

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Edile - Architettura

Corso di laurea magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



# Abstract

---

Autostrade sostenibili: applicazione all'interconnessione autostradale del sistema  
Pedemontano con il raccordo autostradale diretto Brescia-Milano (IPB)

**Relatore:** Prof. Enrico DE ANGELIS

**Tesi di laurea di:**

Ermanno SERRA

Matr. 750325

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

## Sommario

Abstract.....	4
English abstract .....	5
1. IL PROGETTO IPB .....	6
2. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA .....	10
2.1. CONFORMITÀ AL PTCP E PTRP .....	10
2.2. I PARCHI.....	11
2.3. LE CAVE .....	13
2.4. RIFERIMENTI PROGETTUALI: GALLERIE VERDI ARTIFICIALI .....	14
2.5. RETI CICLABILI .....	16
3. INTEGRAZIONE AMBIENTALE.....	18
3.1. ASSETTO INFRASTRUTTURALE.....	18
3.2. ASSETTO ECONOMICO-PRODUTTIVO DELL'AREA.....	20
3.3. CARATTERI DEMOGRAFICI E INSEDIATIVI .....	25
3.4. DOTAZIONI TECNOLOGICHE E UTILIZZO DI FONTI RINNOVABILI.....	31
4. IL PROGETTO "STRADA VERDE" .....	34
4.1. PROGETTO DI UN PONTE CICLO-PEDONALE.....	38
4.1.1. Scelte progettuali e conformità alle normative tecniche.....	39
4.1.2. Soluzioni tecnologiche.....	41
4.1.3. Dimensionamento della struttura in legno lamellare .....	43
4.1.4. Durabilità e protezione del legno .....	96
4.1.5. Barriere protettive laterali.....	100
4.1.6. Deflusso e accumulo delle acque piovane .....	102
4.2. PROGETTO DI UN COMPONENTE EDILIZIO PER L'ACCUMULO IDRICO .....	104
4.2.1. Caratterizzazione meccanica del calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio .....	105
4.2.2. Dimensionamento dell'altezza della sezione .....	111
4.2.3. Caratterizzazione tecnologica.....	114
4.2.4. Verifiche di resistenza al fuoco e classe di reazione al fuoco.....	116
4.2.5. Durabilità .....	121
4.3. BARRIERE ACUSTICHE CON FOTOVOLTAICO INTEGRATO .....	141
4.3.1. Verifica dell'attenuazione del livello acustico.....	144
4.3.2. Verifiche strutturali.....	147
4.4. PANNELLI FOTOVOLTAICI.....	158

4.5.	RETE DI TELERISCALDAMENTO E CENTRALE DI COGENERAZIONE .....	163
4.6.	ILLUMINAZIONE.....	176
4.7.	ASFALTO FOTO CATALITICO.....	177
4.8.	IMPIANTO MINI-EOLICO.....	178
4.9.	TECNOLOGIE PER LA SICUREZZA.....	179
4.10.	EPOS – SISTEMA DI RICARICA PER AUTO ELETTRICHE .....	181
4.11.	SITRAFFIC CONCERT-SISTEMA PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO .....	182
5.	CONCLUSIONI .....	188
	Bibliografia.....	191
	Indice delle figure.....	193
	Indice dei grafici.....	196
	Indice delle tabelle .....	197
	Indice delle Tavole.....	200

## Abstract

Questo lavoro nasce dalla mia esperienza di tirocinio presso l'azienda di costruzioni Vitali Spa. Il progetto affidatomi aveva lo scopo di elevare il livello prestazionale e rendere così più sostenibile il sistema autostradale lombardo, applicando ad una infrastruttura reale in corso di progettazione il concept KM0 Road per un'infrastruttura energeticamente sostenibile, di cui Vitali Spa è Project leader. Il concept si prefiggeva di creare un sistema modulare attrezzato con i componenti necessari a sfruttare ogni tipologia di input energetico disponibile fino a diventare un organismo con un metabolismo proprio capace di dialogare con il contesto ambientale e trarne vantaggi in termini di efficienza energetica, sicurezza e gestione economica. La scelta dell'infrastruttura è ricaduta sulla Interconnessione Autostradale tra la BreBeMi e la Pedemontana (IPB), in quanto trattasi di un tratto stradale molto breve e in fase di progettazione definitiva, caratteristiche che lo rendono adatto a prestarsi come laboratorio sperimentale per l'applicazione delle tecnologie per la produzione di energia e delle misure necessarie per ridurre l'impatto ambientale e paesaggistico. Nei primi tre capitoli si descrivono le caratteristiche dell'IPB e si effettua una analisi conoscitiva del territorio da essa attraversato, dal punto di vista urbanistico/paesaggistico e socio-economico; il quarto capitolo rappresenta il fulcro della trattazione e in esso si sviluppa la fase di progettualità delle principali soluzioni tecniche individuate tra le diverse proposte avanzate nelle riunioni preliminari: produzione di energia elettrica fotovoltaica, utilizzo di asfalto foto catalitico, rete di teleriscaldamento, impianto mini eolico con generatori ad asse verticale, barriere acustiche integrate, illuminazione di sicurezza tramite led stripes, oltre a misure per la mitigazione ambientale e l'inserimento territoriale quali un ponte ciclopedonale e la sua ottimizzazione prestazionale-funzionale al fine di una maggiore sostenibilità nelle diverse fasi della sua vita utile. Si conclude con un bilancio economico e quindi la valutazione della convenienza a realizzare o meno le opere studiate.

## English abstract

*This work stems from my internship experience at the construction company Vitali Spa (April-July 2011). The project aimed to raise the performance level of the northern highway infrastructure system and thus make that system more sustainable by applying the concept called KMO Road (designed by Giulio Ceppi and Total Tool) to a real highway during the design stage. It is a concept for a sustainable energy road for which Vitali is the project leader. The concept was intended to create a modular system equipped with the components necessary to exploit any type of available energy input, to become an organism with a metabolism that can interact with their environment and gain advantages in terms of energy efficiency, security and economic management. The motorway interconnection between Pedemontana and BreBeMi (IPB) has been chosen, since this is a very short road section and in course of final design. These characteristics make the site suitable to serve as an experimental laboratory for the application of technologies intended to maximize energy production and introduce such measures as are necessary to reduce the environmental and landscape impact. In the first three chapters are described the features of IPB and a cognitive analysis is developed of the territory crossed by the road, in terms of town planning, landscape and social-economic aspects. The fourth chapter is the focus of discussion and it develops the design phase of the main technical solutions which have been identified for the various proposals made in the preliminary meetings: the production of photovoltaic energy, use of photo catalytic asphalt, district heating, mini-wind energy plants with vertical axis turbines, integrated sound barriers, security lighting using LEDs stripes, along with such measures for environmental mitigation as a cycle and pedestrian bridge and its performance and functional optimization in order to greater sustainability in the various phases of its life cycle. This study concludes with a balance between benefits and costs of realization in order to evaluate the suitability of the entire project.*

## 1. IL PROGETTO IPB

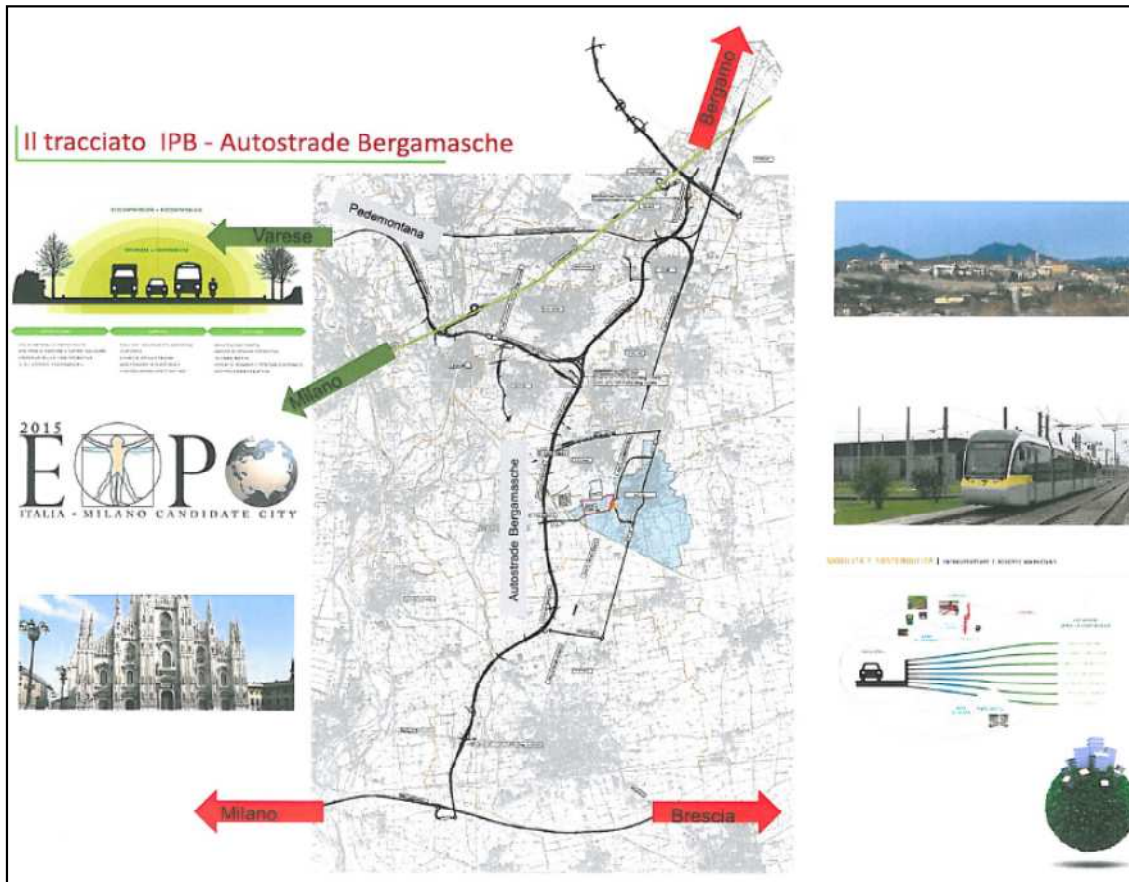


Figura 1.1: Collocazione strategica dell'IPB [Vitali spa]

L'interconnessione autostradale in oggetto di progettazione si sviluppa per una lunghezza di circa 17 km nel tratto di territorio della provincia di Bergamo compreso tra i fiumi Adda e Serio, con direzione nord-sud. Si trova in una posizione strategica di collegamento tra le maggiori città Lombarde come Milano, Bergamo, Brescia e Varese.

Permette il collegamento tra le tre principali vie di comunicazione lombarde, l'autostrada A4, la nuova Pedemontana e il Raccordo autostradale diretto Brescia-Milano (Bre.Be.Mi) nonché la decongestione del traffico, garantendo al sistema autostradale lombardo un maggiore livello di qualità e funzionalità.

La società, che ha per oggetto sociale principale la promozione, la progettazione, la costruzione e la gestione dell'Interconnessione autostradale del Sistema Viabilistico Pedemontano con il Raccordo autostradale Diretto Brescia-Milano o tratte di essa, di eventuali prolungamenti e diramazioni della stessa e di altre autostrade, o tratti di esse, contigue, complementari o comunque tra loro connesse, è costituita dai seguenti soci:

- Autostrade Lombarde SpA
- Provincia di Bergamo
- A.B.M. Azienda Bergamasca Multiservizi SpA
- Cassa Rurale Banco di Credito Cooperativo di Treviglio
- Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura di Bergamo
- UBI BANCA
- Credito Bergamasco SpA
- Banca Infrastrutture Innovazione e Sviluppo SpA
- Comune di Osio Sotto
- Comune di Pontirolo Nuovo
- Comune di Treviglio
- ANCE Bergamo - Associazione Costruttori Edili
- Consorzio Stabile Eureka
- Impresa Pizzarotti & C Spa
- Comune di Dalmine
- Consorzio GOL Società consortile a r.l.

Sono direttamente interessati dall'attraversamento della strada nel territorio di propria competenza i comuni di Treviglio (28836 abitanti), Fara Gera d'Adda (7487), Pontirolo Nuovo (4895), Arcene (4735), Ciserano (5700), Boltiere (5624), Brembate (8179), Verdellino (7790), Osio Sotto (11900), Osio Sopra (5070), Levate (3688), Dalmine (23132) e Stezzano (11864) per un totale di tredici comuni e 123.900 abitanti.

Il sistema di esazione configurato sarà di tipo aperto con unica barriera bidirezionale (situata in comune di Fara Gera d'Adda) posta ad ovest di Treviglio. Sono previsti lungo il tracciato 6 svincoli di collegamento alla viabilità esistente ed ai nuovi interventi programmati dagli Enti Locali:

- Svincolo n. 1: collegamento nuova variante alle ex SS.SS 42 - 525 in comune di Osio Sotto a sud est del centro abitato;
- Svincolo n. 2: collegamento strada comunale Corso Europa in comune di Boltiere;
- Svincolo n. 3: collegamento alla SP n. 122 in comune di Ciserano;
- Svincolo n. 4: collegamento alla SP n. 144 e alla SP n. 142 in comune di Pontirolo Nuovo;
- Svincolo n. 5: collegamento alla ex SS 42 in località Castel Cerreto in comune di Treviglio;
- Svincolo n. 6: collegamento alla ex SS n. 11 in comune di Treviglio ed al casello di Treviglio del raccordo Brescia Milano.

E' prevista inoltre la realizzazione di un' area di servizio nel comune di Treviglio. Il tracciato, di circa 13 km, si sviluppa per circa 8,9 km in trincea, per circa 3 km in rilevato; sono previste inoltre due galleria artificiali

la cui lunghezza complessiva è di 890 metri, un manufatto di sottopasso della linea ferroviaria Milano Treviglio (85 m) ed un viadotto di 75 m. E' previsto inoltre un tratto di opera connessa con la tangenziale sud di Bergamo.

La **piattaforma stradale** è di categoria A per ambito extraurbano come da D.M. Infrastrutture e Trasporti 5.11.2001, con larghezza totale di 25 m, formata da due carreggiate a doppia corsia di 3,75 m, banchina pavimentata di 3,00 m e spartitraffico centrale di 4,00 m, di cui 2,60 m necessari per le barriere di protezione.

Le **barriere di sicurezza** saranno di tipo omologato secondo le norme vigenti e con classi di severità che si adattano ad ogni situazione particolare; le cuspidi in corrispondenza di diramazioni verranno realizzate con opportune vie di fuga con materiale idoneo; ogni punto iniziale di impianto verrà completato con dispositivi di attenuazione d'urto all'avanguardia.

La **segnaletica verticale** sarà realizzata secondo i concetti più avanzati di leggibilità in ogni condizione meteo e di opportuno preavviso all'utenza; le pellicole ad altissima rifrangenza ed anticondensa e saranno compatibili con l'uso nei periodi di forte inversione termica. I portali segnaletici, dotati di retroilluminazione, saranno in grado di aumentare la leggibilità delle indicazioni in qualunque condizione di visibilità.

La **componente telematica** riveste un ruolo fondamentale nel bilancio delle tecnologie implementate nell'infrastruttura.

Saranno posate dorsali in **fibra ottica** su entrambe le carreggiate, consentendo l'illimitata disponibilità di banda, nonché la completa protezione dei circuiti digitali di trasmissione dati. Gli apparati per telecomunicazioni saranno conformi agli standard più avanzati disponibili. L'allestimento di una rete di telecomunicazioni, che collegherà tutte le componenti e infrastrutture del sistema autostradale (stazioni, aree di servizio e di parcheggio, strutture di assistenza e d'informazione, sedi operative, rete autostradale), consentirà poi ai sistemi informativi di rendere disponibili tutti i servizi di gestione e controllo.

Il **sistema di raccolta e gestione dei dati** provenienti dal campo e la successiva informazione all'utenza saranno coordinati da un unico centro operativo. Il sistema informativo permetterà di:

- Controllare lo stato generale degli eventi attivi tramite una rappresentazione grafica dei tratti autostradali aggiornata dinamicamente con i fenomeni più importanti;
- Inserire o modificare qualsiasi evento o informazione verso l'utenza determinando il tipo di periferica (cartelli a messaggio variabile, televideo, ecc.) dove deve essere inviata la notizia;
- Creare e inviare messaggi "speciali" sui cartelli a messaggio variabile ogni qualvolta si presentino avvenimenti eccezionali o eventi non previsti;



- Individuare automaticamente, in funzione degli eventi presenti sulla rete , su quali cartelli a messaggio variabile diffondere l' informazione e con quale messaggistica;
- Diffondere misurazioni meteo (nebbia, pioggia, gelo, temperatura, ecc.)

L' **esazione dei pedaggi** sarà completamente automatizzata, con gestione a distanza delle anomalie di transito, del corretto funzionamento degli impianti di esazione e tecnologici delle stazioni e della eventuale telesorveglianza delle aree e dei fabbricati.

### **Piano economico e finanziario**

Il piano economico finanziario illustrato è stato redatto nell'ambito della procedura prevista dal Regolamento Regionale 08.07.02 n°4. È stata identificata una soluzione tecnico-finanziaria per mantenere l'equilibrio economico e finanziario del progetto in assenza di contributo pubblico e garantendo un'adeguata remunerazione per i soci.

Il risultato è stato ottenuto tramite le tariffe di pedaggio, che rimangono comunque inferiori del 30% rispetto a quelle praticate sull'autostrada BreBeMi e di circa il 50% rispetto a quelle applicate sulla Pedemontana.

Il programma di investimenti contiene una previsione di spesa per lavori di progettazione e costruzione ammontante a 251'653 €, al netto dei ribassi d'asta del 10% (aggiornamento 30/05/2011).

Il rispetto dell'equilibrio economico-finanziario previsto dal Piano elaborato presuppone che tale spesa sarà coperta con le risorse fornite dagli azionisti (34,6%) e con il ricorso al mercato finanziario attraverso la tecnica del project finance per il residuo 65,4%.

La durata complessiva del finanziamento è stata ipotizzata in 35 anni con ripagamento in 31 anni a partire dal secondo anno di operatività dell'autostrada.

Il tasso di interesse utilizzato per calcolare gli interessi sui finanziamenti è stato assunto pari al 6%.

## 2. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

### 2.1. CONFORMITÀ AL PTCP E PTRP

Il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), nel rispetto degli indirizzi e delle strategie indicate nel Piano Territoriale Paesistico Regionale (PTRP), si pone quale strumento utile e adeguato a fornire indicazioni significative di riferimento e coordinamento per l'attività di pianificazione urbanistica delle diverse Amministrazioni Comunali. Definisce un particolare assetto urbanistico-territoriale suddividendo il territorio della provincia di Bergamo in Aree Urbanistiche Sovracomunali. I comuni sopra citati fanno riferimento agli ambiti 19 e 21 situati nella Unità di Paesaggio di alta pianura asciutta tra Brembo e Serio. Questa fascia di territorio presenta un assetto prevalentemente agrario e una forte concentrazione urbana determinata dalla presenza di industrie lungo i principali assi viari. Grossi centri urbanizzati di origine radiale, insediamenti industriali e commerciali tra i più grossi della provincia creano il tessuto connettivo principale di questo ambito che non si sviluppa più secondo un modello a gemmazione ma si compongono a schiera o a pettine lungo tali vie di comunicazione. Le aree libere residue dell'agricoltura presentano i caratteri dell'alta pianura bergamasca e sono caratterizzate dalle emergenze fuori scala dei grossi insediamenti produttivi che comunque caratterizzano il paesaggio. Al fine di limitare il fenomeno di espansione urbana che genera conurbazione spezzando la continuità dei terreni destinati all'agricoltura, il PTCP prevede degli ambiti di valorizzazione, riqualificazione, progettazione paesistica e di connessione di sistemi di aree verdi o ambiti fluviali, creando corridoi o canali verdi, di funzione ecologica, deputati a progettazione paesistica e mitigazione dell'impatto ambientale delle nuove infrastrutture previste.

Gli ambiti territoriali più urbanizzati e più prossimi al tracciato autostradale, sono quelli che riguardano i comuni di Levate/Dalmine e Brembate/Boltiere. Le aree naturali di mitigazione, essendo qui molto limitate, potrebbero non offrire una sufficiente protezione, soprattutto per quanto riguarda l'inquinamento acustico. È possibile prevedere in tali situazioni, adeguate barriere antirumore, studiate opportunamente come oggetti a basso impatto visivo, integrate nell'ambiente circostante. Tali sistemi possono diventare supporti di sistemi di pannelli solari fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.

## 2.2. I PARCHI

Il PTCP individua gli ambiti di particolare significato naturalistico, ambientale e paesistico per i quali viene ritenuta opportuna la promozione di Parchi Locali a Interesse Sovracomunale (PLIS), al fine di garantire una maggiore valorizzazione del patrimonio naturale e paesistico e una progettazione degli interventi sia sotto il profilo delle opportunità di utilizzo delle risorse, ciò anche considerando la necessità complessiva di miglioramento della qualità dell'offerta ambientale e paesistica, sia sotto il profilo della gestione degli interventi per la salvaguardia e la valorizzazione dei luoghi e delle loro peculiarità.

Il tracciato interferisce con un articolato complesso di aree protette a carattere sovra comunale.

Nel tratto nord, con il **Parco Agricolo-Ecologico di Bergamo-Stezzano** (700 ettari) che pur collocandosi in contesto fortemente urbanizzato e infrastrutturato garantisce la continuità degli spazi aperti connettendosi al Parco Ovest di Bergamo, all'Area dei nuovi Ospedali Riuniti di Bergamo e al Parco dei Colli di Bergamo. Rispetto al sistema delle aree protette l'area si connette direttamente a sud con l'attuale PLIS del Morla in cui è prevista la connessione della IPB con la tangenziale sud di Bergamo; il grande spazio verde che si viene così a creare prevede riqualificazione delle aree agricole tramite realizzazione di fattorie didattiche, produzione e vendita di prodotti di qualità, attività agrituristica, consolidamento delle sponde dei corsi d'acqua e creazione di fasce tampone alberate, riqualificazione e valorizzazione delle relazioni visive privilegiate quali il sistema collinare di Bergamo e i nuclei urbani in sua prossimità, strutturazione di un disegno territoriale di percorsi per la mobilità lenta dedicato all'uso quotidiano (aree pedonali, ciclabili).

**Parco del Basso Corso del fiume Brembo**, consorzio che coinvolge i comuni di Boltiere, Bonate Sotto, Dalmine, Filago, Madone, Osio Sopra e Osio Sotto.

Nella fascia sud del tracciato si attraversa il **PLIS della "Geradadda"** esteso per circa 1684 ettari (16.836.912 m<sup>2</sup>) e interessante parte dei comuni di Arcene, Canonica d'Adda, Ciserano, Fara Gera d'Adda, Pontirolo Nuovo e Treviglio. Le modalità di pianificazione e di gestione, riconosciute dal D.G.P. n°440 del 06/09/2007 sono:

- recuperare e valorizzare il sistema delle rogge e del paesaggio attraverso la reintroduzione di specie autoctone, il completamento delle alberature e la collocazione di nuove, la sistemazione delle sponde e il miglioramento dei percorsi campestri.
- Creare un sistema per la fruizione del parco nel tempo libero tramite individuazione di poli di interscambio (bici/ferro/gomma), il potenziamento delle infrastrutture esistenti (centri sportivi, aree attrezzate), individuazione di aree di sosta quali aree pic-nic, maneggi, percorsi-vita ecc, recupero edifici storico-artistici sia di carattere civile che religioso.

- Valorizzare il settore agricolo in quanto l'agricoltura costituisce uno strumento di difesa dell'ambiente.
- Porsi come elemento di mitigazione delle infrastrutture ad alto impatto paesaggistico.

## 2.3. LE CAVE

Il PLIS racchiude zone prevalentemente agricole e zone di elevata valenza ambientale, ma anche zone con diversa funzione, ossia ambiti produttivi per attività estrattiva. Le **cave** costituiscono, insieme al reticolo delle rogge e delle strade campestri, l'ossatura principale del parco. Il Piano Cave (L.R. 8 Agosto 1998 n°14) individua quattro ambiti territoriali estrattivi.

L'**ambito 14** (ex poli AP10g) insiste sul territorio di Pontirolo Nuovo in località Moschetta, al confine con Canonica d'Adda, era vigente nel piano Cave del 1990 e nell'attuale pianificazione 2003-2012 è interessato da ampliamenti. Esso è vincolato dalle captazioni idropotabili (D.Lgs. 258/00), si estende per 74,3 ettari con una previsione di produzione nel decennio di tre milioni e mezzo di metri cubi di materiale. In sede di recupero, l'area è destinata ad ospitare funzioni insediative e ricreative quali attrezzature per il tempo libero, di uso pubblico, con indirizzo naturalistico in zona sud-est, mentre le scarpate dovranno essere modellate su pendenze di sicurezza inferiori a un terzo e il fondo cava sarà recuperato a lago.

L'ambito territoriale estrattivo 18 (**ATEg18**), localizzato in zona Cà d'Arcene, interessa i comuni di Arcene, Ciserano e Pontirolo Nuovo e si estende per una superficie di 58,3 ettari. È prevista una espansione nel piano 2003-2012 prevedendo una produzione di tre milioni di metri cubi. La società Vitali Spa è proprietaria di un terreno che sarà adibito a cava di estrazione di sabbie, ghiaie, pietrischi per un totale previsto di materiale estratto pari a 1.500.000 m<sup>3</sup> in 8 anni di attività. Le attività di recupero prescritte dal Piano Cave, previo riempimento, comportano la realizzazione di un parco naturalistico a fruizione pubblica e di una area agricola nella zona est, il modellamento delle scarpate con pendenze inferiori a un terzo, la copertura con adeguata coltre di terreno coltivato e rinverdimento e infine il recupero del fondo cava a lago. L'azienda prevede un recupero contestuale alla fase di escavazione permettendo la riduzione dei tempi di permanenza del sito estrattivo, recuperando in quattro anni la metà delle aree. Il recupero propone la riconversione territoriale dell'area con diverse possibilità funzionali (ricettive, turistiche, sportive, parchi tecnologici per la produzione di energia rinnovabile, ecc). In conformità con gli obiettivi del PLIS di poter valorizzare l'utilizzo del parco nel tempo libero, è plausibile una riconversione a area polisportiva di interesse sovramunicipale.

Pontirolo è interessato da altri due ambiti estrattivi. ATEg26 (ex polo BP1g1) sorge in località cascina Peri espandendosi verso nord. Per la sua estensione di 11,2 ettari, si prevede l'estrazione nel decennio di 200.000 metri cubi di materiale e, una volta finita l'attività estrattiva, il recupero ad area agricola e naturalistica. Il secondo è ATEg27 che si estende per 22,8 ettari in zona Fornasetta. Per esso è prevista una produzione di 1.700.000 metri cubi di materiale, al cui esaurimento dovrà seguire un recupero a destinazione insediativa, ricreativa e naturalistica e il recupero del fondo cava a lago.

## 2.4. RIFERIMENTI PROGETTUALI: GALLERIE VERDI ARTIFICIALI

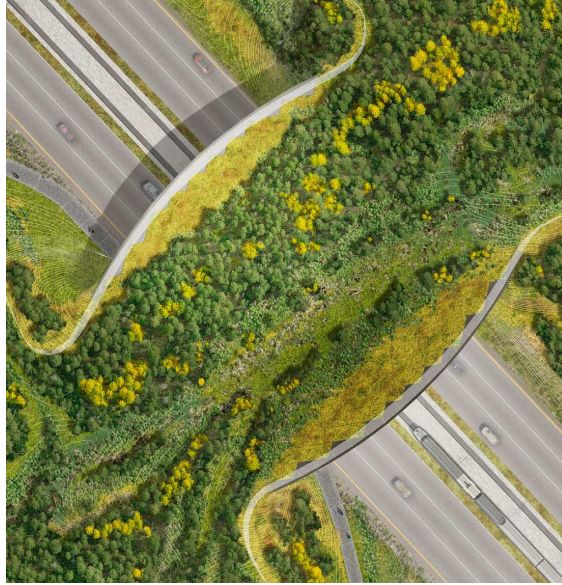
Le infrastrutture di comunicazione esistenti e in corso di esecuzione rappresentano un elemento di frammentazione fisica, relazionale e percettiva dell'area; il trattamento dei canali infrastrutturali esistenti attraverso un equipaggiamento verde posto su gallerie artificiali, contribuisce a una mediazione del rapporto (e delle esternalità) infrastruttura-area Parco. Tale intervento è opportuno per riparare aree sensibili e comunque deve salvaguardare le relazioni visive privilegiate (in particolare la visuale del sistema dei colli di Bergamo dall'autostrada e dalla ferrovia). Oltre a costituire un elemento di "compensazione" delle esternalità infrastrutturali, una attenta progettazione delle fasce verdi può incidere positivamente sulla qualità dell'equipaggiamento vegetazionale dell'ambiente circostante.

Importante inoltre è l'attenzione verso i coni visuali rilevanti che non devono essere occultati, ma al contrario potenziati dal sistema arboreo.

Si riportano alcune immagini esplicative riguardo a tali sistemi di mitigazione paesaggistica.



Figura 2.1: Pedemontana-galleria artificiale



**Figura 2.2: Ecodotto**

In base agli elementi finora descritti si può inquadrare l'opera autostradale di interconnessione come un sistema infrastrutturale con forte valenza ambientale in quanto le disposizioni locali, provinciali e regionali assicurano un suo efficace inserimento nel contesto naturale al fine di preservarlo senza negare, ma potenziando, lo sviluppo sostenibile del territorio.

Le Norme Tecniche Attuative del PTCP di Bergamo danno le seguenti specificazioni negli articoli 79,80 e 81:

Il PTCP considera parte essenziale delle previsioni concernenti il sistema di adeguamento della mobilità, le indicazioni atte a risolvere i problemi di relazione tra l'infrastruttura ed il contesto territoriale, paesaggistico, ambientale e insediativo. A tal fine indica, per le infrastrutture elencate all'art. 81, comma 2, lettera a), le aree, ubicate lungo le fasce laterali ai tracciati, che formano oggetto di obbligatori studi di inserimento, finalizzati alla definizione degli interventi di mitigazione e compensazione ambientale nonché di riqualificazione territoriale. I corridoi e le aree entro le quali è prevista la realizzazione di nuove infrastrutture di interesse provinciale e/o sovra-provinciale indicate nella Tav. E3 del PTCP, sono sottoposti a tutela, interessando opere e interventi di competenza della pianificazione territoriale, ai sensi della L.R. 1/2000, da recepire negli strumenti urbanistici comunali. Per il sistema viabilistico, la tutela riguarda la rete autostradale e la rete principale. La dimensione dei corridoi individuati nella Tav. E4, laddove connessi ad areali disciplinati dagli artt. 65.b e 66, è individuata in una fascia di mt.100 dall'asse dell'infrastruttura.

Si deve garantire la presenza di fasce verdi per la mitigazione dell'impatto ambientale/paesaggistico dell'infrastruttura creando una vera e propria Green Way lungo l'intero sviluppo del tracciato.

## 2.5. RETI CICLABILI

Il parco della Geradadda è fornito di diversi percorsi ciclabili che permettono agli utenti di apprezzare le principali bellezze naturali, ambientali, storico-artistiche del territorio. Si riporta la mappa messa a disposizione dal sito internet del parco "[http://www.parcogeradadda.it/itin\\_mappa.htm](http://www.parcogeradadda.it/itin_mappa.htm)".



Figura 2.3: rete ciclabili parco della Geradadda [www.geradadda.it]

Sovrapponendo la precedente mappa con il tracciato autostradale in progetto, si riscontrano diversi punti di interferenza di questo con i tracciati ciclabili.





Figura 2.4: interferenze tra IPB e rete ciclabile del parco della Geradadda

Per ripristinare i percorsi è necessario prevedere degli attraversamenti in sovrappasso all'autostrada al fine di garantire, nonostante la realizzazione dell'infrastruttura, la piena fruibilità dei servizi offerti dal Parco senza causare un rilevante danno sociale ed economico per i comuni interessati. Le previsioni del PTCP in relazione agli ecodotti per il ripristino paesaggistico, possono essere facilmente ingrate con la necessità di ripristino dei percorsi ciclabili ipotizzando un elemento che assolva entrambe le funzioni contemporaneamente.

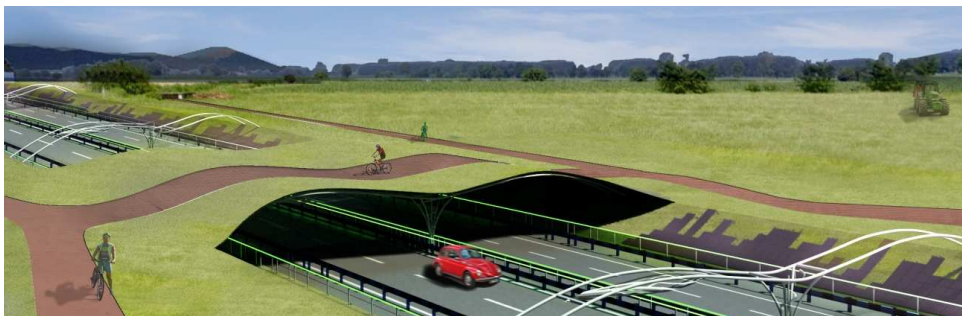


Figura 2.5: Concept sovrappasso ciclopedonale [Studio Zoppini Associati]

### 3. INTEGRAZIONE AMBIENTALE

#### 3.1. ASSETTO INFRASTRUTTURALE

L'attuale sistema autostradale non ha livelli qualitativi e funzionali ottimali ma, al contrario, presenta tratti stradali con forte congestione nelle ore di punta favorendo la deviazione del traffico sulle molte strade statali e provinciali che confluiscono radialmente nella città di Bergamo attraversando i limitrofi centri urbani con conseguente innalzamento dei livelli di inquinamento atmosferico e acustico. Il sistema delle tangenziali (Est, Ovest, Sud) permette lo smistamento dei traffici passanti e costituisce un collegamento tra le vie di penetrazione urbane.

Il nuovo modello di infrastrutture primarie delle comunicazioni ha lo scopo di:

- assorbire i traffici pesanti
- fluidificare i percorsi
- garantire maggiore sicurezza
- garantire maggiore mobilità per il traffico locale



Figura 3.1: IPB [Autostrade Bergamasche]

Le principali iniziative, ancora in fase di progettazione, volte ad adeguare il sistema viabilistico sono:

- **Raccordo autostradale diretto Brescia-Milano (Bre.Be.Mi):** Collega direttamente Brescia con Milano passando per Caravaggio e Treviglio (Bergamo) accorciando di circa 20 km la distanza che intercorre tra le medesime città percorrendo l'autostrada A4. Viene previsto un buon assorbimento del traffico con alleggerimento considerevole del tratto Brescia-Bergamo-Milano della A4, offrendo alle aree della pianura bergamasca da Calcio a Treviglio ottime possibilità di servizio per il traffico locale e per gli insediamenti produttivi e commerciali della zona.
- **Autostrada Pedemontana:** Costituisce una infrastruttura autostradale che si distacca dalla A4 in Bergamo, mantenendo la direttrice di passaggio pedemontano intermedio, a nord del Capoluogo lombardo, con collegamenti diretti autostradali (A8-A9) con Como, Varese e Malpensa. Il nuovo asse dovrebbe consentire un forte drenaggio del traffico dell'area a nord di Milano che eviti il passaggio del Capoluogo e l'utilizzo del tratto di A4 da Bergamo a Milano, contribuendo all'alleggerimento del traffico. Noto è l'interesse della nuova infrastruttura per la creazione di un quadro equilibrato del sistema autostradale nel territorio di Bergamo.
- **Raccordo autostradale Bre-Be.Mi./Pedemontana:** Si sviluppa a partire dalla sezione di fine competenza della tratta autostradale Pedemontana a nord giungendo in prossimità della zona nord di Treviglio dove avviene la connessione con l'autostrada Bre.Be.Mi. L'opera si sdoppia nel territorio del comune di Osio Sotto e prosegue fino al nuovo casello di Dalmine dove avviene il raccordo alla tangenziale Sud di Bergamo (di prossima realizzazione). Il nuovo tracciato coinvolge i comuni di Treviglio, Pontirolo Nuovo, Ciserate, Verdellino, Brembate, Boltiere, Osio Sotto, Dalmine, Levate, Stezzano e Bergamo.

Risulta di strategica importanza il collegamento ferroviario Treviglio-Bergamo che corre parallelo all'IPB toccando i comuni di Treviglio, Arcene, Verdellino e Stezzano. Le relative stazioni ferroviarie costituiscono dei nodi di interscambio di primo livello tra le modalità di trasporto su ferro e su gomma (mezzi privati e mezzi pubblici) con importanza commerciale data la forte produttività industriale della zona.

Questa relazione tra vie di trasporto permette di creare altre relazioni con una rete ciclabile diffusa in modo capillare attraverso il territorio, potenzialmente sviluppabile all'interno dei parchi verdi protetti che connettono le comunità locali.

### 3.2. ASSETTO ECONOMICO-PRODUTTIVO DELL'AREA

I campi di principale orientamento economico e produttivo della provincia di Bergamo sono:

- **Industriale** con le media imprese esportatrici, progredito nell'ultimo trimestre del 2010 del 1,7% congiunturale (rispetto al periodo precedente) e del 6,7% rispetto al 2009 caratterizzato da un rallentamento dovuto alla crisi, nonostante il mercato del lavoro veda ancora molte imprese che ricorrono alla cassa integrazione, anche se in misura minore rispetto ai picchi del 2008/2009. In media d'anno il 2010 ha visto ridursi del -2,7% gli addetti nell'industria. Le attività industriali sono concentrate prevalentemente nel territorio di Dalmine e Treviglio.

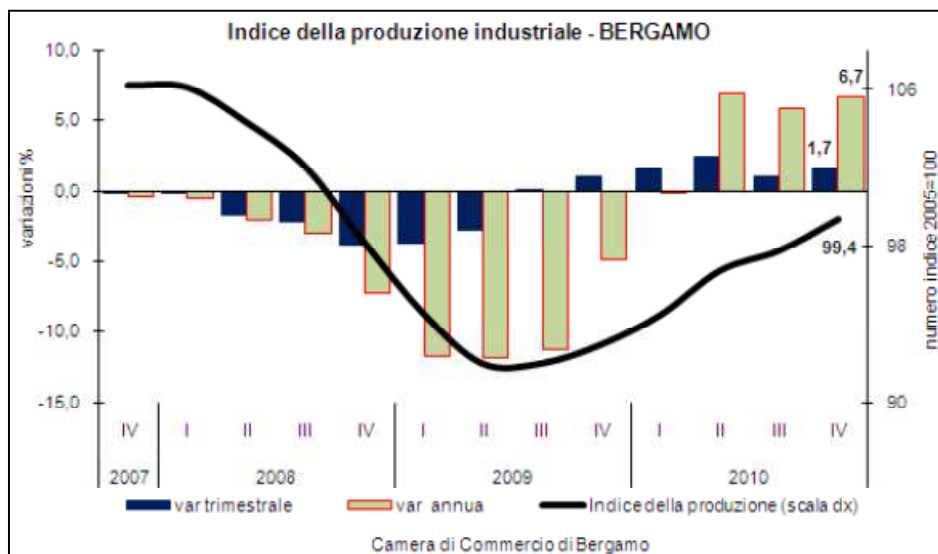


Figura 3.2: indice della produzione industriale

L'industria siderurgica, quale settore maggiormente sviluppato, è presente nella zona in particolare a Dalmine con la Tenaris, la Dalmine SpA, la Mondial Trading Srl, Centro Sviluppo Materiali SpA, a Stezzano con la MILFER SpA, a Bergamo con la ILF Srl, Boffiser Srl, 3L Srl, AG Trading Srl, a Pontirolo Nuovo con la Metal Inox Centro Srl, a Osio Sotto con la Siderver Srl. Lungo lo sviluppo della A4 alle porte di Bergamo è sito il Parco Scientifico Tecnologico Kilometro Rosso della Brembo, impresa elettromeccanica multinazionale.

Variazione grezza su base annua della produzione nei settori dell'industria bergamasca										
	IV 08	I 09	II 09	III 09	IV 09	I 10	II 10	III 10	IV 10	risposte valide IV trim 2010
Siderurgia	-5,5	-12,4	-12,7	-4,3	1,1	3,7	9,9	5,3	10,1	6
Min. non metalliferi	-8,1	-13,7	-14,6	-14,4	-12,1	-14,5	-2,1	-4,0	-3,2	11
Chimica	-8,2	-13,8	-8,3	-12,9	2,1	5,5	11,0	13,9	8,2	18
Meccanica	-7,0	-12,8	-15,3	-14,4	-6,4	-1,0	9,2	8,5	8,3	94
Mezzi di trasporto	2,9	-11,0	-17,7	-14,2	-4,3	12,2	15,0	16,4	6,1	5
Alimentari	-0,3	-3,5	-1,9	-0,5	-2,3	2,7	-2,3	-6,7	-0,8	4
Tessile	-11,6	-11,8	-9,2	-11,9	-5,5	-5,2	6,9	1,2	8,5	18
Pelli e calzature	-8,3	-11,4	0,0	-12,3	1,3	-0,3	-14,2	-8,8	1,5	5
Abbigliamento	-7,4	-5,0	-8,9	-2,8	-4,8	-12,2	4,8	2,4	2,2	9
Legno-mobili	-6,2	-5,7	1,0	-7,4	-1,2	2,7	4,6	4,9	6,0	11
Carta-editoria	-6,9	-14,4	-11,3	-3,1	-4,2	6,4	6,8	4,3	2,2	8
Gomma-plastica	-8,8	-12,9	-9,2	-7,6	-1,8	6,7	4,4	3,4	7,5	24
Ind. varie	-6,5	-11,2	-19,3	-9,8	-11,1	-2,0	0,4	3,8	2,9	12
<b>TOTALE</b>	<b>-7,2</b>	<b>-11,9</b>	<b>-12,1</b>	<b>-10,9</b>	<b>-4,6</b>	<b>-0,2</b>	<b>7,3</b>	<b>5,8</b>	<b>6,7</b>	<b>225</b>
Settori in crescita	1	0	1	0	3	7	10	10	11	
Settori in contrazione	12	13	11	13	10	6	3	3	2	

Camera di Commercio di Bergamo

Figura 3.3: variazione grezza su base annua della produzione nei settori dell'industria bergamasca

- **Artigianato** il cui ciclo di produzione è in miglioramento di 4 punti su base annua ma stazionario (0,1) nel trimestre. Segnali positivi più robusti sono presenti nella dinamica del fatturato e degli ordinativi. Le previsioni per il primo trimestre del 2011 sono in leggera prevalenza ancora negative, salvo che per la domanda estera. Nella media dell'intero anno 2010 la produzione dell'artigianato manifatturiero è aumentata del +2,2% ( a seguito di -4,2% nel 2008 e -12,5% nel 2009), un risultato tra i migliori in Lombardia. L'occupazione nell'artigianato è in contrazione: -0,6% nel trimestre. Nella media 2010 il calo degli addetti è stato del 2% contro un dato medio regionale di -2,5%.

Il settore dell'artigianato si suddivide in diverse aree di mestiere: costruzioni (imprese edili, muratori, tinteggiatori, gessisti, piastrellisti, fabbri, serramentisti), Impiantistica/manutenzioni (elettrici, antenisti, idraulici), Servizi (elettrauti, gommisti, carrozzieri, tappezzeri, imprese di pulizia), Servizi alla persona (lavanderie, estetiste, acconciatori), Produzione e subfornitura (produttori di materie plastiche-chimiche, falegnami, mobiliari, fornitura meccanica, tessile-abbigliamento-calzaturiero), alimentaristi (produzione pasta fresca, pizzerie, caseifici, gelaterie, pasticcerie) e Immagine, Arte e Comunicazione (tipografie, grafici, stamperie, artigianato artistico, orafi, orologiai). Le diverse aree sono associate nell' Associazione Artigiani Bergamo riconosciuta da Confartigianato.

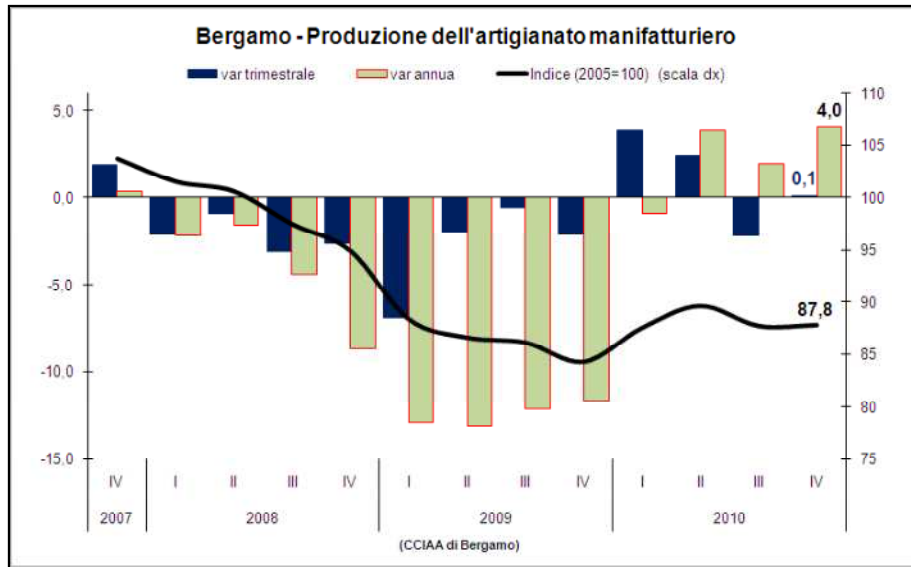


Figura 3.4: produzione dell'artigianato manifatturiero

- **Commercio al dettaglio.** Il volume d'affari a Bergamo, nell'ultimo trimestre 2010, è ancora inferiore del -1,6% rispetto a un anno prima, con una flessione marcata nell'alimentare (-3,6%) e nel commercio non specializzato (-2,8%). Nel non alimentare il risultato è meno negativo (-0,2%). Positivo invece l'andamento dell'occupazione che segna un progresso del +0,7% nel trimestre. In miglioramento anche le aspettative. Vanno consolidandosi strutture commerciali sempre più ampie nella forma dei centri commerciali. Ciò concentra il traffico, altro fattore di possibile congestionamento delle strade locali.

I centri commerciali che possono essere raggiunti tramite l'IPB sono il Centro Commerciale Brembate (di modeste dimensioni) e Le due Torri Shopping Center (Stezzano), una struttura di 45mila metri quadrati con 90 negozi, un Superstore e 2400 posti auto che raccoglie un bacino d'utenza di circa 650.000 abitanti.

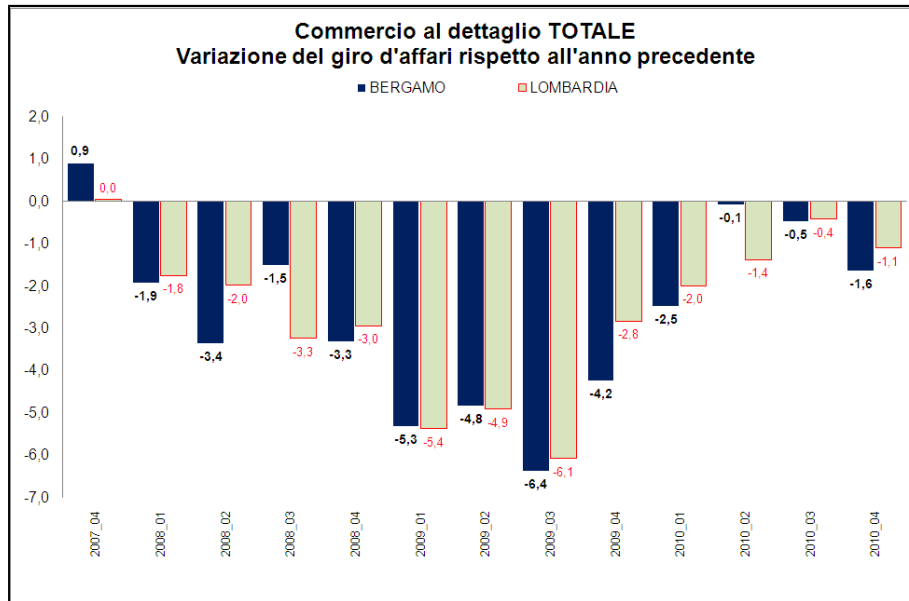


Figura 3.5: commercio al dettaglio

- Nell'**edilizia** il giro d'affari è stazionario: +0,2% su base annua.
- Nell'**insieme dei servizi** il fatturato è poco al di sotto dell'anno precedente (-0,3%). Trasporti, servizi avanzati e altri servizi alle imprese segnano un recupero, mentre sono ancora in fase negativa commercio all'ingrosso, informatica e telecomunicazioni, alberghi, bar e ristoranti e servizi alle persone.

L'occupazione nei servizi risulta in netta diminuzione nell'ultimo trimestre del 2010.

I servizi raggruppano le attività terziarie in gruppi omogenei rispetto alla destinazione.

Si individuano quattro tipologie di servizi: servizi per il sistema produttivo, ovvero destinati a soddisfare la domanda delle imprese; servizi per le famiglie, destinati all'impiego finale da parte delle famiglie; di rete, rivolti sia all'impiego finale che intermedio e che svolgono funzione di raccordo fra soggetti economici; servizi alla destinazione collettiva.

Come esempio citiamo Servitec Srl Servizi per l'innovazione a Dalmine che offre servizi legati all'ambiente (Risanamento dei pozzi d'acqua per uso industriale, Studi idrogeologici su bacini e torrenti, Individuazione di eventuali perdite sulle reti di distribuzione, Misure di portata pressione e temperatura, Certificazioni ambientali, ecc), all'energia (per utenti privati, pubblici, associazioni di categoria analizzando la situazione dei clienti, verificando le forniture, offrendo consulenze, operando aggiornamenti normativi, effettuando misurazioni, tarature, certificazioni, redigendo studi di fattibilità, direzione lavori).

Servizi di logistica a Stezzano con SDA Express Courier che effettua spedizioni aeree, marittime e terrestri nazionali e internazionali.

Sono considerati servizi gli hotel presenti nei comuni di Treviglio, Boltiere, Verdellino/Zingonia, Osio Sotto, Dalmine e Stezzano, le scuole, considerando di strategica importanza i centri univer-

sitari di Treviglio (Università degli Studi di Bergamo) e Dalmine (Università degli Studi di Bergamo-Ingegneria).

Da segnalare la prossima realizzazione di un nuovo centro universitario a Stezzano.

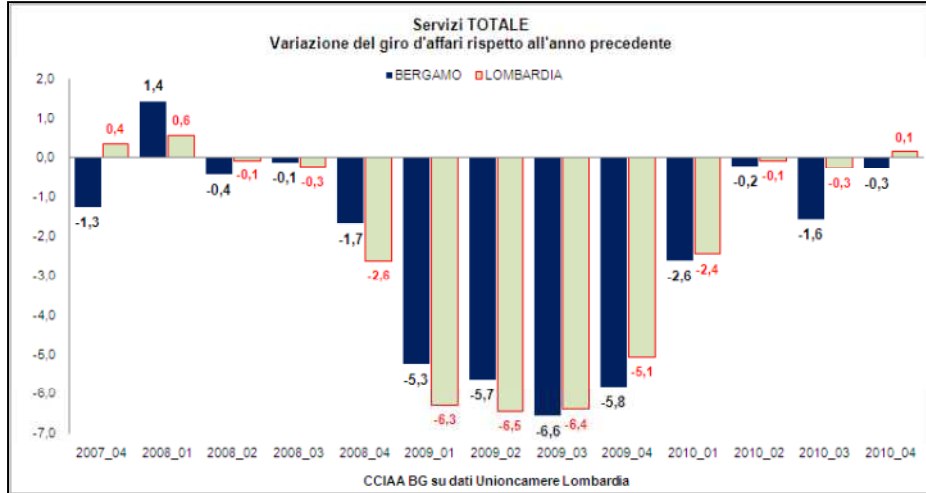


Figura 3.6: Servizi



### 3.3. CARATTERI DEMOGRAFICI E INSEDIATIVI

I dati ISTAT relativi alla provincia di Bergamo mettono in evidenza un lieve e tendenzialmente costante incremento annuo della popolazione. Si parla di una crescita tra Gennaio e Novembre 2010 dello 0,8% (aggiornamento 28/03/11). Il continuo trend di crescita della popolazione residente è dovuto alla grande produttività del territorio grazie alla molteplicità di attività in esso insediate nonché al crescente flusso migratorio e al processo di decentramento delle aree metropolitane Est Milanese e Bergamasca. Anche la presenza di importanti vie di comunicazione facilita la crescita, e le imminenti realizzazioni infrastrutturali non possono che confermare tale tendenza. Si prevede per il 2020 un incremento di popolazione residente del 4,4% rispetto al 2010 e un +7,8% nel 2030 (rispetto al decennio precedente). Nella pianura compresa tra Adda e Serio risiede circa il 18% della popolazione della provincia. La percentuale tenderà ad aumentare leggermente. Il PTCP vuole vincolare il territorio non ancora raggiunto dall'urbanizzazione crescente orientando i Comuni a porre attenzione alla salvaguardia dei varchi paesistico-ambientali ancora presenti, promuovendo quella rete di interconnessione fra corridoi ecologici esistenti ed aree aperte di interesse naturalistico o agricolo, che possono rafforzare il sistema ambientale e paesistico, e tutelare quelle potenzialità di percezione del paesaggio, che sono strategiche per un corretto rapporto tra necessità urbanizzative e tutela dei valori ambientali e paesistici. È necessario che i comuni attraverso il PGT (Piano di Governo del Territorio) valutino attentamente le trasformazioni edilizie prediligendo interventi di recupero di aree dismesse, di patrimonio edilizio esistente e di compattazione delle zone costruite, evitando per quanto possibile l'espansione e la dispersione.

La realizzazione della nuova infrastruttura viaria, già prevista nel PTCP, risulta perciò inserita nel contesto paesaggistico senza che ne derivi alcuno dei suddetti fenomeni. Il suo tracciato è infatti affiancato da zone di valorizzazione, riqualificazione e progettazione paesaggistica e i comuni con cui essa entra in relazione sono dotati di una specifica regolamentazione delle aree destinate alla trasformazione urbanistica nelle quali possono essere previste iniziative/programmi di intervento di elevata rilevanza locale o sovra comunale.

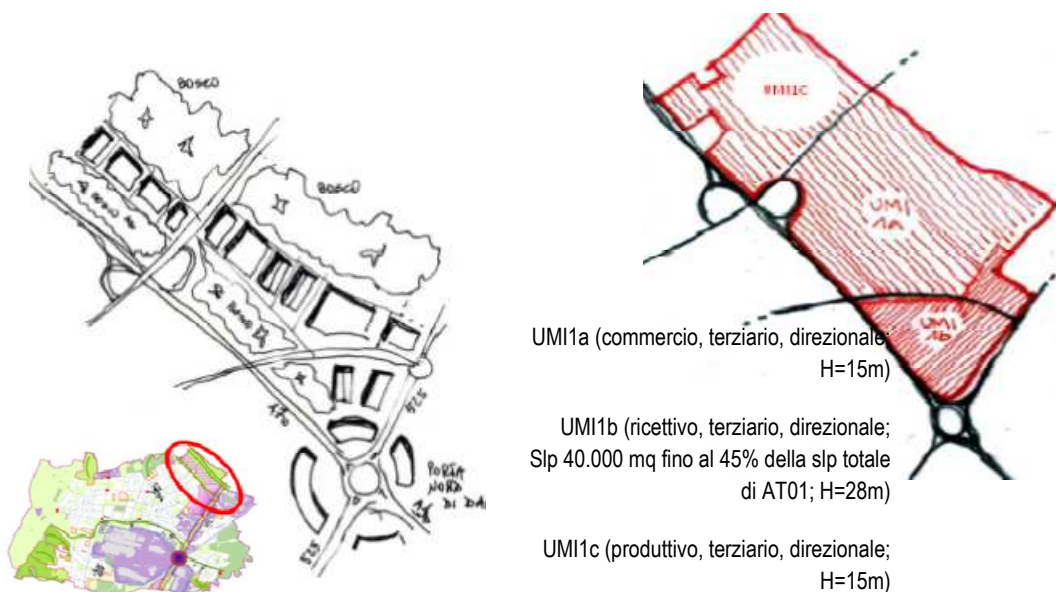
Si elencano i principali interventi:

#### DALMINE

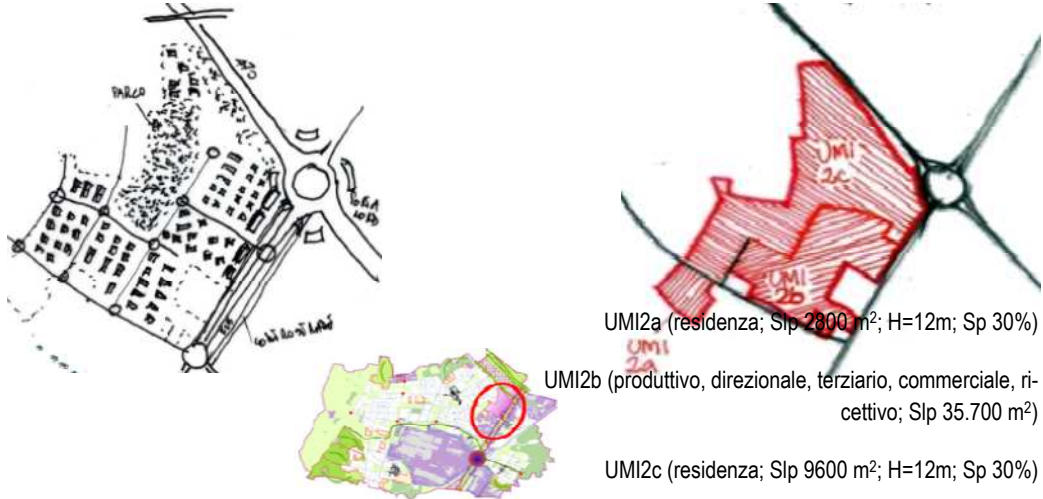
Il PGT, ai sensi della L.R. 12/2005 e in conformità con il precedente PRG, individua diversi Ambiti di Trasformazione (AT). Il PGT verifica con la VAS e con i criteri della sostenibilità dello sviluppo gli Ambiti di Trasformazione. Attribuisce agli ambiti importanti strategie territoriali e di Servizi. Nel PGT le trasformazioni diventano motivo di tutela e di valorizzazione ecologica, ambientale e paesaggistica, di produzione di Servizi di eccellenza, di qualificazione funzionale, urbana e architettonica. Si elencano gli ambiti più significativi:

- (AT01) Bosco delle Attività Plurifunzionali. Superficie AT pari a 288.900 m<sup>2</sup>; Slp prevalentemente produttivo terziario e mix-funzionale pari a 93.000 m<sup>2</sup>.

Formazione di un “parco di tipo innovativo” nel quale le attività plurifunzionali sono integrate con un tessuto importante e di qualità di spazi verdi. Obiettivo dell’ambito è quello di compensare e perequare le azioni sia dal punto di vista ambientale e paesaggistico che dal punto di vista economico, fornendo un “paesaggio industriale avanzato”. L’ambito diviene un grande parco boscato nel quale le attività (secondario, mixfunzionale, ecc.) si collocano in modo armonico producendo qualità ecologica, ambientale, paesaggistica, funzionale e architettonica. Gli spazi a verde (bosco, verde di diversa e varia tipologia e morfologia, coltivazioni agrarie, ecc.) sono privati, devono estendersi quantomeno per un terzo della superficie dell’ambito e possono con convenzione essere resi di uso pubblico. Gli interventi devono essere di qualità urbanistica, architettonica e funzionale e devono valorizzare gli elementi paesaggistici (visuali e coni panoramici verso le Prealpi Orobiche, ecc.). Lungo le strade i fronti e gli spazi aperti devono essere di eccellenza architettonica; gli interventi devono produrre attorno alla rotatoria tra la 525 e la 470 un paesaggio urbano di qualità (“la porta nord di Dalmine”). Sono favorite le attività produttive dotate di certificazioni, legate a tecnologie ambientalmente sostenibili e allo sviluppo integrato del territorio comunale; sono vietate le attività a rischio incidente rilevante e quelle che comportano spreco notevole di spazio, uno scarso valore aggiunto in termini occupazionali, cadute negative sul territorio, ecc., come le attività di logistica, magazzino-deposito, prefabbricazione, ecc. Sono incentivati gli interventi che utilizzano energie rinnovabili ed ecosostenibili con centrale di cogenerazione e sistema di produzione di energia elettrica fotovoltaica in grado di garantire la copertura dei carichi termici e frigoriferi delle attività insediabili nonché di quelle insediate nel territorio comunale e in grado di cedere energia elettrica alla rete comunale.



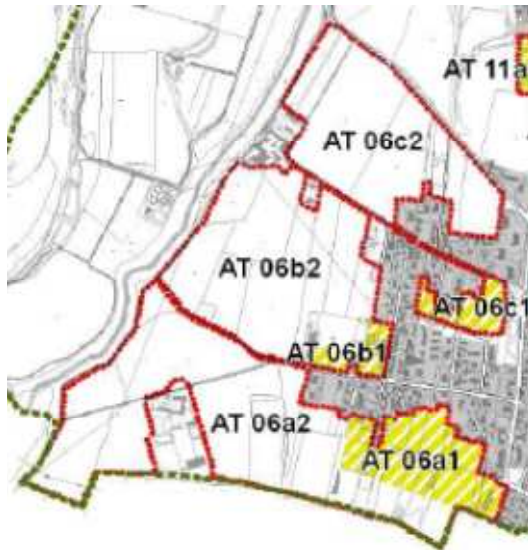
- (AT02) Porta Nord di Dalmine. Formazione di un territorio multiprestazionale nel quale le attività produttive e plurifunzionali sono tra di loro integrate in un tessuto urbano importante, che contribuisce a dare qualità all'accesso da nord a Dalmine. Requisiti analoghi a (AT01).



- (AT04) Porta Sud di Dalmine. Analogo ad (AT02).  
Produzione secondaria e mix-funzionale; SIp 18.700 m<sup>2</sup>; H=15m; Sp 15%
- (AT6) Stanze Verdi di Mariano. Formazione di una serie di "stanze verdi" per Mariano nel quale le residenze sono integrate con un tessuto importante e di qualità di spazi verdi agricoli accessibili per l'educazione ambientale.

L'ambito diviene una rete di aree agricole diversamente governate che si rapportano in modo armonico con il quartiere di Mariano e producendo qualità ecologica, ambientale, paesaggistica e promuovono educazione ambientale tramite convenzione, che stabilisce con l'Amministrazione le modalità di accesso al pubblico e la fruizione ecologico-didattica delle attività primarie (percorsi educativi, cascine didattiche, ecoturismo, agri turismo, ecc).

Gli spazi a verde agricolo (a2, b2, c2) sono privati e con convenzione possono essere resi di uso pubblico.



AT06a, AT06b, AT06c (residenza e attività correlate; SIp<sub>a</sub> 11850 m<sup>2</sup>; SIp<sub>b</sub> 3340 m<sup>2</sup>; SIp<sub>c</sub> 2700 m<sup>2</sup>)

H<sub>a,b,c</sub> = 12m

Sp 30%

Per gli ambiti **a** e **c**, la SIp definita può essere incrementata di 1500 m<sup>2</sup> per attività commerciali: esercizi di vicinato e una Media struttura di vendita di 800 m<sup>2</sup> di superficie di vendita.

La convenzione per la fruizione pubblica ecologico-didattica delle aree viene compensata con la premialità di 300 m<sup>2</sup> di SIp che verrà realizzata in adiacenza alle aree stesse.

- (AT8) Stanze Verdi di Sabbio. Analogo ad (AT6) (Slp 3460 m<sup>2</sup>; H=12m; Sp 30%). Convenzione per la fruizione pubblica ecologico-didattica compensata con premialità di 300m<sup>2</sup>.
- (AT11) Nuovo Polo Scolastico.

Gli ambiti di trasformazione prevalentemente residenziali occupano una superficie di 266.510 m<sup>2</sup> mentre quelli produttivi, terziari e multifunzionali 549.040 m<sup>2</sup> per un totale di 815.550 m<sup>2</sup>.

## BOLTIERE

Destinazione prevalentemente residenziale:

- (AT1) 14000 m<sup>2</sup> slp
- (AT3) 5400 m<sup>2</sup> slp
- (AT4) 4312 m<sup>2</sup> slp

Destinazione per attività economiche/produttive:

- (AT2) 17400 m<sup>2</sup> slp
- (AT7) 9000 m<sup>2</sup> slp
- (AT9) 9600 m<sup>2</sup> slp
- (AT10) 18000 m<sup>2</sup> slp

Destinazione speciale per strutture polivalenti di interesse sovra comunale:

- (AT12) 62000 m<sup>2</sup> sl

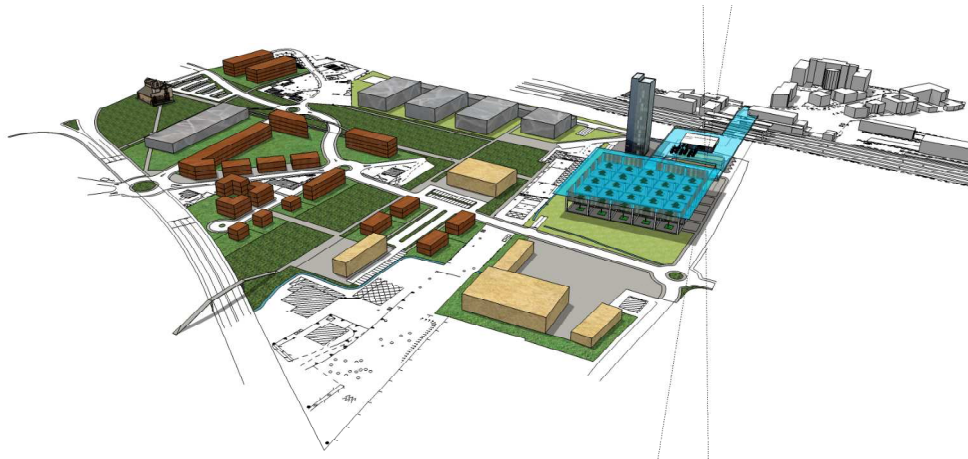
TREVIGLIO

- (AT1) Polo Sportivo Integrato. 60905 m<sup>2</sup> (ripartita tra residenze, servizi, attività ricettive e direzionali). La zona già dotata di attrezzature sportive viene trasformata in un parco a vocazione sportiva associando agli esistenti impianti per il calcio, il tennis, il basket e l'atletica, altri servizi di uso pubblico quali piscina, palestra e nuovo stadio per il calcio. A questi si affiancano altri servizi sempre di natura pubblica quali albergo, negozi, centro per fisioterapia. Si ammette la presenza di limitate zone ad uso privato.



**Figura 3.7: area di trasformazione ad uso pubblico (area sportiva)**

- (AT2) Nuovo Centro Urbano Stazione Sud. 67580 m<sup>2</sup> (tra residenze, servizi, attività ricettive e direzionali). Il ruolo e il funzionamento della stazione ferroviaria centrale, stante il prevedibile incremento dei movimenti pendolari in direzione di Milano e considerando gli sviluppi infrastrutturali e insediativi nella porzione sia meridionale che settentrionale del territorio trevigliese, è augurabile che venga migliorato e potenziato. In particolare vanno salvaguardate quelle aree poste a sud del fascio di binari e rimaste libere dall'occupazione di capannoni industriali e sottoposte ad un intervento per realizzare una grande piazza (in parte coperta), da utilizzarsi anche per ospitare eventi espositivi e manifestazioni. Tale piazza può essere collegata con l'edificio e la piazza della stazione attuale mediante opportuni sovra e sottopassi dei binari, può essere servita da una piastra di parcheggi interrati nel sottosuolo che vada ad incrementare la dotazione già esistente a raso e corredata ai suoi margini da opportunità edificatorie complementari in grado di mitigare i costi e rendere sostenibile economicamente l'intervento.



**Figura 3.8: area di trasformazione ad uso pubblico (area stazione)**

- (AT3) Parco Sud. Completamenti insediativi per strutture prevalentemente terziarie e residenziali con relativi servizi per una superficie totale di 488.126 m<sup>2</sup> di cui 54.783 m<sup>2</sup> adibiti a servizi. Realizzazione di un grande parco che separa tali insediamenti dal sistema infrastrutturale a sud con superficie pari a 1.841.500 m<sup>2</sup>.



**Figura 3.9: aree di completamento insediativo Parco Sud**

### PONTIROLO NUOVO

Destinazione prevalentemente produttiva:

- (AT1)

Destinazione prevalentemente residenziale:

- (AT2)
- (AT3)
- (AT5-AT6)

### 3.4. DOTAZIONI TECNOLOGICHE E UTILIZZO DI FONTI RINNOVABILI

La presenza di rilevanti ambiti di trasformazione urbana nei comuni interessati dal passaggio della nuova autostrada permette di contribuire in modo importante alla loro valorizzazione in termini di sostenibilità ambientale. È infatti possibile utilizzare la rete di trasporto viaria come rete di trasporto tecnologica integrando in essa dei sistemi di produzione di energia e le relative reti di distribuzione, andando a servire i centri abitati e le zone produttive limitrofe. Si è svolta una ricerca riguardante i servizi tecnologici già presenti nella zona.

	Treviglio	Pontirolo	Nuovo	Ciserano	Verdellino	Boltiere	Brembate	Osio Sotto	Osio Sopra	Levate	Dalmine	Stezzano	Arcene
Teleriscaldamento											✓		
Fibra Ottica	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
Wireless		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Tabella 3.1: Analisi dei servizi tecnologici

Il **teleriscaldamento** è attualmente installato solamente nei comuni nei quali è presente una centrale di cogenerazione, di termovalorizzazione dei rifiuti o un altro impianto produttivo in cui è possibile recuperare i vapori delle lavorazioni per riscaldare un fluido termovettore, solitamente acqua, che viene poi distribuita alle utenze per mezzo di tubazioni interrate isolate (per limitare le dispersioni di calore e garantire il servizio). Attualmente, nella zona, sono presenti impianti di produzione, nei comuni di Cassano D'Adda (centrale termoelettrica), Dalmine (centrale termoelettrica a ciclo combinato) e Bergamo dove sono presenti quattro centrali: cogenerazione Carnovali e Goltara (114,5 MWt + 11,5 MWe), cogenerazione Monterosso (10 MWt + 1,1 MWe), produzione semplice Cavour (6 MWt). La lunghezza di distribuzione delle reti di teleriscaldamento fino ad oggi installate raggiunge i 14 km; allacciandosi alle centrali di produzione è perciò possibile sfruttare la strada quale via di distribuzione del servizio ai comuni che ancora utilizzano fonti energetiche tradizionali, lungo l'intero tracciato stradale (per circa 16 km).

La rete **wireless** essendo già molto diffusa può essere potenziata installando dei ripetitori lungo il tracciato stradale dell' IPB in modo da garantire una buona presenza di segnale anche nelle località in cui esso risulta più debole nonché sulla strada stessa e le aree di sosta.

La **fibra ottica**, oltre a poter andare a servire il comune di Arcene che ne è sprovvisto, può connettere i sistemi elettronici di rilevamento, video-sorveglianza e informazione per l'utenza. I dati, trasmessi in tempo reale, saranno funzionali alla sorveglianza e gestione del traffico, alla sicurezza nelle gallerie e all'informazione dei viaggiatori per ciò che riguarda le condizioni di traffico (rallentamenti, tempi di percorrenza, distanze, lavori in corso, eventuali elementi di disturbo presenti, uscite e caselli, condizioni meteo, ecc).



Figura 3.10: Mappa copertura wireless [www.bigtlc.it]



Figura 3.11: Rete di distribuzione fibra ottica [www.bigtlc.it]



Lungo il tracciato saranno installati **pannelli fotovoltaici** che produrranno energia elettrica per l'illuminazione stradale, i caselli agli svincoli autostradali e da immettere in rete per la vendita. Tale energia potrà essere utilizzata nei centri abitati per soddisfare il fabbisogno elettrico delle abitazioni. L'interconnessione risulta perciò oltre che una via di comunicazione diventa un vero e proprio sistema ambientale ecologico, sicuro e all'avanguardia nella produzione e trasporto di energia pulita.



#### 4. IL PROGETTO “STRADA VERDE”



Dopo aver descritto le potenzialità di integrazione ambientale e paesaggistica dell'intervento, si procede con una nuova fase di lavoro nella quale si progettano i sistemi che permettono all'intervento di avere caratteristiche verdi, oltre che costituire un reale vantaggio, per i comuni limitrofi all'infrastruttura, in termini di risparmio energetico, qualità dell'ambiente costruito e risparmio economico e una fonte di ricavo economico per i soggetti gestori. Si tende ad un miglioramento e ad uno sviluppo dell'area bergamasca che ospiterà la nuova autostrada.

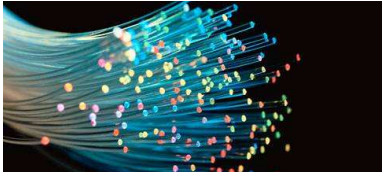
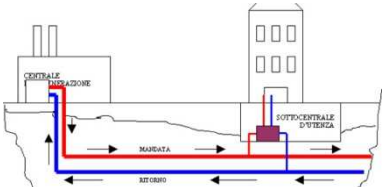
Gli input che portano allo sviluppo delle tecnologie della Strada Verde, sono il sole, il vento, il paesaggio, il flusso veicolare e i consumi dell'utenza. Questi portano alla produzione di energia termica, energia elettrica fotovoltaica e eolica, inquinamento atmosferico e inquinamento acustico. I moduli del sistema che si va a progettare hanno la funzione di regolare e gestire questi output, al fine dell'efficienza nello sfruttamento delle fonti naturali e della sostenibilità.


Tali moduli sono stati innanzitutto definiti in base ad un'analisi di prefattibilità nella quale si elencano i sottosistemi costituenti l'infrastruttura con i relativi costi unitari (dove presenti), benefici e criticità. Altri sottosistemi precedentemente previsti nel concept KM0 Road sono stati scartati per gli eccessivi costi di realizzazione e manutenzione nonché per il basso rendimento energetico ed economico che avrebbero avuto (manto riscaldato, impianto geotermico a tubi orizzontali).

Lo scopo del lavoro successivo è l'ingegnerizzazione delle soluzioni precedentemente ipotizzate.

ENERGIA				
Intervento	Descrizione	Costi	Benefici	Criticità
<b>1. Impianti fotovoltaico</b> 	Utilizzo di pannelli solari fotovoltaici integrati all'interno delle infrastrutture della autostrada (in itinere e nelle aree di servizio)	3.000 €/kW	Produzione di energia elettrica per il fabbisogno autostradale e per la vendita Incentivi statali pari a circa 0,23 €/kWh di energia prodotta (IV Conto Energia, I sem. 2013)	Effettuare una opportuna integrazione conservando l'ottimale orientamento dei pannelli e mantenendo tutti gli standard di sicurezza previsti dalla normativa stradale
<b>2. Impianti eolici</b> 	Sfruttamento del flusso veicolare per la produzione di energia elettrica tramite turbine eoliche di piccola potenza	2.000 – 3.000 €/kW	Produzione di energia elettrica per il fabbisogno autostradale e per la vendita Incentivi statali	Mancanza di conoscenza del flusso di aria generata dai veicoli Mancanza di stabilità nelle condizioni del vento

GESTIONE				
Intervento	Descrizione	Costi	Benefici	Criticità
<b>3. Controllo e monitoraggio</b> 	Sistemi di controllo e monitoraggio dell'autostrada, della circolazione e delle turbative dotato di software innovativi per gestione del traffico e delle emergenze	n.d.	Maggior sorveglianza della circolazione e maggior efficienza nel recupero di situazioni complesse	
<b>4. Free flow toll</b> 	Sistema di pedaggio senza barriere fisiche	n.d.	Massima fluidità del traffico	Gestione delle violazioni

SOTTOSERVIZI				
Intervento	Descrizione	Costi	Benefici	Criticità
<b>5. Rete in fibra ottica</b> 	Rete di telecomunicazione su fibra ottica con tecnologia OTN di proprietà del gestore autostradale con caratteristiche di ridondanza e sicurezza nel passaggio dei dati da utilizzare per diversi servizi (dati, fonia, TVCC, ecc.)	n.d.	Vantaggi in termini di costi di gestione e manutenzione (la rete può essere gestita direttamente dal gestore autostradale senza necessità di interventi e servizi da parte di tecnici esterni)	
<b>6. Teleriscaldamento</b> 	Sfruttamento dell'arteria autostradale per la distribuzione di una rete di teleriscaldamento ai Comuni limitrofi	n.d.	Distribuzione del riscaldamento a basso costo ed elevata efficienza	Possibile dispersione del calore a causa della lunghezza dei tratti

SICUREZZA				
Intervento	Descrizione	Costi	Benefici	Criticità
<b>7. Telecamere mobili</b> 	Telecamere su binario (o su cavo) per sorvegliare nel miglior modo possibile l'intera tratta autostradale	n.d.	Migliore sorveglianza del traffico, degli eventi che si verificano e dell'infrastruttura stessa	Gli attuali sistemi in commercio sono pensati per spazi limitati (qualche centinaio di metri)
<b>8. Guide ottiche luminose</b> 	Sistemi a led per la guida ottica dei veicoli in caso di scarsa visibilità e per fornire indicazioni sullo stato della circolazione	75 €/m	Maggior sicurezza e fluidità della circolazione anche in condizioni critiche	I led potrebbero essere danneggiati in seguito a urti dei veicoli

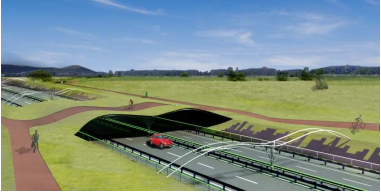

SERVIZI ACCESSORI				
Intervento	Descrizione	Costi	Benefici	Criticità
<b>9. Ponte ciclopedonale</b> 	Ponte ciclopedonale per riconnettere la rete ciclabile nel parco della Geradadda	n.d.	Utilizzo del territorio nel tempo libero. Valorizzazione beni culturali	
<b>10. Punti di ricarica auto elettriche</b> 	Realizzazione di punti per la ricarica delle auto elettriche presso le aree di servizio	23.000 €/cad.	Incentivazione all'uso di auto ecologiche Ricavi dalla vendita dell'energia	Parco elettrico ancora limitato (specialmente in autostrada) Tempi di ricarica lunghi

Tabella 4.1: Studio di pre-fattibilità degli interventi per la sostenibilità dell'infrastruttura

#### 4.1. PROGETTO DI UN PONTE CICLO-PEDONALE

Si ritiene di prioritaria importanza, la realizzazione di un collegamento ciclabile posto sul tratto autostradale che attraversa la zona di Arcene - Pontirolo Nuovo, strategica per via della presenza delle cave ma soprattutto per l'importante nodo di interscambio tra auto, ferrovia e bicicletta.

I principali requisiti da soddisfare sono:

- leggerezza reale e visiva
- integrazione ambientale
- sicurezza per gli utenti
- struttura ordinaria non classificata nella categoria "gallerie" secondo il DM 5/11/01
- resistenza meccanica ai carichi di folla (NTC '08)
- capacità di accumulo idrico
- capacità drenante

la scelta di utilizzare una copertura a verde è legata, nel presente caso, ai seguenti obiettivi:

- fruibilità visiva: realizzazione di un elemento avente valenza puramente architettonica e paesaggistica;
- variazioni delle condizioni di contesto ambientale esterno: in relazione alla capacità della copertura a verde di assorbire polveri, di costituire un eventuale elemento di assorbimento acustico e di regimazione idrica e mitigazione della temperatura;
- compensazione ambientale: capacità della copertura a verde e del sistema architettonico, intesi come un elemento ambientale complesso, di restituire integralmente o parzialmente le valenze che il sistema ambientale originario conferiva al contesto<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> UNI 11235:2007, pag. 5

#### 4.1.1. Scelte progettuali e conformità alle normative tecniche

Per la struttura portante si sceglie di utilizzare il legno lamellare realizzando un sistema di travi principali e travi secondarie che appoggia su elementi di fondazione in CA posti lateralmente e centralmente alle carreggiate. Per mantenere la forma alare ipotizzata in fase preliminare e per contenere l'altezza degli elementi strutturali, si realizzano due campate con travi curve di luce pari a 22 metri ciascuna.

Il livello altimetrico del piano stradale rispetto al piano campagna è posto a -6,5 metri. La quota di imposta dell'arco dipende dalla dimensione della fondazione (non dimensionata) e sarà tale da garantire una quota massima della copertura finita pari a +1,06 metri sul piano campagna. Il raccordo tra la struttura progettata e il piano campagna viene realizzato tramite il successivo riempimento con il terreno di riporto dello scavo sul quale verrà realizzata la stratigrafia che costituisce la pista ciclabile vera e propria.

La progettazione architettonica del ponte rispetta la normativa sul superamento delle barriere architettoniche garantendo una pendenza del 5% per rampe di lunghezza superiore a 5 metri<sup>2</sup> e di conseguenza viene rispettata la normativa per la progettazione di percorsi ciclo-pedonali per la quale nel caso di realizzazione di piste ciclabili in sede propria, indipendenti dalle sedi viarie destinate ad altri tipi di utenza stradale, la pendenza longitudinale delle singole livellette non può generalmente superare il 5%, fatta eccezione per le rampe degli attraversamenti ciclabili a livelli sfalsati, per i quali può adottarsi una pendenza massima fino al 10%<sup>3</sup>.

Secondo le Linee Guida per la progettazione della reti ciclabili, al fine di definire gli standard geometrici da garantire alla rete, si adotta la seguente classificazione dei percorsi ciclabili:

Tab. 2.1 Principali categorie di itinerari ciclabili

	Categoria	Tipo di utenza	Velocità di progetto (minima orientativa)
A	Universali <sup>1</sup>	Sono percorsi adeguati a tutte le tipologie: cicloamatoriale (non agonistico), cicloturistico, ciclopendolare, di accesso locale (casa scuola, acquisti ecc.)	35 km/h
B	Medio raggio <sup>2</sup>	Come i percorsi A), con esclusione della categoria cicloamatoriale	28 km/h
C	Breve raggio	Sono percorsi dedicati all'accesso locale ed ai ciclopendolari di breve raggio	22 km/h
D	Locali	Percorsi di accesso a specifiche destinazioni	15-18
E	Vie verdi	Si tratta di itinerari multifunzionali, riservati alla circolazione non motorizzata, in ambienti di particolare valenza paesaggistica ed ambientale.	15-20 km/h
F	Cicloamatoriali	Si tratta di tratti stradali intensamente frequentati da cicloamatori	n.d.

Figura 4.1: Principali categorie di itinerari ciclabili [Linee Guida per la progettazione delle reti ciclabili, Tab. 2.1]

<sup>2</sup> Allegato LR 20/02/89, n°6, Prescrizioni tecniche di attuazione per l'eliminazione delle barriere architettoniche

<sup>3</sup>DM 30/11/99, n°557, Art. 8 comma 1

Il caso specifico in progettazione, ricade della categoria “Vie Verdi” in quanto i percorsi ciclabili da valorizzare si trovano in ambiente prevalentemente extraurbano in area adibita a parco.

Per quanto riguarda tale categoria, la larghezza della superficie pavimentata, in genere delimitata da bordi a raso, varia tra 2,5 e 5 metri ed è sempre bidirezionale (doppio senso di marcia).

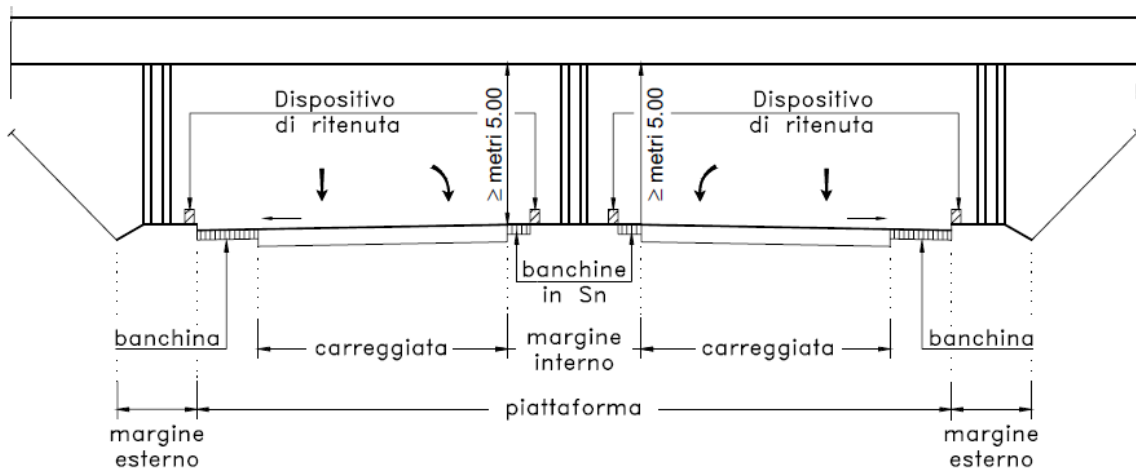
Il percorso progettato è a larghezza variabile tra un minimo di 2,5 metri nella sezione di mezzeria del ponte e 4,5 metri nelle sezioni nelle quali avviene il raccordo tra il ponte e il piano campagna.

Dal punto di vista della sicurezza stradale, sono garantite, per l’opera stradale in sottopasso, le dimensioni minime previste dal DM 5/11/01 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” di cui si riportano i passi di interesse per la progettazione del ponte ciclo-pedonale:

*“Per tutti i tipi di strada, qualora l’opera in sottopasso abbia una lunghezza superiore ai metri 20, la piattaforma e gli elementi marginali saranno previsti in analogia al caso delle gallerie.*

*Solo allorché la strada sottostante sia a carreggiate separate ed abbia un margine interno compatibile con i dispositivi di ritenuta, può prevedersi un sostegno centrale dell’opera di scavalcamento.*

*Le strutture orizzontali devono dar luogo ad un’altezza libera, misurata sulla verticale a partire da qualsiasi punto della carreggiata stradale sottostante, non inferiore a 5,00 metri.”<sup>4</sup>*



**Figura 4.2: Dimensioni minime opere in sottopasso [DM 5/11/01, par. 4.1.1, opere di scavalcamento e sottopassi]**

Il ponte progettato ha un appoggio centrale di altezza 4,5 metri sul quale si appoggiano gli archi in legno che raggiungono, a partire da una distanza di 70 centimetri dai dispositivi di ritenuta (guard rail), un'altezza di 5 metri.

<sup>4</sup> DM 5/11/01, paragrafo 4.1.1, Opere di scavalcamento e sottopassi



#### 4.1.2. Soluzioni tecnologiche

Per la realizzazione della copertura verde si adotta un sistema prefabbricato tipo “Daku” per coperture inclinate a verde intensivo leggero. Le difficoltà consistono nelle elevate pendenze della copertura che richiedono adeguati sistemi di ritenuta del terreno e lo smaltimento delle acque che defluiscono verso il centro della copertura. Lo strato portante è costituito da pannelli strutturali prefabbricati scatolari in legno OSB, la cui conformazione maschio-femmina permette una facile posa nella creazione di superfici curve e contemporaneamente garantisce bassi carichi sulla struttura portante di travi principali e di conseguenza sulle fondazioni. Tali pannelli vengono impermeabilizzati in opera con una doppia membrana impermeabile (4+4mm) in bitume-polimero: il primo strato è autoadesivo e viene posato perciò in aderenza totale mentre il secondo strato è antiradice e viene posato in totale aderenza al primo tramite sfiammatura. Si fa attenzione ad eseguire i corretti risvolti laterali e i pontage con l'impermeabilizzazione della fondazione. Vengono poi posati lo strato drenante/accumulo in polistirene, lo strato filtrante geotessile, il sistema di ritenuta del terreno e il terreno di coltura.

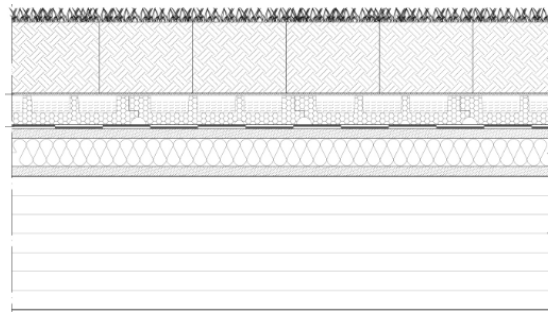


Figura 4.3: Sezione corrente copertura a verde inclinato intensivo leggero

Rispetto alla copertura verde, si mantengono inalterati gli strati di supporto, impermeabilizzazione, accumulo idrico e filtrante. Al di sopra viene realizzato un piano di posa in argilla espansa che permette di contenere i carichi sulla struttura portante rispetto a quelli che si avrebbero utilizzando la ghiaia di fiume. Successivamente si posa lo strato di Binder e lo strato di usura in asfalto colorato che garantisce una superficie uniforme e regolare (perciò più sicura e confortevole per gli utenti) e maggiore visibilità del tracciato.

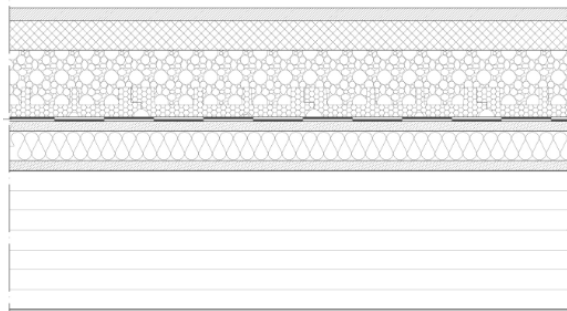
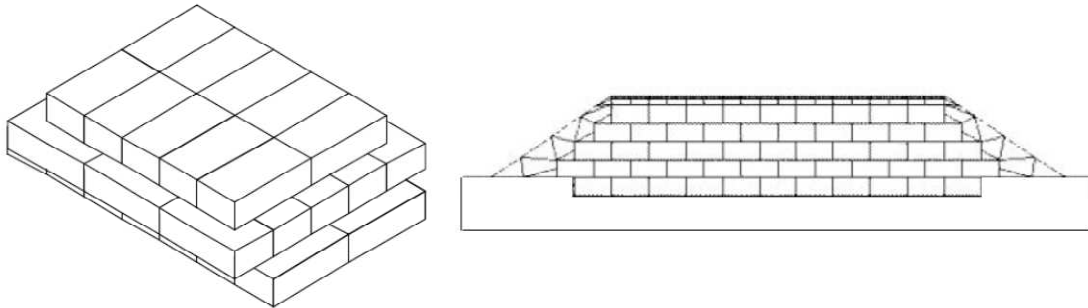


Figura 4.4: Sezione corrente pista ciclabile

Per la realizzazione del rilevato sul quale viene posata la pista ciclabile, si utilizza un particolare sistema di alleggerimento in blocchi in EPS di dimensioni 1x2x0.5 metri. Il polistirene facilita il lavoro di cantiere per via della sua leggerezza e facilità di posa in opera. Qui vengono posti su più strati a giunti sfalsati, con un'orditura dello strato ortogonale a quella dello strato immediatamente inferiore e collegati tramite tasselli meccanici dentati detti "gripper" che consentono la trasmissione delle azioni tra i blocchi e la stabilità durante le fasi di lavorazione. Un rilevato in EPS richiede la realizzazione di una sovrastruttura stradale rigida quale elemento di ripartizione dei carichi. Il materiale consente di limitare i cedimenti dovuti al consolidamento del terreno di fondazione, di ridurre gli spostamenti di terra e l'area di ingombro del rilevato. Elimina la possibilità di formazione del ghiaccio sulla superficie e facilita la posa in opera offrendo un'elevata adattabilità alle forme che il terreno richiede.



**Figura 4.5: Disposizione dei blocchi di EPS in un rilevato stradale**



**Figura 4.6: Montaggio dei blocchi**



**Figura 4.7: Rivestimento in terra**

#### 4.1.3. Dimensionamento della struttura in legno lamellare

La struttura oggetto di progettazione è costituita da 14 travi principali in legno lamellare incollato disposte su due campate di luce pari a 22 metri ciascuna vincolate alle fondazioni laterali e ai pilastri centrali tramite piastre in acciaio schematizzate, ai fini del calcolo, come cerniere. L'interasse tra le travi è di 3 metri e viene dimezzato (1,5 metri) in corrispondenza delle tre travi centrali deputate a sorreggere il maggiore carico della pista ciclo-pedonale rispetto a quello della copertura verde che grava sui restanti elementi. La successione di elementi scandita con tali interassi porta ad una lunghezza complessiva dell'opera di 15 metri.

Il sostegno degli strati superiori è affidato agli arcarecci posti a collegamento delle travi principali con interasse di 2,2 metri.

La lunghezza del ponte viene aumentata da un ordine di arcarecci a sbalzo, speculari rispetto al suo asse trasversale e sagomati in modo da conferire alla struttura un profilo variabile in pianta.

È presente un sistema di controvento in cavi di acciaio.

Il legno lamellare nasce col fine di superare i limiti dimensionali del tronco dell'albero dal quale si ricavano le travature. Da un solo fusto è infatti impossibile ottenere elementi di sezione e lunghezza necessarie a consentire la copertura di luci libere di 20-30 metri. Inoltre il portamento tipico dei fusti non consente di ottenere travi curve, o della curvatura voluta, di sezione sufficiente. Affinché si possa parlare di travi in legno lamellare, si deve essere in presenza di più di due tavole incollate tra loro, lo spessore delle lamelle di regola non deve superare i 40 mm e la larghezza i 220 mm.

La lunghezza degli elementi costruttivi non è limitata, se non da problemi di produzione, di trasporto e di montaggio.

Le normative di riferimento per la progettazione di strutture in legno lamellare sono:

- UNI EN 1995-1-1 (Eurocodice 5-1)
- UNI EN 1995-1-2 (Eurocodice 5-2)
- DM 14/01/08 (NTC '08)

Per il calcolo delle azioni del vento:

- CNR-DT 207/2008, Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni

#### 4.1.3.1. Caratteristiche meccaniche materiale

Legno Lamellare GLULAM GL28h per travi principali ed arcarecci.

<b>LEGNO LAMELLARE GL28h</b>			
<b>Tipo di tensione</b>			
flessione	f <sub>mk</sub>	28	N/mm <sup>2</sup>
trazione // fibre	f <sub>t0k</sub>	19.5	N/mm <sup>2</sup>
trazione ⊥ fibre	f <sub>t90k</sub>	0.45	N/mm <sup>2</sup>
compressione // fibre	f <sub>c0k</sub>	26.5	N/mm <sup>2</sup>
compressione ⊥ fibre	f <sub>c90k</sub>	3	N/mm <sup>2</sup>
taglio // fibre	f <sub>vk</sub>	3.2	N/mm <sup>2</sup>
<b>Moduli di elasticità N/mm<sup>2</sup></b>			
E // fibre		12600	N/mm <sup>2</sup>
E ⊥ fibre		420	N/mm <sup>2</sup>
modulo di taglio G		780	N/mm <sup>2</sup>
densità media		500	Kg/m <sup>3</sup>
		3.7E-06	N/mm <sup>3</sup>
<b>Dimensione lamelle</b>			
lamelle	40	mm	
base travi	8+2n	mm	

Tabella 4.2: caratteristiche meccaniche legno lamellare

Acciaio S275 per i controventi:

$$f_{yk} = 275 \text{ MPa}$$

Per bulloni e chiodi si è assunto: Bulloni classe 4.8

$$f_{uk} = 400 \text{ MPa (da produttore)}$$

#### 4.1.3.2. Azioni del vento

Struttura situata in provincia di Bergamo, Zona 1, altezza sul livello del mare inferiore ai 1000 metri.

Lombardia - Bergamo - Zona 1		
$v_{b0}$	25	m/s
$a_0$	1000	m
$k_a$	0.01	1/s
$\rho$	1.25	kg/m <sup>3</sup>

Tabella 4.3: Parametri di macrozonazione

La pressione del vento ( $p$ ) sarà data dalla seguente formula:

$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

dove:

- $q_b$  = pressione cinetica di riferimento ed è calcolata con la seguente formula:

$$q_b = \frac{v_{b0}^2 \cdot \rho}{2} = 390,625 \text{ N/m}^2$$

- $c_e$  = coefficiente di esposizione, dipendente dall'altezza del suolo ( $z$ ), dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito dove sorge la costruzione; si calcola con la seguente formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

Nel presente caso, essendo in classe di rugosità del terreno C corrispondente ad aree con ostacoli diffusi quali alberi, case, muri, recinzioni, ecc., si ricade nella categoria di esposizione III:

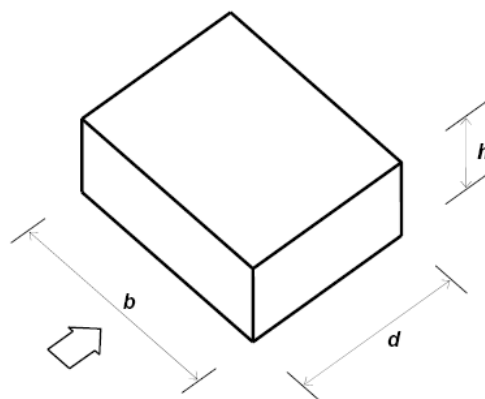
ZONE 1,2,3,4,5						
		costa				
	mare			500m	750m	
	2 km	10 km	30 km			
A	—	IV	IV	V	V	V
B	—	III	III	IV	IV	IV
C	—	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**

Categorie di esposizione del sito	$k_r$	$z_0$ (m)	$z_{min}$ (m)
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Figura 4.8: Criterio di assegnazione della categoria di esposizione per le diverse zone italiane [Figura 3.3, CNR-DT 207/2008, pag. 47]

Perciò, con  $z=5\text{m}$ , si ottiene un coefficiente di esposizione  $c_e = 1,707$ .

- $c_d$  = coefficiente dinamico che tiene conto degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali. Nel nostro caso viene assunto pari ad 1, essendo il nostro edificio di altezza inferiore agli 80 metri.
- $c_p$  = coefficiente di forma, calcolato con la norma CNR\_DT207-2008.



Faccia sopravento	Facce laterali	Faccia sottovento
$h/d \leq 1: c_{pe} = 0,7 + 0,1 \cdot h/d$	$h/d \leq 0,5: c_{pe} = -0,5 - 0,8 \cdot h/d$	$h/d \leq 1: c_{pe} = -0,3 - 0,2 \cdot h/d$
$h/d > 1: c_{pe} = 0,8$	$h/d > 0,5: c_{pe} = -0,9$	$1 < h/d \leq 5: c_{pe} = -0,5 - 0,05 \cdot (h/d - 1)$

Figura 4.9: Coefficienti  $c_{pe}$  per facce sopravento, sottovento e laterali [CNR-DT 207/2008, Appendice G.2]

Dal calcolo si ottengono le seguenti pressioni del vento:

vento direzione travi		
h [m]	5	
b [m]	15	
d [m]	22	
h/d	0.227273	< 0,5
$c_p$ laterali	-0.68182	
$c_p$ sopra	0.722727	
$c_p$ sotto	-0.34545	
P laterali	-0.00045	[N/mm <sup>2</sup> ]
P sopra	0.000482	[N/mm <sup>2</sup> ]
P sotto	-0.00023	[N/mm <sup>2</sup> ]

Tabella 4.4: Calcolo di  $c_p$  e delle pressioni del vento in direzione parallela alle travi

vento direzione ortogonale		
h [m]	5	
b [m]	22	
d [m]	15	
h/d	0.333333	< 0,5
$c_p$ laterali	-0.76667	
$c_p$ sopra	0.733333	
$c_p$ sotto	-0.36667	
P laterali	-0.00051	[N/mm <sup>2</sup> ]
P sopra	0.000489	[N/mm <sup>2</sup> ]
P sotto	-0.00024	[N/mm <sup>2</sup> ]

Tabella 4.5: Calcolo di  $c_p$  e delle pressioni del vento in direzione perpendicolare alle travi

#### 4.1.3.3. Azioni della neve

Il carico provocato dalla neve sulle coperture sarà valutato mediante la seguente espressione:

$$q_s = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_t$$

dove:

- $q_{sk}$  = carico neve al suolo, che per una copertura nella zona I – Mediterranea sarà pari ad 1,5 kN/m<sup>2</sup>.
- $\mu_i$  = coefficiente di forma della copertura, il quale varrà:

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_i$	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Figura 4.10: Valore del coefficiente di forma [DM 14/01/08, par. 3.4.3]

- $C_E$  = coefficiente di esposizione; nel nostro caso verrà assunto pari ad 1.
- $C_t$  = coefficiente termico; nel nostro caso verrà assunto pari ad 1.

Il carico neve sulla copertura sarà pari a:

$$q_s = 0.0012 \text{ N/mm}^2$$



**4.1.3.4. Analisi dei carichi**

<b>Carichi permanenti strutturali - g</b>			
	Sezione	Peso	Peso lineare
<b>Tipologia del carico</b>	m <sup>2</sup>	kN/m <sup>3</sup>	N/mm
travi principali in legno di abete	0.17	4.00	0.66
arcarecci in legno di abete	0.02	5.00	0.08
lignum K	0.10	2.70	0.27
			1.02

<b>Carichi permanenti non strutturali - g'</b>		
	Massa/sup	Peso/sup
<b>Tipologia del carico</b>	kg/m <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
carichi appesi	0	0.00000
sistema verde	220	0.00216
impermeabilizzante	0	0.00000
manto in lamiera di alluminio	0	0.00000
		0.00216

<b>Carichi accidentali - q'</b>	
Tipologia del carico	N/mm <sup>2</sup>
folla	0.0050
Neve	0.0012

**Tabella 4.6: Analisi dei carichi**

Le azioni variabili del traffico considerate, caratterizzanti le strade di 3° categoria (passerelle pedonali) sono le seguenti:

*Schema di Carico 5: costituito dalla folla compatta, agente con intensità nominale, comprensiva degli effetti dinamici, di 5,0 kN/m<sup>2</sup>. Il valore di combinazione è invece di 2,5 kN/m<sup>2</sup>. Il carico folla deve essere applicato su tutte le zone significative della superficie di influenza, inclusa l'area dello spartitraffico centrale, ove rilevante<sup>5</sup>.*

<sup>5</sup> DM 14/01/08, par. 5.1.3.3, Schemi di carico

#### 4.1.3.5. Arcarecci

Lo schema statico per la verifica degli arcarecci è appoggio-appoggio, utilizzando le seguenti misure:

$L [mm]$	2982
$b [mm]$	160
$h [mm]$	280
$i [mm]$	2100
$I [mm^4]$	2.93E+08
$E [N/mm^2]$	12600

Tabella 4.7: Caratteristiche dimensionali degli arcarecci

#### Verifiche SLE

Combinazione di carico:

$$g+g'=0.002327 \text{ N/mm}^2$$

$$q=4.89 \text{ N/mm}$$

Dove  $g+g'$  non considera il peso proprio delle travi principali in quanto non portate dagli arcarecci, mentre  $q$  è ottenuto moltiplicando per l'interasse tra gli arcarecci.

Si verifica ora la deformazione istantanea ( $w_{inst}$ ) rispetto ai seguenti valori limite:

valori limite SLE	
$w_{inst} < L / 300$	9.94
$w_{inst} < L / 500$	5.96

Tabella 4.8: Valori limite  $w_{inst}$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} < \frac{L}{300} \text{ e } \frac{L}{500} = 1.36 \text{ mm}$$

**Verificato**

Si verifica la deformazione finale ( $w_{fin}$ ) rispetto ad altri valori limite:

valori limite SLE	
$w_{fin} < L/150$	19.88
$w_{fin} < L/300$	9.94

**Tabella 4.9: Valori limite  $w_{fin}$**

$$w_{fin} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{E_{0,fin}I} < \frac{L}{150} e \frac{L}{300} = 2.46 \text{ mm}$$

con:

$$E_{0,fin} = \frac{E}{1 + k_{def}} = 7000 \text{ N/mm}^2$$

dove  $k_{def}$ , che tiene conto delle condizioni ambientali di esercizio della struttura (umidità), viene assunto pari a 0,8 per il legno lamellare in classe di servizio 2 secondo l' Eurocodice 5-1<sup>6</sup>.

### Verificato

### Verifiche SLU

Per la verifica agli stati limite ultimi si utilizzano i seguenti coefficienti parziali per la combinazione delle azioni:

$\gamma_m$	1.25	EC5-1
$\gamma_g$	1.35	NTC '08, cap.5
$\gamma_g'$	1.5	NTC '08, cap.5
$\gamma_q$	1.35	NTC '08, cap.5

**Tabella 4.10: Coefficienti parziali**

si assumono inoltre i seguenti coefficienti di correzione che tiene conto degli effetti della durata del carico ( $k_{mod}$ ) definiti in base alle classi di durata del carico:

	c. perm.	c. lunga d.	c. media d.	c. breve d.	c. inst.
$k_{mod}$	0.5	0.55	0.65	0.7	0.9

**Tabella 4.11: Coefficienti di durata del carico**

<sup>6</sup> La classe di servizio 2 è caratterizzata da un'umidità nei materiali corrispondente a una temperatura di 20 °C e ad un'umidità relativa dell'aria circostante maggiore dell'85% solo per poche settimane all'anno.

Combinazione di carichi permanenti

$$\gamma_g g + \gamma_g g' = 0.00329 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 6.91 \text{ N/mm}$$

Il Momento massimo si calcola, a favore di sicurezza, come per gli elementi semplicemente appoggiati:

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8}$$

Lo sforzo massimo relativo sarà:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot h}{2I}$$

$$M_{max} = 7.68E+06 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{max} = 3.76 \text{ MPa} < f_{mk} \cdot K_{mod} / \gamma_m = 11.20 \text{ MPa}$$

**Verificato**

Si calcola ora il Taglio massimo:

$$V_{max} = \frac{pL}{2}$$

Lo sforzo massimo relativo sarà:

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \frac{V_{max}}{b_{crit} \cdot h}$$

Con il coefficiente  $b_{crit} = 0,65 \cdot b$  che incrementa lo sforzo agente di taglio a causa della fessurazione alla quale sono sottoposti gli elementi inflessi<sup>7</sup>.

Il valore viene confrontato con il valore limite derivato dalla resistenza a taglio perpendicolare alle fibre.

$$V_{max} = 10305.39 \text{ N}$$

$$b_{cr} = 104 \text{ mm}$$

$$\tau_{max} = 0.531 \text{ MPa} < f_{vk} \cdot K_{mod} / \gamma_m = 1.280 \text{ MPa}$$

**Verificato**


---

<sup>7</sup> UNI EN 1995-1-1 (Eurocodice 5-1), par. 6.1.7

Combinazione di carichi accidentali

$$\gamma_g g + \gamma_g g' + \gamma_q q = 0.01004 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 21.087 \text{ N/mm}$$

Come in precedenza si calcolano il Momento e il Taglio massimo, i relativi sforzi e valori limite di confronto ottenendo i seguenti risultati (si precisa che viene modificato il valore di  $k_{mod}$  in quanto è diversa la durata di applicazione del carico):

$$M_{max} = 2.34E+07 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{max} = 11.21 \text{ MPa} < f_{mk} * K_{mod} / \gamma_m = 15.68 \text{ MPa}$$

**Verificato**

$$V_{max} = 31440.31 \text{ N}$$

$$b_{cr} = 104 \text{ mm}$$

$$\tau_{max} = 1.620 \text{ MPa} < f_{vk} * K_{mod} / \gamma_m = 1.792 \text{ MPa}$$

**Verificato**

**Verifica al fuoco – metodo della sezione ridotta**

Si assumono i seguenti parametri:

- $\beta_n$  velocità di carbonizzazione del legno lamellare, pari a 0,7 mm/min;

**Table 3.1 – Design charring rates  $\beta_0$  and  $\beta_n$  of timber, LVL, wood panelling and wood-based panels**

	$\beta_0$ mm/min	$\beta_n$ mm/min
<b>a) Softwood and beech</b> Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
<b>b) Hardwood</b> Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
<b>c) LVL</b> with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
<b>d) Panels</b> Wood panelling	0,9 <sup>a</sup>	–
Plywood	1,0 <sup>a</sup>	–
Wood-based panels other than plywood	0,9 <sup>a</sup>	–

<sup>a</sup> The values apply to a characteristic density of  $450 \text{ kg/m}^3$  and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.

**Figura 4.11: Velocità di carbonizzazione [Tab. 3.1, UNI EN 1995-1-2]**

- $d_0$  spessore di legno a temperatura elevata con proprietà meccaniche ridotte considerate nel nostro metodo di calcolo nulle, pari a 7 mm;
- $t$  tempo di resistenza al fuoco, pari a 60 minuti;
- $k_0$  coefficiente moltiplicativo di  $d_0$

$$k_0 = \frac{t}{20} \quad \text{se } t < 20 \text{ min}$$

$$k_0 = 1 \quad \text{se } t > 20 \text{ min}$$

- $d_{char,n}$  spessore carbonizzato:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 42 \text{ mm}$$

Analisi dei carichi

Per il principio della non sovrapposizione di fenomeni sfavorevoli si ha la seguente combinazione di carichi:

$$g+g' = 0.002 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 4.886 \text{ N/mm}$$

La sezione ridotta assume le seguenti dimensioni:

$$b' = 62 \text{ mm}$$

$$h' = 231 \text{ mm}$$

dove:

$$b' = b - 2 \cdot (d_{char,n} + k_0 d_0)$$

$$h' = h - (d_{char,n} + k_0 d_0)$$

Per la nuova sezione si calcolano, come in precedenza, i valori di momento di inerzia, momento massimo, taglio massimo e relativi sforzi massimi.

$$I' = 63686354 \text{ mm}^4$$

$$M_{\max} = 5431231 \text{ Nmm}$$

$$V_{\max} = 7285 \text{ N}$$

$$\sigma_{\max} = 9.85 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max} = 1.174 \text{ MPa}$$

I valori limite si calcolano considerando un valore incrementato delle resistenze del materiale e un valore ridotto del coefficiente di durata del carico:

$$\sigma_{lim} < \frac{f_{m20} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

$$\tau_{lim} < \frac{f_{v20} \cdot k_{mod,f}}{\gamma_m}$$

Con:

$$f_{m20} = 1,15 \cdot f_{vk}$$

$$k_{mod,f} = 1 - \frac{1}{200} \left( \frac{2b' + 2h'}{b'h'} \right)$$

$$f_{m20} = 32.2 \text{ MPa}$$

$$f_{v20} = 3.68 \text{ MPa}$$

$$K_{\text{mod},f} = 1$$

$$\sigma_{\text{lim}} = 32.20 \text{ MPa}$$

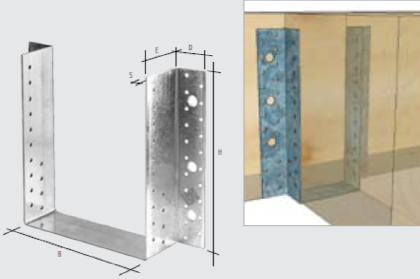
$$\tau_{\text{max}} = 3.68 \text{ MPa}$$



## Verifica dei collegamenti


### Arca-reccio - scarpa

Si sceglie di utilizzare, per il collegamento dell'arca-reccio alla trave principale, un elemento di giunzione come la scarpa con chiodi di dimensioni 4x60 mm.



**SCARPA A GRANDE MISURA**  
ali esterne

codice	descrizione B x H	n <sub>n</sub> Ø5	n <sub>N</sub> Ø5	Ø 13	peso	portata* [KN]	chiodo	pz. confezione	
DMM DMM	PF201400	100 x 240	46	30	6	0,995	21,42	4,0x60	20
DMM DMM	PF201405	100 x 280	54	34	6	1,133	24,28	4,0x60	20
ASG ASG	PF201410	120 x 240	46	30	6	1,030	21,42	4,0x60	20
ASG ASG	PF201415	120 x 280	54	34	6	1,167	24,28	4,0x60	20
ASH ASH	PF201420	140 x 240	46	30	6	1,064	21,42	4,0x60	20
ASH ASH	PF201425	140 x 280	54	34	6	1,201	24,28	4,0x60	20
ASJ ASJ	PF201430	160 x 160	30	18	4	0,824	12,85	4,0x60	15
ASK ASK	PF201435	160 x 200	38	22	6	0,961	15,71	4,0x60	15
ASL ASL	PF201440	160 x 240	46	30	6	1,098	21,42	4,0x60	15
ASM ASM	PF201445	160 x 280	54	34	6	1,236	24,28	4,0x60	15
ASP ASP	PF201450	160 x 320	62	38	6	1,373	27,13	4,0x60	15
ASR ASR	PF201455	180 x 220	42	26	6	1,064	18,56	4,0x60	10
ASS ASS	PF201460	180 x 280	54	34	6	1,270	24,28	4,0x60	10
ASD ASD	PF201465	200 x 200	38	22	6	1,030	15,71	4,0x60	10
ASE ASE	PF201470	200 x 240	46	30	6	1,167	21,42	4,0x60	10



Fissaggio alternativo con viti 5,0x50 cod.PF603550  
Per i valori di portata rivolgersi all'ufficio tecnico.  
\*Valori di portata con chiodi scanalati 4,0 x l<sub>n</sub> [chiodatura totale]

D = 41  
E = 61  
S = 2,5

Figura 4.12: Mezzo di unione [catalogo rotofixing]

Le modalità di rottura sono evidenziate in figura:

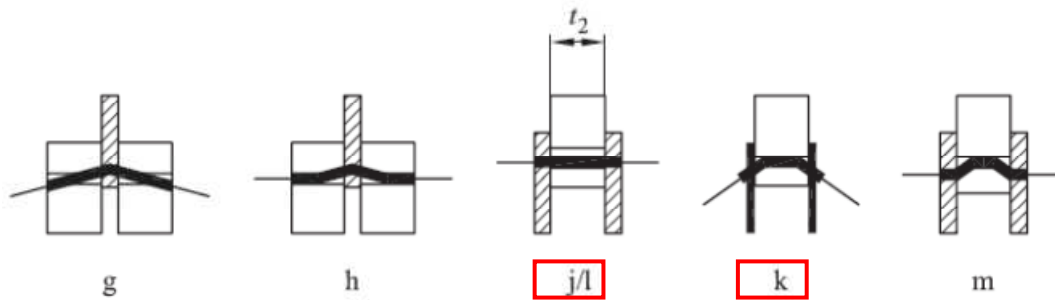


Figura 4.13: Criteri di rottura unioni acciaio-legno [figura 8.3, UNI EN 1995-1-1]

con le seguenti capacità portanti caratteristiche:

Per piastre di acciaio sottili poste come elementi esterni di una connessione a doppio taglio:

$$F_{v,Rk} = \min. \begin{cases} 0,5f_{h,2,k}t_2d & (j) \\ 1,15\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,2,k}}d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases} \quad (8.12)$$

dove:

$F_{v,Rk}$  è la capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione;

$f_{h,k}$  è la resistenza caratteristica a rifollamento nell'elemento ligneo;

$t_1$  è il più piccolo degli spessori dell'elemento dal lato legno, oppure la profondità di penetrazione;

$t_2$  è lo spessore dell'elemento ligneo centrale;

$d$  è il diametro del mezzo di unione;

$M_{y,Rk}$  è il momento caratteristico di snervamento, per il mezzo di unione;

$F_{ax,Rk}$  è la capacità caratteristica a estrazione, per il mezzo di unione.

I differenti modi di rottura sono illustrati in figura 8.3.

Avendo lo spessore dell'elemento ligneo centrale ( $t_2$ ) pari a 160mm e la lunghezza di penetrazione del chiodo ( $t_1$ ) pari a 55mm:

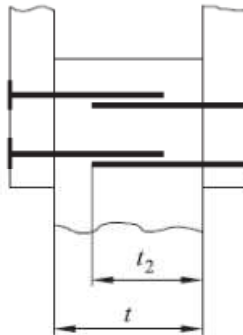


Figura 4.14: unione a doppio taglio acciaio-legno con chiodi [figura 8.5, UNI EN 1995-1-1]

Avendo calcolato la resistenza caratteristica al rifollamento ( $f_{h,2,k}$ ) come:

- Per chiodi aventi diametri fino a 8 mm, si applicano le seguenti resistenze caratteristiche a rifollamento per il legno e per l'LVL:

- senza preforatura

$$f_{h,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \text{ N/mm}^2 \quad (8.15)$$

- con preforatura

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k \text{ N/mm}^2 \quad (8.16)$$

dove:

$\rho_k$  è la massa volumica caratteristica del legno, in  $\text{kg/m}^3$ ;

$d$  è il diametro del chiodo, in mm.

si avrà:

$$f_{h,2,k} = 25,30 \text{ N/mm}^2$$

Avendo calcolato il momento caratteristico di snervamento ( $M_{y,Rk}$ ) come:

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3f_u d^{2,6} & \text{per chiodi a gambo cilindrico} \\ 0,45f_u d^{2,6} & \text{per chiodi a gambo quadro e scanalato} \end{cases}$$

dove:

$M_{y,Rk}$  è il valore caratteristico per il momento di snervamento, in Nmm;

$d$  è il diametro del chiodo, come definito nella EN 14592, in mm;

$f_u$  è la resistenza a trazione del filo, in N/mm<sup>2</sup>.

risulterà:

$$M_{y,Rk} = 7880 \text{ Nmm}$$

La capacità caratteristica ad estrazione viene calcolata come:

Per chiodi a gambo liscio:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{ax,k} dt + f_{head,k} d_h^2 \end{cases} \quad (8.24)$$

dove:

$f_{ax,k}$  è la resistenza caratteristica a estrazione, sul lato della punta;

$f_{head,k}$  è la resistenza caratteristica all'attraversamento dell'elemento da parte della testa, sul lato della testa del chiodo;

$d$  è il diametro del chiodo secondo il punto 8.3.1.1;

$t_{pen}$  è la lunghezza di penetrazione dal lato della punta, oppure la lunghezza della parte filettata inserita nell'elemento che riceve la punta;

$t$  è lo spessore dell'elemento dal lato della testa;

$d_h$  è il diametro della testa del chiodo.

Risulterà quindi:

$$F_{ax,Rk} = 562.50$$

$$f_{ax,k} = 5.00$$

$$f_{head,k} = 17.50$$

$$t_{pen} = 55$$

Inserendo i dati, si troveranno le 2 possibili capacità portanti:

$$(j) = 10119.36$$

$$(k) = 1764.29$$

Nel nostro caso, il valore minimo si avrà per la combinazione (k) perciò:

$$F_{v,Rk}=1764,29 \text{ N}$$

Il numero di chiodi che dovremo utilizzare a causa del taglio e del carico assiale dovuto al vento, sarà dato dal quoziente tra la forza combinata taglio (combinazione di carichi accidentali) e vento e la capacità portante effettiva (caso k):

$$F_{N+V} = \sqrt{V^2 + N^2}$$

$$V = 31440.31 \text{ N}$$

$$N = 0.00 \text{ N}$$

$$F_{(N+V)} = 31440.31 \text{ N}$$

$$N^\circ \text{ chiodi} = 17.8$$

$$N^\circ \text{ chiodi effettivo} = 18$$

Questi chiodi saranno posti al centro dell'arcareccio.

Il numero di chiodi che dovremo utilizzare a causa del momento di trasporto sarà dato dal quoziente tra il taglio massimo dovuto dal momento ( $V_m$ ) e la capacità portante effettiva (caso k), avendo calcolato  $V_m$  come:

$$V_m = \frac{V \cdot e}{d}$$

con:

- $V$       taglio massimo
- $e$       eccentricità pari a 52 mm
- $d$       braccio della coppia interna pari a 60 mm

Quindi si avrà:

$$V_m = 27248.27 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk} = 1764.3 \text{ N}$$

$$N^\circ \text{ chiodi} = 15.4$$

$N^\circ$  chiodi effettivo = 16 (Questi chiodi saranno fissati all'estremità dell'arcareccio)

### Scarpa – trave principale

Le modalità di rottura sono evidenziate in figura:

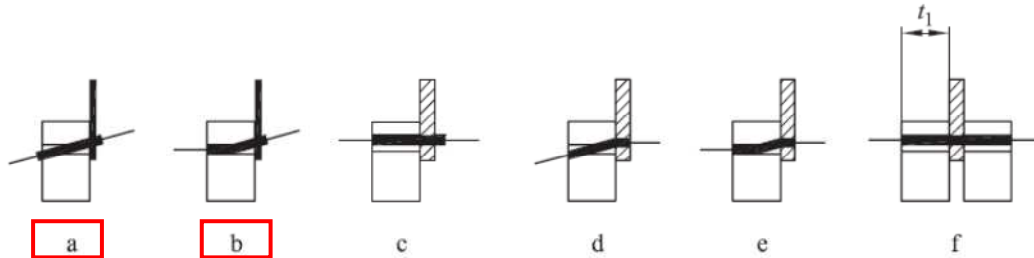


Figura 4.15: Criteri di rottura unioni acciaio-legno [figura 8.3, UNI EN 1995-1-1]

con le seguenti capacità portanti caratteristiche:

$$F_{v,Rk} = \min. \begin{cases} 0,4 f_{h,k} t_1 d & (a) \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \end{cases} \quad (8.9)$$

dove:

$F_{v,Rk}$  è la capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione;

$f_{h,k}$  è la resistenza caratteristica a rifollamento nell'elemento ligneo;

$t_1$  è il più piccolo degli spessori dell'elemento dal lato legno, oppure la profondità di penetrazione;

$t_2$  è lo spessore dell'elemento ligneo centrale;

$d$  è il diametro del mezzo di unione;

$M_{y,Rk}$  è il momento caratteristico di snervamento, per il mezzo di unione;

$F_{ax,Rk}$  è la capacità caratteristica a estrazione, per il mezzo di unione.

I differenti modi di rottura sono illustrati in figura 8.3.

Avendo calcolato la resistenza caratteristica al rifollamento ( $f_{h,k}$ ) come:

- Per chiodi aventi diametri fino a 8 mm, si applicano le seguenti resistenze caratteristiche a rifollamento per il legno e per l'LVL:

- senza preforatura

$$f_{h,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \text{ N/mm}^2 \quad (8.15)$$

- con preforatura

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k \text{ N/mm}^2 \quad (8.16)$$

dove:

$\rho_k$  è la massa volumica caratteristica del legno, in  $\text{kg/m}^3$ ;

$d$  è il diametro del chiodo, in mm.

si troverà:

$$f_{h,k} = 25.30 \text{ N/mm}^2$$

Avendo calcolato il momento caratteristico di snervamento ( $M_{y,Rk}$ ) come:

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 f_u d^{2,6} & \text{per chiodi a gambo cilindrico} \\ 0,45 f_u d^{2,6} & \text{per chiodi a gambo quadro e scanalato} \end{cases}$$

dove:

$M_{y,Rk}$  è il valore caratteristico per il momento di snervamento, in Nmm;

$d$  è il diametro del chiodo, come definito nella EN 14592, in mm;

$f_u$  è la resistenza a trazione del filo, in  $\text{N/mm}^2$ .

si avrà:

$$M_{y,Rk} = 7880 \text{ Nmm}$$

e la capacità caratteristica ad estrazione come:

Per chiodi a gambo liscio:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{ax,k} d t + f_{head,k} d_h^2 \end{cases} \quad (8.24)$$

dove:

$f_{ax,k}$  è la resistenza caratteristica a estrazione, sul lato della punta;

$f_{head,k}$  è la resistenza caratteristica all'attraversamento dell'elemento da parte della testa, sul lato della testa del chiodo;

$d$  è il diametro del chiodo secondo il punto 8.3.1.1;

$t_{pen}$  è la lunghezza di penetrazione dal lato della punta, oppure la lunghezza della parte filettata inserita nell'elemento che riceve la punta;

$t$  è lo spessore dell'elemento dal lato della testa;

$d_h$  è il diametro della testa del chiodo.

avremo:

$$F_{ax,Rk} = 755.00$$

$$f_{ax,k} = 5.00$$

$$f_{head,k} = 17.50$$

$$t_{pen} = 55$$

Inserendo i dati, si troveranno le 2 possibili capacità portanti:

$$(a) = 2782.82$$

$$(b) = 1812.41$$

Nel nostro caso, il valore minimo si avrà per la combinazione (b) perciò:

$$F_{V,Rk} = 1812.41 \text{ N}$$

Il numero di chiodi che dovremo utilizzare a causa del taglio sarà dato dal quoziente tra il taglio massimo (nel nostro caso nella combinazione carichi accidentali SLU) e la capacità portante effettiva (caso k):

$$V = 31440.31 \text{ N}$$

$$F_{V,Rk} = 1812.4 \text{ N}$$

$$N^{\circ} \text{ chiodi} = 17.3$$

$$N^{\circ} \text{ chiodi effettivo} = 18$$

## Verifica di resistenza al vento

### Vento in direzione delle travi principali – Arcarecci tensoinflexi

Viene ora verificata la sezione di legno dell'arcareccio sotto l'azione del vento e dei carichi statici con combinazione accidentale, calcolando i seguenti parametri:

- carico del vento: pressione laterale con vento in direzione della trave, pari a:

$$q_{\text{vento}} = 0,00023 \text{ N/mm}^2$$

avendo considerato il carico originale di 0,00045 N/mm<sup>2</sup> dimezzato per la presenza di due sistemi di controventatura.

Si considerano:

- area di influenza del travetto più sfavorito calcolata come prodotto tra l'interasse tra i travetti e l'altezza media di influenza del carico del vento:

$$A_{\text{influenza}} = 13650000 \text{ mm}^2$$

- forza assiale di trazione agente sul travetto:

$$N = 3103,83 \text{ N}$$

calcolata come:

$$N = \frac{q_{\text{vento}}}{A_{\text{influenza}}}$$

- area dell'arcareccio:

$$A_{\text{arcareccio}} = 44800 \text{ mm}^2$$

Si trova quindi uno sforzo di trazione calcolato come:

$$\sigma = \frac{N}{A_{\text{arc}}}$$

pari a:

$$\sigma_t = 0,069 \text{ MPa}$$



Lo sforzo dato dai carichi statici verticali è:

$$\sigma_{\max} = 11,21 \text{ MPa}$$

La verifica a tensoflessione sarà:

**Flessione e trazione assiale combinate (tensoflessione)**

(1)P Devono essere soddisfatte le seguenti espressioni:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.17)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.18)$$

(2) Si applicano i valori di  $k_m$  forniti nel punto 6.1.6.

Con:

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{mk} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

$$f_{m,d} = 15.58 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = 10.92 \text{ MPa}$$

$$k_m = 0.7$$

$$\sigma_z = 0$$

$$\text{Verifica} = 0.51 < 1$$

**Verificato**

Vento in direzione ortogonale alle travi – Arcarecci Pressoinflessi

Viene ora verificata la sezione di legno dell'arcareccio sotto l'azione del vento e dei carichi statici con combinazione accidentale, calcolando i seguenti parametri:

- carico del vento in direzione ortogonale alle travi, considerando metà del carico totale per la presenza di due sistemi di controventatura, pari a:

$$q_{\text{vento}} = 0,00055 \text{ N/mm}^2$$

avendo considerato il carico originale di 0,001101 N/mm<sup>2</sup> dimezzato per la presenza di due sistemi di controventatura.

- Altezza media di influenza del carico del vento per ottenere un carico lineare:

$$h_{\text{med}} = 6500 \text{ mm}$$

- forza assiale di compressione agente sul travetto:

$$R' = 41133,14 \text{ N}$$

calcolata come:

$$R' = q_{\text{vento}} * h_{\text{med}} * l_{\text{trave}}$$

- area dell'arcareccio:

$$A_{\text{arcareccio}} = 44800 \text{ mm}^2$$

Si trova uno sforzo di compressione calcolato come:

$$\sigma = \frac{R'}{A_{\text{arc}}}$$

pari a:

$$\sigma_c = 0,918 \text{ MPa}$$

Lo sforzo dato dai carichi statici verticali è:

$$\sigma_m = 11,21 \text{ MPa}$$

La verifica a pressoflessione sarà:

**Flessione e compressione assiale combinate (pressoflessione)**

(1)P Devono essere soddisfatte le seguenti espressioni:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

(2)P Si applicano i valori di  $k_m$  forniti nel punto 6.1.6.

Con:

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{mk} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

$$f_{md} = 15.7 \text{ MPa}$$

$$f_c = 14.8 \text{ MPa}$$

$$k_m = 0.7$$

$$\sigma_z = 0 \text{ MPa}$$

$$\text{Verifica} = 0.5 < 1$$

**Verificato**

#### 4.1.3.6. Travi principali

La trave principale è in legno lamellare di luce pari a 23 metri tra i due appoggi. Ha un raggio di curvatura medio  $r_m = 25,36$  metri. Ai fini del calcolo con un software di modellazione strutturale ad elementi finiti (SAP2000), è stata schematizzata come un elemento discretizzato in 45 segmenti di lunghezza diversa vincolato agli estremi con i vincoli ideali di cerniera-cerniera.

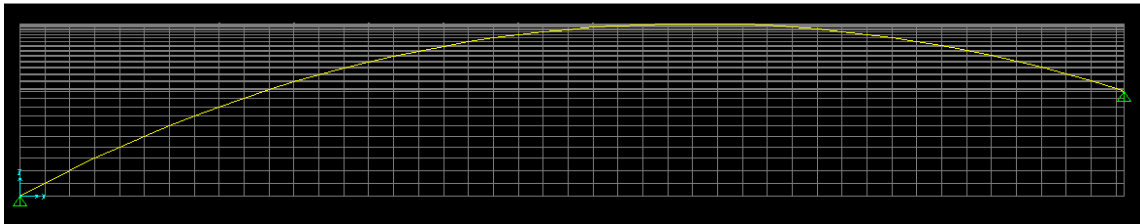


Figura 4.16: Schematizzazione struttura

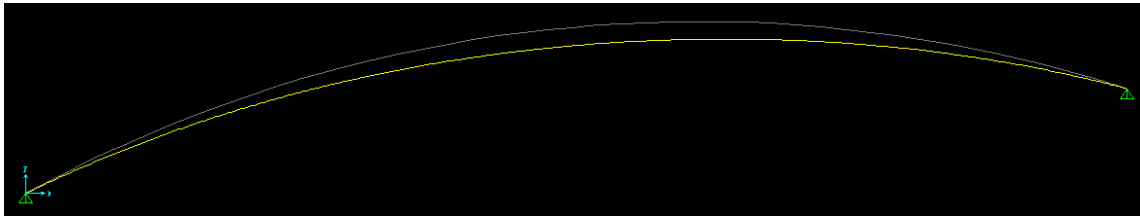


Figura 4.17: Diagramma deformata

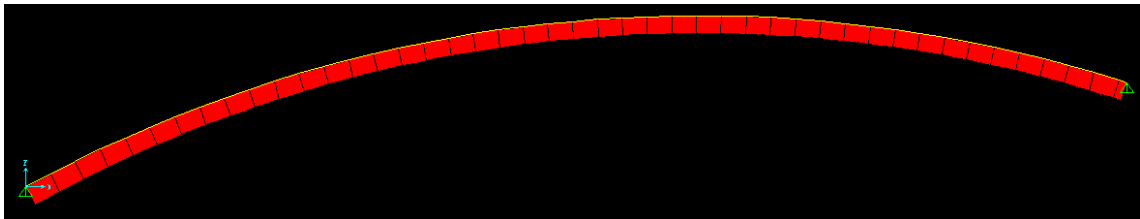


Figura 4.18: Diagramma azione assiale (N)

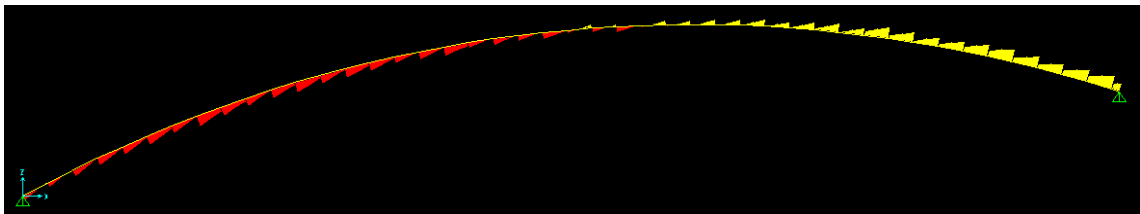


Figura 4.19: Diagramma azione di taglio

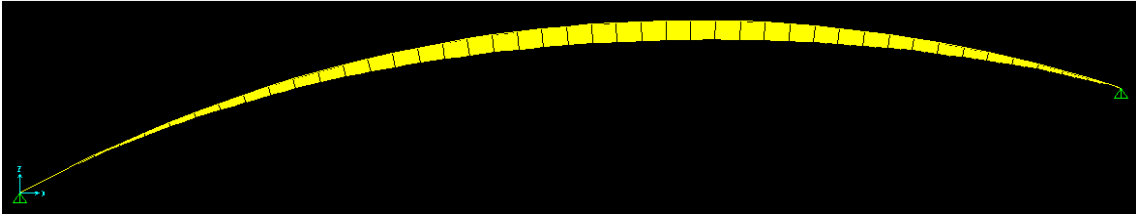


Figura 4.20: Diagramma momento flettente

Caratteristiche dimensionali della trave:

L	23000	mm
b	180	mm
h	920	mm
i	3000	mm
$r_{in,max}$	24900	mm
I	1.17E+10	mm <sup>4</sup>
E	12600	mm <sup>2</sup>
$I_{tor}$	2.74E+10	mm <sup>4</sup>
$I_z$	4.47E+08	mm <sup>4</sup>

Tabella 4.12: Caratteristiche dimensionali trave principale

### Verifiche SLE

Combinazione di carico:

$$g+g' = 0.00250 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 7.49100 \text{ N/mm}$$

Immettendo i carichi nel software viene restituito il valore di deformazione istantanea  $w_{inst}$ . Si confronta con i valori limite:

valori limite SLE	
$w_{inst} < L / 300$	76.67
$w_{inst} < L / 500$	46.00
$w_{fin} < L / 150$	153.33
$w_{fin} < L / 300$	76.67

Tabella 4.13: valori limite  $w_{inst}$ ,  $w_{fin}$

$$w_{\text{inst}} = 1.71 \text{ mm}$$

**Verificato**

Si calcola ora la deformazione finale a partire da quella istantanea tramite il coefficiente  $k_{\text{def}}$ :

$$k_{\text{def}} = 0.8 \text{ (classe di servizio 2)}$$

$$w_{\text{fin}} = w_{\text{inst}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) = 3.08 \text{ mm}$$

**Verificato**

### Verifiche di stabilità (travi soggette a flessione o pressoflessione)

La stabilità laterale torsionale deve essere verificata sia nel caso in cui esista solo un momento  $M_y$  intorno all'asse forte  $y$  sia nel caso in cui esista una combinazione fra momento  $M_y$  e forza di compressione  $N_c$ .

Nel presente caso è opportuno eseguire tale verifica in quanto sono molto rilevanti sia gli sforzi di flessione che di compressione nella trave curva. Ciò è dovuto alla grande luce libera e ai vincoli cerniera che non permettono la traslazione orizzontale dell'elemento. La verifica viene ripetuta anche rispetto all'asse verticale per controllare che la trave non incorra in fenomeni di sbandamento laterale.

Si calcola inizialmente la snellezza relativa per la flessione:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

Dove:

- $f_{m,k}$  è la resistenza a flessione del materiale
- $\sigma_{m,crit}$  è la tensione critica a flessione così calcolata:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y}$$

$$W_y = \frac{2 * I}{h}$$

$$M_{y,crit} = \frac{\pi \sqrt{G_{0,05} E_{0,05} I_{tor} I}}{l_{ef}}$$

Con:

- $E_{0,05}$  valore di quinto percentile del modulo elastico parallelo alle fibre (caratteristica del materiale)
- $G_{0,05} = (E_{0,05}/E)*G$  valore di quinto percentile del modulo di taglio parallelo alle fibre
- $l_{ef} = (1.25 * l)/2$  lunghezza efficace della trave<sup>8</sup> (trave curva a due cerniere)

$l_{ef}$	14562.5	mm
$W_y$	2.54E+07	mm <sup>3</sup>
$E_{0,05}$	10200	MPa
$G_{0,05}$	631.43	MPa

<sup>8</sup> M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena, *Strutture in legno*, Hoepli, Milano, 2009, pag. 451

$M_{y,crit}$	9.79E+09	Nmm
$\sigma_{m,crit}$	385.70	N/mm <sup>2</sup>
$\lambda_{rel,m}$	0.27	-

Tabella 4.14: Parametri per il calcolo di  $\lambda_{rel,m}$ 

Si può valutare così  $k_{crit}$ , coefficiente che tiene conto della resistenza a flessione ridotta dovuta allo sbandamento laterale:

$$k_{crit} = 1 \quad (\lambda_{rel,m} < 0,75)$$

Nel caso in cui esista una combinazione fra momento  $M_y$  intorno all'asse forte  $y$  e forza di compressione  $N_c$ , si raccomanda che le tensioni soddisfino la seguente espressione:

$$\left( \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1$$

Dove:

- $\sigma_{m,d}$  è la tensione a flessione di progetto
- $\sigma_{c,0,d}$  è la tensione a compressione di progetto parallela alle fibre
- $f_{c,0,d}$  è la resistenza di progetto a compressione parallela alle fibre
- $k_{c,y}$  è definito dalle seguenti espressioni (a seconda dell'asse rispetto al quale viene eseguito il calcolo):

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$$



Con i seguenti rapporti di snellezza:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

e

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

Direzione longitudinale (asse y): Considero come lunghezza di libera inflessione, il 90% dell'intera luce dell'arco per considerare la maggiore difficoltà di un arco a flettersi rispetto ad una trave rettilinea.

$\sigma_{m,d}$	7.48	MPa
$k_{crit}$	1.00	-
$f_{md}$	20.16	MPa
$\sigma_{c,0,d}$	8.16	MPa
$k_{crit,y}$	0.551	-
$f_{c,0,d}$	19.08	MPa
$k_y$	1.35	-
$\lambda_{rel,y}$	1.26	-
$\beta_c$	0.10	-
$\lambda_z$	77.94	-
$f_{c,0,k}$	26.5	MPa
Verifica	0.91	$\leq 1$

**Tabella 4.15: Verifica stabilità longitudinale**

Direzione trasversale (asse z): Come lunghezza di libera inflessione prendo l'interasse degli arcarecci che considero elementi stabilizzanti. Lo faccio perché il momento tende le fibre inferiori della trave e comprime quelle superiori perciò il contributo instabilizzante dovuto alla compressione è maggiore nel lembo superiore (in cui vi sono gli arcarecci).

$\sigma_{m,d}$	7.48	MPa
$k_{crit}$	1.00	-
$f_{md}$	20.16	MPa
$\sigma_{c,0,d}$	8.16	MPa
$k_{crit,z}$	0.944	-
$f_{c,0,d}$	19.08	MPa
$k_z$	0.73	-
$\lambda_{rel,z}$	0.66	-
$\beta_c$	0.10	-
$\lambda_z$	40.41	-
$f_{c,0,k}$	26.5	MPa
Verifica	0.591	$\leq 1$

**Tabella 4.16: Verifica stabilità trasversale**

## Verifiche SLU

Si verifica la sezione a pressoflessione, trazione perpendicolare alle fibre e taglio.

Utilizzando i medesimi coefficienti parziali delle verifiche dell'arcareccio, si analizzano due diverse combinazioni di carico:

### Combinazione di carichi permanenti

$$\gamma_g g + \gamma_g g' = 0.0037 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 11.0840 \text{ N/mm}$$

Il valore del momento massimo e dello sforzo assiale saranno i seguenti, calcolati con l'ausilio del programma SAP 2000:

$$M_{\max} = 1.06E+08 \text{ Nmm}$$

$$N = 7.64E+05 \text{ N}$$

Si calcolano gli sforzi di flessione, compressione e trazione perpendicolare alle fibre che dovranno soddisfare le verifiche rispetto ai valori limite:

$\sigma_{m,\max}$	4.22	MPa	$< k_r \cdot f_{md}$	13.44	<b>Verificato</b>
$\sigma_{c,\max}$	4.61	MPa			
$\sigma_{t90d}$	0.03	MPa	$< k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90k}$	0.23	<b>Verificato</b>

**Tabella 4.17: Verifica SLU con carichi permanenti**

dove:

$$\sigma_{m,\max} = k_l \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} < k_{mod} f_{m,k} / \gamma_m \quad \text{con } M_{ap,d} = M_{\max}$$

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} < k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}$$

$$f_{md} = \frac{f_{mk} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \quad \text{con } k_{mod}=0.6 \text{ e } \gamma_m=1.25$$

È necessario valutare i coefficienti utilizzati nel calcolo,  $k_r$ ,  $k_l$ ,  $k_p$ ,  $k_{dis}$ ,  $k_{vol}$ .

$$k_r = k_1 + k_2 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^3$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha_{ap}$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \tan \alpha_{ap} - 7,8 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$r = r_{in} + 0,5 h_{ap}$$

dove:

$M_{ap,d}$  è il momento di progetto in corrispondenza del colmo;

$h_{ap}$  è l'altezza al colmo della trave, vedere figura 6.9;

$b$  è la larghezza della trave;

$r_{in}$  è il raggio interno, vedere figura 6.9;

$\alpha_{ap}$  è l'angolo di rastremazione al centro della zona di colmo, vedere figura 6.9.

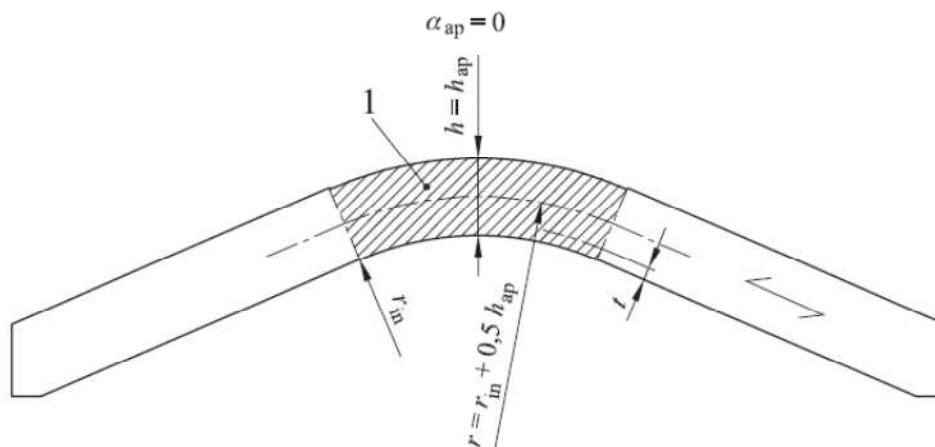


Figura 4.21: Travi curve [figura 6.9, UNI EN 1995-1-1]

Nel nostro caso abbiamo:

$k_1$	1.00
$k_2$	0.35
$k_3$	0.60
$r$ [mm]	25360
$h/r$	0.036
<b><math>k_r</math></b>	<b>1.013</b>
$\alpha_{ap}$	0

Tabella 4.18: Coefficiente  $k_r$

Il coefficiente  $k_r$  tiene conto della riduzione di resistenza dovuta alla piegatura delle lamelle durante la produzione e viene calcolato in funzione del raggio di curvatura interno  $r_{in}$  e dello spessore delle lamelle  $t$ :

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{per } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \frac{r_{in}}{t} & \text{per } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases}$$

$$r_{in}/t = 622.5$$

$$k_r = 1$$

Il coefficiente  $k_p$  è calcolato come:

$$k_p = k_5 + k_6 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2$$

$$k_5 = 0,2 \tan \alpha_{ap}$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \tan \alpha_{ap} + 2,6 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_7 = 2,1 \tan \alpha_{ap} - 4 \tan^2 \alpha_{ap}$$

Dove i singoli coefficienti, con  $\alpha_{ap}=0$  e  $h/r=0.032$ , assumono valori pari a:

$k_p$	0.009
$k_5$	0
$k_6$	0.25
$k_7$	0

Tabella 4.19: Coefficiente  $k_p$

I coefficienti  $k_{vol}$  e  $k_{dis}$  vengono ricavati dalla normativa tecnica in base alla tipologia del legno e alle dimensioni dell'elemento da verificare a trazione perpendicolare alle fibre:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}$$

con

$$k_{vol} = \begin{cases} 1,0 & \text{per legno massiccio} \\ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0,2} & \text{per legno lamellare incollato LVL avente tutti gli strati paralleli all'asse della trave} \end{cases}$$

$$k_{dis} = \begin{cases} 1,4 & \text{per travi a doppia rastremazione e curve} \\ 1,7 & \text{per travi centinate} \end{cases}$$

dove:

- $k_{dis}$  è un coefficiente che tiene conto dell'effetto della distribuzione della tensione nella zona di colmo;
- $k_{vol}$  è un coefficiente di volume;
- $f_{t,90,d}$  è la resistenza di progetto a trazione perpendicolare alla fibratura;
- $V_0$  è il volume di riferimento pari a 0,01 m<sup>3</sup>;
- $V$  è il volume sollecitato della zona di colmo, in metri cubi, (vedere figura 6.9) e si raccomanda che non sia assunto maggiore di  $2V_b/3$ , dove  $V_b$  è il volume totale della trave.

Si ottiene quindi:

$k_{dis}$	<b>1.4</b>
$k_{vol}$	<b>0.366</b>
$V_0$ [mm <sup>3</sup> ]	10000000
$V$ [mm <sup>3</sup> ]	1523520000

Tabella 4.20: Coefficienti  $k_{dis}$ ,  $k_{vol}$

Verificate la sezione sotto le diverse azioni prese singolarmente, bisogna verificarla in presenza della combinazione degli sforzi di compressione e flessione (pressoflessione):

**Flessione e compressione assiale combinate (pressoflessione)**

(1)P Devono essere soddisfatte le seguenti espressioni:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

(2)P Si applicano i valori di  $k_m$  forniti nel punto 6.1.6.

Dove:

- $\sigma_{c,0,d}$  è lo sforzo di progetto a compressione
- $\sigma_{m,y,d}$  è lo sforzo di progetto a flessione
- $f_{c,0,d}$  è la resistenza a compressione di progetto parallela alle fibre (  $f_{c,0,d}=k_{mod} * f_{c,0,k} / \gamma_m$  )
- $f_{m,y,d}$  è la resistenza di progetto a flessione parallela alle fibre (  $f_{m,y,d}=k_{mod} * f_{m,k} / \gamma_m$  )

Inserendo i valori nelle due espressioni per le verifiche a pressoflessione si ottiene:

$f_{md}$	13.44	MPa
$f_{cd}$	12.72	MPa

$k_m$	0.70	
verifica1	0.35	$\leq 1$
verifica2	0.45	$\leq 1$

**Tabella 4.21: verifica pressoflessione combinazione carichi permanenti**

### Verificato

Si verifica ora la sezione al taglio massimo ricavato dall'analisi della trave con SAP 2000. Lo sforzo massimo relativo sarà pari a:

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \frac{V_{max}}{b_{crit} \cdot h} < f_{vk} k_{mod} / \gamma_m$$

Con  $b_{crit} = 0.65 \cdot b$  per considerare la fessurazione alla quale sono soggetti gli elementi inflessi<sup>9</sup>.

$V_{max}$	25903	N		
$b_{cr}$	120.6	mm		
$T_{max}$	0.3502	MPa	$< f_{vk} \cdot k_{mod} / \gamma_m$	1.5360

**Tabella 4.22: Verifica al taglio combinazione carichi permanenti**

### Verificato

<sup>9</sup> UNI EN 1995-1-1 (Eurocodice 5-1), par. 6.1.7

Combinazione carichi accidentali

$$Y_g g + Y_g g' + Y_q q = 0.0104 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 31.3340 \text{ N/mm}$$

Le verifiche si svolgono in modo analogo a quelle svolte per la combinazione di carichi permanente.

Le azioni agenti sono ricavate dal software SAP2000:

$$M_{\max} = 1.87E+08 \text{ Nmm}$$

$$N = 1.35E+06 \text{ N}$$

Si calcolano gli sforzi e si confrontano con i valori limite:

$\sigma_{m,\max}$	6.86	MPa	$< k_r \cdot f_{md}$	20.16	<b>Verificato</b>
$\sigma_{c,\max}$	7.82	MPa			
$\sigma_{t90d}$	0.06	MPa	$< k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90k}$	0.23	<b>Verificato</b>

**Tabella 4.23: verifica flessione e trazione perpendicolare alle fibre**

Si verifica la sezione a pressoflessione:

$f_{md}$	20.16	MPa
$f_{cd}$	19.08	MPa
$k_m$	0.70	
verifica1	0.41	$\leq 1$
verifica2	0.51	$\leq 1$

**Tabella 4.24: Verifica a pressoflessione combinazione carichi accidentali**

**Verificato**

Si verifica la sezione al taglio:

$V_{\max}$	45801	N		
$b_{cr}$	120.6	mm		
$T_{\max}$	0.593	MPa	$< f_{vk} \cdot K_{mod} / \gamma_m$	2.304

**Tabella 4.25: verifica al taglio combinazione carichi accidentali**

**Verificato**



### Verifica al fuoco

Come per la verifica degli arcarecci applico il metodo della sezione ridotta considerando i medesimi parametri:

$\beta_n$ [mm/min]	0.7
$d_0$ [mm]	7
$t$ [min]	60
$k_0$	1
$d_{char,n}$ [mm]	42

**Tabella 4.26: Parametri sezione ridotta**

La combinazione delle azioni per la verifica al fuoco considera i carichi permanenti e i permanenti non strutturali tralasciando i carichi variabili:

$$g+g' = 0.00250 \text{ N/mm}^2$$

$$q = 7.49100 \text{ N/mm}$$

La sezione ridotta ha le seguenti caratteristiche:

$$b' = 82 \text{ mm}$$

$$h' = 871 \text{ mm}$$

$$I' = 4.52E+09 \text{ mm}^4$$

dove:

$$b' = b - 2 \cdot (d_{char,n} + k_0 d_0)$$

$$h' = h - (d_{char,n} + k_0 d_0)$$

$$I' = \frac{b' h'^3}{12}$$

Inserendo i nuovi carichi in SAP2000 si ottengono i valori delle azioni M, V, N:

$$M_{\max} = 9.13E+07 \text{ Nmm}$$

$$N_{\max} = 6.58E+05 \text{ N}$$

$$V_{\max} = 2.23E+04 \text{ N}$$

Si calcolano le resistenze al 20% frattile a temperatura normale:

$$f_{m20} = 32.2 \text{ MPa}$$

$$f_{c20} = 30.475 \text{ MPa}$$

Con  $k_{mod,f} = 1$  si verificano gli sforzi nella sezione:

$\sigma_{m,max}$	8.92	MPa	$< k_r \cdot f_{md}$	32.20	<b>Verificato</b>
$\sigma_{c,max}$	9.21	MPa			
$\sigma_{t90d}$	0.08	MPa	$< k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t90k}$	0.23	<b>Verificato</b>

**Tabella 4.27: verifica flessione e trazione perpendicolare alle fibre**

Con  $k_m=1$  si verifica la sezione presso inflessa:

verifica1	0.29	$\leq 1$
verifica2	0.37	$\leq 1$

**Tabella 4.28: verifica pressoflessione**

**Verificato**

Verifica della sezione al taglio:

$f_{v20}$	3.68	MPa	
$T_{max}$	0.721	$< f_{v20} \cdot k_{mod,t} / \gamma_m$	3.68

**Tabella 4.29: verifica al taglio**

**Verificato**

## Verifica dei collegamenti

### Cerniera - unione bullonata

Si realizza l'unione per mezzo di una piastra a scomparsa all'interno della sezione della trave e spinotti. Si ricade perciò nel caso di unione acciaio-legno di spessore qualsiasi interposta come elemento centrale di una connessione a doppio taglio.

$H = 400 \text{ mm}$

$B = 920 \text{ mm}$

$S = 10 \text{ mm}$

Spinotti M27 di classe 4.8 e resistenza a trazione  $f_{uk}=400 \text{ N/mm}^2$ .

Le modalità di rottura sono segnalate nella figura seguente:

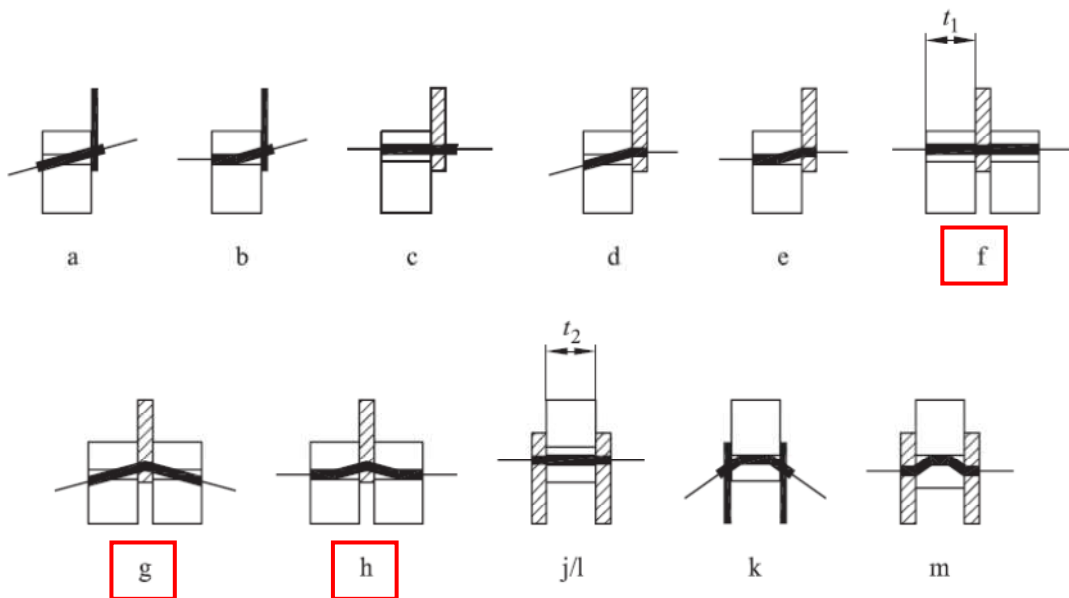


Figura 4.22: Criteri di rottura unioni acciaio-legno [figura 8.3, UNI EN 1995-1-1]

Con le seguenti capacità portanti caratteristiche:

- Per una piastra di acciaio di qualsiasi spessore interposta come elemento centrale di una connessione a doppio taglio:

$$F_{v,Rk} = \min. \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(f)} \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(g)} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(h)} \end{cases} \quad (8.11)$$

dove:

$F_{v,Rk}$  è la capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione;

$f_{h,k}$  è la resistenza caratteristica a rifollamento nell'elemento ligneo;

$t_1$  è il più piccolo degli spessori dell'elemento dal lato legno, oppure la profondità di penetrazione;

$t_2$  è lo spessore dell'elemento ligneo centrale;

$d$  è il diametro del mezzo di unione;

$M_{y,Rk}$  è il momento caratteristico di snervamento, per il mezzo di unione;

$F_{ax,Rk}$  è la capacità caratteristica a estrazione, per il mezzo di unione.

avendo calcolato la resistenza caratteristica a rifollamento nell'elemento ligneo ( $f_{h,\alpha,k}$ ) come:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (8.31)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (8.32)$$

dove:

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{per legno di conifere} \\ 1,30 + 0,015d & \text{per LVL} \\ 0,90 + 0,015d & \text{per legno di latifoglie} \end{cases} \quad (8.33)$$

e:

$f_{h,0,k}$  è la resistenza caratteristica a rifollamento, parallelamente alla fibratura, in N/mm<sup>2</sup>;

$\rho_k$  è la massa volumica caratteristica del legno, in kg/m<sup>3</sup>;

$\alpha$  è l'angolo formato dalla retta di azione del carico e la fibratura;

$d$  è il diametro del bullone, in mm.

Considerando la combinazione dell' azione assiale e del taglio, si ha un angolo tra la retta di azione del carico risultante e la fibratura pari ad  $\alpha=2,00^\circ$ ; si avrà quindi:

$$f_{h,2,k} = 29.90$$

$$k_{90} = 1.76$$

$$a = 2.00$$

$$f_{n,a,k} = 18.41$$

Il momento caratteristico di snervamento è dato dalla seguente formula in base alla tipologia di mezzo di unione, lo spinotto, assimilabile al chiodo dal punto di vista del calcolo:

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 f_u d^{2,6} & \text{per chiodi a gambo cilindrico} \\ 0,45 f_u d^{2,6} & \text{per chiodi a gambo quadro e scanalato} \end{cases}$$

dove:

$M_{y,Rk}$  è il valore caratteristico per il momento di snervamento, in Nmm;

$d$  è il diametro del chiodo, come definito nella EN 14592, in mm;

$f_u$  è la resistenza a trazione del filo, in N/mm<sup>2</sup>.

ci porterà ad avere:

$$M_{y,Rk} = 632014 \text{ Nmm}$$

Si calcola la capacità caratteristica ad estrazione ( $F_{ax,Rk}$ ):

- Per chiodi a gambo liscio:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{ax,k} d t + f_{head,k} d_n^2 \end{cases} \quad (8.24)$$

dove:

$f_{ax,k}$  è la resistenza caratteristica a estrazione, sul lato della punta;

$f_{head,k}$  è la resistenza caratteristica all'attraversamento dell'elemento da parte della testa, sul lato della testa del chiodo;

$d$  è il diametro del chiodo secondo il punto 8.3.1.1;

$t_{pen}$  è la lunghezza di penetrazione dal lato della punta, oppure la lunghezza della parte filettata inserita nell'elemento che riceve la punta;

$t$  è lo spessore dell'elemento dal lato della testa;

$d_n$  è il diametro della testa del chiodo.

con:

$$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2$$

$$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2$$

Quindi si avrà:

$$f_{ax,k} = 5$$

$$f_{head,k} = 17.5$$

$$t = 27 \text{ mm}$$

$$t_{pen} = 180$$

$$d_h = 27 \text{ mm}$$

$$F_{ax,Rk} = 16402.5$$

Si può infine calcolare la capacità portante caratteristica del mezzo di unione  $F_{V,Rk}$  applicando le formule relative ai tre criteri di rottura (f), (g), (h) e prendendo il valore minimo tra essi:

$$(f) = 89477.43 \text{ N}$$

$$(g) = 46035.18 \text{ N}$$

$$(h) = 44867.92$$

$$F_{v,Rk} = 44867.92 \text{ N}$$

Per trovare il numero di spinotti da utilizzare, combino le azioni agenti (N e V) ottenendo l'azione totale agente e divido per la capacità portante caratteristica (caso h) del singolo spinotto (il numero ottenuto viene approssimato per eccesso ad un valore intero):

$$N = 1350562 \text{ N}$$

$$V = 45801 \text{ N}$$

$$\text{Angolo} = 0.03$$

$$F_{comb} = 1351338 \text{ N}$$

$$N^\circ \text{ bulloni} = 30.1$$

$$N^\circ \text{ bulloni effettivo} = 31$$

Si utilizzano perciò 31 spinotti M27 (classe 4.8)

La spaziatura tra i connettori è stata ricavata tramite le seguenti formule (con  $\alpha$  = angolo tra la retta di azione del carico e la fibratura = 0):

prospetto 8.5 Valori minimi di spaziature e distanze da bordi ed estremità, per spinotti

Spaziature e distanze da bordi/estremità (vedere figura 8.7)	Angolo	Minima spaziatura o distanza da bordo/estremità
$a_1$ (parallela alla fibratura)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2  \cos \alpha ) d$
$a_2$ (ortogonale alla fibratura)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (estremità sollecitata)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	max. (7 d ; 80 mm)
$a_{3,c}$ (estremità scarica)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	max. ( $a_{3,t}  \sin \alpha $ ) d ; 3d
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	3d
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	max. ( $a_{3,t}  \sin \alpha $ ) d ; 3d
$a_{4,t}$ (bordo sollecitato)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	max. ([2 + 2 sin $\alpha$ ] d ; 3d)
$a_{4,c}$ (bordo scarico)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3d

Figura 4.23: Valori minimi di spaziature e distanze da bordi ed estremità [prospetto 8.5, UNI EN 1995-1-1]

Si ottiene allora, con  $d=27$  mm:

$$a_1 = 135 \text{ mm}$$

$$a_2 = a_{3,c} = a_{4,c} = 81 \text{ mm}$$

#### 4.1.3.7. Comportamento al sisma

Si cerca ora di capire, in modo sintetico, quale sia il comportamento delle strutture in legno sottoposte ad azioni sismiche. Per introdurre le riflessioni a questo tema si parte dalle considerazioni relative alle figure riportate di seguito:



Figura 4.24: pagoda del tempio di Horyu-Ji a Nara  
(Giappone)



Figura 4.25: Terremoto di Kobe (Giappone)

Nelle immagini si può vedere un comportamento diametralmente opposto di costruzioni in legno sottoposte al sisma. La prima foto rappresenta una Pagoda giapponese, costruzione storica con più di 14 secoli di vita e alta 31,5m la quale, nonostante sia localizzata in un paese soggetto a frequenti sollecitazioni sismiche, non ha mai riportato nel corso degli anni alcun danno strutturale per tale causa. Nella foto accanto è invece possibile osservare un intero quartiere costituito da abitazioni di legno, completamente danneggiato dal sisma durante il terremoto di Kobe del 1995.

Queste immagini contrapposte mostrano il fatto che una costruzione in legno a priori non è “sismoresistente” ma lo diviene nel momento in cui si effettua una corretta progettazione e un’altrettanta attenta esecuzione.

Il legno è generalmente un materiale che presenta caratteristiche di leggerezza e resistenza ma al sisma si comporta in modo fragile in quanto i carichi di breve durata (è il caso dell’azione sismica) tendono ad irrigidirlo non permettendo ad esso di dissipare energia (comportamento duttile). La duttilità statica è espressa dal rapporto tra la deformazione ultima e la deformazione alla fine del comportamento elastico.

Sapendo che le forze sismiche su una struttura possono essere calcolate mediante la legge di Newton ( $F=m*a$ ), se una struttura è realizzata con materiale leggero, come il legno, avrà minori masse e quindi ci saranno in gioco minori forze sismiche. Ad esempio il legno massiccio di conifera ha un peso specifico intorno ai 500 kg/m<sup>3</sup> e questo significa che il rapporto peso specifico/resistenza è simile a quello dell’acciaio ed è 5 volte inferiore a quello del calcestruzzo.



Altro aspetto di massima è che le strutture rigide, per loro proprietà meccaniche, sono interessate da forze sismiche superiori a strutture flessibili e deformabili com'è il caso del legno (ciò è rilevabile anche in natura confrontando la sollecitazione del vento che colpisce alberi ad alto fusto oppure canne di bamboo). L'elevata flessibilità è traducibile in un aumento del periodo proprio di oscillazione e, quindi, in una minore suscettibilità della struttura nei confronti dell'azione sismica.

Le strutture in legno hanno una bassa capacità di dissipare energia e possono essere progettate in campo elastico. Le zone dissipative dovranno essere localizzate nei collegamenti che conferiscono alla struttura una duttilità concentrata. Per il collegamento della trave alla fondazione e al sostegno centrale si realizzano unioni con mezzi di unione a gambo cilindrico<sup>10</sup> quali gli spinotti (così come i bulloni, chiodi e viti). In generale un elemento si considera resistente se è in grado di sopportare sforzi elevati mentre se sotto sforzi relativamente bassi è in grado di deformarsi molto, si dice duttile. Per un buon comportamento all'azione sismica, bisogna soddisfare sia i requisiti di resistenza che di duttilità:

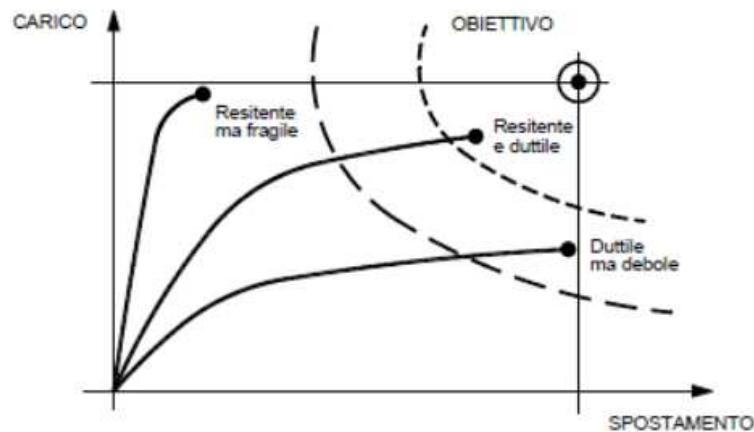


Figura 4.26: Curva carico-spostamento [M.A. Parisi, Corso di costruzioni in zona sismica, Lez. 24]

<sup>10</sup>DM 14/01/08 (NTC), cap. 7.7

Differenti tipologie di connettori hanno curve di comportamento meccanico al sisma diverse:

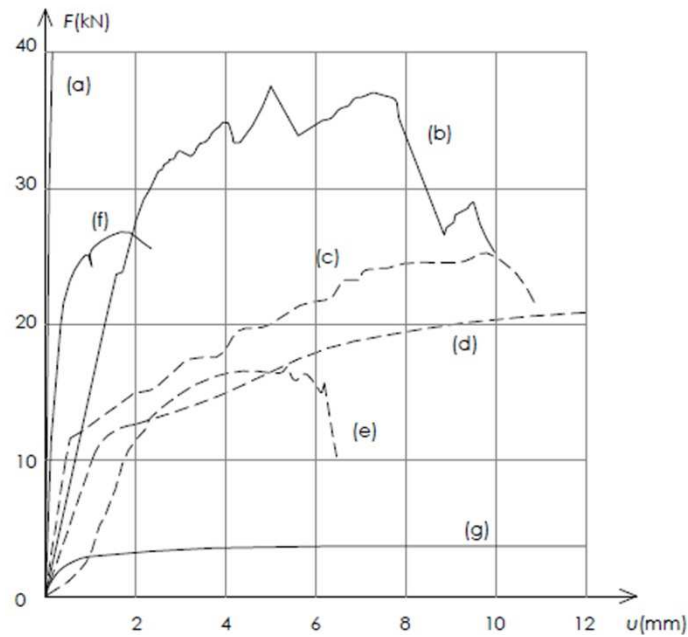


Figura 4.27: Curve carico-spostamento per differenti tipologie di connettori [M.A. Parisi, Corso di costruzioni in zona sismica, Lez. 24]

Dove:

- (a) collegamento incollato (12500 mm<sup>2</sup>)
- (b) anello (d=14 mm)
- (c) piastra dentata (d=62 mm)
- (d) perno (d=14 mm)
- (e) bullone (d=14 mm)
- (f) piastra stampata (100x100 mm)
- (g) chiodo (d=4,4 mm)

Il perno presenta quindi, rispetto al bullone, una resistenza simile ma maggiori risorse di duttilità. Nel caso di progetto il diametro dei collegamenti a gambo cilindrico è maggiore di 14 mm ma si assume quanto detto come criterio generale di scelta. La rottura duttile è caratterizzata dalla formazione di cerniere plastiche nei connettori. Aumentando la snellezza del perno aumenta anche la sua duttilità.



Figura 4.28: Duttilità delle connessioni a gambo cilindrico [M.A. Parisi, Corso di costruzioni in zona sismica, Lez. 24]

Al fine di ridurre i costi di produzione degli elementi, si introduce un fattore di struttura che permette di ridurre lo spettro di risposta in quanto si tiene in conto della possibilità, seppur ridotta, della struttura e dei suoi collegamenti, di dissipare energia. Il fattore di struttura si definisce come:

$$q = \frac{a_u}{a_y}$$

Con:

- $a_u$  accelerazione di picco del sisma, che porta la struttura al crollo
- $a_y$  accelerazione che porta la struttura al limite elastico

Il fattore di struttura è funzione sia del materiale impiegato, che della tipologia strutturale cioè lo schema statico con il quale la struttura viene identificata ai fini del calcolo. Una struttura iperstatica quale l'arco a due cerniere con mezzi di unione a gambo cilindrico è classificata, dalle NTC '08, come una struttura a scarsa capacità di dissipazione energetica (classe B) e viene attribuito un fattore di struttura pari a 1,5.

#### 4.1.3.8. Elementi di controvento in acciaio

##### Calcolo delle forze agenti

Per la verifica a trazione dei controventi vengono assunti i seguenti carichi agenti:

$q_v = 0.001101$  MPa      carico del vento

$q_d = 0.000000$  MPa      carico di sbandamento

$q_{tot} = 0.000550$  MPa      carico totale

dove:

- carico del vento: sommatoria del carico sopravvento e sottovento dimezzato, poiché vi sono due sistemi di controventatura.
- carico di sbandamento:

$$q_d = k_f \frac{n N_d}{k_{f,3} l}$$

dove:

$$k_f = \min. \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \sqrt{\frac{15}{l}} \end{array} \right.$$

$N_d$  è il valore di progetto della forza di compressione media nell'elemento;

$l$  è la luce totale del sistema di stabilizzazione, in m;

$k_{f,3}$  è un coefficiente di correzione.

dove:

$k_l$	0.026	-
$k_{f,3}$	30	-
n° travi	7	-
$M_d$	1.87E+08	Nmm
$N_d$	0.00	N
$\sigma_{m,crit}$	75.46	MPa
$E_{0,05}$	10200.00	MPa
$W_y$	2.54E+07	mm <sup>3</sup>
$l_{ef}$	14562.5	mm

$\lambda_{rel}$	0.61	-
$k_{cr}$	1.00	-

Tabella 4.30: Parametri per verifica sbandamento

I valori sono ottenuti con formule analoghe a quelle utilizzate nelle “verifiche di stabilità” della trave:

$$N_d = (1 - k_{crit}) \frac{M_d}{h}$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{per } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m} & \text{per } (0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4) \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{per } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{l_{ef} W_y} \quad (6.31)$$

dove:

$E_{0,05}$  è il valore di quinto percentile del modulo di elasticità parallelo alla fibratura;

$G_{0,05}$  è il valore di quinto percentile del modulo di taglio parallelo alla fibratura;

$I_z$  è il momento di inerzia intorno all'asse debole z;

$I_{tor}$  è il momento torsionale di inerzia;

$l_{ef}$  è la lunghezza efficace della trave, in funzione delle condizioni di appoggio e della configurazione del carico, secondo il prospetto 6.1;

$W_y$  è il modulo della sezione intorno all'asse forte y.

Il valore di  $N_d$  è nullo in quanto  $k_{crit}$  assume valore unitario, cioè si considera che non ci sia una forza assiale di compressione dovuta al momento massimo nella trave dato dalla combinazione di carichi accidentale.

Il carico totale  $q_{tot}$  è dato dalla media aritmetica del carico del vento e del carico di sbandamento. In questo caso è pari alla metà del solo carico del vento. Il sistema di controvento viene considerato come una trave su due appoggi e per questo motivo il carico viene diviso sui due appoggi in modo simmetrico.

Si possono quindi esprimere le combinazioni di carico allo SLU prendendo il valore maggiore tra la combinazione che considera il carico della neve completo e quello del vento dimezzato e quella che inverte tale situazione.

$$q_1 = 0.008170 \text{ N/mm}^2$$

$$q_2 = 0.010995 \text{ N/mm}^2$$

$$Q = 32.98 \text{ N/mm}$$

dove:

$$(q_1) = \gamma_g \cdot g + \gamma'_g \cdot g' + \gamma_q \cdot q$$

con il carico accidentale della neve moltiplicato per 0,5 e i carico del vento moltiplicato per 1.

$$(q_2) = \gamma_g \cdot g + \gamma'_g \cdot g' + \gamma_q \cdot q$$

con il carico accidentale della neve moltiplicato per 1 e i carico del vento moltiplicato per 0,5.

$$Q = \max(\text{carico1}; \text{carico2}) \cdot i$$

### Verifica cavo in acciaio teso

Si dimensiona il cavo in acciaio che costituisce l'elemento di controvento fissato con apposita piastra alla faccia inferiore delle scarpe metalliche di sostegno degli arcarecci. Essi sono considerati, per la presente verifica, come puntoni che formano con il cavo in acciaio un angolo di  $37^\circ$  (0,65 rad). La forza nel puntone  $R'$  si calcola moltiplicando il carico totale per la sua area di influenza verticale ottenuta come prodotto tra l'altezza media di applicazione del carico e metà luce dell'arco (sistema di controvento paragonato a trave su due appoggi). Dividendo  $R'$  per il coseno dell'angolo ( $40^\circ$ ) tra il puntone e il controvento si ottiene la forza  $S$  agente nel controvento (l'elemento obliquo):

$$S = \frac{R'}{\cos \alpha}$$

$$\alpha = 0.6458 \text{ rad}$$

$$R' = 41133.14 \text{ N}$$

$$S = 51504.25 \text{ N}$$

Ipotesizzando un cavo in acciaio di diametro  $\phi 18\text{mm}$  riesco a trovare lo sforzo nella sezione di acciaio dividendo la forza per l'area del cavo. Tale valore deve essere inferiore della resistenza a trazione di progetto dell'acciaio utilizzato calcolata come rapporto tra la resistenza caratteristica e il coefficiente di sicurezza  $\gamma_m$  pari a 1,05<sup>11</sup>:

$$f_{yk} = 275 \text{ MPa}$$

$$d = 18 \text{ mm}$$

$$\sigma = 202.40 \text{ MPa} < f_{yd} = f_{yk} / \gamma_m = 261.90 \text{ MPa}$$

**Verificato**

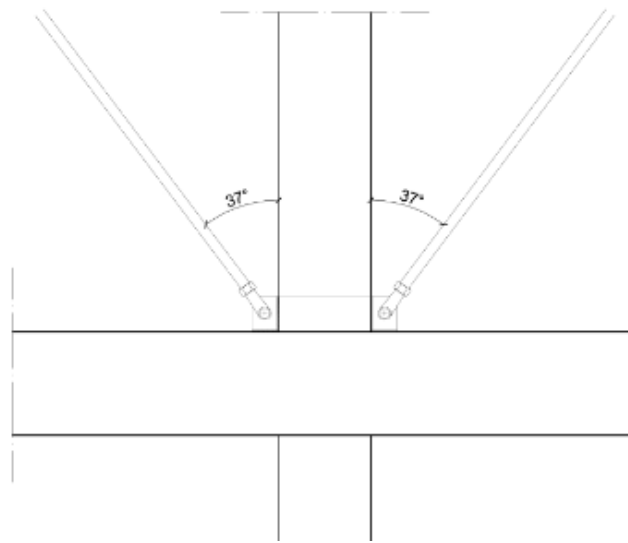


Figura 4.29: Controventi in acciaio [Tav. 4]

<sup>11</sup> D.M. 14/01/2008 (NTC), tabella 4.2.V

#### 4.1.4. Durabilità e protezione del legno

##### 4.1.4.1. Valutazione del tipo di rischio

Il degrado del legno avviene principalmente per attacchi biotici (funghi, insetti, ecc.) e azioni delle intemperie. Lo sviluppo delle spore di funghi è favorito in ambienti con una temperatura dell'aria compresa tra i 18°C e i 30°C (mentre è impossibile per temperature inferiori ai 5°C) e un contenuto d'acqua nel legno superiore al 20% che è possibile per umidità relative superiori al 90%. Sono condizioni che, si può dire, sono sempre presenti per elementi strutturali posti in ambiente esterno, perciò il rischio di un attacco biotico è costante. È necessaria una protezione dal contatto diretto tra il legno e l'acqua. Le azioni delle intemperie sono invece azioni cicliche di umidificazione ed essiccamento del materiale. Nel caso di azione diretta, si verifica l'assorbimento da parte del materiale, che si rigonfia generando coazioni interne, fino al collasso locale dello stesso. Al termine della precipitazione avviene l'essiccazione, e quindi il ritiro del legno, che sarà favorita dalla maggiore conducibilità propria del legno umido. Con l'incidenza della radiazione solare diretta sulla superficie umida, il ritiro sarà maggiore su tale superficie rispetto agli strati più profondi dell'elemento ligneo. Questo è causa di fessurazione le quali, oltre a ridurre la capacità portante della sezione resistente, sono una via preferenziale per l'ingresso di sempre maggiori quantità d'acqua. Si crea perciò un circolo vizioso che porta al veloce degrado della struttura posta in opera. Sulla struttura in progettazione saranno irrilevanti i rischi di formazione di condensa sulle superfici in quanto ben ventilate (intradosso della copertura). Il degrado non riduce la sezione resistente della trave ma ne riduce la resistenza. Si manifesta con la formazione di macchie d'acqua e cambiamento di colore in particolar modo sulla testa delle travi o altri elementi in quanto l'acqua ha più facilità a penetrare longitudinalmente alle fibre piuttosto che trasversalmente.

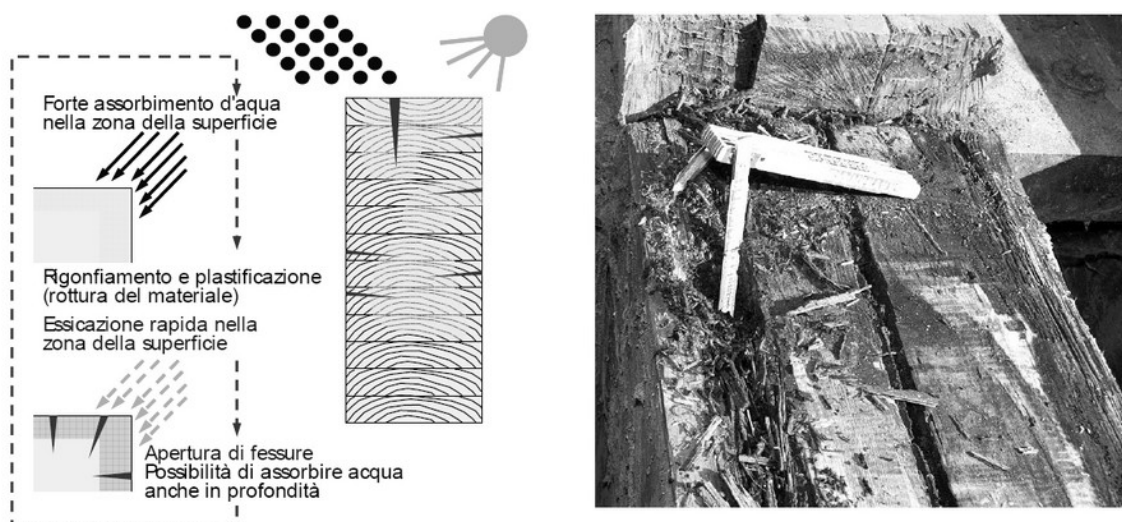


Figura 4.30: a) azione ciclica delle intemperie su una sezione; b) penetrazione del degrado di una sezione di legno lamellare incollato [www.promolegno.com]



Si definiscono<sup>12</sup> per le strutture in legno diverse **Classi di Rischio** in funzione delle condizioni di umidità relativa:

1. Ambiente riparato, protetto dagli agenti atmosferici ( $UR_{\text{legno}} < 20\%$ ). Garanzia contro il rischio di attacco fungino. Possibile attacco da insetti.
2. Ambiente riparato ma con elevata umidità dell'aria (possibile  $UR_{\text{legno}} > 20\%$ ). Può essere presente l'attacco fungino ed è possibile l'attacco da insetti.
3. Elementi lignei esposti all'attacco fungino ed al possibile attacco di insetti ( $UR_{\text{legno}} > 20\%$ ).
4. Elementi esposti, anche a contatto diretto con acqua dolce o terreno. Materiale permanentemente esposto all'attacco fungino. È possibile l'attacco di insetti.
5. Elementi permanentemente a contatto diretto con acqua salata. Possibile attacco di organismi invertebrati marini. Attacco di insetti per le parti non immerse.

L'appartenenza a una determinata classe dipende sia dalle condizioni ambientali che dalle misure protettive previste in fase di progetto e dalle strategie di manutenzione.

Vengono definite inoltre delle **Classi di Resistenza** del legno:

1. Molto durabile (Castagno, Robinia)
2. Durabile (Castagno, Robinia)
3. Moderatamente durabile (Larice, Duglasia)
4. Poco durabile (Larice, Duglasia, Abete rosso, Abete bianco, Pino)
5. Non durabile (Faggio, Frassino)

Tale resistenza può essere incrementata tramite protezioni superficiali o impregnazione per la quale vengono definite delle classi di **Impregnabilità**, da 1 (facilmente impregnabile) a 4 (difficilmente impregnabile) a seconda del tipo di legno:

1. Faggio
2. Frassino, Abete bianco
3. Abete rosso, Abete bianco, Pino
4. Larice, Duglasia, Quercia, Castagno, Robinia

---

<sup>12</sup> EN 335-1-2-3, "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno"

#### 4.1.4.2. Strategia di progetto

<b>Legname utilizzato:</b>	Conifera (Abete bianco o rosso)
<b>Prodotti:</b>	Legno Lamellare Incollato GL28h
<b>Classe di resistenza:</b>	4 (poco durabile)
<b>Classe di servizio:</b>	2 (EC5-1) – Umidità relativa dei materiali in equilibrio con ambiente a temperatura di 20°C e umidità relativa dell'aria circostante che superi l'85% solo per poche settimane all'anno. Possono appartenere a tale classe gli elementi lignei posti all'esterno ma protetti, almeno parzialmente, dalle intemperie e dall'irraggiamento solare diretto. Coefficiente $k_{def} = 0.8$
<b>Impregnabilità:</b>	3 (moderatamente impregnabile)
<b>Classe di rischio:</b>	1

La classe di rischio viene ottenuta prevedendo in fase progettuale i seguenti accorgimenti costruttivi:

- Orientazione delle tavole di legno in modo da evitare accumuli di acqua
- Protezione dall'azione diretta dalle intemperie tramite scossaline, gocciolatoi e tavole di sacrificio
- Protezione delle travi principali tramite altri elementi della costruzione (travetti a sbalzo). L'angolo massimo che delimita la zona protetta è pari a 60°.

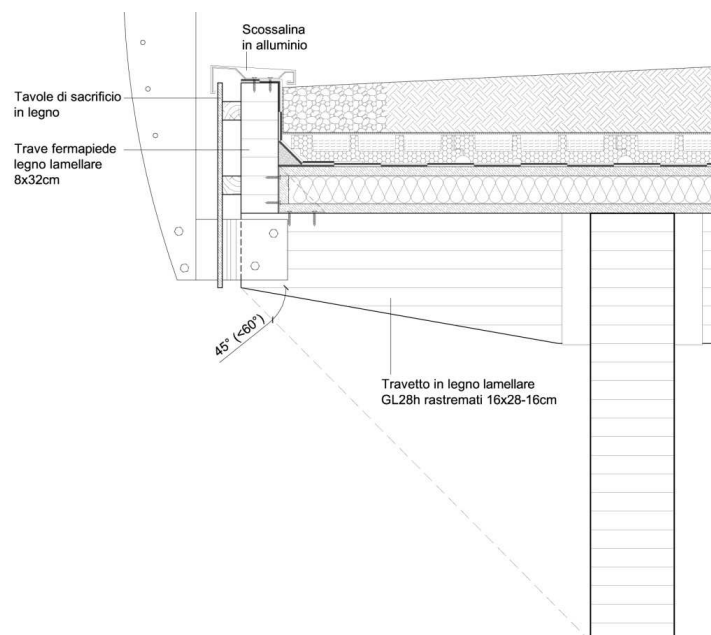


Figura 4.31: Progetto della protezione degli elementi in legno

## 4.1.4.3. Strategie di manutenzione


AGENTI	AZIONI	EFFETTI-GUASTI	INTERVENTI
Chimici	CO <sub>2</sub>	Corrosione dei mezzi d'unione metallici con formazione di ruggine. Presenza di colature di ruggine sulla superficie lignea.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rimozione mezzi d'unione degradati</li> <li>2. Pulizia dai detriti</li> <li>3. Interposizione di materiale distanziatore dell'unione dal legno</li> <li>4. Sostituzione mezzi d'unione con nuovi elementi</li> </ol>
Biologici	Attacco di funghi, insetti, ecc.	Degrado del materiale e perdita di resistenza	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Valutazione visiva (annuale) e strumentale dell'estensione del degrado</li> <li>2. Eventuale sostituzione elementi</li> <li>3. Protezione degli elementi strutturali</li> </ol>
Fisici	Sovraccarichi	<p>Schiacciamento dei punti di appoggio delle travi o degli elementi secondari sulle travi.</p> <p>Rifollamento del legno in prossimità delle unioni.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verifica visiva (annuale) e strumentale</li> <li>2. Consolidamento strutturale</li> </ol>
	Acqua, radiazione solare diretta	<p>Formazione di fessure, macchie d'acqua, variazione cromatica, putrefazione del legno, facilitazione dell'attacco biologico.</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Valutazione visiva (annuale) dell'estensione del degrado</li> <li>2. Eventuale sostituzione elementi</li> <li>3. Protezione degli elementi strutturali</li> </ol>

Tabella 4.31: Scheda dei guasti di elementi in Legno Lamellare Incollato

#### 4.1.5. Barriere protettive laterali

Per ridurre i rischi legati ad uno scorretto utilizzo del ponte da parte degli utenti, siano essi ciclisti o pedoni e per permettere che gli interventi di manutenzione possano avvenire in sicurezza, è necessario prevedere l'integrazione di barriere protettive poste ai lati estremi della struttura che impediscano cadute dei soggetti sulle carreggiate autostradali. La normativa per la progettazione delle piste ciclabili (DM 30/11/99, n°557, art. 9.3) enuncia il seguente obbligo:

*Per gli attraversamenti a livelli sfalsati riservati ai ciclisti (piste ciclabili in sede propria) va in genere preferita la soluzione in sottopasso, rispetto a quella in sovrappasso, assicurando che la pendenza longitudinale massima delle rampe non superi il 10% e vengano realizzate, nel caso di sovrappasso, barriere protettive laterali di altezza non inferiore ad 1,50 metri.*

Le barriere sono state progettate con un'altezza che rispetta il minimo di legge (1,50 metri) e tale altezza è stata ritenuta opportuna in quanto il tracciato della pista ciclopedonale si sviluppa nella sezione di mezz'aria della copertura distando almeno 5 metri dalla barriera su entrambi i lati. Perché la barriera non costituisca un elemento di elevato impatto visivo e sia facilmente integrabile nel progetto si sceglie di realizzarla tramite sottili montanti costituiti da due profili in acciaio inox sagomato di spessore 8mm preaccoppiati tramite distanziatori e bulloni, e traversi in cavi di acciaio inox  $\Phi 10\text{mm}$  tesi tra i montanti, con passo relativo pari a 10 cm. I montanti vengono fissati esternamente al bordo laterale del ponte, sulla testa dei travetti a sbalzo, ad un profilo ad L in acciaio (tramite bullonatura) saldato in officina ad una secondo profilo a C, ancorato ai travetti con bulloni passanti.

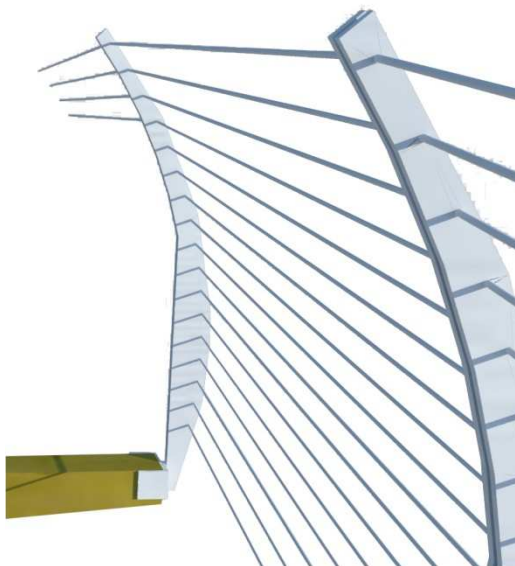


Figura 4.32: Parapetto in acciaio

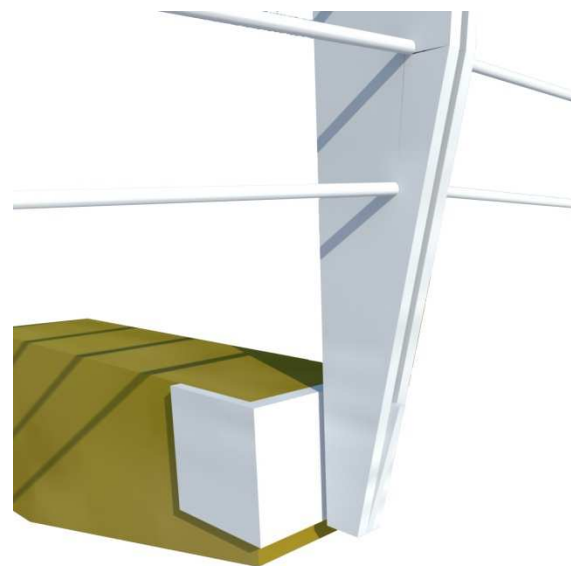


Figura 4.33: Particolare aggancio parapetti

Per la verifica strutturale del parapetto si considera un'azione orizzontale di 1,5 kN/m applicata al corrimano<sup>13</sup>. L'interasse tra due montanti è pari a 2,1 metri perciò alla sommità di ogni montante verrà applicata un'azione di 3,15 kN. Si considera il sistema come una mensola e si dimensionano i bulloni che resistono al momento alla base.

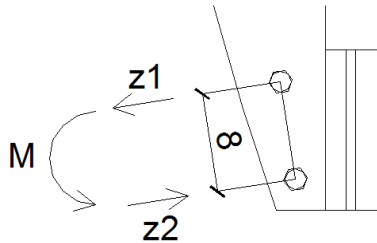


Figura 4.34: Azioni sulla bullonatura del parapetto

q	1.5	kN/m	Forza specifica
i	2.1	m	Interasse tra i montanti
Q	3.15	kN	Forza applicata al corrimano
h	2	m	Altezza barriera
M	6.3	kNm	Momento alla base
d	0.08	m	Interasse tra i bulloni
$z_{1,2}$	78.75	kN	Azione dovuta al momento
$A_s$	205.83	mm <sup>2</sup>	Area di acciaio
$A_{1s}$	102.91	mm <sup>2</sup>	Area di un bullone
D	11.45	mm	Diametro bullone
$D_{eff}$	12	mm	Diametro effettivo

Tabella 4.32: Calcolo bullonatura del parapetto

Si utilizzano due bulloni M12, classe 4.8, resistenza a trazione caratteristica  $f_{ck}=400$  N/mm<sup>2</sup>.

<sup>13</sup> DM 14/01/08 (NTC), par. 5.1.3.10

#### 4.1.6. Deflusso e accumulo delle acque piovane

La conformazione della copertura impone delle direzioni di deflusso delle acque piovane verso il centro ed esternamente. Queste vengono raccolte rispettivamente da:

- un canale posto nel giunto strutturale tra le travi appartenenti alle due campate inclinato dal centro verso i bordi laterali dove sono i pluviali che attraversano i pilastri centrali per connettersi al collettore di raccolta delle acque provenienti dalla superficie stradale.
- un tubo drenante interrato posto alla base della fondazione e superficialmente da una canalina posta al principio della rampa inclinata che permette l'accesso al ponte.

La copertura a verde rappresenta una possibile strategia di riduzione dell'impatto ambientale delle costruzioni. Infatti oltre ai vantaggi di tipo energetico, se impiegata su edifici, presenta il vantaggio ecologico di "volano idraulico" in quanto controlla il deflusso dell'acqua piovana assorbendola temporaneamente e rilasciandola lentamente evitando allagamenti per tracimazione della rete fognaria. Inoltre dal punto di vista della durabilità, protegge il manto impermeabile prolungandone la vita utile.

La dimensione degli scarichi è stata calcolata con metodo tabellare in funzione della superficie di raccolta:

$$S = (7,5 \cdot 20) \text{ m} = 150 \text{ m}^2$$

Per pluviali con imboccatura cilindrica si utilizza un diametro minimo del foro di 17cm:

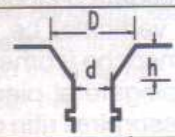
Scarico con imbocco cilindrico (1)			Scarico con imbocco tronco conico (1)				
Superficie interessata (m <sup>2</sup> )		Diametro minimo foro di scarico (cm)	Superficie interessata (m <sup>2</sup> )				
∅ normale	∅ maggiorato		∅ normale	∅ maggiorato	D (cm)	d (cm)	h (cm)
	(in assenza di troppo pieno)			(in assenza di troppo pieno)			
50	33	8	71	47		8	
64	43	9	91	61		9	
79	53	10	113	75		10	
95	63	11	136	91		11	
113	75	12	161	107		12	
133	88	13	190	127		13	
154	103	14	220	147		14	
177	118	15	253	168		15	
201	134	16	287	191		16	
227	151	17	324	216		17	
254	169	18	363	242		18	
284	189	19	406	270		19	

Figura 4.35: Determinazione del diametro degli scarichi in funzione della superficie servita [A. Gottfried, *Quaderni del manuale di progettazione edilizia – le chiusure orizzontali*, Hoepli, Milano, 2010, Tab.7, pag.47]

Per permettere alla vegetazione di disporre di un approvvigionamento di acqua, vengono installati, sopra al manto impermeabile degli elementi di accumulo idrico in polistirene espanso sinterizzato di spessore 6cm con conformazione a pannelli bugnati (vaschette di accumulo) attentati sui quattro lati per consentirne l'accostamento. Questo sistema accumula l'acqua piovana e la rilascia al terreno attraverso un processo di condensazione e di micro-evaporazione detto "acqua di diffusione". I pannelli hanno dimensione pari a 125x100 cm e una capacità di accumulo idrico di 16 litri/m<sup>2</sup>.

## 4.2. PROGETTO DI UN COMPONENTE EDILIZIO PER L'ACCUMULO IDRICO

Il sistema di accumulo idrico prima descritto presuppone la presenza di uno strato di supporto che lo sorregga (pannelli scatolari in legno OSB) ed uno strato impermeabile ad esso sottostante.

L'obiettivo della trattazione è quello di sviluppare un elemento che assolve in se tutte le funzioni proprie dei tre strati citati: funzione strutturale, funzione di accumulo idrico e funzione di tenuta all'acqua. La motivazione che sta alla base di questa ricerca è il risparmio economico che si otterrebbe in fase di cantiere in quanto una sola squadra operativa sarebbe in grado di posare il sistema con un numero di operazioni inferiori a quelle necessarie altrimenti.

Per assolvere la funzione di accumulo idrico si adotta, dal pannello previsto in sede di progetto, la conformazione bugnata dell'elemento utile a formare delle vaschette in cui viene accumulata l'acqua.

Al fine di adattare i nuovi elementi alla curvatura delle travi sulle quali vengono appoggiati, vengono realizzati di forma stretta e allungata, riprendendo il concetto di adattabilità e praticità nella posa e nella movimentazione propria dei pannelli strutturali scatolari in legno OSB (LignumK). Le dimensioni sono perciò pari a 48x299 cm in modo che riescano a coprire l'interasse tra le travi (pari a 3 metri) e a "discretizzare" con buona precisione la curvatura dell'arco.

Con tali dimensioni viene garantito un giunto di dilatazione termica tra due pannelli accostati, di cui verificare l'idoneità a posteriori con la seguente formula:

$$s = \Delta T * L * \alpha \quad \text{ampiezza del giunto}$$

Con:

- $\Delta T$  escursione termica stagionale (assunta pari a 50°C);
- L distanza tra i giunti (3m);
- $\alpha$  coefficiente di dilatazione termica (in funzione del materiale scelto).

È quindi necessario scegliere il materiale, valutare l'altezza dell'elemento e verificarne la resistenza.

Considerando di sostituire il nuovo pannello agli strati impiegati nel progetto "base" occupando lo stesso spazio, si devono soddisfare i requisiti resistenza con uno spessore limitato. Il materiale che, si pensa, possa soddisfare tale requisito, è il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio.



#### 4.2.1. Caratterizzazione meccanica del calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio<sup>14</sup>

Il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale composito caratterizzato da una matrice cementizia e da fibre discrete. La matrice è costituita da calcestruzzi o da malte normali o ad alte prestazioni. Le fibre possono essere di acciaio, polimeriche, di carbonio, di vetro o di materiale naturale.

Per impieghi strutturali sono raccomandate le fibre di acciaio con un dosaggio minimo superiore allo 0,3% in volume. Le proprietà del composito dipendono dalle caratteristiche dei materiali componenti e dai loro dosaggi, dalla loro geometria, dalla percentuale volumetrica di fibre e dalle sue caratteristiche meccaniche.

Le fibre possono contribuire a mitigare il fenomeno della fessurazione e ad incrementare l'energia assorbita durante la frattura.

L'aggiunta di fibre in una matrice cementizia, ne migliora quindi il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure e fornendo, dopo la formazione delle stesse, una resistenza post-fessurativa altrimenti assente. I calcestruzzi rinforzati con fibre d'acciaio vengono denominati SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete).

In generale, per il confezionamento di un FRC, bisogna considerare le seguenti prescrizioni:

- $a/c \leq 0,5 \div 0,55$  per evitare la presenza di vuoti dopo l'evaporazione dell'acqua interstiziale
- $d_{agg} \leq 10 \div 15$  mm per garantire una buona distribuzione delle fibre

le fibre risultano caratterizzate, oltre che dal materiale, anche dalla lunghezza ( $l$ ), dal diametro ( $d$ ), dalla forma (lisce, sagomate) e dal rapporto d'aspetto ( $l/d$ ).

Il rapporto d'aspetto in particolare è un indice di snellezza della fibra e influisce in modo inversamente proporzionale sul carico massimo sopportabile. Per mantenere con bassi  $l/d$  un buon livello di duttilità, è necessario agire sul contenuto percentuale in volume di fibre ( $V_{f\%}$ ). Un aumento di  $V_{f\%}$  infatti accresce la resistenza del composito e la tenacità fessurativa cioè l'energia dissipata per provocare la fessurazione di una superficie unitaria di frattura di un corpo.

Come è stato detto, le fibre non si spezzano all'apertura di una fessura ma continuano a resistere al progredire dell'apertura. Se le fibre si rompono o si estraggono durante la fase iniziale della formazione della

---

<sup>14</sup> La trattazione è una semplificazione e una sintesi della teoria riguardante i calcestruzzi fibrorinforzati. Si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

- CNR-DT 204/2006, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato*;
- L. Rossi, *Caratterizzazione meccanica di calcestruzzi fibrorinforzati con fibre d'acciaio*, tesi di laurea, Università degli Studi di Bologna, A.A. 2006/2007;

fessura, allora la resistenza di prima fessurazione corrisponde alla resistenza ultima. Il materiale si dice avere un comportamento degradante (softening). Se viceversa, le fibre sono in grado di sopportare ulteriore carico dopo la formazione della prima fessura, allora ha un comportamento incrudente (hardening).

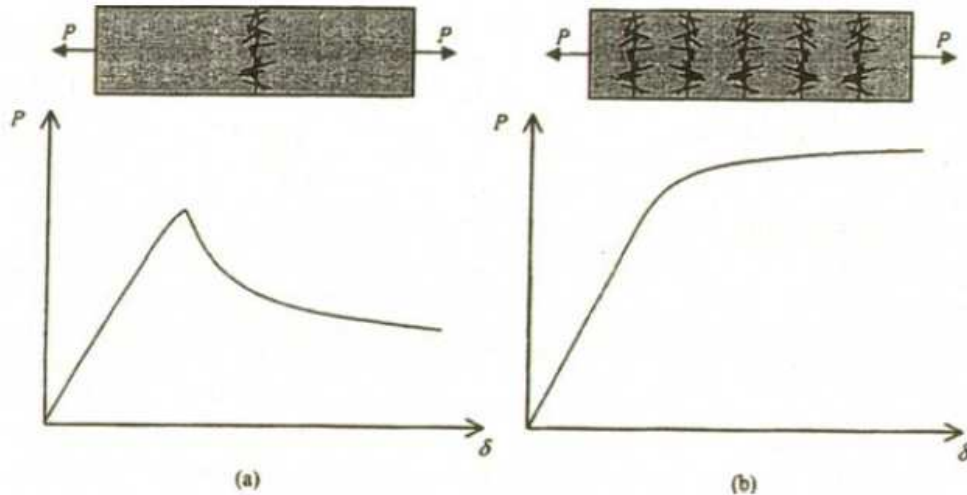


Figura 4.36: Comportamento Softening (a) e Hardening (b) [CNR-DT 204/2006, par. 1.4]

Durante la formazione delle fessure si ha un assottigliamento del materiale. Per questo motivo non è corretto, per lo studio del materiale, utilizzare un approccio tensionale che porterebbe a valutazioni ottimistiche. È più opportuno utilizzare il metodo della meccanica della frattura che prende in considerazione l'energia di frattura e lo spessore.

Fino a fessurazione il materiale ha un comportamento elastico mentre dopo la fessurazione si considera che abbia un comportamento elastoplastico. Durante la fessurazione si dissipa un certo quantitativo di energia detta Energia di Frattura ( $G_f$ ), funzione della resistenza ultima a trazione e dell'allungamento massimo del provino utilizzato e indice della duttilità del materiale. La duttilità (e quindi  $G_f$ ) aumenta all'aumentare dal contenuto di fibre  $V_f\%$  e dello spessore dell'elemento.

## Trazione

A trazione il FCR ha il seguente comportamento (curva sforzo-deformazione):

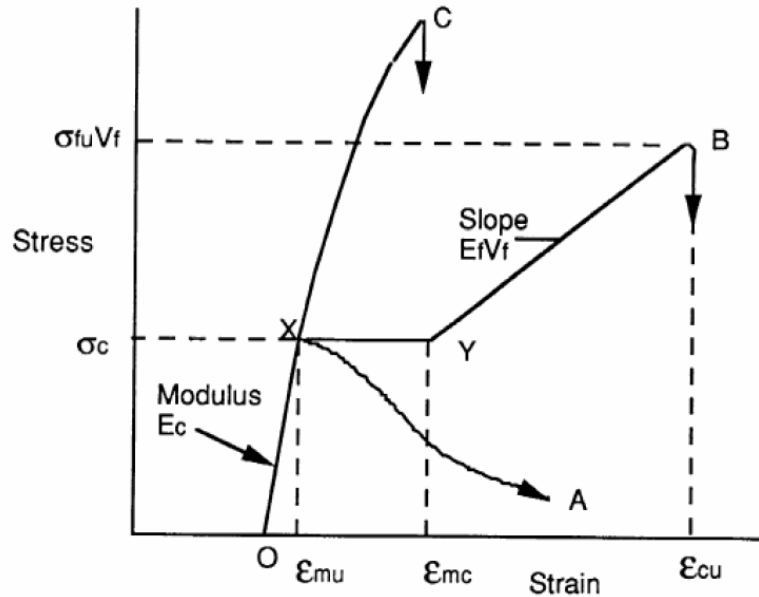


Figura 4.37: Curve sforzo-deformazione [D.J. Hannant, 2000]

Dove:

- $\sigma_c$  è lo sforzo relativo alla prima fessurazione
- $\sigma_{fu}V_f$  è lo sforzo ultimo relativo alle fibre
- xy è il tratto a sforzo costante in cui avviene la formazione delle fessure.

Se si esprimono i volumi di fibre e della matrice come frazioni del volume del materiale composito posto pari a 1, si può scrivere:

$$\sigma_c = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m$$

$$E_c = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

Ipotizzando la perfetta aderenza tra fibre e matrice considerando:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m$$

Posso scrivere:

$$\frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

$$\sigma_f = \frac{E_f}{E_m} \sigma_m = n \sigma_m$$

Allora sostituendo avrò:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= V_f n \sigma_m + (1 - V_f) \sigma_m = \\ &= \sigma_m (V_f n + 1 - V_f) = \\ &= \sigma_m (V_f (n - 1) + 1) \end{aligned}$$

Quindi:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_f}{1 + (n - 1)V_f}$$

Al momento di formazione della fessura si ha:

$$\sigma_m = \sigma_{mu}$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_{mu}$$

E la seguente formula per lo sforzo nel composito:

$$\sigma_c = V_{f,crit} E_f \varepsilon_{mu} + (1 - V_{f,crit}) \sigma_{mu}$$

Dopo la fessurazione gli sforzi gravano interamente sull'acciaio:

$$\sigma_c = V_{f,crit} \sigma_{fu}$$

Dove il volume critico di fibre è la quantità di fibre minima necessaria a supportare tutto lo sforzo nella sezione, quando la matrice non ha più resistenza a trazione. Esso è ricavabile dall'uguaglianza tra le due equazioni:

$$V_{f,crit} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu} - E_f \varepsilon_{mu} + \sigma_{mu}}$$

Nel caso si utilizzino fibre in acciaio, il volume critico è pari a:

$$V_{f,crit,eff} = 2V_{f,crit}$$

## Flessione

Le principali applicazioni dei calcestruzzi fibrorinforzati richiedono che questi abbiano adeguata resistenza a flessione.

La resistenza a trazione per flessione può essere fino a tre volte superiore della resistenza a trazione diretta anche se dovrebbero essere uguali per la teoria dell'elasticità. La differenza è dovuta al comportamento duttile di compositi fibrosi per cui il diagramma delle tensioni di trazione della sezione trasversale di una trave inflessa sottoposta a flessione, non è triangolare in fase di fessurazione.

Considerando una trave fessurata e rinforzata con fibre, la distribuzione delle tensioni è lineare e l'asse neutro è spostato verso la zona compressa. Le fibre trasmettono gli sforzi di trazione e tengono uniti i lembi costituenti le facce della fessura.

Per descrivere il comportamento, non conoscendo gli esatti sforzi nelle fibre, si assume un diagramma di sforzi equivalenti. Nella zona tesa viene operata una semplificazione: prima della fessurazione si considera una distribuzione elastica, dopo la fessurazione le fibre vengono estratte dalla matrice con carico costante lungo la fessura ( $\sigma_{cu}$ =resistenza ultima a trazione dopo la fessurazione).

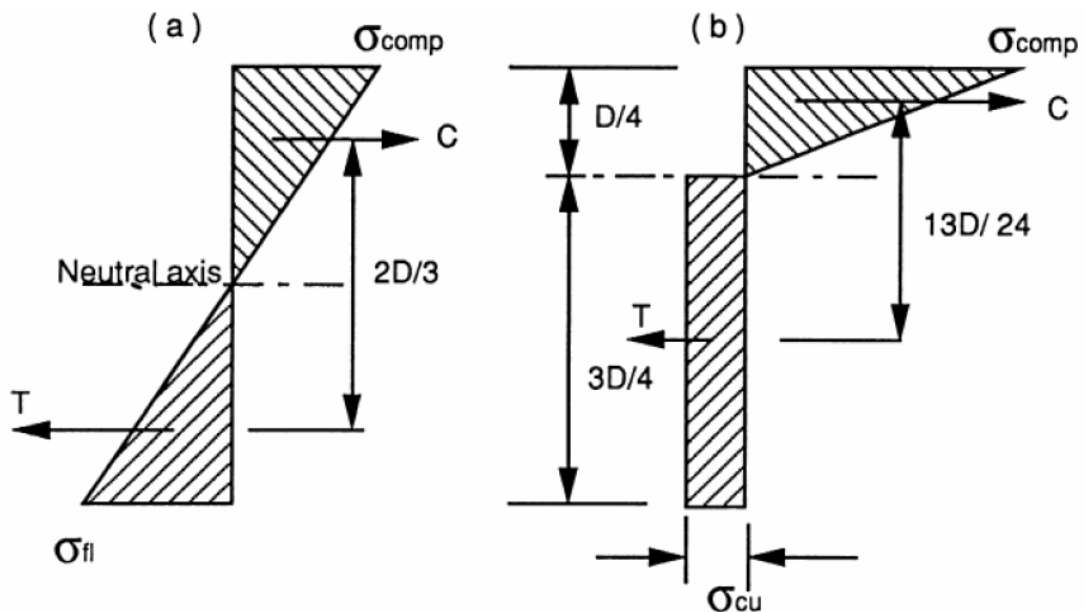


Figura 4.38: Andamento delle tensioni a flessione. a) comportamento elastico a tensione e compressione. b) comportamento elastico a compressione ed elasto-plastico a tensione. [D.J. Hannant, 2000]

Per il primo diagramma il momento resistente si assume pari a:

$$M_R = \sigma_{fl} \frac{bh^2}{6}$$

Mentre per il secondo:

$$M_R = \frac{13}{32} \sigma_{cu} b h^2$$

Dall'uguaglianza tra le due relazioni si ottiene:

$$\sigma_{fl} = 2,44 \sigma_{cu}$$

$$\sigma_{cu} = 0,41 \sigma_{fl}$$

Ciò implica un incremento della resistenza a flessione nel caso che a trazione la resistenza residua dopo la fessurazione superi di 0,41 volte la resistenza massima.

Anche il volume critico effettivo di fibre a trazione viene moltiplicato per lo stesso coefficiente al fine di ottenere il corrispondente valore a flessione:

$$V_{f,crit,eff,fl} = 0,41 V_{f,crit,eff} = 0,41 * 2 V_{f,crit}$$

Queste formule teoriche per i calcestruzzi fibrorinforzati verranno utilizzate per giungere ad un dimensionamento di massima dell'altezza dell'elemento prefabbricato oggetto di progettazione.

#### 4.2.2. Dimensionamento dell'altezza della sezione

Si ipotizza una sezione semplificata dell'elemento di accumulo con le seguenti dimensioni:

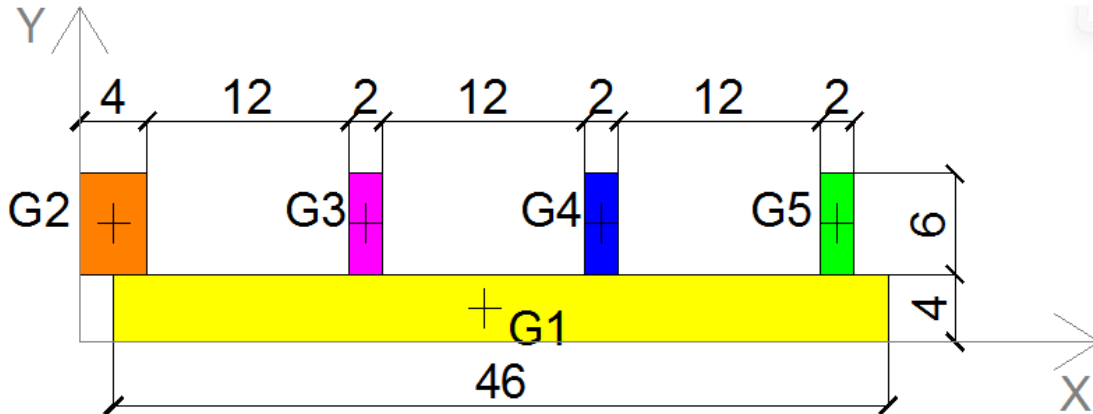


Figura 4.39: Sezione semplificata per il calcolo del momento di inerzia

Si calcola per tale sezione il momento di inerzia attorno all'asse X dopo aver trovato le coordinate del baricentro G ( $X_G, Y_G$ ) a partire dai baricentri delle diverse parti di cui la figura è composta:

$$X_G = \frac{\sum S_y}{\sum A} = 23,6 \text{ cm}$$

$$Y_G = \frac{\sum S_x}{\sum A} = 3,2 \text{ cm}$$

$$I_x = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{b_i h_i^3}{12} + A_i y_i^2 \right) = 1,56 * 10^7 \text{ mm}^4$$

Il modulo elastico del calcestruzzo si assume pari a  $E=38'000$  MPa.

I carichi massimi agenti sull'elemento sono quelli riferiti alla stratigrafia con pista ciclabile:

strato	s	p	P
	m	kg/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
Argilla espansa	0.200	90	0.90
Binder	0.060	108	1.08
Asfalto di usura	0.025	45	0.45
Elemento di accumulo (saturo)		200	2.00
Accidentale		500	5.00

Tabella 4.33: Analisi dei carichi su strato di accumulo idrico

Considerando che in opera gli elementi verranno posti affiancati l'uno con l'altro, si assume un'area di carico larga 50 cm; si calcola così il carico agente su un metro di copertura.

$$i = 0.48 \text{ m}$$

$$q_{slu} = 13.10 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{slu} = 6.55 \text{ kN/m}$$

Si utilizza un calcestruzzo con classe di resistenza C37/45 e con classe di esposizione XC4 (ciclicamente asciutto e bagnato:  $a/c_{max} = 0,50$ ; dosaggio minimo di cemento 340 (300)  $\text{kg/m}^3$ ; minima classe di resistenza: C32/40 (C30/37)).

Si ricavano dalla resistenza caratteristica, le altre proprietà del calcestruzzo:

$R_{ck}$	45.0	N/mm2	Resistenza caratteristica cubica
$f_{ck}$	37.4	N/mm2	Resistenza caratteristica cilindrica
$f_{ctm}$	3.4	N/mm2	Resistenza media a trazione
$f_{ctm,fl}$	4.0	N/mm2	Resistenza media a trazione per flessione

**Tabella 4.34: Proprietà della matrice cementizia**

Calcolati come<sup>15</sup>:

$$f_{ck} = 0,83R_{ck}$$

$$f_{ctm} = 0,30f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctm,fl} = 1,2f_{ctm}$$

Si riportano ora le caratteristiche geometriche e meccaniche delle fibre d'acciaio<sup>16</sup>:

d	0.9	mm	Diametro fibre
l	50	mm	Lunghezza fibre
l/d	56		Rapporto d'aspetto
R	1450	N/mm2	Resistenza a trazione

**Tabella 4.35: Proprietà fibre d'acciaio**

<sup>15</sup> DM 14/01/08, par. 11.2.10

<sup>16</sup> Technical data sheet, Wirand Fibre FF2 HS, [www.officinemaccaferrri.com](http://www.officinemaccaferrri.com)



Si calcolano le resistenze caratteristiche e di progetto del composito considerando un coefficiente di sicurezza  $\gamma_m=1.5$ :

$f_c$	16.4	N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica a trazione
$f_{fi}$	39.9	N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica a flessione
$f_{cd}$	10.9	N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a trazione di progetto
$f_{fd}$	26.6	N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a flessione di progetto

**Tabella 4.36: Proprietà del composito**

La sollecitazione di momento agente sulla sezione è calcolata come per le travi semplicemente appoggiate ( $M_{ed}=Q_{sli}L^2/8$ ) considerando una luce pari all'interasse tra le travi principali della copertura ( $L=3m$ ). Si calcolano quindi gli sforzi nel caso elastico e nel caso elasto-plastico:

$$M_{ed} = 7.37 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{pre-fess} = 14905.12 \text{ kN/m}^2 = 14.91 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{post-fess} = 10623.93 \text{ kN/m}^2 = 10.62 \text{ N/mm}^2$$

**Verificato**

### 4.2.3. Caratterizzazione tecnologica

La sezione corretta dell'elemento di accumulo è la seguente:

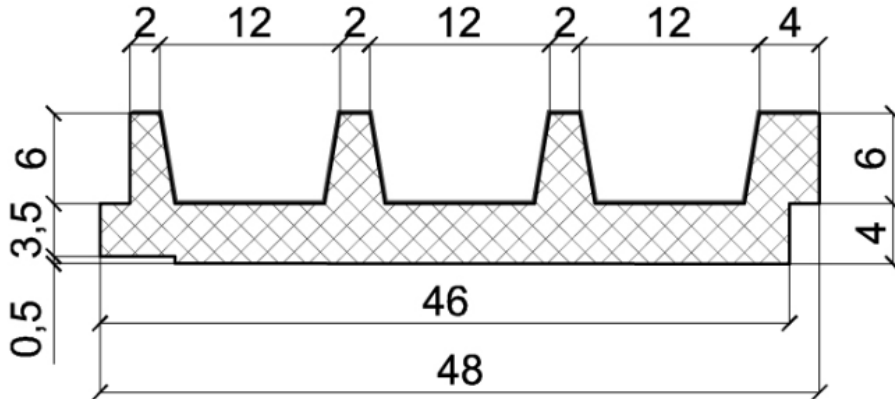


Figura 4.40: sezione trasversale elemento di accumulo idrico

La particolare conformazione è caratterizzata da un battente per permettere l'accostamento a giunti sfalsati e l'inserimento di elementi di fissaggio metallici ad "L" per evitare lo scivolamento sul piano inclinato.

L'ampiezza minima del **giunto** tra diversi elementi accostati di testa, è quindi:

$$s = 1,8 \text{ mm}$$

con un coefficiente di dilatazione pari a quello del calcestruzzo ( $\alpha = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ). lo spazio si riempie con un cordolo fondo giunto in polietilene di diametro doppio rispetto all'ampiezza del giunto (10mm) e una sigillatura siliconica profonda 5mm.



Figura 4.41: Pannello strutturale di accumulo idrico in SFRC

La **capacità** del pannello si ottiene calcolando la somma dei volumi delle vaschette. Essendo dei tronchi di piramide a base rettangolare si avrà:

$$V_{tot} = \sum_{i=1}^{48} \left[ \frac{h_1(A_1 - A_2) + A_1 b}{3} \right]_i$$

Con:

- i            numero di vaschette per pannello
- h<sub>1</sub>        altezza della piramide a base quadrata ottenuta dal prolungamento degli spigoli del solido considerato
- A<sub>1</sub>        area della base maggiore del solido
- A<sub>2</sub>        area della base minore del solido
- b            distanza tra le basi del solido

si ottiene:

$$V_{tot} = 0,0487 \text{ m}^3$$

Considerando il volume riempito di acqua (densità  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ ), il peso del pannello sarà:

$$P = 48,7 \text{ kg}$$

E la capacità:

$$C = 48,7 \text{ l}$$

Si fornisce il valore di capacità specifica alla superficie del pannello:

$$S = 2,99 \times 0,48 = 1,44 \text{ m}^2$$

$$c = 48,7/1,44 = 33,8 \text{ l/m}^2$$

#### 4.2.4. Verifiche di resistenza al fuoco e classe di reazione al fuoco

La classe di resistenza al fuoco, espressa secondo la classificazione data dal DM 16/02/07 “Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione” dovrà essere R60 come la struttura portante in legno.

Dalla norma UNI 9502 “Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso” si ricava la mappatura termica dell'elemento in base al tempo di esposizione al fuoco.

Si riconduce l'elemento al caso di soletta piana e si considera un gradiente di temperatura per uno spessore variabile da 0 a 10 cm. Questo è possibile in quanto la conducibilità del materiale non dipende dalla geometria della sezione ma esclusivamente dalla natura del materiale. Secondo la citata norma, le armature non incidono sulla distribuzione delle temperature, perciò possiamo considerare per il presente caso, una sezione di calcestruzzo normale, senza tener conto della presenza di fibre d'acciaio.

Si considera la presenza del fuoco sul solo lato inferiore (indicato con linea tratteggiata rossa). L' incremento di temperatura viene riportato per ogni centimetro di differenza di spessore.

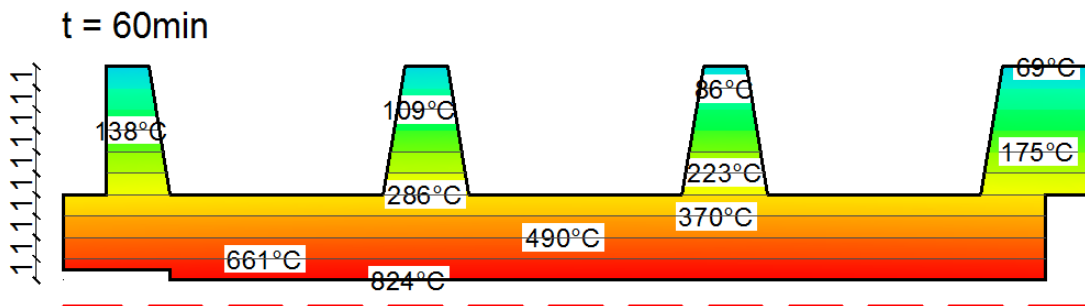


Figura 4.42: Gradiente di temperatura per un tempo di esposizione al fuoco di 60 minuti [immagine elaborata a partire dalla norma UNI 9502, prospetto 1]

Nota la distribuzione delle temperature in ogni sezione, si deve verificare la capacità portante al tempo di esposizione richiesto, tenendo conto della sezione con maggiore sollecitazione e con massimo riscaldamento.

Si considerano i seguenti carichi massimi:

Argilla espansa	90	kg/m <sup>2</sup>	0.90	kN/m <sup>2</sup>
Binder	108	kg/m <sup>2</sup>	1.08	kN/m <sup>2</sup>
Asfalto di usura	45	kg/m <sup>2</sup>	0.45	kN/m <sup>2</sup>
Elemento di accumulo (saturo)	200	kg/m <sup>2</sup>	2.00	kN/m <sup>2</sup>
Accidentale da folla	500	kg/m <sup>2</sup>	5.00	kN/m <sup>2</sup>

**Tabella 4.37: Analisi dei carichi per la verifica di resistenza al fuoco**

La combinazione delle azioni in caso di incendio non tiene conto di eventuali altre azioni particolari quali il sisma, il vento e altre di natura dinamica. Inoltre i carichi permanenti vengono presi con il loro valore caratteristico e i carichi accidentali vengono moltiplicati per un coefficiente di combinazione.

$\gamma_{G,A}$	1	Coefficiente parziale di sicurezza per azioni permanenti
$\psi_{1,1}$	0.5	Coefficiente di combinazione per l'azione variabile principale
$\psi_{2,i}$	0.3	Coefficiente di combinazione generico per azioni variabili secondarie

**Tabella 4.38: Coefficienti di combinazione per situazioni eccezionali**

Considerando una larghezza dell'area di influenza pari alla larghezza del singolo elemento (0,48 m) si ottiene la seguente combinazione di carico Q:

$$q = 6.93 \text{ kN/m}^2$$

$$Q = 3.33 \text{ kN/m}$$

Con l'esposizione al fuoco e quindi all'aumentare delle temperature  $\theta$ , si ha una riduzione delle resistenze caratteristiche del materiale. La riduzione della resistenza caratteristica a compressione si ottiene tramite il coefficiente  $k_c(\theta)$ , chiamato fattore di riduzione della resistenza del conglomerato cementizio compresso:

$$f_{ck}(\theta) = k_c(\theta)f_{ck}(20^\circ\text{C})$$

con:

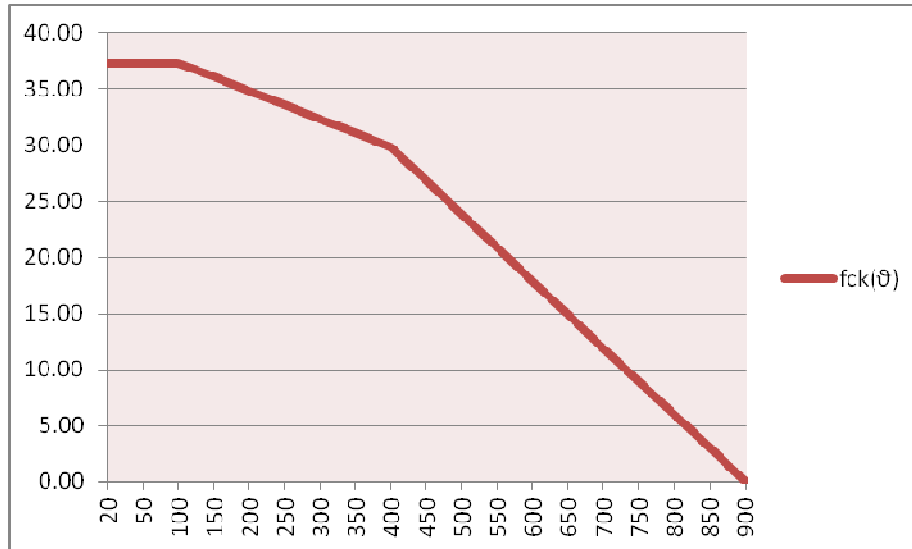
$$k_c(\theta) = 1 \quad \text{per} \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta < 100^\circ\text{C}$$

$$k_c(\theta) = \frac{(1600-\theta)}{1500} \quad \text{per} \quad 100^\circ\text{C} \leq \theta < 400^\circ\text{C}$$

$$k_c(\theta) = \frac{(900-\theta)}{625} \quad \text{per} \quad 400^\circ\text{C} \leq \theta < 900^\circ\text{C}$$

$$k_c(\theta) = 0 \quad \text{per} \quad \theta \geq 900^\circ\text{C}$$

Prendendo un intervallo di temperature tra 20°C e 900°C con passo di 50°C, si può costruire un grafico approssimativo dell'andamento dei valori di resistenza a compressione  $f_{ck}(\theta)$  espressa in N/mm<sup>2</sup>:



**Grafico 4.1: Riduzione della resistenza a compressione  $f_{ck}(\theta)$  del conglomerato cementizio in funzione della temperatura**

La riduzione della resistenza caratteristica a trazione del conglomerato in funzione della temperatura, si ricava tramite il coefficiente di riduzione della resistenza del conglomerato cementizio teso  $k_{ct}(\theta)$ :

$$f_{ctk}(\theta) = k_{ct}(\theta)f_{ctk}(20^\circ\text{C})$$

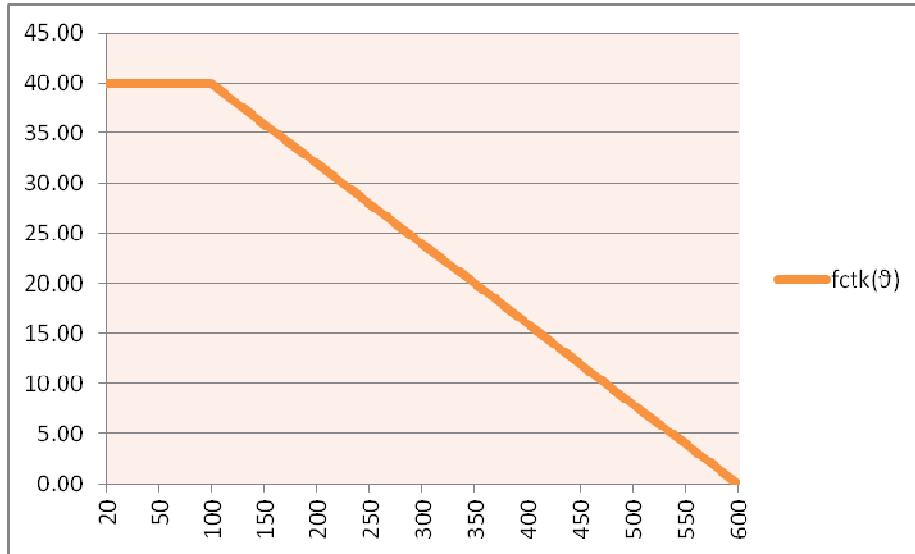
con:

$$k_{ct}(\theta) = 1 \quad \text{per} \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta < 100^\circ\text{C}$$

$$k_{ct}(\theta) = \frac{(600-\theta)}{500} \quad \text{per} \quad 100^\circ\text{C} \leq \theta < 600^\circ\text{C}$$

$$k_{ct}(\theta) = 0 \quad \text{per} \quad \theta \geq 600^\circ\text{C}$$

Prendendo un intervallo di temperature tra 20°C e 600°C con passo di 50°C, si può costruire un grafico approssimativo dell'andamento dei valori di resistenza a trazione per flessione  $f_{ctk}(\theta)$  espressa in N/mm<sup>2</sup>:



**Grafico 4.2: Riduzione della resistenza a trazione  $f_{ctk}(\theta)$  del conglomerato cementizio in funzione della temperatura**

Con le temperature della sezione soggetta al fuoco per un tempo di 60 minuti, calcolo i coefficienti di riduzione delle resistenze e le resistenze stesse per iterazione fino a che vengono verificati gli sforzi rispetto alle resistenze.

I valori a cui si giunge sono i seguenti:

range $\theta$	$20 \leq \theta < 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$100 \leq \theta < 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$400 \leq \theta < 900 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta \geq 900 \text{ }^\circ\text{C}$
$\theta$	100	400	773	
$k_c(\theta)$	1.00	0.80	0.20	0.00
range $\theta$	$20 \leq \theta < 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$100 \leq \theta < 600 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta \geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\theta$	100	532		
$k_{ct}(\theta)$	1.00	0.14	0.00	0.00

**Tabella 4.39: Coefficienti di riduzione delle resistenze  $k_c(\theta)$  e  $k_{ct}(\theta)$**

$f_{ck}(20^\circ\text{C})$	37.35	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctk}(20^\circ\text{C})$	39.95	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ck}(\theta)$	7.59	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctk}(\theta)$	5.43	N/mm <sup>2</sup>

**Tabella 4.40: Resistenze iniziali  $f_{ck}$ ,  $f_{ctk}$  e ridotte  $f_{ck}(\theta)$ ,  $f_{ctk}(\theta)$**

Considerando la lunghezza dell'elemento come lunghezza di libera inflessione, si calcola il momento agente e gli sforzi di compressione (comportamento elastico) e di trazione per flessione (comportamento elasto-plastico):

$M_{ed}$	3.74	kNm
$\sigma_c$	7.57	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{t,fl}$	5.40	N/mm <sup>2</sup>

**Tabella 4.41: Momento e sforzi agenti nella sezione**

Le verifiche sono soddisfatte se si considera di valutare lo sforzo di trazione per flessione applicato al centro del rettangolo di altezza  $3D/4$  (par. 4.6.1.2) e la temperatura raggiunta in tal punto pari a  $430^{\circ}\text{C}$ , ottenuta come media tra  $490^{\circ}\text{C}$  e  $370^{\circ}\text{C}$ .

Secondo il DM 10/03/05 e il DM 15/03/05, i prodotti realizzati in calcestruzzo o in fibrocemento o altri materiali che contengano una percentuale in peso o in volume di materiale organico inferiore all'1%. Possono perciò essere classificati come materiali appartenenti alla Classe A1 (incombustibilità) di **reazione al fuoco**, senza essere sottoposti a prove.



#### 4.2.5. Durabilità

##### 4.2.5.1. Valutazione del tipo di rischio

La durabilità di una struttura è definita come attitudine di un'opera a sopportare attacchi di agenti aggressivi di diversa natura mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche e funzionali e si ottiene innanzitutto tramite la durabilità dei materiali con i quali essa viene realizzata, cioè la loro capacità di durare nel tempo resistendo alle azioni aggressive dell'ambiente in cui si trova. La condizione di esposizione ambientale dell'elemento è possibile definirla estrema in quanto le fonti di possibile aggressione sono molteplici. È posto in ambiente esterno e si interfaccia all'estradosso con l'acqua piovana accumulata e proveniente dal terreno costituente la copertura a verde, all'intradosso con lo spazio aerato del sovrappasso autostradale. Le cause del degrado del calcestruzzo sono innanzitutto strutturali, dovute all'applicazione di eventuali sovraccarichi, assestamenti, carichi ciclici con conseguente formazione di fessure o micro fessure sul lembo inferiore (teso) dell'elemento strutturale. A queste si sommano il degrado fisico dovuto a cicli di gelo-disgelo dell'acqua interstiziale nei capillari pori della matrice di calcestruzzo. Sul lato acciaio (fibre) si può manifestare, normalmente non contemporaneamente, la corrosione dovuta a carbonatazione e cloruri.

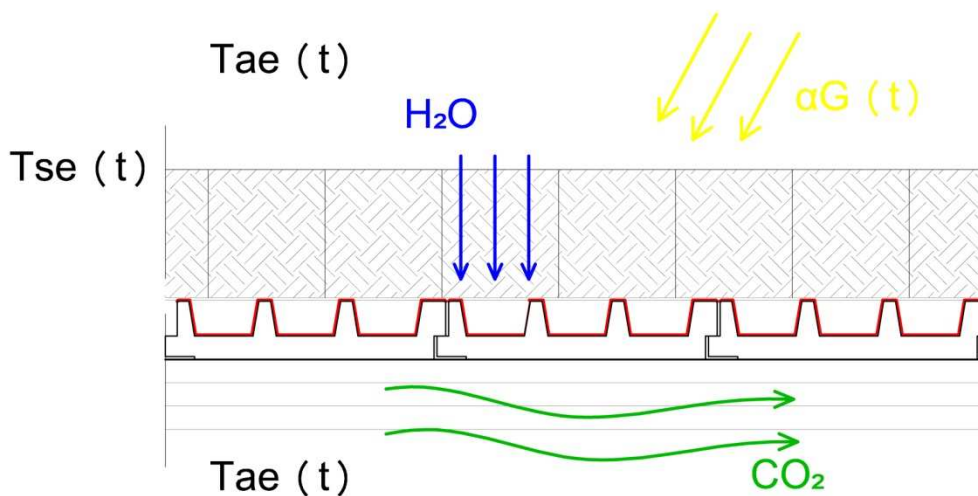
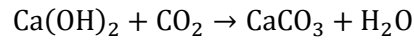


Figura 4.43: Agenti di degrado

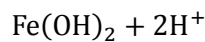
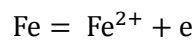
Il calcestruzzo si comporta normalmente come una soluzione alcalina con pH compreso tra 13 e 14, in grado di passivare le armature. Nel tempo esso perde le caratteristiche protettive, dalla superficie esterna agli strati più interni, a causa dell'anidride carbonica proveniente dall'ambiente naturale che ne abbassa il pH da 13 a valori inferiori a 9. L'azione dell'anidride carbonica sul conglomerato cementizio è poco pericolosa, mentre risulta determinante nei confronti della corrosione delle armature metalliche. Il fenomeno chimico si verifica sulla superficie del calcestruzzo a contatto con l'aria e consiste nella combinazione

dell'idrossido di calcio, proveniente dalla pasta di cemento indurita, con l'anidride carbonica, formando carbonato di calcio (decalcificazione) secondo la reazione:

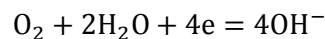


A questo processo è assegnato il nome di **carbonatazione**. Venute meno le caratteristiche di protezione, ha luogo il processo di corrosione delle armature, quando queste sono a contatto con ossigeno e acqua, secondo quattro processi chimici parziali complementari:

- L'ossidazione del ferro che libera elettroni e porta alla formazione di prodotti di corrosione. Per idrolisi si liberano anioni.



- La riduzione dell'ossigeno che consuma tali elettroni e forma cationi.



- Trasporto di elettroni nel metallo dalle regioni anodiche a quelle catodiche, alle quali vengono resi disponibili.
- Circolazione di corrente elettrica nel calcestruzzo.

La circolazione della corrente nelle armature è inevitabile in quanto la loro resistenza è trascurabile ma, è possibile rallentare il processo di corrosione realizzando almeno una condizione tra le seguenti:

- Il processo anodico è lento perché le armature sono passive
- Il processo catodico è lento perché risulta bassa la velocità di penetrazione dell'ossigeno nella matrice fino alle armature
- La resistività del calcestruzzo è elevata.

La proprietà che regola tali processi è quindi la permeabilità, la capacità del calcestruzzo di consentire l'ingresso di sostanze quali, azoto, ossigeno, CO<sub>2</sub>, acqua. Il trasporto di tali sostanze dipende dalla porosità (quantità e dimensione dei pori capillari), dallo spessore del copri ferro e dalla presenza di fessure. L'acqua contenuta nei pori capillari costituisce la frazione principale dell'acqua contenuta nel calcestruzzo ed è sufficiente che l'umidità relativa dell'ambiente scenda sotto il 100% perché possa evaporare, non avendo forze di legame con la superficie solida. L'acqua presente nei pori con diametro inferiore a 50 nm, presenta delle tensioni superficiali che la legano alla superficie solida ed è perciò necessario che l'umidità relativa assuma valori sempre più bassi, al diminuire della dimensione dei pori, affinché possa evaporare.

Il contenuto d'acqua di un calcestruzzo dipende quindi dall'umidità relativa esterna. Se i pori sono colmi d'aria vi è maggiore facilità di penetrazione per la CO<sub>2</sub>, mentre se sono riempiti con acqua la penetrazione avviene molto lentamente. Così la velocità di diffusione di CO<sub>2</sub> diminuisce con la riduzione dell'evaporazione e perciò con l'aumento dell'umidità relativa. A saturazione cessa il trasporto di anidride carbonica. Allo stesso tempo, la carbonatazione può avvenire solo in presenza d'acqua: si hanno quindi tendenze opposte. Il valore ottimale di umidità relativa per lo sviluppo di degrado per carbonatazione di attesta intorno al 50-80%<sup>17</sup>. La capacità di rallentare la penetrazione della carbonatazione dipende anche dal rapporto acqua/cemento:

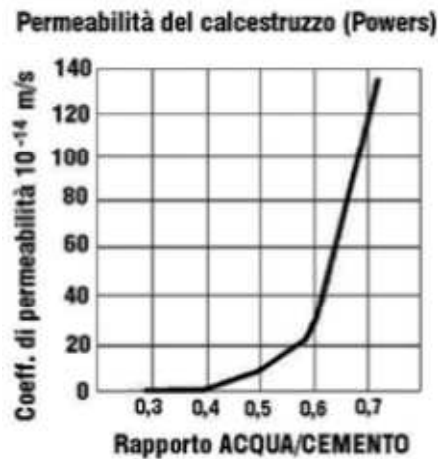


Figura 4.44: Permeabilità del cls in funzione di a/c [www.betonsafe.it]

La corrosione da **cloruri** non avviene in quanto si considerano trascurabili i Sali contenuti nel terreno e fintanto che si impiega un sistema di protezione della superficie di calcestruzzo all'estradosso dell'elemento di accumulo. Si realizza perciò una impermeabilizzazione in sede di prefabbricazione tramite impermeabilizzante liquido cementizio elastico fibrorinforzato (scheda tecnica allegata), che consente di coprire uniformemente le complesse superfici e di preservare il calcestruzzo dal contatto con acqua portatrice di eventuali cloruri provenienti dal terreno. Quando l'impermeabilizzazione si deteriora alla fine della sua vita utile ha inizio un processo di assorbimento capillare dell'acqua, tanto più lento quanto più è basso il rapporto acqua/cemento. In questo caso si ha infatti un coefficiente di permeabilità K molto basso, dell'ordine di  $10^{-11}$  m/s, inoltre per elementi prefabbricati, dove si ha un buon controllo della maturazione del getto, si può dire che sarà dalle 10 alle 100 volte inferiore che nei calcestruzzi di bassa o media qualità gettati in opera<sup>18</sup>. La vita utile di una impermeabilizzazione tradizionale bituminosa è di circa 10-15 anni. Per un solaio con green-roof si suppone pari a 40 anni, in virtù delle minori sollecitazioni termiche al quale

<sup>17</sup> P. Pedefferri, L. Bertolini, *La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali*, McGraw-Hill, Milano, 1996, pag. 43

<sup>18</sup> *Id.*, pag. 40

è sottoposto il solaio strutturale<sup>19</sup>. Un impermeabilizzante liquido è in grado di raggiungere una vita utile di 25 anni<sup>20</sup>. L'impermeabilizzazione della copertura in oggetto di studio è protetta dalle elevate escursioni termiche di una copertura tradizionale ma, allo stesso tempo, è chiamata ad assolvere alla funzione di tenuta all'acqua per lunghi periodi. Si può ritenere il materiale asciutto e in quanto non soggetto ad infiltrazione d'acqua superiormente e fortemente ventilato inferiormente. La ventilazione è infatti in grado di asportare per evaporazione l'acqua di impasto del calcestruzzo ed eventuale acqua infiltrata in caso di guasti dello strato impermeabile.

Per confermare le ipotesi di durata dell'impermeabilizzazione, verificando così il comportamento inerziale del terreno sovrastante l'elemento, sono state calcolate le temperature superficiali medie giornaliere sulla superficie dello strato impermeabile. Per la valutazione, si fa riferimento alla procedura per il calcolo della temperatura e del flusso in regime periodico stabilizzato in un mezzo semi-infinito. Considerando una copertura verde orizzontale con uno strato di terreno di 22 cm, si considera soggetta a due tipologie di forzanti climatiche, la temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare diretta, agenti entrambe sulla sua superficie superiore. Si vuole determinare il profilo di temperatura nello strato di terra e si legge il valore di temperatura sulla superficie interna del terreno. Innanzitutto si calcola la temperatura superficiale dello strato, influenzata dall'incidenza della radiazione solare:

$$T_s(t) = T_{ae}(t) + \frac{\alpha G(t)}{h_e}$$

Dove:

- $T_{ae}(t)$  è la temperatura dell'aria esterna media oraria [°C] ricavata dai dati climatici<sup>21</sup>
- $\alpha$  è l'assorbanza del terreno assunta pari a 0.75
- $G(t)$  è la radiazione diretta media oraria sulla superficie orizzontale [W/m<sup>2</sup>] ricavata dai dati climatici
- $h_e$  coefficiente liminare esterno pari a 25 W/m<sup>2</sup>K

Il calcolo è stato effettuato con l'ausilio del software di simulazione energetica dinamica Trnsys 16 con il quale si crea un modello nel quale vengono immessi i dati climatici e la sopracitata equazione, al fine di ricavare la temperatura superficiale ed esterna con un intervallo di calcolo di un'ora (in totale si ottengono 8760 valori in un anno):

<sup>19</sup> Ing. R. Marvaldi, Arch. L. Tramonto, *Green Roof Banca Popolare Etica*, pag.10

<sup>20</sup> <http://www.laroccarappresentanze.it>, Hyperdesmo System

<sup>21</sup> Dati climatici di Bergamo - Orio al Serio scaricati dal sito web [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)

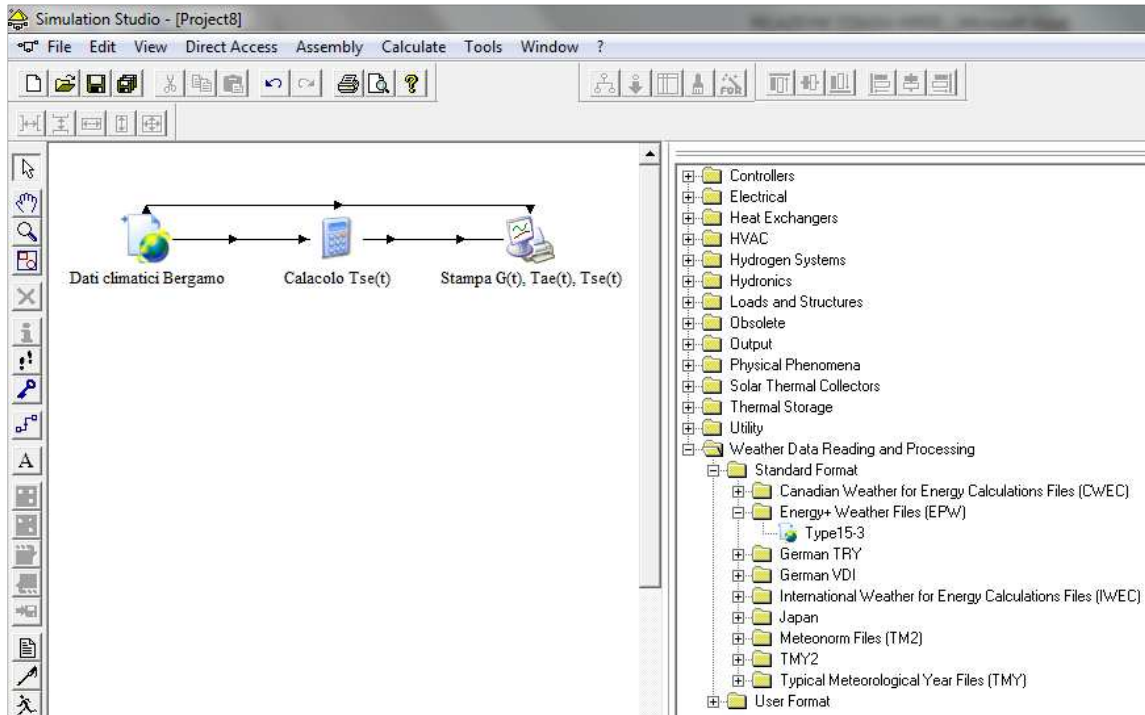


Figura 4.45: Modello in Trnsys 16 per il calcolo della  $T_s(t)$

Al fine di avere un risultato più sintetico, si calcolano le temperature esterne medie giornaliere  $\theta_{me}(t)$  e le temperature superficiali medie giornaliere  $\theta_{ave}(t)$ .

Dopo aver discretizzato la stratigrafia in strati più piccoli di spessore pari a 0.01 m, il profilo di temperatura, variabile con la profondità del terreno, si calcola con la seguente formula:

$$\theta(x, t) = \theta_{ave} + \Delta\theta e^{-\beta x} \sin(\omega t - \beta x)$$

Dove:

$$\Delta\theta = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{2}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Con:

- $\theta_{\max}$  è la temperatura massima giornaliera [K]
- $\theta_{\min}$  è la temperatura minima giornaliera [K]
- $\omega$  pulsazione angolare [1/s]
- T periodo di calcolo [h]
- $\alpha$  diffusività termica [m<sup>2</sup>/s]
- $\lambda$  conduttività del materiale [W/mK]
- $\rho$  densità del terreno [kg/m<sup>3</sup>]
- c capacità termica specifica [J/kgK]

Parametri temporali di calcolo:

T	24	h	86400	s
$\omega$	0.262	1/h	7.272E-05	1/s

**Tabella 4.42: Periodo di calcolo e pulsazione angolare**

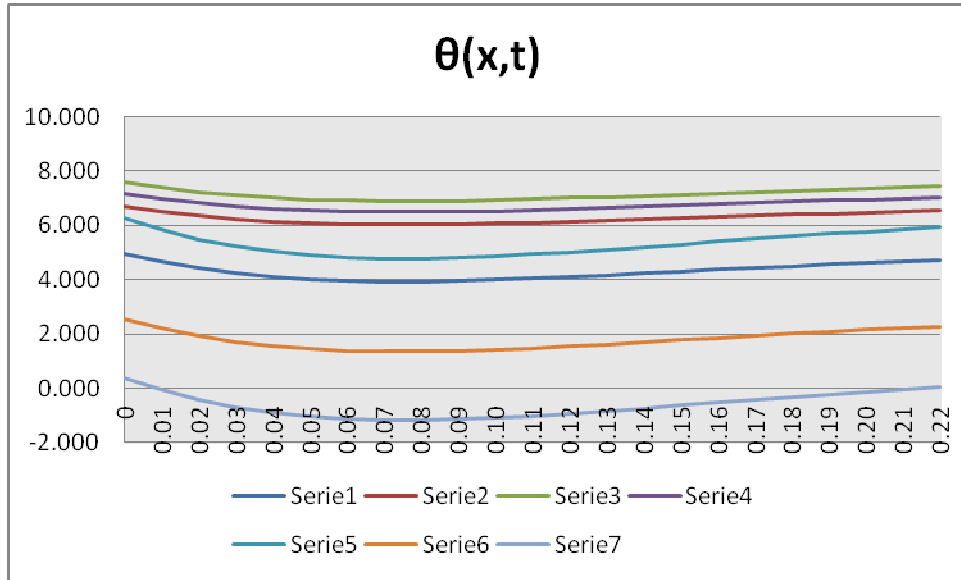
Le caratteristiche termiche del terreno vengono estrapolate dalla norma ISO 10456:2007:

$\rho$	$\lambda$	c	$\alpha$	$\beta$	$\delta$
kg/m <sup>3</sup>	W/mK	J/kgK	m <sup>2</sup> /s	1/m	m
1800	1.5	2500	3.333E-07	10.44	0.068

**Tabella 4.43: Proprietà termiche terreno [ISO 10456:2007, Table 3]**

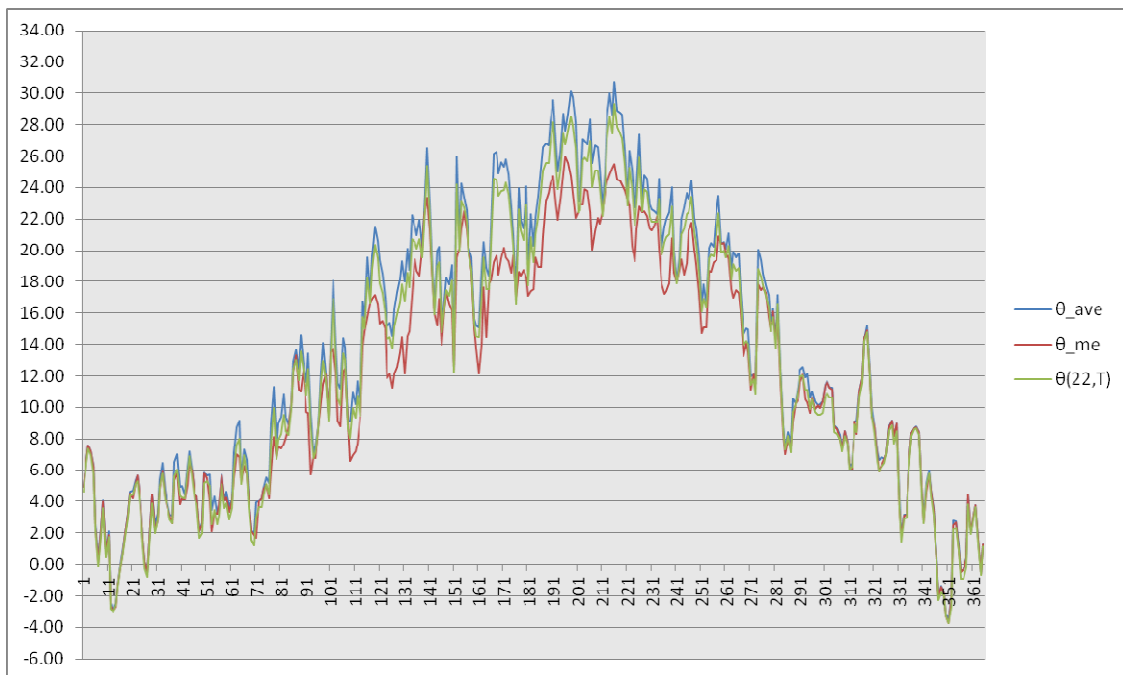
Da tale prospetto si può notare che l'onda termica giornaliera ha una profondità di penetrazione  $\delta$  minore dello spessore dello strato considerato. Per profondità superiori, la temperatura non risente più della radiazione solare ma tende a stabilizzarsi.

Si riporta l'andamento della temperatura in funzione della profondità di penetrazione per una settimana generica del mese di gennaio al solo scopo di esemplificare quanto appena affermato:



**Grafico 4.3: Andamento della temperatura in funzione della profondità di penetrazione**

Si ottiene infine l'andamento annuale delle temperature medie giornaliere sulla superficie all'intradosso dello strato di terreno  $\theta(22,t)$  e si pongono a confronto con le temperature medie giornaliere dell'aria esterna  $\theta_{me}$  e le temperature medie superficiali  $\theta_{ave}$ :



**Grafico 4.4: Andamento annuale delle temperature medie giornaliere**

Si giunge alle seguenti conclusioni:

- Le temperature alla profondità di 22cm del terreno sono maggiori della temperatura dell'aria esterna e minori della temperatura superficiale del terreno dove incide la radiazione solare.
- Lo strato impermeabilizzante, posto al di sotto del terreno, non è soggetto ad elevate escursioni termiche stagionali in quanto le temperature massime estive sono inferiori ai 35°C mentre le minime sono superiori ai - 4°C. l'impermeabilizzazione non è soggetta a forti azioni di deformazione dovuta a ritiro e dilatazione.
- Le temperature si abbassano a valori inferiori agli 0°C solamente per 17 giorni l'anno. Si può perciò ritenere trascurabile il congelamento dell'acqua accumulata sull'impermeabilizzazione. In tal caso l'aumento di volume dell'acqua non costituirebbe un problema in quanto la conformazione delle vaschette di accumulo permettono l'espansione verticale del fluido che non andrebbe perciò ad aggravare gli sforzi esercitati sulle pareti impermeabilizzate.
- Si può considerare, in base ai risultati ottenuti ed ai valori reperiti da letteratura, una vita media dello strato impermeabilizzante pari a 25 anni.



Per la struttura, esposta alle suddette condizioni atmosferiche e rischi di degrado, è garantita una vita utile di servizio di almeno 50 anni rispettando le prescrizioni date dalla norma UNI EN 206-1 riguardo le caratteristiche del calcestruzzo, lo spessore di copri ferro, il rapporto acqua/cemento, il dosaggio minimo di cemento, la lavorabilità del calcestruzzo, definite in base alle classi di esposizione ambientale. Il semplice rispetto delle norme elimina la maggior parte delle forme di degrado che si possono riscontrare. La forma di degrado che si presenta con maggior probabilità è la corrosione per carbonatazione, perciò in base alla norma si può considerare la struttura esposta alle condizioni ambientali descritte dalla classe di esposizione XC3 (ambiente ciclicamente bagnato e asciutto) e si adottano le seguenti caratteristiche di mix design per il confezionamento del calcestruzzo:

<b>Classi di esposizione ambientale secondo UNI EN 206-1</b>								
Classe di esposizione ambientale	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizioni ambientali	UNI 9858	A/C massimo	Contenuto minimo di cemento kg/m <sup>3</sup>	Rck minima N/mm <sup>2</sup>	Contenuto minimo di aria %	Copri ferro minimo Mm
XC3	Umidità moderata	Cls per interni con umidità relativa moderata o alta e cls all'esterno protetto dalla pioggia	5a	0,55	280	C30/37	-	30

Figura 4.46: Classe di esposizione ambientale [UNI EN 206-1]

L'elemento strutturale viene realizzato però in calcestruzzo fibrorinforzato caratterizzato, come detto precedentemente, dalla presenza di fibre d'acciaio all'interno della matrice e dalla assenza di armatura lenta per calcestruzzo armato tradizionale. Inoltre il minor diametro degli aggregati riduce la porosità della matrice cementizia garantendo i vantaggi che ciò comporta: lenta evaporazione dell'acqua dai pori capillari, umidità relativa elevata, lenta penetrazione dell'aria, bassa velocità di propagazione della carbonatazione.

La carbonatazione, qualora si inneschiasse, tende a corrodere la fibre metalliche. Studi sperimentali<sup>22</sup> hanno dimostrato che le fibre più soggette alla corrosione sono quelle poste nelle immediate vicinanze della superficie esposta del calcestruzzo e quelle con insufficiente protezione o non protette. Per le fibre con trattamenti superficiali sono stati osservati solo localizzati danni al ricoprimento superficiale. Si è inoltre osservato come i fenomeni corrosivi interessino sempre le fibre prese singolarmente e non si propagano, probabilmente a causa della discontinuità elettrochimica delle fibre stesse. Per quanto attiene alle fibre attraversanti fessure aperte, che sono direttamente esposte agli attacchi degli agenti aggressivi presenti nell'atmosfera, si è trovato che la loro sensibilità alla corrosione è legata alla apertura di fessura:

*"I risultati della prova di carbonatazione indicano un ottimo comportamento della sola matrice ed un ulteriore miglioramento quando si aggiungano fibre all'impasto. Risultati simili sono stati ottenuti sia con la prova di assorbimento dell'acqua per capillarità, sia dalla prova di penetrazione dell'acqua sotto pressione.*

<sup>22</sup> L. Ferrara, R. Fratesi, S. Signorini, F. Sonzogni, *Estratto dagli atti del 15° Congresso C.T.E. Bari*, 4-5-6 novembre 2004.

L'ottimo comportamento della matrice di calcestruzzo ad alta resistenza, sicuramente attribuibile alla sua elevata compattezza, è chiaramente sostenuta dai risultati delle prove; l'aggiunta delle fibre incrementa ulteriormente la durabilità del materiale, senza costituire preferenziale veicolo di ingresso degli agenti aggressivi all'interno della matrice".

La presenza di fibre migliora perciò le caratteristiche di porosità del materiale riducendo la profondità di penetrazione della carbonatazione rispetto ai calcestruzzi normali esposti alle stesse condizioni ambientali. Ciò è stato provato da una sperimentazione<sup>23</sup> su provini in SFRC tramite la lettura del rapporto tra l'acqua capillare CSH e il carbonato di calcio (prodotto della reazione di carbonatazione):

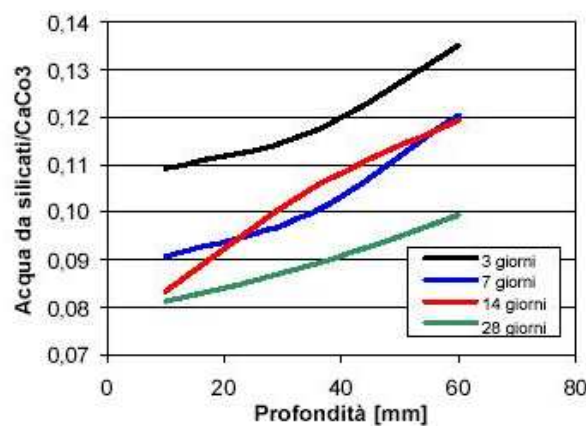


Figura 4.47: Andamento sempre ascendente della carbonatazione in profondità nei SFRC

Da quanto sopra si ottiene una chiara idea dell'avanzamento della carbonatazione nel tempo:

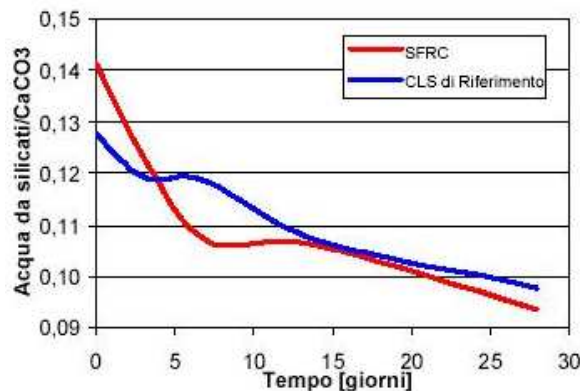


Figura 4.48: Andamento della carbonatazione media dei calcestruzzi fibrorinforzati e di riferimento, in funzione del tempo

<sup>23</sup> L. Cimitan, C. Failla, S. Signorini, F. Sonzogni, G. Viglieno-Cossalino, *Estratto dagli atti del 14° Congresso C.T.E. Mantova, 7-8-9 Novembre 2002.*

La tipologia di fibre non influenza particolarmente la resistenza alla penetrazione della carbonatazione, a meno di utilizzare fibre caratterizzate da una protezione superficiale (zincatura) che permette di prevenire o ritardare la corrosione tramite la formazione di un film passivo anche in ambienti debolmente acido come può essere il calcestruzzo carbonatato. Utilizzando tale tipologia di fibre è provato che si ha un decadimento della dimensione dei pori con il progredire della carbonatazione. Per carbonatazione il film passivo viene danneggiato in modo uniforme.

Come nel caso di calcestruzzi normali, anche per i SFRC viene costruita una tabella contenente indicazioni di carattere prescrittivo per il confezionamento di un calcestruzzo durevole per garantire una vita utile di servizio di almeno 50 anni, in condizioni ordinarie di manutenzione. Tale tabella viene proposta anche dalla norma CNR-DT 204/2006. Tramite questo strumento è possibile scegliere la tipologia di fibra da utilizzare in relazione alle classi di esposizione e alla matrice di calcestruzzo, limitatamente alle fibre di acciaio. Le fibre sono classificate con l'associazione di un numero (1, 2, 3) e una lettera (A, B, C). Il numero indica la composizione chimica delle fibre:

- 1       basso contenuto di carbonio
- 2       alto contenuto di carbonio
- 3       inox

la lettera il processo di produzione delle fibre:

- A       da filo trafilato
- B       da lamiera tagliata
- C       da altre fabbricazioni

La sigla ST indica l'eventuale protezione superficiale.

Tipo di calcestruzzo	Tipo di fibra	Classi di esposizione																			
		Nessun rischio di corrosione o attacco	Corrosione da carbonatazione					Corrosione da cloruri						Attacco gelo/disgelo				Ambienti chimici aggressivi			
			X0	XC1	XC2	XC3	XC4	Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)			Acqua marina			XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
C1	A3-B3-C3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	A1-B1-C1 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-
	A1-B1-C1	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	-	SI	-	-	-	SI	SI	SI	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
	A2-B2-C2	SI	SI	SI	-	-	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	A3-B3-C3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	A1-B1-C1 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-
	A1-B1-C1	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	-	SI	-	-	-	SI	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	-	SI	-	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2	SI	SI	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	A3-B3-C3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	A1-B1-C1 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A1-B1-C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 4.49: Raccomandazioni nella scelta di fibre d'acciaio in funzione della classe di esposizione e del tipo di calcestruzzo [CNR-DT 204/2006, Tabella 3-2]

Si possono utilizzare, per garantire la protezione dalla corrosione, fibre in acciaio zincato. La loro resistenza è buona per la corrosione da carbonatazione e per basse percentuali di cloruri. Per quantità di cloruri più elevate, il rivestimento si deteriora per pitting. In alternativa è possibile utilizzare fibre in acciaio inox A3, ma risulta essere una soluzione più costosa.

#### 4.2.5.2. Stima della vita utile

È stata determinata la vita utile di riferimento dell'elemento analizzandone i possibili modi di guasto. L'obiettivo è ora quello di determinare la vita utile del componente edilizio in condizioni di progetto attraverso l'applicazione del metodo fattoriale. Tale metodo consente di stimare la vita utile di un componente edilizio a partire dalla RLS (Reference Service Life), ovvero la durata di un determinato elemento tecnico in condizioni standard. L'applicazione del metodo fattoriale si basa non solo sulla RLS, bensì anche sull'ipotesi di fattori correttivi assegnati a secondo delle varie condizioni in cui il componente edilizio viene impiegato. Nonostante questo metodo risulti essere di semplice applicazione, purtroppo, presenta il difetto di essere fortemente arbitrario a seconda della valutazione dei vari fattori correttivi. La vita utile nelle condizioni contestuali di progetto (Estimated Service Life, ESL) si ottiene applicando la seguente formula:

$$ESL = RSL \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G$$

Dove:

- ESL è la vita utile dell'elemento tecnico nelle condizioni contestuali di progetto;
- RSL è la vita utile dell'elemento tecnico nelle condizioni di riferimento;
- A è il fattore legato alla qualità di produzione;
- B è il fattore legato alla qualità di progettazione;
- C è il fattore legato alla qualità di esecuzione;
- D è il fattore legato alle condizioni ambientali interne;
- E è il fattore legato alle condizioni ambientali esterni;
- F è il fattore legato alle condizioni d'uso;
- G è il fattore legato al livello di manutenzione.

Si ricorda che il valore numerico dei vari fattori dipende dal confronto tra le condizioni contestuali di progetto e le condizioni di riferimento fornite direttamente dal produttore. Ogni fattore può assumere valori che possono variare da 0,8 fino a 1,2: a seconda che le condizioni di contingenza risultino migliori (1,1 o 1,2) o peggiori (0,8 o 0,9) rispetto alle condizioni standard. Nel seguito verranno descritte brevemente le motivazioni che hanno portato alla scelta del valore di ogni singolo fattore preso in considerazione. Il caso di studio riguarda un elemento prefabbricato con funzioni portante, di accumulo idrico e di tenuta all'acqua, componente una stratigrafia di copertura verde intensivo leggero con strato di coltura di compreso tra i 15 e i 25 cm.

Si elencano di seguito le condizioni contestuali di progetto applicate a tutti e tre gli elementi tecnici presi in esame:

<i>Produzione</i>	<i>Progettazione</i>	<i>Esecuzione</i>	<i>Ambiente interno</i>	<i>Ambiente esterno</i>	<i>Condizione d'uso</i>	<i>Manutenzione</i>
<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>F</u>	<u>G</u>
Produzione certificata (Direttiva dei Prodotti da Costruzione, ISO 9001)	buona	Sub-appaltatori specializzati	Uso esterno.	Elevata esposizione ad inquinanti; periodicamente asciutto e bagnato; umidità elevata	Proprie da progetto	Assenza di manutenzione per inaccessibilità


**Tabella 4.44: Condizioni contestuali di progetto**

In seguito sono invece riportate le condizioni di riferimento per ogni elemento tecnico:

<i>Produzione</i>	<i>Progettazione</i>	<i>Esecuzione</i>	<i>Ambiente interno</i>	<i>Ambiente esterno</i>	<i>Condizione d'uso</i>	<i>Manutenzione</i>
<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>F</u>	<u>G</u>
Produzione certificata (Direttiva dei Prodotti da Costruzione, ISO 9001)	Non definito	Posa e assistenza specifica	Non definito	Ciclicamente asciutto e bagnato senza presenza di forti concentrazioni di inquinanti	Ponti di 3° categoria	Non definita

**Tabella 4.45: Condizioni di riferimento**

Viene ora riportato il componente edilizio esaminato con una breve descrizione:

<i>Descrizione</i>	
<p>Elemento portante bugnato di accumulo idrico per copertura verde, in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre in acciaio (classe di esposizione XC4). Impermeabilizzazione in bitume.</p>	

**Tabella 4.46: Descrizione del componente**

La stratigrafia completa nella quale si colloca il componente edilizio è la seguente:

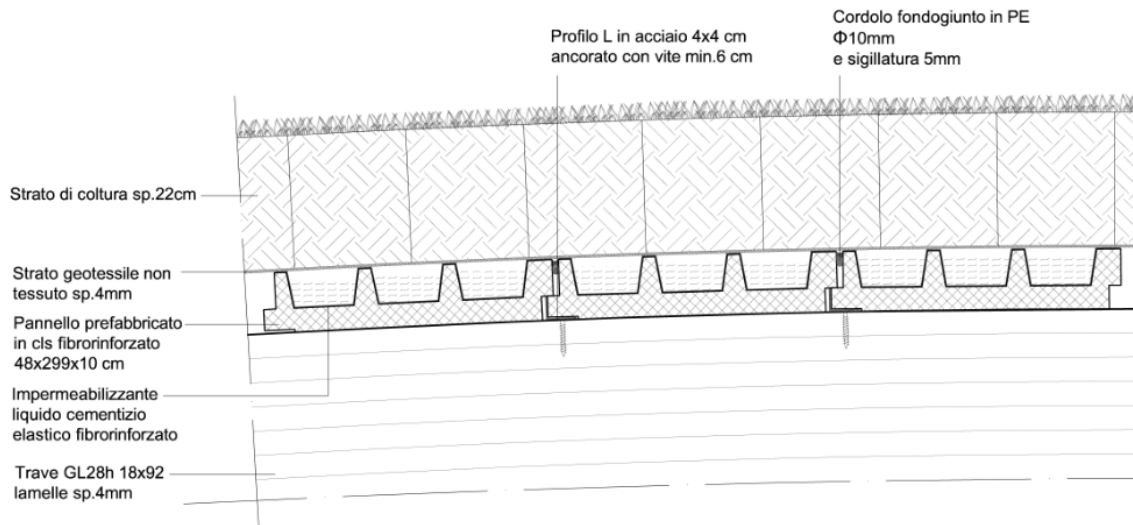


Figura 4.50: Sezione corrente copertura a verde

Si può calcolare ora la vita utile:

		Elemento portante di accumulo idrico per copertura verde in calcestruzzo fibrorinforzato (classe di esposizione XC4)
<b>RSL</b>	50	Vita Utile di riferimento (Reference Service Life) pari alla vita utile della struttura
<b>A</b>	1.2	Un sistema di produzione certificato secondo la Direttiva Prodotti della Costruzione permette di garantire maggiore qualità del prodotto rispetto ad una condizione in cui non viene indicata alcuna specificazione. La prefabbricazione garantisce un maggiore livello qualitativo del prodotto in quanto è certificato il processo di produzione.
<b>B</b>	1.1	L'elemento non è direttamente esposto a vento, pioggia e altri fenomeni atmosferici in quanto sottostante ad altri strati. Il contatto diretto con l'acqua è evitato tramite impermeabilizzazione. All'intradosso è a contatto con l'ambiente esterno.
<b>C</b>	1.1	Le condizioni contestuali di progetto richiedono manodopera e assistenza specifica.
<b>D</b>	1	Uso esterno.
<b>E</b>	0.9	Presenza di acqua in base alla frequenza delle precipitazioni. Periodi con presenza di acqua e periodi con assenza di acqua. Il terreno fa sì che l'elemento sia costantemente esposto ad umidità. Alta concentrazione di inquinanti (autostrada)
<b>F</b>	1.2	Elemento soggetto a sollecitazioni d'esercizio previste dal calcolo quali carichi permanenti e accidentali. Non è a diretto contatto con l'utenza.
<b>G</b>	0.8	Limitata accessibilità. L'elemento non è facilmente manutenibile perché richiederebbe la parziale rimozione degli strati superiori e il loro temporaneo stoccaggio.
<b>ESL</b>	<b>62.7</b>	<b>Vita Utile Stimata nelle condizioni di contesto</b>

Tabella 4.47: Attribuzione dei punteggi, motivazioni e calcolo della vita utile

Si può stimare la vita utile, utilizzando un metodo fattoriale cosiddetto “evoluto”. È un metodo di stima ingegneristico della durata in opera di un componente edilizio, direttamente discendente dal metodo fattoriale semplice. Esso mantiene una complessità abbastanza limitata ed ha il vantaggio di offrire un precisione ed un’accuratezza migliori di quello non evoluto. Anche questo metodo prevede di stimare la vita utile dei componenti edilizi presi in esame nelle condizioni di progetto correggendo il valore della RLS (Reference Service Life) con dei fattori moltiplicativi riferiti alle condizioni particolari in cui il componente viene utilizzato. La sua maggiore complessità, che determina anche una più alta realistica dei risultati, è data dall’utilizzo di distribuzioni di probabilità per definire i fattori correttivi, in luogo dei fattori deterministici che si assegnavano con il metodo semplice. Si attribuiscono valori minimi e massimi per ogni categoria in base alle variabilità delle condizioni di contesto definite nel calcolo precedente. Si costruisce così una distribuzione di probabilità triangolare per ogni fattore.

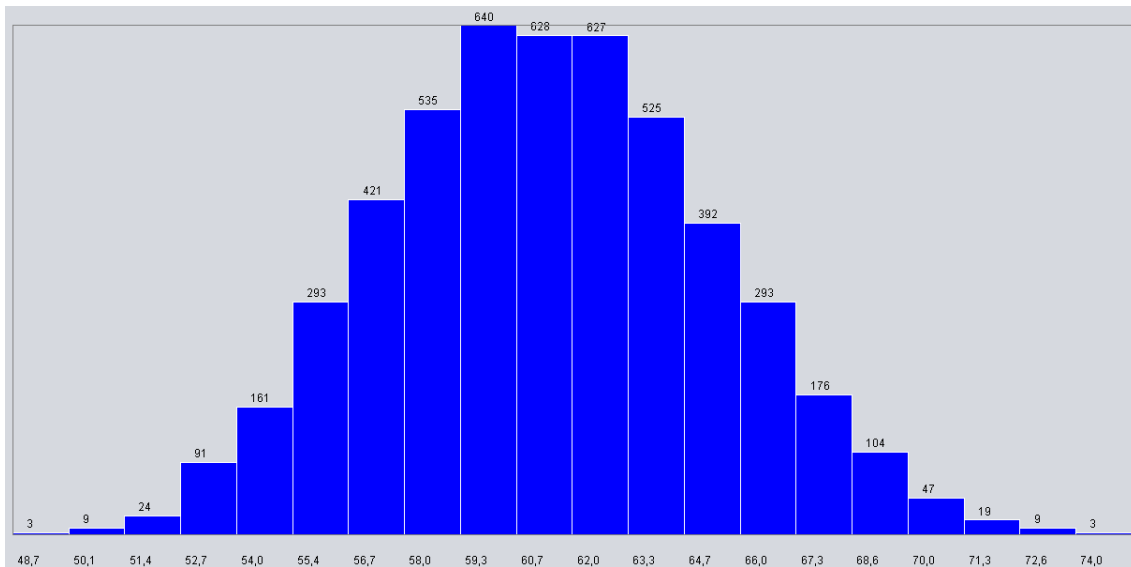
<b>CODICE</b>			<b>RSL</b>	<b>DESCRIZIONE</b>
			50	Elemento portante di accumulo idrico per copertura verde in calcestruzzo fibrinforzato ottenuta tramite il rispetto delle prescrizioni desunte dalla normativa di riferimento per tale materiale e dalle prove sperimentali documentate nei testi riportati in bibliografia (Tipologia fibre A1, Classe di esposizione XC3, $R_{min}=C30/37$ , $(a/c)_{min}=0,55$ ).
<b>INTERVALLO VALORI</b>			<b>MOTIVAZIONE</b>	
$A_{min}$	$A_{pp}$	$A_{max}$	Una produzione certificata (prefabbricazione) è considerata sufficientemente affidabile da poter ridurre il valore di progetto del 5%.	
1,15	1,20	1,20		
$B_{min}$	$B_{pp}$	$B_{max}$	Essendo la fase progettuale controllata, si è stabilito che il fattore B potesse avere un valore minimo inferiore del 5% rispetto al valore più probabile. Il valore massimo viene aumentato solo del 5% rispetto al valore più probabile perché l’attività progettuale raramente riesce a raggiungere risultati migliori rispetto agli obiettivi iniziali.	
1,05	1,1	1,15		
$C_{min}$	$C_{pp}$	$C_{max}$	Poiché la fase esecutiva risulta essere una delle fasi più critiche e meno controllabili del processo edilizio si è stabilito di porre il valore minimo ridotto del 10% rispetto al valore più probabile. Inoltre, poiché la fase esecutiva difficilmente porta alla realizzazione di elementi tecnici migliori di ciò che era stato pensato nella fase progettuale, si assegna un valore massimo pari a quello medio. Si ritiene critica la fase di posa principalmente per ciò che riguarda la realizzazione dei giunti tra gli elementi, punti di più probabile infiltrazione di acqua.	
1	1,1	1,1		
$D_{min}$	$D_{pp}$	$D_{max}$	L’elemento è posto in ambiente esterno quindi non si hanno variazioni delle prestazioni in base alle condizioni ambientali interne.	
1	1	1		
$E_{min}$	$E_{pp}$	$E_{max}$	Si è deciso che il valore minimo del fattore E potesse essere posto pari a 0,8 in quanto le concentrazioni di inquinanti in certi periodi della giornata o dell’anno possono raggiungere valori molto alti, pregiudicando il comportamento e l’aspetto della faccia inferiore del pannello. Si è inoltre stabilito che il valore massimo risulti pari a 1 in quanto vi sono periodi, in particolare quelli piovosi, ventosi e con poco traffico in cui la concentrazione degli inquinanti può diminuire in maniera drastica.	
0,8	0,9	1		



$F_{min}$	$F_{pp}$	$F_{max}$	L'elemento può essere soggetto a carichi particolari, come incendio, urto, ecc..che ne rendono più insicuro l'utilizzo normale.
1,1	1,2	1,2	
$G_{min}$	$G_{pp}$	$G_{max}$	Si è stabilito che il fattore massimo potesse variare del 10% rispetto al valore medio in quanto le opere di manutenzione, se effettuate, sono di natura straordinaria e perciò molto incidenti sul ripristino delle prestazioni iniziali del componente edilizio.
0,8	0,8	0,9	

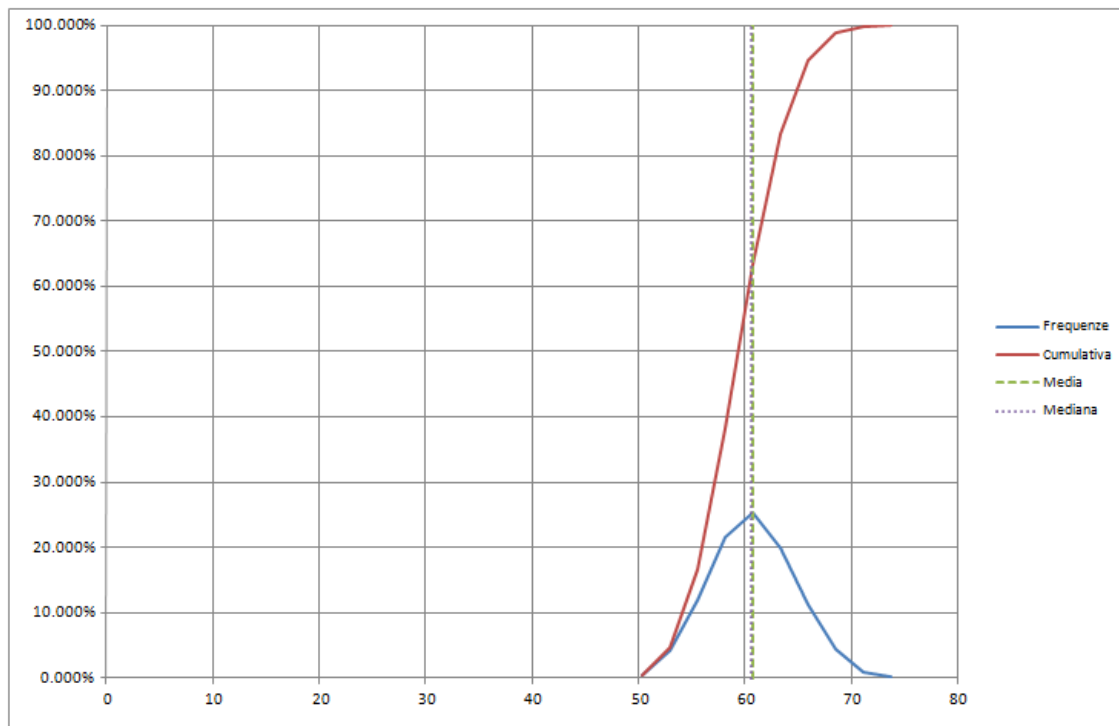
**Tabella 4.48: valori, motivazioni e calcolo vita utile (metodo fattoriale evoluto)**

Si riporta la distribuzione di probabilità ottenuta inserendo i valori più probabili, massimi e minimi dei singoli fattori in SLP tool, programma che sfruttando il Metodo Montecarlo fornisce il grafico seguente che permette di visualizzare quale sia il valore più attendibile di ESL e in quale intorno potrà variare più probabilmente:



**Grafico 4.5: Distribuzione di probabilità di ESL**


Da questo grafico è possibile vedere che il valore di ESL con la più alta probabilità corrisponde all' intervallo che ha per valor medio 59.3 anni, mentre considerando i 5000 valori casuali utilizzati per l' applicazione del Metodo Montecarlo si calcola una media di 60.71 anni ed una mediana di 60.59 anni. Nel grafico seguente è riportata la curva corrispondente alla probabilità cumulativa che mostra come ci sia circa il 62% di probabilità che il componente termini la sua vista utile prima del valore più probabile di ESL.



**Grafico 4.6: Curva di probabilità cumulativa**

Si nota come sia presente uno scarto di circa 4 anni tra la stima effettuata con il metodo fattoriale semplice e quello evoluto. Si prendono per buoni i risultati di quest'ultimo.

## 4.2.5.3. Strategie per la manutenzione

AGENTI	AZIONI	EFFETTI-GUASTI	INTERVENTI
Chimici	H <sub>2</sub> O	<p>Problema risolto con impermeabilizzazione dello strato di supporto. Possibile guasto dei giunti o più raramente dell'impermeabilizzazione.</p>	<p>Ispezione visiva annuale dell'intradosso della copertura.</p> <p>Ripristino dell'impermeabilizzazione tramite la rimozione del terreno e posa di nuovo strato impermeabile liquido. Ogni 30 anni a meno di guasti accidentali rilevati per mezzo dell'ispezione visiva.</p>
	CO <sub>2</sub>	<p>L'ingresso di CO<sub>2</sub> nei pori capillari provoca la carbonatazione del calcestruzzo e quindi, per la riduzione del pH, la corrosione delle fibre d'acciaio.</p> <p>Il degrado si manifesta con tracce di ruggine su fibre superficiali.</p> 	<p>Ispezione visiva annuale dell'intradosso della copertura.</p> <p>Prelievo e analisi chimica di campioni per valutare l'avanzamento del degrado e la vita residua della struttura.</p> <p>Ripristino del calcestruzzo tramite le seguenti operazioni<sup>24</sup>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rimozione sporco e parti incoerenti e in via di distacco</li> <li>- Pulizia delle fibre dalla ruggine</li> <li>- Protezione delle fibre tramite applicazione di due mani di boiaccia passivante anticarbonatante</li> <li>- Ripristino dello spessore originale con malta cementizia fibrorinforzata a ritiro compensato</li> <li>- Rasatura della superficie con malta a base di leganti idraulici, inerti silicei selezionati e additivi polimerici</li> <li>- Protezione contro la carbonatazione con vernice a base di resine acriliche.</li> </ul>

<sup>24</sup> [www.indexspa.it](http://www.indexspa.it), Capitolato tecnico 3 – Ripristino del calcestruzzo e <http://www.alfaetomega.it/risanamento-calcestruzzo.html>


Fisici	Sovraccarichi	Fessurazione e/o microfessurazione sul lembo inferiore teso.	<p>Misurazione in sito dell'apertura delle fessure</p> <p>Rinforzo a flessione con FRP (Fiber Reinforced Polymer) dopo aver praticato la pulitura delle superfici.</p> 
--------	---------------	--	---

Tabella 4.49: Scheda dei guasti di elementi SFRC

### 4.3. BARRIERE ACUSTICHE CON FOTOVOLTAICO INTEGRATO

La sostenibilità di un intervento quale un'infrastruttura autostradale, è resa possibile anche dal controllo delle emissioni sonore in ambiente. Il tracciato, essendo realizzato prevalentemente in trincea, permette, tramite la sua conformazione, di risolvere il problema dell'attenuazione del livello sonoro immesso in ambiente. Infatti il terreno accumulato lateralmente alle carreggiate funge da barriera acustica e attenua l'onda sonora generata dalla sorgente (il traffico). Nel caso che il tracciato percorra il territorio o in rilevato, l'effetto di attenuazione dovuto al terreno scompare e deve essere compiuto da elementi artificiali appositamente progettati allo scopo e interposti tra sorgente e ricevitori (edifici isolati o posti in centri abitati entro la fascia di rispetto acustica). La soluzione oggi più utilizzata per l'abbattimento del rumore generato dalle attività di trasporto, è rappresentata dalle barriere acustiche, nonostante si producano e vi siano in circolazione mezzi di trasporto con motori più silenziosi, sistemi di scarico più isolati e si utilizzino asfalti fonoassorbenti. L'inserimento di una barriera acustica nel territorio è un fatto complesso che produce effetti non solo acustici, ma anche di impatto visivo e paesaggistico; è per questo che i tratti di rete stradale che richiedono l'installazione di barriere sono limitati, cercando in sede di progetto una maggiore integrazione del tracciato con il paesaggio, mantenendo adeguate distanze dai centri abitati e realizzando prevalentemente tratti in trincea (come avviene nel caso dell' IPB).

Gli aspetti che concorrono alla scelta di una barriera antirumore possono essere suddivisi in due categorie: quelli relativi alle prestazioni di tipo acustico e quelli di tipo non acustico. I primi riguardano le modifiche del campo acustico introdotte dalla barriera al fine di ottenere un beneficio nelle zone da proteggere (fattori positivi) o riguardano un eventuale degrado delle prestazioni (fattori negativi); in base alle più recenti tendenze della ricerca internazionale, essi possono essere sintetizzati in tre parametri chiave: *insertion loss*, *transmission loss* e *reflection loss*. I secondi includono una grande varietà di aspetti.

- Insertion loss: misura dell'effettiva efficienza della barriera inserita nell'ambiente;
- Transmission loss: misura della capacità della barriera di attenuare il suono trasmesso attraverso essa;
- Reflection loss: misura della capacità della barriera di attenuare il suono riflesso su di essa.

Una barriera acustica è un ostacolo solido, sufficientemente fonoisolante, che blocca la linea di vista tra la sorgente di rumore ed il ricevitore. Il fenomeno chiave è quello della **diffrazione**, per cui le onde sonore, quando incontrano la barriera, si propagano oltre ed anche dietro la stessa, ma con intensità attenuata. È come se il bordo della barriera divenisse la sorgente sonora effettiva che irradia nella zona schermata, con una intensità minore di quella della sorgente reale (principio di Huygens-Fresnel). Si dice anche che la barriera crea una zona di ombra acustica.

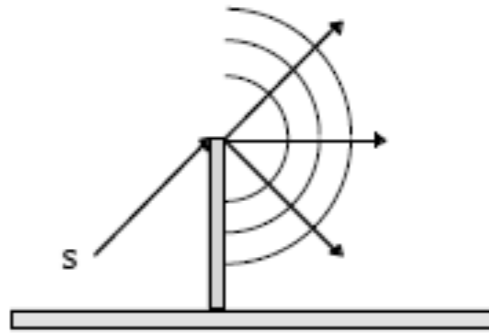


Figura 4.51: Fenomeno della diffrazione su barriera acustica

L'efficienza di una barriera acustica è rappresentata dall'isolamento acustico  $\Delta L$  definito come la differenza tra il livello di pressione sonora  $L_0$  in un certo punto prima dell'inserimento della barriera e il livello che si ha dopo l'inserimento della barriera  $L_1$ .

In generale, l'energia acustica prodotta da una sorgente, raggiunge il ricevitore secondo tre modalità:

- Diffrazione sul bordo superiore e sui bordi laterali;
- Trasmissione attraverso la barriera;
- Diffrazione e riflessione prodotte da superfici investite dall'onda acustica.

Nel caso di propagazione in campo aperto si trascura l'ultimo effetto.

In relazione allo spettro del rumore stradale per barriere con massa superficiale maggiore a  $20\text{kg/m}^2$  si può ritenere non determinante e perciò trascurabile la trasmissione<sup>25</sup>. Quindi l'energia che raggiunge il ricevitore è solamente quella trasmessa per diffrazione e si calcola con la seguente formula (formula di Maekawa):

$$\Delta L = 10 \log_{10}(3 + 20N)$$

Nel caso di sorgenti lineari, come il traffico stradale, la formula di Maekawa diventa:

$$\Delta L = 10 \log_{10}(2 + 5,5N)$$

N è il numero di Fresnel:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

Dove:

$$\delta = SC + CR - SR = 2\sqrt{h^2 + 16} - 8$$

<sup>25</sup> U.J. Kurze, C.S. Anderson, *Sound attenuation by barrier*, 1971

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Con:

- $\delta$  cammino percorso dall'onda sonora
- $\lambda$  lunghezza d'onda della perturbazione sonora
- $c$  velocità del suono
- $f$  frequenza

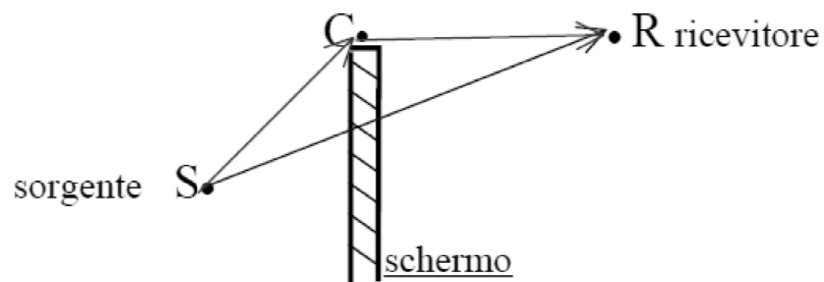


Figura 4.52: Schematizzazione del percorso  $\delta$

Per considerare anche l'effetto della diffrazione dai bordi laterali ( $N_1, N_2$ ) della barriera si può calcolare l'isolamento acustico nel seguente modo (Per lunghezze superiori a 4-5 volte l' altezza, l'effetto dei bordi è trascurabile):

$$\Delta L' = \Delta L - 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} \right)$$

#### 4.3.1. Verifica dell'attenuazione del livello acustico

Dal concept iniziale si vede che le barriere acustiche costituiscono un prolungamento del sistema dei pannelli fotovoltaici posti sul pendio del rilevato stradale, fino a raccordarsi con il traliccio che regge i pannelli informativi quando questo è presente. Per poter realizzare un prodotto finale quanto più vicino a quanto descritto, si è pensato di spezzare le due parti, quella inferiore vincolata al pendio e quella superiore, per far sì che non si abbiano rotture dovute a movimenti differenziali tra il terreno ed il traliccio.

La barriera acustica si realizza con pannelli sandwich costituiti da un involucro composto da due lamiera d'acciaio zincato unite da rivetti, di dimensioni pari a 296x50x10,5 centimetri. La funzione di abbattimento acustico è affidata ad un pannello isolante interposto in lana di roccia con densità di 90 kg/m<sup>3</sup>. Essendo una delle due lamiera microforata, il pannello isolante è rivestito, sul lato a contatto con questa, con un velo vetro resinato, idrorepellente, siliconato, in modo da garantire la resistenza agli agenti atmosferici e ai raggi ultravioletti. Sui bordi laterali il pannello è chiuso da una testata in polipropilene caricato per assicurare l'ermeticità tra pannello e struttura portante della barriera, costituita da pilastri HEA di tre possibili misure diverse, 140, 160 e 180 mm.

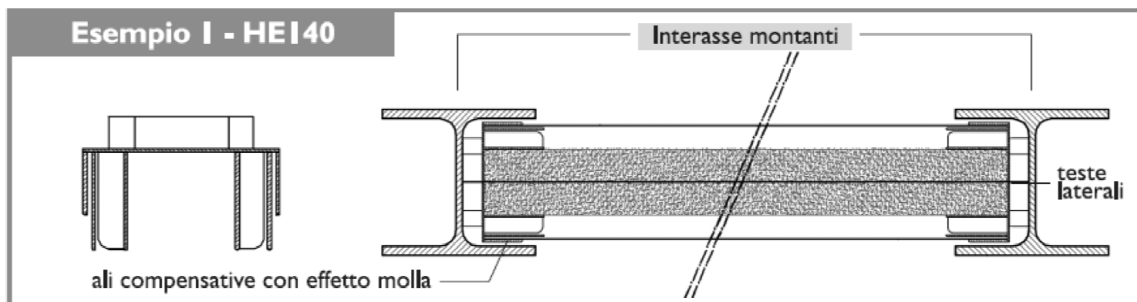


Figura 4.53: Schema di montaggio pannello fonoassorbente [www.alufon.it]

La barriera acustica, così realizzata, è inclinata sul piano stradale di 41° per un'altezza di 4,58 metri. Sarà necessario perciò verificare che l'attenuazione del livello acustico da fonte di traffico stradale, porti ad un livello che rispetti i limiti di immissione sonora previsti dalla legge. Si fa riferimento al DPR 30/03/04 n°142 in cui si definisce:

- fascia di pertinenza acustica: striscia di terreno misurata in proiezione orizzontale, per ciascun lato dell'infrastruttura, a partire dal confine stradale, per la quale il presente decreto stabilisce i limiti di immissione del rumore.



TIPO DI STRADA (secondo codice della strada)	SOTTOTIPI A FINI ACUSTICI (secondo D.M. 5.11.01 - Norme funz. E geom. Per la costruzione di strade)	Ampiezza fascia di pertinenza acustici (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)	Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)
A - autostrada		250	50	40	65	55

Figura 4.54: Valori limite di livello acustico e fasce di pertinenza acustica [DPR 30/03/04 n°142, Allegato 1]

In base alle formule sopra citate, si verifica l'efficacia della barriera a partire dalla sua altezza, definita in progetto. Si assume un livello acustico iniziale pari ad 80 dB (strada molto trafficata).

<i>h</i>	<b>4.58</b>	<i>m</i>
$\delta$	4.16	m
N	12.24	
$\Delta L$	18.41	dB
L	80	dB
<b>L'</b>	<b>61.59</b>	<b>dB</b>

Tabella 4.50: Verifica di attenuazione del livello sonoro in prossimità di una barriera fonoassorbente

È verificato il livello acustico limite diurno per un ricettore posto immediatamente dietro la barriera. Per distanze maggiori, si avranno ulteriori attenuazioni dovute all'effetto dell'aria, del terreno e meteorologici.

L'assorbimento di energia sonora da parte dell'aria dipende fortemente dalla frequenza del suono e dall'umidità, meno fortemente dalla temperatura e dalla pressione ambientale.

La presenza del terreno crea riflessioni che interferiscono in modo costruttivo o distruttivo con le onde sonore generate dalla sorgente. L'onda riflessa viene modificata sia in ampiezza che in fase. L'attenuazione dovuta al terreno varia fortemente con la frequenza, in funzione del tipo di sorgente, delle caratteristiche del terreno, delle altezze e della distanza relativa tra sorgente e ricevitore. L'effetto è particolarmente rilevante alle frequenze medio-basse per terreni "soffici" e quando la sorgente si trova al di sopra del terreno di almeno un metro: è perciò particolarmente influente per sorgenti sonore come il traffico stradale.

Tra gli effetti meteorologici sono compresi i gradienti di temperatura e i gradienti di velocità del vento causano per *rifrazione* un cambiamento di direzione delle onde sonore durante la propagazione. Se la curvatura è verso l'alto si crea una zona d'ombra vicino al terreno, in cui si ha un'attenuazione che può raggiungere i -20 dB.

Nel caso invece di curvatura delle traiettorie verso il basso si ha una condizione favorevole per la propagazione ed un minimo di attenuazione. La curvatura verso l'alto è prodotta dalla propagazione controvento; la curvatura verso il basso è prodotta dalla propagazione a favore di vento. Effetti analoghi si hanno, rispettivamente, nel caso di gradienti di temperatura negativi verso l'alto (ore pomeridiane) o verso il basso (ore mattutine).

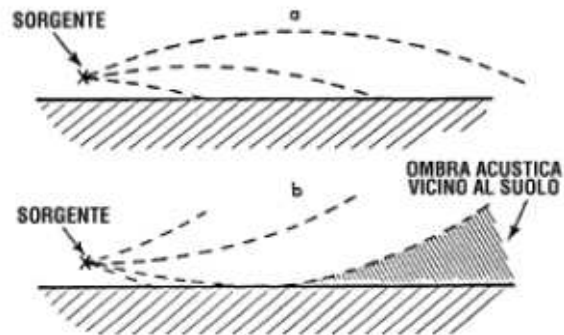


Figura 4.55: Curvatura delle traiettorie di propagazione del suono causate dal vento o gradienti termici

### 4.3.2. Verifiche strutturali

Rimane da verificare la resistenza degli elementi strutturali che sorreggono i pannelli costituenti le barriere acustiche. Si ipotizza di utilizzare profili HE140A inclinati di  $41^\circ$  sul piano stradale, ancorati ad un cordolo di fondazione tramite tirafondi e accoppiati a profili tubolari in acciaio che oltre ad essere un ulteriore sostegno, permettono di mantenere la continuità del disegno creato dallo scandirsi dei tralicci, ricalcandone la forma.

Per una corretta analisi dei carichi sulla struttura, è necessario ricalcolare l'azione del vento, considerando i coefficienti di pressione propri per muri e parapetti, secondo l'Appendice G.5 della norma CNR-DT 207/2008 "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni". I coefficienti di pressione complessiva assumono valori differenti in funzione della distanza dalla estremità dell'elemento; quindi questo viene suddiviso in fasce, dove  $h$  è l'altezza del muro o del parapetto. I coefficienti di pressione complessiva sono inoltre influenzati dall'eventuale presenza di un elemento di chiusura laterale disposto nella direzione del flusso; esso ha l'effetto di ridurre (in modulo) la depressione sulla faccia sottovento e, pertanto, di ridurre la pressione complessiva che agisce sulle aree prossime all'estremità.

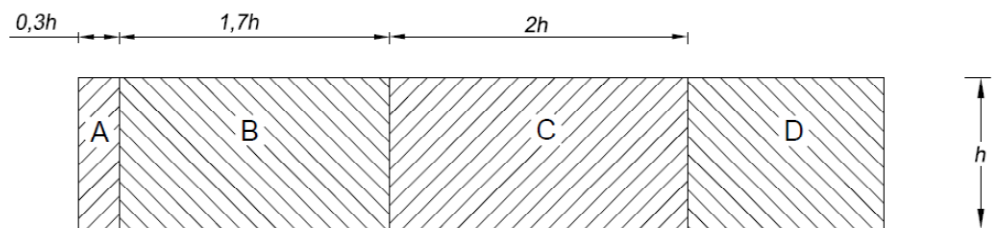


Figura 4.56: Suddivisione di muri e parapetti in aree di uguale pressione complessiva [CNR-DT 207/2008, Appendice G.5]

Per ogni fascia dell'elemento, in funzione del rapporto tra lunghezza e altezza, della densità  $\varphi$  della parete (porosità) e della presenza di una chiusura laterale, si hanno differenti coefficienti di pressione:

- $\varphi = 1$  parete non porosa
- $l/h \geq 10$  si suppone una lunghezza indefinita della barriera
- assenza di chiusura laterale

$c_{pn}$	A	3.4
	B	2.1
	C	1.7
	D	1.2

Tabella 4.51: Coefficienti di pressione complessiva

L'elemento considerato è inoltre posto sottovento ad un altro elemento simile (barriera sul lato opposto della strada). Questo può causare un effetto di schermatura che porta ad una riduzione della pressione sull'elemento stesso. Tale riduzione è legata alla porosità dell'elemento schermante e alla distanza tra l'elemento schermante e l'elemento considerato. Si calcola un coefficiente  $\psi_s$  che va a moltiplicare i coefficienti  $c_{pn}$ .

Rapporto di spaziatura $x/h$	$\varphi = 1,0$	$\varphi = 0,8$
$0 \leq x/h \leq 5$	$\psi_s = 0,3$	
$5 \leq x/h \leq 10$	$\psi_s = 0,07 \cdot (x/h) - 0,05$	$\psi_s = 0,03 \cdot (x/h) + 0,15$
$10 \leq x/h \leq 15$	$\psi_s = 0,04 \cdot (x/h) + 0,25$	$\psi_s = 0,04 \cdot (x/h) + 0,05$
$15 \leq x/h \leq 20$	$\psi_s = 0,03 \cdot (x/h) + 0,40$	$\psi_s = 0,07 \cdot (x/h) - 0,40$

Figura 4.57: Fattore di schermatura per muri e parapetti [CNR-DT 207/2008, Appendice G.5]

Si ottiene il seguente valore di  $\psi_s$ :

x [m]	40
h [m]	7.12
x/h	5.62
$\psi_s$	0.34

Tabella 4.52: Calcolo fattore di schermatura

E i nuovi valori del coefficiente di pressione:

$c_{pn}$	A	1.17
	B	0.72
	C	0.58
	D	0.41

Tabella 4.53: Valori coefficiente di pressione

La pressione cinetica di picco del vento viene calcolata come visto precedentemente con i parametri di macrozonazione:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_{b0}^2 = 390,625 \text{ N/m}^2$$

Si pone  $c_r=1$  e si calcola il coefficiente di esposizione  $c_e$  in base alla categoria di esposizione del sito di progetto e alla altezza  $z$  dal suolo:

$$\begin{array}{ll}
 c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] & \text{per } z \geq z_{\min} \\
 c_e(z) = c_e(z_{\min}) & \text{per } z < z_{\min}
 \end{array}$$

Figura 4.58: Coefficiente di esposizione [CNR-DT 207/2008, par. 3.2.7]

La pressione del vento è quindi data dal prodotto tra la pressione cinetica di picco e i coefficienti precedentemente calcolati:

$$P = q_b c_r c_e c_{pn}$$

P (x)	876.27	N/m <sup>2</sup>
	541.23	N/m <sup>2</sup>
	438.14	N/m <sup>2</sup>
	309.27	N/m <sup>2</sup>

Tabella 4.54: Pressione del vento

Il carico della neve è ridotto rispetto a quello calcolato precedentemente in quanto il coefficiente di esposizione è calcolato per inclinazioni comprese tra 30° e 60°.

La struttura viene schematizzata con 20 elementi discreti incastrati a terra:

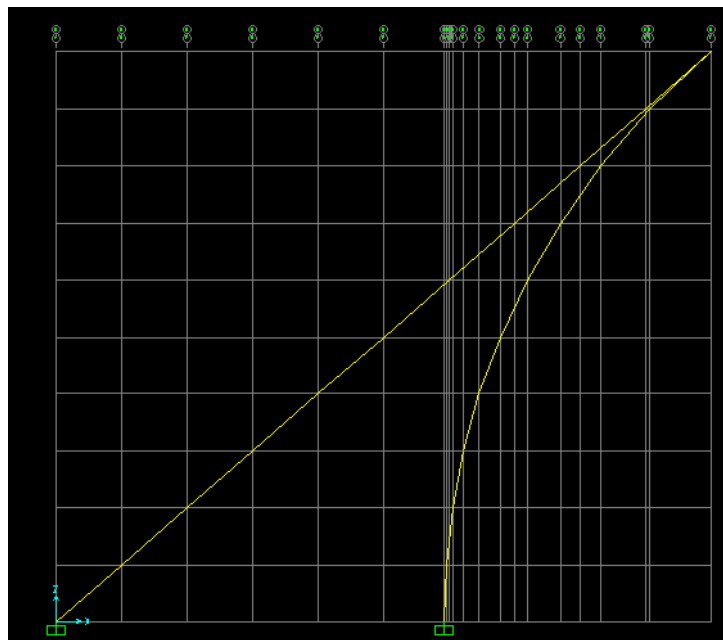


Figura 4.59: Schematizzazione struttura con SAP 2000

Su di essa gravano i seguenti carichi:

<i>PERMANENTI</i>		
HEA140	0.19	kN/m <sup>2</sup>
<i>PERMANENTI NON STRUTTURALI</i>		
P.FONO	0.15	kN/m <sup>2</sup>
P.FV	0.5	kN/m <sup>2</sup>
<i>VARIABILI</i>		
vento	0.88	kN/m <sup>2</sup>
neve	0.76	kN/m <sup>2</sup>

**Tabella 4.55: Analisi dei carichi**

Utilizzando i coefficienti di combinazione, si realizzano le combinazioni di carico allo stato limite di esercizio (SLE) e allo stato limite ultimo (SLU) che vengono utilizzate per caricare la struttura al fine delle verifiche di resistenza:

$\gamma_g$	1.30
$\gamma_{g'}$	1.50
$\gamma_{q1}$	1.50
$\psi$	0.50

**Tabella 4.56: Coefficienti parziali**

$P_{SLE}$	2.09	kN/m <sup>2</sup>
$P_{SLE}$	6.27	kN/m

**Tabella 4.57: Combinazione di carico SLE**

$p_{SLU}$	3.10	kN/m <sup>2</sup>
$P_{SLU}$	9.30	kN/m

**Tabella 4.58: Combinazione di carico SLU**

Dal software si ottengono i diagrammi delle azioni:

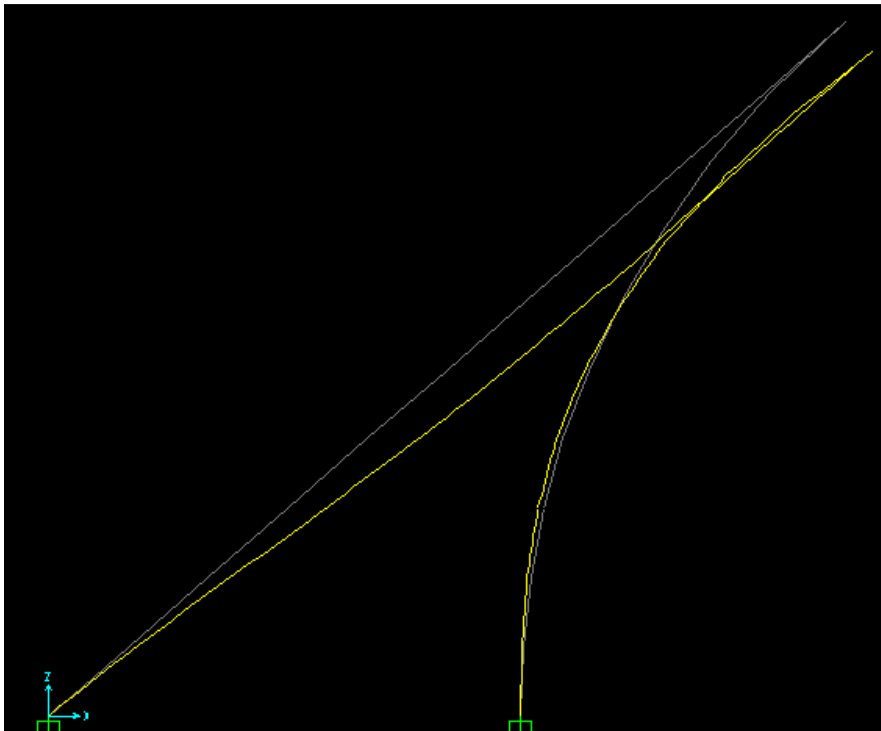


Figura 4.60: Diagramma deformato

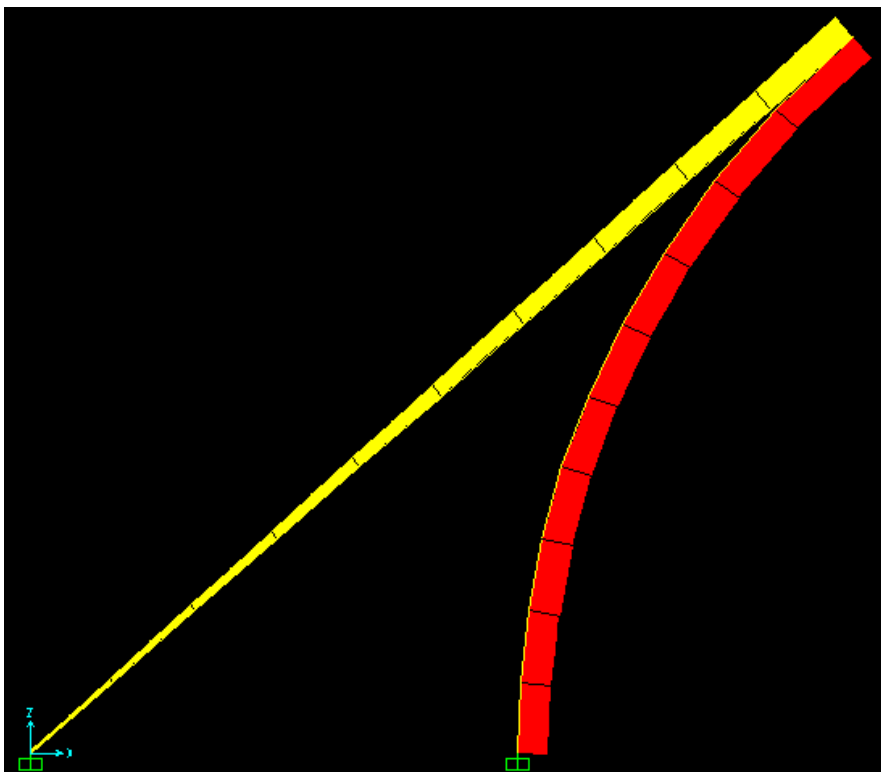


Figura 4.61: Diagramma azione assiale (N)

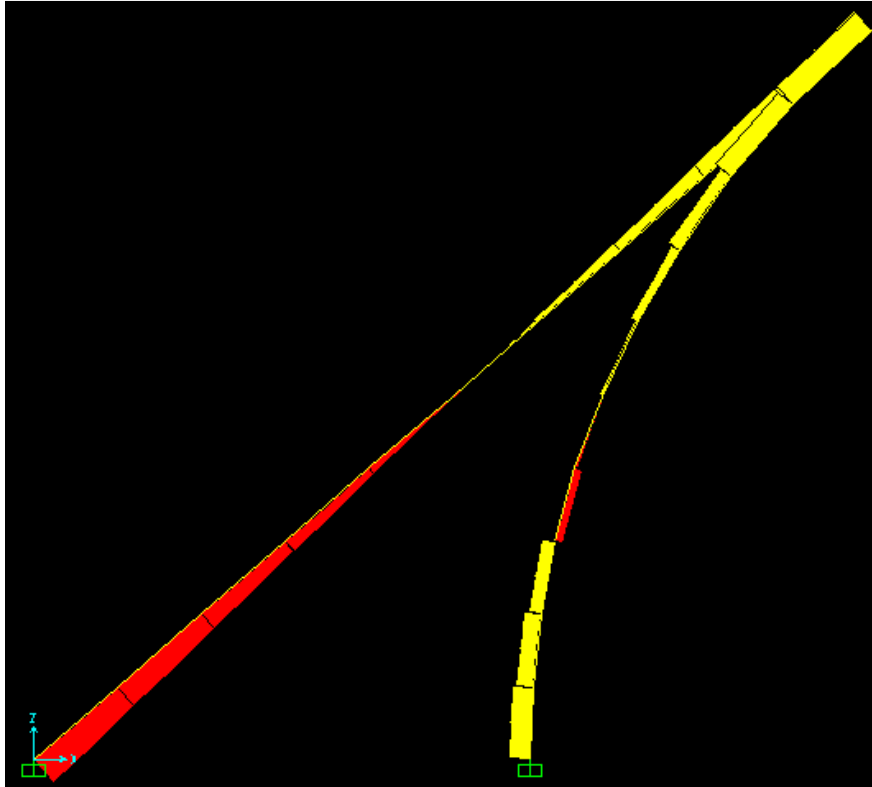


Figura 4.62: Diagramma taglio (V)

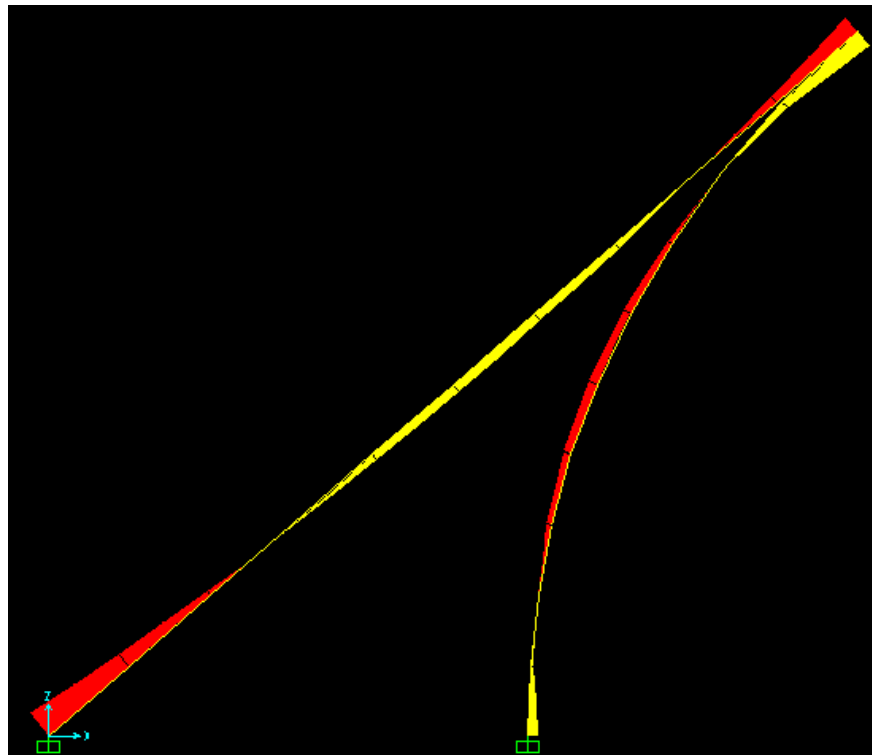
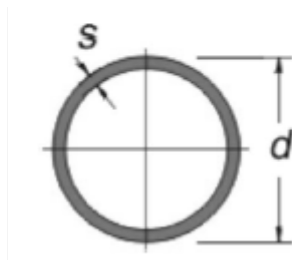


Figura 4.63: Diagramma momento flettente (M)



L'elemento considerato per l'asta inferiore è un profilo tubolare in acciaio con le seguenti caratteristiche:



$I_{x0}$	856	cm <sup>4</sup>	Momento di inerzia
A	25.70	cm <sup>2</sup>	Sezione metallica
d	168.30	mm	Diametro
s	5.00	mm	Spessore
i	5.78	cm	Raggio di inerzia
p	20.1	kg/m	Peso

Tabella 4.59: Caratteristiche dimensionali profilo tubolare [www.oppo.it]

Si verifica il pilastro tubolare all'instabilità e alla compressione che risulta essere l'azione più gravante sull'elemento. Innanzitutto si classifica la sezione in base alla sua snellezza:

Sezioni Tubolari						
Classe	Sezione inflessa e/o compressa					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$ (Per $d/t > 90 \epsilon^2$ vedere EN 1993-1-6)					
$\epsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	$f_{yk}$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Figura 4.64: Massimi rapporti larghezza-spessore per parti compresse [Tabella 4.2.III, DM 14/01/08]

Calcolando  $d/t$  e confrontandolo con i valori che contraddistinguono ogni classe:

$d/t$	33.66
$\varepsilon^2$	0.85
$50\varepsilon^2$	42.50
$70\varepsilon^2$	59.50
$90\varepsilon^2$	76.50

**Tabella 4.60: Calcolo rapporto larghezza-spessore**

Si può dire che l'elemento compresso appartiene alla Classe 1 ed è possibile perciò considerarlo tozzo.

La verifica di stabilità si compie considerando l'elemento uniformemente compresso:

$$\frac{N}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

Dove  $N_{b,Rd}$  è la resistenza all'instabilità dell'asta compressa mentre  $N$  è l'azione assiale agente, ricavata dal software.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_*^2}} \leq 1$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda_* - 0,2) + \lambda_*^2]$$

$$\lambda_* = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \text{carico critico elastico} = \frac{\pi^2 E_s I_{x0}}{l_0^2}$$

- il coefficiente di sicurezza per sezioni in acciaio di classe 1 è  $\gamma_{M1} = 1,05$
- Il coefficiente  $\alpha$  è detto fattore di imperfezione ed è ricavato da tabella in base alla curva di instabilità e al tipo di sezione: per sezioni formate a caldo e curva di instabilità "a", si ottiene  $\alpha=0,21$ .
- La lunghezza dell'asta è  $l = 4,7$  m.
- La lunghezza di libera inflessione si calcola come  $l_0 = \beta l$  dove il coefficiente  $\beta$  è valutato tenendo conto delle effettive condizioni di vincolo dell'asta nel piano di inflessione considerato (conside-

rando l'asta come mensola incastrata a terra ma con un vincolo aggiuntivo dovuto all'asta superiore, prendiamo  $\beta=1,5$  invece che pari a 2):  $l_0 = 9,4$  m.

$N_{cr}$	163.49	kN
$\lambda^*$	2.63	
$\varphi$	4.22	
$\chi$	0.13	<b>Verificato</b>
$N_{b,Rd}$	71.75	kN
$N$	60.86	kN
$N/N_{b,Rd} \leq 1$	0.85	<b>Verificato</b>

**Tabella 4.61: verifica di stabilità delle membrature**

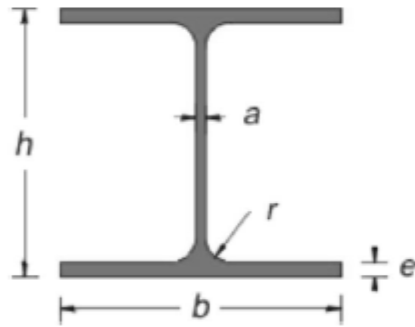
L'asta non si stabilizza per effetto dell'azione assiale di compressione.

È inoltre opportuno limitare la snellezza  $\lambda$  al valore di 200 per le membrature principali:

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = 196.65 < 200$$

Lo sforzo a compressione  $\sigma_c$  è pari a  $29.6 \text{ N/mm}^2$ , inferiore al valore limite dato dalla resistenza compressione  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_m = 262 \text{ N/mm}^2$ . È dunque soddisfatta la verifica a compressione.

Si verifica ora l'**asta superiore** della struttura, ipotizzato essere un profilo HE180A, in modo che possa essere ad esso saldato il profilo tubolare, dalle seguenti caratteristiche:



$W_x$	293600	mm <sup>3</sup>
$I_x$	2510000	mm <sup>4</sup>
$A$	4525	mm <sup>2</sup>
$p$	35.5	kg/m

**Tabella 4.62: Caratteristiche dimensionali trave HE180A**

Dal software SAP 2000 ricavo i valori delle azioni agenti:

$M_{ed}$	38.35	kNm
$N_{ed}$	52.61	kN
$V_{ed}$	29.00	kN

**Tabella 4.63: Azioni agenti**

Verifico la resistenza all'interazione tra azione assiale  $N$  e momento flettente  $M$ :

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} < f_{yd}$$

$$\sigma = 142,25 \text{ N/mm}^2 < 262 \text{ N/mm}^2$$

**Verificato**

Si calcola ora il diametro dei **tirafondi** necessari ad ancorare la struttura alla fondazione. Si utilizzano 4 tirafondi posti alla base del pilastro, aventi resistenza a trazione caratteristica  $f_{tk}$  e resistenza a trazione di progetto  $f_{td}=f_{tk}/\gamma_{Rd}$  dove  $\gamma_{Rd}$  è il fattore di sovra resistenza pari a 1,15.

Considerando una distanza  $l$  tra due bulloni di 28 cm, si calcolano le forze di estrazione e compressione sul bullone a partire dal momento alla base ricavato dall'analisi della struttura tramite il software di calcolo e già considerato precedentemente.

Si ricava quindi l'area di acciaio necessaria a contrastare tali azioni e, ipotizzando un diametro di bullone pari a 12 mm, si ottiene il numero di bulloni, da approssimarsi per eccesso.

$l$	0.28	m	larghezza base pilastro
$z$	136.96	kN	forza di estrazione
$f_{tk}$	440	N/mm <sup>2</sup>	resistenza caratteristica bulloni
$f_{td}$	382.61	N/mm <sup>2</sup>	resistenza di progetto bulloni
$A_s$	357.97	mm <sup>2</sup>	area bulloni
$A_{1s}$	89.49	mm <sup>2</sup>	area di un bullone
$d$	10.67	mm	diametro reale
$d_{eff}$	12	mm	diametro effettivo

**Tabella 4.64: Verifica tirafondi**

Si utilizzano perciò 4 tirafondi  $\Phi 12$  mm posti a 5 cm dal bordo del pilastro, saldato ad apposita piastra di contrasto in acciaio.

#### 4.4. PANNELLI FOTOVOLTAICI

Dato il concept innovativo dell'autostrada in questione è stato ritenuto opportuno prevedere l'utilizzo di pannelli solari fotovoltaici integrati nell'infrastruttura lungo il suo sviluppo e nell'area di servizio per la produzione di energia elettrica per il soddisfacimento del fabbisogno elettrico autostradale (ad esempio l'illuminazione delle piste ciclabili e l'area di servizio) e per la vendita. È necessario ricercare una opportuna integrazione mantenendo l'orientamento ottimale dei pannelli e tutti gli standard di sicurezza. Per mantenere quindi un orientamento verso sud dei pannelli fotovoltaici è stato ritenuto conveniente seguire longitudinalmente l'autostrada laddove il suo percorso fosse in direzione est-ovest.

La possibilità di installare i pannelli ortogonalmente alla direzione della strada laddove il percorso fosse nord-sud, è stata scartata in quanto, per mantenere l'esposizione sud sarebbe stata necessaria una struttura di rialzamento dei pannelli rispetto alla superficie inclinata di appoggio che costituisce il pendio di trincea o rilevato. Oltre ad essere una soluzione più costosa rispetto al semplice appoggio dei moduli sul piano inclinato, risulta essere ad alto impatto ambientale in quanto i pannelli non potrebbero essere considerati integrati nel sistema.

La disposizione lungo l'asse nord-sud è causa inoltre di una riduzione di producibilità dei pannelli, dovuta all'inclinazione a 30° della superficie di appoggio. Questo vincolo morfologico riduce la quota parte di radiazione solare diretta nelle ore in cui il sole ha un'altezza minore di 30° (mattina e sera). Tale valore è stato stimato tramite l'utilizzo di un software di simulazione annuale in regime dinamico *TRNSYS 16* e successiva analisi dati in Excel per le due situazioni estreme ovvero quando i pannelli sono orientati con azimuth pari a 0° e azimuth pari a 45°. Si è ottenuta una riduzione variabile tra il 5 e il 20%.

Per calcolare la produttività dei pannelli installati si è seguita la procedura descritta nella Norma CEI 82-15: rilievo delle prestazioni dei sistemi fotovoltaici - Linee Guida per la misura, lo scambio e l'analisi dei dati e la Norma UNI 10349: Dati climatici.

Località: Bergamo

Latitudine: 45°41'

Longitudine: 9°40'

La radiazione globale annua utilizzata nel calcolo si ottiene sommando le radiazioni giornaliere medie mensili moltiplicate per il numero dei giorni del mese corrispondente ed è pari a 1430 kWh/m<sup>2</sup>a per una superficie con Azimuth di 0° (sud) e inclinata di 30° sull'orizzontale.

Per il calcolo dell'energia totale producibile, si utilizza una radiazione specifica  $H$  [kWh/kW] pari alle ore equivalenti per ogni angolo di esposizione rispetto al sud (azimuth=0°). Questi valori, vengono calcolati tramite il software on-line messo a disposizione dal sito <http://re.jrc.ec.europa.eu> ed esprimono la produzione di elettricità media annuale data da un pannello fotovoltaico con potenza di picco pari ad 1kWp. Questo valore tiene già in considerazione l'efficienza nominale del modulo (12%), efficienza della componentistica del sistema non fotovoltaica (inverter, cablaggio...) e del fattore di riduzione che tiene in considerazione fenomeni come il surriscaldamento, la riflessione parziale della radiazione incidente, la dipendenza spettrale dell'efficienza di conversione e la formazione di depositi di polvere sulla superficie vetrata di protezione.

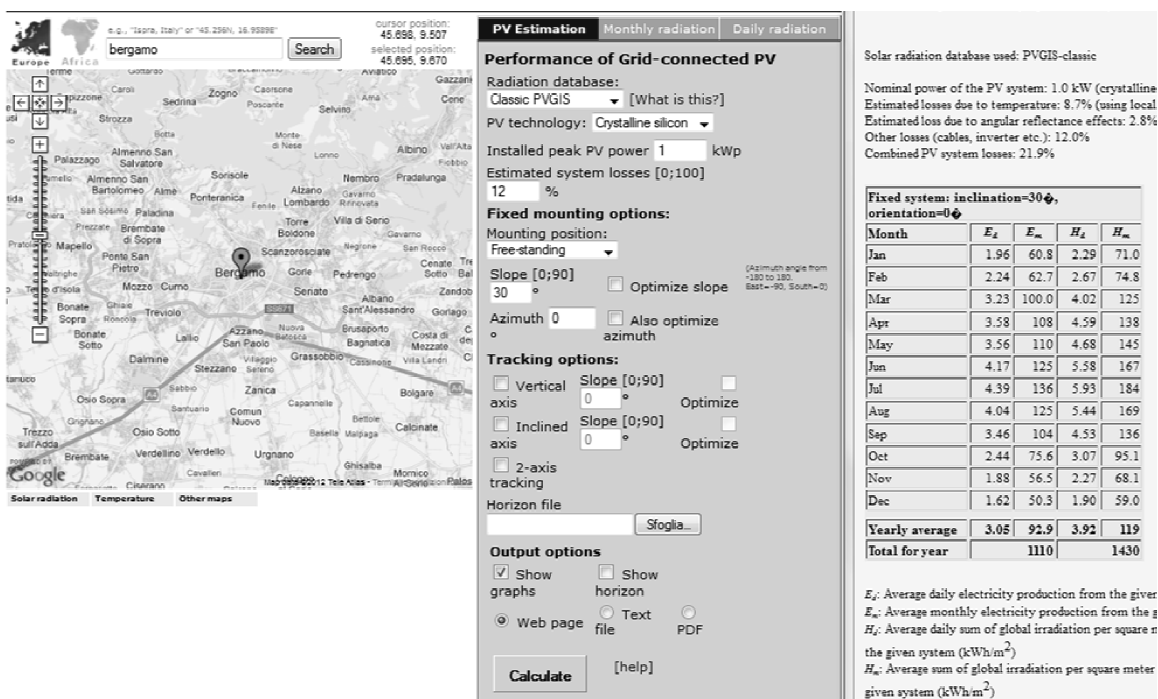


Figura 4.65: Esempio di stima della produzione di energia elettrica fotovoltaica [http://re.jrc.ec.europa.eu]

A partire da tali dati, conoscendo la potenza nominale  $P_{PV}$  e il numero dei moduli installati  $N$ , si ottiene la producibilità totale  $E_{PV}$  del campo fotovoltaico.

Si introduce un coefficiente di perdita di producibilità del 12.5% per considerare l'ombreggiamento causato dalla presenza del pendio della trincea opposto a quello sul quale si appoggiano i pannelli stessi: si ha un taglio della radiazione diretta e l'incidenza della sola radiazione diffusa. Il valore è una media tra le perdite calcolate per un azimuth di 0° (sud) e un azimuth di 45° (sud-ovest, sud-est), pari rispettivamente al 5% e al 20%.

Energia elettrica producibile:

$$E_{PV} = P_{PV}H(1 - P\%)$$

Con:

$P_{PV} = N^{\circ} * P_{pan}$  = potenza nominale installata

$N^{\circ}$  = numero di pannelli installati

$P\%$  = riduzione producibilità per ombreggiamenti 12.5%

Il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera evitate con la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, è dato dal prodotto tra l'energia prodotta per il fattore di emissione ricavato dall'allegato al DGR 11/06/09 n°5796 (Regione Lombardia) e pari a  $f_{em,el} = 0.4332$ .

Per avere delle spese minori in fase di gestione è possibile suddividere l'impianto fotovoltaico in più campi connessi alla rete separatamente. Infatti raggiunta la quota di 6MW di potenza installata, è obbligatorio l'allaccio in alta tensione. Il vantaggio sarebbe quello delle minori dispersioni. Sono state dunque individuate le principali cabine di trasformazione di tensione dell'energia elettrica. È possibile affidare la gestione a enti esterni rispetto ai produttori dell'energia. Il sistema tecnologico fotovoltaico sarà tarato su un periodo di trenta anni di produzione, pari alla durata della concessione dell'infrastruttura.

Il nuovo decreto ministeriale sulle energie rinnovabili (DM 5/5/11) detto Quarto Conto Energia, decreta che gli incentivi statali a decorrere dal primo gennaio 2013 assumono la forma di una Tariffa Onnicomprensiva che incorpora sia una quota incentivante che un corrispettivo per la vendita dell'energia stessa. Si somma ad essa un premio per la quota parte di energia auto consumata (momentaneamente non considerato in quanto non si conosce il fabbisogno elettrico dell'infrastruttura). Gli incentivi vengono erogati con valore costante per 20 anni dall'entrata in esercizio dell'impianto, in base all'energia effettivamente prodotta e non alla potenza installata. Si può perciò valutare il tempo di ritorno dell'investimento iniziale e il ricavo che si ha dalla vendita dell'energia al gestore dei servizi energetici (GSE) nel tempo successivo.



Si riportano le tabelle con i calcoli eseguiti:

INPUT		
$N^{\circ}_{pan}$	4	-
$P_{pan}$	135	W
$\eta_{bos}$	0.85	-
$k_{pv}$	0.9	-
Costo unitario (dato Techno Habitat s.p.a.)	3000	€/kW
Tariffa onnicomprensiva (2013)	0.23	€/kWh

Tabella 4.65: Caratteristiche modulo fotovoltaico

TRATTO	SEZIONI	ANGOLO	H	L	DISTANZA	$N^{\circ}_{PV}$	$P_{PV}$	$E_{PV}$	COSTO	RICAVO/a
-	-	°	kWh/kW	m	m	-	kW	MWh	€	€/a
O.C.										
1	16;24	-45	1050	329	-	1259	170	156	510013	35924
2	27;37	-30	1090	450	-	1722	233	222	697608	51010
3	67;108	45	1050	1850	-	7081	956	878	2867943	202011
Tratta A										
4	1;32	25	1090	865	-	3311	447	426	1340957	98052
5	32;47	5	1110	480	-	1837	248	241	743789	55384
Tratta B										
6	200;234	-24	1092	1280	-	4900	662	632	1984306	145360

Tabella 4.66: Calcolo producibilità, costi e ricavi del campo fotovoltaico

$P_{TOT}$	MW	2.71
$E_{TOT}$	MWh	2555.40
$COSTO_{TOT}$	€	8144616
$RICAVO_{TOT}$	€/anno	587741
PAY-BACK	anni	13.9
EN. RISP.	TEP/anno	1022
CO <sub>2</sub> RISP.	kg/anno	1106998

Tabella 4.67: Prospetto riassuntivo producibilità, costi e ricavi del campo fotovoltaico

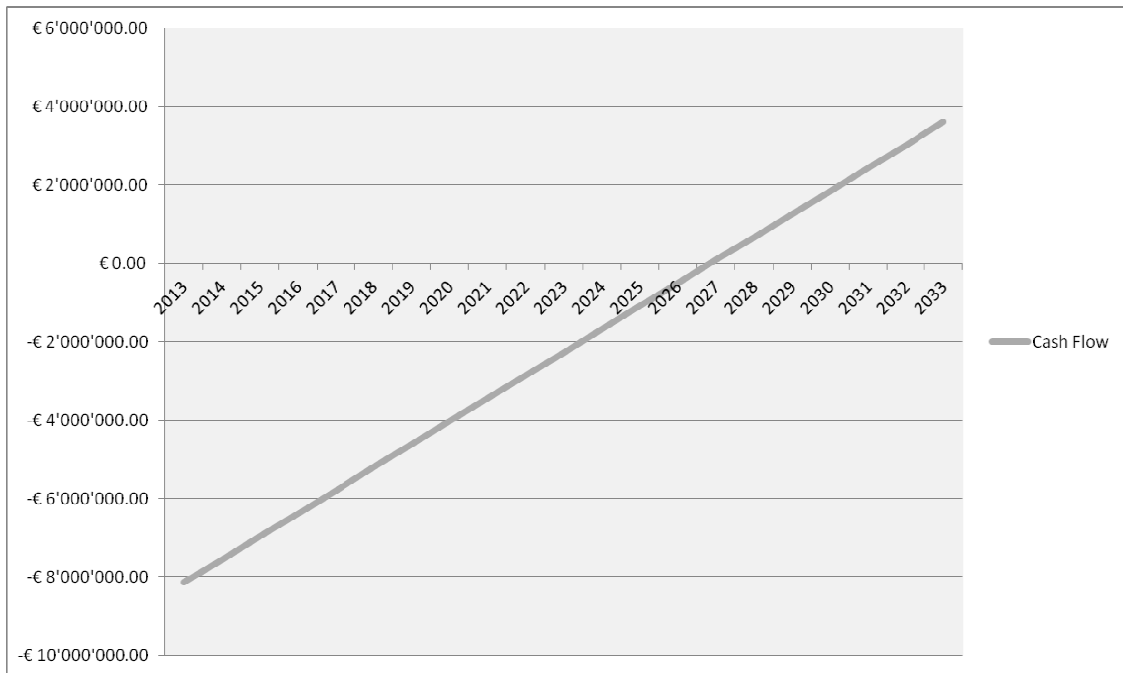


Grafico 4.7: Flusso di cassa semplice impianto fotovoltaico

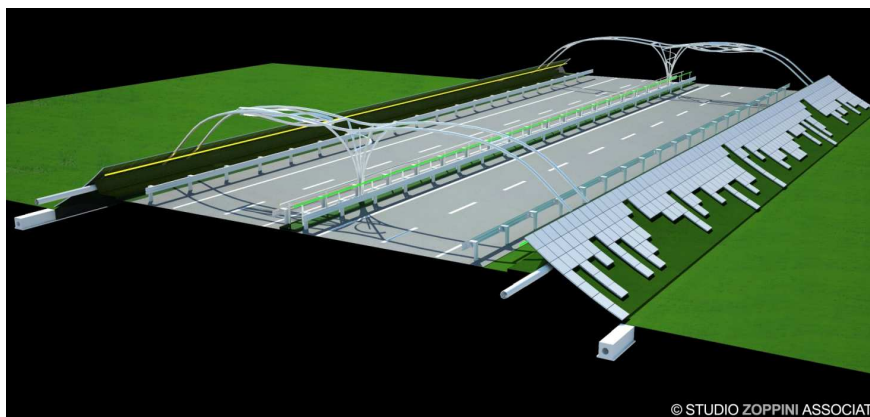


Figura 4.66: Render autostrada tratto in rilevato

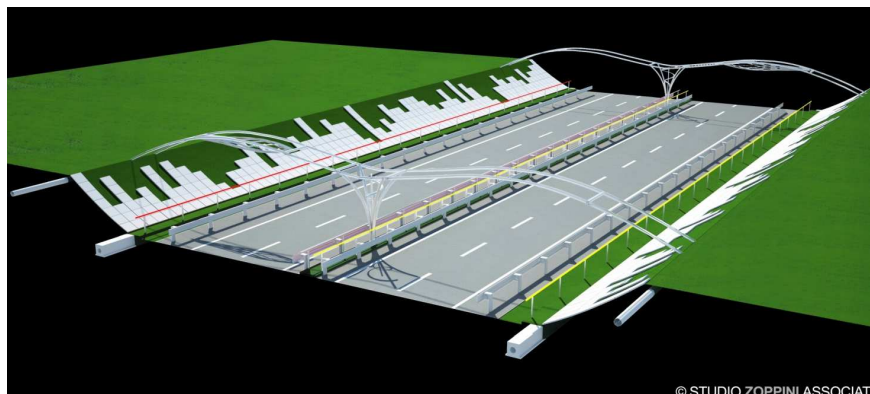


Figura 4.67: Render autostrada tratto in trincea

## 4.5. RETE DI TELERISCALDAMENTO E CENTRALE DI COGENERAZIONE

Al fine di rendere sostenibile la realizzazione del tracciato autostradale, si è effettuato uno studio di prefattibilità di una rete di teleriscaldamento per la distribuzione di energia termica, prodotta da cogenerazione, alle utenze dell'area interessata. Questa scelta è considerata significativa per i benefici ambientali ed economici che apporterebbe all'area e alle utenze.

I sistemi di teleriscaldamento urbano rappresentano una importante opportunità di utilizzazione razionale dell'energia e un doveroso contributo al contenimento della spesa energetica, alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e al controllo dell'inquinamento locale.

La centrale di teleriscaldamento può utilizzare tecnologie cogenerative e/o fonti rinnovabili. In entrambi i casi è possibile ridurre il consumo di fonti fossili. Nel caso di utilizzo di metano mediante tecnologia cogenerativa, l'input primario rimane una fonte fossile ma, complessivamente, la maggiore efficienza della cogenerazione riduce i consumi. Nel caso in cui, invece, l'input della centrale di produzione fosse una fonte rinnovabile (come la geotermia, le biomasse) si avrebbe una totale sostituzione delle fonti fossili.

Il Teleriscaldamento non presenta solo benefici per la collettività ma risulta conveniente anche per i singoli utenti. Le tariffe del servizio calore sono posizionate per offrire all'utenza un risparmio economico rispetto alle soluzioni tradizionali. Inoltre, ad essere offerto è un servizio finale e non un combustibile che necessita di una ulteriore trasformazione tramite caldaie. Il servizio calore permette di:

- pagare a contatore il servizio e non il combustibile;
- regolare la durata del riscaldamento secondo le proprie esigenze;

I costi per gli utenti sono ancora minori se si analizzano altri fattori:

- Costi evitati per acquisto e manutenzione ordinaria e straordinaria delle caldaie che, allacciandosi alla rete di teleriscaldamento, vengono eliminate.
- Maggiore disponibilità di spazi utili (le dimensioni degli scambiatori per teleriscaldamento sono minori delle caldaie di pari potenza, ed inoltre non richiedono locale ventilato, tiraggio, ecc.).

La rete di distribuzione è la parte più costosa dell'impianto di teleriscaldamento: si stima che il suo costo incida sull'investimento complessivo tra il 50% e l'80%. È per questo motivo che risulta importante sfruttare la realizzazione dell'infrastruttura viaria per la posa delle tubazioni della rete di teleriscaldamento, riducendo notevolmente i costi di scavo. Lo sviluppo della rete seguirà perciò l'andamento del tracciato stradale dal quale si distaccheranno le diramazioni che andranno a raggiungere i confini comunali, dai quali inizieranno le tratte locali fino alle sottocentrali installate nelle abitazioni.

Per le valutazioni preliminari è stato seguito il procedimento proposto nelle “Linee Guida per la Promozione dei Sistemi di Teleriscaldamento” dell’ ENEA e Regione Lombardia e nello Studio di fattibilità contenuto nel “Quaderno-Serie Ricerca” CRASL:

1. **Analisi della domanda di calore per l’utenza civile residenziale.** Si determina il volume di abitazioni potenzialmente allacciabile alla rete di teleriscaldamento, partendo dai dati ISTAT dedotti dai documenti del censimento svolto nel 2001, riguardanti il numero di abitazioni presenti nei comuni interessati, la superficie media delle abitazioni (94m<sup>2</sup>) e l’altezza utile media (3m). L’area coinvolge gli 8 comuni ricadenti in un raggio di 5km dal sito di collocazione della centrale di cogenerazione , in quanto più facilmente raggiungibili dalla rete di teleriscaldamento, considerata la convenienza economica nel portare il servizio. Si tratta di Arcene, Ciserano, Pontirolo Nuovo, Boltiere, Brembate, Osio Sotto, Verdellino e Treviglio la cui popolazione supera in numero quella totale dei restanti comuni.
2. **Analisi della domanda di calore per l’utenza civile relativa ai servizi.** In base ai dati ISTAT del censimento del 2001 relativi al numero di addetti ai servizi nei medesimi comuni.

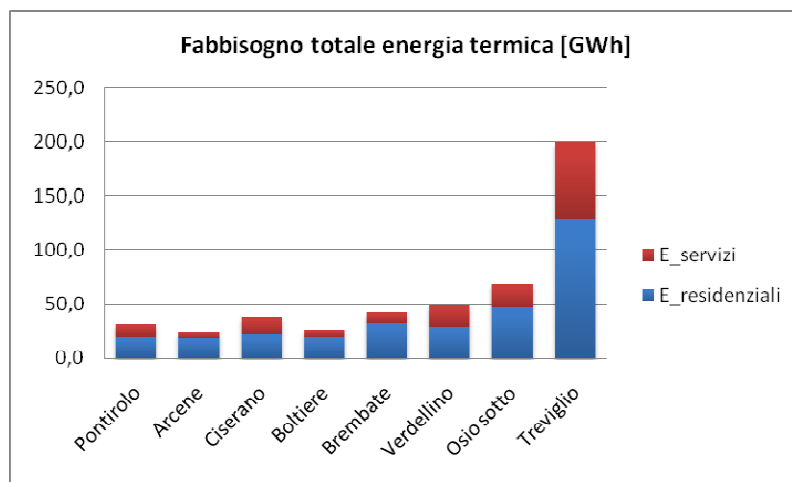


Grafico 4.8: Fabbisogno totale di energia termica

In base alla superficie del territorio comunale è possibile esprimere i consumi energetici in GWh/km<sup>2</sup> al fine di capire quale tra i comuni coinvolti ha un consumo maggiore di energia termica per residenze e servizi.

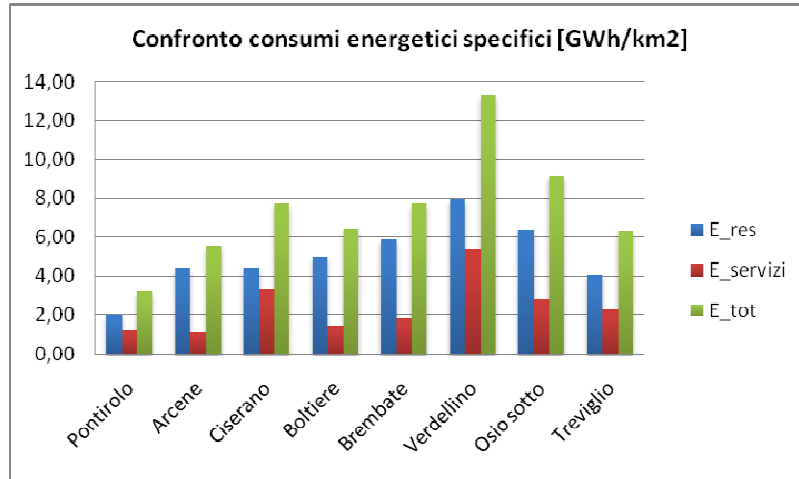


Grafico 4.9: Confronto tra i consumi energetici specifici per ogni comune

3. Calcolo del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento tramite valori parametrici medi specifici.
4. Correzione del fabbisogno secondo una percentuale di volume riscaldato potenzialmente interessata all'allacciamento. Si ipotizza di allacciare una quota pari al 35% dell'utenza di calore presente nei vari comuni. Questo indice di penetrazione del teleriscaldamento deriva dalle stime sugli impianti di riscaldamento centralizzati presenti nei vari comuni e in parte dalle tipologie di comuni interessati.

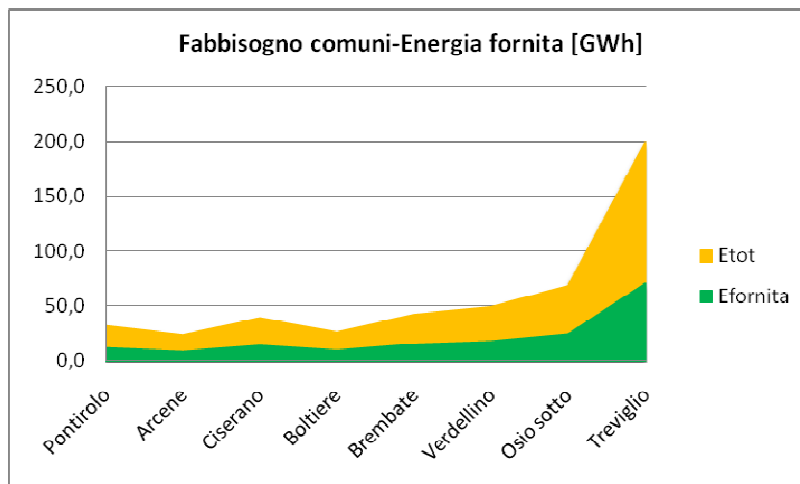
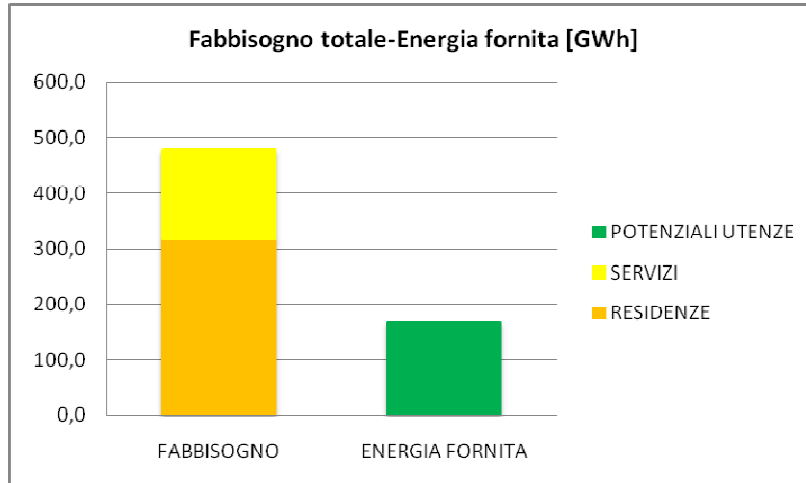


Grafico 4.10: Confronto tra fabbisogno ed energia fornita



**Grafico 4.11: Confronto tra fabbisogno per residenze e servizi ed energia fornita**

5. Valutazione del costo della rete primaria e secondaria<sup>26</sup> sulla base delle misurazioni delle tratte e di alcuni parametri quali il *carico termico lineare* riferito alla lunghezza delle reti di distribuzione e alla potenza media delle sottocentrali, ottenuta come rapporto tra potenza immessa (nota) e numero di sottocentrali (incognita). Per questa valutazione preliminare vengono assunti tali parametri sulla base di sistemi di riscaldamento effettivamente realizzati (fonte AIRU). Si calcola la portata delle tubazioni per ogni tratto di rete e si associa ad essa il corrispondente diametro e prezzo comprensivo di materiale (35%) e scavo (65%). Per la rete primaria vengono ridotti i prezzi delle tubazioni in quanto non vi è un apposito scavo da realizzare<sup>27</sup>.
6. Calcolo dei costi totali (centrale + sottocentrali + rete primaria + rete secondaria).
7. Calcolo dei ricavi dalla vendita dell'energia termica ed elettrica.
8. Calcolo del Pay-Back semplice per la valutazione della sostenibilità economica degli interventi.

<sup>26</sup> La rete ramificata richiede grossi diametri nei tratti iniziali all'uscita della centrale. La tendenza attuale è di utilizzare tubazioni pre-coibentate specificamente prodotte per reti di teleriscaldamento, con sistema di localizzazione delle perdite integrato. Nel caso di tubazioni interrato occorre proteggere la parte superiore parte inferiore della tubazione con uno strato di terreno di almeno 60 cm, oppure con lastre di cemento, mentre la deve appoggiare su terreno o sabbia ben costipati.

<sup>27</sup> Riduzione del 50% (invece che del 65% pari all'incidenza dello scavo) per computare lavorazioni aggiuntive per la posa della rete.

INPUT	Unità di misura	QUANTITA'
Energia specifica assorbita dalla utenze residenziali	[kWh/m <sup>3</sup> ]	40
Energia specifica al numero di addetti, assorbita dai servizi	[kWh/addetto]	5000
Perdite di rete	[%]	10%
Ore di funzionamento a pieno carico della parte termica della centrale di cogenerazione	[h/a]	2000
% potenza termica del gruppo di cogenerazione	[%]	55%
% potenza elettrica del gruppo di cogenerazione	[%]	45%
Rapporto kWh <sub>t</sub> /kWh <sub>e</sub>	[ - ]	1.22
Costo centrale di cogenerazione	[€/kW]	1200
Costo sottocentrali 30 kW	[€/unità]	7000
Costo sottocentrali 50 kW	[€/unità]	11000
Costi della rete	[€/m]	Tubi (35%) + Scavo (65%)
Prezzo vendita energia termica	[€/MWh]	80
Prezzo vendita energia elettrica (prezzo di mercato senza alcun incentivo)	[€/MWh]	70

Tabella 4.68: Dati di input per il calcolo

*** Costi della rete (tubi + scavo)	
Diametro nominale	Costo unitario [€/m]
600	1500
500	1300
450	1200
400	1100
350	1000
300	850
250	750
200	670
150	560
125	500
100	450
80	280
65	170
50	160
40	145
32	140
25	120

Tabella 4.69: Costi unitari della rete

## Indice dei simboli utilizzati:

n° ABITAZIONI	-	Quantità di abitazioni del comune
V <sub>MEDIO</sub>	m <sup>3</sup>	Volume medio per una abitazione
V <sub>AB</sub>	Mln m <sup>3</sup>	Volume coperto riscaldabile
ESPEC,ASSORB.	GWh/mln m <sup>3</sup>	Consumo energetico per un metro cubo di abitazione
E <sub>RESIDENZIALI</sub>	GWh <sub>t</sub>	Fabbisogno energetico utenze civili residenziali
n° ADDETTI	-	Numero di impiegati nel settore servizi
ESPEC,ADDETTI	kWh/add	Consumo energetico medio per ogni addetto ai servizi
E <sub>SERVIZI</sub>	GWh <sub>t</sub>	Fabbisogno energetico utenze civili servizi
E <sub>TOT</sub>	GWh <sub>t</sub>	Fabbisogno energetico totale
Quota servita	%	Percentuale di fabbisogno coperta dal teleriscaldamento
E <sub>FORNITA</sub>	GWh <sub>t</sub>	Energia termica realmente fornita alle utenze
E <sub>ELETRICA</sub>	GWh <sub>e</sub>	Corrispondente di energia elettrica prodotta dalla centrale cogenerativa
P <sub>TERMICA</sub>	MW <sub>t</sub>	Potenza termica centrale di cogenerazione
P <sub>ELETRICA</sub>	MW <sub>e</sub>	Potenza elettrica centrale di cogenerazione
C.T.L.	MW <sub>t</sub> /km	Carico termico lineare ( <i>fonte AIRU</i> )
P <sub>SOTTOC.</sub>	kW <sub>t</sub>	Potenza termica delle sottocentrali
L <sub>RL</sub>	Km	Lunghezza rete locale
m	Kg/s	Portata di acqua surriscaldata
D	mm	Diametro teorico tubazioni
D <sub>EFF</sub>	mm	Diametro effettivo tubazioni
C.R.D	%	Coefficiente di riduzione del diametro delle tubazioni
C <sub>URL</sub>	€/m	Costo unitario rete locale
C <sub>TRL</sub>	k€	Costo totale rete locale
n° SOTTOC.	-	Numero di sottocentrali
C <sub>T SOTTOC</sub>	k€	Costo totale sottocentrali
L <sub>ALLACIAM.</sub>	km	Lunghezza tratti di allacciamento rete primaria - rete locale
C <sub>U ALLAC</sub>	€/m	Costo unitario degli allacciamenti
L <sub>RP</sub>	Km	Lunghezza rete primaria
C <sub>U RP</sub>	€/m	Costo unitario rete primaria
C <sub>TRP</sub>	k€	Costo totale rete primaria
C <sub>T CENTRALE</sub>	k€	Costo totale centrale di cogenerazione
CT	k€	Costo totale intervento
Ricavi Termico	k€/anno	Ricavi dalla vendita dell'energia termica
Ricavi Elettrico	k€/anno	Ricavi dalla vendita dell'energia elettrica
Pay-back	anni	Tempo di ritorno dell'investimento

Tabella 4.70: Indice dei simboli utilizzati



UTENZE CIVILI E SERVIZI	n° ABITAZIONI	V MEDIO	V AB	ESPEC, ASSORB.	ERESIDENZIALI	n° ADDETTI	ESPEC, ADDETTI	ESERVIZI
	-	m <sup>3</sup>	mln m <sup>3</sup>	GWh/mln m <sup>3</sup>	GWh <sub>t</sub>	-	kWh/add	GWh <sub>t</sub>
Pontirolo	1744	282	0.492	40	19.7	2421	5000	12.1
Arcene	1646	282	0.464	40	18.6	962	5000	4.8
Ciserano	1957	282	0.552	40	22.1	3333	5000	16.7
Boltiere	1773	282	0.500	40	20.0	1144	5000	5.7
Brembate	2847	282	0.803	40	32.1	1987	5000	9.9
Verdellino	2601	282	0.733	40	29.3	3945	5000	19.7
Osio sotto	4214	282	1.188	40	47.5	4157	5000	20.8
<b>PARZIALE</b>	-	-	-	-	<b>189.3</b>			<b>89.7</b>
Treviglio	11398	282	3.214	40	128.6	14181	5000	70.9
<b>TOTALE</b>	-	-	-	-	<b>317.9</b>			<b>160.7</b>

Tabella 4.71: Calcolo del fabbisogno di energia termica

UTENZE CIVILI E SERVIZI	ETOT	Quota servita	E FORNITA	E ELETTRICA	P TERMICA	P ELETTRICA
	GWh <sub>t</sub>	%	GWh <sub>t</sub>	GWh <sub>e</sub>	MW <sub>t</sub>	MW <sub>e</sub>
Pontirolo	31.8	35%	11.1	9.1	5.6	4.5
Arcene	23.4	35%	8.2	6.7	4.1	3.3
Ciserano	38.7	35%	13.6	11.1	6.8	5.5
Boltiere	25.7	35%	9.0	7.4	4.5	3.7
Brembate	42.0	35%	14.7	12.0	7.4	6.9
Verdellino	49.1	35%	17.2	14.1	8.6	7.0
Osio sotto	68.3	35%	23.9	19.6	12.0	9.8
<b>PARZIALE</b>	<b>279.0</b>	<b>35%</b>	<b>97.7</b>	<b>79.9</b>	<b>48.8</b>	<b>40.0</b>
Treviglio	199.5	35%	69.8	57.1	34.9	28.6
<b>TOTALE</b>	<b>478.5</b>	<b>35%</b>	<b>167</b>	<b>137.0</b>	<b>83.7</b>	<b>68.5</b>

Tabella 4.72: Calcolo energia fornita e potenza della centrale di cogenerazione

RETE LOCALE	C.T.L.	P <sub>SOTTOC.</sub>	L <sub>RL</sub>	m	D	D <sub>EFF</sub>	C.R.D.	C <sub>URL</sub>	C <sub>TRL</sub>	n° <sub>SOTTOC.</sub>	C <sub>T</sub> <sub>SOTTOC.</sub>
	MW/km	kW <sub>t</sub>	km	kg/s	mm	mm	%	€/m	k€	-	k€
Pontirolo	1	30	5.56	33.2	168	150	80%	560	2491.3	185	1298
Arcene	1	30	4.09	19.5	129	150	80%	560	1832.7	136	955
Ciserano	1	30	6.78	32.4	166	200	80%	670	3633.8	226	1582
Boltiere	1	30	4.50	21.5	135	150	80%	560	2016.4	150	1050
Brembate	1	30	7.36	35.2	173	200	80%	670	3944.2	245	1717
Verdellino	1	30	8.59	41.0	187	200	80%	670	4602.2	286	2003
Osio sotto	1.5	50	7.97	57.1	220	250	75%	750	4483.4	239	2630
<b>PARZIALE</b>									<b>23004</b>		<b>11235</b>
Treviglio	1.5	50	23.27	166.8	376	400	75%	1100	25599	698	7680
<b>TOTALE</b>									<b>48603</b>		<b>18915</b>

Tabella 4.73: Calcolo della lunghezza e dei costi della rete locale

RETE PRIMARIA	LALLAC.	D	CUALLAC.	LDORSALE	m	D	DEFF	CU <sub>DORSALE</sub>	CT <sub>RP</sub>
	km	mm	€/m	km	kg/s	mm	mm	€/m	k€
Pontirolo	0.750	150	560		200.0	412	450	1200	420
Arcene	1.370	150	560	0.750	354.8	549	600	1500	1329.7
Ciserano	0.675	200	670						452.25
Boltiere	0.625	150	560	1.484	113.8	311	350	1000	1092
Brembate	0.720	200	670	1.015	35.2	173	200	670	822.43
Verdellino	1.185	200	670	3.452	154.8	363	400	1100	2692.6
Osio sotto	0.7	250	750						525
<b>PARZIALE</b>									<b>7333.9</b>
Treviglio	1.945	400	1100	3.937	166.8	376	400	1100	4304.9
<b>TOTALE</b>									<b>11639</b>

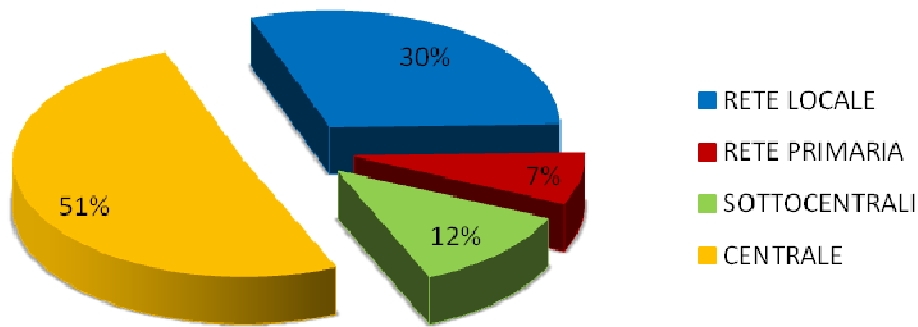
Tabella 4.74: Calcolo della lunghezza e dei costi della rete primaria

SINTESI	CT <sub>R.L.</sub>	CT <sub>R.P.</sub>	CT <sub>SOTTOC.</sub>	CT <sub>CENTRALE</sub>	CT	Ricavi Termico	Ricavi Elettrico	Pay-Back
	k€	k€	k€	k€	k€	k€/anno	k€/anno	anni
Pontirolo	2491.34	420.00	1297.57	5459.92	9668.84	889.76	636.99	6.3
Arcene	1832.75	1329.70	954.56	4016.57	8133.58	654.55	468.60	7.2
Ciserano	3633.81	452.25	1581.88	6656.23	12324.17	1084.72	776.56	6.6
Boltiere	2016.40	1092.00	1050.21	4419.07	8577.68	720.14	515.56	6.9
Brembate	3944.21	822.43	1717.01	7224.81	13708.45	1177.38	842.89	6.8
Verdellino	4602.23	2692.55	2003.46	8430.14	17728.37	1373.80	983.52	7.5
Osio sotto	4483.43	525.00	2630.28	11738.4	19377.14	1912.93	1369.48	5.9
<b>PARZIALE</b>	<b>23004.2</b>	<b>7333.9</b>	<b>11235</b>	<b>47945.2</b>	<b>89518.2</b>	<b>7813.3</b>	<b>5593.6</b>	<b>6.7</b>
Treviglio	25599.22	4304.85	7679.77	34273.3	71857.17	5585.28	3998.56	7.5
<b>TOTALE</b>	<b>48603.4</b>	<b>11638.8</b>	<b>18914.7</b>	<b>82218.5</b>	<b>161375.4</b>	<b>13398.6</b>	<b>9592.2</b>	<b>7.0</b>

Tabella 4.75: Costi per la realizzazione e ricavi della vendita di energia

Il costo totale per la realizzazione della rete e della centrale di cogenerazione, di potenza di **70 MWe**, è pari a **161 Milioni di Euro** così suddiviso:

- Costo Centrale = 82 Milioni di Euro
- Costo rete primaria = 12 Milioni di Euro
- Costo rete locale = 49 Milioni di Euro
- Costo sottocentrali = 19 Milioni di Euro



**Grafico 4.12: Incidenza dei costi teleriscaldamento**

Le voci di maggiore incidenza nell'analisi economica del progetto sono quelle relative allo scavo e posa delle reti secondarie (30%) e quelle relative alla centrale (51%). Con l'inclusione di Treviglio nella valutazione raddoppiano i costi, data la grande estensione della rete locale e l'elevata presenza di utenze allacciabili. Allo stesso tempo non viene compromessa la sostenibilità economica in quanto il tempo di pay-back rimane in linea con quello degli altri comuni.

Il risparmio economico che si ha nel realizzare la rete di teleriscaldamento posando le tubazioni nello scavo già predisposto per il tracciato stradale, rispetto al costo da sostenere nel caso si voglia realizzare una rete analoga senza tale presupposto, è del 33%. Infatti il rapporto tra costo della rete primaria nel primo caso (pari a 11,6 milioni di €) e nel secondo caso (17,35 milioni di €) è pari a 0,67. Rispetto ai costi totali che si ottengono considerando con valore intero i costi della rete primaria, si ha un risparmio del 3,42% (5,71 milioni di €).

Centrale	82'218'505	€
Rete primaria	17'347'250	€
Rete locale	48'603'391	€
Sottocentrali	18'914'732	€
Totale	167'083'878	€
Ricavo elettrico	9'592'159	€
Ricavo termico	13'398'571	€
Pay-back	7.27	anni
Risparmio CO2	23'305'304	kg
Risparmio EP	47	GWh

**4.76: Voci di costo considerando il costo pieno della rete primaria**

La realizzazione delle tratte secondarie e delle sottocentrali risulta vantaggiosa al fine dell'efficienza dell'intervento in quanto gli utenti finali sarebbero incentivati a sostituire il proprio impianto (caldaia a gas,

elettrica) senza un significativo aggravio delle spese che si limiterebbero al quadro di controllo e regolazione posto all'interno dell'appartamento. Nel caso in cui non si voglia affrontare la spesa fino a livello dell'utente finale, è possibile portare il servizio all'ingresso dei comuni e lasciare alle singole amministrazioni la facoltà di decisione in merito all'allaccio alla rete delle utenze. Il Pay-back scende da 7 a 4 anni e i costi a 94 Milioni di Euro.

Centrale	82'218'505	€
Rete primaria	11'638'775	€
Rete locale	0	€
Sottocentrali	0	€
Totale	93'857'280	€
Ricavo elettrico	9'592'159	€
Ricavo termico	13'398'571	€
Pay-back	4.08	anni
Risparmio CO2	23'305'304	kg
Risparmio EP	47	GWh

**Tabella 4.77: Voci di costo considerando il costo pieno della rete primaria e nulli i contributi della rete locale e sottocentrali**

Nel caso in cui non si calcolano le spese per la rete locale e le sottocentrali, il risparmio è lo stesso ma incide maggiormente sul bilancio generale (5,73%).

Centrale	82'218'505	€
Rete primaria	17'347'250	€
Rete locale	0	€
Sottocentrali	0	€
Totale	99'565'755	€
Ricavo elettrico	9'592'159	€
Ricavo termico	13'398'571	€
Pay-back	4.33	anni
Risparmio CO2	23'305'304	kg
Risparmio EP	47	GWh

**Tabella 4.78: Voci di costo considerando nullo l'importo relativo a rete locale e sottocentrali**

Il teleriscaldamento e la cogenerazione si rivelano servizi e tecnologie molto convenienti e remunerative, data la previsione di ricavo intorno ai 23 milioni di euro l'anno, derivante dalla vendita dell'energia elettrica e termica. Vengono serviti in totale 2'781'100 m<sup>3</sup> di residenze e 11'246 addetti ai servizi.

Rimane da valutare la dimensione della **Centrale di Cogenerazione** e l'impatto che avrebbe sul territorio del comune ospitante, in termini di integrazione paesaggistica e inquinanti. Per questo si riporta l'esempio della nuova centrale cogenerativa di Imola, paragonabile in quanto a potenza generata (80 MW<sub>t</sub> e 80 MW<sub>e</sub>).



Figura 4.68: Centrale di cogenerazione di Imola (vista aerea)



Figura 4.69: Centrale di cogenerazione di Imola (esterno)

Il complesso è costituito da un unico fabbricato principale per le funzioni primarie del processo, assemblandovi anche le funzioni ausiliari e di servizio in settori contigui ma separati; un fabbricato separato per il sistema di raffreddamento a torri evaporative; due fabbricati separati per la centrale termica di supporto e per le grandi vasche di servizio; collegamenti con l'esistente costituiti da viabilità integrata, piazzali di servizio e impiantistica interrata (fognature, scarichi, eccetera).

Il fabbricato principale richiede un'altezza tra 12 e 23 m, una larghezza tra 50 e 75 m e una lunghezza complessiva di oltre 70 m, quindi un'area coperta di circa 5.000 m<sup>2</sup>. Il Ciclo Combinato, cioè il cuore della centrale, è composto dai seguenti sistemi e macchinari:

- 2 turbine a gas. Ciascuna aziona il relativo alternatore da 30 MW<sub>e</sub>;
- 2 caldaie a recupero con relativi catalizzatori per la riduzione degli inquinanti prodotti dalla combustione del gas nelle turbine a gas;
- 2 camini di scarico di diametro di tre metri e altezza di 50 metri;
- 1 turbina a vapore, che aziona il relativo Alternatore da 20 MW<sub>e</sub>;
- sistema di produzione acqua calda per il teleriscaldamento;
- sistema di condensazione del vapore esausto allo scarico della turbina a vapore;
- sistema di raffreddamento con torre evaporativa.



**Figura 4.70: Centrale di cogenerazione di Imola (interno)**

Completano la centrale, oltre al sistema di generazione di energia elettrica, al sistema elettrico di Alta Tensione, al sistema di monitoraggio emissioni, i normali sistemi ausiliari di centrale come il sistema di produzione di aria compressa, di produzione di acqua demineralizzata, quello antincendio, eccetera. In aggiunta, sono anche installati un impianto autonomo di integrazione e soccorso al teleriscaldamento ed un impianto di produzione acqua refrigerata del tipo ad assorbimento, alimentato con l'acqua calda del teleriscaldamento, per il condizionamento ambientale estivo dei locali della stessa centrale e degli uffici della sede di Hera a Imola. In particolare l'impianto autonomo di integrazione e soccorso al teleriscaldamento è costituito da 4 caldaie di potenzialità pari a 11,25 MW<sub>t</sub> ognuna, alimentate a gas, e garantisce la produzione del necessario calore di riscaldamento dell'acqua del teleriscaldamento anche in caso di parziale o totale fermo dei macchinari della centrale (manutenzioni, guasti accidentali, eccetera).

L'impatto ambientale di maggior rilievo è quello relativo alle emissioni di inquinanti, provenienti dai fumi di scarico delle turbine a gas, in atmosfera quali CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>vapore</sub>. Per contenere i valori di concentrazione dei gas potrebbe rendersi necessaria l'installazione di catalizzatori. Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ha imposto dei valori limite di concentrazione media oraria degli inquinanti tramite il decreto DEC/DSA/2006/00142:

Ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> )	15 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Monossido di carbonio (CO)	10 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Slip di ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	2,5 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
<hr/>	
Polveri Sottili Totali (PTS)	5 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
PM10	3,5 [mg/Nm <sup>3</sup> ]

**Figura 4.71: Limiti di legge per le emissioni di inquinanti**

La centrale di Imola riesce a mantenere le proprie emissioni ad un livello inferiore a quello prescritto dal decreto. I valori misurati vengono qui riportati:

Ossidi di azoto (NOx)	minore di 8 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Monossido di carbonio (CO)	minore di 2 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Slip di ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	minore di 1 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Polveri Sottili Totali (PTS)	minore di 1 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
PM10	minore di 0,5 [mg/Nm <sup>3</sup> ]

**Figura 4.72: Immissione di inquinanti in ambiente ( centrale di cogenerazioni di Imola)**

Si può pensare quindi che la centrale di cogenerazione per il progetto *Strada Verde* possa avere delle dimensioni simili a quelle presentate andando ad occupare una superficie totale di circa 20'000 m<sup>2</sup> con le dovute misure di mitigazione ambientale (verde, rilievi artificiali, forme e volumi che attenuano la percezione dell'impianto nel contesto, ecc). L'emissione di sostanze inquinanti è molto contenuta perciò la presenza della centrale nel territorio comunale di Arcene non genera effetti negativi ma, al contrario permette un risparmio di energia primaria di 4000 TEP/anno e una riduzione dell'emissione di CO<sub>2</sub> di 23'000 tonnellate/anno con la sostituzione delle caldaie tradizionali. La realizzazione di impianti tecnologici è prevista nel Piano Cave quale possibilità di recupero della cava al termine dell'attività estrattiva, in quanto opera di pubblica utilità. Il costo della centrale sarà più elevato di quanto prospettato per conferire all'opera una valenza architettonica adeguata alla riduzione dell'impatto ambientale e per le tecnologie compatte che permettono di ridurre gli ingombri di alcune parti dell'impianto.

## 4.6. ILLUMINAZIONE

L'illuminazione dell'autostrada non ha la sola funzione di migliorare la visibilità ma anche quella di segnalare le condizioni di percorribilità in base ai colori assunti dai led costituenti il sistema di illuminazione.

Si impiegano delle stringhe led flessibili, fornite da OSRAM montate in corrispondenza dei guard-rail laterali e centrali, su appositi supporti. Per ogni guard-rail vi sono due linee luminose indipendenti, di diverso colore sui due lati della carreggiata. Il verde segnerà condizioni stradali normali, mentre il rosso/arancione condizioni di difficile agibilità. Per il funzionamento del sistema sono necessari gli alimentatori, un controller e dei ripetitori.

Valutazione dei costi per un chilometro di percorso:

	Q (m)	CU (€)	CT (€)	SC%	netto iva esclusa
OSRAM LINARE FLEX PROTECT RGB MODULI 4 MT MATERIALE NECESSARIO PER FORMARE 8 LINEE INDIPENDENTI PER KM.	2000	690	1'380'000,00	NETTO	320'000,00
OSRAM OT 75 ALIMENTATORE X LED rgb	2000	114	228'000,00	NETTO	66'000,00
<b>Totale netto iva esclusa/km</b>					<b>386'000,00</b>
<b>Totale netto iva inclusa/km</b>					<b>463'200,00</b>

Tabella 4.79: Costi illuminazione led

In un kilometro sono presenti 8 linee luminose poste accoppiate, per ogni carreggiata, al bordo e al centro. Il costo si può leggere più semplicemente per un più immediato confronto pari a 75 €/m.

Dato il contesto extraurbano del tracciato autostradale, un tale sistema di illuminazione e segnalazione del percorso, migliora l'aspetto della sicurezza per gli utenti in quanto permette l'individuazione del tracciato anche in situazioni ambientali di nebbia o maltempo.

La tecnologia del Led permette di ridurre i costi di gestione e manutenzione del sistema di illuminazione data la maggiore durabilità delle lampade.

Per lo sviluppo totale di circa 17 km si ha un costo totale per l'illuminazione di **7'874'400 €**.

Rimangono esclusi dal computo metrico, i supporti necessari per il montaggio delle stringhe led (valutarne la necessità) e la posa in opera dell'intero sistema. Si può ipotizzare un incremento del 10% (manodopera) ottenendo una spesa di **8'662'000 €**.



#### 4.7. ASFALTO FOTO CATALITICO

Ha lo scopo di contribuire alla riduzione degli inquinanti organici presenti nell'atmosfera provenienti da fabbriche, automobili, riscaldamento etc. utilizzando il processo della fotocatalisi, paragonabile alla fotosintesi delle piante. Il processo si attiva in presenza di aria e luce, decompone le sostanze organiche e inorganiche inquinanti e le trasforma in sostanze non nocive. I nuovi materiali sono in grado di "mangiare" gli inquinanti atmosferici organici e inorganici applicando il processo della fotocatalisi, che consiste nell'uso di semiconduttori solidi in grado di ossidare sostanze nocive fino a completa mineralizzazione. È una soluzione più costosa dell'asfalto tradizionale.

<b>STRATO D'USURA TRADIZIONALE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Tappeti di usura in conglomerato bituminoso tipo bitulite, compreso stendimento e rullatura. Spessore cm 3</li> </ul>	6,00 – 7,00 €/m <sup>2</sup>
<b>STRATO D'USURA CON TRATTAMENTO FOTOCATALITICO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fornitura e posa di conglomerato bituminoso di tipo drenante spessore cm 4</li> <li>■ Trattamento di superficie di pavimentazione stradale con prodotto fotocatalitico realizzato con malta premiscelata in polvere composta da cemento fotocatalitico (riduce sostanze organiche inquinanti )</li> </ul>	35,00 – 40,00 €/m <sup>2</sup>

Figura 4.73: Costi asfalto fotocatalitico [www.vitalispa.it]

**VOC:** riduzione 100%

**NO<sub>x</sub>:** riduzione 49%

**SO<sub>x</sub>:** riduzione 94%

**CBT(carica batterica totale):** riduzione 43%

**LM (lievi e muffe):** riduzione 74%

#### 4.8. IMPIANTO MINI-EOLICO

Vengono installati dei generatori con asse verticale nella corsia spartitraffico, all'interno delle strutture deputate a portare i pannelli informativi. Essendo questi ultimi posti a distanza di 500 metri l'uno dall'altro, si riusciranno ad installare circa 30 aerogeneratori. Si riportano i dati tecnici di una tipologia di pala minieolica ad asse verticale, solitamente utilizzata per siti di tipo urbano e altezza tra i 3 e i 10 metri.

<b>DATI TECNICI</b>	<b>Q</b>	<b>U.M.</b>
potenza nominale	1	kW
velocità del vento nominale	14	m/s
velocità di cut-in	3	m/s
velocità di cut-out	15	m/s
n° di giri massimo	415	giri/min
n° di pale	3	-
voltaggio output	240	V
<b>DIMENSIONI</b>		
peso del rotore	65	kg
diametro del rotore	1.45	m
altezza del rotore	1.45	m
area spazzata	2.10	m <sup>2</sup>

**Tabella 4.80: Dati tecnici generatore minieolico**

Nel contesto considerato in progetto, si pone nulla la produzione di energia elettrica da fonte eolica, come si osserva anche dal confronto dei dati di velocità del vento nella zona di Bergamo con la curva di potenza del generatore minieolico. Essendo quello in questione un progetto pilota e di ricerca sull' utilizzo di fonti rinnovabili, esportabile in altri contesti, si decide di installare il sistema di generazione eolico al fine di un monitoraggio della produzione energetica al fine di capire e valutare l'effettiva sostenibilità economica dell'intervento. Può essere utile precisare, ai fini del monitoraggio, che la produzione energetica può essere influenzata dal movimento dei flussi d'aria generati dallo spostamento dei veicoli sommato all'azione del vento, nonché agli occasionali flussi naturali che raggiungono il valore di velocità corrispondente al 4° grado della scala Beaufort: 5,5 m/s – vento moderato.

Il costo indicativo della tecnologia minieolica va dai 3'000,00 ai 5'000 € a ogni kW di potenza nominale installato. L'impianto in oggetto di progettazione essendo composto da 30 generatori da 1kW ciascuno, ha una potenza nominale di 30 kW. Perciò il costo di installazione sarà vicino ai 150'000 €.

## 4.9. TECNOLOGIE PER LA SICUREZZA

La sicurezza e il confort degli utenti sono i maggiori indicatori di qualità di una infrastruttura viaria.

Si è proposto di promuovere la sicurezza del traffico tramite sponsor nelle aree di servizio e nei documenti legati al progetto. Si ha un ritorno di spesa più rapido e una riduzione dei costi di gestione e di manutenzione.

Si pensa inoltre ad un sistema di telecamere mobili su binari che segnala e rileva i problemi verificatisi in strada, a seguito di una segnalazione pervenuta loro da sensori ciechi (per evitare problemi di mal funzionamento dovuti a condizioni di scarsa visibilità) posti sui sovrappassi, viadotti e archi di sostegno dei pannelli informativi. Normalmente si adotta una distanza di circa 5 km tra gli elementi ma, dato il basso costo dell'apparecchio (200 €/cad.), sarà possibile incrementare la frequenza (ogni 500 m), riducendo così la corsa del binario e il tempo di percorrenza dello stesso da parte della telecamera (che ha una velocità di circa 10 m/s) al fine di garantire un servizio migliore di sorveglianza lungo l'intero sviluppo autostradale

Le informazioni vengono trasmesse ai pannelli informativi tramite una rete di telecomunicazione su fibra ottica con tecnologia OTN di proprietà del gestore autostradale, con caratteristiche di ridondanza e sicurezza nel passaggio dei dati da utilizzare per diversi servizi. Si ha un vantaggio in termini di fluidità del traffico e gestione della circolazione. I dati vengono gestiti da una centrale di monitoraggio. Il sistema informativo permetterà di:

- Controllare lo stato generale degli eventi attivi tramite una rappresentazione grafica dei tratti autostradali aggiornata dinamicamente con i fenomeni più importanti;
- Inserire o modificare qualsiasi evento o informazione verso l'utenza determinando il tipo di periferica (cartelli a messaggio variabile, televideo, ecc.) dove deve essere inviata la notizia;
- Creare e inviare messaggi "speciali" sui cartelli a messaggio variabile ogni qualvolta si presentino avvenimenti eccezionali o eventi non previsti;
- Individuare automaticamente, in funzione degli eventi presenti sulla rete, su quali cartelli a messaggio variabile diffondere l'informazione e con quale messaggistica;
- Diffondere misurazioni meteo (nebbia, pioggia, gelo, temperatura, ecc.)

Lo stato dell'arteria sarà pertanto controllato in modo continuo, dettagliato ed uniforme, permettendo di ottimizzare gli interventi manutentivi, di soccorso, di gestione in genere della viabilità. Le segnalazioni delle condizioni di traffico sono date anche da bande in fibra ottica a colori variabili.

La fluidità del traffico è garantita anche agli svincoli in quanto il pagamento non avviene in modo tradizionale ma è automatizzato con un sistema tipo telepass. Incentivare l'utilizzo dei sistemi di pedaggio automatizzati comporta una velocizzazione delle operazioni di esazione con minori perdite di tempo per l'utenza, nonché il contenimento dei costi di investimento e di gestione e di investimento per strutture civili ed impianti. Gli svincoli sono i seguenti:

- Svincolo n. 1: collegamento con la viabilità esistente della SP 184 nei comuni di Osio Sotto e Boltiere;
- Svincolo n. 2: collegamento con l'opera connessa di raccordo con tangenziale Sud di Bergamo in comune di Osio Sotto;
- Svincolo n. 3: collegamento alla SP n. 122 in comune di Ciserano;
- Svincolo n. 4: collegamento alla SP n. 142 e raccordo alla S.S. n. 42 in comune di Treviglio;
- Svincolo n. 5: collegamento alla ex SS 11 (completamento dello svincolo a carico intervento Bre.be.mi.) in comune di Treviglio;

#### 4.10. EPOS – SISTEMA DI RICARICA PER AUTO ELETTRICHE<sup>28</sup>

Dato il concept innovativo dell'autostrada in questione è stato ritenuto opportuno prevedere l'inserimento di una area per la ricarica delle auto elettriche da collocarsi idealmente presso l'area di servizio/autogrill già prevista in progetto. La soluzione proposta per la ricarica delle auto elettriche è EPOS, costituita dai seguenti sottosistemi :

- 1 Stazione di ricarica principale EPOS presso la quale è possibile effettuare il pagamento della ricarica
- 2 Stazioni satelliti presso le quali effettuare al ricarica vera e propria dei veicoli
- SW package City Control 6 compact per la gestione ed il controllo del sistema EPOS.

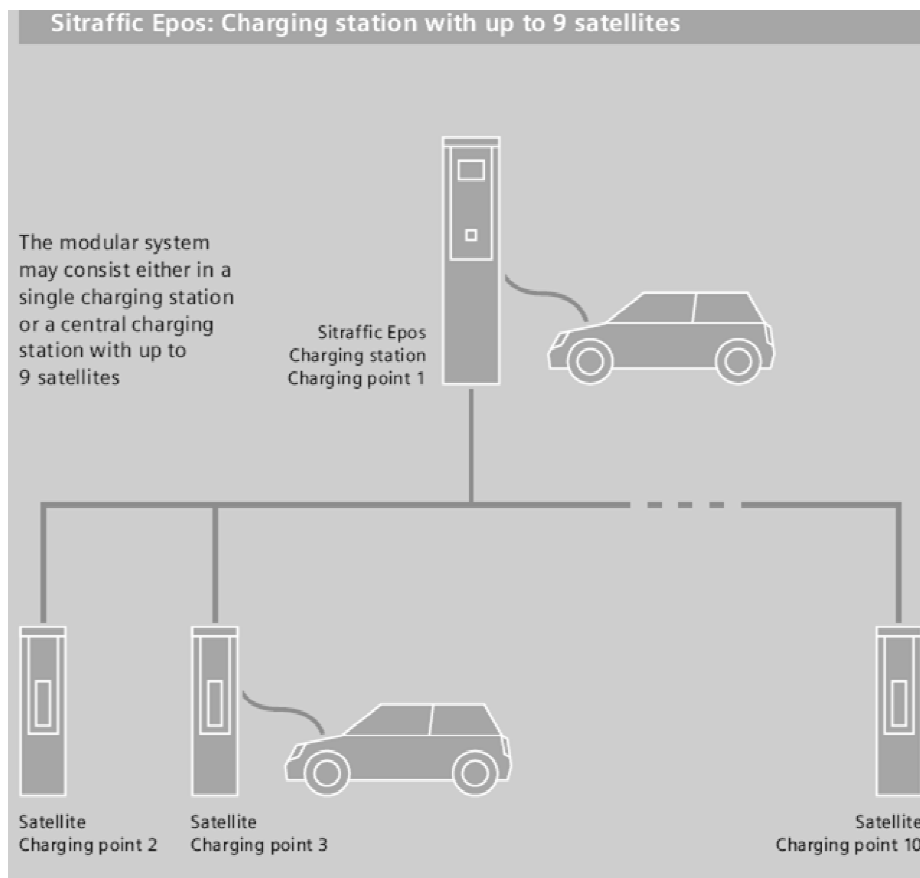


Figura 4.74: Schema sistema di ricarica auto elettriche

Con riferimento a quanto descritto, è proposta da Siemens la seguente valutazione economica stimata per il sistema EPOS descritto: Euro 19.039,00 + IVA.

<sup>28</sup> Informazioni da materiale fornito da Siemens s.p.a. al fine di un più completo quadro delle tecnologie utilizzate nell'autostrada. Tale materiale non è pertanto frutto del mio lavoro di tesi.

#### 4.11. SITRAFFIC CONCERT-SISTEMA PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO<sup>29</sup>

Dato il concept innovativo dell'autostrada in questione è stato ritenuto opportuno prevedere la realizzazione di una centrale per la gestione del traffico e dell'infomobilità al fine di gestire in modo integrato sull'intera struttura autostradale i dati derivanti dalle reti di monitoraggio del traffico e le informazioni derivanti dalle elaborazioni di tali dati. Siemens propone come sistema per la gestione del traffico il nuovo sistema Sitraffic Concert, che si basa su un concetto di piattaforma integrata alla quale sono connesse tutte le specifiche applicazioni verticali solitamente implementate nei centri di traffic management (monitoraggio dei flussi di traffico, TVCC ecc.). Sitraffic Concert rappresenta quindi una solida base alla quale sono connessi i differenti moduli applicativi sopra citati, secondo un principio di flessibilità e modularità che permette di definire, per ogni Cliente, l'architettura più adatta e più rispondente alle specifiche esigenze operative. Tutti i moduli facenti parte della soluzione SITRAFFIC Concert sono sincronizzati ed integrati l'uno con l'altro ed utilizzano il medesimo database, in modo da garantire la massima trasparenza e consistenza dei dati. La soluzione qui proposta è costituita da un insieme di moduli derivanti dalla piattaforma SITRAFFIC Concert selezionati sulla base delle esigenze espresse nell'ambito del progetto Pedemontana; sulla base delle specifiche esigenze del Cliente sarà ovviamente possibile selezionare con maggiore accuratezza i moduli e le funzionalità realmente necessarie, individuando una soluzione tagliata su misura per la realtà autostradale oggetto della presente valutazione.

##### **La soluzione proposta: le funzionalità**

La soluzione Sitraffic Concert è estremamente versatile e consente di controllare pannelli a messaggio variabile e indicazioni direzionali così come sensori per il monitoraggio del traffico e monitoraggio ambientale, sistemi di videosorveglianza o per segnalazioni di emergenza. Sitraffic Concert ha una architettura modulare estremamente flessibile e può essere adattato alla gestione sia di situazioni estremamente semplici (come, ad esempio, il caso della arteria di connessione tra Pedemontana e Brebemi di lunghezza circa 20 Km) ma allo stesso tempo può espandersi nel tempo in modo da gestire la supervisione dell'intero tratto autostradale di Pedemontana. Di seguito sono elencati e brevemente descritti i principali applicativi software compresi nella fornitura del sistema proposto:

##### **Gestione pannelli a messaggio variabile (VMS)**

SITRAFFIC Concert offre una gestione completa ed integrata dei pannelli a messaggio variabile. In questo modulo (VMS) sono comprese le seguenti funzionalità principali:

---

<sup>29</sup> Informazioni da materiale fornito da Siemens s.p.a. al fine di un più completo quadro delle tecnologie utilizzate nell'autostrada. Tale materiale non è pertanto frutto del mio lavoro di tesi.

- Approntamento di contenuti di visualizzazione (immagini) per pannelli e di programmi (sequenza di immagini scadenzata a livello temporale).
- Definizione di quale immagine/programma debba venir visualizzata/o su quale pannello in quale orario (gestione su base temporale).
- Definizione di quale immagine/programma debba venir visualizzata/o su quale pannello in quale orario sulla base di quale condizione (gestione su base temporale e gestione in funzione degli eventi).
- Gestione diretta (manuale) dei pannelli.
- Gestione dei pannelli sulla base di differenti livelli di priorità.
- Visualizzazione grafica delle immagini o dei programmi al momento correnti.
- Emissione dello stato di funzionamento momentaneo dei pannelli.

La definizione del tipo di pannello e del contenuto del pannello, nonché l'attivazione ed il controllo dei pannelli vengono realizzate tramite il modulo gestione pannelli. Tutte le configurazioni e le modifiche per i pannelli collegati vengono qui eseguite a livello centrale. La gestione avviene o per singoli pannelli o per gruppi di pannelli, che possono venir definiti a scelta. Tutte le attivazioni dei pannelli possono essere determinate anche partendo dalla vista del calendario. Così facendo, viene fissata, direttamente nel calendario, la durata della validità per l'attivazione di un pannello e viene fissata la corrispondente attivazione del pannello (quale immagine o programma su quale pannello). Inoltre, il calendario indica tutte le attivazioni dei pannelli effettuate e future. Ad intervalli di tempo regolari (ad intervalli orari, giornalieri, mensili, ecc.) è possibile generare attivazioni ricorrenti in modo particolarmente agevole tramite questa vista.

### **Rilevamento incidenti / modulo Incident Detection**

Mediante l'utilizzo di algoritmi matematici per i differenti casi applicativi (urbani/extraurbani) questo modulo calcola in modo continuo la probabilità che si verifichi un incidente in determinate sezioni di misura. Se si superano dei valori di soglia critici, la centrale di controllo viene informata in modo esplicito sull'incidente in questione. Per Incident Management si intende un'elaborazione degli incidenti supportata dall'operatore. Questi incidenti possono venir generati manualmente oppure dal sistema. Gli incidenti vengono visualizzati nell'interfaccia come segnalazioni relative al traffico. Con l'ausilio di piani di azione (piani di reazione) possono venir sottoposti all'operatore suggerimenti sui successivi provvedimenti da adottare. Un incidente è un evento che influisce negativamente sul flusso del traffico. Influssi negativi sono rappresentati di norma da code che vengono rilevate direttamente dalle unità di rilevamento (sensori) presenti su strada. Come reazione ad un incidente è possibile definire, con l'aiuto del modulo Strategy, sequenze automatiche per certe azioni. Il riconoscimento di un incidente si basa sugli stessi dati di ingresso utilizzati per il riconoscimento delle code. In questo modo non è possibile rilevare in maniera diretta incidenti o altri eventi straordinari. Il rilevamento di eventi straordinari (incidenti) è quindi possibile in maniera indiretta;

fondamentamente, il sistema segnala una possibile situazione di incidente qualora la situazione attuale di traffico si discosti significativamente dal normale andamento statistico del traffico. Questa deduzione deve sempre venir verificata e classificata da un operatore. Per la verifica degli incidenti da parte di un operatore possono venir utilizzate telecamere TVCC, che vengono posizionate nei punti critici della città.

### **Gestione TVCC**

Questo modulo permette la gestione di telecamere a circuito chiuso per monitorare il traffico e permette il controllo della telecamera e la registrazione di sequenze video. Oltre ai benefici per la sicurezza di un monitoraggio del traffico a livello di area metropolitana, permette di migliorare il controllo della singola telecamera e, ad esempio, l'efficienza della gestione degli incidenti. Il server del sistema comunica la TVCC mediante l'interfaccia open OCPI (OCPI OCPI-1 e-2). Questo permette di visualizzare sulla mappa GIS le singole immagini video registrate dalle telecamere con un refresh rate definibile dall'utente; è inoltre possibile controllare da remoto le singole telecamere ad es. per operazioni PTZ (Pan / Tilt / Zoom). Le telecamere sono visualizzate sulla mappa GIS mediante icone di colore differente a seconda dello stato di funzionamento:

- rosso: Camera non funzionante
- verde: Videocamera in funzione
- grigio: Stato di funzionamento non noto

Le telecamere possono essere utilmente utilizzate ad esempio per avere informazioni visive in caso di ricezione a livello di centrale di un messaggio di allarme per incidente.

### **Analisi dei dati di traffico - SRT (Statistic and report)**

Con l'aiuto del tool Statistics & Reports è possibile visualizzare e stampare report e grafici relativi a diversi valori archiviati provenienti dal sistema. Il software di valorizzazione è realizzato come modulo autonomo sulla base di un generatore di report. I dati memorizzati nel sistema di archiviazione possono venir rappresentati lungo i seguenti assi:

- asse temporale
- asse dei valori (istogrammi)
- rappresentazioni di diagrammi fondamentali

Gli assi di visualizzazione contengono una descrizione del tipo e della unità delle dimensioni visualizzate ad es. il volume del traffico [veh / h], tempo [min]. E' possibile la rappresentazione anche con doppio asse Y. I report e le statistiche sono in formato PDF e possono essere generati sullo schermo o stampante. Il modulo è composto da due licenze: "Basic" e "Premium".



- La licenza "Basic" per mette all'utente di selezionare i seguenti rapporti pre-definiti e statistiche
- analisi di dati di traffico a breve termine: sezioni di misura e rilevatori
- analisi giornaliera dei dati di traffico
- analisi individuali: grafici a linee o istogrammi a barre.

La licenza "SRT Premium" permette di selezionare i seguenti rapporti pre-definiti e statistiche:

- totale mensile giornaliero
- rappresentazione giornaliera: 24 ore, totale notturno (18:00 - 06:00), valori di picco
- Giorni di punta
- Statistiche mensili: per ciascuna sezione di misura
- statistiche annuali: rappresentazione della media per ogni giorno della settimana e del mese, valori medi annuali.

I report possono essere salvati come file pdf. È possibile inserire una descrizione sintetica nel nome del file, i parametri di valutazione e i risultati della ricerca sono contenuto del protocollo salvato. I dati di archivio valutati possono essere salvati in formato standard.

#### **Analisi dei dati di traffico - LOS (Level of Service, calcolo della condizione di traffico)**

Attraverso questo modulo, è possibile realizzare uno dei diagrammi base per la rappresentazione dei dati di traffico, cioè il diagramma che mette in relazione la velocità del flusso (Km/h) con la densità del traffico (n° veicoli/ora) ed attribuire quindi sulla base di questi parametri la specifica condizione di traffico. L'area del grafico è stata suddivisa in cinque fasce a ciascuna delle quali corrisponde una precisa situazione di traffico (da traffico fluido a traffico congestionato); le fasce sono state poi raggruppate in tre sottoaree caratterizzate dai colori verde, arancio e rosso sulla base di specifiche condizioni di velocità e tasso di occupazione definite dall'utente. Il grafico può venire aggiornato in automatico o in modalità manuale dall'operatore attraverso il ricalcolo dei parametri di velocità media e tasso di occupazione attuali; è previsto anche il ricalcolo dei parametri.

#### **Strategy management – modulo STRAMO**

Al fine di supportare in maniera efficace gli ingegneri del traffico nella definizione, nel test e nell'implementazione di adeguate strategie di traffico, Siemens ha sviluppato un tool estremamente performante che può venir utilizzato ugualmente bene anche per applicazioni individuali, quali il controllo del traffico di più alto livello. I dati provenienti dai sensori di traffico facenti capo sia alla rete urbana sia a quelle autostradale possono venir integrati con dati relativi ai dati ambientali e/o altri dati situazioni in sequenze logiche sulla base delle specifiche esigenze applicative del cliente. Gli scenari di traffico derivati da

queste fonti dati sottostanti possono venir utilizzati per indirizzare l'utente verso l'applicazione di specifiche strategie di controllo del traffico urbano, nonché per generare raccomandazioni di controllo per la rete autostradale interurbana. Anche un aspetto completamente nuovo – la gestione del traffico “verde” nel rispetto dell'ambiente – viene oggi pienamente supportata. Il modulo Strategy Management è la componente di sistema di livello superiore per il controllo del traffico, la gestione del traffico, l'informazione sul traffico, il condizionamento del traffico in base alle condizioni ambientali ed il riconoscimento di eventi di disturbo interni al sistema, cosa che permette di realizzare non solo una gestione del traffico a livello interurbano ed extra-urbano, bensì anche a livello dell'intero sistema. Vengono concordati provvedimenti e strategie validi per i singoli sistemi, in modo tale che il loro effetto sinergico possa rafforzare il grado di efficacia complessivo o risolvere possibili conflitti in termini di obiettivi da raggiungere. Il modulo Strategy Management reagisce a delle situazioni predefinite con una sequenza di azioni. Le situazioni vengono identificate per mezzo di uno strumento per il riconoscimento dei diversi scenari; ciascuno scenario può essere caratterizzato da elementi differenti derivanti dai diversi sottosistemi (TVCC, pannelli a messaggio variabile, sensori di rilevamento del traffico, sensori meteo ecc.). Qualora si verifichi una situazione predefinita, il sistema reagisce suggerendo all'operatore una o più strategie di intervento ciascuna caratterizzata da una definita sequenza di azioni. E' possibile attivare le strategie anche manualmente, mediante interventi mirati tramite interfaccia operativa che conducono a "stringhe" di azioni desiderate. In questo modo all'operatore è consentito un accesso centrale, che garantisce l'operatività ai più diversi attori tramite un'unica interfaccia.

### **Comunicazione – MediaManager**

Il modulo MediaManager permette la selezione automatica o manuale delle informazioni fornite dai sottosistemi connessi a SITRAFFIC Concert e la trasmissione di informazioni di vario tipo (ad es. messaggi, grafici, testi) relative allo stato del traffico a diversi media, quali Radio, fax, e-mail o Internet. La trasmissione di messaggi/informazioni può essere operata sia in modo manuale che in modo automatico; in quest'ultimo caso la trasmissione viene schedulata al verificarsi di determinate condizioni impostate dall'utente.

### **Indicazioni di tipo economico**

In linea generale, la quotazione economica di un sistema di gestione del traffico e dell'infomobilità come SITRAFFIC Concert dipende fortemente dalla quantità dei moduli (e funzionalità) richiesti; essendo un sistema modulare e configurabile su misura in base alle specifiche esigenze del Cliente, una quotazione realistica non può quindi prescindere da tali considerazioni. Del tutto indicativamente, e sulla base di precedenti esperienze di sistemi analoghi operate da Siemens in Europa, le valorizzazioni di tali sistemi van-

no da un minimo di 300.000 euro a valori massimi anche superiori al milione di euro; Siemens è quindi a disposizione per fornire chiarimenti tecnici e stime economiche più accurate per il progetto in esame.

Si sottolinea inoltre che il sistema proposto è utilizzabile, con lievi espansioni, anche per la gestione dell'intera rete autostradale Pedemontana, consentendo quindi una notevole compensazione dell'eventuale investimento effettuato e garantendo un vantaggio in termini di gestione integrata dei dati sull'intero territorio interessato dall'infrastruttura autostradale.

## 5. CONCLUSIONI

La Sostenibilità, secondo la definizione data dalla relazione della Commissione Ambiente e Sviluppo delle Nazioni Unite (Rapporto Brundtland-1987) è la capacità di soddisfare i bisogni del presente senza compromettere il soddisfacimento dei bisogni delle future generazioni, cioè senza distruggere le risorse di cui disponiamo. Per non cadere in ideologie ambientaliste per cui si contrappone la conservazione allo sviluppo e l'ambiente al mercato, si è coniato un ulteriore termine che cerca di conciliare le due apparentemente opposte esigenze quali lo sviluppo e la salvaguardia dell'ambiente: Sviluppo Sostenibile. Esso nasce dall'equilibrio tra le componenti economica, socio-culturale ed ambientale che devono coesistere ed integrarsi tra loro.

Lo sviluppo del progetto si può ritenere essersi mosso in tale direzione, scegliendo, studiando, valutando quelle soluzioni tecniche in grado di portare un beneficio alla società e all'ambiente, certamente modificato e contaminato dall'inserimento di un nuovo sistema antropico quale un'infrastruttura autostradale.

Le principali soluzioni sviluppate assolvono la funzione di:

- Produrre energia che permetta, tramite il suo utilizzo, di ridurre le emissioni di anidride carbonica che si avrebbero dall'utilizzo di tradizionali fonti energetiche e sistemi di produzione;
- Ripristinare parzialmente il sistema ambientale utilizzando materiali e sistemi tecnologici (copertura verde) che permettano di ottimizzare l'efficienza dell'opera nel periodo di vita di servizio, limitare la frequenza delle manutenzioni e garantire elevate prestazioni nonostante il difficile contesto nel quale operano;
- Ridurre i tempi e costi di realizzazione (Pannelli SFRC), con incidenza sulla riduzione dell'impatto ambientale del cantiere e ciò che esso comporta (polveri, utilizzo di energia, utilizzo di materiali, ecc.);
- Incrementare il livello qualitativo del costruito;
- Garantire ai residenti servizi energetici a basso impatto ambientale e maggiore sicurezza agli utenti dell'infrastruttura.

Analizzando il quadro economico generale (Tabella 80) si può avere un confronto diretto tra i diversi interventi del progetto e stabilire quali tra essi risultano più sostenibili sia dal punto di vista economico che sociale/ambientale. Tra le soluzioni impiantistiche risulta come punto forte del progetto, la realizzazione della rete di teleriscaldamento in quanto, nonostante gli elevati costi (comunque riducibili del 42% nel caso si arresti l'intervento a livello della rete primaria), si ha una elevata produzione di energia termica ed elettrica in grado di soddisfare la richiesta di un consistente numero di comuni dell'area di progetto con ingenti ricavi per il gestore del servizio. L'utente ha perciò il vantaggio di acquistare energia a prezzi inferiori rispet-

to al gas naturale, di risparmiare sulla manutenzione dell'impianto termico domestico, di vivere in migliori condizioni di sicurezza in quanto non è presente combustibile in caldaia, spesso causa di esplosioni, fughe di gas, incendi, ecc. Oltre ai vantaggi del singolo, quale il gestore e l'utente, si hanno grandi vantaggi ambientali e sociali in quanto si ha un elevato risparmio di anidride carbonica immessa in ambiente e vengono utilizzate per la combustione sostanze di scarto quali biomasse con un consistente risparmio di energia primaria sottratta all'ambiente naturale.

La tecnologia fotovoltaica risulta meno sostenibile del teleriscaldamento in quanto ancora molto costosa e con basso rendimento. Inoltre la rendita economica è stata calcolata con le tariffe incentivanti previste per il 2013: nel caso l'impianto venga installato in periodi successivi, tali tariffe subiscono delle riduzioni perciò il tempo di ritorno ne risulterebbe incrementato. Il quarto conto energia tende ad incentivare maggiormente i piccoli impianti realizzati e integrati sugli edifici piuttosto che i grandi campi fotovoltaici, per i quali è possibile in ogni caso pensare ad incentivi economici provenienti dalla comunità europea.

Le altre tecnologie non danno una rendita economica diretta come accade per i sistemi di produzione di energia ma sono fondamentali per rendere sostenibile il progetto rispetto ai parametri sociali in quanto la sicurezza degli utenti dell'infrastruttura viaria, migliorata attraverso tali misure, costituisce un ulteriore gradino per il benessere e lo sviluppo della comunità. In generale si può considerare un tempo di ritorno medio di 8,5 anni, sicuramente accettabile per eventuali finanziatori del progetto.

QUADRO ECONOMICO	P	E	COSTO	RICAVO	PAY-BACK	EP risp	CO <sub>2</sub> risp
	MW	MWh/a	€	€/a	anni	TEP/a	kg/a
<i>FV</i>	2.71	2630	8.15 mln	600'000	13.5	1000	1.3 mln
<i>TLR</i>	83.7 (t)	167.5 (t)	161.4 mln	23 mln	7	4044	23 mln
	68.5 (e)	137 (e)					
<i>MINI EOLICO</i>	<i>Misura in situ</i>		150'000	-	-	-	-
<i>ILLUMINAZIONE LED</i>	-	-	8.7 mln	-	-	-	-
<i>ASFALTO FOTOCATALITICO</i>	-	-	20 mln	-	-	-	-
<i>SICUREZZA</i>	-	-	1 mln	-	-	-	-
<i>PONTE CICLOPEDONALE</i>	<i>Da valutare</i>						
<i>EPOS-Ricarica Auto Elettriche</i>			22'846,8				
<b>Totale</b>			<b>200 mln</b>	<b>23.6 mln</b>	<b>8.5</b>	<b>5044</b>	<b>24.3 mln</b>

Tabella 5.1: Sintesi di costi e ricavi per misure volte alla sostenibilità ambientale dell'intervento

Per quanto riguarda il progetto del ponte ciclopedonale, la rendita proveniente dalla sua realizzazione è, anche in questo caso, totalmente sociale e ambientale. Viene infatti permessa la riqualificazione del parco della Geradadda valorizzando dei beni culturali in esso presenti, attraverso la valorizzazione dei percorsi ciclabili che li collegano. La valutazione dei costi per la realizzazione non è stata effettuata perciò il tempo di ritorno sarà più elevato ma prevedibilmente ancora accettabile. La convenienza economica dell'impiego del componente edilizio progettato è valutabile attraverso un simile procedimento; sicuramente è stata verificata la convenienza tecnica derivante dalla ottimizzazione delle prestazioni di un solo elemento.

Considerando i contenuti del lavoro si può affermare che per limitatezza di risorse, quali tempo, conoscenze tecniche specifiche, denaro e persone fisiche, il lavoro è da considerarsi incompleto in quanto sono sicuramente possibili ulteriori sviluppi e approfondimenti di alcune tematiche, in particolare: 1) elaborazione di più precise verifiche strutturali del ponte valutando la risposta della struttura a combinazioni di carico non uniformemente distribuito ed alla azione sismica di cui si è fatto un accenno qualitativo; 2) dimensionamento con metodi analitici più corretti, verifica sperimentale del componente edilizio in SFRC da parte di una azienda di prefabbricati in calcestruzzo al fine di una precisa caratterizzazione meccanica che renderebbe possibile, per esempio, la realizzazione di tabelle con l'indicazione della portanza di tale elemento per diverse combinazioni di lunghezza e carico al fine di rendere commerciabile il prodotto e impiegabile in situazioni analoghe o altre situazioni, ad esempio per la realizzazione di solai a secco per i quali risultano importanti le proprietà dinamiche e il conseguente comportamento capacitivo; 3) sviluppo di piani di manutenzione della struttura; 4) computo metrico estimativo del ponte ciclopedonale per una eventuale offerta ad aziende interessate alla realizzazione dell'opera.

Inoltre, dato l'approccio molto pratico che è stato dato al lavoro, può risultare in alcuni tratti poco accademico per quanto riguarda ad esempio la validazione del metodo di calcolo per la rete di teleriscaldamento. In merito a ciò, ci si è basati su dati medi provenienti da analoghi studi, materiale divulgativo di Comuni che hanno scelto di applicare tale tecnologia nel loro territorio e censimenti.

## Bibliografia

- [1] Camera di commercio Bergamo, *La congiuntura economica a Bergamo*, 01/02/10.
- [2] CNR-DT 204/2006, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato*.
- [3] CNR-DT 207/2008, *Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni*.
- [4] Comune di Bergamo, *Parco agricolo-ecologico di carattere intercomunale, Studio di fattibilità, Rapporto finale*, Luglio 2006.
- [5] Confindustria Bergamo, *Le imprese bergamasche e confindustria Bergamo*, 2008.
- [6] CRASL, *Quaderno – Serie ricerca*.
- [7] DM 05/05/11, *Quarto conto energia*.
- [8] DM 05/11/01, *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*.
- [9] DM 10/03/05
- [10] DM 14/01/08, *Norme tecniche per le costruzioni*.
- [11] DM 15/03/05
- [12] DM 16/02/07, *Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione*.
- [13] DM 30/11/99 n°557
- [14] DPR 30/03/04 n°142
- [15] EN 335 – 1,2,3, *Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno*.
- [16] ENEA, Regione Lombardia, *Linee guida per la promozione dei sistemi di teleriscaldamento*.
- [17] Gottfried, *Quaderni del manuale di progettazione edilizia – le chiusure orizzontali*, Hoepli, Milano, 2010.
- [18] Ing. R. Marvaldi, Arch. L. Tramonto, *Green Roof Banca Popolare Etica*.
- [19] ISO 10456:2007
- [20] L. Cimitan, C. Failla, S. Signorini, F. Sonzogni, G. Viglieno-Cossalino, *Estratto dagli atti del 14° Congresso C.T.E. Mantova, 7-8-9 Novembre 2002*.
- [21] L. Ferrara, R. Fratesi, S. Signorini, F. Sonzogni, *Estratto dagli atti del 15° Congresso C.T.E. Bari, 4-5-6 novembre 2004*.
- [22] L. Rossi, *Caratterizzazione meccanica di calcestruzzi fibrorinforzati con fibre di acciaio*, Tesi di laurea, Università degli studi di Bologna, A.A. 2006/2007.
- [23] *Linee guida per la progettazione delle reti ciclabili*.
- [24] LR 20/02/89 n°6, *Prescrizioni tecniche di attuazione per l'eliminazione delle barriere architettoniche*.

- [25] M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena, *Strutture in legno*, Hoepli, Milano, 2009.
- [26] M.A.Parisi, *Lezioni del corso di Costruzioni in zona sismica*.
- [27] Minor, White, Derucher, *Bridge maintenance, inspection and evaluation*, 1992.
- [28] O. Ali, D. Bigaud, E. Ferrier, *Comparative durability analysis of CFRP-strengthened RC highway bridges*, *Construction and building materials* 30 (2012), pp. 629-642, Elsevier.
- [29] P. Pedferri, L. Bertolini, *La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali*, McGraw-Hill, Milano, 1996.
- [30] PGT del Comune di Boltiere, *Documento di piano*, Ottobre 2008.
- [31] PGT del Comune di Boltiere, *Valutazione ambientale strategica di supporto al PGT*, Settembre 2008.
- [32] PGT del Comune di Brembate, *Valutazione ambientale strategica*, Novembre 2009.
- [33] PGT del Comune di Dalmine, *Valutazione ambientale strategica*, Aprile 2010.
- [34] PGT del Comune di Pontirolo Nuovo.
- [35] PGT del Comune di Treviglio, *Documento di piano*.
- [36] PGT del Comune di Verdellino.
- [37] PRG del Comune di Arcene, *Norme tecniche di attuazione*, Settembre 2005.
- [38] Provincia di Bergamo, Determinazione dirigenziale n° 2982 del 11/10/07, *Modalità di pianificazione e di gestione del PLIS della "Geradadda" in seguito ad avvenuto riconoscimento con DGP n°442 del 06/09/07*.
- [39] Provincia di Bergamo, *Piano territoriale di coordinamento provinciale, approvato dal Consiglio Provinciale con delibera n° 40 del 22/04/04*.
- [40] Relazione tecnica PLIS della Geradadda.
- [41] Relazione tecnica progetto preliminare IPB.
- [42] U.J. Kurze, C.S. Anderson, *Sound attenuation by barrier*, 1971.
- [43] UNI 11235:2007
- [44] UNI 9502, *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso*.
- [45] UNI EN 1995-1-1 (*Eurocodice 5-1*)
- [46] UNI EN 1995-1-2 (*Eurocodice 5-2*)
- [47] UNI EN 206-1
- [48] V. Mechtcherine, *Towards a durability framework for structural elements and structures made of strengthened with high-performance fibre-reinforced composites*, *Construction and building materials* 31 (2012), pp. 94-104, Elsevier.
- [49] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong, *Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview*, *Construction and building materials* 30 (2012), pp. 125-138, Elsevier.



**Siti web:**

- [1] <http://apps1.eere.energy.gov>
- [2] <http://www.joint.it>
- [3] [re.jrc.ec.europa.eu](http://re.jrc.ec.europa.eu)
- [4] [www.alfaetomega.it](http://www.alfaetomega.it)
- [5] [www.aluflon.it](http://www.aluflon.it)
- [6] [www.betonsafe.it](http://www.betonsafe.it)
- [7] [www.bigtlc.it](http://www.bigtlc.it)
- [8] [www.indexspa.it](http://www.indexspa.it)
- [9] [www.laroccarappresentanze.it](http://www.laroccarappresentanze.it)
- [10] [www.laterlite.it](http://www.laterlite.it)
- [11] [www.officinemaccaferri.com](http://www.officinemaccaferri.com)
- [12] [www.oppo.it](http://www.oppo.it)
- [13] [www.parcogeradadda.it](http://www.parcogeradadda.it)
- [14] [www.promolegno.com](http://www.promolegno.com)
- [15] [www.vitalispa.it](http://www.vitalispa.it)

**Indice delle figure**

Figura 1.1: Collocazione strategica dell'IPB [Vitali spa] .....	6
Figura 2.1: Pedemontana-galleria artificiale.....	14
Figura 2.2: Ecodotto.....	15
Figura 2.3: rete ciclabili parco della Geradadda [www.geradadda.it].....	16
Figura 2.4: interferenze tra IPB e rete ciclabile del parco della Geradadda.....	17
Figura 2.5: Concept sovrappasso ciclopedonale [Studio Zoppini Associati].....	17
Figura 3.1: IPB [Autostrade Bergamasche] .....	18
Figura 3.2: indice della produzione industriale.....	20
Figura 3.3: variazione grezza su base annua della produzione nei settori dell'industria bergamasca .....	21
Figura 3.4: produzione dell'artigianato manifatturiero .....	22
Figura 3.5: commercio al dettaglio .....	23
Figura 3.6: Servizi.....	24
Figura 3.7: area di trasformazione ad uso pubblico (area sportiva).....	29
Figura 3.8: area di trasformazione ad uso pubblico (area stazione).....	30
Figura 3.9: aree di completamento insediativo Parco Sud.....	30
Figura 3.10: Mappa copertura wireless [www.bigtlc.it].....	32

Figura 3.11: Rete di distribuzione fibra ottica [www.bigtlc.it].....	32
Figura 4.1: Principali categorie di itinerari ciclabili [Linee Guida per la progettazione delle reti ciclabili, Tab. 2.1].....	39
Figura 4.2: Dimensioni minime opere in sottopasso [DM 5/11/01, par. 4.1.1, opere di scavalcamento e sottopassi].....	40
Figura 4.3: Sezione corrente copertura a verde inclinato intensivo leggero [Tav. 5] .....	41
Figura 4.4: Sezione corrente pista ciclabile [Tav. 5] .....	41
Figura 4.5: Disposizione dei blocchi di EPS in un rilevato stradale .....	42
Figura 4.6: Montaggio dei blocchi .....	42
Figura 4.7: Rivestimento in terra.....	42
Figura 4.8: Criterio di assegnazione della categoria di esposizione per le diverse zone italiane [Figura 3.3, CNR-DT 207/2008, pag. 47] .....	46
Figura 4.9: Coefficienti $c_{pe}$ per facce sopravento, sottovento e laterali [CNR-DT 207/2008, Appendice G.2] .....	47
Figura 4.10: Valore del coefficiente di forma [DM 14/01/08, par. 3.4.3].....	48
Figura 4.11: Velocità di carbonizzazione [Tab. 3.1, UNI EN 1995-1-2].....	54
Figura 4.12: Mezzo di unione [catalogo rotofixing].....	57
Figura 4.13: Criteri di rottura unioni acciaio-legno [figura 8.3, UNI EN 1995-1-1].....	57
Figura 4.14: unione a doppio taglio acciaio-legno con chiodi [figura 8.5, UNI EN 1995-1-1].....	58
Figura 4.15: Criteri di rottura unioni acciaio-legno [figura 8.3, UNI EN 1995-1-1].....	61
Figura 4.16: Schematizzazione struttura.....	68
Figura 4.17: Diagramma deformata .....	68
Figura 4.18: Diagramma azione assiale (N).....	68
Figura 4.19: Diagramma azione di taglio .....	68
Figura 4.20: Diagramma momento flettente .....	69
Figura 4.21: Travi curve [figura 6.9, UNI EN 1995-1-1].....	76
Figura 4.22: Criteri di rottura unioni acciaio-legno [figura 8.3, UNI EN 1995-1-1].....	83
Figura 4.23: Valori minimi di spaziature e distanze da bordi ed estremità [prospetto 8.5, UNI EN 1995-1-1] .....	87
Figura 4.24: pagoda del tempio di Horyu-Ji a Nara (Giappone) .....	88
Figura 4.25: Terremoto di Kobe (Giappone) .....	88
Figura 4.26: Curva carico-spostamento [M.A. Parisi, Corso di costruzioni in zona sismica, Lez. 24].....	89
Figura 4.27: Curve carico-spostamento per differenti tipologie di connettori [M.A. Parisi, Corso di costruzioni in zona sismica, Lez. 24] .....	90

Figura 4.28: Duttività delle connessioni a gambo cilindrico [M.A. Parisi, Corso di costruzioni in zona sismica, Lez. 24].....	91
Figura 4.29: Controventi in acciaio [Tav. 4].....	95
Figura 4.30: a) azione ciclica delle intemperie su una sezione; b) penetrazione del degrado di una sezione di legno lamellare incollato [www.promolegno.com].....	96
Figura 4.31: Progetto della protezione degli elementi in legno .....	98
Figura 4.32: Parapetto in acciaio .....	100
Figura 4.33: Particolare aggancio parapetti .....	100
Figura 4.34: Azioni sulla bullonatura del parapetto .....	101
Figura 4.35: Determinazione del diametro degli scarichi in funzione della superficie servita [A. Gottfried, Quaderni del manuale di progettazione edilizia – le chiusure orizzontali, Hoepli, Milano, 2010, Tab.7, pag.47].....	102
Figura 4.36: Comportamento Softening (a) e Hardening (b) [CNR-DT 204/2006, par. 1.4].....	106
Figura 4.37: Curve sforzo-deformazione [D.J. Hannant, 2000].....	107
Figura 4.38: Andamento delle tensioni a flessione. a) comportamento elastico a tensione e compressione. b) comportamento elastico a compressione ed elasto-plastico a tensione. [D.J. Hannant, 2000].....	109
Figura 4.39: Sezione semplificata per il calcolo del momento di inerzia .....	111
Figura 4.40: sezione trasversale elemento di accumulo idrico .....	114
Figura 4.41: Pannello strutturale di accumulo idrico in SFRC.....	114
Figura 4.42: Gradiente di temperatura per un tempo di esposizione al fuoco di 60 minuti [immagine elaborata a partire dalla norma UNI 9502, prospetto 1].....	116
Figura 4.43: Agenti di degrado.....	121
Figura 4.44: Permeabilità del cls in funzione di a/c [www.betonsafe.it].....	123
Figura 4.45: Modello in Trnsys 16 per il calcolo della $T_s(t)$ .....	125
Figura 4.46: Classe di esposizione ambientale [UNI EN 206-1] .....	129
Figura 4.47: Andamento sempre ascendente della carbonatazione in profondità nei SFRC.....	130
Figura 4.48: Andamento della carbonatazione media dei calcestruzzi fibrorinforzati e di riferimento, in funzione del tempo.....	130
Figura 4.49: Raccomandazioni nella scelta di fibre d'acciaio in funzione della classe di esposizione e del tipo di calcestruzzo [CNR-DT 204/2006, Tabella 3-2].....	132
Figura 4.50: Sezione corrente copertura a verde.....	135
Figura 4.51: Fenomeno della diffrazione su barriera acustica .....	142
Figura 4.52: Schematizzazione del percorso $\delta$ .....	143
Figura 4.53: Schema di montaggio pannello fonoassorbente [www.alufon.it].....	144

Figura 4.54: Valori limite di livello acustico e fasce di pertinenza acustica [DPR 30/03/04 n°142, Allegato 1] .....	145
Figura 4.55: Curvatura delle traiettorie di propagazione del suono causate dal vento o gradienti termici	146
Figura 4.56: Suddivisione di muri e parapetti in aree di uguale pressione complessiva [CNR-DT 207/2008, Appendice G.5].....	147
Figura 4.57: Fattore di schermatura per muri e parapetti [CNR-DT 207/2008, Appendice G.5] .....	148
Figura 4.58: Coefficiente di esposizione [CNR-DT 207/2008, par. 3.2.7] .....	149
Figura 4.59: Schematizzazione struttura con SAP 2000.....	149
Figura 4.60: Diagramma deformata .....	151
Figura 4.61: Diagramma azione assiale (N).....	151
Figura 4.62: Diagramma taglio (V).....	152
Figura 4.63: Diagramma momento flettente (M).....	152
Figura 4.64: Massimi rapporti larghezza-spessore per parti compresse [Tabella 4.2.III, DM 14/01/08] ...	153
Figura 4.65: Esempio di stima della produzione di energia elettrica fotovoltaica [ <a href="http://re.jrc.ec.europa.eu">http://re.jrc.ec.europa.eu</a> ] .....	159
Figura 4.66: Render autostrada tratto in rilevato.....	162
Figura 4.67: Render autostrada tratto in trincea .....	162
Figura 4.68: Centrale di cogenerazione di Imola (vista aerea) .....	173
Figura 4.69: Centrale di cogenerazione di Imola (esterno).....	173
Figura 4.70: Centrale di cogenerazione di Imola (interno).....	174
Figura 4.71: Limiti di legge per le emissioni di inquinanti.....	174
Figura 4.72: Immissione di inquinanti in ambiente ( centrale di cogenerazioni di Imola).....	175
Figura 4.73: Costi asfalto fotocatalitico [ <a href="http://www.vitalispa.it">www.vitalispa.it</a> ].....	177
Figura 4.74: Schema sistema di ricarica auto elettriche .....	181
Figura 4.75: Pannello informativo .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
Figura 4.76: Sistema di gestione telecamere a circuito chiuso .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
Figura 4.77: Sistema di analisi dati di traffico.....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>

## Indice dei grafici

Grafico 4.1: Riduzione della resistenza a compressione $f_{ck}(\theta)$ del conglomerato cementizio in funzione della temperatura .....	118
Grafico 4.2: Riduzione della resistenza a trazione $f_{ctk}(\theta)$ del conglomerato cementizio in funzione della temperatura .....	119
Grafico 4.3: Andamento della temperatura in funzione della profondità di penetrazione.....	127

Grafico 4.4: Andamento annuale delle temperature medie giornaliere .....	127
Grafico 4.5: Distribuzione di probabilità di ESL.....	137
Grafico 4.6: Curva di probabilità cumulativa .....	138
Grafico 4.7: Flusso di cassa semplice impianto fotovoltaico.....	162
Grafico 4.8: Fabbisogno totale di energia termica .....	164
Grafico 4.9: Confronto tra i consumi energetici specifici per ogni comune .....	165
Grafico 4.10: Confronto tra fabbisogno ed energia fornita .....	165
Grafico 4.11: Confronto tra fabbisogno per residenze e servizi ed energia fornita .....	166
Grafico 4.12: Incidenza dei costi teleriscaldamento.....	171

## Indice delle tabelle

Tabella 3.1: Analisi dei servizi tecnologici.....	31
Tabella 4.1: Studio di pre-fattibilità degli interventi per la sostenibilità dell'infrastruttura.....	37
Tabella 4.2: caratteristiche meccaniche legno lamellare .....	44
Tabella 4.3: Parametri di macrozonazione .....	45
Tabella 4.4: Calcolo di $c_p$ e delle pressioni del vento in direzione parallela alle travi.....	47
Tabella 4.5: Calcolo di $c_p$ e delle pressioni del vento in direzione perpendicolare alle travi.....	47
Tabella 4.6: Analisi dei carichi .....	49
Tabella 4.7: Caratteristiche dimensionali degli arcarecci .....	50
Tabella 4.8: Valori limite $w_{inst}$ .....	50
Tabella 4.9: Valori limite $w_{fin}$ .....	51
Tabella 4.10: Coefficienti parziali .....	51
Tabella 4.11: Coefficienti di durata del carico .....	51
Tabella 4.12: Caratteristiche dimensionali trave principale.....	69
Tabella 4.13: valori limite $w_{inst}$ , $w_{fin}$ .....	69
Tabella 4.14: Parametri per il calcolo di $\lambda_{rel,m}$ .....	72
Tabella 4.15: Verifica stabilità longitudinale .....	73
Tabella 4.16: Verifica stabilità trasversale .....	74
Tabella 4.17: Verifica SLU con carichi permanenti .....	75
Tabella 4.18: Coefficiente $k_1$ .....	76
Tabella 4.19: Coefficiente $k_p$ .....	77
Tabella 4.20: Coefficienti $k_{dis}$ , $k_{vol}$ .....	78
Tabella 4.21: verifica pressoflessione combinazione carichi permanenti.....	79
Tabella 4.22: Verifica al taglio combinazione carichi permanenti .....	79

Tabella 4.23: verifica flessione e trazione perpendicolare alle fibre.....	80
Tabella 4.24: Verifica a pressoflessione combinazione carichi accidentali.....	80
Tabella 4.25: verifica al taglio combinazione carichi accidentali.....	80
Tabella 4.26: Parametri sezione ridotta.....	81
Tabella 4.27: verifica flessione e trazione perpendicolare alle fibre.....	82
Tabella 4.28: verifica pressoflessione.....	82
Tabella 4.29: verifica al taglio.....	82
Tabella 4.30: Parametri per verifica sbandamento.....	93
Tabella 4.31: Scheda dei guasti di elementi in Legno Lamellare Incollato.....	99
Tabella 4.32: Calcolo bullonatura del parapetto.....	101
Tabella 4.33: Analisi dei carichi su strato di accumulo idrico.....	111
Tabella 4.34: Proprietà della matrice cementizia.....	112
Tabella 4.35: Proprietà fibre d'acciaio.....	112
Tabella 4.36: Proprietà del composito.....	113
Tabella 4.37: Analisi dei carichi per la verifica di resistenza al fuoco.....	117
Tabella 4.38: Coefficienti di combinazione per situazioni eccezionali.....	117
Tabella 4.39: Coefficienti di riduzione delle resistenze $k_c(\theta)$ e $k_{ct}(\theta)$ .....	119
Tabella 4.40: Resistenze iniziali $f_{ck}$ , $f_{ctk}$ e ridotte $f_{ck}(\theta)$ , $f_{ctk}(\theta)$ .....	119
Tabella 4.41: Momento e sforzi agenti nella sezione.....	120
Tabella 4.42: Periodo di calcolo e pulsazione angolare.....	126
Tabella 4.43: Proprietà termiche terreno [ISO 10456:2007, Table 3].....	126
Tabella 4.44: Condizioni contestuali di progetto.....	134
Tabella 4.45: Condizioni di riferimento.....	134
Tabella 4.46: Descrizione del componente.....	134
Tabella 4.47: Attribuzione dei punteggi, motivazioni e calcolo della vita utile.....	135
Tabella 4.48: valori, motivazioni e calcolo vita utile (metodo fattoriale evoluto).....	137
Tabella 4.49: Scheda dei guasti di elementi SFRC.....	140
Tabella 4.50: Verifica di attenuazione del livello sonoro in prossimità di una barriera fonoassorbente ....	145
Tabella 4.51: Coefficienti di pressione complessiva.....	147
Tabella 4.52: Calcolo fattore di schermatura.....	148
Tabella 4.53: Valori coefficiente di pressione.....	148
Tabella 4.54: Pressione del vento.....	149
Tabella 4.55: Analisi dei carichi.....	150
Tabella 4.56: Coefficienti parziali.....	150
Tabella 4.57: Combinazione di carico SLE.....	150

Tabella 4.58: Combinazione di carico SLU.....	150
Tabella 4.59: Caratteristiche dimensionali profilo tubolare [www.oppo.it].....	153
Tabella 4.60: Calcolo rapporto larghezza-spessore.....	154
Tabella 4.61: verifica di stabilità delle membrature.....	155
Tabella 4.62: Caratteristiche dimensionali trave HE180A.....	156
Tabella 4.63: Azioni agenti.....	156
Tabella 4.64: Verifica tirafondi.....	157
Tabella 4.65: Caratteristiche modulo fotovoltaico.....	161
Tabella 4.66: Calcolo producibilità, costi e ricavi del campo fotovoltaico.....	161
Tabella 4.67: Prospetto riassuntivo producibilità, costi e ricavi del campo fotovoltaico.....	161
Tabella 4.68: Dati di input per il calcolo.....	167
Tabella 4.69: Costi unitari della rete.....	167
Tabella 4.70: Indice dei simboli utilizzati.....	168
Tabella 4.71: Calcolo del fabbisogno di energia termica.....	169
Tabella 4.72: Calcolo energia fornita e potenza della centrale di cogenerazione.....	169
Tabella 4.73: Calcolo della lunghezza e dei costi della rete locale.....	169
Tabella 4.74: Calcolo della lunghezza e dei costi della rete primaria.....	170
Tabella 4.75: Costi per la realizzazione e ricavi della vendita di energia.....	170
4.76: Voci di costo considerando il costo pieno della rete primaria.....	171
Tabella 4.77: Voci di costo considerando il costo pieno della rete primaria e nulli i contributi della rete locale e sottocentrali.....	172
Tabella 4.78: Voci di costo considerando nullo l'importo relativo a rete locale e sottocentrali.....	172
Tabella 4.79: Costi illuminazione led.....	176
Tabella 4.80: Dati tecnici generatore minieolico.....	178
Tabella 5.1: Sintesi di costi e ricavi per misure volte alla sostenibilità ambientale dell'intervento.....	189

## Indice delle Tavole

Tavola 1: Inquadramento territoriale, trasformazioni urbanistiche dell'area di progetto

Tavola 2: Inquadramento territoriale, parchi e reti ciclabili

Tavola 3: Soluzioni impiantistiche

Tavola 4: Barriere acustiche con fotovoltaico integrato

Tavola 5: Ponte ciclopedonale, struttura in legno lamellare

Tavola 6: Ponte ciclopedonale, sezioni e particolari

Tavola 7: Ponte ciclopedonale, pianta e prospetti

Tavola 8: Ponte ciclopedonale, render, viste, fasi realizzative

Tavola 9: Ponte ciclopedonale, sviluppo di un componente edilizio



*Nel concludere questo lavoro di tesi sul tema della sostenibilità delle infrastrutture stradali, ringrazio per il prezioso aiuto tecnico e sostegno il relatore di questa tesi Prof. Enrico De Angelis oltre che Vitali s.p.a. per avermi dato la possibilità di svolgere l'attività di tirocinio, Arch. Fabio Bosoni per la collaborazione e supervisione del lavoro durante il tirocinio, Techno Habitat s.p.a. e Siemens s.p.a. per la collaborazione nello sviluppo delle soluzioni impiantistiche, i miei genitori Mario e Maria Rosa, i nonni e gli altri parenti, Chiara e famiglia Contardi e tutti gli amici, in particolare i miei "compagni di tesi" Alice, Marica, Elisa, Marco, Francesca e Gian, amico di sempre e compagno di studi in questi (quasi) sei anni di università.*