piste ciclabili con uno sguardo alla normativa vigente, dimensionamento strutturale.

Bibliografia

Armacell. n.d. *DESIGNED FOR A CLEANER TOMORROW.*

Arulrajah, Arul, Ehsan Yaghoubi, Yat Choy Wong, and Suksun Horpibulsuk. 2017. "Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: Resilient moduli and strength characteristics." *Construction and Building Materials 147.*

Asprone, Domenico, and Gaetano Manfredi. 2018. "La resilienza verso estremi come chiave della sostenibilità delle città del futuro." *Techne 15.*

Bano, Valentina. 2012. *Materiali e prodotti polimerici.*

Barba-Sànchez, Virginia, Enrique Arias-Artùnez, and Luis Orozco-Barbosa. 2019. "Smart cities as a source for entrepreneurial opportunities: Evidence for Spain." *Technological Forecasting & Social Change, n 148.*

Careless, James. 2020. "The possibilities are endless with smarter pavements ." *Asphalt magazine-Spring 2020.*

Carra, Gugliermo. 2019. "Smart city, come si evolvolo le città grazie all'economia circolare." *economyup.it.* Agosto 09.

Censis. 2018. "La sfida della plastica: una gestione intelligente per un materiale intelligente." Milano.

Ciaramella, A., S. Bellintani, L. Savio, C. Carbonaro, R. Pagani, R. Pennacchio, G. Peretti, and F. Thiebat. 2018. "Smart furniture and smart city ." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering- 21st International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering: Construction - The Formation of Living Environment* . Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) .

Civiero, Paolo. 2012. "Sistemi costruttivi industrializzati per l'edilizia residenziale: il sistema CCCabita." *Techne 04.*

Comune di Follonica. 2019. *Pista ciclabile in plastica riciclata: al via il completamento.*

Corepla. n.d. *Riciclo e recupero.* School contest.

Corinaldesi, V., and G. Moriconi. 2011. "The role of industrial by-products in self-compacting concrete." *Construction and Building Materials.*

Corinaldesi, V., and G. Moriconi. 2003. "The use of recycled aggregate from building demolition in self-compacting concrete." *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium.*

Corinaldesi, Valeria, and Giacomo Moriconi. 2014. "Il riciclaggio delle macerie da C&D per chiuedere il ciclo di vita del calcestruzzo." *inconctreto.net.* Febbraio 19.

Cossu, R., F. Garbo, F. Girotto, F. Simion, and A. Pivato. 2017. "PLASMIX management: LCA of six possible scenarios." *Waste Management 69.*

Costa, Beatrice. 2017. *Gestione rifiuti urbani tra Amsterdam e Torino.* Torino: Dipartimento di Architettura e Design corso di laurea Magistrale.

De Maeijer, Patricia Kara, Geert Luyckx, Cedric Vuye, Eli Voet, Wim Van Den Bergh, Steve Vanlanduit, Johan Braspenninckx, Nele Stevend, and Jurgen De Wolf. 2019. "Fiber Optics Sensors in Asphalt Pavement: State-of-the-Art Review ." *Infrastructures 2019, 4, 36* .

Dhir, R.K., N.A. Henderson, and M.C. Limbachiya. 1998. "Use of recycled concrete aggregate." *Thomas Telford Publishing.*

Di Lauro, A., S. Sicher, D. Grimaldi, M. Varaglioti, A. Fabbri, C. Sacco, and P. Cirquetti. 2017. "Linee guida sui rifiuti speciali-Costruzione e Demolizione." *Implementation and enforcement of the environmental Acquis focussed on industrial waste management.*

D'Angelo, John. 2020. "Pavement cracking – what binder properties control ." *Asphalt magazine-Spring 2020.*

Domenichini, L., P. Di Mascio, P. Giannattasio, C. Caliendo, B. Festa, A. Marchionna, P. Firmi, E. Molinaro, and G. Paoloni. 1995. "Modello di Catalogo delle Pavimentazioni Stradali." *CNR.*

Facciolla, Erika. n.d. "Esempi di città sostenibili e smart city." *nelcuoredelpaese.it.*

Galderisi, Adriana. 2011. "Mobilità Urbana Sostenibile: strategie in attoenuovesfide perlecittàeuropee." *TeMa 02.11.*

Hassan, A., H. Ganjidoust, and A. Abedin Maghanaki. 2005. "Use of Plastic Waste (Polyethylene Terephthalate) in Asphalt Concrete Mixture as Aggregate Replacement." *J. Waste Management and Research v.23.*

He, Yuan, Ivan Stojmenovic, Yunhuai Liu, and Yu Gu. 2014. "Smart City." *International Journal of Distributed Sensor Networks.*

Hennelly, Patrick, Christina Öberg, and Gary Graham. 2015. "Managing in smart cities. A network approach." *IMP Journal.*

Hoult, Neil, Peter J. Bennet, Ivan Stoianov, Paul Fidler, Cedo Maksimovic, Campbell Middleton, Nigel Graham, and Kenichi Soga. 2009. "Wireless sensor networks: creating 'smart infrastructure'." *civil engineering 162* .

Huang, Y. 2004. "Pavement Analysis and Design." *Pearson Prentice Hall.*

Kankaala, Kari, Maarit Vehiläinen, Pellervo Matilainen, and Pauli Välimäki. 2018. "Smart city actions to support sustainable city development." *TECHNE Special Issue 01.*

Kasai, Y. 1988. "Demolition and reuse of concrete and masonry. Reuse of demolition waste." *Chapman and Hall.*

Kummitha, Rama Krishna Reddy. 2019. "Smart cities and entrepreneurship: An agenda for future research ." *Technological Forecasting & Social Change, n 149 .*

Laufs, Julian, Hervé Borrion, and Ben Bradford. 2020. "Security and the smart city: A systematic review." *Sustainable Cities and Society,n 55.*

Loma, Michal, and Ondrej Pribyl. 2020. "Smart city model based on systems theory." *International Journal of Information Management.*

Loo, W. Van. 1998. "Closing the concrete loop – from reuse to recycling." *Use of recycled concrete aggregate.*

Loprencipe, G., and D. Drago. 2006. "Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali." *Convegno Nazionale Stradale-Comitato Tecnico C 4.3 Pavimentazioni stradali.* Napoli.

Lynch, Jerome P., and Kenneth J. Loh. 2006. "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring." *The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 2, .*

Manosalvas-Paredes, Mario, Lajnef Nizar, Karim Chatti, Kenji Aono, Juliette Blanc, Nick Thom, Gordon Airey, and Davide Lo Presti. 2019. "Data Compression Approach for Long-Term Monitoring of Pavement Structures ." *Infrastructures 2020, 5, 1 .*

Manosalvas-Paredes, Mario, Ronald Roberts, Maria Barriera, and Konstantinos Mantolovas. 2019. "Towards More Sustainable Pavement Management Practices Using Embedded Sensor Technologies ." *Infrastructures 2020, 5, 4 .*

Marzouk, Mohamed, and Ahmed Othman. 2020. "Planning utility infrastructure requirements for smart cities using the T integration between BIM and GIS." *Sustainable Cities and Society, n57.*

Mazzeo, Giuseppe, and Cristina Calenda. 2011. "Linee d'azione per una mobilità sostenibile." *TeMA 02.11.*

Morimoto, Risako. 2013. "A socio-economic analysis of Smart Infrastructure sensor technology ." *Transportation Research Part C, Vol.31.*

Muromachi, Y., and T. Vincent. 2008. " Transport durable dans les mégalopoles Sustainable transport in mega-cities." *Routes-Roads.*

Papa, Enrica, Gerardo Carpentieri, and Stefano Santarpia. 2011. "Un progetto di mobilità sostenibile: la LungoSolofrana ." *TeMA Lab 02.11 Vol 4 - No 2 .*

Pepe, Francesco. 2019. "LA CHIUSURA DEL CERCHIO: PIROLISI PER LA PRODUZIONE DI IDROCARBURI." *Giornata della ricerca-promossa da Corepla.* Pisa.

2016. "Rapporto dell'International Solid Waste Association."

Ratti, Carlo. n.d. "Senseable Genova."

Regione autonoma della Sardegna. 2018. "Linee guida, indirizzi tecnici e buone pratiche."

Rotilio, Marianna, Annalisa Taballione, and Pierluigi De Berardinis. 2016. "La Ciclovia dell'alta valle dell'Aterno: tra eco turismo e mobilità sostenibile." *TECHNE 11* .

Santagata, Felice. n.d. *Teoria e tecnica delle costruzioni stradali* . Pearson.

Scanu, Antonio. 2019. "Valutazione sperimentale dell'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato mediante sistemi modello ."

Soga, Kenichi, and Jennifer Schooling. 2016. "Infrastructure sensing ." *Interface Focus, vol 6.*

Srivastava, Parul, and Ali Mostafavi. 2018. "Challenges and Opportunities of Crowdsourcing and Participatory Planning in Developing Infrastructure Systems of Smart Cities." *Infrastructures 2018, 3, 51.*

Stelluti Scala, Eleonora, Edoardo Soliveri, and Letizia Testa. 2020. "Smart City Platform: il futuro sostenibile delle città." *culturedigitali.org.* Maggio 31.

Sun, Lijun, Hongduo Zhao, Huizhao Tu, and Yu Tian. 2018. "The Smart Road: Practice and Concept ." *Engineering, vol. 4* .

U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration. 2013. "Smart Pavement Monitoring System ."

Ungureanu, Dragos, Nicole Taranu, Didi Hoha, Stefan Zghibarcea, and Dorina Nicolina. 2020. "Accelerated testing of a recycled road structure made with reclaimed asphalt pavement material ." *Construction and Building Materials 262* .

Vagan, Terziyan, Olena Kaykova, and Dmytro Zhovtobryukh. 2010. "UbiRoad: Semantic Middleware for Context-Aware Smart Road Environments Terziyan, Vagan ; Kaykova, Olena ; Zhovtobryukh, Dmytro." *2010 Fifth International Conference on Internet and Web Applications and Services.*

Vattano, Starlight. 2013. "Esperienze Europee e Italiane Smart Cities: un modello per la pianificazione smart del costruito." *TECHNE 05* .

Venturini, Loretta. 2017. "Il fresato: materiale ecosostenibile per miscele bituminose – prima parte ." *Strade & Autostrade.*

Venturini, Loretta. 2019. "Innovazione tecnologica per pavimentazioni stradali prestazionali ." *Strade & Autostrade.*

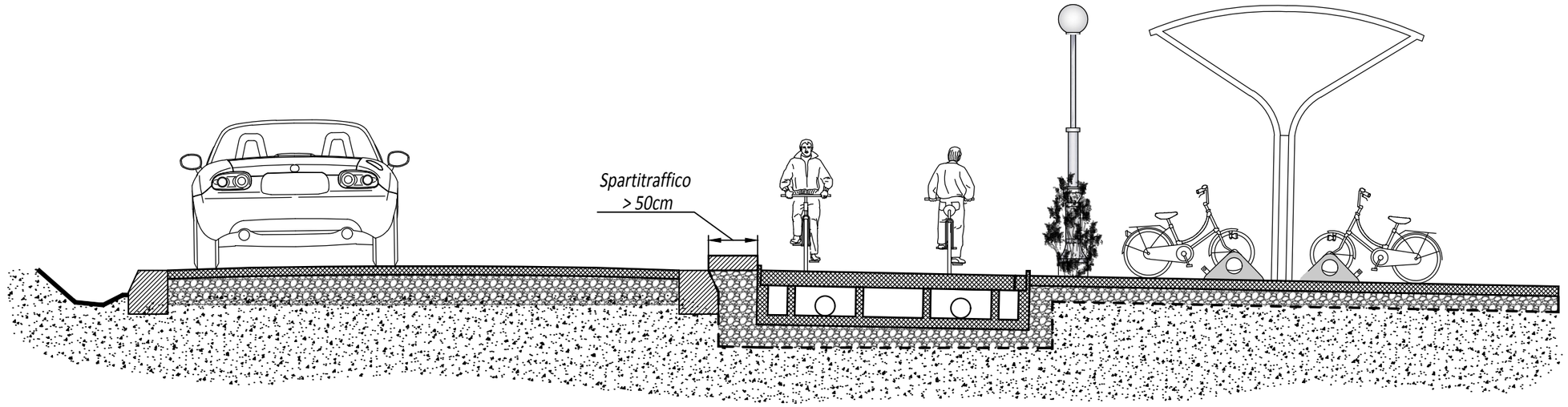
Vettori, Maria Pilar. 2016. "Cycling city project: strategie e tecnologie delle infrastrutture per la mobilità sostenibile. Il caso di Copenhagen ." *TECHNE 11* .

VolkerWessels. 2018. https://www.volkerwessels.com/en/projects/plasticroad.

Wang, Yangyang, Zhen Leng, Xi Li, and Chichun Hu. 2018. "Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance." *Journal of Cleaner Production 171.*

Yang, Shuo. 2014. *Health monitoring of pavement systems using smart sensing technologies.* Iowa State University .

Zoorob, SE, and LB Suparma. 2000. "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt)." *Cem Concr Compos.*

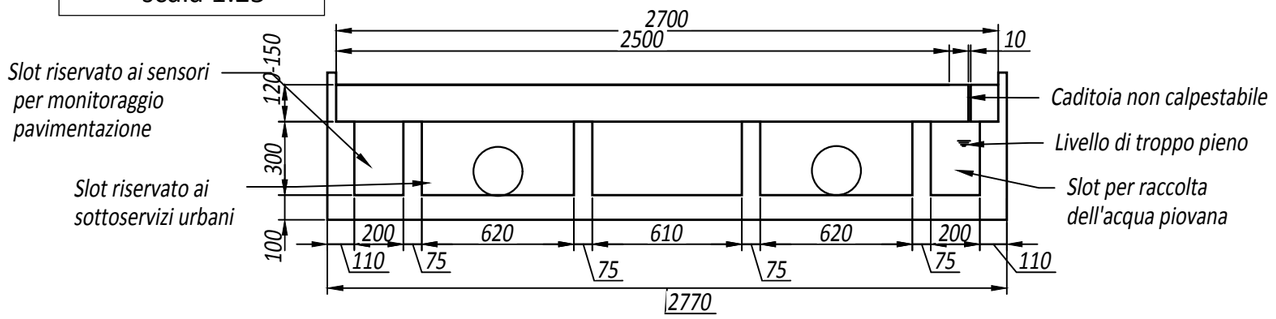


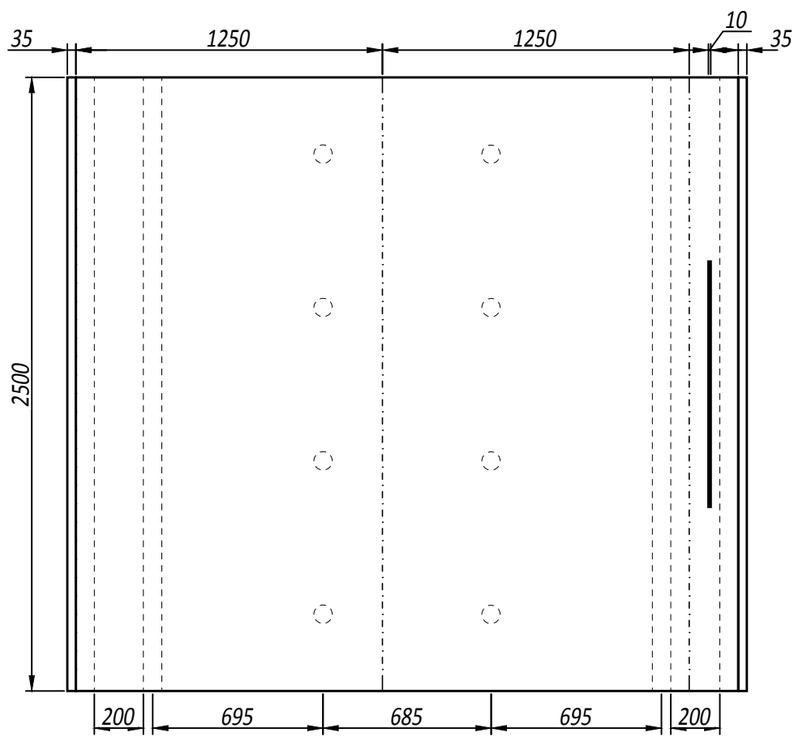
Strada veicolare locale
L. 5,50 m.

Ciclabile a due corsie
p = 2% - L. 2,50 m.

Area parcheggio biciclette

Sezione trasversale
scala 1:25

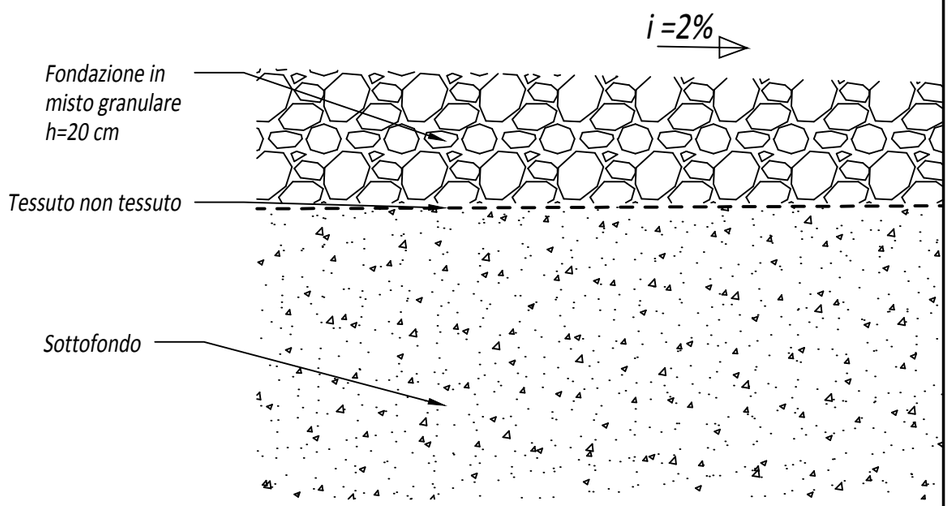




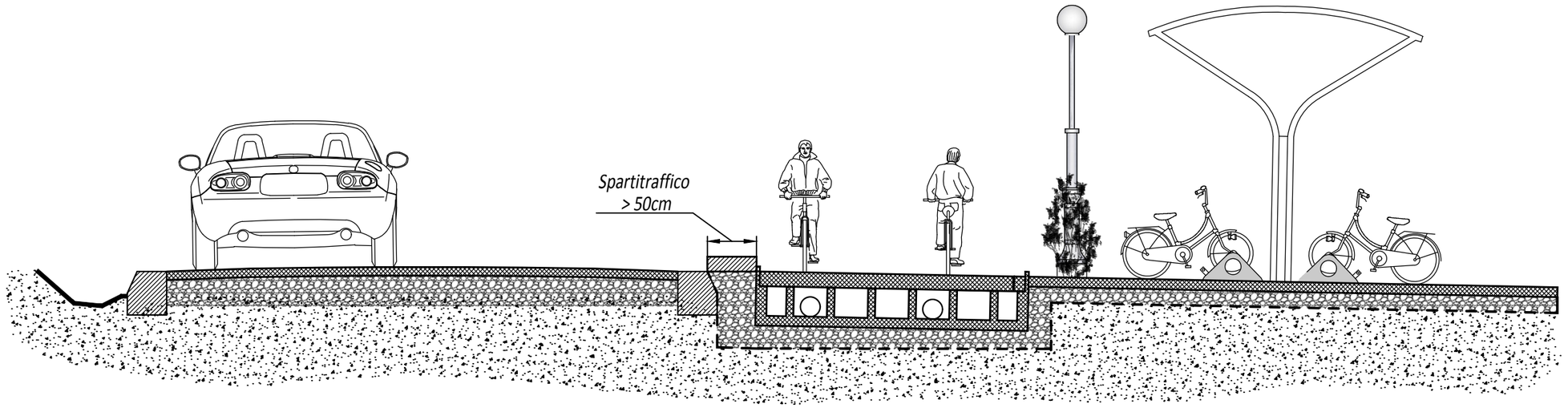
Striscia di delimitazione corsia

Vista dall'alto
scala 1:25

Dettaglio fondazione
scala 1:10



Titolo della Tesi SOVRASTRUTTURE PREFABBRICATE ED ECOCOMPATIBILI PER PISTE CICLABILI	Scala VARIA
	Descrizione TIPOLOGIA A_CASO 1
Candidata GABALLO FRANCESCA	Nome Tavola ALLEGATO 01

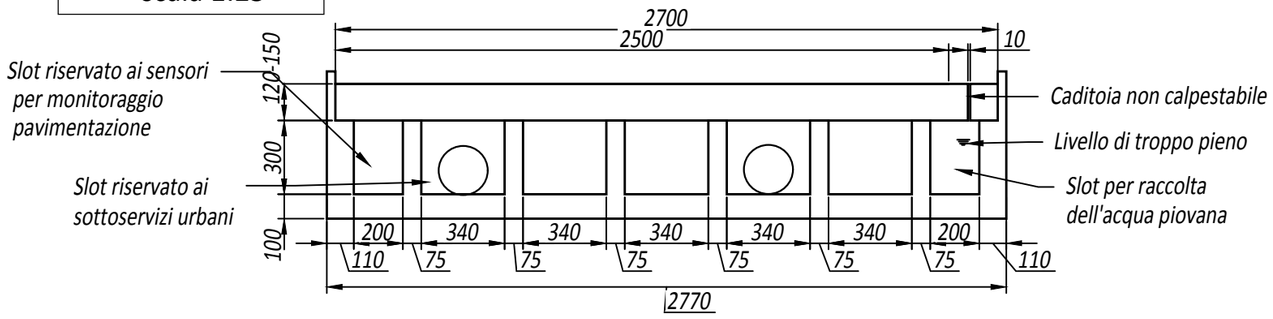


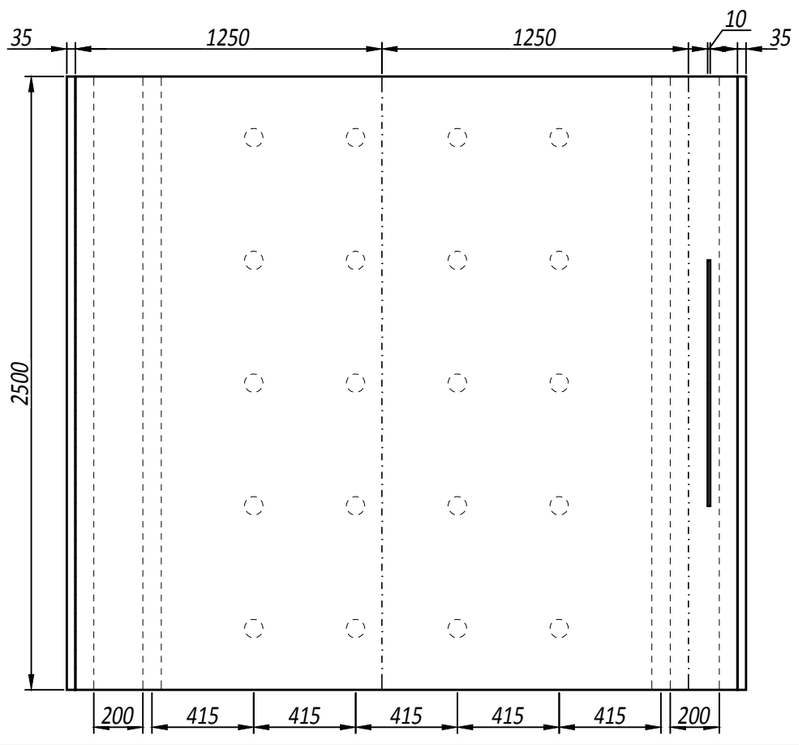
Strada veicolare locale
L. 5,50 m.

Ciclabile a due corsie
p = 2% - L. 2,50 m.

Area parcheggio biciclette

Sezione trasversale
scala 1:25

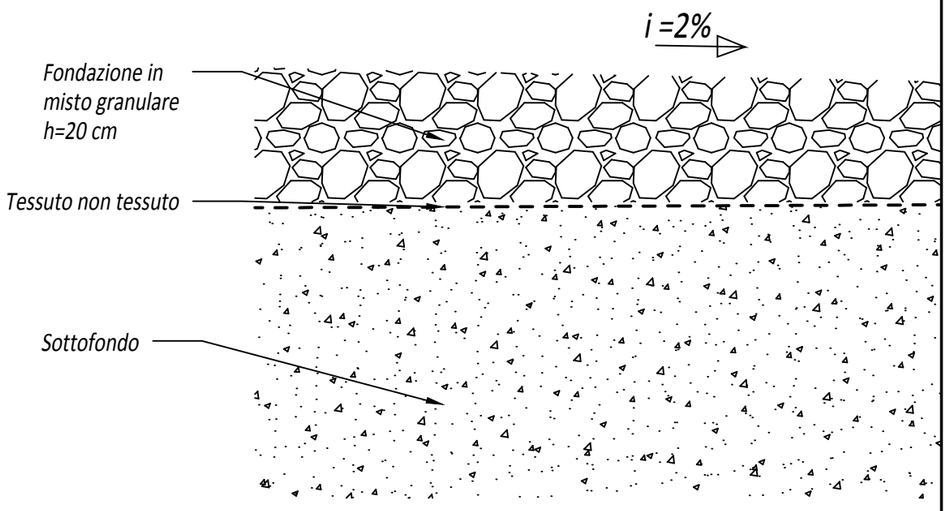




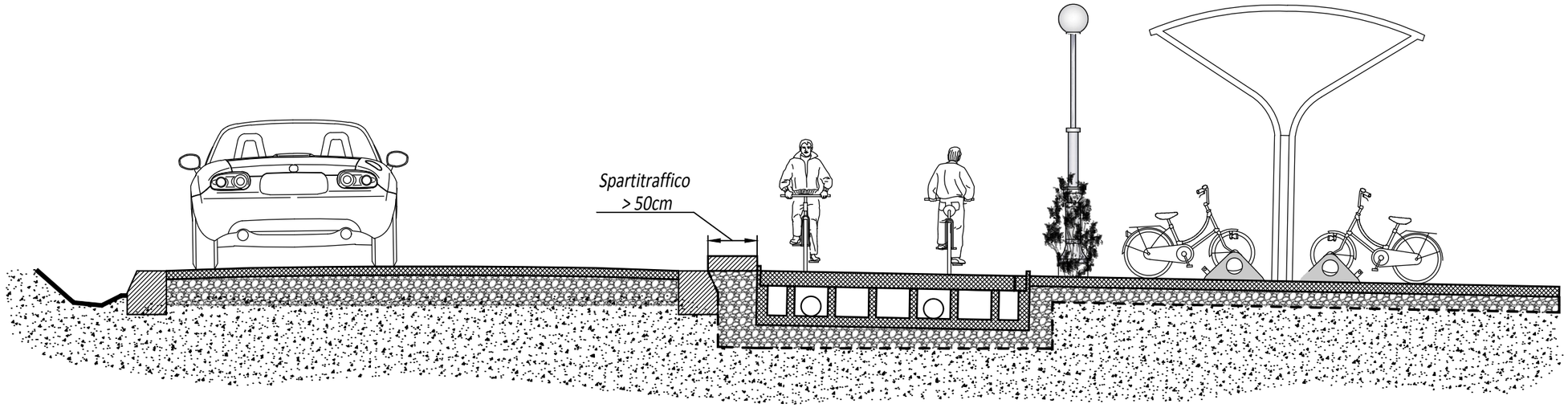
Striscia di delimitazione corsia

Vista dall'alto
scala 1:25

Dettaglio fondazione
scala 1:10



Titolo della Tesi SOVRASTRUTTURE PREFABBRICATE ED ECOCOMPATIBILI PER PISTE CICLABILI	Scala VARIA
	Descrizione TIPOLOGIA A_CASO 2
Candidata GABALLO FRANCESCA	Nome Tavola ALLEGATO 02

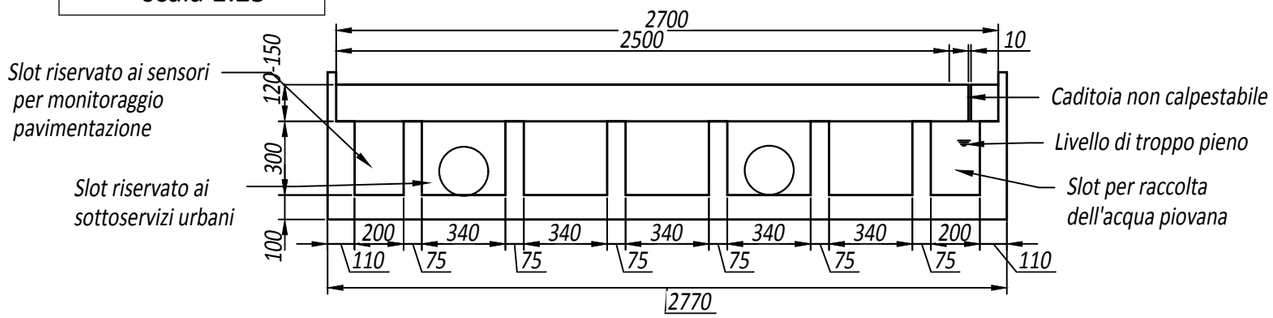


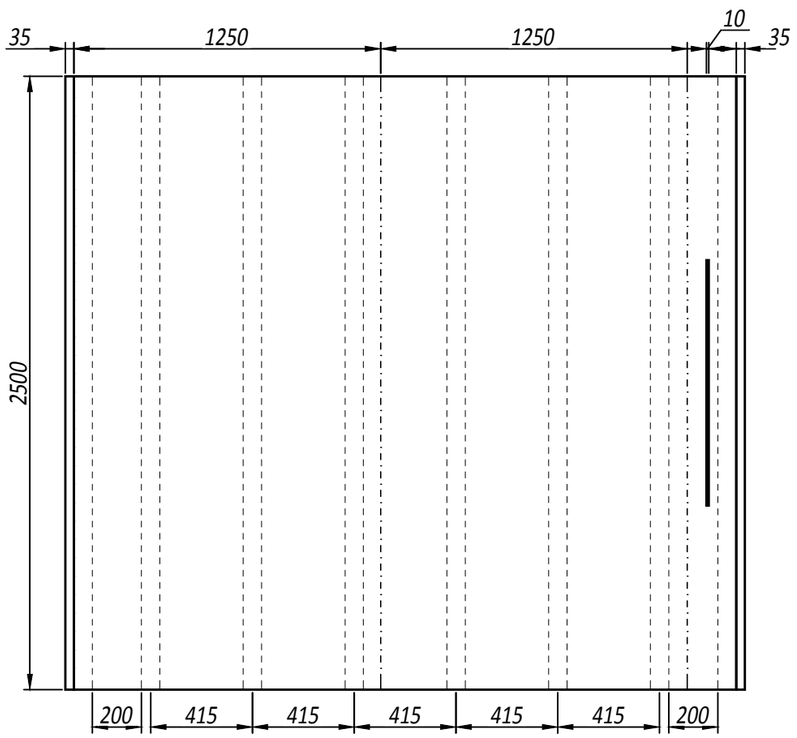
Strada veicolare locale
L. 5,50 m.

Ciclabile a due corsie
p = 2% - L. 2,50 m.

Area parcheggio biciclette

Sezione trasversale
scala 1:25

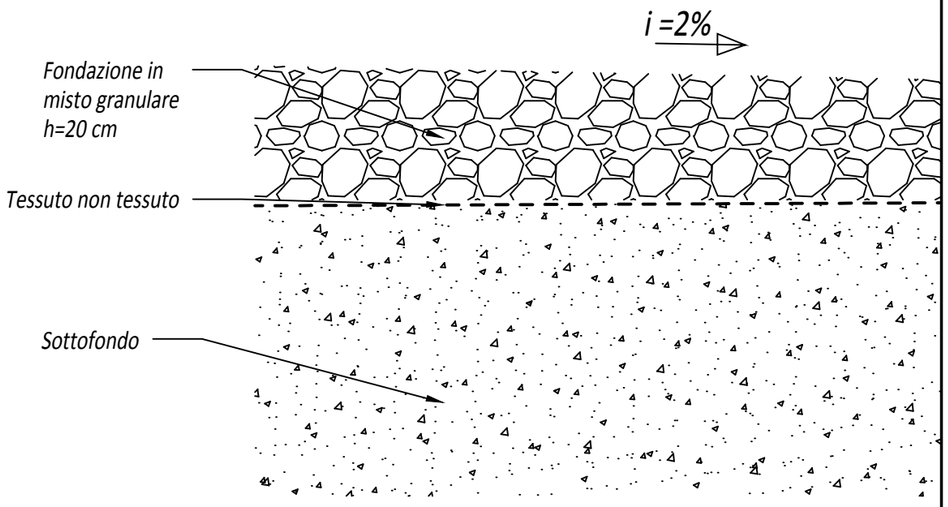




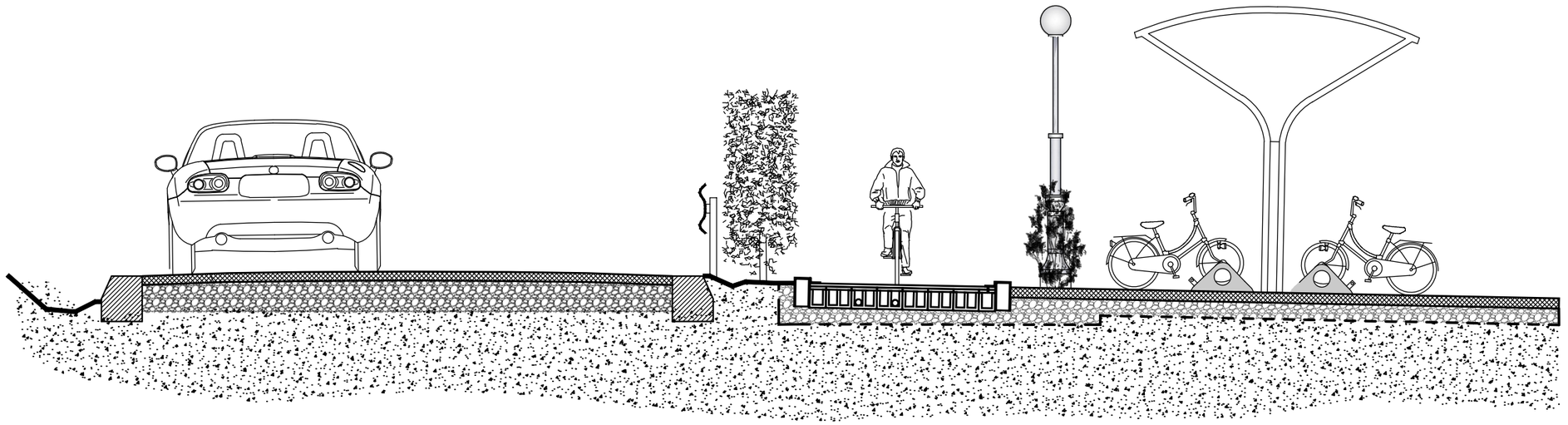
Striscia di delimitazione corsia

Vista dall'alto
scala 1:25

Dettaglio fondazione
scala 1:10



Titolo della Tesi SOVRASTRUTTURE PREFABBRICATE ED ECOCOMPATIBILI PER PISTE CICLABILI	Scala VARIA
	Descrizione TIPOLOGIA A_CASO 3
Candidata GABALLO FRANCESCA	Nome Tavola ALLEGATO 03



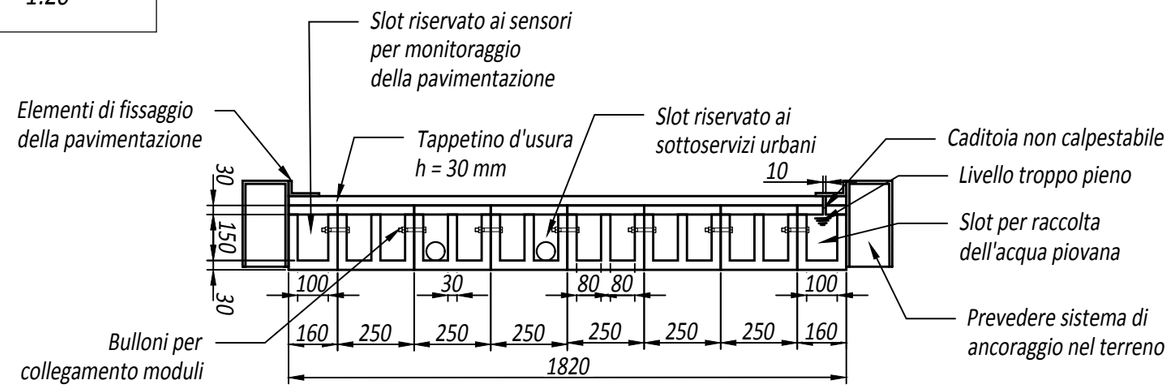
Strada veicolare locale
L. 5,50 m.

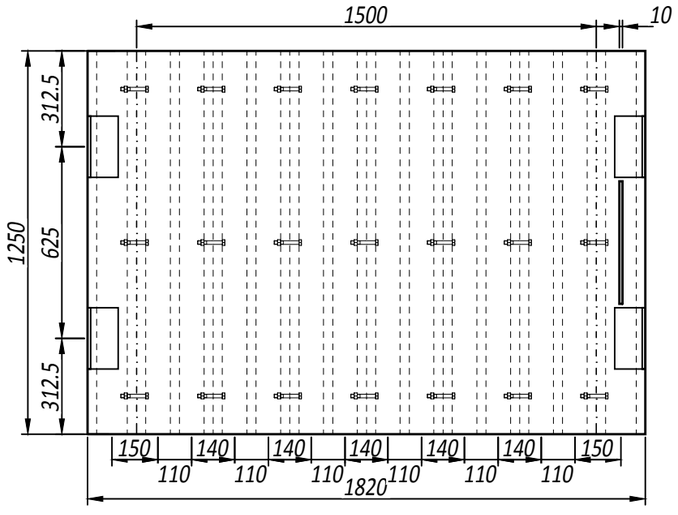
Barriera
invalicabile

Ciclabile a una corsia
p = 2% - L. 1,50 m.

Area parcheggio biciclette

Sezione trasversale
1:20

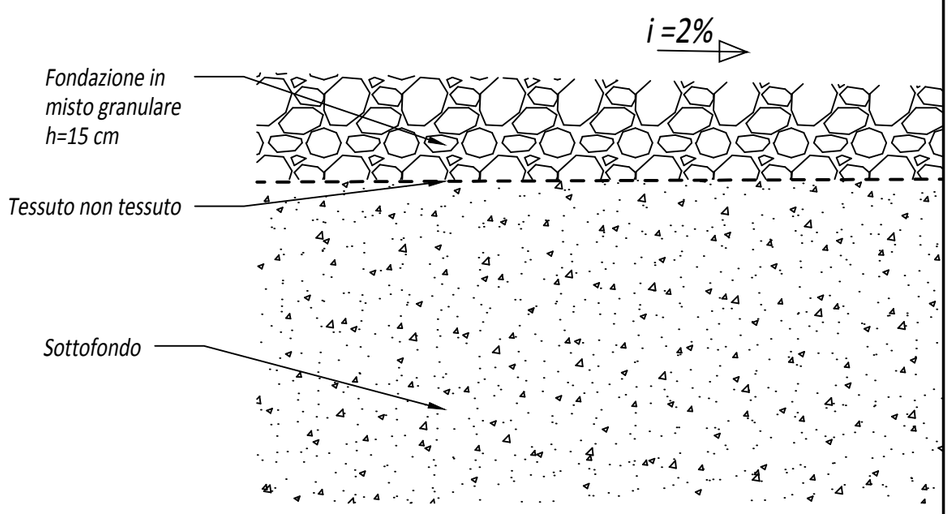




Striscia di delimitazione corsia

Vista dall'alto
1:20

Dettaglio fondazione
scala 1:10



Titolo della Tesi SOVRASTRUTTURE PREFABBRICATE ED ECOCOMPATIBILI PER PISTE CICLABILI	Scala VARIA
	Descrizione TIPOLOGIA B
Candidata GABALLO FRANCESCA	Nome Tavola ALLEGATO 04