POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Building Maintenance Management

Valutazione sintetica della durabilità di sistemi edilizi e politiche di manutenzione degli edifici

Tesi di Laurea Magistrale

Relatori:

Prof. Bernardino CHIAIA

Ing. Andrea RESPIGHI

Candidata:

Daniela ABAGNALE

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Indice i

Indice delle figure iii

Indice delle tabelle iv

Premessa 9

Introduzione 11

Obiettivo dello studio 11

Struttura della tesi 13

Capitolo 1 15

Metodi speditivi d'ispezione 15

1.1 Introduzione 15

1.2 Perché un metodo speditivo 15

1.3 Metodi speditivi di indagine 17

1.3.1 Linee Guida Seveso 19

1.3.2 "Inspection of public building based on risk assessment" 21

1.3.3 Certificato di Idoneità Statica 23

1.4 Lezioni apprese e problemi da superare 25

1.5 Conclusioni 27

Capitolo 2 29

Definizione del metodo 29

2.1 Introduzione 29

2.2 Definizione elementi oggetto di indagine 29

2.3 Approccio FMEA 34

2.3.1 L'analisi FMEA 34

2.3.2 Applicazione 38

2.4 Codifica del metodo 49

2.4.1 I parametri 49
2.4.2 Definizione algoritmo matematico e indici 58
2.4.3 L'ispezione.....76
2.4.4 Prescrizioni.....78
2.5 Conclusioni 80
Capitolo 3 81
Caso studio: la stazione di Torino Porta Nuova 81
3.1 Introduzione.....81
3.2 Storia e inquadramento 81
3.3 L'ispezione.....89
3.4 Criticità emerse e soluzione proposte.....92
3.4.1 Il problema della corrosione 92
3.4.2 Ispezionabilità 97
3.4.3 Indici e algoritmo matematico..... 100
3.4.4 La numerabilità degli elementi 103
3.5 Risultati e possibili sviluppi futuri 105
3.6 Conclusioni 108
Capitolo 4 109
Maintenance Management..... 109
4.1 Introduzione..... 109
4.2 Storia e principi fondamentali della manutenzione..... 109
4.3 Manutenzione preventiva basata sulle ispezioni..... 118
4.4 Verso una manutenzione predittiva 122
4.5 Metodo affidabilistico 125
4.6 KPI..... 127
4.7 Conclusioni 131
Capitolo 5 133
Politiche di manutenzione applicate a Torino Porta Nuova 133

5.1 Introduzione 133
5.2 Inquadramento e descrizione 133
5.3 Proposta di manutenzione.....137
5.4 Aspetto economico.....139
5.5 Conclusioni 140
Capitolo 6 141
Conclusioni 141
Bibliografia 144
Opere citate 146
Appendice: elaborazione dati 148
***Ringraziamenti* 163**

Indice delle figure

Figura 1.1: Modello fish-bone per valutazione sintetica invecchiamento per stabilimenti "Seveso" 20
Figura 1.2: Mappa interattiva riportante i risultati del risk assessment dello studio "Inspection of public buildings based on risk assessment 23
Figura 2.1: Classificazione elementi oggetto di indagine.....33
Figura 2.2: Fasi FMEA, schema tradotto e adattato da Wang, 2003. 38
Figura 2.3: Schema del meccanismo di scorrimento tra conci 55
Figura 2.4: Schema spostamento alle imposte per archi e volte.....55
Figura 2.5: Schema per deformazione di elementi orizzontali 63
Figura 2.6: Schema per il calcolo del rapporto λ.....67
Figura 3.1:Planimetria del progetto del Mazzucchetti del 1861 (21).....83
Figura 3.2: Stazione di Porta Nuova. Interno della grande tettoia nel 1892 (21) 84
Figura 3.3:Stazione di Porta Nuova. Prospetto principale nel progetto originale di Mazzucchetti del 1867 (21) 85

Figura 3.4: Stazione di Porta Nuova. Planimetria generale nel 1911 (22) 86
Figura 3.5: Stazione Porta Nuova dopo i lavori del 1948 - 1955 (21) 87
Figura 3.6: Stazione di Torino Porta Nuova. Planimetria dell'edificio viaggiatori nel 2019.....89
Figura 3.7: Un tratto della copertura del Binario 1.....90
Figura 3.8: Un tratto del rivestimento murario lungo il Binario 1 91
Figura 3.9: Un tratto della copertura del Binario 20.....91
Figura 3.10: Stazione di Torino Porta Nuova. Binario 1. Dettaglio di lamiera in acciaio 94
Figura 3.11: Stazione di Torino Porta Nuova. Binario 1. Dettaglio della copertura 96
Figura 4.1: Evoluzione degli obiettivi della manutenzione nelle tre generazioni 111
Figura 4.2: Fasi della manutenzione correttiva..... 113
Figura 4.3: Fasi della manutenzione preventiva 114
Figura 4.4: Fasi della manutenzione preventiva secondo condizione . 114
Figura 4.5: Fasi della manutenzione preventiva 114
Figura 4.6: Classificazione manutenzione ordinaria..... 115
Figura 4.7: Esempio di check-list per fenomeni globali..... 121
Figura 5.1: Inquadramento dell'Edificio 1 134
Figura 5.2: Inquadramento copertura 7 dell'Edificio 1. 135
Figura 5.3: Sezione manto di copertura 136

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Fattori di rischio per resistenza meccanica e stabilità dell'edificio [tradotta da (6)].....22
Tabella 2.1 Template per analisi FMEA 37
Tabella 2.2: FMEA per strutture verticali.....40
Tabella 2.3: FMEA per strutture orizzontali 41
Tabella 2.4: FMEA per fondazioni. 42
Tabella 2.5: FMEA per strutture bidimensionali 42
Tabella 2.6: FMEA per collegamenti verticali 43

Tabella 2.7: FMEA per divisori 43
Tabella 2.8: FMEA per rivestimento di esterni 44
Tabella 2.9: FMEA per rivestimenti di interni 45
Tabella 2.10: FMEA per finiture interne e rivestimenti esterni 46
Tabella 2.11: FMEA per elementi in acciaio 47
Tabella 2.12: FMEA per elementi in cemento armato 47
Tabella 2.13: FMEA per elementi in muratura 48
Tabella 2.14: FMEA per elementi in materiale lapideo 48
Tabella 2.15: FMEA per elementi in legno 48
Tabella 2.16: Coefficiente di entità difetto in assenza di difetti visibili 58
Tabella 2.17: Coefficiente di entità difetto per difetti di origine antropica 59
Tabella 2.18: Coefficiente di entità difetto per difetti dovuti ad agenti biochimici 59
Tabella 2.19: Coefficiente di entità difetto per asportazione o mancanza di materiale 59
Tabella 2.20: Coefficiente di entità difetto per rigonfiamento 59
Tabella 2.21: Coefficiente di entità difetto per deformazioni 60
Tabella 2.22: Coefficiente di entità difetto per difetti che influiscono sulla resistenza meccanica 60
Tabella 2.23: Coefficiente di entità difetto per difetti dell'acciaio 60
Tabella 2.24: Coefficiente di entità difetto per difetti di archi e volte 60
Tabella 2.25: Coefficiente di estensione difetto per difetti di origine antropica 61
Tabella 2.26: Coefficiente di estensione difetto per difetti dovuti ad agenti biochimici 61
Tabella 2.27: Coefficiente di estensione difetto per asportazione o mancanza di materiale 61
Tabella 2.28: Coefficiente di estensione difetto per distacco copriferro 61
Tabella 2.29: Coefficiente di estensione difetto per nidi di ghiaia 62
Tabella 2.30: Coefficiente di estensione difetto per Pop Out del calcestruzzo 62
Tabella 2.31: Coefficiente di estensione difetto per distacco o dilavamento malta 62

Tabella 2.32: Coefficiente di estensione difetto per distacco di elementi o materiale 63
Tabella 2.33: Coefficiente di estensione difetto per deformazioni di elementi orizzontali 63
Tabella 2.34: Coefficiente di estensione difetto per deformazioni di elementi verticali 63
Tabella 2.35: Coefficiente di estensione difetto per deformazioni 64
Tabella 2.36: Coefficiente di estensione difetto per rigonfiamento 64
Tabella 2.37: Coefficiente di estensione difetto per fessurazione – 1 65
Tabella 2.38: Coefficiente di estensione difetto per fessurazione – 2 65
Tabella 2.39: Coefficiente di estensione difetto per rottura di elemento o di parti di elemento non sostituibili singolarmente 66
Tabella 2.40: Coefficiente di estensione difetto per rottura di parti di elemento sostituibili singolarmente o di macroelementi 66
Tabella 2.41: Coefficiente di estensione difetto per difetti dell'acciaio 66
Tabella 2.42: Coefficiente di estensione difetto per bullonature mancanti 67
Tabella 2.43: Coefficiente di estensione difetto per scorrimento tra conci in archi e volte 67
Tabella 2.44: Coefficiente di estensione difetto per spostamenti alle imposte in archi e volte 68
Tabella 2.45: Coefficiente di estensione difetto per fessurazione in archi e volte 68
Tabella 2.46: Valori per coefficiente di importanza elemento r 69
Tabella 2.47: Livelli di difettosità dell'elemento 70
Tabella 2.48: Livelli di difettosità pesata dell'elemento 70
Tabella 2.49: Livelli di difettosità pesata dell'elemento e codice colore 72
Tabella 2.50: Schema riassuntivo indici 73
Tabella 2.51: Valori indice di difettosità pesata 73
Tabella 2.52: Verifica di coerenza per un indice di difettosità bassa 74
Tabella 2.53: Verifica di coerenza per un indice di difettosità media 74
Tabella 2.54: Verifica di coerenza per un indice di difettosità alta 75
Tabella 2.55: Verifica di coerenza per difettosità massima per ogni categoria 75

Tabella 2.56: Modello di scheda per l'ispezione 78
Tabella 2.57: Possibili combinazioni per la coppia $Dg; Dw$ 79
Tabella 2.58: Prescrizioni per le coppie $Dg; Dw$ 79
Tabella 3.1: Coefficienti di entità difetto per difetti dell'acciaio 93
Tabella 3.2: Coefficienti di estensione difetto per difetti dell'acciaio 93
Tabella 3.3: Nuovi valori del coefficiente di entità difetto per l'acciaio .. 95
Tabella 3.4: Nuovi coefficienti di estensione difetto per corrosione al terzo stadio 97
Tabella 3.5: Tempi e ratio di ispezione per Binario 1 e Binario 20 99
Tabella 3.6: Scala di integrità singolo elemento 101
Tabella 3.7: Scala di integrità pesata 101
Tabella 3.8: Indice VGR per Binario 1 valutato con indice di integrità pesata non pesata 102
Tabella 3.9: Livelli di integrità pesata dell'elemento e codice colore 102
Tabella 3.10: Binario 20. Confronto tra indici di integrità con diversa divisione macroelementi 104
Tabella 3.11: Risultati per il Binario 1 105
Tabella 3.12: Risultati per il Binario 1. Dettaglio pensilina 106
Tabella 3.13: Risultati per il Binario 1. Dettaglio pavimentazione 106
Tabella 3.14: Risultati per il Binario 1. Dettaglio pareti 106
Tabella 3.15: Risultati Binario 20 106
Tabella 3.16: Risultati Binario 20. Dettaglio pensilina 107
Tabella 3.17: Risultati Binario 20. Dettaglio pavimentazione 107
Tabella 3.18: Risultati Binario 20. Dettaglio pareti 107
Tabella 4.1:Cause ricorrenti per difetti riscontrati nei Binari 1 e 20 130

Premessa

Il presente elaborato è stato redatto con il supporto dell'Azienda Tecsa S.r.l., società di consulenza specialistica fondata da Carlo Fiorentini nel 1979, con sede a Pero Milanese. Tecsa S.r.l. è operante sia a livello nazionale che internazionale con lo scopo di fornire un supporto di consulenza nel campo della sicurezza, dell'antincendio, dei sistemi di gestione e dell'ingegneria forense con particolare attenzione alle aziende soggette all'applicazione delle direttive Seveso. Nel corso degli anni il mercato di riferimento a partire dal mondo della raffinazione e della petrolchimica si è esteso al settore militare, a quello dei trasporti e alle infrastrutture critiche tra cui porti, aeroporti e stazioni ferroviarie.

Direttore Esecutivo di Tecsa è Luca Fiorentini, ad oggi uno dei maggiori esperti italiani in materia di analisi del rischio, rischio di incendio e ingegneria antincendio orientata alla prestazione, riconosciuto dal Politecnico di Torino come esperto della materia "Codici e simulazione di eventi incidentali per la riconduzione della dinamica incidentale rispetto agli elementi probatori". Insieme a tutto il senior management, contribuisce alla condivisione del know-how nel campo della sicurezza e dell'attività di ricerca e sviluppo della società.

Il lavoro è stato svolto con il relatore aziendale, Andrea Respighi, Ingegnere Meccanico, ora project manager e analista di rischio in Tecsa. La

natura multidisciplinare di questa tesi ha fatto sì che la cooperazione di un Ing. Meccanico e un aspirante Ing. Civile fosse oltremodo fruttuosa.

Introduzione

Obiettivo dello studio

Il patrimonio architettonico italiano è anziano: oltre a edifici e infrastrutture di valenza storico artistica, comprende molti elementi edificati nel secondo dopoguerra e durante il boom economico degli anni '60.

Su molti edifici ci sono stati interventi successivi fatti con criteri che ora sappiamo avere conseguenze disastrose, senza immaginare o prevedere gli effetti e le interazioni tra vecchio e nuovo, molteplici piccoli interventi fatti senza avere una visione di insieme della struttura.

Sulla scia di incidenti e collassi strutturali, che hanno ormai sempre di più una notevole risonanza mediatica, per gli incalcolabili costi sia sotto il profilo economico che in termini di vite umane, è aumentata la consapevolezza riguardo i seguenti aspetti:

- le reti infrastrutturali sono a tutti gli effetti sistemi complessi, composti da bracci (strade, autostrade, ponti, viadotti) e nodi (stazioni ferroviarie, porti, aeroporti, ma anche punti di interesse come scuole, ospedali, industrie). Il collasso di un elemento di questo sistema può anche portare a interruzioni del servizio con conseguenti perdite economiche in periodi di tempo anche lunghi.
- la probabilità di accadimento non trascurabile dell'effetto *cascading failure*: il collasso di un ramo o nodo del sistema causa un sovraccarico negli altri rami e nodi. Se rami e nodi non sono progettati per il sovraccarico oppure non sono in buono stato di conservazione, tale sovraccarico può portare al loro collasso. Un evento di questo tipo

cascading failure può portare a conseguenze molto ampie e non sempre prevedibili.
- infrastrutture considerate "giovani" rispetto alla loro vita nominale, per effetto di errori di progettazione, errori di esecuzione e negligenze nella manutenzione, presentano un invecchiamento accelerato.
- il progredire delle tecnologie ha causato significativi cambiamenti nelle condizioni di esercizio, anche senza un cambio di destinazione d'uso: si pensi, per esempio, all'aumento avvenuto negli ultimi decenni non solo del traffico su mezzi pesanti ma anche delle masse da questi trasportate.

Sempre più spesso gli attuali amministratori del costruito hanno tra le mani strutture complesse, che hanno già subito interventi di varia entità e in cui altri ne servirebbero, ma con una possibilità di investimenti limitata. È divenuto quindi necessario pensare ad uno strumento che fornisca a tali amministratori indicazioni sullo stato di integrità e degrado della struttura, su quali siano gli interventi più urgenti e quali misure adottare per ridurre la probabilità di accadimento di incidenti rilevanti. Queste informazioni dovrebbero aiutare gli amministratori a indirizzare al meglio il capitale disponibile tra tutti gli interventi che sarebbero necessari. Al momento non esiste, nel variegato mondo delle costruzioni, uno strumento definito a tale scopo o delle pratiche consolidate generalizzate.

L'ambito industriale, di contro, può vantare 40 anni di esperienza in analisi del rischio negli impianti, con tecniche a livello di approfondimento crescente (metodo speditivi, metodi statistici, ecc.), in particolare per rischi legati all'invecchiamento dell'impianto stesso. Per gli impianti si è soliti parlare di invecchiamento o *aging*: con questo termine si intende un fenomeno dipendente dall'età del componente e dal numero di modifiche che lo stesso ha subito nel tempo in termini di deterioramento e/o danno subito (1). La problematica connessa all'aging degli impianti e delle apparecchiature è centrale in Italia e in Europa in generale in conseguenza del progressivo invecchiamento delle strutture industriali costruite in passato e ancora operanti.

In ambito civile, più che *invecchiamento* si usano i termini alterazione e degrado, riferiti ai materiali da costruzione. Con *alterazione* di un elemento

costruttivo si intende il processo di modificazione che non implica necessariamente un peggioramento delle sue caratteristiche sotto il profilo conservativo, come idrolisi, ossidazione, dissoluzione, per citarne alcuni. Il *degrado*, invece, è un processo di modificazione che porta un peggioramento delle caratteristiche sotto il profilo conservativo. In generale, la conservazione nel tempo delle caratteristiche fisiche e meccaniche di materiali e strutture è definita *durabilità*.

In generale, in ambito ingegneristico, si definisce *affidabilità* (o più di frequente *reliability*) l'attitudine di un componente o di un sistema a svolgere la funzione richiesta in determinate condizioni e per un dato intervallo di tempo (2).

Se l'invecchiamento di un'apparecchiatura è influenzato dai danneggiamenti, fermate impreviste e in generale eventi che ne causano stress, per le strutture il degrado e l'alterazione sono influenzati da fattori chimici-ambientali e meccanici. Questi fattori verranno approfonditi più avanti. Essere a conoscenza dei meccanismi di degrado presenti nella struttura è fondamentale per programmare in modo corretto e efficace gli interventi necessari.

L'obiettivo del presente studio è duplice: in primo luogo quello di estrapolare dal loro contesto le metodologie di analisi del rischio e dell'invecchiamento consolidate in ambito industriale per riadattarle e applicarle in ambito civile al fine di definire un metodo speditivo di analisi di edifici. Successivamente, sempre guardando all'esperienza dell'ambito industriale, si illustreranno le politiche di manutenzione in uso e gli sviluppi tecnologici di questi anni, con particolare attenzione all'ambito industriale, per adattarle a costruzioni esistenti.

Struttura della tesi

La tesi è divisa in due blocchi: la prima parte è interamente dedicata alla definizione del metodo speditivo di analisi di edifici civili. Il Capitolo 1 è uno studio bibliografico di lavori svolti e prassi già consolidate, anche prese in prestito dall'ambito industriale. Nel Capitolo 2 vengono descritti l'approccio e gli step che hanno portato alla definizione del metodo vero e proprio. Il Capitolo 3 è dedicato all'applicazione del metodo ad un caso studio, la

stazione di Porta Nuova a Torino, al fine di verificarne la coerenza con gli obiettivi e di scovarne le criticità.

Nella seconda parte della tesi si prosegue con uno sguardo più ampio sulle politiche di manutenzione e gestione del costruito. Nel Capitolo 4 si prendono in prestito le definizioni e i principi generali della manutenzione in ambito industriale per applicarli al mondo del costruito. Nel Capitolo 6 si prosegue l'applicazione al caso studio, presentando delle proposte di politiche di manutenzione per alcuni ambienti peculiari della stazione Torino Porta Nuova.

Capitolo 1

Metodi speditivi d'ispezione

1.1 Introduzione

Nel presente capitolo sono riportate le operazioni preliminari alla definizione del metodo d'ispezione: ricerca e documentazione su strumenti analoghi.

Dapprima si elencheranno le proprietà "ideali" di un metodo speditivo, che verranno tenute in conto come traccia in ogni step nella scrittura del metodo del presente studio.

Delle decine di metodi speditivi attualmente, ne sono stati selezionati alcuni, usati sia in ambito industriale che civile per diversi scopi, che presentano caratteristiche affini all'intento di questo studio. Questi saranno analizzati, al fine di individuare punti di forza e di debolezza, che saranno presi in esame durante la definizione dei criteri e requisiti che il metodo dovrà rispettare.

1.2 Perché un metodo speditivo

L'idea di definire un metodo speditivo nasce dall'esigenza di avere una visione di insieme sullo stato di conservazione di un bene, al fine di poter investire efficacemente in manutenzione e interventi le risorse economiche a disposizione. L'obbiettivo dunque è di raccogliere informazioni, non approfondite, sullo stato di degrado di edifici anche molto estesi o complessi.

Quest'operazione dev'essere abbastanza agevole da poter essere ripetuta a intervalli regolari.

Si pensa ad un metodo speditivo a indici, che abbia le seguenti caratteristiche:

- applicabilità in fase di ispezione;
- conducibilità da un ingegnere civile o edile o un tecnico specializzato del settore;
- proporzionalità delle misure: verranno assegnati valori numerici direttamente o inversamente proporzionali con la gravità della situazione riscontrata;
- chiarezza della valutazione ottenuta: il metodo sarà applicato da un tecnico specializzato, ma il risultato dovrà essere di forma intuitiva, in modo da essere intellegibile anche da proprietari e gestori che verosimilmente potrebbero non avere una preparazione ingegneristica approfondita. Inoltre, l'algoritmo del metodo deve essere definito in modo da non avere situazioni ambigue o non facilmente interpretabili;
- uniformità: il metodo dev'essere ripetibile ed evitare il più possibile valutazioni soggettive su questioni di dettaglio;
- rapidità: l'ingegnere o il tecnico non dovrà compiere misure approfondite, che se necessario verranno effettuate in un secondo momento, ma l'ispezione dovrà essere effettuabile anche più di una volta all'anno, senza essere troppo oneroso economicamente per il gestore, che potrebbe essere scoraggiato dai costi;
- prescrittivo: ai risultati delle valutazioni verranno associate delle prescrizioni e delle indicazioni su come approfondire il livello di conoscenza delle criticità;
- libertà di scelta: il metodo non dipende dal tipo di politica di gestione della struttura, pertanto il gestore sarà poi libero di scegliere le soluzioni tecniche e gestionali da adottare per risolvere le criticità.

Con l'applicazione al caso studio si verificherà se l'algoritmo proposto rispetterà questi prerequisiti.

1.3 Metodi speditivi di indagine

Un'indagine speditiva è un'analisi caratterizzata da facilità di impiego e rapidità di risposta. Di contro, le informazioni derivanti da indagini speditive hanno un basso livello di approfondimento e di precisione, hanno dunque un certo margine di incertezza. Per questo motivo, indagini speditive non escludono e non possono sostituire analisi più approfondite, ma anzi si configurano come operazioni preliminari, svolte al fine di rilevare anomalie o criticità, senza la pretesa di caratterizzarle e definirle nel dettaglio.

Come altri in questa tesi, anche "metodo speditivo" è una terminologia propria più dell'ambito industriale che di quello civile, dove parla invece di *schedature*. La schedatura, letteralmente "compilazione di una scheda", di un edificio consiste nella raccolta di informazioni essenziali sull'edificio stesso. Tali informazioni derivano da indagine documentale o da rilievo dell'opera. Le schede da compilare vengono redatte sulla base dello scopo che ci si prefigge (spesso verifica censimentale attuata da Enti amministrativi), ma tra le centinaia di schede utilizzate e reperibili in rete o in archivi cartacei, ci sono alcuni elementi ricorrenti come ubicazione, anno di edificazione, materiali, stile architettonico, ecc.

Tra le schedature pensate per scopo censimentale e di recupero si cita quella contenuta nel "Manuale di Buone Pratiche" per gli interventi di restauro conservativo degli edifici tradizionali, redatto all'interno del progetto AlpStone. Tale progetto ha come scopo il recupero dell'architettura tradizionale della Provincia del Verbano Cusio Ossola e del Canton Ticino e delle culture ad esso collegate. Una peculiarità è che la schedatura proposta è stata redatta avendo in mente uno strumento fruibile da utenti con basi culturali differenti e non per forza con una specifica formazione ingegneristica e per tale motivo può essere compilata anche dal proprietario del manufatto. Il patrimonio architettonico interessato da questo studio comprende non solo edifici, e questi sono soprattutto cascine, casere e alpeggi, ma anche infrastrutture quali vie di comunicazione storiche, opere di terrazzamento e confinamento, ecc.

Si cita anche lo strumento utilizzato all'interno della campagna di rilevamento di monumenti architettonici italiani del progetto *Evoluzione del*

sistema informativo territoriale Carta del Rischio del Patrimonio Culturale. In questo caso si è utilizzato la scheda di primo livello *A - Unità Edilizia Storica* dell'Istituto superiore per la conservazione e il restauro, con delle aggiunte basate sulla scheda sismica del progetto *Catastrofi naturali e loro conseguenze sul patrimonio culturale e ambientale italiano. Mitigazione e previsione di alcune tipologie di eventi*. La scheda A è composta da una prima sezione dedicata alle informazioni anagrafico-identificative del bene, e da una seconda che si concentra sullo stato di conservazione al fine di determinare il livello di vulnerabilità. Nella tabella di vulnerabilità, per ogni componente edilizia sono richieste: il livello di ispezionabilità e la presenza di danno. In presenza di quest'ultimo, questo viene caratterizzato descrivendo: tipologia di elemento danneggiato, la tecnica costruttiva, la tipologia di danno, l'estensione, la gravità, l'urgenza e l'intervento (3) .

I danni vengono classificati nelle seguenti tipologie proposte: disgregazione materiali, umidità, attacchi biologici, alterazioni strati superficiali, parti mancanti (4). Per l'intensità del danno invece vengono forniti i seguenti livelli:

- gravità: 1 – 2;
- estensione: 20%, 40%, 60%, 80%, 100%;
- grado di urgenza: 1 – 2 – 3.

Non è stato possibile trovare e verificare quali criteri vengano considerati per l'assegnazione dei livelli di intensità, in particolare per gravità e grado di urgenza, e se siano fornite delle indicazioni di tipo qualitativo o quantitativo. Questa distinzione è importante, perché influisce direttamente sull'uniformità delle valutazioni ottenute, quando applicate da persone diverse.

I due metodi citati sono esempi degli approcci e dei criteri usati nella pratica quando si deve dare una valutazione a degli edifici. Poiché lo scopo principale in questi casi è quello censimentale, si ha un livello di approfondimento minore rispetto a quello che stiamo cercando noi ora.

Si analizzano ora, più nel dettaglio, tre strumenti che offrono spunti di riflessione interessanti per questo studio.

1.3.1 Linee Guida Seveso

Si considera il metodo per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti "Seveso" proposto dal gruppo di lavoro coordinato dall'INAIL (5).

Per stabilimenti "Seveso" si intendono quegli stabilimenti che secondo il D.L. 105/2015 sono a rischio incidente rilevante dovuto alla presenza di sostanze classificate pericolose in quantità superiori ai limiti di soglia. Il disastro di Seveso del 1976 ebbe conseguenze e risonanza pubblica tali da portare all'emanazione di normative europee dedicate al censimento e al controllo di siti a rischio.

Nella direttiva 2012/18/UE o Seveso III, si è aggiunta la necessità, per questi siti, di gestire il rischio associato all'invecchiamento e alla corrosione degli impianti, soprattutto considerando lo scarso livello di rinnovo del patrimonio impiantistico europeo. Per invecchiamento s'intende non solo come età dell'apparecchiature, ma anche le modifiche subite in termini di deterioramento e danno. L'aumento dell'invecchiamento comporta una maggiore probabilità di accadimento di guasti nel tempo di servizio dell'apparecchiatura stessa.

La gestione del rischio racchiude l'insieme di attività per l'identificazione, la valutazione e la riduzione dei rischi. Lo strumento qui analizzato è stato proposto per la valutazione dell'idoneità di tutte le attività predisposte per il controllo dei processi di invecchiamento degli impianti.

Il metodo è speditivo a indici, basato su un'analisi di tipo fish-bone in cui vengono presi in considerazione elementi acceleranti e fattori frenanti nei confronti dell'invecchiamento degli impianti. Ad ognuno di questi viene assegnato un punteggio, rispettivamente di penalità e di compensazione.

In Figura 1.1 è riportato uno schema che riassume efficacemente il metodo. In rosso sono indicati i fattori acceleranti e i numeri su sfondo nero sono i relativi moduli per il calcolo delle penalità. In verde, invece, i fattori frenanti e su sfondo bianco i moduli per il calcolo delle relative compensazioni.

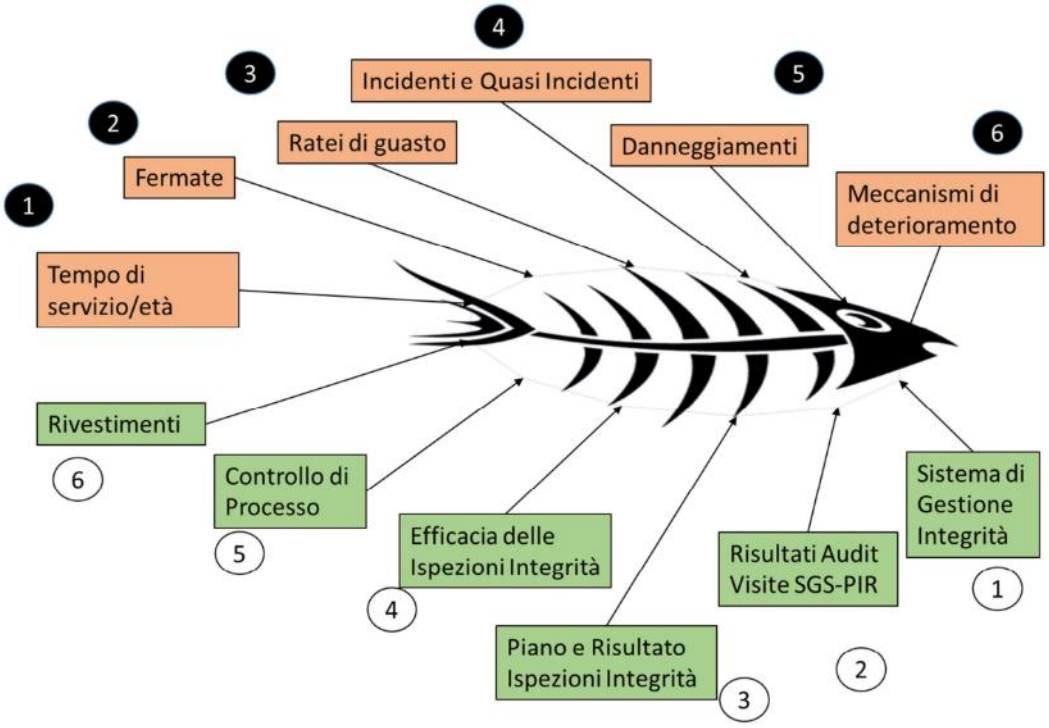

Figura 1.1: Modello fish-bone per valutazione sintetica invecchiamento per stabilimenti "Seveso"

I moduli sono, nella pratica, delle tabelle da compilare con i dati relativi alle apparecchiature e ai sistemi di monitoraggio dell'impianto in un periodo di osservazione di almeno 10 anni. Nelle Linee Guida vengono forniti i parametri e le istruzioni per la compilazione dei suddetti moduli, dai quali si ottiene un punteggio per ogni fattore, negativo per quelli acceleranti e positivo per i frenanti. I punteggi per ogni modulo variano, in valore assoluto, da 1 a 4. Per i fattori frenanti, maggiore è il punteggio ottenuto maggiore è la correttezza nelle procedure di gestione dell'invecchiamento. Al contrario, per i fattori acceleranti, all'aumentare del punteggio in valore assoluto aumentano le criticità nella gestione dei rischi.

Si noti che dei sei fattori frenanti, cinque sono riferiti alle politiche di gestione dell'impianto.

Dalla somma algebrica dei punteggi si ottiene l'indice compensato. L'indice compensato di segno positivo, ottenuto dunque in una situazione in cui le compensazioni superino le penalità, è segno di bontà delle prassi adottate, ma se fosse di segno negativo sarebbe necessario apportare migliorie e modifiche al sistema. L'informazione su quali ulteriori misure

compensative adottare per aumentare l'indice compensato è suggerita dai punteggi delle penalità più alti in valore assoluto, che indicano in quali fasi il sistema di gestione dell'invecchiamento necessita di un potenziamento.

Una perplessità che sorge nei confronti dell'algoritmo matematico è sul fatto che l'indice compensato può variare da -24 a +24 e l'unica discriminante sul risultato è il segno positivo. Non sono presenti ulteriori range di risultati con relative prescrizioni. Per esempio, per risultati di poco superiori allo zero, anche se la gestione dell'invecchiamento è positiva, comunque sarebbe bene intervenire per apportare delle migliorie.

Una criticità delle Linee Guida è che in esse non è specificato quale punteggio assegnare in caso di mancanza totale o parziale dei dati e neanche come renderlo in qualche modo evidente nella lettura dei risultati.

Si noti che per la definizione del modulo 3 "Ratei di guasto" si è potuto sfruttare la mole di dati raccolti negli ultimi decenni su casi realmente avvenuti e documentati. Purtroppo, nel mondo delle costruzioni, non sempre si può fare affidamento a banche dati così ricche.

1.3.2 "Inspection of public building based on risk assessment"

In questo studio, condotto presso l'Istituto di Ingegneria Strutturale e Riedificazione dell'Università di Riga, viene valutata la sicurezza di 7252 edifici pubblici di capienza superiore a 100 persone. L'idea di questo censimento nasce in seguito ad un crollo in un centro commerciale nel 2013 in cui persero la vita 54 persone. Rifacendosi anche al Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 marzo 2011, vengono presi in considerazione i seguenti requisiti per ogni edificio:

- resistenza meccanica e stabilità;
- sicurezza in caso di incendio;
- igiene, salute e ambiente;
- sicurezza e accessibilità;
- protezione dai rumori;
- efficienza energetica e mantenimento del calore;
- uso sostenibile di risorse naturali.

Tra questi, il primo requisito è affine allo scopo del metodo speditivo oggetto di questa tesi. Per verificare questo prerequisito viene effettuata una

ispezione visiva generale dell'edificio e i suoi locali, in particolare guardando le fondazioni, i muri perimetrali, le strutture portanti e le coperture. Si considera soddisfatto se vengono verificate le seguenti condizioni (6):

- le strutture portanti rispettano la capacità portante di progetto;
- le deformazioni sono mantenute entro limiti accettabili;
- assenza di collassi parziali;
- assenza di danni a impianti o giunti dovuti a deformazioni delle strutture portanti.

Ad ogni edificio viene assegnato un fattore di rischio (che può variare da 1 a 3) per ogni requisito, ma le indicazioni date per assegnare tale fattore sono qualitative. Si riporta a titolo d'esempio, la tabella dei fattori di rischio per la resistenza meccanica e stabilità dell'edificio (6).

Fattore di rischio	Risultato dell'ispezione
RF1	Sono state identificate lievi violazioni dei requisiti di resistenza meccanica e stabilità che non comportano rischi significativi per la salute e / o la vita o l'ambiente degli utenti dell'edificio
RF2	Sono state identificate violazioni dei requisiti di resistenza meccanica e stabilità che rappresentano un rischio significativo per la salute e / o la vita o l'ambiente degli utenti dell'edificio
RF3	Tali violazioni dei requisiti di resistenza meccanica e stabilità sono state identificate e costituiscono un rischio inammissibile per la salute e / o la vita o l'ambiente degli utenti dell'edificio

Tabella 1.1: Fattori di rischio per resistenza meccanica e stabilità dell'edificio [tradotta da (6)]

Il fattore di rischio viene combinato con la categoria dell'edificio per ottenere una valutazione finale compresa tra 1 (Buone condizioni/sicuro) e 3 (Condizioni pericolose/ non sicuro). Un aspetto notevole di questo studio è che i risultati vengono riportati su una mappa disponibile online, quindi accessibile per tutti. Probabilmente proprio per questo motivo, la valutazione finale è tradotta in un codice colore di facile intuizione [1 = verde; 2 = giallo; 3 = rosso].

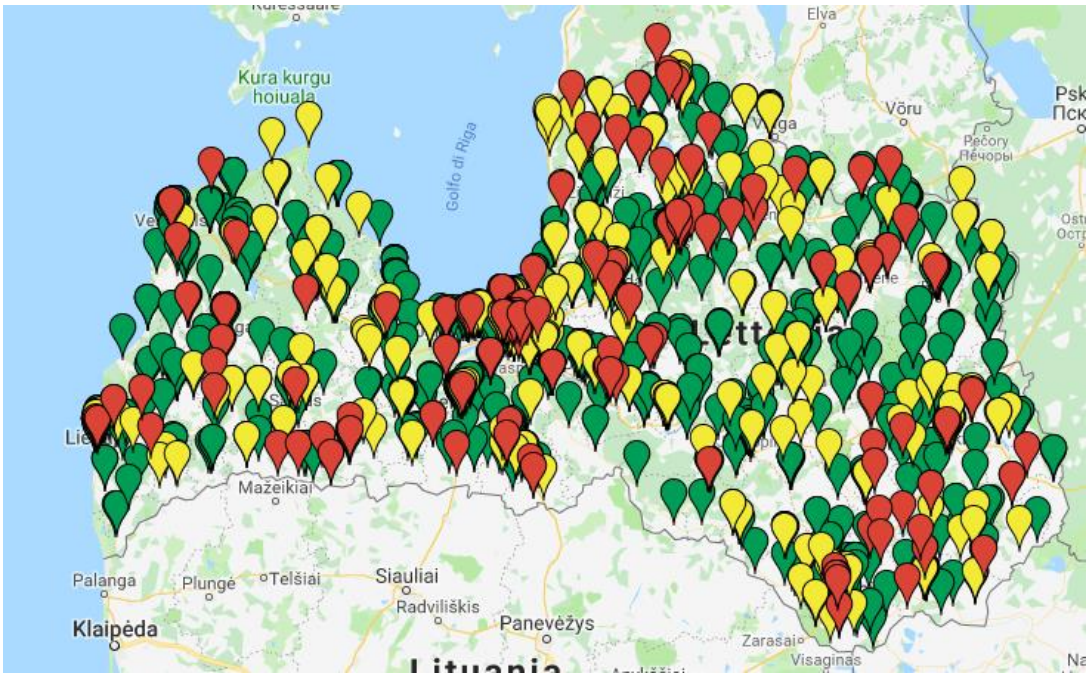

Figura 1.2: Mappa interattiva riportante i risultati del risk assessment dello studio "Inspection of public buildings based on risk assessment

1.3.3 Certificato di Idoneità Statica

La procedura con le finalità più simili a quelle di questa tesi è il Certificato di Idoneità Statica. Si tratta di un certificato richiesto dal Regolamento Edilizio del Comune di Milano del 26 Novembre 2014 a tutti i proprietari di fabbricati con più di 50 anni non in possesso del certificato di collaudo statico. Tale certificato deve essere acquisito entro 5 anni dall'emanazione del Regolamento, pena l'inagibilità dell'edificio o delle parti non certificate. Al momento dell'emanazione del regolamento era l'unico provvedimento del genere in tutta Italia.

Le indagini sull'immobile hanno due livelli di approfondimento: se il primo livello, basato su un'analisi qualitativa del fabbricato, viene soddisfatto, il certificato è rilasciato. Il secondo livello viene attivato solo nel caso in cui l'esame di primo livello non abbia risultato positivo e comporta indagini più approfondite, con costi di esecuzione anche notevoli.

Lo studio parte da un'analisi storico critica dell'edificio, contenente documentazione di progetto, la ricostruzione storica di eventi eccezionali o modifiche al progetto, l'intervista all'amministazione o ai proprietari, eventuale Certificato Prevenzione Incendi emesso dai Vigili del Fuoco, pratiche edilizie varie.

La seconda fase è la definizione dell'organismo strutturale primario, con indicazione dello schema statico, della tipologia di struttura portante, le dimensioni generali, la verifica della congruità dei carichi con la destinazione d'uso, la verifica di presenza di interventi di cui non si sia riscontrata documentazione, la presenza di strutture non portanti connesse alle primarie e la descrizione delle fondazioni basata sulla documentazione disponibile. Successivamente si chiede di analizzare l'interazione con l'ambiente circostante e le condizioni al contorno (altri fabbricati, presenza di falda, scavi, ecc....).

Infine, nei sopralluoghi interni ed esterni, si esamina lo stato di integrità di strutture portanti e non, coperture, scale, controsoffittature, impianti e anche di qualsiasi elemento che possa costituire un pericolo per la sicurezza come elementi in quota non vincolati.

Durante il sopralluogo, vengono presi in considerazione i seguenti aspetti:

- presenza di segnali di sofferenza;
- presenza di interventi di modifica dell'organismo strutturale;
- presenza di pericolo esterno;
- presenza di elementi accessori a rischio.

"Ai fini dell'attuazione delle verifiche di primo livello, la Proprietà/Amministratore provvederà preliminarmente alla nomina di un "Tecnico Abilitato" nella persona di un soggetto cui sia giuridicamente consentito svolgere collaudi statici" (7). Tale requisito è soddisfatto per ingegneri o architetti iscritti all'Albo da più di 10 anni che non sia intervenuto in alcun modo nella progettazione, direzione ed esecuzione dell'opera o di interventi successivi.

Per la verifica di idoneità statica vengono assegnati gli elementi da analizzare e i parametri su cui il Tecnico Abilitato deve basare la propria ispezione, come la presenza di lesioni, fessure o crepe. Il Tecnico Abilitato rilascia una relazione contenente giudizi qualitativi sullo stato di conservazione (insufficiente, scarso, sufficiente, buono). Dunque, per l'emissione del certificato non vengono forniti parametri precisi o soglie numeriche, piuttosto ci si rimette al giudizio dell'ingegnere, il che spiega il

requisito sul Tecnico Abilitato. Tuttavia, la durata dell'iscrizione all'albo del professionista non è garanzia di esperienza, preparazione e aggiornamento nel settore.

Ormai a ridosso della scadenza dei 5 anni, che avverrà il 26 novembre 2019, solo per 300 edifici su 25'000 il Certificato di Idoneità Statica è stato presentato e metà di questi presenta criticità di diversa natura (8). Una delle difficoltà riscontrate è quella dei costi di esecuzione delle indagini: gli edifici che rientrano in questo regolamento sono spesso appartenenti a privati. Costituisce in diversi casi un vero e proprio impedimento all'emanazione del certificato il reperimento di tutti gli atti di fabbrica degli edifici, dei passaggi di proprietà e il complesso di tutti gli interventi eseguiti successivamente alla originaria costruzione.

1.4 Lezioni apprese e problemi da superare

Analizzando le schedature riportate è evidente come queste siano lontane dallo strumento con i requisiti fissati soprattutto perché hanno scopi diversi: se questo è censire un grande numero di edifici, al fine di creare o aggiornare banche dati, la schedatura non può, per ovvie ragioni, avere un livello di approfondimento troppo alto. Lo scopo di questo strumento, invece, è più vicino ad un "censimento" di ogni elemento strutturale e non presente in un edificio.

Pregevole l'intenzione del progetto AlpStone di avere uno strumento flessibile, nel senso di poter essere adattabile a manufatti molto diversi fra loro, se non addirittura "unici". Sicuramente sarà da tenere in conto un modo di comportarsi quando ci si trova davanti ad un tipo di struttura, elemento o materiale non ancora incluso nel metodo, di modo che esso possa essere ampliabile e estendibile.

La valutazione sintetica dell'invecchiamento delle Linee Guida Seveso presenta alcuni limiti che minano i vantaggi di adottare un metodo speditivo (9). Si elencano di seguito quelli ritenuti attinenti al metodo speditivo oggetto di questo studio e che saranno da tenere in considerazione nel corso della definizione:

- nelle Linee Guida viene spiegato che la positività dell'indice compensato indica la bontà delle prassi di gestione in uso nello

stabilimento e che per indice compensato negativo il sistema deve essere migliorato, con il suggerimento di apportare modifiche nei moduli con punteggio minore. Non vengono fornite ulteriori soglie per valori superiori allo 0 e relative prescrizioni su misure aggiuntive da adottare. Quindi allo stato attuale un indice compensato di poco maggiore di zero viene trattato alla stregua di un indice compensato molto maggiore di zero;

- non vengono fornite indicazioni su come l'analista si debba comportare nel momento in cui ci fossero lacune nei dati a disposizione. In questo caso analisti più cautelativi potrebbero assegnare arbitrariamente un punteggio negativo, altri potrebbero preferire un punteggio neutro. In questo modo viene meno la ripetibilità del metodo. Nel caso di una struttura, la situazione equivalente è la non ispezionabilità di alcuni elementi in quota non facilmente raggiungibili, in cui l'osservazione ad occhio nudo può essere fallace;
- non ci sono pesi correttivi per i fattori, quindi essi hanno tutti la stessa rilevanza all'interno dell'indice compensato. Allo stesso modo, non sono presenti pesi correttivi che tengano in conto la magnitudo delle conseguenze del guasto di una specifica apparecchiatura. Se si valuta l'invecchiamento e se le conseguenze di invecchiamento sono guasti, si potrebbe assegnare un peso differente alle diverse apparecchiature sulla base delle conseguenze dei guasti.

Nello studio condotto dall'università di Riga, è stato scelto di rendere disponibili i risultati online, e quindi è stato pensato di riportare su mappa i risultati usando un codice semaforico di immediata comprensione. Questo tipo di comunicazione è estremamente efficace e verrà tenuto in considerazione in fase di elaborazione dei risultati del metodo speditivo.

Invece, la valutazione di un così alto numero di requisiti per l'edificio porta necessariamente ad un livello di approfondimento più basso di quanto si vuole ottenere in questo studio. Quindi, per quanto la tentazione di risolvere ogni problema sia sempre forte in un ingegnere è bene ricordarsi di

non allontanarsi troppo da quanto si vuole ottenere e di non aggiungere troppa "carne al fuoco". Seguiamo un solo obiettivo, ma un pelo più approfondito. Probabilmente sempre per ragioni collegate alla varietà di requisiti da verificare, i parametri forniti per l'assegnazione dei fattori di rischio sono qualitativi e non quantitativi.

Anche per il Certificato di Idoneità Statica le indicazioni per la valutazione della sicurezza sono qualitative. Questo costituisce un limite al metodo perché se applicato alla medesima struttura in uno stesso momento, ma da tecnici diversi si potrebbero ottenere risultati diversi fra loro. Anche se applicato a strutture diverse, i risultati non sarebbero confrontabili perché le ispezioni sono state effettuate da persone diverse. Si cercherà, dunque, di superare la soggettività tipica dei metodi speditivi basati su parametri e valutazioni qualitativi.

Una grossa criticità del Certificato di Idoneità statica è l'impossibilità, riscontrata nella pratica, di ricostruire lo storico documentale e amministrativo dell'edificio. In particolare, costituisce un requisito vincolante per l'emanazione del Certificato stesso. Non si mette in dubbio l'importanza della documentazione riguardo la costruzione originaria e gli interventi successivi, perché se l'ingegnere conosce la struttura, i materiali e il comportamento strutturale, può condurre un'ispezione più efficace. Nella realtà dei fatti, però, molti progetti, un tempo presso il genio civile, sono ora presso i Comuni e gli archivi sono dislocati su diversi luoghi. Il reperimento della documentazione è molto lungo e oneroso e, di fatto, le indagini dei professionisti si arenano a questo punto, prima ancora del sopralluogo.

Siccome bisogna tener conto delle reali condizioni con cui si dovrà in seguito lavorare, fare affidamento su documenti che sono di fatto introvabili sarebbe sintomo di un ottimismo ai limiti dell'ingenuità. Si terrà dunque in contro, nella stesura del metodo, della possibilità che l'ingegnere sia nella condizione di dover effettuare il sopralluogo senza aver avuto la possibilità di consultare una documentazione approfondita.

1.5 Conclusioni

Visti e considerati i punti di forza e debolezza dei metodi descritti, il metodo speditivo oggetto di questo studio, oltre ai prerequisiti già menzionati

in 1.2, sarà applicabile anche con una documentazione storica e progettuale scarsa; avrà indicazioni per la valutazione dei punteggi quantitative e numerabili, al fine di rendere oggettivi e confrontabili i risultati. Nel calcolo dell'indice, si dovrà tenere in conto delle conseguenze di guasti e rotture degli elementi.

Avendo come focus ultimo la sicurezza degli utenti, le masse appese e gli elementi in quota costituiranno una categoria a sé stante. Al fine di facilitare il compito dei decisori, il dominio di valori dell'indice complessivo sarà diviso in range, ognuno con delle prescrizioni. Infine, i risultati saranno presentati con un codice colore di facile interpretazione.

Capitolo 2

Definizione del metodo

2.1 Introduzione

La stesura di un metodo d'ispezione speditivo che rispetti i prerequisiti fissati nel Capitolo 1 è un processo non elementare, in cui è concreta la possibilità di allontanarsi dallo scopo prefisso o di tralasciare inavvertitamente qualche caratteristica.

Nel capitolo che segue verranno descritti i passi che hanno portato alla stesura del metodo: a partire dagli elementi da osservare durante l'indagine, ai segni da cercare su essi, definiti con un approccio causa-effetto. Seguono i ragionamenti fatti per articolare l'algoritmo che soggiace l'indice: i parametri scelti, le relative soglie e punteggi. Vengono, infine, proposti cinque diversi indici, la cui efficacia verrà testata all'interno del Capitolo 3, con il caso studio.

2.2 Definizione elementi oggetto di indagine

In un metodo speditivo da applicarsi durante una ispezione occorre innanzitutto definire le unità logiche del sistema e gli elementi da analizzare. Riprendendo uno degli scopi fissati, ossia la sicurezza delle persone, il primo criterio usato per la definizione e la categorizzazione degli elementi oggetto di

indagine è l'influenza che questi hanno in termini di sicurezza. Si distinguono, quindi, i seguenti casi:

- sicurezza legata alla stabilità complessiva dell'edificio;
- sicurezza legata a elementi non portanti;
- sicurezza legata all'interazione con impianti e utenze.

Per ogni caso si individuano i sistemi coinvolti; per sistema si intende l'insieme strutturato di elementi aventi medesima funzione. I sistemi vengono suddivisi nei sottosistemi, e per ognuno di questi si individuano le unità tecnologiche e infine l'elemento ultimo.

Nell'analisi della sicurezza legata alla stabilità complessiva dell'edificio si esamina il sistema strutturale, il quale è diviso nei sottosistemi: fondazioni, strutture verticali, strutture orizzontali, archi e volte. Il sottosistema fondazioni ha come unità tecnologiche le fondazioni dirette e le fondazioni speciali. Nel primo caso gli elementi sono: cordoli continui in cemento armato, travi rovesce in cemento armato, plinti in cemento armato, e così via. Nel secondo caso gli elementi sono: fondazioni in pali di legno, fondazioni in pali di acciaio o cemento armato, micropali, ecc…

Negli elementi verticali rientrano le murature portanti (in cemento armato, in laterizio e in tutti i vari materiali) e i pilastri (in cemento armato, in acciaio) i controventi in acciaio. Nelle strutture orizzontali si considerano le travi (cemento armato, acciaio, composite, legno) e i solai, con tutte le loro classificazioni in base al materiale e al comportamento. Rientrano negli elementi verticali anche i collegamenti, ossia i diversi tipi di scale.

L'analisi legata a elementi non portanti comprende il sistema dei divisori e il sistema estetico. Nel sistema dei divisori si distinguono i sottosistemi dei divisori interni (comprendenti elementi quali partizioni fisse e smontabili, divisori, porte e telai) e divisori verso l'esterno (sono inclusi elementi come muri esterni, parapetti, ringhiere, porte esterne). Nel sistema estetico rientrano il sottosistema delle finiture e quello degli elementi di arredo. Nelle finiture sono inclusi, tra le varie cose: intonaci, tinteggiature, infissi, pavimentazioni e coperture. Negli elementi di arredo si considerano: segnaletica, cartellonistica, panchine, dissuasori esterni.

Nella sicurezza legata all'interazione con impianti e utenze sono coinvolti tutti i sistemi tecnologici: impianti gas, impianti idrici sanitari, impianti di climatizzazione, impianti di telecomunicazione, impianti di sollevamento, impianti di sicurezza, impianti elettrici. Gli impianti vengono per la quasi totalità esclusi da questo studio perché si espanderebbe troppo il campo di ricerca, ma soprattutto il loro funzionamento non è di stretta competenza di un ingegnere civile. Si ricorda che gli impianti, secondo l'art. 7 del decreto 22 gennaio 2008, n 37, devono avere una dichiarazione di conformità rilasciata al termine dell'installazione e in seguito a rifacimenti parziali. Se l'ingegnere volesse svolgere un lavoro più completo sulla struttura, può considerare le dichiarazioni di conformità per comprovare l'età dell'impianto e eventualmente suggerire una revisione se questi dovessero essere vetusti. In virtù di quanto detto, per non disperdere le energie, rischiando al tempo stesso di svolgere uno studio superficiale, degli impianti si considerano solo le parti con cui potrebbe interagire l'utente, ad esclusione degli impianti idrici sanitari. Si considerano, dunque:

- impianti di sollevamento di persone o cose: ascensori, montacarichi, scale mobili;
- porte scorrevoli;
- prese elettriche;
- corpi illuminanti: considerati perché sono elementi in quota;
- monitor e impianti audio: considerati poiché elementi appesi.

Non si considerano elementi di arredo quali distributori di cibi e bevande e simili.

Ricordando che il metodo vuole essere speditivo e quindi l'ispezione non deve essere troppo lunga, si sceglie di limitare il livello di approfondimento con cui si analizzano le unità e gli elementi. Per esempio, nel caso dell'unità tecnologica "soffittatura", gli elementi tecnici sono, a rigore, i singoli pannelli e la griglia. In questo caso considerare ogni pannello distintamente comporterebbe un dispendio di tempo e energie eccessivo. L'ingegnere, dunque, valuterà lo stato di degrado della soffittatura nel suo insieme. Nel caso in cui la soffittatura avesse un'estensione troppo ampia, c'è la possibilità che difetti gravi localizzati non abbiano la giusta attenzione. In questo caso, sarebbe meglio suddividere il macro-elemento soffittatura in sub-elementi.

Se sono presenti giunti o moduli ricorrenti, possono essere considerati per definire i sub-elementi. Lo stesso ragionamento viene applicato anche nel caso di pavimentazioni e coperture, e simili. Questa problematica viene ripresa nel paragrafo 3.4.4 dove, all'interno del caso studio, si studiano gli effetti sulla valutazione globale di una suddivisione più fine o più grossolana dei macroelementi.

Si riporta uno schema riassuntivo dell'organizzazione funzionale degli elementi. Per brevità, sono riportati solo alcuni elementi a titolo di esempio e non viene indicata l'unità tecnologica.

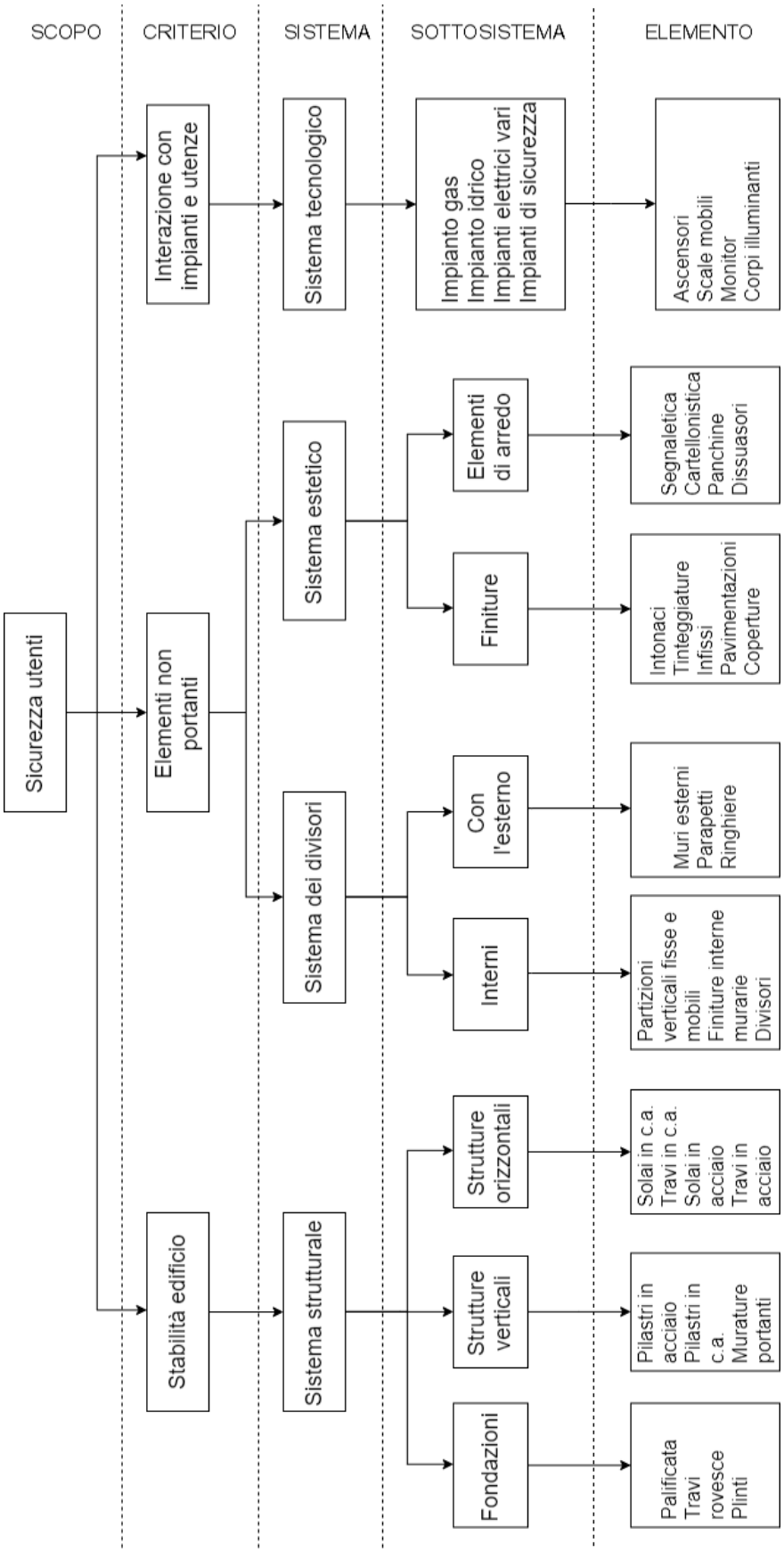

Figura 2.1: Classificazione elementi oggetto di indagine

2.3 Approccio FMEA

Una volta definiti gli elementi da cercare, vista la potenziale vastità dei sintomi e dei segnali di degrado da ricercare in fase di ispezione, si è scelto di applicare una procedura consolidata in ambito industriale, ossia un'analisi dei modi e degli effetti dei guasti o, in inglese, *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA).

2.3.1 L'analisi FMEA

La FMEA è un metodo di analisi di rischio di tipo semi-quantitativo usata per individuare le cause dei guasti e le loro conseguenze, usato per processi, prodotti o sistemi.

Venne introdotta nel 1945 in alcune procedure militari statunitensi per condurre le analisi di affidabilità allo scopo di valutare gli effetti dei malfunzionamenti dei componenti sui sistemi. I guasti venivano classificati in base al loro impatto sul successo della missione e della sicurezza degli oggetti e delle persone. Negli anni '60, la NASA ne fece ampio uso per lo studio, messa a punto e realizzazione delle missioni spaziali Apollo. Celebre è anche l'applicazione al caso della Ford Plinto, detta ai tempi l'"Auto Assassina", poiché presentava dei difetti nel serbatoio che ne causavano la rottura anche in caso di incidenti a bassa velocità e la fuoriuscita della benzina portava frequentemente a incendi.

Oggigiorno, il metodo è applicato in diversi ambiti, tra cui aeronautica, automotive, elettronica e in generale nell'industria manufatturiera, sia nella progettazione di prodotti (*Design FMEA*) che nei processi (*Process FMEA*).
La tecnica ha tre principali obiettivi (10):

- riconoscere i potenziali difetti di un prodotto o processo e valutare i relativi effetti;
- identificare le azioni correttive che possano eliminare i potenziali guasti, ridurne la probabilità di accadimento o il rischio;
- creare una documentazione del processo di identificazione, valutazione e attività correttive per migliorare continuamente la qualità del processo o del prodotto.

I principi su cui si basa il metodo, da cui si trae ispirazione a più riprese nel corso di questo studio, sono tre. Come diceva il quality manager P. B. Crosby, la strategia più efficace per risolvere problemi complessi consiste nel dividerli in problemi più semplici e risolverli separatamente. Nell'analisi FMEA, processi e progettazioni lunghe ed elaborate vengono scomposti nei loro step basilari e queste vengono analizzate singolarmente. Il secondo principio è che una catena si spezza nel suo anello più debole: nelle prime fasi dell'analisi vengono individuati gli "anelli deboli" per sapere dove sarà necessario potenziare o concentrare gli interventi. Infine, si applica il principio di Pareto, detto anche "legge 80/20", secondo il quale il 20% delle cause provoca l'80% degli effetti: durante l'analisi, di frequente si trovano delle cause di guasto ricorrenti. Individuandole, si potrà studiare come fare pochi interventi, ma mirati ed efficaci, che impattano su più modalità di guasto, invece di diversi interventi minori poco impattanti.

La FMEA fornisce un metodo per esaminare sistematicamente tutti i modi in cui un guasto può presentarsi. Per ogni tipo di guasto è possibile stimare:

- l'effetto del guasto sul sistema;
- la probabilità che il guasto si presenti;
- i possibili mezzi per rilevare un guasto.

L'approccio è di tipo bottom-up: si parte con l'unità più semplice del sistema (o prodotto o servizio o processo) e uno dei suoi guasti per progressivamente arrivare a livelli più complessi.

Prima di cominciare un'analisi FMEA occorre svolgere alcune operazioni preliminari. Innanzitutto, l'obiettivo deve essere ben definito, per evitare di distrarsi con aspetti secondari del sistema o prodotto. Sulla base dell'obiettivo definito, è utile raccogliere il maggior numero possibile di documenti, quali specifiche e disegni di progetto, manuali, registri di manutenzione, allo scopo di avere tutte le informazioni a portata di mano. Successivamente, si scompone il sistema in sottosistemi o elementi più piccoli, tenendo a mente che avendo elementi troppo piccoli, l'analisi perde la visione di insieme e comporta un investimento molto alto in termini di risorse e che elementi troppo grandi possono indurre confusioni e potrebbero essere difficili da gestire. Questa tematica è già emersa nel Paragrafo 2.2 nella definizione degli elementi oggetto di indagine. In ultimo, stilare un elenco delle potenziali

modalità e cause di guasto notoriamente ricorrenti, può essere una buona base da cui partire.

A questo punto può iniziare l'analisi vera e propria: per ogni elemento o *item* vengono eseguiti i seguenti step (10):

1. definire l'item analizzato;
2. definire la funzione dell'item analizzato;
3. identificare tutti i potenziali modi di guasto dell'item;
4. determinare le cause per ogni potenziale modo di guasto;
5. identificare gli effetti di ogni potenziale modo di guasto, senza tenere in considerazione i dispositivi e le misure di sicurezza attualmente impiegati nel sistema;
6. identificare e elencare i dispositivi e le misure di sicurezza già impiegati nel sistema per ogni potenziale modo di guasto;
7. determinare le azioni e raccomandazioni, sia preventive che correttive, più appropriate, basandosi sull'analisi dei rischi.

Dopo aver esaminato tutti gli elementi, si assegna ad ogni modalità di guasto un punteggio da 1 a 10 per ognuno dei seguenti fattori:

- *Severity* (gravità) ossia la "seriousness" degli effetti del guasto, basata sul peggior effetto possibile, dove 1 sta per nessun effetto e 10 per effetto molto pericoloso e senza preavviso;
- *Occurrence* (probabilità) cioè la frequenza di accadimento del guasto, dove 1 indica una probabilità remota o guasto improbabile e 10 una probabilità molto alta o guasto quasi inevitabile;
- *Detection* (rilevamento) la capacità di identificare il guasto prima che raggiunga l'utente finale o il cliente, dove 1 sta per identificazione quasi certa e 10 per guasto assolutamente impossibile da identificare.

Con questi tre fattori si determina il *Risk Priority Number* (numero di rischio prioritario), abbreviato RPN, nel seguente modo:

$$RPN = Severity \cdot Occurrence \cdot Detection$$

L'RPN viene calcolato con le condizioni iniziali e successivamente tenendo in considerazione le misure e i dispositivi di sicurezza in uso. Essendo i fattori S, O, D espressi con valori compresi tra 1 e 10, RPN avrà un valore compreso tra

1 e 1000. L'RPN è una stima del rischio associato ad un guasto e viene usato per dare priorità ai potenziali meccanismi di guasto per assegnare le risorse, che sono sempre limitate, agli item con rischio più elevato. Il tipo di intervento o misura correttiva da applicare è suggerito dagli stessi fattori. Gli interventi più efficaci saranno quelli che impatteranno sul maggiore tra S, O e D. Per esempio, se fosse S il fattore maggiore, si dovrà intervenire in modo da mitigare o frenare i meccanismi di guasto; se fosse O sarebbero necessari interventi per ridurre le frequenze di accadimento; infine se fosse D occorrerebbe agire sulle misure di controllo.

Si riporta, a titolo di esempio, uno dei tanti modelli di tabella usati per analisi FMEA:

Item	**Funzione**	**Modo di guasto**	**S**	**O**	**D**	**RPN iniziale**	**Misure correttive**	**S**	**O**	**D**	**RPN corretto**

Tabella 2.1 Template per analisi FMEA

In ambito industriale e aziendale l'analisi viene condotta da un team multidisciplinare che comprende le figure professionali coinvolte nel sistema o processo in diversi momenti e livelli. Non è stato possibile radunare un team per l'applicazione a questo studio, ma l'analisi è stata fatta mantenendo la filosofia, ossia immedesimandosi in diversi ruoli: operaio, ingegnere, gestore, utente.

L'analisi FMEA meriterebbe certo un maggiore spazio di approfondimento, tuttavia ci si è limitato a riportare quegli aspetti che sono stati estrapolati e riadattati all'interno del presente studio.

Si può riassumere la procedura FMEA con lo schema riportato nella pagina successiva.

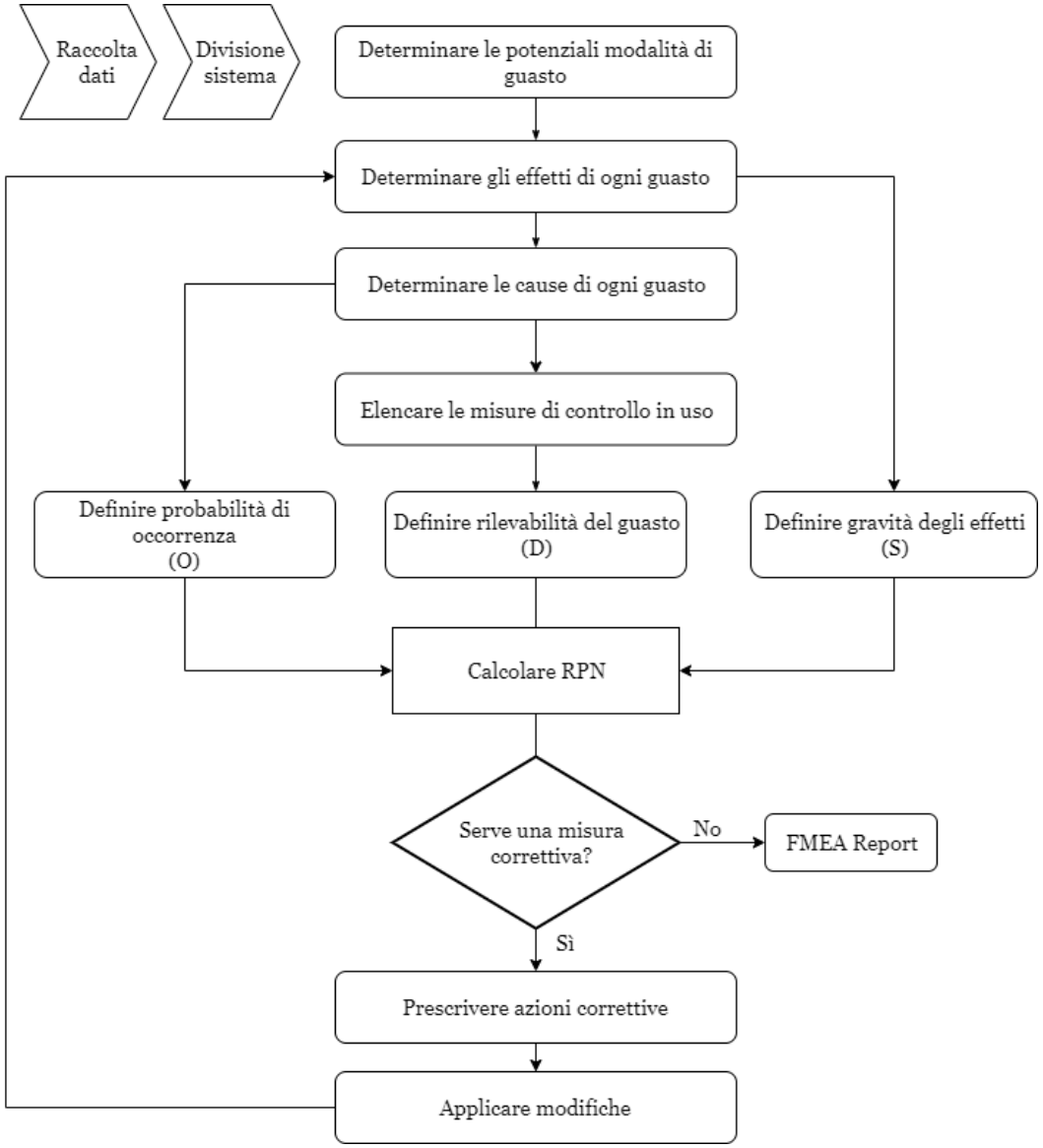

Figura 2.2: Fasi FMEA, schema tradotto e adattato da Wang, 2003.

2.3.2 Applicazione

L'analisi FMEA è già stata applicata all'ambito delle costruzioni, in particolare nelle fasi di progettazione e realizzazione (11) per strutture ordinarie e grattacieli (12), ma anche per valutare il ciclo-vita e durabilità di un edificio (13). Più spesso, viene applicata alle fasi di costruzione di un edificio, con l'intento di prevedere problemi che possano sorgere in cantiere e fornire le informazioni necessarie per la gestione del progetto stesso.

Un prerequisito necessario per un efficace uso dell'analisi FMEA è un sufficiente livello di conoscenza del sistema a cui è applicata. Nel mondo delle

costruzioni, il tasto dolente spesso è proprio la corretta gestione delle informazioni. Come emerso negli studi esaminati nel Capitolo 1, è più facile fare una valutazione qualitativa del rischio, poiché la numerosità e varietà dei fattori che influenzano il sistema scoraggia l'uso di misurazioni quantitative. Questi fattori non solo possono variare da progetto a progetto (si pensi per esempio alle diverse condizioni di un edificio in alta montagna rispetto ad uno vicino al mare) ma spesso questi sono interconnessi e le dipendenze non sono sempre lineari.

Inoltre, l'applicazione di un'analisi FMEA agli edifici, diversamente dall'ambito industriale, deve tenere necessariamente in conto fattori di rischio ambientali e organizzativi oltre quelli tecnici, in particolare nelle fasi di progettazione e realizzazione (11).

In virtù di queste considerazioni, l'applicazione FMEA in questo caso non può e non ambisce ad essere completa ed esaustiva come lo sarebbe se fosse applicata ad uno specifico edificio esistente o cantiere. Si ricorda, dunque, al lettore che l'analisi FMEA viene presa come spunto per l'approccio nella determinazione degli elementi da cercare in fase di ispezione e non verrà calcolato il RPN. Cionondimeno, nella stesura del metodo si terrà conto del fatto che ci si potrebbe imbattere in fattori non contemplati in questo studio.

Ricordando le fasi precedentemente descritte, lo step iniziale di scomposizione del sistema in sottosistemi e unità minori coerentemente con la loro funzione, è già stato svolto nel paragrafo 2.2.

Nel caso di edifici possiamo trasporre il termine *guasto* abitualmente usato in ambito industriale, con il termine *rottura*. Se nei processi produttivi i potenziali guasti sono, più frequentemente: impossibilità nell'apertura o chiusura, rottura fragile, fessurazione, deformazione, mancanza di materiale, elemento troppo piccolo o troppo grande (10), nell'ingegneria civile i potenziali metodi di rottura e meccanismi di degrado sono:

- rottura per flessione;
- rottura per torsione;
- rottura per sforzo normale eccessivo;
- rottura per punzonamento;
- dilatazione termica;
- gelività;

- attacco chimico: carbonatazione, ossidazione, solfatazione, argillificazione, attacco da cloruri.

Ricordando l'utilità di stilare una lista preliminare di cause di guasto ricorrenti, da tenere come riferimento, esse sono:

- errori di progettazione;
- difetti nel materiale;
- errori in cantiere, posa in opera ed esecuzione lavori;
- sollecitazioni dovute a carico eccessivo: carichi concentrati, cambio di destinazione d'uso, uso improprio;
- cause naturali: condizioni metereologiche e climatiche, umidità, disastri;
- cause antropiche: incendi, incidenti, urti, inquinamento.

Si riportano i risultati di analisi FMEA condotta sugli elementi definiti in 2.2. Oltre alla divisione per funzione, si sono considerati anche casi più generali relativi ai materiali utilizzati.

Per il sistema strutturale, sottosistema strutture verticali portanti, sono stati identificati i seguenti modi di guasto, con relative cause ed effetti:

	Elemento	**Modo di guasto**	**Causa di guasto**	**Effetti**
Strutture verticali portanti	Pilastro in cemento armato	Schiacciamento	Pilastro o staffatura sottodimensionato per carichi verticali	Lesioni verticali e spanciamento Apertura delle staffature e distacco del copriferro
		Rottura per flessione	Pilastro sottodimensionato per forze verticali eccentriche	Fessure orizzontali nel pilastro da un solo lato
	Pilastro in acciaio	Instabilità	Elemento troppo snello per carichi verticali cui è soggetto	Deformazione dell'asse verticale
	Murature portanti	Rottura della continuità strutturale	Cedimento differenziale fondazioni; cedimento architrave	Lesioni variamente inclinate
				Distacchi o rigonfiamenti di intonaci

Tabella 2.2: FMEA per strutture verticali

Per quanto riguarda il sistema delle strutture orizzontali:

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Strutture orizzontali	Solai e travi in cemento armato	Flessione	Eccessi di carico Errore di progettazione Grave corrosione dell'armatura	Accentuarsi freccia in campata Lesioni a intradosso in campata e in estradosso all'incastro Lesioni sui tramezzi sottostanti Lesioni sulle pavimentazioni Lesioni sulle controsoffittature Lesioni sugli impianti
		Taglio	Eccesso di carico concentrato Armatura a taglio inadeguata	Fessure sulle facce laterali inclinate a 45° Lesioni sulle coperture
		Punzonamento	Insufficienza sezione staticamente reagente	Fessure di andamento radiale con al centro il pilastro
	Solai e travi in legno	Tarlatura	Mancata manutenzione	Fori, escavazioni
		Inflessione	Eccesso di carichi	Accentuarsi freccia in campata Fessure
		Attacco biochimico	Presenza di acqua intermittente o stagnante	Marcescenza Funghi Muffe

Tabella 2.3: FMEA per strutture orizzontali

L'analisi FMEA, per il sottosistema delle fondazioni ha portato i risultati esposti nella tabella alla pagina successiva.

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Fondazioni	Palificata	Cedimento differenziale	Insufficienza di lunghezza di infissione o diametro	Lesioni nelle tamponature o murature o travi della struttura (attenzione alla disposizione) Lesioni e rotture negli impianti
	Plinti e travi rovesce in cemento armato		Errore di progettazione Variazione dei parametri geotecnici Variazione condizioni al contorno	
	Plinti e travi rovesce muratura	Cedimento di una intera trave di fondazione	Errore di progettazione; Variazione dei parametri geotecnici; Variazione delle condizioni al contorno	Fessure ad arco su muratura portante e tamponamenti
		Cedimento di un pilastro di fondazione		Fessure a 45° simmetriche rispetto il pilastro che cede, ripetute identiche su ogni piano

Tabella 2.4: FMEA per fondazioni.

Si considerano ora strutture bidimensionali e collegamenti verticali.

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Strutture bidimensionali	Archi e volte	Spostamenti alle imposte	Carichi concentrati in eccesso	Allargamento luce: fessurazioni in intradosso. Accorciamento luce: Fessurazioni in estradosso
		Scorrimento tra conci	Degrado, dilavamento, distacco malta	Abbassamento di porzioni dell'arco/volta
		Schiacciamento muratura compressa	Carichi in eccesso	Rottura laterizio
		Formazione di un meccanismo	Carichi in eccesso; sezioni interamente fessurate	Crollo

Tabella 2.5: FMEA per strutture bidimensionali

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Collegamento verticale	Scale	Scivolosità	Usura materiale Manutenzione carente Pulizia con agenti chimici aggressivi	Abrasione scabrezze Superficie liscia al tatto Superficie lucida alla vista
		Cedimento connessione ringhiere	Uso improprio Urti Degrado materiale circostante le connessioni	Cedevolezza ringhiera
			Degrado connessione	Rimozione o caduta ringhiera

Tabella 2.6: FMEA per collegamenti verticali

Conclusa l'analisi sul sistema strutturale, si passa agli elementi non portanti. Si considera il sistema dei divisori.

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Divisori	Parete a elementi squadrati e malta	Schiacciamento	Assestamenti strutturali Carichi in eccesso	Crepe, fessurazioni, rottura intonaco Spanciamento
		Degrado degli intonaci	Carenza di manutenzione Infiltrazioni: perdite idriche o percolazioni da esterno	Fessurazione, formazione di reticoli, distacco Macchie umide
	Pannelli	Deformazioni nell'orditura portante	Assestamenti strutturali	Deformazioni e separazioni dei pannelli
	Porte e telai			

Tabella 2.7: FMEA per divisori

Si passa quindi sottosistema protettivo, si considerano in primis i rivestimenti interni ed esterni e successivamente le finiture interne ed esterne.

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Rivestimento di esterni	Impermeabilizzazioni	Rottura localizzata	Urti Tagli Condizioni meteorologiche particolarmente aggressive	Fessurazioni Strappi Scollamenti Comparsa di infiltrazioni nei locali sottostanti
		Attacco biochimico	Accumulo e ristagni d'acqua	Alterazioni superficiali Depositi superficiali
			Carente manutenzione	Sviluppo di vegetazione
		Degrado diffuso	Perdita di tenuta per invecchiamento	Sollevamenti, ondulazioni, scollamenti Infiltrazioni diffuse nei locali sottostanti
	Manti di copertura in laterizio	Rottura, distacchi	Invecchiamento Urto	Infiltrazioni localizzate
			Sollevamento da parte di agenti meteorologici estremi	Fessurazioni Deformazioni Delaminazioni
			Manutenzione carente	Sviluppo di vegetazione,

Tabella 2.8: FMEA per rivestimento di esterni

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Rivestimento interni	Pavimentazione	Rottura da sollecitazioni meccaniche	Urti Caduta di oggetti	Cavillature, scheggiature, abrasioni, punzonature, perforazioni, fessurazioni, distacco dal sottofondo
			Carichi concentrati troppo elevati	Maggiore esposizione elementi sottostanti a umidità e agenti chimici e ambientali
		Gelività	Presenza di acqua e basse temperature	Sfaldamento della superficie, fessurazioni
		Attacco biochimico	Presenza di acqua stagnante	Corrosione della superficie e dei giunti
			Presenza di acqua piovana	Depositi e insudiciamento della superficie
			Manutenzione carente	Macchie Efflorescenze, funghi, muffe
			Pulizia con agenti chimici aggressivi	Abrasioni, corrosione della superficie
		Distacco dei sottofondi	Dilatazione termica	Irregolarità della superficie del pavimento, rottura, distacco di singoli elementi
		Rottura da cedimenti delle fondazioni	Deformazione eccessiva delle strutture di sostegno del solaio	Maggiore esposizione elementi sottostanti a umidità e agenti chimici/ambientali
			Abbassamento struttura portante verticale	Irregolarità della superficie del pavimento, rottura, distacco di singoli elementi
	Controsoffittatura	Lesioni	Assestamento strutturale	Fessurazioni, deformazioni, irregolarità nella superficie
		Marcescenza	Infiltrazioni provenienti da manufatti sovrastanti	Macchie colorate

Tabella 2.9: FMEA per rivestimenti di interni

	Elemento	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Finiture	Intonaci, Rivestimenti lapidei e ceramici	Lesioni	Grandi deformazioni e spostamenti nell'elemento verticale	Crepe Fessurazioni
		Degrado superficiale	Invecchiamento intonaco, urti, atti vandalici	Bollature superficiali, erosione, disgregazione, distacchi, esposizione elementi sottostanti
		Marcescenza	Infiltrazioni: perdite idriche o percolazioni da esterno	Macchie umide, alterazione cromatica, penetrazione di umidità, rigonfiamento
		Gelività	Presenza di acqua e umidità a basse temperature	Sfaldamento della superficie Fessurazioni
		Lesioni	Eccessive deformazioni e spostamenti elementi portanti	Fessurazioni Deformazioni Irregolarità nella superficie
		Attacco biochimico	Presenza di acqua stagnante Presenza di acqua piovana Manutenzione carente	Muffe, degrado intonaco Esposizione di elementi sottostanti Depositi e insudiciamento della superficie Macchie Efflorescenze, funghi, muffe

Tabella 2.10: FMEA per finiture interne e rivestimenti esterni

Si è poi condotta un'analisi trasversale, basata sul materiale e non sulla funzione e posizione dell'elemento. È stata fatta perché considerare le modalità di guasto relative al materiale nell'analisi precedente l'avrebbe resa troppo articolata e forse poco fruibile. Tuttavia, queste considerazioni non sono trascurabili, perché materiali diversi hanno cause di guasto anche molto diverse fra loro. Perciò si è deciso di riportarle a parte, in modo che possano valere anche per elementi non esplicitamente riportati nelle tabelle precedenti.

	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Elementi in acciaio	Ossidazione	Mancata applicazione di protezione	Ossidazione nodi di collegamento
	Fessurazione	Errore di progettazione: dimensione e scelta materiale	Presenza di cricche nelle saldature
		Errore di posa in opera: saldatura	

Tabella 2.11: FMEA per elementi in acciaio

	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Elementi in cemento armato	Corrosione dell'armatura	Presenza di acqua Attacco da cloruri da ambiente esterno Attacco da cloruri da confezionamento calcestruzzo Presenza di CO_2 Fessure	Lesioni parallele alle armature Rigonfiamento e distacco del copriferro
	Segregazione del calcestruzzo	Errato mix design: eccesso di acqua, aggregati troppo grandi, poco fine Errori in posa in opera: vibrazione inadeguata Errore progettuale: armature troppo fitte	Nidi di ghiaia
	Gelività	Presenza di acqua sulla superficie del cls e abbassamento ciclico delle temperature	Fessure
	Rottura	Errore di progettazione o posa in opera: copriferro insufficiente	Distacco del copriferro
	Azioni spingenti armatura piegata	Errore di progettazione o posa in opera: armatura maldisposta	Distacco del copriferro
	Ritiro plastico Ritiro igrometrico Ritiro termico	Curing inadeguato	Fessure
	Reazione alcali-aggregato	Errore mix design e confezionamento Presenza di umidità	Pop out del calcestruzzo

Tabella 2.12: FMEA per elementi in cemento armato

	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Elementi in muratura	Degrado delle malte	Esposizione ad agenti atmosferici	Degrado dello stato conservativo della malta Distacchi Diminuzione di sezione reagente

Tabella 2.13: FMEA per elementi in muratura

	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Elementi in materiale lapideo	Dilatazione termica	Variazioni termiche Assenza di giunti	Rigonfiamenti Fessurazioni e frantumazioni superficiali
	Cristallizzazione	Presenza di acqua con sali disciolti	Subflorescenza Efflorescenza
	Erosione alveolare	Presenza di vento Presenza di acqua	Disgregazione Formazione cavità superficiali

Tabella 2.14: FMEA per elementi in materiale lapideo

	Modo di guasto	Causa di guasto	Effetti
Elementi in legno	Tarlatura	Mancata manutenzione	Fori e canali scavati nella superficie e successivo deterioramento
	Inflessione	Eccesso di carichi	Grandi spostamenti e deformazioni
	Marcescenza	Infiltrazioni frequenti di acqua Ristagni di acqua	Presenza di macchie scure Perdita di rigidezza Decomposizione del legno
	Attacco fungino	Presenza di umidità o acqua	Presenza di macchie colorate Fessurazioni a reticolo Distacco di materiale

Tabella 2.15: FMEA per elementi in legno

Il sistema tecnologico è per la maggior parte esclusi da questo studio per le motivazioni espresse in 2.2. Quegli elementi che vengono inclusi in questo studio sono stati individuati sulla base dei criteri esposti nello stesso

paragrafo. Pertanto, l'approccio FMEA non viene applicato al sistema tecnologico.

2.4 Codifica del metodo

Come visto in 2.3.1, nell'analisi FMEA ad ogni elemento viene assegnato un punteggio per i fattori *Severity*, *Occurrence* e *Detectability*, da cui si calcola il Risk Priority Number. Per questo metodo speditivo è stato scelto di riproporre un sistema analogo. Verranno quindi di seguito definiti i parametri con cui descrivere ogni elemento. Per ogni parametro saranno definite le scale di punteggio e le linee guida per assegnarlo. Sulla base dei parametri verranno introdotti degli indici descrittivi dello stato di conservazione e degrado dell'elemento e della struttura nel suo insieme.

2.4.1 I parametri

Il metodo è da applicare durante ispezione visiva, quindi ci si limita a ciò che l'ingegnere può vedere e misurare direttamente, quindi l'indagine è improntata sulla ricerca degli effetti visibili delle rotture. Il primo parametro quindi riguarderà il tipo di effetto riscontrato.

Il secondo parametro invece descriverà l'estensione del difetto, perché molti fenomeni sono progressivi e peggiorano con il tempo, come l'ampliarsi di umidità e la fessurazione. L'estensione del difetto è un modo per descrivere fino a che punto si è evoluto il fenomeno e, indirettamente, è un'indicazione della durata del fenomeno stesso.

Gli effetti saranno percepiti dall'ingegnere come degli scostamenti dalla forma ideale dell'elemento. Per questo motivo e per riallinearci al gergo delle costruzioni, d'ora in poi si parlerà più spesso di *difetti* invece che di *effetti*.

Dall'analisi FMEA si è visto che metodi di rottura diversi possono avere effetti simili. Per esempio, le "fessure" compaiono tra gli effetti di: cedimenti di fondazioni, inflessione eccessiva su travi e solai in cemento armato e legno, spostamenti alle imposte di archi in muratura, gelività su cemento armato, e altri ancora. Risalire alla causa di un determinato effetto non è immediato e fattibile a vista, bisogna considerare le condizioni al contorno, la storia dell'edificio e ricorrere ad indagini più approfondite. Per questo motivo, la causa di guasto costituisce una grossa incertezza, quindi avere un parametro

che la riguardi comporterebbe delle difficoltà nell'assegnazione dei valori e nell'affidabilità dei risultati.

Se da un lato uno stesso effetto può colpire elementi con funzioni e materiali diverse, dall'altro, però, la gravità delle potenziali conseguenze non sarà la stessa per tutti i casi. Ad esempio, fessure su una colonna portante in cemento armato hanno potenziali conseguenze, anche sul lungo periodo, ben più gravi di fessure solo sull'intonaco. Per questo motivo, si è scelto di avere un parametro relativo all'elemento su cui è riscontrato l'effetto e alla funzione che esso svolge nel complesso strutturale.

È anche vero, però, che avere fessure su elementi diversi ma vicini nello spazio, può essere sintomo di un fenomeno più ampio. Questo aspetto è troppo complicato da tenere in considerazione in questa fase, quindi se ne terrà conto più avanti nella definizione degli indici.

Ricapitolando, i parametri scelti per descrivere lo stato di degrado di ogni elemento sono:

- l'entità del difetto, ossia il tipo di effetto riscontrato sull'elemento;
- l'estensione del difetto, che indica lo stato di avanzamento del fenomeno e quanto è compromesso l'elemento;
- l'importanza dell'elemento difettato per tenere in conto indirettamente della *Severity* di un effetto.

Di seguito, si analizzano nel dettaglio i parametri individuati.

2.4.1.1 Entità del difetto

Si parte dagli effetti emersi durante l'analisi FMEA. Vengono raggruppati non più per elemento, tranne laddove strettamente necessario, ma per categorie riguardanti i tipi di difetti. Questa organizzazione viene fatta già pensando alla futura applicazione. I difetti riscontrabili in fase di ispezione sono:

1) difetti di origine antropica:
    a. graffiti;
    b. gomme da masticare;
    c. errori di progettazione o realizzazione:
2) difetti dovuti ad agenti biochimici:

a. macchie di umidità;
b. patine;
c. colonizzazione (funghi, muffe, ecc..) eccetto legno;
d. colonizzazione (funghi, muffe, ecc..) su legno;
e. marcescenza;
f. croste;
g. efflorescenza;
h. piante con apparato radicale;
i. piante senza apparato radicale;

Per la colonizzazione si è distinto il caso del legno, perché in quanto materia organica è più sensibile a questo tipo di attacco. Si è fatta anche la distinzione delle piante perché le piante senza apparato radicale comportano dei danni superficiali, invece piante con apparato radicale possono portare a rotture in profondità. Il discernimento è più facile di quanto non sembri e può essere fatto anche da chi non ha una preparazione botanica: alghe e muschi non sviluppano un apparato radicale, ma erbe e arbusti sì.

3) difetti dovuti ad asportazione o mancanza di materiale:
   a. distacco del copriferro;
   b. nidi di ghiaia;
   c. pop out del calcestruzzo;
   d. distacco e dilavamento malta nella muratura;
   e. fenomeni superficiali: erosione, alveolizzazione, pitting e fori;
   f. mancanza di parti dell'elemento in generale;

Si è scelto di aggiungere il caso "mancanza di parti dell'elemento in generale" in quanto si riconosce che l'ambizione di essere totalmente esaustivi è inavvicinabile e ci si potrebbe trovare di fronte a situazioni non rientranti nei casi a – e.

4) difetti tipo rigonfiamento:
   a. rigonfiamento su intonaco;
   b. rigonfiamento su materiale lapideo e laterizio;
   c. rigonfiamento su calcestruzzo;

In questo caso si è scelto di distinguere il rigonfiamento in base al tipo di materiale, perché su materiali diversi sono implicati fenomeni aventi cause e tempistiche diverse.

5) difetti tipo deformazioni:
    a. spanciamento di elementi verticali;
    b. fuori piombo;
    c. deformazione asse verticale;
    d. accentuarsi di freccia in campata;
6) difetti che influiscono sulla resistenza meccanica:
    a. fessurazione;
    b. rottura di parti dell'elemento sostituibili singolarmente;
    c. rottura dell'elemento o di parti dell'elemento non sostituibili singolarmente;
7) difetti dell'acciaio:
    a. alterazione strati protettivi: placcature, smaltature, vernici;
    b. corrosione 1° stadio: deterioramento zinco (white rust);
    c. corrosione 2° stadio: presenza di zone rosse (red spot);
    d. bullonature mancanti (nei nodi);
8) difetti di archi e volte:
    a. fessure;
    b. spostamenti alle imposte;
    c. scorrimento tra conci;

Questi sono i tipi di difetto che più facilmente si possono riscontrare. Peculiarità del metodo è che nel caso in cui si fosse tralasciato qualche caso particolare, questa lista può essere integrata facilmente.

2.4.1.2 Estensione del difetto

Per ogni difetto individuato viene definito il modo migliore per caratterizzarne l'estensione. Nella definizione del parametro e in particolare delle relative soglie si tiene conto del fatto che il metodo dev'essere speditivo e nell'ispezione non sono contemplati strumenti di precisione (laser, ecc...) ma solo righello, calibro, estensimetro.

Per i "Difetti di origine antropica" si considera in generale l'impatto del difetto sull'uso e l'interazione con l'elemento, quindi se il difetto comporta un

danno puramente estetico, se influenza il comfort dell'utente o se compromette la durabilità dell'elemento stesso o degli elementi adiacenti.

I "Difetti dovuti ad agenti biochimici" sono perlopiù difetti superficiali o di cui non si può intuire la profondità. Per questo motivo si considera come parametro l'estensione superficiale rispetto la superficie totale dell'elemento. Fa eccezione la colonizzazione da piante: come sottolineato in precedenza, alcune di esse sviluppano un apparato radicale, quindi c'è la possibilità di avere rotture anche profonde. Di questa differenza, però, si tiene in conto già nell'entità del difetto.

Nei "Difetti dovuti ad asportazione o mancanza di materiale" si considera in ogni caso l'estensione superficiale rispetto la superficie totale dell'elemento. In aggiunta, nel caso del distacco del copriferro si prende in considerazione anche la profondità massima del fenomeno: si sa che il distacco del copriferro influisce sulla durabilità dell'elemento per via dell'esposizione dell'armatura agli agenti atmosferici. Discorso analogo vale per il distacco o dilavamento della malta: si considera la profondità per cui il laterizio o la pietra sono esposti. Per i nidi di ghiaia, invece, essendo essi sensibili ai cicli di gelo e disgelo, si considera se l'elemento è in una posizione tale da poter subire tale fenomeno.

La categoria dei "Difetti tipo deformazioni" è la più ostica: non esistono in letteratura limiti di deformazione accettabile in esercizio già definiti, se non quelli presenti in NTC08 per le verifiche in condizioni di esercizio per l'acciaio. La varietà dei casi in cui ci si può imbattere in fase di ispezione scoraggia dall'usare criteri che invece sono ben definiti per categoria di elemento e materiale. Sia per elementi verticali che per gli orizzontali il parametro è il rapporto di deformazione: spanciamento su altezza totale; deformazione verticale e luce. In generale, per casi non riconducibili ai precedenti si considera se la deformazione comporta o meno un disagio negli utenti a livello estetico o di comfort e se l'uso e la funzione dell'elemento risultano o meno compromessi.

Nei "Difetti tipo rigonfiamento" il parametro significativo è lo spessore dello stesso. In più si considera la presenza o meno di fessurazione, poichè questa riduce la durabilità dell'elemento.

I “Difetti che influiscono sulla resistenza meccanica” hanno parametri significativi molto diversi fra loro. Nel caso della fessurazione si procede ad una descrizione delle fessure secondo:

- direzione;
- distribuzione;
- lunghezza;
- apertura.

Non viene considerata la profondità, essendo questa difficile da misurare in sito senza strumenti elettronici costosi.
Un altro possibile parametro per le fessurazioni è il tipo di fenomeno di cui sono il sintomo. Come visto nelle tabelle nel paragrafo 2.3.1, le fessure sono effetti riconducibili a modalità e cause di guasto diverse, ma a seconda del tipo di fenomeno, la presenza di fessurazione può avere implicazioni diverse. Per esempio: le fessure da ritiro plastico, oltre ad essere pressoché inevitabili, non compromettono la durabilità del manufatto, mentre fessure verticali in un pilastro possono essere il sintomo di un carico verticale eccessivo. Il tipo di fenomeno costituisce il parametro di riferimento solo nel caso in cui il quadro fessurativo sia riconducibile ad un caso specifico, altrimenti si considera la descrizione delle fessure.

Per la rottura di parti di elemento sostituibili si considera l’estensione superficiale o il numero di pezzi rotti sul totale. Per rottura di elemento o parti di elemento non sostituibili si considerano le conseguenze in termini estetici, di comfort, di uso e di sicurezza delle persone come già visto per i difetti di origine antropica.

Per i “Difetti dell’acciaio”, come alterazione strati protettivi, corrosione al primo e secondo stadio il parametro di riferimento è l’estensione superficiale. Per le bullonature mancanti si considera il rapporto percentuale tra il numero di bullonature mancanti e le bullonature totali del collegamento.

Per i “Difetti di archi e volte” i parametri solo legati perlopiù agli spostamenti subito dall’arco stesso o da parti di esso. Per lo scorrimento relativo tra i conci si considera la distanza in direzione verticale tra i lembi dei due conci.

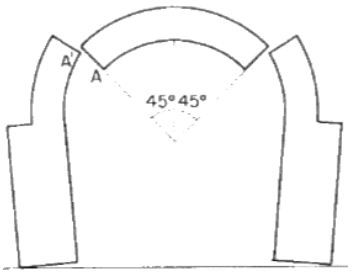

Figura 2.3: Schema del meccanismo di scorrimento tra conci

Per gli spostamenti alle imposte si considera lo scostamento tra la luce di progetto e la luce effettiva al momento dell'ispezione.

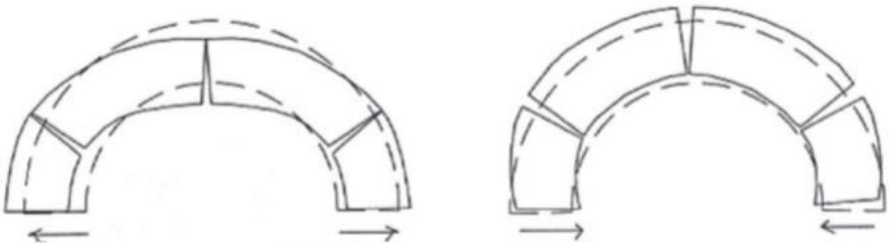

Figura 2.4: Schema spostamento alle imposte per archi e volte

Per la fessurazione si segue un ragionamento analogo a quanto visto nella fessurazione in generale, ma con indicazioni diverse per la direzione e disposizione delle fessure, essendo in questo caso coinvolti fenomeni diversi. Infatti, gli archi, quando sottoposti a carichi eccessivi, presentano tra i segni di sofferenza delle fessure in posizioni correlate al tipo di arco. Infatti, archi a tutto sesto o sesto ribassato presentano fessurazioni in estradosso alle reni e in intradosso in chiave. Al contrario archi a sesto acuto presentano fessurazioni in estradosso in chiave e in intradosso alle reni.

2.4.1.3 Importanza dell'elemento

L'esigenza di definire un parametro legato alla funzione dell'elemento nasce perché, come già visto, uno stesso difetto su elementi differenti può avere conseguenze anche molto diverse fra loro. Nell'analisi FMEA esiste il coefficiente S (*Severity*) che considera la gravità degli effetti. In questo caso, non si può riprodurre questo coefficiente tal quale, perché ci sono delle incertezze sulla modalità di guasto e quindi sulle conseguenze. Si precisa che in questo metodo il focus è più spostato sull'effetto che sulla modalità di guasto. La stima delle conseguenze di un effetto dipende in primis dalle

modalità di guasto e dalle cause ma ci sono sempre fattori secondari che influenzano il fenomeno. Si cerca di aggirare queste incertezze, ragionando su un altro aspetto: quanto sarebbe grave la rottura di un certo elemento? Che conseguenze avrebbe sulla sicurezza delle persone? E sugli elementi adiacenti o sull'intero edificio? Ci potrebbero essere delle interruzioni nel servizio? Si possono innescare effetti a catena? Si escludono, però, da questo ragionamento conseguenze e fenomeni legati ad un uso improprio dell'elemento.

In definitiva, per l'importanza dell'elemento si distinguono le seguenti categorie:

- elementi importanti per la stabilità dell'edificio;
- elementi che influiscono sulla sicurezza delle persone, dove si distinguono i seguenti casi:
    - elementi che se non integri possono comportare la caduta o l'inciampo di persone;
    - elementi che cadendo possono provocare danni a cose o a persone;
    - elementi di impianti con cui interagisce l'utente;
- elementi che hanno scopo protettivo o di aumentare la durabilità.

Gli elementi che se non integri possono comportare la caduta o l'inciampo di persone sono generalmente ringhiere, ballatoi, ma anche gradini isolati. È opportuna una distinzione in base alla caduta: questa può essere una caduta da piano stabile, caduta entro 2m da piano stabile e oltre 2m da piano stabile. La soglia in altezza è scelta prendendo a riferimento il Testo Unico 81/2008, in cui viene definito lavoro in quota un'attività lavorativa che espone il lavoratore al rischio di caduta da una quota posta ad altezza superiore a 2m rispetto al piano stabile.

Negli elementi che cadendo possono provocare danni a cose o a persone sono generalmente compresi: masse appese, elementi in quota vincolati e non (monitor, impianti audio, corpi illuminanti, cartellonistica). In questo caso vi è una prima distinzione tra gli elementi appesi a parete e gli elementi appesi a soffitto. Gli elementi a parete hanno conseguenze meno gravi per la

sicurezza delle persone perché si dovrebbe essere appoggiati alla parete stessa e ciò non è sempre possibile, in particolare per quegli elementi appesi al entro 1m di altezza.

Gli elementi appesi a soffitto sono più problematici. Gli effetti di una caduta dipendono dalla quota di partenza e dalla massa. Se si volesse essere più precisi, anche trascurando l'attrito dell'aria, bisognerebbe considerare dimensioni e forma del grave. Le dimensioni perché due elementi della stessa massa ma di dimensioni diverse impattano su un'area diversa, che implica danni economici diversi e anche un diverso numero di persone potenzialmente coinvolte. La forma, invece, influisce sul tipo di impatto: si pensi al diverso impatto di un elemento piatto o un elemento acuminato. In particolare, prendendo in considerazione il corpo umano: la caduta di un elemento piatto su un uomo in piedi causa traumi da schiacciamento, invece un corpo contundente, oltre allo schiacciamento, può causare anche penetrazione. Purtroppo, per quanto affascinante, la trattazione degli effetti di una caduta sul corpo umano non può essere presa in considerazione all'interno di questo studio perché troppo ampia e non sono stati trovati studi precedenti a riguardo.

È vero che tutti i parametri qui menzionati sono importanti, ma per avere uno strumento che sia veramente utilizzabile in modo speditivo occorre operare una selezione. Si sceglie di usare come primo criterio le dimensioni: in particolare si distingue in oggetti che coinvolgerebbero una sola persona, quindi di ampiezza inferiore o uguale a 1 m^2e quelli che coinvolgerebbero più di una persona.

Inoltre, si procede ad una stima grezza dell'energia potenziale di un grave. Come noto, l'energia potenziale gravitazionale di un corpo posto in prossimità della superficie terrestre è data da:

$$U = mgh$$

Questo calcolo non vuole essere preciso e raffinato ma appunto una stima grezza per tenere in conto l'ampiezza delle conseguenze di una eventuale caduta.

2.4.2 Definizione algoritmo matematico e indici

Ai tre parametri individuati nel paragrafo 2.4.1 si assegnano dei coefficienti numerici, che saranno usati per descrivere lo stato di degrado dell'elemento. Si ha quindi:

- d_i = coefficiente di entità del difetto dell'i-esimo elemento, che va da 0 a 4;
- e_i = coefficiente di estensione del difetto del difetto dell'i-esimo elemento, va da 1 a 4;
- r_i = coefficiente di importanza (*relevance*) dell'i-esimo elemento, va da 1 a 5.

In linea generale per l'assegnazione dei valori numerici ai coefficienti si sono considerate le seguenti conseguenze dei difetti:

- danno estetico;
- danno a livello di comfort;
- alterazione nell'uso dell'elemento;
- danni ad altri elementi;
- durabilità di altri elementi compromessa;
- funzione dell'oggetto compromessa;
- elemento non è più in grado di svolgere la sua funzione.

2.4.2.1 Coefficiente di entità difetto

Il tipo di difetto riscontrato sull'elemento determina il *coefficiente di entità difetto* d_i. Il valore di tale coefficiente va da 0 per elementi senza difetti visibili a 4 per elementi con difetti gravi. Nel caso in cui un elemento presentasse più di un difetto, ad esso vanno assegnati i coefficienti in base al difetto più gravoso.

Di seguito sono riportate le tabelle con i valori da assegnare al coefficiente di entità difetto a seconda dei casi. Per facilitare la consultazione, i difetti sono suddivisi per macrocategorie.

ASSENZA DI DIFETTI	
Tipo di difetto	d_i
Non si riscontrano difetti visibili	0

Tabella 2.16: Coefficiente di entità difetto in assenza di difetti visibili

DIFETTI DI ORIGINE ANTROPICA	
Tipo di difetto	d_i
Graffiti	0
Gomme da masticare	0
Errori di progettazione e realizzazione	2

Tabella 2.17: Coefficiente di entità difetto per difetti di origine antropica

DIFETTI DOVUTI AD AGENTI BIOCHIMICI	
Tipo di difetto	d_i
Macchie di umidità	1
Patine	1
Colonizzazione di funghi, muffe, ecc. (eccetto legno)	1
Colonizzazione di funghi, muffe, ecc. su legno	2
Marcescenza	4
Croste	3
Alterazione cromatica	1
Efflorescenza	1
Piante senza apparato radicale	1
Piante con apparato radicale	2

Tabella 2.18: Coefficiente di entità difetto per difetti dovuti ad agenti biochimici

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE	
Tipo di difetto	d_i
Erosione	1
Alveolizzazione	1
Pitting	1
Fori	1
Distacco del copriferro	4
Nidi di ghiaia	2
Pop out del calcestruzzo	2
Distacco e dilavamento malta	2
Distacco di elementi o materiale (per casi diversi da quelli specificati)	3

Tabella 2.19: Coefficiente di entità difetto per asportazione o mancanza di materiale

DIFETTI TIPO RIGONFIAMENTO	
Tipo di difetto	d_i
Rigonfiamento su calcestruzzo	3
Rigonfiamento su materiale lapideo e laterizio	3
Rigonfiamento su intonaco e altri materiali	2

Tabella 2.20: Coefficiente di entità difetto per rigonfiamento

DIFETTI TIPO DEFORMAZIONI	
Tipo di difetto	d_i
Fuori piombo	1
Spanciamento di elementi verticali	3
Deformazione asse verticale	3
Accentuarsi di freccia in campata	3

Tabella 2.21: Coefficiente di entità difetto per deformazioni

DIFETTI CHE INFLUISCONO SULLA RESISTENZA MECCANICA	
Tipo di difetto	d_i
Fessurazione	2 - 3
Rottura di parti dell'elemento sostituibili singolarmente	3
Rottura elemento o di parti dell'elemento non sostituibili singolarmente	4

Tabella 2.22: Coefficiente di entità difetto per difetti che influiscono sulla resistenza meccanica

DIFETTI DELL'ACCIAIO	
Tipo di difetto	d_i
Alterazione strati protettivi	1
Corrosione 1 stadio: deterioramento zinco (white rust)	2
Corrosione 2 stadio: presenza di zone rosse (red spot)	3
Bullonature mancanti	3

Tabella 2.23: Coefficiente di entità difetto per difetti dell'acciaio

DIFETTI DI ARCHI E VOLTE	
Tipo di difetto	d_i
Fessurazione	3
Spostamenti alle imposte	3
Scorrimento tra conci	4

Tabella 2.24: Coefficiente di entità difetto per difetti di archi e volte

2.4.2.2 Coefficiente di estensione difetto

Il secondo parametro a cui è associato un coefficiente numerico è l'estensione del difetto. Sempre ragionando con un approccio FMEA, il criterio di riferimento per la scelta del coefficiente numerico è l'entità delle conseguenze. Le soglie scelte sono frazioni di intero espresse in percentuale rispetto la dimensione di riferimento, facilmente stimabili in sito a occhio nudo (metà, un terzo, un quarto e così via).

Il coefficiente di estensione difetto va da 1 a 4 e di seguito vengono riportate le tabelle per l'assegnazione del coefficiente.

DIFETTI DI ORIGINE ANTROPICA	
Descrizione	e_i
Difetto che causa un danno estetico	1
Difetto che causa un danno a livello di comfort	1
Difetto che compromette la durabilità dell'elemento stesso o di elementi adiacenti	2

Tabella 2.25: Coefficiente di estensione difetto per difetti di origine antropica

Per difetti dovuti ad agenti biochimici, si considera come parametro per l'estensione superficiale, calcolata come rapporto tra superficie che presenta il difetto e superficie totale dell'elemento.

DIFETTI DOVUTI AD AGENTI BIOCHIMICI				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
$\boldsymbol{e_i}$	1	2	3	4

Tabella 2.26: Coefficiente di estensione difetto per difetti dovuti ad agenti biochimici

Nel caso di erosione, alveolizzazione, pitting e fori, che sono difetti riguardanti principalmente i materiali lapidei si considera come parametro per l'estensione superficiale, calcolata come rapporto tra superficie che presenta il difetto e superficie totale dell'elemento.

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE – EROSIONE, ALVEOLIZZAZIONE, PITTING, FORI				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
$\boldsymbol{e_i}$	1	2	3	4

Tabella 2.27: Coefficiente di estensione difetto per asportazione o mancanza di materiale

Per il distacco di copriferro i parametri sono l'estensione superficiale e la profondità. Per l'estensione superficiale si considera il rapporto tra superficie che presenta il difetto e superficie totale dell'elemento. Per la profondità, lo scoglio significativo è l'esposizione dell'armatura.

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE – DISTACCO DEL COPRIFERRO			
Estensione	<30%	<60%	>60%
Armatura non esposta	1	2	3
Armatura esposta	2	3	4

Tabella 2.28: Coefficiente di estensione difetto per distacco copriferro

Come nei casi precedenti, il parametro per i nidi di ghiaia è l'estensione superficiale, calcolata come rapporto tra superficie che presenta il difetto e superficie totale dell'elemento. In questo caso però, vista la sensibilità dei nidi di ghiaia a cicli di gelo e disgelo, c'è una ulteriore distinzione basata sull'esposizione dell'elemento ad acqua e basse temperature.

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE – NIDI DI GHIAIA				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
Elemento non esposto ad acqua e gelo	1	1	2	3
Elemento esposto ad acqua e gelo	1	2	3	4

Tabella 2.29: Coefficiente di estensione difetto per nidi di ghiaia

Essendo il pop out un fenomeno puntuale, il parametro di riferimento è il numero di fori a m^2.

Nel caso in cui si abbia formazione di un reticolato di fessure tra i fori si assegna il valore massimo (e_i =4) indipendentemente dal numero dei fori.

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE – POP OUT DEL CALCESTRUZZO				
N° fori a m2	<5	<10	<20	>20 o formazione di reticolato tra i fori
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.30: Coefficiente di estensione difetto per Pop Out del calcestruzzo

Per distacco o dilavamento malta i due parametri sono l'estensione superficiale e la profondità raggiunta. In particolare, quest'ultimo parametro è espresso in porzione di mattone o pietra esposta.

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE – DISTACCO O DILAVAMENTO MALTA			
Estensione	<30%	<60%	>60%
Esposizione inerte <50%	1	2	3
Esposizione inerte >50%	2	3	4

Tabella 2.31: Coefficiente di estensione difetto per distacco o dilavamento malta

Nel caso di distacchi o mancanza di materiale, per casi diversi da quelli specificati, si fa riferimento alla tabella successiva. Anche in questo caso si

considera l'estensione superficiale, intesa come rapporto tra superficie che presenta il difetto e superficie totale dell'elemento.

DIFETTI DOVUTI AD ASPORTAZIONE O MANCANZA MATERIALE – DISTACCO DI ELEMENTI O MATERIALE				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.32: Coefficiente di estensione difetto per distacco di elementi o materiale

Nel caso di deformazioni di elementi orizzontali si considera il rapporto tra deformazione verticale e luce dell'elemento, secondo il seguente schema:

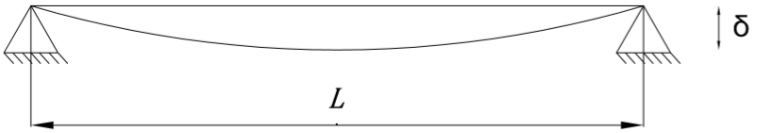

Figura 2.5: Schema per deformazione di elementi orizzontali

Il rapporto di deformazione è calcolato come $\delta/_L$ e determina il coefficiente di estensione difetto, come quanto indicato in Tabella 2.33.

DIFETTI TIPO DEFORMAZIONI – DEFORMAZIONE DI ELEMENTI ORIZZONTALI				
$\delta/_L$	$< \frac{1}{300}$	$< \frac{1}{200}$	$< \frac{1}{100}$	$> \frac{1}{100}$
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.33: Coefficiente di estensione difetto per deformazioni di elementi orizzontali

Nel caso di deformazioni di elementi verticali si ragiona in modo analogo a quanto visto per gli elementi orizzontali, ma il rapporto di deformazione è calcolato rispetto l'altezza totale H dell'elemento, dunque come $\delta/_H$.

DIFETTI TIPO DEFORMAZIONI – DEFORMAZIONE DI ELEMENTI VERTICALI				
$\delta/_H$	$< \frac{1}{250}$	$< \frac{1}{200}$	$< \frac{1}{100}$	$> \frac{1}{100}$
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.34: Coefficiente di estensione difetto per deformazioni di elementi verticali

Per casi diversi da quelli menzionati e per elementi che non siano portanti (r_i=5) si fa riferimento al seguente schema generale:

DIFETTI TIPO DEFORMAZIONI	
Descrizione	e_i
La deformazione comporta un danno estetico o a livello di comfort	1
La deformazione altera l'uso dell'elemento	2
La deformazione altera l'uso dell'elemento e porta danni a altri elementi ad esso collegati	3
La funzione e l'uso dell'elemento sono compromessi	4

Tabella 2.35: Coefficiente di estensione difetto per deformazioni

Nel caso di rigonfiamento, i parametri significativi per il difetto sono lo spessore del rigonfiamento e la presenza di fessurazione, che influisce sulla durabilità.

DIFETTI TIPO RIGONFIAMENTO				
Spessore e fessurazione	<1cm senza fessurazione	<1cm con fessurazione	>1cm senza fessurazione	>1cm con fessurazione
$\boldsymbol{e_i}$	1	2	3	4

Tabella 2.36: Coefficiente di estensione difetto per rigonfiamento

Si considerano ora quei difetti che influiscono sulla resistenza meccanica dell'elemento.

Nel caso della fessurazione, per descrivere l'ampiezza del fenomeno si considerano i seguenti parametri: direzione e posizione, distribuzione e frequenza, lunghezza e apertura. Non si considera la profondità in quanto la misurazione non è immediata e comporta l'utilizzo di strumentazioni non adatte ad una indagine di tipo speditivo. Ad ognuno dei parametri menzionati viene assegnato un punteggio parziale compreso tra 0 e 1; il coefficiente di estensione difetto è dato dalla somma dei punteggi parziali.

Il parametro "Lunghezza" è inteso come lunghezza della fessura rapportata alla lunghezza massima nella direzione della fessura stessa.

FESSURAZIONE				
Direzione/posizione	**Distribuzione e frequenza**	**Lunghezza**	**Apertura**	**e_i parziale**
Direzione qualsiasi (non riconducibile agli altri casi)	1 : 1m	<25%	visibili con difficoltà (0.2mm)	0,25
Fessure parallele direzione principale in cui lavora l'elemento	1 : 0,5 m	<50%	chiaramente visibili (0.4mm)	0,50
Fessure inclinate di 45°	1 : 0,25m	<75%	fino a 5mm	0,75
Fessure parallele armature O verticali in elementi verticali O ortogonali tra loro o formanti un reticolo	1 : 0,1m	fino a 100%	oltre 5mm	1,00

Tabella 2.37: Coefficiente di estensione difetto per fessurazione – 1

In alternativa, nel caso in cui il progettista riconosca dal quadro fessurativo e dalle condizioni al contorno il tipo di fenomeno, per l'assegnazione del coefficiente di estensione difetto si usa la tabella seguente.

FESSURAZIONE	
Descrizione	**e_i**
fessure da ritiro igrometrico [ca] fino apertura 2mm fessure da ritiro plastico [ca] fino apertura 2mm fessure da ritiro termico [ca]fino apertura 2mm	1
fessure da ritiro igrometrico [ca] apertura oltre 2mm fessure da ritiro plastico [ca] apertura oltre 2mm fessure da ritiro termico [ca] apertura oltre 2mm	2
Fessure lungo la linea d'angolo per scollegamento tra muri portanti e di spina [muratura] Fessure ad arco [muratura] Fessure da flessione [ca]	3
Fessure a croce di Sant'Andrea [muratura] Fessure inclinate a 45°, identiche, simmetriche e formanti un arco immaginario [muratura] Fessure da taglio [ca] Fessure da cedimenti differenziali Fessure da schiacciamento di elementi verticali	4

Tabella 2.38: Coefficiente di estensione difetto per fessurazione – 2

I due metodi di assegnazione del coefficiente di estensione difetto sono mutualmente esclusivi e in caso di dubbio all'analista è raccomandato l'uso del Modo 1.

Nel caso di rottura dell'elemento o di parti dell'elemento non sostituibili singolarmente si fa riferimento allo schema seguente

ROTTURA DI ELEMENTO O DI PARTI DI ELEMENTO NON SOSTITUIBILI SINGOLARMENTE	
Descrizione	e_i
La rottura ha conseguenze in termini di danno estetico o di comfort	1
La rottura altera l'uso dell'elemento	2
La rottura altera l'uso dell'elemento e porta danni a altri elementi ad esso collegati	3
L'elemento è inutilizzabile, non svolge la funzione per cui è stato costruito	4

Tabella 2.39: Coefficiente di estensione difetto per rottura di elemento o di parti di elemento non sostituibili singolarmente

Nel caso di un macroelemento composto da pezzi modulari il parametro di riferimento è il numero di pezzi modulari rotti sul totale.

ROTTURA DI PARTI DI ELEMENTO SOSTITUIBILI SINGOLARMENTE O DI MACROELEMENTI				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.40: Coefficiente di estensione difetto per rottura di parti di elemento sostituibili singolarmente o di macroelementi

Si considerano ora quei difetti riscontrabili in elementi in acciaio.

Per i difetti tipici dell'acciaio, quali l'alterazione di strati protettivi, la corrosione al primo o al secondo stadio, il parametro è l'estensione superficiale, calcolata come rapporto tra superficie che presenta il difetto e superficie totale dell'elemento.

L'assenza di strati protettivi comporta l'assegnazione del livello massimo

$$e_i = 4$$

DIFETTI DELL'ACCIAIO – ALTERAZIONE STRATI PROTETTIVI, CORROSIONE 1° STADIO, CORROSIONE 2° STADIO				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.41: Coefficiente di estensione difetto per difetti dell'acciaio

Per bullonature mancanti l'estensione è da intendersi come il rapporto percentuale tra il numero di bullonature mancanti e le bullonature totali del collegamento.

DIFETTI DELL'ACCIAIO – BULLONATURE MANCANTI				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.42: Coefficiente di estensione difetto per bullonature mancanti

Si considerano ora i difetti che riguardano strutture quali archi e volte.

Per lo scorrimento relativo tra conci si considera la distanza in direzione verticale tra i due lembi.

DIFETTI DI ARCHI E VOLTE – SCORRIMENTO TRA CONCI				
Estensione	<0,5cm	<1cm	<5cm	>5cm
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.43: Coefficiente di estensione difetto per scorrimento tra conci in archi e volte

Per gli spostamenti alle imposte, in riferimento allo schema in Figura 2.4: Schema spostamento alle imposte per archi e volteFigura 2.4, si assegna il coefficiente di estensione difetto in funzione del seguente rapporto:

$$\lambda = \left|\frac{L_{nom} - L_{eff}}{L_{nom}}\right| \cdot 100$$

Dove:

- L_{nom} è la luce nominale da progetto
- L_{eff} è la luce effettiva al momento dell'ispezione.

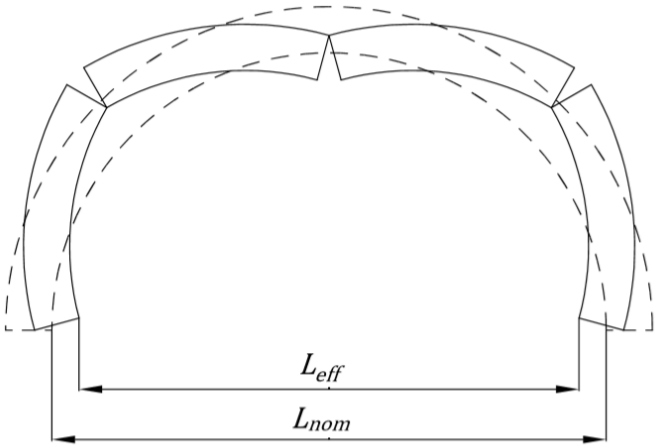

Figura 2.6: Schema per il calcolo del rapporto λ

Il coefficiente di estensione difetto è dunque determinato secondo la seguente tabella.

DIFETTI DI ARCHI E VOLTE – SPOSTAMENTI ALLE IMPOSTE				
λ	<1%	<5%	<10%	>10%
e_i	1	2	3	4

Tabella 2.44: Coefficiente di estensione difetto per spostamenti alle imposte in archi e volte

L'assegnazione del coefficiente di estensione difetto per la fessurazione di archi e volte è simile al caso generale della fessurazione, ma cambiano le soglie sulla direzione e la posizione delle fessure.

FESSURAZIONE				
Direzione e posizione	**Distribuzione e frequenza**	**Lunghezza**	**Apertura**	**e_i parziale**
/	1 : 1m	<25%	visibili con difficoltà (0.2mm)	0,25
Direzione qualsiasi	1 : 0,5 m	<50%	chiaramente visibili (0.4mm)	0,50
/	1 : 0,25m	<75%	fino a 5mm	0,75
Archi a tutto sesto o sesto ribassato: fessurazioni in estradosso alle reni e in intradosso in chiave Archi a sesto acuto: fessurazioni in estradosso in chiave e in intradosso alle reni	1 : 0,1m	fino a 100%	oltre 5mm	1,00

Tabella 2.45: Coefficiente di estensione difetto per fessurazione in archi e volte

2.4.2.3 Coefficiente di importanza elemento

Secondo i criteri espressi nel paragrafo 2.4.1.3 sono stati codificati i valori del coefficiente di importanza elemento, riportati in Tabella 2.46.

Tipo di elemento	r_i
Elementi portanti: pilastri, travi, solai, murature portanti, archi e volte, controventi, nodi strutturali, pensiline	5
Scale e scale mobili	4
ELEMENTI NON PORTANTI	
Partizioni verticali fisse, coperture (impermeabilizzazioni, tegole), vetrate e finestre	3
Partizioni verticali mobili, divisori, porte e telai	2
FINITURE ESTERNE E INTERNE, ELEMENTI DI ARREDO	
Intonaci, tinteggiature, infissi, rivestimenti, panchine, dissuasori	1
ELEMENTI CHE SE NON INTEGRI POSSONO COMPORTARE LA CADUTA O L'INCIAMPO DI PERSONE (RINGHIERE, BALLATOI, BALAUSTRE) AD ECCEZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI E SCALE	
Caduta da piano stabile	2
Caduta entro 2m da piano stabile	3
Caduta oltre 2m da piano stabile	4
ELEMENTI CHE CADENDO POSSONO PROVOCARE DANNI A COSE O A PERSONE: MASSE APPESE, ELEMENTI IN QUOTA VINCOLATI E NON (SOFFITTATURE, CARTELLONISTICA, MONITOR, IMPIANTI AUDIO, CORPI ILLUMINANTI) AD ECCEZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI.	
Elementi appesi a parete entro 1m	1
Elementi appesi a parete oltre 1m	2
Elementi appesi a soffitto di area < 1m²	3
Elementi appesi a soffitto di area > 1m²	4
ELEMENTI DI IMPIANTI CON CUI INTERAGISCE L'UTENTE	
Elementi di impianti elettrici, esclusi elementi appesi	2
Impianti di sollevamento di persone o di cose per mezzo di ascensori, di montacarichi, di scale mobili e simili	3

Tabella 2.46: Valori per coefficiente di importanza elemento r

2.4.2.4 Indici

A partire dai tre coefficienti descritti, si calcolano gli indici che descrivono lo stato di difettosità dell'elemento e del sistema edilizio. L'idea iniziale era di definire indici che descrivessero lo stato di integrità degli elementi, ma durante il processo è risultato più efficace improntare il discorso sui difetti e i parametri scelti sono incentrati proprio su questi. Per coerenza e per non generare confusione, gli indici qui proposti saranno ribaltati rispetto quanto ipotizzato inizialmente e invece di descrivere lo stato di integrità saranno indicativi della difettosità. Si propongono due indici per singoli elementi e tre

indici aggregativi, in cui si valuta nell'insieme l'edificio o la sua porzione oggetto di indagine.

L'*Indice di difettosità dell'elemento* D_cè un indice sullo stato di difettosità assoluta. Viene calcolato per ogni singolo elemento ed è dato dal prodotto tra il coefficiente di entità del difetto e il coefficiente di estensione del difetto, dunque:

$$D_c = d_i \cdot e_i$$

Poiché il coefficiente d_i varia da 0 a 4 e il coefficiente e_i varia da 1 a 4, allora D_c varia da 0 a 16. Si distinguono tre diversi range di difettosità:

$\mathbf{D_c}$	**Difettosità**
$\mathbf{0 \leq D_c \leq 3}$	Bassa
$\mathbf{3 < D_c \leq 6}$	Media
$\mathbf{6 < D_c \leq 16}$	Alta

Tabella 2.47: Livelli di difettosità dell'elemento

L'*Indice pesato di difettosità* D_p è un indice sullo stato di difettosità comprensivo di un peso basato sul la funzione dell'elemento stesso. È dato dal prodotto dell'indice di difettosità del singolo elemento per il coefficiente di importanza dello stesso:

$$D_p = D_c \cdot r_i = d_i \cdot e_i \cdot r_i$$

In questo modo, il valore di D_p va da 0 a 80

$\mathbf{D_p}$	**Difettosità pesata**
$\mathbf{0 \leq D_p \leq 10}$	Bassa
$\mathbf{10 < D_p \leq 30}$	Media
$\mathbf{30 < D_p \leq 80}$	Alta

Tabella 2.48: Livelli di difettosità pesata dell'elemento

A prima vista i range di difettosità pesata sembrano essere fortemente asimmetrici e sbilanciati verso la difettosità alta. I range, infatti, non sono stati stabiliti sulla base dei numeri naturali effettivamente compresi tra 0 e

80, perché in questo dominio si celano dei "buchi". Ci sono dei numeri che non è possibile ottenere dalla combinazione dei tre fattori: si pensi ai numeri primi maggiori di 5 e tutti i loro multipli. Per esempio, dalla combinazione di d e r non è possibile ottenere nessun numero compreso tra 65 e 79.

Per questo motivo, se si avesse una suddivisione in parti uguali basata solo sui numeri naturali compresi tra 0 e 80 e quindi da 0 a 26, da 26 a 54 e da 54 a 80. I numeri nella fascia alta che veramente possono uscire sono solo 3: 60 64 e 80. In fascia media si avrebbero 7 numeri effettivi, in bassa 15. Se poi si considera che uno stesso valore di Dp può essere ottenuto da più combinazioni, questa asimmetria si fa ancora più grande: si avrebbero quindi 62 possibili combinazioni in fascia bassa, 15 in fascia media e 4 in fascia alta.

Per questi motivi si è operata una divisione in range sulla base delle effettive combinazioni possibili e sulla base del significato reale di quelle combinazioni. Con la suddivisione proposta si hanno 33 combinazioni in fascia bassa compreso lo 0, 32 in fascia media e 16 in fascia alta.

A questo punto si valutano gli indici aggregativi.

L'*Indice di difettosità globale* D_g è calcolato come la media degli indici pesati di difettosità di tutti gli n elementi dell'edificio in esame. A questo indice viene associato il *voto del peggiore*, D_w (*w=worst*) ossia il valor massimo tra tutti gli indici pesati di difettosità. Nel calcolo dell'indice di difettosità globale sono inclusi anche gli elementi sani, ossia quelli con punteggio nullo.

$$D_g = \frac{1}{n} \cdot \sum_i D_{p_i}$$

$$D_w = \max\left\{D_{p_i}\right\}$$

L'indice di difettosità globale e il voto del peggiore vengono presentati insieme: $\{D_g; D_w\}$

L'*Indice VGR* si rifà ai livelli di difettosità pesata per il singolo elemento. Ai livelli di difettosità pesata viene associato un codice colore di tipo semaforico, riportato in Tabella 2.49. Ad ogni codice colore si attribuisce la percentuale di elementi sul totale a cui è stato attribuito quel livello di difettosità.

D_p	**Difettosità pesata**	**Codice colore**
$\mathbf{0 \leq D_p \leq 10}$	Bassa	Verde
$\mathbf{10 < D_p \leq 30}$	Media	Giallo
$\mathbf{30 < D_p \leq 80}$	Alta	Rosso

Tabella 2.49: Livelli di difettosità pesata dell'elemento e codice colore

L'indice VGR viene presentato come sequenza dei tre valori, es: [60%;30%;10%].

L'*indice di difettosità pesata per ambiente* è dato dalla media matematica degli indici pesati di difettosità, ma in questo caso non viene calcolato globalmente per l'intero edificio: il calcolo dell'indice viene fatto per ambiente. Sono inclusi anche gli elementi sani, ossia quelli con punteggio nullo. Questo indice viene pensato per un duplice scopo: il primo è quello di individuare fenomeni che interessino più elementi adiacenti. Il secondo è quello di fornire al committente un'informazione rapida su quali ambienti si debba eventualmente limitare l'accesso. Sempre a beneficio del committente, questo indice ben si presta ad una restituzione grafica, per esempio in pianta, in modo da dare un'idea a colpo d'occhio di quali siano gli ambienti più critici dell'edificio. Inoltre, dati forniti in questa forma sono adatti ad essere incrociati con altri tipi di informazioni, come destinazione d'uso e livello di affollamento.

Nella tabella successiva vengono riassunti gli indici proposti e relativo significato.

	Sigla	Nome indice	Significato
Singoli	$\mathbf{D_c}$	Indice di difettosità dell'elemento	Descrive stato di difettosità basata sul tipo di difetto presente e la sua estensione.
	$\mathbf{D_p}$	Indice di difettosità pesata	Descrive stato di difettosità (tipo di difetto e estensione) e contiene informazioni sul ruolo strutturale dell'elemento stesso.
Aggregativi	$\mathbf{D_g}$; $\mathbf{D_w}$	Indice di difettosità globale + voto del peggiore.	Descrive lo stato di difettosità, compresa del valore strutturale, di tutti gli elementi dell'edificio analizzato.
	VGR	Indice VGR	Esprime in percentuale a quanti elementi è stato attribuito ogni codice colore.
	$\mathbf{D_z}$	Indice a zona	Contiene informazioni analoghe all'indice globale ma limitate ad una porzione dell'edificio.

Tabella 2.50: Schema riassuntivo indici

2.4.2.5 Verifica di coerenza

Prima di testare il metodo sul caso studio, si procede ad una verifica matematica per la coerenza dei valori stabili per i coefficienti. La verifica viene fatta sull'indice di difettosità pesata: si analizza un caso per ognuno dei tre livelli di difettosità. I casi sono costruiti a ritroso: a partire da un valore fissato di D_p, si costruiscono le combinazioni di coefficienti che moltiplicati tra loro danno come risultato quel valore di D_p. Sulla base dei diversi coefficienti vengono formulati ipotesi di situazioni riscontrabili nella realtà e si verifica che l'indice D_p non sia sovrastimato o sottostimato.

$\mathbf{D_p}$	**Difettosità pesata**
$\mathbf{0 \leq D_p \leq 10}$	Bassa
$\mathbf{10 < D_p \leq 30}$	Media
$\mathbf{30 < D_p \leq 80}$	Alta

Tabella 2.51: Valori indice di difettosità pesata

Si considera come primo caso un livello di difettosità pesata basso, ossia $D_p = 4$. Nella tabella successiva si riportano le terne di coefficienti che danno come risultato $D_p = 4$. Per ogni terna si propone un esempio.

$d_i \cdot e_i \cdot r_i$	**Esempio**
$2 \cdot 2 \cdot 1$	Nidi di ghiaia per un'estensione minore di un terzo dell'elemento, di un muretto da esterno in cemento armato (quindi esposto a acqua e gelo)
$2 \cdot 1 \cdot 2$	Rigonfiamento senza fessurazione di un pannello verticale mobile
$1 \cdot 2 \cdot 2$	Efflorescenza, per un'estensione minore di un terzo dell'elemento, di una pavimentazione in PVC
$1 \cdot 1 \cdot 4$	Macchia di umidità estesa per meno di un quarto di una scalinata
$1 \cdot 4 \cdot 1$	Efflorescenze che ricoprono per più del 60% di un elemento di arredo esterno.
$4 \cdot 1 \cdot 1$	Distacco del copriferro, minore di un terzo dell'elemento, armatura non esposta di un muretto da esterno

Tabella 2.52: Verifica di coerenza per un indice di difettosità bassa

Le situazioni proposte sono congruenti con un livello di difettosità basso. Inoltre, dal confronto tra le diverse situazioni che portano allo stesso valore dell'indice di difettosità pesata non emergono discrepanze.

Nel secondo caso, si considera un valore di indice di difettosità pesata medio, che rientri nel codice giallo: $D_p = 16$.

$d_i \cdot e_i \cdot r_i$	**Esempio**
$1 \cdot 4 \cdot 4$	Alterazione degli strati protettivi per una superficie maggiore del 60% dei supporti in acciaio di un cartellone di 8m²
$4 \cdot 1 \cdot 4$	Distacco del copriferro, minore di un quarto dell'elemento con armatura non esposta su una scala in cemento armato.
$4 \cdot 4 \cdot 1$	Distacco del copriferro, per una superficie di oltre 60% di un muretto da esterno, con armatura esposta
$2 \cdot 2 \cdot 4$	Distacco e dilavamento malta per estensione <60% con mattoni esposti per profondità <50% su un muro esterno in laterizio.
$2 \cdot 4 \cdot 2$	Rigonfiamento con fessurazione di un pannello verticale divisorio nei servizi igienici
$4 \cdot 2 \cdot 2$	Marcescenza per estensione >60% di un telaio in legno.

Tabella 2.53: Verifica di coerenza per un indice di difettosità media

Non si riscontrano contraddizioni tra le situazioni proposte e il livello di difettosità medio. Paragonando le diverse situazioni che portano allo stesso valore dell'indice di difettosità pesata non emergono incompatibilità.

Nel terzo caso, si considera un valore di indice di difettosità pesata alto, che rientri nel codice rosso: $D_p = 48$.

$d_i \cdot e_i \cdot r_i$	**Esempio**
$3 \cdot 4 \cdot 4$	Presenza di red spot per estensione >60% sulla rampa di una scala in acciaio da esterni
$4 \cdot 3 \cdot 4$	Instabilità e possibile rimozione di balaustra su balconata oltre 2m di altezza da piano stabile
$4 \cdot 4 \cdot 3$	Rottura localizzata per estensione >60% di un'impermeabilizzazione

Tabella 2.54: Verifica di coerenza per un indice di difettosità alta

Non emergono incongruenze tra le situazioni proposte e il livello di difettosità alto. Comparando le diverse situazioni che portano allo stesso valore dell'indice di difettosità pesata non emergono discordanza.

Si procede ora ad una verifica trasversale: si calcola il valore massimo di D_p per ogni valore del coefficiente di importanza elemento r_i e si verifica che il livello di difettosità sia coerente con un esempio concreto.

$d_i \cdot e_i \cdot r_i$	D_p	**Difettosità**	**Colore**	**Esempio**
$4 \cdot 4 \cdot 1$	16	Media	Giallo	Marcescenza panchina in legno
$4 \cdot 4 \cdot 2$	32	Media	Giallo	Distacco elementi per superficie >60% di pavimentazione
$4 \cdot 4 \cdot 3$	48	Alta	Rosso	Distacco elementi per superficie >60% di impermeabilizzazione
$4 \cdot 4 \cdot 4$	64	Alta	Rosso	Balaustra di una balconata a quota oltre 2m rotta
$4 \cdot 4 \cdot 5$	80	Alta	Rosso	Distacco del copriferro pilastro

Tabella 2.55: Verifica di coerenza per difettosità massima per ogni categoria

Tutti gli esempi riportati in tabella risultano coerenti con il codice colore corrispondente. Può sembrare strano che anche per elementi con coefficiente di importanza elemento $r_i = 1$ si abbia un codice colore giallo, ma bisogna tenere a mente che comunque un elemento con massimi coefficienti di entità

e estensione difetto. Bisogna tenere dunque in considerazione eventuali effetti su elementi circostanti, la creazione di situazioni di rischio e la spesa economica per interventi di riparazione o sostituzione.

Si ritengono dunque soddisfatte tutte le verifiche di congruenza proposte.

2.4.3 L'ispezione

Per quanta esperienza possa avere l'ingegnere, è sempre bene studiare il sistema edilizio prima dell'ispezione per limitare quanto possibile sorprese e imprevisti. Le principali di fonti d'informazione sono di tipo documentale: disegni e capitolato di progetto, resoconti di interventi successivi, cronistoria di eventi naturali e incidentali. Tuttavia, nel caso di edifici con un lungo trascorso alle spalle non sempre sono reperibili e più ci si allontana nel passato, più le informazioni si fanno rade. Per esempio, i documenti di progetto originali di edifici del secolo scorso e oltre probabilmente sono in formato cartaceo, e anche se ben conservati, non è detto che siano stati digitalizzati perché l'operazione richiede tempo. Nel caso di edifici con rilevanza storico – artistica, alcuni documenti potrebbero essere andati persi. Edifici che hanno subito eventi catastrofici come incendi, alluvioni, sismi, guerre, esplosioni potrebbero aver avuto bisogno di interventi più o meno complessi, non necessariamente documentati. Lo stesso vale per interventi di ampliamento o restaurazione o interventi minori.

È chiaro quindi che ottenere una documentazione completa per edifici già vecchi, che hanno avuto diversi passaggi di proprietà, variazione di destinazione d'uso, e che hanno superato guerre, disastri naturali o di origine antropica è utopia. Se disponibili, i documenti vanno consultati perché si può abbassare il livello di incertezza su quanto visto in fase di ispezione, ma il presente metodo è stato pensato per non essere strettamente dipendente dalle fonti documentali e in modo da essere applicabile anche in caso di assenza totale di informazioni preliminari. L'unica eccezione è costituita dalle planimetrie, senza le quali l'ispezione diventa disorganizzata e dispersiva.

A livello documentale è indispensabile consultare planimetrie e disegni di progetto. La numerazione anticipata di tutti gli elementi da analizzare durante il sopralluogo velocizza e semplifica il rilievo dei difetti. Se esiste già

una numerazione adottata dal gestore o proprietario è bene mantenere la coerenza usando quella già disponibile. Un' eventuale incoerenza dei disegni con la realtà sarebbe grave, ma la verifica delle informazioni non è oggetto di questo studio, come invece accade per il rilascio del Certificato di Idoneità statica del Comune di Milano (cfr. 1.3.3).

Se sono disponibili i documenti originali o di interventi successivi, il compito dell'ingegnere è facilitato se prima dell'ispezione si riesca a ricostruire per ogni elemento:

- collocazione;
- funzione strutturale;
- materiale;
- anno di posa in opera.

Nel caso in cui queste informazioni non fossero disponibili sono possibili due strade alternative: la ricerca attraverso normative, manuali, pratiche di anni passati oppure l'intervista a gestori e operatori della manutenzione, che nel corso di interventi di minori hanno sviluppato un certo livello di conoscenza, basata sull'esperienza. Entrambe queste vie, però, possono essere dispendiose in termini di tempo e a priori non c'è certezza di ottenere risultati concreti e attendibili. La scelta di ricorrere o meno queste pratiche dipende da due fattori: quanto sia necessario e il livello di approfondimento richiesto dal cliente. Il metodo può essere applicato anche senza avere una conoscenza preliminare completa, proprio perché è basato su quel che è evidente e perché non ha la pretesa di fare diagnosi strutturali ma solo di avere una fotografia dello stato di degrado dell'edificio.

È possibile che siano state condotte in precedenza ispezioni, indagini diagnostiche o analisi di laboratorio. È vero che questi forniscono informazioni più approfondite rispetto quelle ottenibili da un metodo speditivo, ma potrebbero non essere facilmente integrabili con esso. Indagini approfondite possono essere puntuali o fortemente localizzate. Invece in questo metodo si ambisce ad avere uno sguardo ampio seppur poco approfondito. La disponibilità di informazioni aggiuntive può esser utile per l'ingegnere per poter identificare meglio il fenomeno in fase di ispezione. Inoltre, avere un riferimento nel passato può essere utile per studiare l'evoluzione del fenomeno del tempo. Questo argomento, non strettamente

attinente al metodo qui proposto, verrà ripreso nel Capitolo 4, in riferimento alle politiche di manutenzione.

Vista la rilevanza che le masse appese rivestono ai fini della sicurezza e, di conseguenza, in questo metodo, è necessario che l'ingegnere abbia completa accessibilità alla struttura in particolare per verificare lo stato di integrità degli ancoraggi.

L'ispezione è condotta da ingegnere o da un tecnico del settore e dev'essere il più possibile a distanza di contatto, senza l'uso di strumentazioni di impiego lento e complicato. Ad esempio, è accettabile l'uso di un distometro, ma non di un laser scanner.

La scheda da compilare è una tabella in cui, in fase di ispezione, vengono riportati il materiale dell'elemento, l'entità e l'estensione del difetto riscontrato. Nella prima colonna è riportato il codice identificativo assegnato all'elemento in fase di preparazione. Nella seconda colonna il materiale: questo non costituisce un coefficiente di per sé ma semplifica l'assegnazione dei coefficienti successivi. La terza e la quarta colonna riguardano il difetto riscontrato: l'entità e l'estensione. L'ultima colonna è dedicata alle "Note", laddove l'ingegnere abbia bisogno di annotare informazioni utili per le fasi successive.

Vengono riportati tutti gli elementi, anche quelli che a vista risultano sani.

ID elemento	**Materiale**	**Entità Difetto**	**Estensione**	**Note**
Pilastri				
P1.1				
P1.2				
...				
Trave				
T1.1				
T2.1				
...				

Tabella 2.56: Modello di scheda per l'ispezione

2.4.4 Prescrizioni

Le prescrizioni sono formulate sulla base dei valori ottenuti per l'indice di difettosità globale con il voto del peggiore e al codice colore ad esso associato.

In particolare, la coppia $\{D_g; D_w\}$ può avere le seguenti combinazioni, in termini di codice colore:

		D_w		
		V	G	R
D_g	V	VV	VG	VR
	G	–	GG	GR
	R	–	–	RR

Tabella 2.57: Possibili combinazioni per la coppia $\{D_g; D_w\}$

Di tutte le combinazioni possibili, solo quelle in cui il codice colore del voto del peggiore è più grave a quello dell'indice di difettosità globale hanno senso in questo contesto.

Si riportano di seguito i suggerimenti su quali politiche e strategie adottare in ogni caso.

$\{D_g; D_w\}$	**Prescrizioni**
$\{\boldsymbol{V}; \mathbf{V}\}$	Non vengono applicate limitazioni o richiesta di indagini o interventi.
$\{\boldsymbol{V}; \mathbf{G}\}$	Non vengono applicate limitazioni. Si consiglia di indagare sulle cause degli elementi con codice colore giallo e, se necessario, aumentare la frequenza di sopralluoghi localizzati.
$\{\boldsymbol{V}; \boldsymbol{R}\}$	Non vengono applicate limitazioni. Si prescrivono indagini approfondire sui codici colore rosso per definire cause, situazioni di rischio e intervento.
$\{\boldsymbol{G}; \boldsymbol{G}\}$	Richieste indagini sugli elementi e su eventuali fenomeni più ampi che interessino più elementi. Si consiglia di aumentare frequenza di sopralluoghi complessivi
$\{\boldsymbol{G}; \boldsymbol{R}\}$	La frequenza dei sopralluoghi è aumentata. Si prescrivono indagini sui codici colore rosso per definire cause, situazioni di rischio e intervento.
$\{\boldsymbol{R}; \boldsymbol{R}\}$	Viene limitato l'accesso. Sono richieste indagini approfondite sulle cause di guasto e interventi urgenti.

Tabella 2.58: Prescrizioni per le coppie $\{D_g; D_w\}$

Si tenga a mente che l'indagine è applicata a tappeto su tutti gli elementi presenti nell'edificio, per cui non è possibile prescrivere misure con maggiore precisione. L'importante è approfondire il livello di conoscenza su ogni situazione presente nell'edificio e analizzare scenari di rischio.

2.5 Conclusioni

Il metodo è stato definito con una particolare attenzione nella definizione degli elementi oggetto di indagine e del loro ruolo strutturale. Ad ogni elemento è stata applicata un'analisi dei modi e degli effetti dei guasti (FMEA). Sulla base dei risultati dell'analisi sono stati definiti due coefficienti per poter descrivere lo stato di danno di ogni elemento, considerando l'*entità* e l'*estensione* del difetto. Un terzo coefficiente tiene in considerazione la funzione strutturale e la *relevance* di ogni elemento. I parametri scelti per l'assegnazione di ogni coefficiente sono pensati per poter essere rapidamente verificabili durante ispezione. Inoltre, sono fornite indicazioni e soglie numeriche, in modo da rispettare il requisito di uniformità e proporzionalità delle misure.

Sulla base dei tre coefficienti vengono calcolati due indici di difettosità singoli e tre indici di difettosità aggregativi. Ogni indice è accompagnato da una scala di valutazione e un codice colore, per poter avere una valutazione il più possibile chiara e intuitiva. Sulla base di uno di questi indici sono stilate delle prescrizioni, che indicano al gestore come approfondire il livello di conoscenza delle criticità, ma senza costituire limitazioni nella libertà di scelta, riconoscendo che le tecniche e attività da attuare vanno valutate caso per caso.

Capitolo 3

Caso studio: la stazione di Torino Porta Nuova

3.1 Introduzione

Nel seguente capitolo viene descritta l'applicazione del metodo per la valutazione sintetica dello stato di integrità ad un caso reale al fine di tarare i coefficienti proposti e verificare la congruenza matematica dell'algoritmo. Dopo la descrizione e l'inquadramento dell'opera, con focus sulle zone oggetto di indagine, si evidenzieranno le criticità emerse sia in fase ispettiva che nell'analisi dei dati e come queste siano state affrontate.

Verranno dunque esposti i risultati dell'applicazione del metodo e commentata l'efficacia degli indici.

Si conclude il capitolo verificando se il metodo soddisfi i prerequisiti definiti nel Capitolo 1.

3.2 Storia e inquadramento

La stazione di Torino Porta Nuova è la terza grande stazione italiana, con circa 192 mila transiti giornalieri e 70 milioni di frequentatori l'anno [1]. Situata nel centro di Torino, oltre ad essere la principale stazione cittadina, è

1 Dati ufficiali Grandi Stazioni Rail S.p.A.

anche un importante punto di interscambio del trasporto pubblico locale e regionale.

La storia della stazione affonda le radici nel lontano Regno di Sardegna. Nel 1860 il commendator Bona, Direttore Generale delle Strade Ferrate dello Stato, diede all'ingegner Mazzucchetti l'incarico di eseguire il progetto di risistemazione del complesso della Stazione di Porta Nuova. Progetto di risistemazione, in quanto, dal 1849 (anno della istituzione del primo *Imbarcadero* per Genova) ad allora, vari edifici vennero via via realizzati in modo disorganico per soddisfare le crescenti esigenze che il trasporto ferroviario in impetuosa crescita andava a determinare.

Aldo Mazzucchetti (1824 – 1894) era un ingegnere che già si era distinto, giovanissimo, nella costruzione della stazione di Alessandria (1849 – 60), e in seguito di Genova Principe (1853 – 60). Piemontese, si formò alla scuola di Carlo Promis (progettista delle espansioni urbanistiche torinesi di metà '800 e anche del "Piano Fuori Porta Nuova" del 1851 e quindi di Piazza Carlo Felice, antistante all'arrivo dei binari ferroviari). Per la sua esperienza e per la sua organicità al contesto tecnico progettuale della capitale sabauda, era dunque il progettista ideale per l'incarico della costruzione della Stazione di Porta Nuova.

Nel corso del progetto, Mazzucchetti venne coadiuvato da Carlo Ceppi (1829 – 1921), anch'egli allievo di Promis e che in seguito divenne uno degli architetti più importanti di Torino degli ultimi decenni dell'ottocento. L'apporto di Ceppi probabilmente incise sul progetto soprattutto per quando concerne il disegno delle facciate.

I lavori del primo impianto, iniziati nel dicembre del 1861, si protrassero fino al 1868.

I treni entravano direttamente entro una grande tettoia posta fra due corpi di fabbrica. Verso via Nizza (a levante) quelli in partenza e verso via Sacchi quelli in arrivo. *"...il vantaggio incontrastabile di separare i servizi di arrivo e partenza, valgono a spiegare il concetto della disposizione adottata, per cui a fianco e parallelamente ai binari vennero stabilite due fabbriche principali e distinte, a levante per la partenza e a ponente per l'arrivo dei convogli, congiunte insieme dalla tettoia centrale a sosta dei convogli stessi. [...] Un semplice porticato a tramontana (*lato corso Vittorio, ndr*) serve a fornire una comunicazione esterna fra le due fabbriche e a chiudere la tettoia centrale per difendere l'ambiente interno dalle intemperie, mentre l'estremità opposta, verso mezzogiorno, interamente aperta, da varco ai convogli..."* (14).

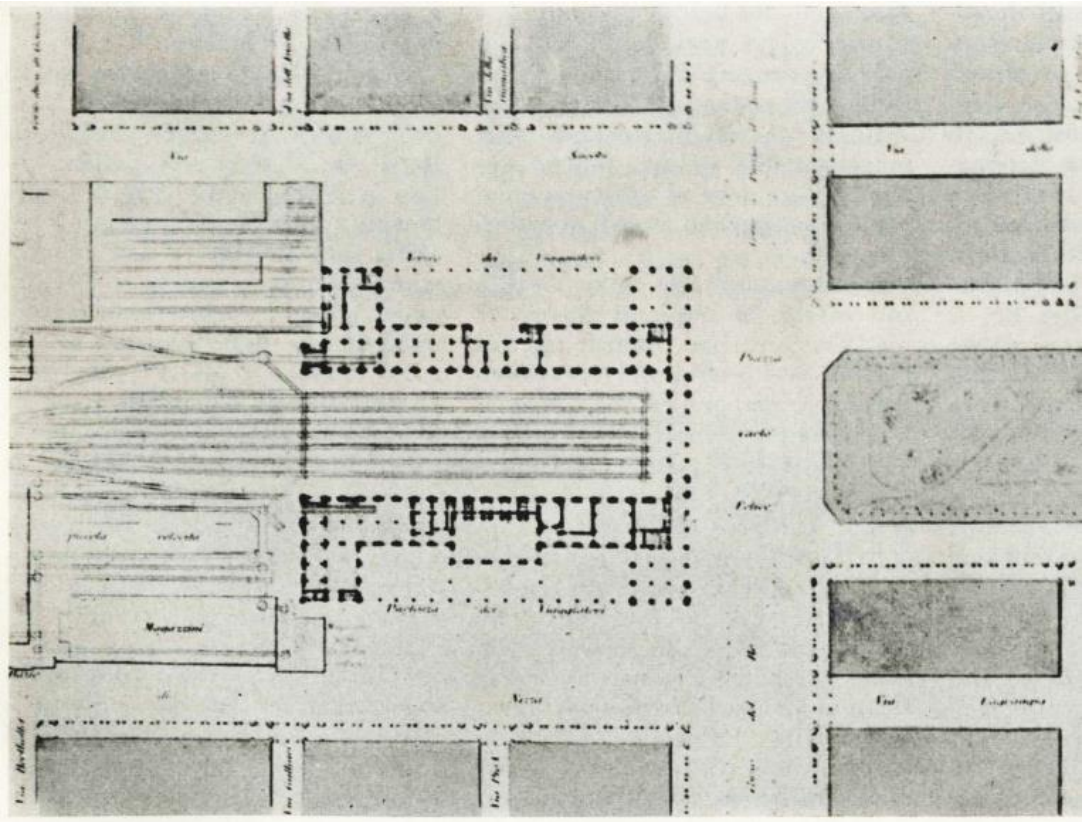

Figura 3.1:Planimetria del progetto del Mazzucchetti del 1861 (21)

L'ingresso principale, posto su via Nizza in prossimità dei treni in partenza, in posizione centrale dell'edificio di levante, rende l'impianto originario diverso dall'intendimento più recente riguardante le stazioni di testa, in cui l'asse d'ingresso è in genere parallelo ai binari. Si trattava invece

di una impostazione bilaterale, simile a quella della stazione di King's Cross a Londra, di poco antecedente.

Le maniche su via Nizza e su via Sacchi erano poste in arretrato rispetto alle vie, a costruire ampi piazzali antistanti. L'elemento di maggiore impegno e rilevanza costruttiva fu la copertura metallica posta fra i fabbricati su via Nizza e via Sacchi. Le sue centine metalliche ad arco semicircolare di 48m di luce incastrate alle imposte, senza catena, davano luogo ad una copertura di grande luce di caratteristiche non ancora realizzate in Italia, e da poco sperimentata in strutture per grandi Esposizioni internazionali, quali ad esempio quella di Dublino del 1853 e della volta centrale dell'edificio dell'Esposizione Universale di Parigi del 1855 (anch'essa di 48m di luce).

La galleria centrale, coperta da questa volta era lunga 142m e conteneva 7 binari.

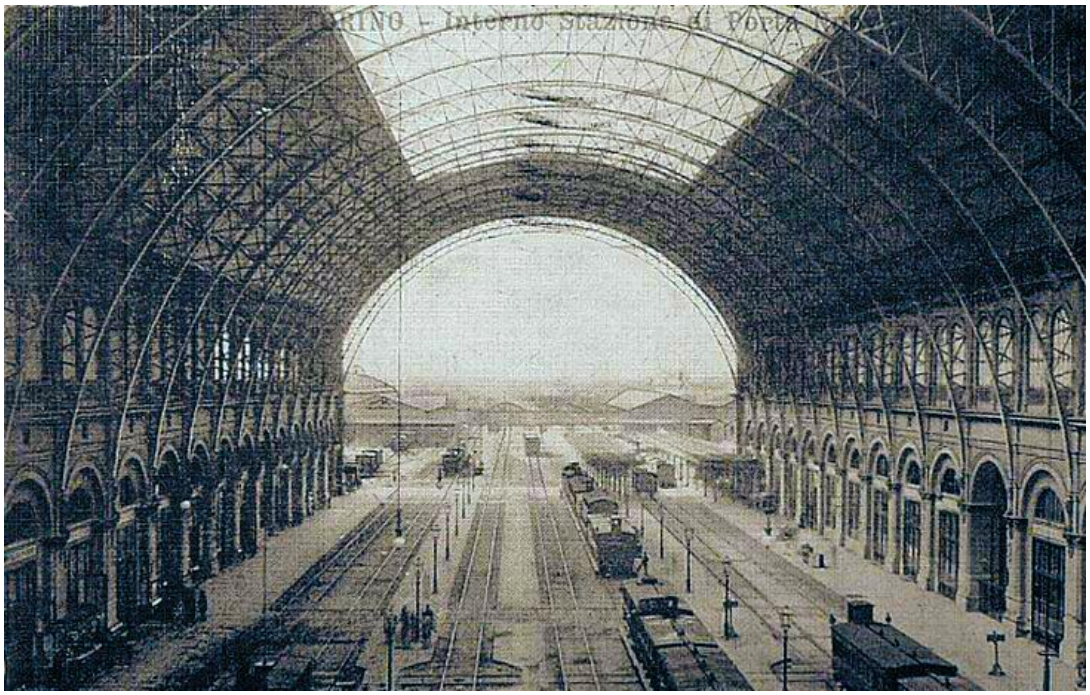

Figura 3.2: Stazione di Porta Nuova. Interno della grande tettoia nel 1892 (21)

L'ingresso principale, come si è accennato, era posto sull'asse del fabbricato su via Nizza, con grande ambiente di ingresso con biglietteria, di cui è visibile e ben conservato l'apparato decorativo (il salone degli stemmi), in cui anche di recente fu posta una biglietteria provvisoria. Al fianco del salone degli stemmi si trova l'interno maggiormente pregiato del complesso,

la cosiddetta *Sala Gonin* dal nome del pittore Francesco Gonin (1808 – 1889) che l'affrescò. La *Sala Gonin,* già denominata *Sala Reale,* era destinata alla sala d'attesa di prima classe.

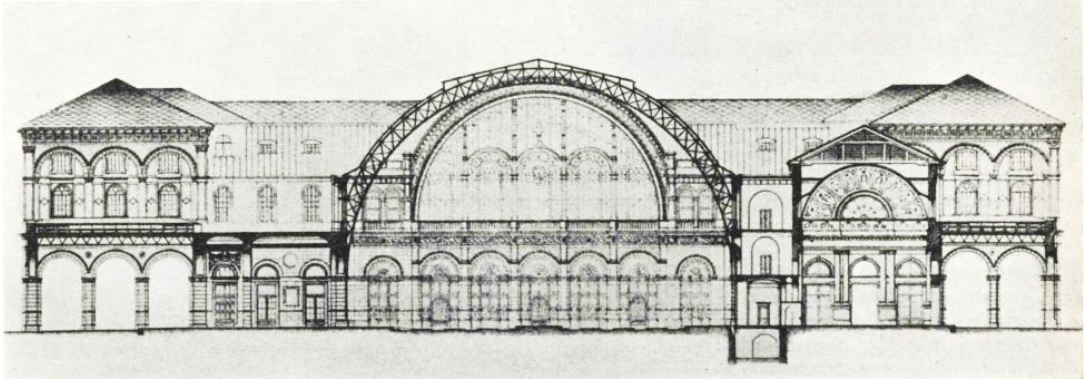

Figura 3.3:Stazione di Porta Nuova. Prospetto principale nel progetto originale di Mazzucchetti del 1867 (21)

L'impianto complessivo era leggermente dissimmetrico a causa della preesistenza, da mantenere, dell'officina di riparazione delle locomotive, posta dal lato di via Sacchi, che verrà in seguito sopraelevata fino ad assumere l'attuale aspetto, come lo stesso Mazzucchetti non mancò di rilevare nella sua relazione (14).

Nonostante il declassamento di Torino da capitale a capoluogo, la stazione di Porta Nuova si rivelò ben presto non sufficiente, a dispetto di chi sosteneva inizialmente fosse sovradimensionata e troppo grandiosa, a causa dello sviluppo industriale e della crescita demografica della città.

In occasione dell'Esposizione Universale di Torino nel 1911 i binari vennero portati da 7 a 13 e aumentati i servizi, ricavando tra l'altro nuovi locali biglietteria e ristoranti (con chioschi angolari) al di sotto della grande volta dietro il portico di piazza Carlo Felice. Sul piano generale è da notare che, sebbene permanesse la divisione netta fra partenze e arrivi, fosse ormai decaduta l'iniziale impostazione con asse trasversale. Da notare anche la presenza dell'edificio della polizia (che in seguito verrà ampliato) accostato alla torre sud-est, peraltro, sul sedime di un edificio già preesistente, come può notarsi nella planimetria di progetto ordinario in Figura 3.4.

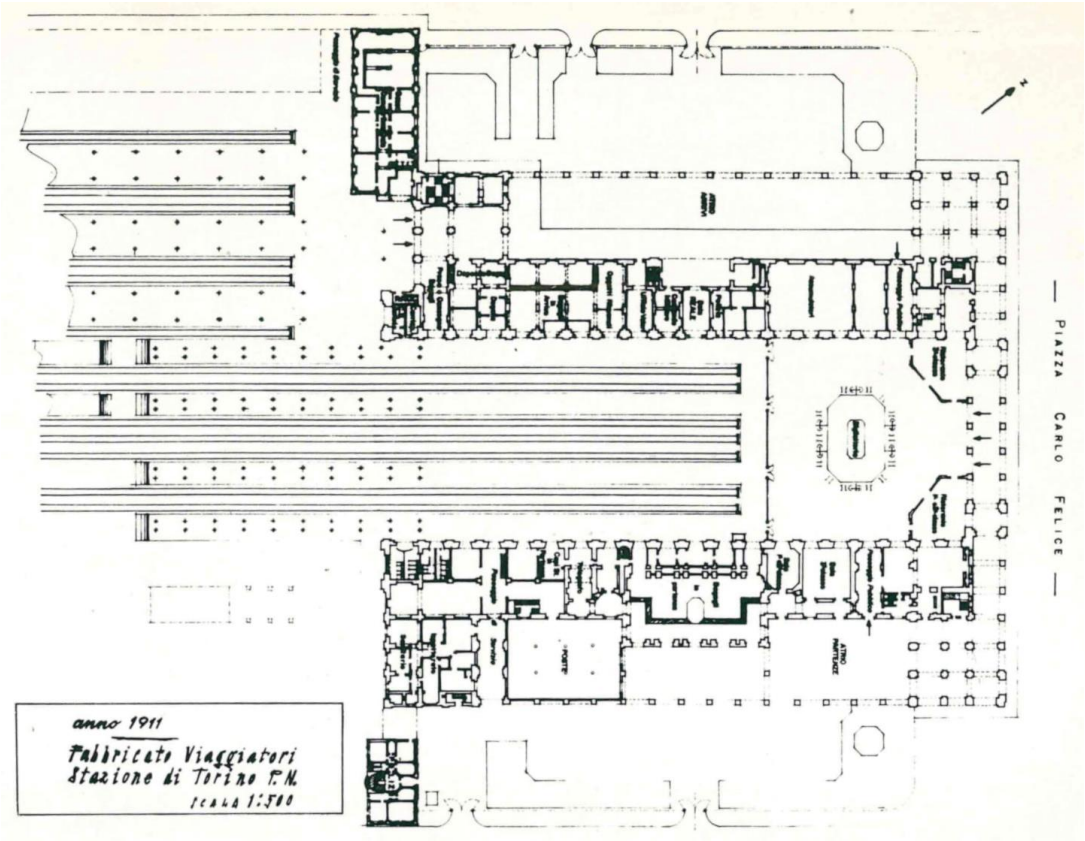

Figura 3.4: Stazione di Porta Nuova. Planimetria generale nel 1911 (22)

Nel 1940 venne terminato il grande edificio su via Nizza, destinato prevalentemente a uffici postali, lungo complessivamente oltre 210m, progettato dall'ufficio tecnico delle ferrovie e tuttora esistente.

Nel 1941 venne demolita la grande volta in ferro originale, al fine di ricavare ferro per i fini bellici. L'attuale volta dell'atrio lato piazza Carlo Felice, venne realizzata a partire dal 1948.

Nel 1950 venne presentato al pubblico il nuovo progetto nelle sue linee organizzative principali, che poi caratterizzeranno effettivamente Porta Nuova fino all'intervento di riqualificazione recentemente concluso, e in parte ancora oggi. Fra le novità principali del nuovo assetto:

- arretramento dei binari (divenuti 20) oltre i fabbricati storici;
- salone della biglietteria in zona centrale fra i due fabbricati di via Nizza e via Sacchi; questi sopraelevati con nuovi volumi;
- atrio direttamente legato ai portici di Corso Vittorio, sotto la nuova volta in cemento armato;

- la “galleria di testa”, grande tettoia posta perpendicolarmente ai binari di collegamento fra fabbricati storici e inizio dei binari stessi.

I locali della biglietteria, inaugurati nel 1951, tuttavia, i lavori vennero definitivamente completati solo nel 1955 (15).

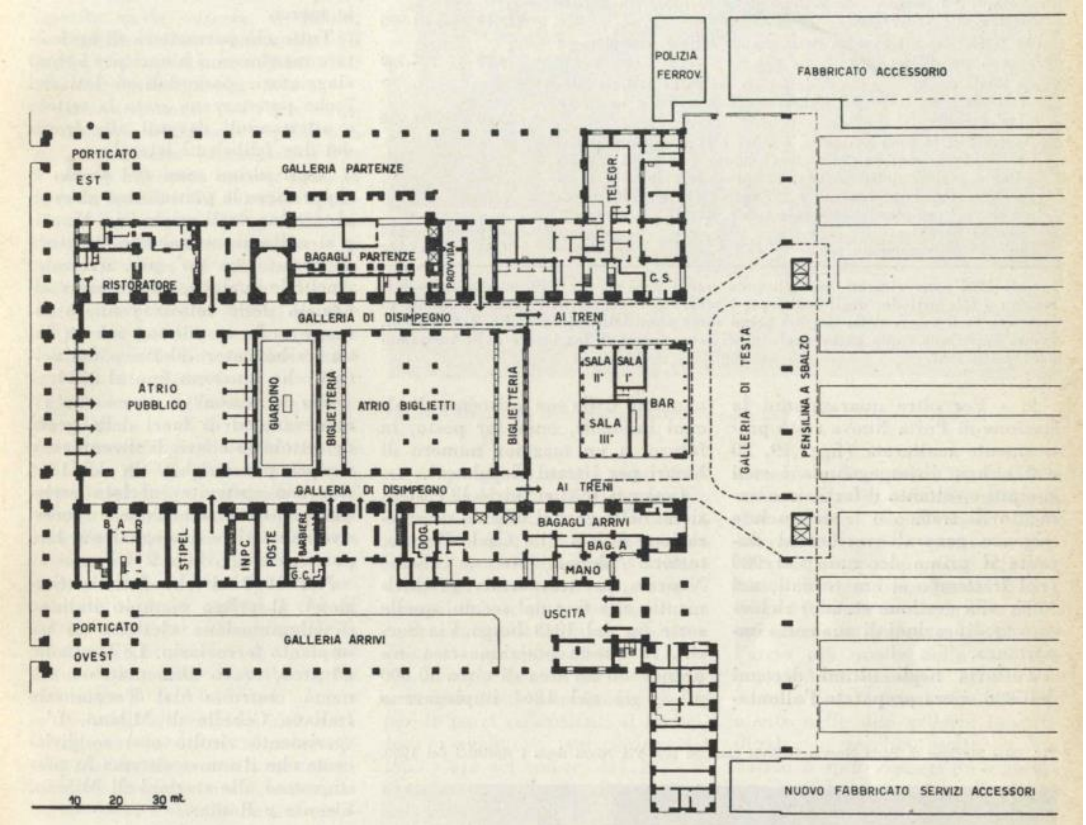

Figura 3.5: Stazione Porta Nuova dopo i lavori del 1948 - 1955 (21)

Lo spazio in precedenza coperto dalla grande volta metallica venne coperto, oltre che dalla nuova volta in cemento armato posta sull’atrio di piazza Carlo Felice, dai solai piani sorretti da travi incrociate, sia lateralmente alla nuova volta che anteriormente, sopra la nuova biglietteria. Nei campi centrali del cassettone così formati vennero posti i lucernai. Questo ad eccezione del patio giardino posto fra l’atrio e la biglietteria, non coperto.

È pure qui opportuno menzionare anche altri lavori minori di questa ristrutturazione. La “Galleria Partenze” sul lato di Via Nizza venne riaperta eliminando i locali in precedenza ricavati al suo interno.

Il corpo di fabbrica lato via Sacchi venne sopraelevato per ricavare ulteriori uffici, con copertura realizzata con volta mista in cemento armato e laterizio fu realizzato con sistema ST’AR RDB o similare.

L'intervento di riqualificazione dei primi anni 2000 (2006 – 2010) ha riguardato essenzialmente gli spazi interni della stazione. In particolare, è stato completamente ridisegnato l'assetto dell'antico salone dei treni come configurato nell'intervento degli anni '50. È stato realizzato un piano ammezzato entro il volume del salone centrale, servito da scale mobili e ascensori direttamente dal piano ferro. Il patio dell'ex giardino è stato coperto con una copertura vetrata; nuovi spazi commerciali sono stati allestiti all'interno. La tettoia lato via Sacchi, restaurato nella struttura e rinnovato nella copertura dell'estradosso, è stato parzialmente chiuso da facciate vetrate onde ottenere ulteriori spazi commerciali. L'atrio di corso Vittorio Emanuele II è stato collegato mediante scale mobili e ascensori alla stazione della metropolitana appena realizzata.

Tra il 2013 e il 2016 massicci interventi hanno riguardato le facciate, le coperture e il parcheggio. Le facciate, in particolare quelle che danno su corso Vittorio Emanuele II, su via Nizza e via Sacchi, sono state oggetto di un massiccio intervento di restauro e ripristino conservativo al fine di riportarle alle tinte originarie del progetto del 1861. Le coperture della volta centrale, dove si trovano ancora travi in legno del 1861, sono state oggetto di un massiccio intervento conservativo, mentre quelle di alcuni edifici su via Nizza e via Sacchi sono state rifatte *ex-novo*. Il parcheggio interrato, inaugurato nel 2016, si estende per quattro piani, per un totale di 250 automobili ospitabili.

Il complesso immobiliare della stazione di Torino Porta Nuova rientra nel perimetro di gestione di Grandi Stazioni Rail S.p.A., ma l'impianto ferroviario è gestito da RFI. Alcuni edifici del complesso sono di competenza di Ferrovie dello Stato Italiane o di FS Sistemi Urbani.

Il complesso immobiliare della stazione di Torino Porta Nuova si estende per 97.070 m², di cui i fabbricati occupano 92.747 m². Si tratta di 10 edifici a destinazione commerciale e/o terziaria, ad eccezione della Cappella di stazione (Edificio 9), dell'Edificio 4 (ex centrale termica ora destinata a locale tecnico) e della centrale termica (Edificio 6), localizzata in un'area distaccata rispetto agli edifici di stazione ricadenti in ambito GS Rail.

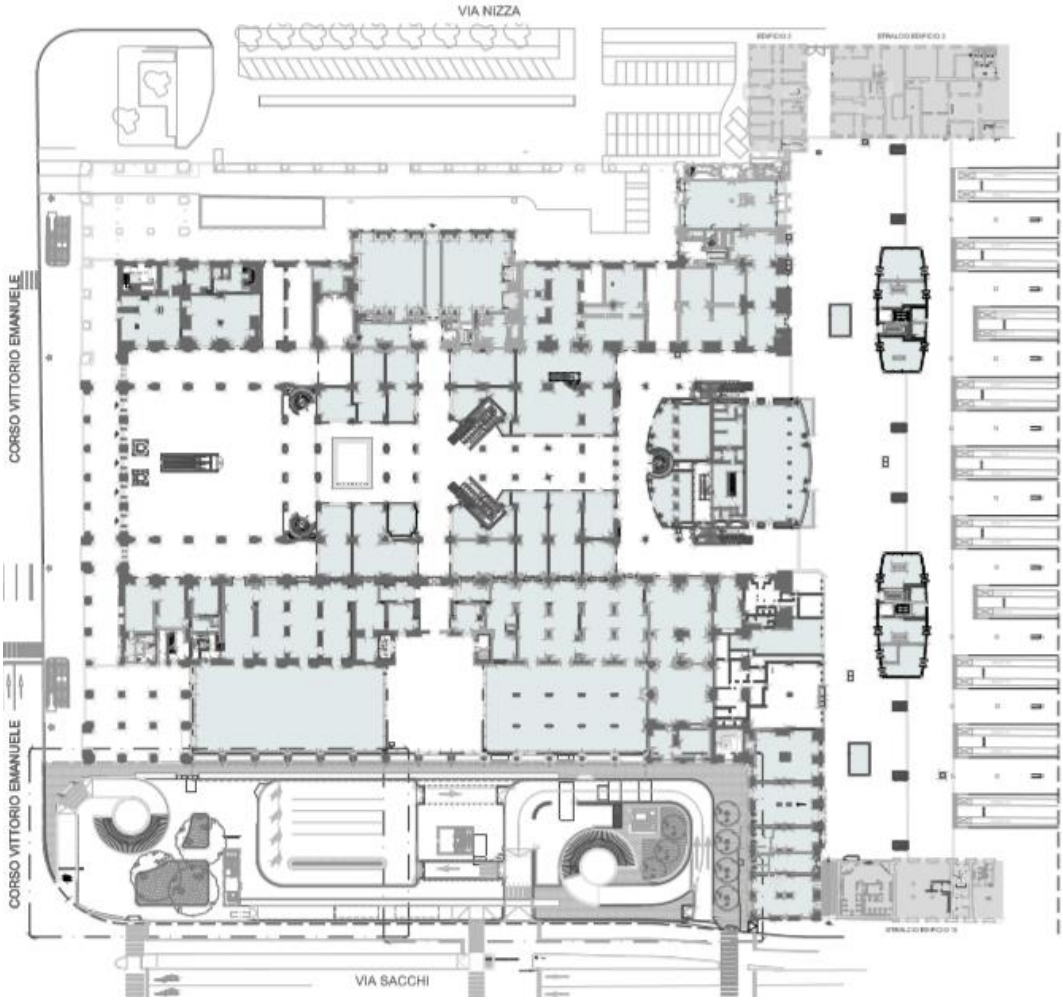

Figura 3.6: Stazione di Torino Porta Nuova. Planimetria dell'edificio viaggiatori nel 2019

L'accesso alla stazione avviene quasi esclusivamente al piano ferro dell'edificio viaggiatori (Edificio 1), dall'ingresso principale su corso Vittorio Emanuele e dagli ingressi laterali su via Nizza e via Sacchi; un ulteriore ingresso posto tra l'edificio 1 e l'edificio 10, lungo via Sacchi, consente un accesso diretto alla testata binari. La stazione Ferroviaria è inoltre accessibile dalla stazione della Metropolitana grazie ad un elemento di collegamento situato nell'atrio principale dell'Edificio Viaggiatori, difronte agli accessi su Corso Vittorio Emanuele II.

3.3 L'ispezione

La scelta delle zone a cui applicare il metodo di valutazione sintetica della difettosità di un edificio è avvenuta in modo da avere una doppia utilità. In

primis, l'attenzione è stata rivolta a quelle porzioni della stazione che potessero mettere alla prova il metodo così come era stato formulato. Durante un sopralluogo preliminare, riguardante in particolare le zone binari e le zone accessibili al pubblico, alcune porzioni dei binari 1 e 20 hanno immediatamente attirato l'attenzione. Entrambe le zone presentavano evidenti fenomeni di degrado, anche in diversi stadi di avanzamento, e sono dunque state incluse in questo studio. Inoltre, tenendo in conto l'esperienza e la conoscenza degli stessi gestori della stazione, i sottotetti della volta centrale e dell'edificio 7 sono stati aggiunti alle zone d'interesse dello studio.

La prima zona oggetto di studio è stata una porzione del binario 1, in particolare il tratto costeggiato dall'edificio di Poste Italiane. La porzione d'interesse, lunga 100m, ha una copertura in cemento armato con lamiere in acciaio alternate a pannelli semicircolari in vetroresina. Proprio la pensilina in cemento armato ad aver determinato la scelta per l'ispezione per la presenza di evidenti segni di degrado legato ad infiltrazioni di acqua negli interstizi tra il cemento armato e lamiere in acciaio o tra il cemento armato e la copertura in vetroresina. Si riporta un esempio in Figura 3.7.

Figura 3.7: Un tratto della copertura del Binario 1

Inoltre, il rivestimento in pietra dell'edificio di Poste Italiane presenta erosioni, fessurazioni e segni di urti dislocati in diversi punti punto il binario, ma sempre alla stessa altezza, come visibile in Figura 3.8.

Figura 3.8: Un tratto del rivestimento murario lungo il Binario 1

L'ispezione del Binario 1 è stata condotta il giorno 15 ottobre 2019 e ha riguardato 235 elementi in 3 ore e mezza.

La seconda zona inclusa nello studio è la porzione del Binario 20 costeggiata dagli edifici 10, 9 e 8, per una lunghezza di 150m. In questo caso la copertura è in laterocemento con moduli in vetrocemento. Le pareti degli edifici 10,9 e 8 hanno rivestimenti in pietra di diverse varietà.

Figura 3.9: Un tratto della copertura del Binario 20.

Anche in questo caso, la scelta è stata dettata dalla presenza di fenomeni di degrado legati ad infiltrazioni di acqua, per la maggior parte localizzati sugli elementi in vetroresina, e zone con esteso distacco di copriferro. Un esempio è riportato in Figura 3.9.

L'ispezione del Binario 20 è stata condotta il giorno 8 novembre 2019, con una durata di 3 ore, per un totale di 184 elementi ispezionati.

3.4 Criticità emerse e soluzione proposte

Le criticità riscontrate sono di diverso tipo. Innanzitutto, in alcuni casi è stato necessario modificare la codifica dei difetti riscontrati, in particolare ritoccando i coefficienti in modo che potessero fornire una rappresentazione utile e al contempo veritiera dei fenomeni. Tra questi il caso più significativo è quello della corrosione, per cui c'è stato bisogno di una ridefinizione sia dei coefficienti di entità difetto che di estensione difetto.

Seguono considerazioni circa la conduzione dell'ispezione. In particolare, vengono espresse precisazioni circa l'accessibilità agli elementi e l'ispezionabilità complessiva dell'opera durante il sopralluogo e le conseguenze dirette sui risultati della valutazione. Viene esposta la criticità riguardo la numerabilità dei macroelementi, quali per esempio le pavimentazioni, e si effettua un'analisi di come questa influenzi i risultati della valutazione

Infine, durante l'elaborazione dei dati sono state apportate delle modifiche agli indici definiti in 2.4.2.4 al fine di migliorarne l'efficacia descrittiva.

3.4.1 Il problema della corrosione

Durante il sopralluogo sul Binario 1 si è riscontrata una criticità nella descrizione dello stato di integrità dei pannelli in acciaio della copertura. In totale, sono presenti 104 lamiere in acciaio e, tra queste, 102 presentano in modo evidente un fenomeno di corrosione, alcune al primo stadio (*white rust*) e altre al secondo (*red spot*), ma con estensioni anche estremamente diverse. Inoltre, in 60 casi si è riscontrata delaminazione, nel 45% in fase incipiente. La prima criticità riscontrata era dovuta al fatto che la

delaminazione dovuta a corrosione non fosse contemplata tra i difetti classificati. Per situazioni come questa erano stati codificati i "casi generali" e "Distacco in generale", con un coefficiente $d_i = 3$ ben si presta alla descrizione del fenomeno.

L'altra difficoltà è sopravvenuta per quei casi in cui i due stadi di corrosione erano presenti contemporaneamente, ma lo stadio più grave aveva estensione nettamente inferiore rispetto al meno grave. Questa compresenza genera discrepanze nell'assegnazione dei coefficienti. La regola generale è di calcolare i punteggi per ogni fenomeno di degrado e poi assegnare quello che restituisce l'indice di difettosità maggiore. In questi casi, se si assegnasse il l'indice di difettosità sulla base dello stadio più avanzato, si ricadrebbe nel controsenso di avere indice minore che se si considerasse lo stadio meno avanzato. Questa differenza è data dalla diversa estensione dei due stadi.

Come visto nel Capitolo 2, per l'assegnazione del coefficiente di entità difetto in caso di corrosione sono distinti i due stadi di avanzamento del fenomeno. Per comodità di lettura, si riporta la tabella con i coefficienti da assegnare.

DIFETTI DELL'ACCIAIO	
Tipo di difetto	d_i
Alterazione strati protettivi	1
Corrosione 1° stadio: deterioramento zinco (white rust)	2
Corrosione 2° stadio: presenza di zone rosse (red spot)	3
Bullonature mancanti	3

Tabella 3.1: Coefficienti di entità difetto per difetti dell'acciaio

Per quanto riguarda il coefficiente di stensione difetto, il parametro di riferimento per l'assegnazione è l'estensione superficiale, con i seguenti valori limite, adottati per tutti gli stadi di avanzamento del fenomeno:

DIFETTI DELL'ACCIAIO – ALTERAZIONE STRATI PROTETTIVI, CORROSIONE				
Estensione	<10%	<30%	<60%	>60%
e_i	1	2	3	4

Tabella 3.2: Coefficienti di estensione difetto per difetti dell'acciaio

Per fare un esempio numerico, si consideri la lamiera in Figura 3.10, che presenta entrambi gli stadi di corrosione con notevole estensione e fase incipiente di delaminazione su circa due terzi del perimetro.

Figura 3.10: Stazione di Torino Porta Nuova. Binario 1. Dettaglio di lamiera in acciaio

Per il calcolo dell'indice di difettosità dell'elemento ci sono tre strade:

- considerando la corrosione al primo stadio (*white rust*), che si estende per più di due terzi della superficie visibile, si ha $d_i = 2$ e $e_i = 4$. Dunque, $D_c = 2 \cdot 4 = 8$, che è un livello difettosità alta;
- considerando il secondo stadio di corrosione (*red spots*), che ha una estensione compresa tra un terzo e due terzi della superficie visibile, si ha $d_i = 3$ e $e_i = 3$. Dunque, $D_c = 3 \cdot 3 = 9$, che è un livello di difettosità alta;
- considerando il caso generale di distacco di materiale, che interessa meno del 10% della superficie visibile totale, si ha $d_i = 3$ e $e_i = 1$. Dunque, $D_c = 3 \cdot 1 = 3$, che corrisponde ad un livello di difettosità bassa.

Ricordando la regola generale, di considerare il difetto che determina la difettosità maggiore, si assegna come indice definitivo quello ottenuto considerando "Corrosione al secondo stadio - red spots". Non trovando soddisfacente questo risultato, perché in realtà il difetto più grave è la delaminazione, si sceglie di correggere gli indici per difetti dell'acciaio.

In primo luogo, si uguaglia l'indice del primo stadio di corrosione, il deterioramento dello Zinco, ad "Alterazione di strati protettivi", essendo lo strato di Zinco uno strato protettivo a tutti gli effetti. Di conseguenza si abbassa di una unità l'indice per il secondo stadio di corrosione. Si aggiunge, inoltre, il terzo stadio "delaminazione o sfaldamento, con indice di entità difetto uguale a 3. Ricapitolando, i coefficienti di entità difetto corretti sono:

DIFETTI DELL'ACCIAIO	
Tipo di difetto	d_i
Alterazione strati protettivi	1
Corrosione 1° stadio: deterioramento zinco (white rust)	1
Corrosione 2° stadio: presenza di zone rosse (red spot)	2
Corrosione 3° stadio: delaminazione o sfaldamento	3
Bullonature mancanti	3

Tabella 3.3: Nuovi valori del coefficiente di entità difetto per l'acciaio

Si sposta ora il focus sui coefficienti di estensione del difetto. Operando con i nuovi coefficienti di entità difetto si ottengono i seguenti indici di difettosità:

- considerando il primo stadio di corrosione, con una estensione maggiore dei due terzi della superficie visibile, si ha $d_i = 1$ e $e_i = 4$. Dunque, $D_c = 1 \cdot 4 = 4$, che è un livello di difettosità medio;
- considerando il secondo stadio di corrosione, che ha un'estensione compresa tra un terzo e due terzi della superficie visibile, si ha $d_i = 2$ e $e_i = 3$. Dunque, $D_c = 2 \cdot 3 = 6$, che è un livello di difettosità medio;
- considerando il terzo stadio di corrosione, che si estende per meno di un decimo della superficie visibile, si ha $d_i = 3$ e $e_i = 1$. Dunque, $D_c = 3 \cdot 1 = 3$, che è un livello di difettosità basso.

Seguendo un altro possibile ragionamento, si potrebbe assegnare gli indici sulla base del fenomeno nel suo insieme, ossia considerando lo stadio più avanzato del fenomeno per assegnare il coefficiente di entità difetto e l'estensione complessiva di tutti e tre gli stadi. In questo modo i coefficienti sono:

- $d_i = 3$, ossia il coefficiente del terzo stadio di corrosione, con delaminazione o sfaldamento;

- $e_i = 4$, perché il fenomeno della corrosione in tutti i suoi stadi interessa più del 60% della superficie visibile.

In questo modo si ottiene il seguente indice di difettosità:

$$D_c = 3 \cdot 4 = 12$$

che indica un livello di difettosità alto. In questo modo, però, non è possibile distinguere, in termini di indici, tra questo caso e situazioni in cui gli stadi più avanzati siano anche più estesi. Si consideri, a titolo di esempio, la lamiera in Figura 3.11.

Figura 3.11: Stazione di Torino Porta Nuova. Binario 1. Dettaglio della copertura

Per la lamiera in figura si avrà, come nel caso precedente, $D_c = 3 \cdot 4 = 12$. In questo modo, a due situazioni in cui si hanno estensioni molto diverse, viene assegnato lo stesso indice. Pertanto, questo modo di procedere viene scartato.

Si correggono i valori per il coefficiente di estensione difetto per il terzo stadio di corrosione, come riportato nella tabella successiva.

DIFETTI DELL'ACCIAIO – CORROSIONE 3° STADIO				
Estensione	<5%	<10%	<20%	>20%
e_i	1	2	3	4

Tabella 3.4: Nuovi coefficienti di estensione difetto per corrosione al terzo stadio

In questo modo si dà un peso maggiore allo stadio più avanzato del fenomeno, seppur abbia estensioni mino.

Considerando nuovamente i due esempi sopracitati, per la lamiera in Figura 3.10, si assegnano i seguenti coefficienti:

- $d_i = 3$, ossia il coefficiente del terzo stadio di corrosione, con delaminazione o sfaldamento;
- $e_i = 2$, perché il fenomeno di sfaldamento interessa una superficie compresa tra il 5% e il 10%.

In questo modo si ottiene il seguente indice di difettosità:

$$D_c = 3 \cdot 2 = 6$$

che appartiene ad un livello di difettosità medio.

Per il caso ritratto in Figura 3.11, invece, si avrà:

- $d_i = 3$, ossia il coefficiente del terzo stadio di corrosione, con delaminazione o sfaldamento;
- $e_i = 4$, perché il fenomeno della corrosione in tutti i suoi stadi interessa più del 60% della superficie visibile.

In questo modo si ottiene il seguente indice di difettosità:

$$D_c = 3 \cdot 4 = 12$$

che indica un livello di difettosità alto.

Applicando le modifiche qui riportate, è stato possibile ottenere indici per i diversi elementi che siano adatti ad un confronto e una gerarchizzazione sensata. Lo stesso non si poteva dire con la codifica iniziale dei difetti dell'acciaio, per cui si aveva un appiattimento dei risultati.

3.4.2 Ispezionabilità

Come ci si aspettava, un limite di questo metodo è che per l'assegnazione dei coefficienti di entità e estensione difetto, l'ingegnere si deve basare solo su ciò che può vedere e misurare direttamente. Questo implica che, per esempio, nel caso del Binario 1, solo un lato delle lamiere in acciaio era visibile, quindi i coefficienti sono stati assegnati solo sulla base dei difetti riscontrati su quel

lato. Si potrebbe ipotizzare che il lato non visibile presenti difetti simili, o fenomeni in stadio più avanzato o maggiormente estesi, ma non è possibile saperlo. Inoltre, per poter fare una valutazione più completa dello stato di integrità della copertura, sarebbe stato utile poter vedere la parte superiore della stessa, ma per motivi logistici e di sicurezza non è stato possibile né accedervi direttamente, né poter accedere ad una zona in cui fosse possibile almeno affacciarsi sulla copertura.

Considerazioni analoghe riguardano anche le infiltrazioni riscontrate nel Binario 1. È stato possibile osservare questo fenomeno per la coincidenza fortuita che l'ispezione è stata condotta in un giorno di pioggia. Se l'ispezione fosse stata condotta in piena estate o semplicemente in un giorno sereno non immediatamente seguente ad un giorno piovoso, non si avrebbe potuto osservare il fenomeno diretto. In mancanza di effetti visibili dipendenti da questo fenomeno, non sarebbe stato rilevabile in alcun modo, ottenendo così dei risultati falsati.

Durante l'ispezione al binario 20, una porzione di pavimentazione non era ispezionabile perché transennata, la pavimentazione stessa aveva subito un intervento. Nonostante la porzione di binario transennata sia stata oggetto di una ispezione successiva, sono sorti dubbi circa l'ispezionabilità nel senso di poter accedere ad una determinata zona o a certi elementi. Si introduce quindi un parametro, ossia il *livello di ispezionabilità*.

Se in fase di ispezione si riscontrano molti problemi di accessibilità agli elementi, si potrebbero avere dei risultati falsati negli indici aggregativi. Il problema risiede proprio nel non poter esprimere un giudizio su questi elementi. La scelta degli ingegneri civili è solitamente orientata verso la soluzione più cautelativa, che in questo caso si traduce nell'assegnare agli elementi non accessibili un indice di difettosità alto. Tuttavia, questa soluzione potenzialmente può portare a risultati che non corrispondono alla realtà, che non è una buona cosa per uno strumento proposto come supporto decisionale.

Si sceglie dunque di non assegnare alcun coefficiente agli elementi inaccessibili, che quindi non verranno inclusi nel calcolo degli indici

aggregativi. Per fornire, dunque, l'informazione di quanti elementi sul totale partecipino effettivamente alla composizione dell'indice, si associa ad esso il livello di ispezionabilità. Indirettamente, fornisce un'indicazione sul livello di incertezza e l'attendibilità degli indici. Il livello di ispezionabilità si calcola come:

$$LI\ [\%] = \frac{elementi\ non\ accessibili}{totale\ elementi} \cdot 100$$

All'interno del caso studio il livello di ispezionabilità non è in realtà stato calcolato, perché è stato effettuato un secondo sopralluogo per poter ispezionare quella zona non accessibile al primo tentativo.

Le due ispezioni sono durate rispettivamente tre ore e mezza e tre ore. Sono stati ispezionati $400m^2$ del Binario 1 e $675m^2$, contenenti rispettivamente 235 e 184 elementi. Se ne ricavano le *ratio* d'ispezione di $114{,}3\ {}^{m^2}/_{h}$ e di $225\ {}^{m^2}/_{h}$, con una media di $165{,}4\ {}^{m^2}/_{h}$. I dati sono riassunti in Tabella 3.5.

	Binario 1	**Binario 20**	**Totale**
Durata [h]	3,5	3	6,5
Superficie [m²]	400	675	1.075
Nr elementi	235	184	419
Superficie/ora	114,3	225	165,4
Elementi/ora	67	61	64

Tabella 3.5: Tempi e ratio di ispezione per Binario 1 e Binario 20

Tenendo in conto l'inesperienza in queste due prime ispezioni e presumendo un aumento in dimestichezza con l'avanzare delle ispezioni si stima un miglioramento del 20% sul valor medio, dunque di poter raggiungere la *ratio* di $200\ {}^{m^2}/_{h}$. Ricordando che gli edifici della stazione Torino Porta Nuova hanno una estensione totale di $92.747\ m^2$, si stima di concludere l'ispezione in circa 464 ore, ossia 58 giornate lavorative di 8 ore distribuite nell'arco di tre mesi (supponendo un singolo consulente).

La durata così ottenuta sembra scoraggiare l'utilizzo di questo metodo più di una volta ogni due anni, ma bisogna tenere in conto anche che la velocità è

influenzata dal numero di elementi presenti. Zone con destinazione d'uso diversa possono essere ispezionate con velocità anche molto diverse.

3.4.3 Indici e algoritmo matematico

Procedendo con l'elaborazione dei dati raccolti durante sopralluogo si è subito riscontrato che il risultato espresso tramite indici fosse in realtà di difficile comprensione.

Essendo definiti come indici di difettosità, forniscono risultati con valori alti in presenza di difetti gravi e molto estesi, mentre elementi in buono stato hanno indici con valori bassi. Questo risulta controintuitivo, perché, probabilmente per abitudini consolidate durante gli anni scolastici, si tende ad associare un giudizio positivo a punteggi alti e un giudizio negativo a punteggi bassi. Dunque, la prima modifica apportata è un'inversione delle scale di punteggio degli indici, in modo da seguire quel che l'intuito suggerisce.

Seguendo ancora l'ottica di avvicinare il risultato finale ad una sorta di votazione scolastica, si normalizzano gli indici: l'indice del singolo elemento viene normalizzato a 10 e l'indice pesato a 100.

Queste due modifiche hanno lo scopo di rendere i risultati più intuitivi e in modo che anche chi legga per la prima volta delle valutazioni, possa avere un'idea dello stato di integrità degli elementi e dell'edificio senza dover consultare una legenda o un manuale.

Per non intervenire sulla definizione dei coefficienti e sull'algoritmo, queste migliorie sono state introdotte direttamente sugli indici.

L'indice di difettosità diventa un *indice di integrità dell'elemento*, ed è calcolato come:

$$I_c = (16 - d_i \cdot e_i) \cdot \frac{5}{8}$$

dove 16 è aggiunto per l'inversione della scala e 5/8 è il fattore per la normalizzazione a 10. La scala diventa dunque una scala di integrità:

I_c	**Integrità**
$8,125 \leq I_c \leq 10$	Buona
$6,25 \leq I_c < 8,125$	Media
$0 \leq I_c < 6,25$	Bassa

Tabella 3.6: Scala di integrità singolo elemento

Analogamente, l'indice di difettosità pesata, diviene un *indice di integrità pesata dell'elemento*:

$$I_p = (80 - d_i \cdot e_i \cdot r_i) \cdot \frac{5}{4}$$

dove 80 è aggiunto per l'inversione della scala e il fattore 5/4 per la normalizzazione a 100. La scala di difettosità diviene dunque:

I_p	**Integrità pesata**
$87,5 \leq \mathrm{I}_p \leq 100$	Buona
$62,5 \leq \mathrm{I}_p < 87,5$	Media
$0 \leq \mathrm{I}_p < 62,5$	Bassa

Tabella 3.7: Scala di integrità pesata

Questa variazione negli indici non comporta alcuna modifica nella definizione dell'indice globale, ora *indice di integrità globale*, ma il voto del peggiore ad esso associato non è più il valore massimo tra tutti i I_p, bensì il valore minimo. Ossia:

$$I_w = \min\left\{I_{p_i}\right\}$$

Per quanto riguarda l'indice VGR, sono sorte delle perplessità circa l'indice su cui debba essere valutato, se su quello pesato o non pesato. Se fosse calcolato considerando l'integrità non pesata, l'indice VGR fornirebbe una indicazione di quanti elementi avrebbero bisogno di un intervento, in termini assoluti. Se invece si considera l'integrità pesata, si tiene conto anche dell'importanza dell'elemento in termini di stabilità, durabilità e sicurezza, ossia quei criteri su cui è definito il *coefficiente di importanza elemento* $\boldsymbol{r_i}$. Il dubbio nasce perché alcuni elementi hanno l'indice di integrità pesata e non pesata appartenenti a due livelli differenti.

Per approfondire la questione si considerano gli indici ottenuti per il Binario 1 e il Binario 20, riportati in Tabella 3.8. Per entrambi i Binari sono calcolati gli indici VGR in due modi: basandosi sull'indice di integrità pesata nel primo modo e basandosi sull'indice di integrità non pesata nel secondo modo.

		V	G	R
Binario 20	Integrità non pesata	84.8	9.2	6.0
	Integrità pesata	86.4	7.6	6.0
Binario 1	Integrità non pesata	62.3	30.2	7.4
	Integrità pesata	49.8	42.8	7.4

Tabella 3.8: Indice VGR per Binario 1 valutato con indice di integrità pesata non pesata

Si può notare come per il Binario 20 il passaggio da integrità non pesata a integrità pesata comporti un lieve miglioramento, ossia la percentuale di elementi in livello di integrità media diminuisca a favore del livello di integrità buona. Situazione opposta per il Binario 1 in cui, con il coefficiente di importanza elemento, si ha un aumento di elementi che ricadono nel codice colore giallo invece che nel codice colore verde. Questa discrepanza è dovuta anche ai diversi range definiti per gli indici di integrità pesata e non pesata: infatti il range di integrità pesata alta è in proporzione inferiore rispetto al range di integrità assoluta verde.

In considerazione di quanto detto, si sceglie in definitiva di calcolare l'indice VGR sulla base dell'indice di integrità dei singoli elementi.

Infine, per le modifiche apportate agli indici, bisogna invertire la scala. Il riferimento per l'indice VGR è quindi:

I_p	**Integrità pesata**	**Codice colore**
$\mathbf{8,125 \leq I_c \leq 10}$	Buona	Verde
$\mathbf{6,25 \leq I_c < 8,125}$	Media	Giallo
$\mathbf{0 \leq I_c < 6,25}$	Bassa	Rosso

Tabella 3.9: Livelli di integrità pesata dell'elemento e codice colore

3.4.4 La numerabilità degli elementi

Ci sono macroelementi, quali ad esempio pavimentazioni o coperture, che pongono l'ingegnere di fronte ad un dubbio: se considerarli un solo macroelemento o se considerare separatamente i singoli elementi che li compongono (per continuare l'esempio, le singole mattonelle o tegole). Durante la stesura preliminare del metodo, si è pensato che considerare separatamente i singoli elementi diventa troppo oneroso dal punto di vista dell'elaborazione dei dati. Al contrario, considerare solamente il macroelemento porta alla perdita dei dettagli, in particolare quando esso sia particolarmente esteso. Guardando poi agli algoritmi matematici, entrambe le vie hanno una influenza diretta sui risultati degli indici aggregativi, essendo questi delle medie matematiche. In particolare, nel primo caso il valore dell'indice aggregato viene fortemente sbilanciato verso il livello di integrità di questi elementi. Al contrario, nel secondo caso si rischia di avere un elemento molto esteso che però pesi poco all'interno della media.

Durante l'applicazione al caso studio, non è mancata occasione per indagare questa problematica.

La pavimentazione dei binari 1 e 20, che è dello stesso tipo e materiale, presenta dei giunti di dilatazione che dividono la pavimentazione in superfici più piccole. Dunque, per l'applicazione del metodo, il macro-elemento "pavimentazione" è stato suddiviso in unità più piccole seguendo la divisione dei giunti.

Per le coperture in cemento armato è stato necessario un ragionamento diverso, poiché i giunti presenti in entrambe le coperture definivano comunque degli elementi molto grandi. Per esempio, la copertura del binario 1 ha una lunghezza complessiva di 100 metri e presenta 4 giunti. Usando solo la divisione fornita dai giunti strutturali, si avrebbero comunque 5 elementi di lunghezza 20m. Per la conformazione della copertura è stato più facile riconoscere un modulo, composto da sei lamiere in acciaio e un pannello in vetroresina, che si ripeteva nello spazio per 18 volte. Dunque, la copertura in cemento armato è stata suddivisa in 18 blocchi, ossia quelli corrispondenti ai moduli descritti.

La copertura del binario 20, invece, è lunga 150 metri e presenta 5 giunti. Nella copertura del binario 20 non è evidente modulo ripetuto: sono presenti degli elementi in vetrocemento, vicino all'attaccatura con la parete, tendenzialmente accoppiati, ma dislocati longitudinalmente lungo la copertura senza regolarità (per esempio nell'intorno della Cappella non sono presenti moduli in vetrocemento). Per delucidare l'effetto sugli indici globali della divisione dei macroelementi si è proceduto a effettuare il calcolo degli indici per il binario 20 in due modi. Nel primo modo, la copertura è stata divisa in modo più grossolano, basandosi esclusivamente sui giunti presenti. Nel secondo modo, le zone comprese tra due giunti consecutivi sono state ulteriormente divise. In entrambi i modi, gli elementi in vetrocemento sono stati separati dalla copertura.

Si riportano, in Tabella 3.10, i valori degli indici di integrità del Binario 20 e della copertura applicando la divisione nei due modi descritti.

Stazione di Torino Porta Nuova - Binario 20 - Copertura						
Divisione	Grossolana			Fine		
Nr elementi	55			79		
I_g	95			94		
$I_{copertura}$	91			87		
I_w	25			25		
VGR [%]	85.5	1.8	12.7	78.5	7.6	13.9

Tabella 3.10: Binario 20. Confronto tra indici di integrità con diversa divisione macroelementi

Dai dati riportati emerge che, con una divisione più grossolana, rispetto ad una più fine, l'indice di integrità del macroelemento aumenta, passando da 87 a 91. Questo passaggio di soli quattro punti è sufficiente per passare da un codice colore giallo ad un codice colore verde.

Osservando l'indice VGR, che esprime, in percentuale, quanti elementi rientrino in ciascun codice colore, si può notare come, infittendo la divisione, la percentuale di codice colore verde diminuisca a favore dei codici colore giallo e rosso.

In entrambi i casi il voto del peggiore è

$$I_w = 25$$

che è un codice colore rosso. Questo punteggio appartiene ad un modulo in vetrocemento e, come si è detto, in entrambi i modi i moduli in vetrocemento sono considerati a parte rispetto il resto della copertura.

Il diverso modo di suddividere i macroelementi, però, influisce poco sull'indice di integrità dell'ambiente, poiché essi differiscono di un solo punto: $I_g = 95$ nel primo modo e $I_g = 94$ nel secondo. Questo succede perché all'indice di integrità dell'ambiente partecipano anche gli altri sistemi che, in questo caso, hanno tutti punteggi oltre 90.

Dunque, applicando una divisione grossolana si perdono i difetti, soprattutto perché l'estensione del difetto è sempre espresso come estensione superficiale. Ciononostante, in ambienti grandi e con molti elementi gli effetti di diversi tipi di divisione si perdono.

3.5 Risultati e possibili sviluppi futuri

L'analisi dei dati raccolti per il Binario 1 ha prodotto i seguenti risultati:

Stazione Torino Porta Nuova

Sezione	Binario 1 - Poste Italiane		
Consulente	Daniela Abagnale		
Data Ispezione	15/10/2019		
I_g	84		
I_w	40		
VGR [%]	62.3	30.2	7.4

Tabella 3.11: Risultati per il Binario 1

Secondo quanto riportato nelle prescrizioni, si consiglia di aumentare frequenza dei sopralluoghi in questa zona. Inoltre, si consiglia di effettuare indagini su quegli elementi che presentano un codice colore rosso per definire cause, scenari di rischio e il migliore modo per effettuare un intervento.

In particolare, se si considerano separatamente i tre sottosistemi principali di questo ambiente, ossia la copertura, la pavimentazione e le pareti, si può notare come il sottosistema più danneggiato sia quello della copertura. Guardando alla numerosità degli elementi, si può notare che è proprio la pensilina quella che influisce di più sull'indice di integrità globale.

Si riportano gli indici dei tre sottosistemi:

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 1 - Pensilina		
Nr elementi	168		
I_g	81		
I_w	40		
VGR [%]	51.8	38.7	9.5

Tabella 3.12: Risultati per il Binario 1. Dettaglio pensilina

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 1 - Pavimentazione		
Nr elementi	47		
I_g	99		
I_w	93		
VGR [%]	100.0	0.0	0.0

Tabella 3.13: Risultati per il Binario 1. Dettaglio pavimentazione

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 1 - Pareti		
Nr elementi	20		
I_g	91		
I_w	78		
VGR [%]	55.0	35.0	10.0

Tabella 3.14: Risultati per il Binario 1. Dettaglio pareti

L'analisi dei dati raccolti per il Binario 20 ha prodotto i seguenti risultati:

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 20		
Consulente	Daniela Abagnale		
Data Ispezione	08/11/2019		
I_g	94		
I_w	25		
VGR [%]	84.8	9.2	6.0

Tabella 3.15: Risultati Binario 20

Le prescrizioni raccomandano di svolgere indagini approfondire sugli elementi che presentano codice colore rosso per definire cause, scenari di rischio e il migliore modo per effettuare un intervento.

Si riportano gli indici dei tre sottosistemi:

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 20 - Pensilina		
Nr elementi	79		
I_g	87		
I_w	25		
VGR [%]	78.5	7.6	13.9

Tabella 3.16: Risultati Binario 20. Dettaglio pensilina

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 20 - Pavimentazione		
Nr elementi	65		
I_g	99		
I_w	90		
VGR [%]	95.4	4.6	0.0

Tabella 3.17: Risultati Binario 20. Dettaglio pavimentazione

Stazione Torino Porta Nuova			
Sezione	Binario 20 - Pareti		
Nr elementi	40		
I_g	93		
I_w	85		
VGR [%]	80.0	20.0	0.0

Tabella 3.18: Risultati Binario 20. Dettaglio pareti

Un possibile miglioramento da implementare in futuro può essere un sistema che permetta di automatizzare l'assegnazione dell'indice di estensione difetto, in relazione alle soglie riscontrate durante il rilievo. Questa implementazione non è realizzabile in modo immediato poiché allo stato attuale le soglie sono numericamente diverse in base al tipo di difetto.

3.6 Conclusioni

Al fine di verificare la congruenza matematica del metodo, è stato applicato a porzioni della stazione di Torino Porta Nuova che presentassero difetti di entità e estensione rilevante, il Binario 1 e il Binario 20.

In base alle considerazioni emerse nelle fasi di rilievo e analisi dei dati, sono state modificate le codifiche per l'entità e l'estensione di alcuni tipi di difetti, in particolare per la corrosione. Gli indici sono stati ribaltati per avere una accezione positiva e normalizzati a 10 e a 100 per essere più facilmente interpretabili. Si è introdotto un parametro, il livello di ispezionabilità, che indica su quanti elementi rispetto al totale sono stati valutati gli indici aggregativi.

Dai risultati ottenuti si evince che, nonostante complessivamente i binari presentino delle buone valutazioni, in entrambi i casi le pensiline devono essere oggetto di indagini approfondite sulle cause dei fenomeni di degrado presenti e, di conseguenza, di interventi.

Capitolo 4

Maintenance Management

4.1 Introduzione

In questo capitolo si inquadra il metodo per la valutazione sintetica della durabilità nel contesto della manutenzione degli edifici, in cui, per via della frammentarietà e poca sedimentazione delle nozioni, tende a esserci confusione diffusa.

Nel paragrafo seguente si delineeranno le coordinate generali in cui ci si muove in questo ambito, esponendo i principi fondamentali e la storia della manutenzione. Anche in questo caso, come già avvenuto nella prima parte di questo studio, si prenderanno a prestito terminologie e definizioni dall'ambito industriale.

Dopo un confronto con la terminologia e le prassi già in uso in ambito civile, si trasporranno i concetti che non trovano un analogo nel mondo delle costruzioni.

4.2 Storia e principi fondamentali della manutenzione

La manutenzione è quella combinazione di tecniche amministrative, incluse azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare una entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta (16).

La storia della manutenzione segue l'evoluzione del mondo industriale: a partire dagli anni '30 si possono distinguere tre diverse generazioni di politiche di manutenzione.

La prima generazione è stata l'unica prassi diffusa dagli anni '30 fino agli inizi della Seconda Guerra Mondiale. In questo periodo l'industria non era molto meccanizzata, dunque i periodi di disservizio avevano un basso impatto sulla produzione complessiva. Inoltre, i componenti erano semplici e facilmente riparabili. Per questi due motivi, non c'era l'esigenza di un'organizzazione sistematica della manutenzione e la filosofia dei gestori era di effettuare riparazioni o sostituzioni solo a rottura avvenuta.

Durante la Seconda Guerra Mondiale, l'aumento della richiesta di beni unito ad una diminuzione drastica della disponibilità di manodopera, portò ad una sempre maggiore meccanizzazione dei processi. L'industria cominciava a dipendere dalle macchine, più numerose e complesse, e i tempi di disservizio influenzavano direttamente le capacità produttive, aumentando i costi di esercizio. La seconda generazione della manutenzione nacque insieme all'esigenza di ridurre al minimo le interruzioni nella produzione e quindi di prevenire la rottura dei componenti, che venivano sostituiti a intervalli regolari. La voce di spesa relativa alla manutenzione cominciò ad essere sempre più rilevante e per questo si intensificò la pianificazione e la predisposizione di sistemi di controllo. Infine, visto l'aumento dei capitali investiti in manutenzione divenne prioritario massimizzare la vita di ogni singolo componente.

A partire dalla seconda metà degli anni '70, le innovazioni dell'industria non consistevano solo nell'uso di nuove tecnologie, materiali e tecniche ma anche nella diffusione della meccanizzazione e dell'automazione a diversi settori, come ad esempio nei trasporti, nella sanità, nell'informatica e telecomunicazioni. L'aumento dell'automazione dei processi ha acutizzato l'impatto di rotture e guasti sulla capacità di soddisfare standard qualitativi, sia per i prodotti che per i servizi.

Negli anni, l'esperienza ha mostrato che guasti e incidenti possono comportare gravi conseguenze in termini ambientali e per la sicurezza delle

persone, anche di grande portata e non facilmente contenibili. L'attenzione della società riguardo queste tematiche è aumentata e, ora, viene richiesto alle aziende di rispettare precisi standard di sicurezza.

Allo stesso tempo, la manutenzione è diventata un punto cruciale per massimizzare il profitto sugli investimenti (ROI, *return on investment*) dei beni fisici, mantenendoli operativi ed efficienti il più a lungo possibile. Dall'interazione di queste cause, i costi di manutenzione sono cresciuti notevolmente sia in termini assoluti che in percentuale sulla totale delle spese sostenute, tant'è che in molte industrie rientra tra le prime tre voci nei costi di gestione.

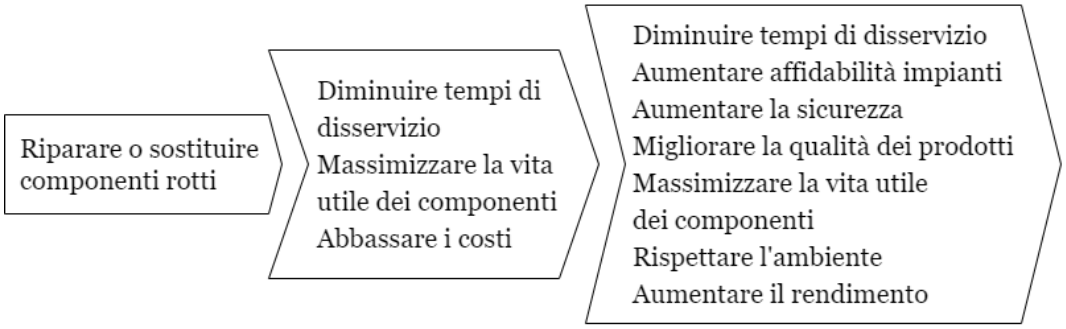

Figura 4.1: Evoluzione degli obiettivi della manutenzione nelle tre generazioni

Negli ultimi vent'anni, la manutenzione ha subito molte trasformazioni, molte più che altre aree gestionali. I cambiamenti sono dovuti soprattutto all'aumento e alla varietà dei beni fisici che hanno bisogno di manutenzione e alle progettazioni sempre più complesse. I nuovi sviluppi della manutenzione comprendono, tra gli altri, strumenti per l'analisi dei rischi e per il monitoraggio delle prestazioni e la definizione di nuove tecniche di manutenzione.

La definizione di manutenzione e dei concetti ad essa collegata sono cambiati più volte nel corso dei decenni, per tenere il passo con le novità tecnologiche e le nuove teorie. In questo studio si fa riferimento alle definizioni date nelle norme UNI.

I principi fondamentali della manutenzione sono (17):

- mantenere strutture, macchine impianti o attrezzature in grado di funzionare nelle condizioni stabilite;
- conservare il patrimonio aziendale per l'intera vita utile;

- garantire, nel rispetto dei punti precedenti, la sicurezza del personale aziendale e la tutela ambientale;
- effettuare le attività di manutenzione con la massima economicità.

L'attuazione dei principi fondamentali sopra descritti consente di raggiungere i seguenti obiettivi generali (17):

- selezione delle politiche di manutenzione più idonee;
- dimensionamento delle risorse in mezzi, uomini e materiali per attuare le politiche selezionate nel rispetto dei vincoli tecnici ed economici;
- controllo tecnico ed economico dei risultati.

Di norma, la manutenzione è divisa in ordinaria e straordinaria. Nella **manutenzione ordinaria** rientrano quegli interventi effettuati durante il ciclo vita di un bene che abbiano come scopo (18):

- mantenere l'integrità originale del bene;
- mantenere o ripristinare l'efficienza dei beni;
- contenere il normale degrado d'uso;
- garantire la vita utile del bene;
- far fronte ad eventi accidentali.

Se gli interventi di manutenzione ordinaria avvengono in seguito a guasti o avarie, allora si parla di manutenzione a guasto o correttiva; se, invece, tali interventi sono all'interno di un preciso piano di manutenzione, allora è il caso di manutenzione preventiva. Da ultimo, se lo scopo dell'intervento è ottimizzare e massimizzare l'efficienza del bene, allora si parla di manutenzione migliorativa.

Va da sé che la manutenzione correttiva è non programmata, ma le manutenzioni preventiva e migliorativa siano programmate.

Gli interventi di **manutenzione straordinaria** sono invece non ricorrenti e hanno un costo più elevato. Lo scopo quindi non è quello di ripristinare una funzione, quanto piuttosto quello di migliorare prestazioni, efficienza, affidabilità.

La **manutenzione correttiva** o a guasto (*corrective* o *breakdown maintenance*) viene eseguita solo in seguito alla rilevazione di un guasto.

L'intervento può essere di riparazione o sostituzione e ha lo scopo di riportare l'elemento nello stato in cui possa svolgere la funzione richiesta. Dopo la rottura, il tempo di riparazione associato è relativamente lungo, il che può comportare dei tempi di fuori servizio. Nei casi di urgenza (*immediate maintenance*) l'intervento è eseguito senza indugio in modo da evitare conseguenze inaccettabili. Nei casi non urgenti, l'intervento può essere differito (*deferred maintenance*) e anche accorpato a interventi programmati.

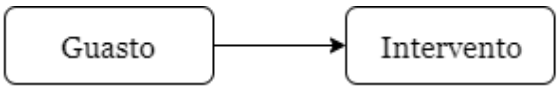

Figura 4.2: Fasi della manutenzione correttiva

La **manutenzione preventiva** (*preventive maintenance*) include qualsiasi attività volta a prevenire i guasti. Gli interventi di revisione e sostituzione vengono programmati in modo da sfruttare il più possibile la vita utile dell'elemento e ridurre le probabilità di guasto o il degrado del funzionamento di un elemento. Questa politica di manutenzione nasce dall'esigenza di sistemi industriali a lavoro continuo di ridurre i tempi di fermo dovuti a guasti e sostituzioni. In generale, nei sistemi a funzionamento continuo, ogni rottura costituisce una interruzione della produzione o del servizio e i tempi di fermo costituiscono delle vere e proprie perdite in termini economici. La manutenzione preventiva si differenzia in base al modo in cui viene determinato il momento ottimale per svolgere l'intervento.

Nella **manutenzione preventiva statistica** (*scheduled maintenance*) il momento per intervenire è determinato calcolando, sulla base di dati storici, la probabilità che un componente possa rompersi entro un determinato periodo di tempo. Gli interventi sono, quindi, pianificati a intervalli regolari, espressi in termini di tempo, tempo reale di funzionamento o cicli di utilizzo. L'intervento viene effettuato senza precedenti indagini sulle condizioni dell'elemento. Se, da una parte, la manutenzione preventiva statistica ha un impatto sul servizio e sul funzionamento del sistema minore di quella predittiva, dall'altra parte questo approccio può portare a sostituzioni fatte troppo in anticipo sulla vita utile di un componente, che equivale ad una perdita in termini economici.

Figura 4.3: Fasi della manutenzione preventiva

La **manutenzione preventiva secondo condizione** è realizzata quando sia possibile un monitoraggio delle condizioni di esercizio e dello stato di degrado di un sistema. Il livello di degrado dei componenti del sistema può essere individuato sulla base di misure dirette di parametri fisici o sulla base di osservazioni indirette e prestazioni. Gli interventi vengono effettuati quando i parametri superino soglie o limiti di sicurezza prestabiliti. Il vantaggio è evidente: il sistema sfrutta al massimo la vita utile dei componenti e riparazioni e sostituzioni sono effettuate solo quando necessario, riducendo i costi. D'altra parte, i sistemi di monitoraggio di qualità sono costosi e serve personale qualificato per l'analisi dei dati raccolti. In ultimo, si è legati all'affidabilità dei sensori.

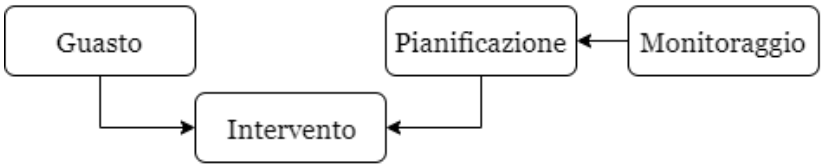

Figura 4.4: Fasi della manutenzione preventiva secondo condizione

Anche la **manutenzione predittiva** prevede l'uso di un sistema di monitoraggio, associando ad esso dei modelli matematici per la predizione della vita rimanente utile (*Remaining Useful Life, RUL*) del componente. Gli interventi vengono effettuati quando la vita rimanente utile è al di sotto di una certa soglia.

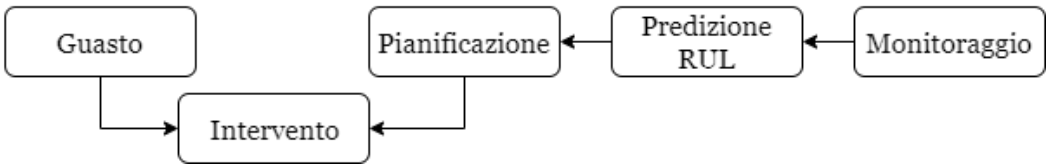

Figura 4.5: Fasi della manutenzione preventiva

La **manutenzione migliorativa** è l'insieme delle azioni di miglioramento o piccola modifica che non incrementano il valore patrimoniale dell'entità (16). Gli interventi non sono conseguenti a guasti, ma derivano da esigenze di miglioramento o ammodernamento e hanno lo scopo di migliorare le prestazioni del sistema o di una sua parte. Da un punto di vista concettuale, manutenzione correttiva e migliorativa sono a due poli opposti, ma a volte attività di manutenzione correttiva diventano un'occasione per apportare piccoli miglioramenti al sistema.

Nella figura successiva sono riportati i tipi di manutenzione ordinaria finora descritti.

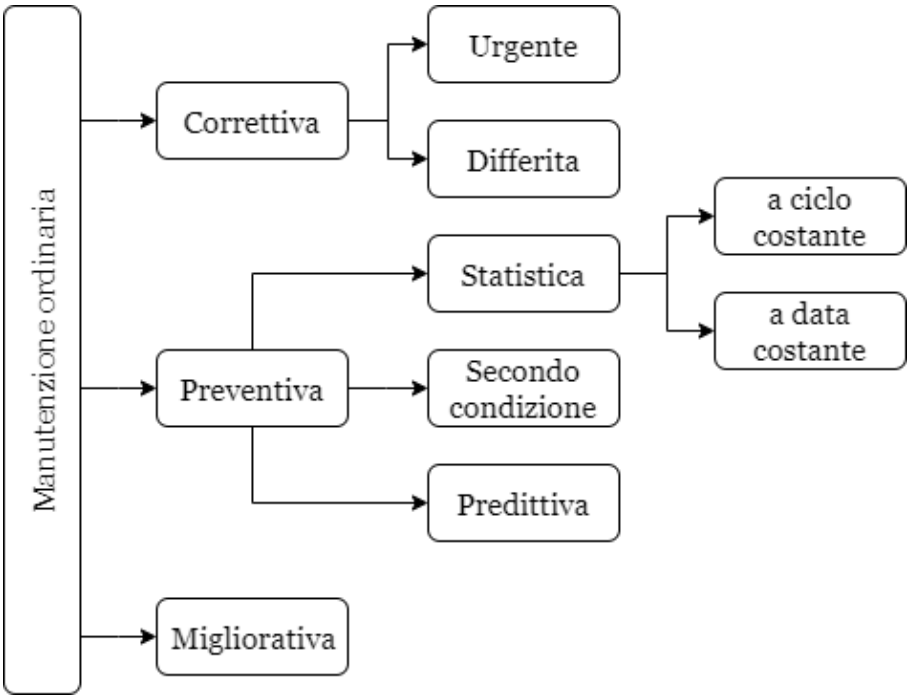

Figura 4.6: Classificazione manutenzione ordinaria

Queste prassi descritte sono già consolidate in ambito industriale e disciplinate da decine di norme UNI. Guardando al mondo degli edifici e delle infrastrutture civili, la situazione si complica.

Per quanto riguarda la normativa tecnica, si può fare riferimento alla UNI EN 15331:2011, in cui si specifica che "*un bene immobile si differenzia da altri beni oggetto di manutenzione essenzialmente per:*

- *la necessità di salvaguardarne il valore patrimoniale nel tempo;*
- *la possibilità che subisca modifiche della destinazione d'uso nel corso della sua vita utile;*

- *la pluralità di soggetti responsabili della manutenzione (proprietario, amministratore, inquilino, datore di lavoro, ecc....);*
- *la sua durata nel tempo (decine di anni).*

[...] Obiettivo della manutenzione di un immobile è quello di garantire l'utilizzo del bene, mantenendone il valore patrimoniale e le prestazioni iniziali entro limiti accettabili per tutta la vita utile e favorendone l'adeguamento tecnico e normativo alle iniziali o nuove prestazioni tecniche scelte dal gestore o richieste dalla legislazione".

Nel mondo delle costruzioni, la manutenzione ordinaria è quella che serve a mantenere i beni al livello di servizio minimo richiesto, in base ai requisiti derivanti dalla destinazione d'uso dell'edificio o di una sua parte. Gli interventi di manutenzione ordinaria non alterano le caratteristiche originali dell'edificio e non ne modificano la struttura essenziale e la destinazione d'uso. Sono interventi ricorrenti nel tempo e hanno generalmente un costo contenuto in confronto alla sostituzione del bene stesso. Rientrano tra gli interventi di manutenzione ordinaria opere di riparazione, rinnovamento e sostituzione delle finiture degli edifici e interventi per mantenere in efficienza impianti tecnologici esistenti (19).

Rientrano, invece, nella manutenzione straordinaria interventi che intendano:

- prolungare la vita utile del bene;
- adeguare il bene alle normative vigenti in materia di salute, sicurezza e ambiente, inclusi interventi per la riduzione del rischio sismico.

Inoltre, gli interventi di manutenzione straordinaria non alterano la sagoma, la forma, il volume o la superficie complessiva dell'edificio e la relativa destinazione d'uso. Sono incluse anche opere e modifiche per rinnovare o sostituire parti anche strutturali degli edifici esistenti e la realizzazione e l'integrazione di servizi igienico sanitari e tecnologici (19). Di fatto, la manutenzione straordinaria è una categoria di interventi edilizi a cavallo tra la manutenzione ordinaria e le ristrutturazioni. A differenza della

manutenzione ordinaria, la straordinaria deve sempre contenere un elemento di innovazione.

Rientrano nella **ristrutturazione edilizia** quegli interventi volti a trasformare gli organismi edilizi esistenti mediante un insieme sistematico di opere che possono portare ad un organismo edilizio in tutto o in parte diverso dal precedente. Tali interventi comprendono il ripristino, la sostituzione, la modifica o l'eliminazione di vecchi elementi architettonici e attraverso l'inserimento di nuovi elementi ed impianti (19).

Gli interventi di **restauro** sono volti al recupero, alla conservazione e alla valorizzazione di immobili con un particolare valore storico, architettonico e ambientale e per tali lavori sono ammessi anche materiali e tecnologie diverse da quelli usati per la costruzione dell'edificio, purché non siano in contrasto con il carattere complessivo di quest'ultimo.

Infine, per **risanamento conservativo** si intendono quei lavori atti al recupero igienico, funzionale e statico dell'edificio e si possono realizzare anche sulle strutture e sull'impianto planimetrico dell'immobile.

Le definizioni qui riportate sono tratte dal Testo Unico dell'Edilizia D.P.R. 380/01 e successive modifiche, con precisazioni emesse in diverse disposizioni regionali e sentenze. La principale conseguenza di questa dispersività delle definizioni è la confusione causata nella gestione privata. Le differenze tra i tipi di intervento si vedono, soprattutto per i privati, in termini di autorizzazioni per interventi e agevolazioni fiscali.

La prassi attualmente diffusa è l'attuazione di interventi di riparazione conseguenti a guasti e una manutenzione "tradizionale" che consiste in revisioni, riparazioni o sostituzioni a seguito di segnalazioni o eventi eccezionali (sismi, alluvioni). Le due pratiche sono spesso confuse nella terminologia e vengono applicate senza una strategia o una programmazione sul lungo periodo.

Per infrastrutture civili, però, un guasto può implicare perdite non solo in termini economici, ma anche in termini di vite umane. Tempi di disservizio per le infrastrutture non sono meno importanti di quelli in ambito industriale: disservizi su una linea stradale comportano dirottamento del traffico su altre strade, che probabilmente si intaseranno; per una linea o nodo ferroviario significa reclami e richieste di risarcimento; per un esercizio

commerciale implica un danno di immagine con conseguente perdita di clienti e diminuzione di vendite.

Il primo passo per scostarsi dalla manutenzione correttiva è l'applicazione di una **manutenzione preventiva basata sulle ispezioni.**

4.3 Manutenzione preventiva basata sulle ispezioni

Con il termine *ispezione* si intende l'insieme delle azioni volte a determinare e a valutare lo stato, le condizioni di esercizio e il funzionamento di un'entità. È inclusa anche la verifica della conformità mediante misurazione, osservazione, prova o rilevazione dimensionale delle caratteristiche relativa ad una entità.

Un programma di manutenzione basato su ispezioni periodiche e riparazioni o sostituzioni è uno dei modi per controllare e intervenire sull'affidabilità di un sistema strutturale. Una politica di questo tipo, oggigiorno, è ancora largamente considerata un costo evitabile se paragonato all'effettiva utilità della sua applicazione. Se le ispezioni non vengono programmate e svolte efficacemente e le informazioni gestite con criterio, con buona probabilità, il pregiudizio si avvera. Lo scopo della sua pianificazione è quello di definire una strategia di riparazione che minimizzi i costi associati alla gestione e all'esercizio dell'edificio, in particolare se paragonati ad una manutenzione di tipo correttivo.

Per definire un programma di ispezioni occorre tenere conto di:

- la significatività delle informazioni ricavate rispetto l'obiettivo dell'ispezione;
- l'intervallo temporale tra le ispezioni;
- la qualità degli elementi architettonici e la qualità complessiva del sistema edilizio dopo la riparazione.

Per ispezioni inquadrate in una politica di manutenzione preventiva, l'obiettivo è quello di analizzare le condizioni della costruzione in modo tale da aggiornare il livello di conoscenza sullo stato attuale della costruzione e dell'evoluzione subita dai fenomeni di degrado. Le informazioni ottenute in fase di ispezione devono essere elaborate in modo da essere un valido

supporto per il gestore nel momento in cui debba prendere decisioni in merito agli interventi di riparazione, sostituzione, adeguamento o limitazione della funzionalità.

Il livello di approfondimento dell'ispezione dipende dalle informazioni che sono già disponibili, ossia dai documenti di progetto e di collaudo e risultati dalle indagini condotte in precedenza. In alcuni casi, per esempio gli edifici storici, alcune di queste informazioni possono essere state completamente perse ed il programma di indagine, di conseguenza, deve risultare sufficientemente esteso, soprattutto nelle fasi iniziali. Per edifici in cui siano disponibili molte informazioni, l'ispezione potrà essere una verifica delle stesse e un aggiornamento sullo stato di degrado.

Il criterio adottato per la definizione del programma di ispezione è quello dei costi: il programma d'ispezione deve essere proporzionato alle informazioni che si vanno cercando e giustificato dalla vita e dal valore residui della costruzione.

Il costo è legato alla durata dell'ispezione stessa ma non vi è un nesso diretto con l'utilità delle informazioni acquisite: un livello di approfondimento molto alto comporta necessariamente delle ispezioni lunghe e onerose, ma non è detto che porti delle informazioni nuove rispetto a quelle già in possesso e che le informazioni ottenute siano utilizzabili per analisi successive.

Visto il costo di ogni ispezione è necessario ottimizzare la sequenza temporale delle ispezioni. Con un intervallo tra due ispezioni successive troppo breve, si ottengono molte informazioni, ma superflue, non essendosi ancora potuto sviluppare o evolvere alcun fenomeno significativo. Al contrario, un intervallo troppo grande, può vanificare i benefici di un intervento di riparazione o sostituzione tempestiva, essendo troppo grave l'entità del danno accumulato.

Il tempo quindi tra due ispezioni successive può dipendere dal tipo di fenomeno che si riscontra: si possono dare degli intervalli standard, ma se durante una ispezione si riscontrano certi danni e certi fenomeni, questo tempo può essere accorciato e in questo caso si può limitare l'ispezione all'area di interesse.

L'obiettivo dell'ispezione è quello di fornire dati e informazioni di supporto ad una decisione in merito all'attuazione di indagini localizzate o dell'interventi di riparazione. All'interno di una politica di manutenzione, vengono definiti indicatori dello stato di danno di ogni elemento e relative soglie critiche. Gli interventi di riparazione sono considerati necessari nel caso in cui gli indicatori superino le soglie critiche. I criteri per la definizione degli indicatori sono collegati all'aumento della sicurezza residua della costruzione che si ottiene con la riparazione. Per le soglie, inoltre, sono contemplate anche considerazioni economiche, quali ad esempio il massimo sfruttamento della vita utile di ogni componente.

Il metodo per la valutazione sintetica dell'integrità di un edificio proposto nella prima parte di questo studio ben si presta ad essere incluso in un piano di manutenzione basato sulle ispezioni. In questo caso, il livello di approfondimento è tale da avere ispezioni sufficientemente veloci da essere ripetute una volta all'anno, ottenendo comunque informazioni significative. Inoltre, in base al risultato degli indici, in alcune situazioni tra le prescrizioni vi è indicato se effettuare indagini più approfondite o se aumentare la frequenza delle ispezioni, anche solo in ambienti circoscritti.

La ripetizione nel tempo di ispezioni condotte applicando sistematicamente lo stesso metodo permette di poter analizzare l'evoluzione dei fenomeni di degrado. È importante che il metodo sia sempre lo stesso, in modo da avere informazioni omogenee e coerenti, dunque confrontabili fra loro. Avendo a disposizione i risultati di più ispezioni effettuate negli anni, si può aggiungere una prospettiva temporale e monitorare l'andamento degli indici di integrità degli elementi nel tempo. Con gli odierni strumenti di analisi dei dati e con un sufficiente numero di ispezioni ripetute nel tempo, è possibile calcolare una *proiezione* dell'indice nel tempo. La proiezione dell'indice viene poi confermata o aggiustata, di volta in volta, dai risultati ottenuti nella pratica.

Le ispezioni sono sì uno strumento utile, ma il risultato di queste rischia di essere uno strumento limitato se non usate in sinergia con altri strumenti che aiutino i committenti ad avere una visione globale, sia in senso spaziale

che in senso temporale. Come visto nel paragrafo 2.4.2.4, l'indice di integrità pesata per ambiente e il relativo codice colore ben si prestano ad essere integrati in planimetrie, per essere facilmente consultate dal committente.

Secondo la stessa linea di principio, il metodo speditivo per la valutazione sintetica dello stato di integrità si può facilmente accorpare a strumenti grafici, come per esempio un software BIM, o a software per il facility management, ad esempio Archibus. In particolare, se si hanno a disposizione per ogni elemento le informazioni riguardo il materiale, la data di posa in opera e l'indice di integrità (pesata e non), queste possono essere implementate nel tempo. Certamente la costruzione di un modello BIM per strutture esistenti è costosa. Inoltre, non è facile avere in modo completo tutte le informazioni menzionate pocanzi, soprattutto quando non si ha a che fare con strutture recenti. Pertanto, è legittimo supporre che l'uso congiunto dei due strumenti sia giustificato, nel caso di grandi infrastrutture e sistemi edilizi complessi.

Uno strumento semplice, ma che può aiutare l'ingegnere ad avere una visione globale in senso spaziale può essere una check-list su fenomeni su vasta scala. Di seguito, un esempio di quesiti da includere in una check-list.

Checklist per fenomeni globali				
	Sì	**No**	**ND**	**Note**
Sono presenti fessurazioni ripetute identiche in ogni piano?				
Sono presenti che suggeriscono il cedimento di una facciata dell'edificio?				
Sono presenti fessurazioni che suggeriscono il cedimento o il rialzo di un pilastro?				
Sono presenti disallineamenti di impianti, giunti o finiture?				
Sono presenti fessurazioni orizzontali sui pilastri?				
Sono presenti fessurazioni da taglio?				
Sono presenti fessurazioni a croce di Sant'Andrea?				
Sono presenti segni di possibile punzonamento?				
Sono presenti segni di spanciamento o di deformazione su elementi verticali?				
Sono presenti infiltrazioni nei locali sottostanti le coperture?				

Figura 4.7: Esempio di check-list per fenomeni globali

La check-list qui proposta va intesa come uno strumento che stimoli l'analista a riconoscere fenomeni globali, che possono essere persi di vista quando ci si concentra troppo su una analisi elemento per elemento.

4.4 Verso una manutenzione predittiva

Come brevemente anticipato in 4.2, la manutenzione predittiva (*predictive maintenance* o *Intelligent Maintenance*) è una politica di manutenzione intelligente, sviluppatasi con la progressiva informatizzazione dei sistemi produttivi. Con l'introduzione di paradigmi come l'*Industria 4.0*, la *Smart productivity*, l'*Industrial IoT*, si sono resi disponibili molti dati in continuo e in tempo reale sui parametri di produzione. L'analisi di questi dati, anch'essa continua e in tempo reale, consente di prevedere il verificarsi dei guasti con il margine di tempo necessario per poter intervenire a impedirne l'accadimento.

I benefici di questa politica di manutenzione sono evidenti: innanzitutto prevenendo i guasti sono limitati gli interventi sui macchinari e massimizzate le vite dei singoli componenti. Riducendo al minimo i costosissimi fermi macchina, aumenta di conseguenza il tempo di servizio. Gli intervalli tra gli interventi di manutenzione diventano, così, più estesi e più flessibili. Grazie alle informazioni a disposizione sulla linea di produzione si ha una maggiore consapevolezza dei rischi. In ultimo, risulta anche più facile l'analisi sulle cause ultime che si traduce in un più veloce ed efficiente impiego della manodopera.

La trasposizione di una simile politica all'ambito civile, però, non è immediata e a costo zero. Come si è detto, la manutenzione predittiva nasce dalla disponibilità continua e in remoto dei dati sulle linee di produzione. Negli edifici esistenti, per poter avere dei dati in modo simile occorre installare sistemi di monitoraggio in remoto. Il costo della progettazione, installazione e delle materie prime di questi sistemi ha limitato finora la loro applicazione solo a rilevanti dal punto di vista strutturale, storico-artistico e strategico. Generalizzare quale tipo di monitoraggio e quali parametri

controllare è pressoché impossibile, perché questi vengono scelti in base al problema ingegneristico e agli scenari di collasso dello studio.

Anche avendo disponibilità di dati in tempo reale, per poter fare previsioni sull'evoluzione di un fenomeno o di una modalità di rottura occorre un appropriato modello matematico che sia rappresentativo del problema ingegneristico. Il numero di dati necessari aumenta se si considera che generalmente i fenomeni di degrado in ambito edilizio sono influenzati da decine di fattori e le correlazioni e le dipendenze non sempre sono lineari.

Il che conduce direttamente, ma non ne è l'unica causa, alla seconda difficoltà di applicazione di una manutenzione predittiva: nella pratica non si usano i concetti di vita utile e di vita rimanente utile. In edilizia, il concetto di vita utile può essere assimilato a quello di *vita nominale di progetto*, ossia il periodo di tempo durante il quale l'edificio o le sue parti, soggetti a interventi di sola manutenzione ordinaria, mantengano specifici livelli prestazionali. Si tenga comunque a mente che la vita nominale di progetto viene definita per l'opera complessiva ed è un parametro convenzionale, assunto in sede di progetto, usato per le verifiche dei fenomeni dipendenti dal tempo, quali la durabilità o la fatica, mediante il corretto dimensionamento dei particolari costruttivi.

In un piano di manutenzione predittiva si parte dalla definizione di vita utile per ogni componente. A partire da questa, sulla base dello stato di degrado riscontrato in fase di ispezione o in base alle prestazioni monitorate, si ricava una stima della vita rimanente utile.

Questi due fattori comportano ostacoli difficilmente superabili nella predizione del tempo di rottura di un elemento architettonico o di un sistema edilizio. Il momento del collasso di un elemento, in alcuni casi, è incerto per la variabilità intrinseca sia delle caratteristiche fisiche che dello stesso modo di guasto. Per ridurre le incertezze occorre seguire più strade: innanzitutto è necessaria una conoscenza approfondita dell'edificio, dei materiali che lo compongono e loro caratteristiche meccaniche. Inoltre, occorre determinare il comportamento strutturale per poter determinare gli scenari di collasso e fenomeni di degrado.

Queste informazioni possono essere subito a portata di mano nel caso di strutture di ultima generazione, ma quando si ha a che fare con edifici non

così recenti, la difficoltà nel reperire le informazioni aumenta con l'età dell'edificio stesso.

Una volta determinati i possibili scenari di collasso e fenomeni di degrado, si possono individuare i parametri significativi da monitorare. Ispezioni, monitoraggio e indagini approfondite, se condotte in modo efficace, riducono l'incertezza sulla presenza e l'evoluzione di tali fenomeni. Tuttavia, è bene tenere a mente che l'incertezza può essere considerevolmente ridotta, ma non può mai essere considerata nulla.

Per chiarire come la scelta dei parametri da monitorare sia strettamente legata al problema ingegneristico in esame si consideri il caso dei ponti ferroviari. In numerosi casi, i ponti ferroviari costituiscono sono difficilmente accessibili per una ispezione a distanza di contatto, sia per la loro posizione geografica, che per la loro intrinseca forma e struttura. In altri casi, per poter sottoporre a ispezione il ponte è necessario interrompere il servizio ferroviario. Uno dei sistemi implementati per il monitoraggio in remoto è basato sull'analisi dinamica dei ponti ferroviari stessi. Nella pratica, vengono installati accelerometri e velocimetri, che trasmettono dati in tempo reale. La risposta di un corpo alle sollecitazioni dinamiche è legata alla rigidezza del corpo stesso. Dall'analisi modale dei dati rilevati, si riescono a rilevare cambiamenti nella rigidezza del ponte stesso. I cambiamenti nella rigidezza, e quindi nelle caratteristiche meccaniche del ponte, possono essere sintomi di fenomeni di degrado. Dunque, con questo metodo, è possibile dedurre l'insorgenza di fenomeni di degrado in modo tempestivo per poter procedere ad indagini e interventi e predirne l'evoluzione.

È evidente che il monitoraggio degli spostamenti è sensato in una struttura sottoposta a forti carichi dinamici come un ponte ferroviario, mentre avrebbe poco senso in un'altra struttura il cui problema principale è costituito da fenomeni di risalita capillare.

Non è indispensabile avere sistemi di monitoraggio in remoto per formulare una politica di manutenzione predittiva, ma è possibile formulare una strategia basata sulle ispezioni. Anche in questo caso occorre avere a disposizione dei dati e un modello matematico descrittivo del problema

ingegneristico, sia esso un meccanismo di guasto o un fenomeno di degrado. Il dato di partenza è la vita utile dell'elemento, come indicata dal costruttore o dal produttore. Una stima della vita utile residua del componente può essere fatta sulla base del modello matematico e i dati delle condizioni in esercizio, come temperatura, umidità, carichi, ecc.. Con le ispezioni si verifica se il modello matematico sia coerente con la realtà e i risultati dei rilievi vengono di volta in volta usati per aggiornare e migliorare il modello stesso.

Ricapitolando, le fasi di applicazione di una manutenzione predittiva ad un sistema edilizio sono:

- inventario e valutazione funzionale di ogni elemento, con analisi per determinare efficienza, vita residua utile, rischio di rottura, generale conformità delle strutture;
- definizione modello di danno per ogni componente strutturale e sua evoluzione nel tempo;
- aggiornamento del modello sulla base del risultato delle ispezioni.

È lapalissiano come questo approccio, se applicato sistematicamente ad ogni elemento architettonico, si trasformi facilmente in un lavoro molto dispendioso in termini sia di tempo che di risorse. È lecito dunque chiedersi se sia veramente efficace applicarlo indistintamente su ogni elemento. Da queste considerazioni sono nati gli approcci affidabilistici.

4.5 Metodo affidabilistico

Il metodo affidabilistico, detto anche *Reliability-centered Maintenance* o *RCM* è basato sul concetto di affidabilità (*reliability* in inglese), intesa come l'attitudine di una entità a svolgere la funzione richiesta in condizioni date per un dato intervallo di tempo.

Nella fattispecie, il metodo RCM è una procedura usata per determinare i requisiti manutentivi di ogni bene materiale nel suo contesto operativo.

In particolare, nel processo RCM sono analizzati i possibili modi di avaria delle apparecchiature e i relativi effetti, ossia si basa su una procedura di tipo FMEA, e in qual modo essi danneggino non solo le singole apparecchiature analizzate, ma come essi si propaghino anche alle altre apparecchiature dell'immobile compromettendo l'affidabilità totale di quest'ultimo. L'analisi RCM classifica le componenti dell'immobile, identifica quelle critiche e, in

base alla severità dei risultati ottenuti, può consigliare l'opzione più idonea da scegliere tra le diverse politiche di manutenzione. L'obiettivo di questo metodo è di ottimizzare i costi di manutenzione, adoperando le politiche di manutenzione più idonee in base alla funzione di ogni elemento.

Nella pratica, il metodo RCM si applica rispondendo a sette specifiche domande riguardo l'elemento o il sistema in esame. Le domande sono:

- quali sono le funzioni e gli standard qualitativi associati dell'elemento nel suo attuale contesto operativo?
- in quali modi non riesce a svolgere le sue funzioni?
- cosa causa ogni errore funzionale?
- cosa succede quando si verifica ogni errore?
- in che modo conta ogni errore?
- cosa si può fare per prevedere o prevenire ogni errore?
- cosa si dovrebbe fare se non è possibile trovare un'attività proattiva adeguata?

Per rispondere ad alcune di queste domande le persone più indicate sono proprio quelle che usano o che hanno più di frequente a che fare con l'elemento in esame. Per questo motivo esse devono essere coinvolte nella procedura sin dall'inizio. Questa necessità, così come alcune delle domande sopra riportate, ricordano i principi usati nell'analisi FMEA.

Una differenza rispetto l'approccio FMEA è che alle conseguenze dei guasti viene riconosciuta molta più importanza rispetto alle loro caratteristiche tecniche. Le conseguenze vengono suddivise in quattro gruppi:

- conseguenze di guasti nascosti: tali guasti non hanno impatti evidenti, ma espongono il sistema a reazioni a catena con anche conseguenze catastrofiche;
- conseguenze ambientali e per la sicurezza;
- conseguenze operative: guasti che influiscono sulla produzione;
- conseguenze non operative: rientrano in questa categoria guasti evidenti, ma che non incidono sulla sicurezza, sulla produzione, né hanno conseguenze ambientali, quindi comportano solo costi diretti della riparazione.

L'inquadramento in queste categorie è uno step fondamentare per il processo decisionale di manutenzione.

Le ultime due domande aiutano a determinare le attività di manutenzione più appropriate per le modalità di guasto identificate. Nel processo RCM le attività e le tecniche manutentive sono divise in due categorie: le attività proattive e le azioni predefinite. Nella prima categoria rientrano le attività messe in atto prima che il guasto si verifichi, al fine di prevenirlo, ossia quelle generalmente incluse nelle politiche di manutenzione preventiva e predittiva. Nella seconda categoria rientrano quelle attività da svolgere quando il guasto si è già verificato o non sia possibile identificare un'attività proattiva, come ad esempio la riprogettazione di un componente o di una parte del sistema.

Una volta definite ed elencate tutte le attività e tecniche manutentive, queste vengono razionalizzate e discretizzate in pacchetti più piccoli da applicare periodicamente. L'efficacia delle attività manutentive viene costantemente sottoposta a revisione e adattata sulla base dell'esperienza acquisita.

In ambito immobiliare, il metodo affidabilistico ben si presta ad essere applicato a infrastrutture e sistemi edilizi molto estesi e tecnologici, come ospedali, grattacieli, stazioni, centri commerciali, ecc.). In questo contesto, le tecniche più onerose in termini di tempo e denaro vengano usate per gli elementi architettonici critici per la stabilità e la sicurezza o con rilevanza storico-artistica. Tecniche più elementari di manutenzione, anche di tipo correttivo, possono essere ancora applicate a elementi che non siano: critici per la sicurezza, cruciali per la produzione o l'erogazione di servizi o costosi e difficili da reperire e sostituire.

4.6 KPI

Approccio totalmente diverso, ma ancora preso a prestito dal mondo industriale e dal marketing è quello basato sui *Key Performance Indicators* (KPI), in italiano "indicatori chiavi di prestazione". I KPI sono indicatori strategici che permettono di misurare lo stato di un processo o la buona riuscita di un progetto e sono legati agli obiettivi che sono stati preposti. Gli indicatori devono essere quantificabili e misurabili, in modo da poter

determinare lo stato dei progressi fatti. Devono essere inoltre scelti in un'ottica di lungo periodo, in modo da poter essere confrontabili nel tempo.

I KPI possono essere applicati in progetti di qualsiasi ambito e di frequente si basano su uno dei tre seguenti fattori: tempo (ad esempio tenere traccia dei progressi, dello stato di avanzamento di un progetto), costi, qualità (ad esempio stimare il grado di soddisfazione dei clienti). Essendo indicatori numerabili e quantificabili, possono essere usati anche per confrontare le performance di progetti (o team o prodotti) diversi, in un'ottica di benchmarking.

Nel mondo dell'ingegneria civile i KPI sono usati soprattutto nella fase di costruzione di un edificio o infrastruttura. In questo caso, i parametri usati più frequentemente sono:

- rapporto tra costi effettivi e costi preventivati;
- lo stato di avanzamento rispetto il Gantt e le obiettivi intermedi fissati;
- numero di reclami;
- numero di incidenti e quasi incidenti
- numero di ore lavoro spese sui diversi segmenti del progetto;
- numero di difetti di posa in opera e realizzazione;
- quantitativo di materiale usato;
- numero di variazioni apportate al progetto.

Ovviamente anche gli indicatori di prestazione devono essere selezionati in base alla loro importanza all'interno del progetto e per gli obiettivi di crescita dell'impresa stessa, altrimenti diventano uno sterile esercizio di calcolo e scrittura report.

Per quanto riguarda la vita in esercizio, gli indicatori si allargano a diversi aspetti della funzionalità di un edificio con, ad esempio, considerazioni sull'ambiente e l'energia o la salute e il comfort degli utenti. Ad oggi, gli indicatori di prestazione già usati per diversi scopi sono:

- sostenibilità: presenza di materiali eco-compatibili, energia usata per riscaldare o raffreddare gli ambienti, capacità dell'edificio di trattenere il calore, presenza di impianto per riciclo dell'acqua;

- accessibilità: se l'edificio è frequentabile con facilità in ogni suo aspetto da persone con disabilità o difficoltà motorie, se sia sicuro;
- comfort: presenza di ambiente salubre per gli utenti, in termini di temperatura, umidità e ricambio dell'aria;
- impatto ambientale;
- acustica, se attività nell'edificio producono rumori che hanno un impatto sugli edifici adiacenti o viceversa, risente di rumori prodotti altrove;
- costi di gestione;
- livello di soddisfazione di utenza.

Per alcuni di questi parametri sono nate certificazioni di terze parti per attestare le performance degli edifici. Molto diffuse sono le certificazioni energetiche e ambientali.

Ritornando ad una ottica più stretta sulla manutenzione, sono già in uso i seguenti parametri:

- costi di manutenzione;
- numero di piccoli lavori rimandati e accumulati, sia quelli non urgenti da dover essere evasi in breve tempo, sia quelli con un livello di urgenza maggiore;
- sicurezza in esercizio: numero di incidenti e quasi incidenti; feedback utenti: lamentele, disservizio.
- durabilità: numero di difetti presenti e di "nuovi" difetti; questo per esempio può essere facilmente applicato con una manutenzione predittiva basata su ispezioni con un supporto informatico, in cui sia facile un confronto tra due ispezioni successive.

In un periodo di transizione una nuova politica di manutenzione è sicuramente utile monitorare la percentuale dei lavori completati che è di tipo "correttivo". In questo modo si può verificare se la gestione è bloccata all'approccio fix-it-when-it-broke o se sta veramente muovendosi in modo efficace verso approcci preventivi statistici o secondo condizione.

Un modo per identificare degli indicatori chiave, soprattutto ai fini della sicurezza può essere quello di ricondursi al principio di Pareto. Come visto al paragrafo 2.3.1, durante l'applicazione di un'analisi FMEA è facile imbattersi in cause di guasto ricorrenti e controllando queste si può influire sulla

probabilità di accadimento di più di una modalità di guasto. In base a quanto visto usando un approccio FMEA su un sistema edilizio, tra le cause di guasto più ricorrenti si trovano: carichi eccessivi o inadeguati, attacchi biochimici e carenza nella manutenzione.

Di conseguenza, si possono formulare i seguenti indicatori:

- rapporto tra carico in esercizio e carico di progetto, per ogni ambiente;
- tenuta all'acqua sia meteorica che di impianti. Stato di integrità di impermeabilizzazione e impianti. Sensibilità intesa come capacità di rilevare un guasto nell'impianto;
- rapporto tra costi di manutenzione effettivi e budget annuale;
- % di elementi difettati presenti nel complesso edilizio.

Soffermandoci sull'ultimo indicatore proposto, questo ricorda la definizione dell'indice VGR come definito al paragrafo Indici2.4.2.4.. Esso infatti può essere considerato a tutti gli effetti un indicatore di prestazione e può essere monitorato nel tempo.

A titolo di esempio si prova ad applicare il principio di Pareto ai Binari 1 e 20, al fine di individuare le probabili cause più ricorrenti dei difetti riscontrati. Nei 419 elementi ispezionati sono stati rilevati 248 difetti. Le cause riscontrate sono schematizzate in Tabella 4.1.

Nr difetti	Ipotesi causa
190	Attacchi biochimici
60	Difetti di origine antropica (tra cui urti, difetti di posa in opera, carenza di manutenzione)

Tabella 4.1:Cause ricorrenti per difetti riscontrati nei Binari 1 e 20

Tra i difetti di origine antropica figurano gli urti in relazione ai difetti quali abrasioni, scheggiature e fessure presenti ad una altezza da terra ricorrente, già citati nel paragrafo 3.3 e di cui un esempio è riportato in Figura 3.8. Si ipotizza che una buona parte di questi difetti siano causati dal traffico pluridecennale dei piccoli veicoli ad uso interno presenti in stazione.

4.7 Conclusioni

La manutenzione in ambito edilizio, che si può definire ancora in fase embrionale, può trarre suggerimenti dalle politiche e tecniche consolidate in ambito industriale, presi gli opportuni accorgimenti.

La sfida che gli odierni gestori della manutenzione devono affrontare è di scegliere la tecnica più appropriata che affronti ogni modalità di guasto o collasso in modo che questa vada incontro alle aspettative dei proprietari, degli utenti e della società nell'insieme. Allo stesso tempo deve essere applicabile sul lungo periodo, avendo perciò un buon rapporto tra costi e risultati. Da ultimo deve essere applicabile con il supporto e la cooperazione di tutte le persone coinvolte a vario titolo nei processi manutentivi.

Vista la pluralità di tecniche a disposizione e di situazioni reali non è possibile definire a priori quale sia la migliore strategia da applicare, ma la scelta va ponderata caso per caso.

Capitolo 5

Politiche di manutenzione applicate a Torino Porta Nuova

5.1 Introduzione

Nel presente capitolo, verrà illustrata una proposta di manutenzione predittiva pensata *ad hoc* per una zona specifica della stazione Torino Porta Nuova: la Copertura 7 dell'Edificio 1. All'inquadramento della zona all'interno del complesso edilizio segue una descrizione strutturale e dei fenomeni di degrado in atto.

La proposta di manutenzione è formulata considerando le azioni più efficaci per rallentare i fenomeni di degrado riscontrati, nonché per limitare le probabili cause. Si conclude il capitolo con una considerazione economica riguardo la politica di manutenzione proposta.

5.2 Inquadramento e descrizione

Durante le fasi preliminari all'applicazione del metodo per la valutazione sintetica dell'integrità strutturale è stata individuata una zona di particolare interesse: la Copertura 7 dell'Edificio 1. Per motivi logistici, non è stato possibile applicare il metodo proposto in questa tesi a tappeto sulla Copertura 7, ma per la peculiarità dell'ambiente, si è scelto di usarla come esempio di applicazione delle politiche di manutenzione illustrate nel Capitolo 4.

Secondo l'organizzazione logistica attuale della Stazione Torino Porta Nuova, l'Edificio 1 è quel che era una volta definito come "*l'edificio viaggiatori*", composto da locali destinati ad uso commerciale e ai servizi ai viaggiatori. È l'unica via d'ingresso dei viaggiatori, che hanno accesso al piano ferro e al piano ferro ammezzato. Dal primo al quinto piano, l'accesso è ristretto al personale di Grandi Stazioni, Ferrovie dello Stato e di stazione.

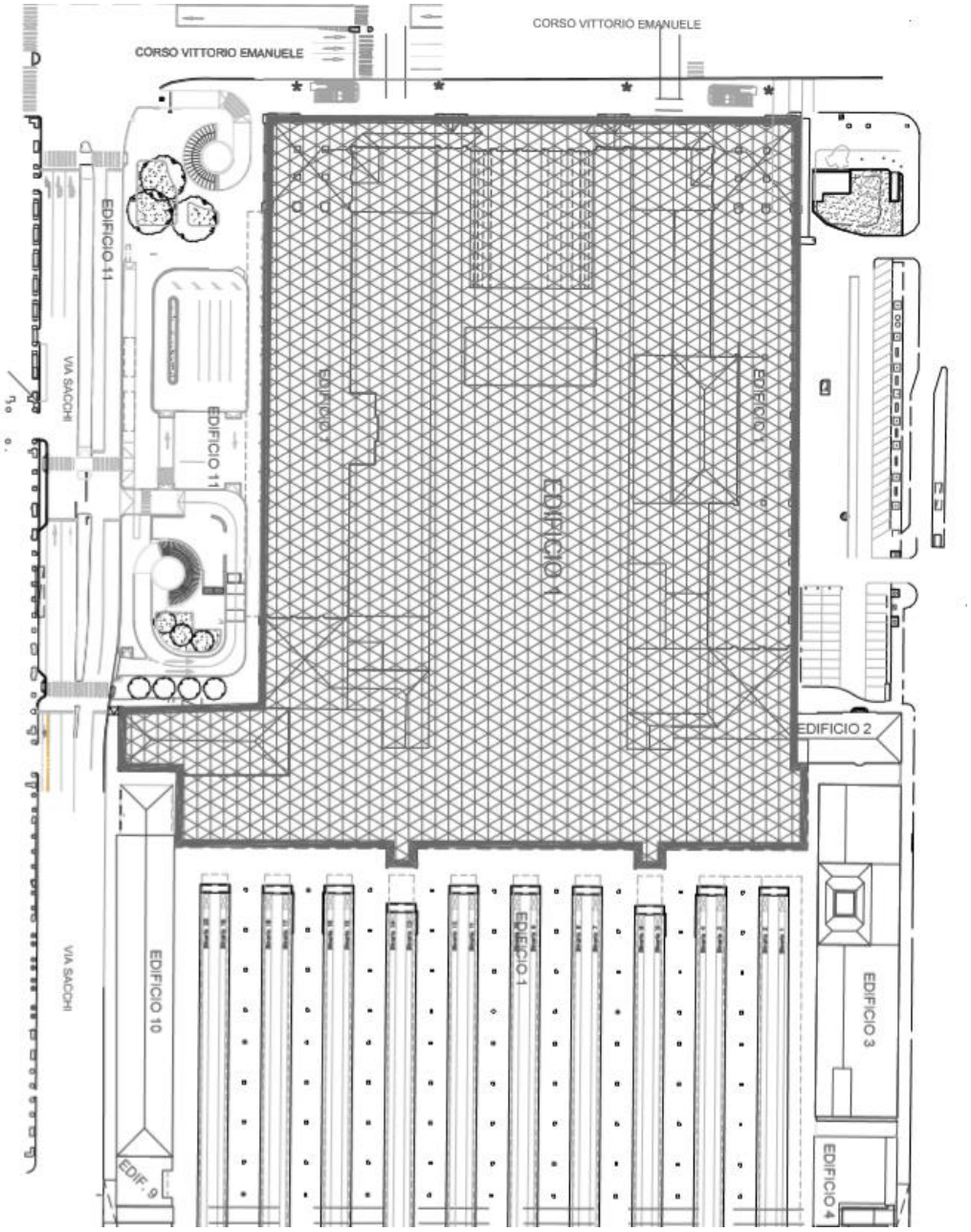

Figura 5.1: Inquadramento dell'Edificio 1

Nella figura precedente è riportata una pianta della Stazione Torino Porta Nuova con evidenziato l'Edificio 1. Invece, nella figura successiva si evidenzia quale sia la Copertura 7, oggetto di quest'analisi.

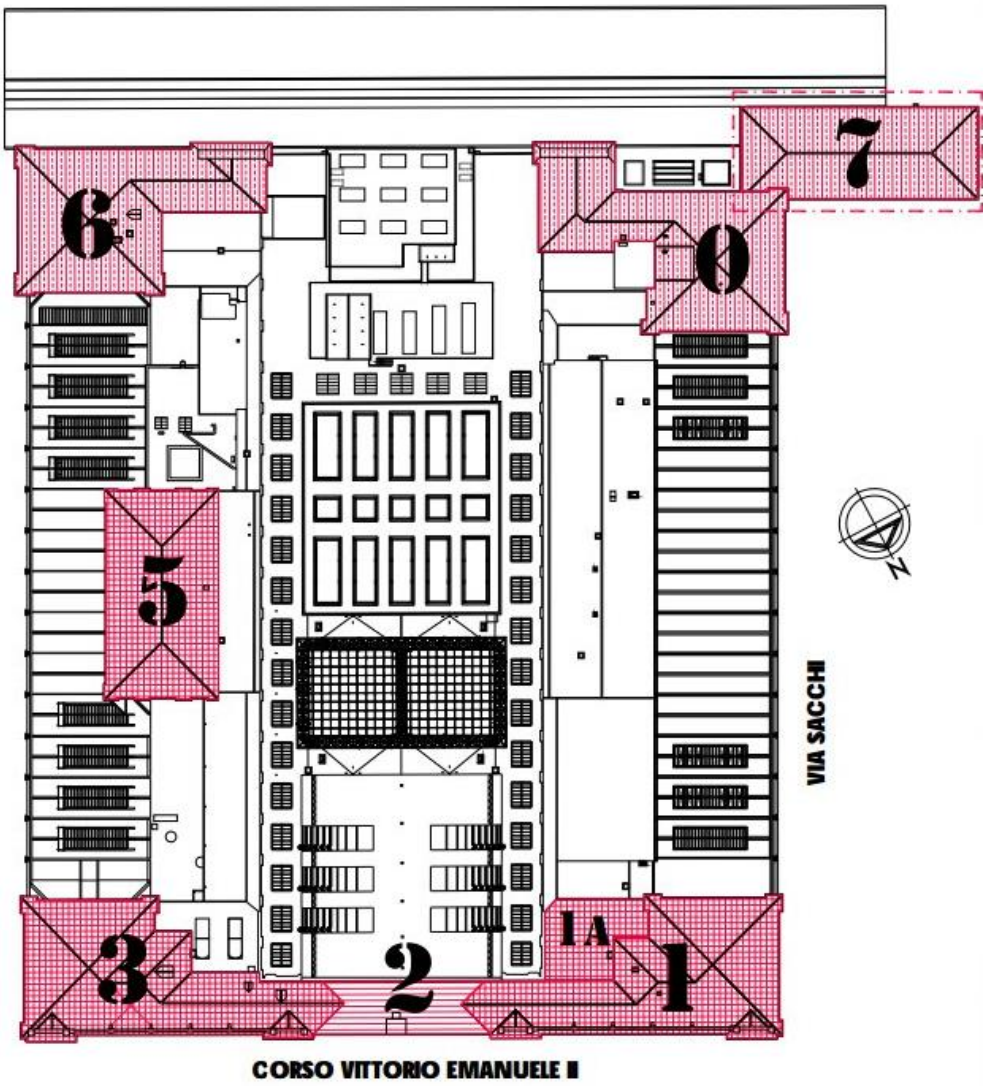

Figura 5.2: Inquadramento copertura 7 dell'Edificio 1.

La copertura è stata soggetta a totale rinnovamento tra il 2011 e il 2014. La nuova copertura è fatta di tegole marsigliesi in laterizio, che poggiano su un sistema di correnti paralleli e perpendicolari alla pendenza. I correnti poggiano su tavolati in pannelli portanti di legno lamellare, rivestiti da una guaina traspirante. I tavolati sono portati da travi in legno massiccio di larice, di sezioni 18x22 o 20x30 o 20x26. Nell'immagine successiva è riportata una sezione del manto di copertura, tratta dagli *as built*. In giallo sono evidenziati i tavolati in pannelli tecnici portanti e in blu la guaina traspirante.

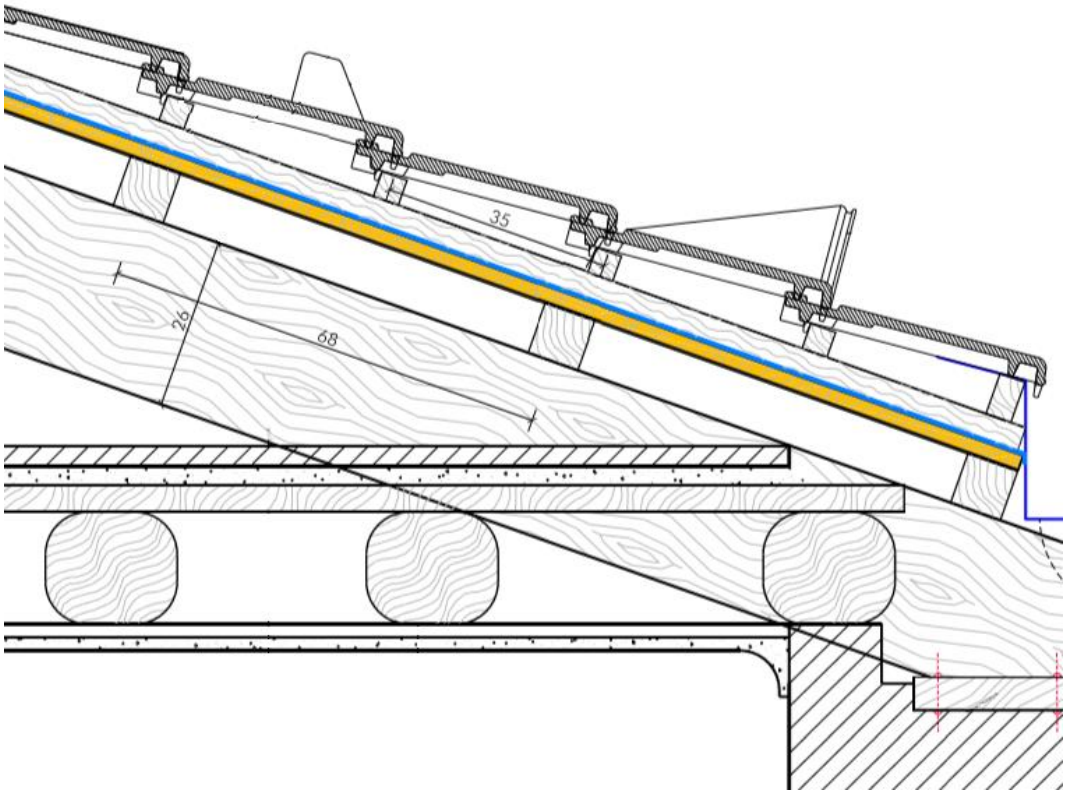

Figura 5.3: Sezione manto di copertura

La Copertura 7 ospita tubazioni facenti parte dell'impianto di riscaldamento. Nei periodi dell'anno in cui l'impianto è attivo, nonostante le tubazioni siano coibentate, si raggiungono temperature intorno ai 30°C. Temperature ancora superiori sono raggiunte in estate inoltrata, periodo in cui a Torino, negli ultimi anni, sono state registrate temperature oltre i 35°C. Inoltre, non essendo presenti sufficienti aperture fisse la ventilazione complessiva dell'ambiente è decisamente scarsa.

Per la combinazione delle situazioni riportate, negli ambienti della Copertura 7 si hanno, in alcuni periodi dell'anno, livelli di temperatura e umidità molto alti.

Durante una ispezione condotta in data 15 novembre 2019 si è visto che diverse travi portanti in larice hanno sviluppato ampie fessure da ritiro, alcune con apertura dell'ordine del centimetro. Altre travi hanno subito deformazioni e rotazioni visibili a occhio nudo. Dieci travi presentano una cerchiatura metallica sulle zone fessurate.

Si precisa che, secondo alcune fonti fotografiche, alcune travi mostravano alcune fessurazioni già poche settimane dopo la posa in opera. Si ipotizza che tali fessurazioni siano dovute ad una insufficiente stagionatura o perché il legno sia stato messo in opera con una umidità intrinseca differente da quella di equilibrio nelle condizioni di esercizio.

5.3 Proposta di manutenzione

Per poter imbastire una proposta di manutenzione occorre dapprima fissare il ruolo strutturale degli elementi in esame, ragionare sulle potenziali cause dei fenomeni di degrado riscontrato e su come poterle controllare e limitare.

L'analisi è concentrata sulle travi in larice, per via dei sintomi di degrado riscontrati e descritti nel paragrafo precedente. Le travi in larice sono gli elementi portanti della copertura, quindi rivestono un ruolo strutturale fondamentale. La sostituzione di una porzione o della totalità della copertura comporta dei costi notevoli.

Le fessurazioni e deformazioni riscontrate influiscono direttamente sulle caratteristiche meccaniche di ogni elemento, in quanto riducono la sezione efficace della trave stessa. In alcuni casi, le deformazioni hanno anche comportato un disallineamento agli incastri e la perdita di aderenza tra elementi che dovrebbero essere contigui.

Le fessurazioni e deformazioni nel legno sono dovute a movimenti dimensionali che avvengono in seguito a cambiamenti di umidità. Essendo in un ambiente con temperatura e umidità variabili durante l'anno, queste travi in legno possono subire movimenti dimensionali anche notevoli.

In aggiunta, l'umidità contenuta nel legno è un fattore che influenza gli attacchi xilofagi (funghi e insetti). Le norme UNI EN 335-1 e UNI EN 335-2 definiscono le classi di rischio biologico da parte di funghi e insetti xilofagi sulla base dell'umidità relativa dell'aria e dell'umidità del legno.

La prevenzione dei principali fenomeni di degrado (deformazioni e attacchi xilofagi) passa attraverso il monitoraggio e il controllo della temperatura e l'umidità in questi ambienti. Una concausa delle condizioni estreme di questi ambienti è l'assenza di un appropriato sistema per

l'aerazione e il ricambio dell'aria pertanto, si consiglia di intervenire per predisporre delle aperture adeguate.

Per quanto riguarda le fessure già aperte si consiglia l'installazione di centine sulle zone in cui le aperture siano troppo grandi e di zoccoli o talloni laddove serva ripristinare la continuità strutturale.

Per il tipo di ambiente e di fenomeni riscontrati, si consiglia una politica di manutenzione basata sulle ispezioni.

Giacché i due parametri che influenzano maggiormente i fenomeni di degrado del legno sono la temperatura e l'umidità, che sono correlati alla stagionalità, si consiglia di effettuare le ispezioni in questi ambienti due volte all'anno. Durante le ispezioni occorre verificare che sia ancora presente la continuità strutturale, in particolare agli appoggi. Oltre a ciò, per via dei movimenti dimensionali del legno, le centine e i cerchiaggi potrebbero essere allentati e dunque non funzionanti. Pertanto, occorre anche verificare lo stato delle bullonature. Infine, occorre monitorare lo stato di apertura delle fessure e lo stato deformativo del legno stesso.

Dopo fenomeni meteorici particolarmente intensi, si consiglia una ispezione al fine di verificare che non siano entrate nell'ambiente acque meteoriche in seguito, per esempio, a danni sulle coperture.

Un discorso diverso va elaborato per una porzione della Copertura 7 che non è accessibile per ispezioni. Anche in questo caso si consiglia di intervenire per predisporre delle aperture che garantiscano una sufficiente ventilazione. In aggiunta si consiglia l'installazione di sensori fissi per la rilevazione dell'umidità relativa dell'aria e temperatura, che trasmettano dati in remoto. Infatti, a partire dalle condizioni termoigrometriche dell'aria è possibile stimare l'umidità di equilibrio del legno. Poiché i movimenti dimensionali del legno sono dipendenti dalla sua umidità di equilibrio è possibile stimare se esso abbia subito movimenti consistenti in base alle variazioni nell'umidità di equilibrio.

Definite le soglie di umidità relativa dell'aria e temperature con valori ottimali, di allerta o valori critici è possibile determinare se la ventilazione sia sufficiente per garantire condizioni ottimali o se persistano problemi.

Nel caso in cui le condizioni di temperatura e umidità relativa dell'aria siano ancora critiche, i gestori valuteranno la possibilità di intervenire ulteriormente per modificare tali parametri o se intervenire con trattamenti preservanti direttamente sul legname.

5.4 Aspetto economico

Le politiche di manutenzione nascono al fine di limitare i costi dovuti agli interventi di riparazione e alle interruzioni di servizio. In questo caso l'adozione di una politica di manutenzione sembra essere un costo evitabile, poiché i fenomeni di degrado riscontrati hanno conseguenze rilevanti in un arco temporale molto ampio. Un esempio della durevolezza del legno è costituito dalle coperture 1, 2 e 3 dell'Edificio 1, in cui sono ancora presenti travi lignee in pino e pino silvestre risalenti al 1861.

Occorre tuttavia considerare la rilevanza della Stazione di Torino Porta Nuova, sia da un punto di vista infrastrutturale all'interno del contesto cittadino e nazionale, ma anche dal punto di vista storico-artistico.

Questi aspetti influiscono inoltre sugli aspetti logistici di ogni attività di manutenzione che abbia luogo in stazione. Infatti, sin dalla fondazione, tutti gli interventi e gli ampliamenti sulla stazione sono avvenuti senza interrompere il servizio ferroviario. Questo significa che in ogni situazione e in ogni cantiere degli interventi di riqualifica degli anni 2000 è sempre stato garantito l'accesso e il passaggio degli utenti e così dovrà essere anche in interventi futuri.

In aggiunta, poiché la stazione è situata nel centro storico di Torino, occorre considerare sempre le interferenze con le infrastrutture circostanti, come ad esempio le linea della metropolitana cittadina. Sul lato di Via Sacchi, la stazione è affiancata per tutta la sua lunghezza dalla linea di uno dei tram cittadini, i cui cavi ad alta tensione costituiscono una limitazione nello spazio nei movimenti di macchine in altezza, come gru a torre.

Per i motivi qui esposti, ogni intervento in questa sede ha una logistica più complessa, che implica in dilatazione dei tempi e ricercatezza delle soluzioni e delle risorse impiegate. Il tutto si traduce direttamente in un incremento dei costi.

Dunque, un intervento di estensione limitata come la creazione di aperture per l'aerazione, nonostante costituisca una difficoltà nell'immediato, ha dei benefici a lungo termine, perché rallenterebbe i fenomeni di degrado in atto. Congiuntamente ad altre tecniche per la prevenzione del degrado delle travi in legno, si può massimizzare la durata delle coperture, scongiurando il più possibile un intervento massiccio come quello di rifacimento totale.

5.5 Conclusioni

All'interno della Copertura 7 dell'edificio 1, per una serie di fattori costruttivi, si vengono a creare delle condizioni termoigrometriche tali da favorire lo sviluppo di fessurazioni, deformazioni e attacchi xilofagi ai danni delle travi portanti in larice lì presenti. Tali danni influiscono direttamente sulla sezione efficace di ogni trave, incidendo sulla resistenza meccanica.

Viste le particolari condizioni logistiche della Stazione di Torino Porta Nuova nel suo insieme e vista la rilevanza strutturale di questa zona, si consiglia di effettuare un intervento che permetta una migliore ventilazione dell'ambiente. Inoltre, si consiglia ispezionare periodicamente le travi al fine di verificare lo stato di avanzamento dei fenomeni su citati. Nelle zone in cui questo non fosse possibile, si consiglia di monitorare umidità relativa dell'aria e temperatura degli ambienti, al fine di mantenerli sempre in un range in cui sia difficile lo sviluppi dei danni sopra citati.

Capitolo 6

Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi era di sviluppare uno strumento da adoperare in ambito edilizio per effettuare una valutazione sintetica dello stato di danno di elementi strutturali e non, che fosse di supporto ai gestori nei processi decisionali della manutenzione, avendo come criteri l'invecchiamento delle strutture e la sicurezza. Nei paragrafi seguenti si riassume il lavoro svolto.

Dopo la definizione preliminare dei prerequisiti del metodo, sono stati analizzati metodi speditivi di ambito industriale e schedature per il rilievo edilizio, al fine di individuarne punti di forza a cui ispirarsi e punti di debolezza da evitare. Infine, si è scelto di non far dipendere l'applicazione del metodo dalla disponibilità di documentazione storica e progettuale. Inoltre, si è deciso che il metodo dovesse essere basato su parametri quantitativi e numerabili, in modo da rendere oggettivi e confrontabili i risultati delle valutazioni. Per facilitare il compito dei decisori, si è previsto di affiancare ai risultati dei codici colore di immediata comprensione e delle prescrizioni.

La stesura del metodo è cominciata dalla definizione degli elementi oggetto d'indagine, con focus sulla funzione strutturale. Ad ognuno di questi elementi è stata applicata un'analisi dei modi e degli effetti dei guasti (FMEA). Dalle considerazioni emerse, è venuto spontaneo definire tre coefficienti per descrivere lo stato di danno di ogni elemento: un coefficiente di *entità del*

difetto, uno di *estensione difetto* e, infine, uno di *importanza dell'elemento*. Sulla base dei tre coefficienti sono stati definiti due indici per elementi singoli – l'*indice di difettosità dell'elemento* e l'*indice di difettosità pesata* dell'elemento – e tre indici globali per poter descrivere il sistema edilizio. L'algoritmo matematico è stato sottoposto ad una verifica di coerenza che ha portato a risultati positivi.

Per tarare nel dettaglio il metodo, esso è stato applicato ad alcune porzioni della Stazione di Torino Porta Nuova. In base quanto emerso durante i rilievi e l'analisi dei dati, è stato necessario apportare delle modifiche ad alcuni coefficienti di entità e estensione difetto. Il miglioramento più corposo è stato dato da alcune modifiche per aumentare l'interpretazione e l'intuibilità dei risultati della valutazione: gli indici sono stati normalizzati a 10 e a 100 e ribaltati per avere una accezione positiva, diventando così degli *indici di integrità strutturale*. Complessivamente, il metodo rispetta i requisiti definiti preliminarmente.

Dai risultati ottenuti è emerso che le porzioni analizzate abbiano complessivamente delle buone valutazioni, ma con necessità di effettuare delle indagini o interventi localizzati.

Nella seconda parte di questa tesi si è ampliato lo sguardo alle strategie di manutenzione, confrontando lo stato dell'arte dell'ambito industriale e civile. Sono stati definiti dei paradigmi, applicabili a costruzioni esistenti, di manutenzione predittiva, del metodo affidabilistico e dei KPI. Il metodo per la valutazione sintetica dell'integrità strutturale è stato inserito all'interno di una politica manutenzione preventiva basata sulle ispezioni.

Infine, si è proposta una strategia di manutenzione per la Copertura 7 dell'Edificio 1 della Stazione di Torino Porta Nuova, in cui sono presenti elementi strutturali sottoposti a condizioni ambientali critiche.

Per sviluppi futuri si consiglia di elaborare un sistema per automatizzazione dei coefficienti di estensione difetto in funzione delle soglie definite, al fine di velocizzare l'analisi dei dati. Inoltre, si consiglia di sviluppare dei tool che permettano una facile integrazione dei risultati su software di gestione e per il disegno tecnico.

Bibliografia

Bibliografia generale

"Manuale per il recupero del patrimonio architettonico di pietra tra Verbano Cusio Ossola e Canton Ticino." [a cura di] Marco Zerbinatti. redatto all'interno del Progetto "Valorizzazione dell'architettura tradizionale, tutela del paesaggio antropizzato e del costruito".

BRASIOLI, Tiziana; MURZI, Martina. Schedatura speditiva per analisi di vulnerabilità architettonica: un'esperienza recente. GEOmedia, [S.l.], v. 10, lug. 2006. ISSN 2283-5687.

Lancellotta R., Calavera J., "Fondazioni", McGraw-Hill Libri Italia Srl, 1999.

Mazzucchetti, Alessandro. "Relazione sui lavori eseguiti per lo scalo definitivo delle ferrovie in Torino". In *Giornale del genio civile*, 1867

Wang, A. P. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliability Engineering and System Safety, 2003.

CNIM, "Linee Guida per la Manutenzione degli edifici", DEI s.r.l. Tipografia del genio civile, 2017

Roberto Di Giulio, "Manuale di manutenzione edilizia - Valutazione del degrado e programmazione della manutenzione", Maggioli Editore, 2007

Center for Chemical Process Safety of the American Institute of chemical engineers, "Dealing with aging process facilities and infrastructure", Wiley, 2018

John Moubray, "Reliability-centered Maintenance", Industrial Press, 1997

Mangosio, M. "La conoscenza dell'edificio: percorsi per un'anamnesi delle vicende storico-costruttive"

Ciampoli, Ing. M. “Criteri di programmazione delle ispezioni sulle costruzioni esistenti e di interpretazione dei risultati sperimentali”

Normative

Decreto Ministeriale - Ministero dei Lavori Pubblici 14 giugno 1989, n. 236. "Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica sovvenzionata e agevolata, ai fini del superamento e dell'eliminazione delle barriere architettoniche."

NTC2008 -"Norme tecniche per le costruzioni" D.M. 14 Gennaio 2008

Decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106 “Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro”, ed. Giugno 2016

D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380 Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia

Legge 5 marzo 1990, n. 46 Norme per la sicurezza degli impianti.

UNI 1047:2013 “Manutenzione – Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni” (Sostituisce UNI 10147:2003)

UNI 10224:2007 “Manutenzione – Principi fondamentali della funzione Manutenzione” (Sostituisce UNI 10224:1993)

UNI 10366:2007 “Manutenzione – Criteri di progettazione della Manutenzione” (Sostituisce UNI 10366:1994)

UNI 11063:2003 “Manutenzione – Definizione di Manutenzione ordinaria e straordinaria”

UNI EN 15331:2011 “Criteri di progettazione, gestione e controllo dei servizi di Manutenzione degli edifici” (Sostituisce UNI CEN/TS 15331:2006)

UNI EN 16646:2015 “Manutenzione – Manutenzione nella gestione dei beni fisici”

UNI 11119:2014 “Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Ispezioni in situ per la valutazione dello stato di conservazione e la stima delle prestazioni degli elementi in opera”

UNI EN 335:2013 “Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Classi di utilizzo: definizioni, applicazione al legno massiccio e prodotti a base di legno”

Opere citate

1. Santucci, Andrea. *L'invecchiamento degli impianti ed il pericolo di incidente rilevante nel contesto internazionale*. Roma : Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, 2018.

2. UNI 9910:1991. *Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio*.

3. *Schedatura speditiva per analisi di vulnerabilità architettonica: un'esperienza recente*. Brasioli, Tiziana e Murzi, Martina. Luglio 2006, GEOmedia.

4. Accardo, Giorgio, Cacace, Carlo e Rinaldi, Roberto. *Il Sistema Informativo Territoriale della “Carta del Rischio”*. s.l. : Istituto Centrale per il Restauro – Laboratorio di Fisica .

5. INAIL. Valutazione sintetica dell’adeguatezza del programma di gestione dell’invecchiamento delle attrezzature negli Stabilimenti Seveso. 2018.

6. Druķis, Pēteris, Gaile, Līga e Pakrastiņš, Leonīds . Inspection of public buildings based on risk assessment. *Procedia Engineering 172*. 2017, p. 247 – 255.

7. Linee guida per l'applicazione dell'art. 11.6 del REGOLAMENTO EDILIZIO del Comune di Milano.

8. *Milano, sicurezza degli edifici: solo 300 su 25 mila hanno la certificazione*. Giannattasio, Maurizio. 16 Marzo 2019, Corriere della sera.

9. Farnè, Mariachiara. Monitoraggio dell’invecchiamento delle installazioni a rischio di incidente rilevante . Politecnico di Torino : s.n., Marzo 2019.

10. AA.VV. *Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis for Automotive, Aerospace and General Manufacturing Industries*. s.l. : Dyadem Press, 2002.

11. Mecca, Saverio e Masera, Marco. *Technical risk analysis in construction by means of FMEA Methodology*. 1999.

12. *Assessment of Delay Factors for Structural Frameworks in Free-form Tall Buildings Using the FMEA* . Dongyoun Lee, Hyunsu Lim, Dongmin Lee, Hunhee Cho and Kyung-In Kang. 2019, International Journal of Concrete Structures and Materials.

13. *Design tools for life cycle analysis and durability evaluation of building systems: a research on the building envelope*. Pollo, Riccardo, Levra Levron, Andrea e Pellerey, Franco. 2013.

14. Mazzucchetti, Alessandro. Relazione sui lavori eseguiti per lo scalo definitivo delle ferrovie in Torino. . *Giornale del Genio Civile*. 1867.

15. *Inaugurazione ufficiale stamane a Porta Nuova*. 11 Settembre 1955, La Stampa.

16. 10147:2013, UNI. Manutenzione - Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni.

17. 10224:2007, UNI. Manutenzione - Principi fondamentali della funzione Manutenzione.

18. UNI 11063:2003. *"Manutenzione – Definizione di Manutenzione ordinaria e straordinaria"*.

19. 380/01, DPR. Testo unico per l'edilizia.

20. *Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning*. Wang, A. P. 2003, Reliability Engineering and System Safety.

21. Mirone, Luigi. La stazione ferroviaria di Torino Porta Nuova. *Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti di Torino*. 1962.

22. Ballatore, Luigi e Masi, Fausto. *Torino Porta Nuova: storia delle ferrovie piemontesi*. Roma : Abete, 1988.

Appendice: elaborazione dati

Binario 1

Stazione	**Torino Porta Nuova**
Sezione	Binario 1 - Poste Italiane
Consulente	Daniela Abagnale
Data	15/10/2019
Legenda	
Ca	Porzione in ca della copertura
L	Lamiera
Cop	Copertura
Gra	Grata
Pav	Pavimentazione
Chius	Chiusino
Riv	Rivestimento murario
Rivpil	Rivestimento pilastro
Zoc	Zoccolo
Cor	Cordoli

Pensilina

Elemento	**Materiale**	**Difetto**	**Estensione**	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Ca.1	cemento armato	macchie di umidità	<30%	1	2	5	8.75	87.5
L1.1	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L2.1	acciaio	Corrosione II stadio	<10%	2	1	4	8.75	90
L3.1	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L4.1	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L5.1	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L6.1	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.1	vetroresina	\				4	10	100
Ca.2	cemento armato	Perdita d'acqua, con zone incrostate e patine	<30%	3	3	5	4.375	43.75
L1.2	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L2.2	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L3.2	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L4.2	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L5.2	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L6.2	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.2	vetroresina	\				4	10	100
Ca.3	cemento armato	macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
L1.3	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L2.3	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L3.3	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L4.3	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L5.3	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L6.3	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.3	vetroresina	\				4	10	100
Ca.4	cemento armato	macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
L1.4	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L2.4	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L3.4	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L4.4	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.4	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L6.4	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
Cop.4	vetroresina	\				4	10	100
Ca.5	cemento armato	macchie di umidità/incrostazioni	<30%	2	2	5	7.5	75
L1.5	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L2.5	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
L3.5	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L4.5	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.5	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
L6.5	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
Cop.5	vetroresina	\				4	10	100
Ca.6	cemento armato	macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
L1.6	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L2.6	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L3.6	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L4.6	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.6	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
L6.6	acciaio	Corrosione II stadio	>60%	2	4	4	5	60
Cop.6	vetroresina	\				4	10	100
Ca.7	cemento armato	macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
L1.7	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
L2.7	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L3.7	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L4.7	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.7	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L6.7	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
Cop.7	vetroresina	\				4	10	100
Ca.8	cemento armato	macchie di umidità	<30%	1	2	5	8.75	87.5
L1.8	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L2.8	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L3.8	acciaio	Corrosione II stadio	<10%	2	1	4	8.75	90
L4.8	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.8	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L6.8	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.8	vetroresina	\				4	10	100

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Ca.9	cemento armato	macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
L1.9	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
L2.9	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L3.9	acciaio	Corrosione III stadio	<20%	3	3	4	4.375	55
L4.9	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.9	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L6.9	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.9	vetroresina	\				4	10	100
Ca.10	cemento armato	macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
L1.10	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L2.10	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L3.10	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L4.10	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L5.10	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L6.10	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
Cop.10	vetroresina	\				4	10	100
Ca.11	cemento armato	macchie di umidità/incrostazioni	<10%	2	1	5	8.75	87.5
L1.11	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L2.11	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L3.11	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L4.11	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.11	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L6.11	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
Cop.11	vetroresina	\				4	10	100
Ca.12	cemento armato	Perdita d'acqua con macchie di umidità e incrostazioni	<60%	3	3	5	4.375	43.75
L1.12	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L2.12	acciaio	Corrosione II stadio	>60%	2	4	4	5	60
Gra3.12	acciaio	\				4	10	100
L4.12	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L5.12	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
Gra6.12	acciaio	\				4	10	100
Cop.12	vetroresina	\				4	10	100
Ca.13	cemento armato	Perdita d'acqua con macchie di umidità e incrostazioni	<60%	3	3	5	4.375	43.75
L1.13	acciaio	Corrosione II stadio	>60%	2	3	4	6.25	70
L2.13	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
Gra3.12	acciaio	\				4	10	100
L4.13	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L5.13	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Gra6.12	acciaio	\				4	10	100
Cop.13	vetroresina	\				4	10	100
Ca.14	cemento armato	Perdita d'acqua e macchie di umidità	<30%	3	2	5	6.25	62.5
L1.14	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
L2.14	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L3.14	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L4.14	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L5.14	acciaio	Corrosione II stadio	<10%	2	1	4	8.75	90
L6.14	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.14	vetroresina	\				4	10	100
Ca.15	cemento armato	Perdita d'acqua e macchie di umidità	<30%	3	2	5	6.25	62.5
L1.15	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L2.15	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L3.15	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L4.15	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
L5.15	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L6.15	acciaio	Corrosione II stadio	>60%	2	2	4	7.5	80
Cop.15	vetroresina	\				4	10	100
Ca.16	cemento armato	macchie/patine	<10%	2	1	5	8.75	87.5
L1.16	acciaio	Corrosione II stadio	>60%	2	4	4	5	60
L2.16	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L3.16	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L4.16	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.16	acciaio	Corrosione II stadio	>60%	2	4	4	5	60
L6.16	acciaio	Corrosione II stadio	<60%	2	3	4	6.25	70
Cop.16	vetroresina	\				4	10	100
Ca.17	cemento armato	Perdita d'acqua e macchie di umidità	<30%	3	2	5	6.25	62.5
L1.17	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L2.17	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L3.17	acciaio	Corrosione II stadio	<10%	2	1	4	8.75	90
L4.17	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L5.17	acciaio	Corrosione III stadio	<5%	3	1	4	8.125	85
L6.17	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
Cop.17	vetroresina	\				4	10	100
Ca.18	cemento armato	macchie di umidità	<30%	1	2	5	8.75	87.5
L1.18	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
L2.18	acciaio	Corrosione II stadio	<30%	2	2	4	7.5	80
L3.18	acciaio	Corrosione III stadio	<10%	3	2	4	6.25	70
Ca.19	cemento armato	Perdita d'acqua, incrostazioni, alterazioni strato protettivo	<60%	3	3	5	4.375	43.75
L1.19	acciaio	Corrosione III stadio	>20%	3	4	4	2.5	40
L2.19	acciaio	Corrosione II stadio	<10%	2	2	4	7.5	80
L3.19	acciaio	Corrosione II stadio	<10%	2	2	4	7.5	80
Cor1	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor2	acciaio	Macchie rosse su rivestimento		1	2	2	8.75	95
Cor3	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor4	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor5	acciaio	Alterazione rivestimento		1	2	2	8.75	95

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Cor6	acciaio	Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor7	acciaio	Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor8	acciaio	Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor9	acciaio	macchie di umidità	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor10	acciaio	Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor11	acciaio	Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor12	acciaio	Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor13	acciaio	macchie di umidità	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor14	acciaio	Alterazione rivestimento/Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor15	acciaio	Alterazione rivestimento/Macchie rosse su rivestimento	<30%	1	2	2	8.75	95
Cor16	acciaio	Alterazione rivestimento		1	2	2	8.75	95
Cor17	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor18	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor19	acciaio	Alterazione rivestimento		1	2	2	8.75	95
Cor20	acciaio	Alterazione rivestimento		1	2	2	8.75	95
Cor21	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor22	acciaio	Alterazione rivestimento		1	2	2	8.75	95
Cor23	acciaio	macchie di umidità		1	2	2	8.75	95
Cor24	acciaio	Alterazione rivestimento		1	2	2	8.75	95

Pavimentazione

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Pav.1	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.2	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.3	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.4	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.5	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.6	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.7	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.8	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.9	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.10	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.11	Pietra	Rottura	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Pav.12	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.13	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.14	Pietra	\		0	0	2	10.0	100

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Pav.15	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.16	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.17	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.18	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pav.19	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Gra.1	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.2	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.3	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.4	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.5	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.6	Acciaio	instabilità		1	1	2	9.4	97.5
Gra.7	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.8	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.9	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.10	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.11	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.12	Acciaio	barre deformate		2	1	2	8.8	95
Gra.13	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.14	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Gra.15	Acciaio	barre deformate + 1 rotta		2	1	2	8.8	95
Gra.16	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.1	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.2	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.3	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.4	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.5	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.6	Acciaio	instabilità		1	1	2	9.4	97.5
Chius.7	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.8	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.9	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.10	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.11	Acciaio	\		0	0	2	10.0	100
Chius.12	Acciaio	instabilità		1	1	2	9.4	97.5

Pareti

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Riv.1	Pietra	Rottura mattonelle	3/35	3	1	2	8.1	92.5
Riv.2	Pietra	Rottura	5/23	3	2	2	6.3	85
Riv.3	Pietra	Mattonelle erose, sgretolate o rotte	8/37	1	2	2	8.8	95
Riv.4	Pietra	macchie	21/84	1	2	2		
		rottura/Sgretolamento	10/84	3	2	2	6.3	85
Riv.5	Pietra	Macchie	7/23	1	3	2	8.1	92.5
Riv.6	Pietra	Rottura	2/28	3	1	2	8.1	92.5
		Macchie	8/28	1	2	2		
Riv.7	Pietra	Rottura	1/7	3	2	2	6.3	85
Riv.8	Pietra	Macchie	1/7	1	2	2	8.8	95
Rivpil.1	Pietra	Macchie	8/21	1	3	2		
		Rottura	3/21	3	2	2	6.3	85

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Rivpil.2	Pietra	Macchie	7/7	1	4	2		
		Rottura	3/21	3	2	2	6.3	85
Rivpil.3	Pietra	Rottura	2/11	3	2	2	6.3	85
Rivpil.4	Pietra	Rottura	2/7	3	2	2	6.3	85
Tubo1	Acciaio	Mancano bullonature, instabile		3	3	2	4.4	77.5
Zoc.1	Pietra	\				1	10.0	100
Zoc.2	Pietra	\				1	10.0	100
Zoc.3	Pietra	\				1	10.0	100
Zoc.4	Pietra	\				1	10.0	100
Zoc.5	Pietra	\				1	10.0	100
Zoc.6	Pietra	\				1	10.0	100
Zoc.pil	Pietra	Rottura	3/8	3	3	1	4.4	88.75

Binario 20

Stazione	**Torino Porta Nuova**
Sezione	Binario 20
Consulente	Daniela Abagnale
Data	8/11/2019
Legenda	
Cop	Porzione in ca della copertura
VC	Vetrocemento
Cop	Copertura
Pavg	Pavimentazione grigia
Pavn	Pavimentazione nera
Porta	Telaio di porte
Riv	Rivestimento murario

Copertura in ca con divisione grossolana

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Cop.1	cemento armato	Foro	1	1	1	5	9.4	93.8
Cop.1	Vernice	Distacco vernice	<10%	3	1	1	8.1	96.3
Cop.2	cemento armato	Distacco di copriferro, armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop.3	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop.4	cemento armato	Distacco di copriferro, armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop.5	cemento armato	Distacco di copriferro, armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Cop.5	cemento armato	Perdita d'acqua	in due punti distinti	3	3	5	4.4	43.8
VC1.1	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.2	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.3	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.4	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.5	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.6	vetro cemento	rottura rivestimento	1/20	3	1	1	8.1	96.3
VC1.7	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.8	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.9	vetro cemento	\				5	10	100
VC1.10	vetro cemento	\				5	10	100
VC2.1	vetro cemento	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.4	93.8
VC2.2	vetro cemento	\				5	10	100
VC2.3	vetro cemento	Macchie di umidità	<30%	1	2	5	8.8	87.5
VC2.4	vetro cemento	\				5	10	100
VC2.5	vetro cemento	\				5	10	100
VC2.6	vetro cemento	Rottura	1/20	3	1	5	8.1	81.3
VC2.7	vetro cemento	\				5	10	100
VC2.8	vetro cemento	Distacco rivestimento	2/20	3	2	1	6.3	92.5

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
VC3.1	vetro cemento	\				5	10	100
VC3.2	vetro cemento	???				5	10	100
VC3.3	vetro cemento	\				5	10	100
VC3.4	vetro cemento	\				5	10	100
VC3.5	vetro cemento	Macchie di umidità	7/20	1	2	5	8.8	87.5
VC3.6	vetro cemento	\				5	10	100
VC3.7	vetro cemento	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.4	93.8
VC3.8	vetro cemento	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.4	93.8

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
VC3.9	vetro cemento	\				5	10	100
VC3.10	vetro cemento	Fessurazione	2/20	2	1	5	8.8	87.5
VC3.11	vetro cemento	\				5	10	100
VC3.12	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.1	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.2	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.3	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.4	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.5	vetro cemento	Distacco copriferro, armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
VC5.6	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.7	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.8	vetro cemento	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.4	93.8
VC5.9	vetro cemento	Macchie di umidità		1	1	5	9.4	93.8
VC5.10	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.11	vetro cemento	Distacco copriferro, armatura esposta	<60%	4	3	5	2.5	25
VC5.12	vetro cemento	Distacco copriferro, armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
VC5.13	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.14	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.15	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.16	vetro cemento	\				5	10	100
VC5.17	vetro cemento	Macchie di umidità	<30%	1	2	5	8.8	87.5
VC5.18	vetro cemento	Macchie di umidità	<30%	1	2	5	8.8	87.5

Copertura in ca con divisione fine

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Cop1.1	cemento armato	Foro	1	1	1	5	9.375	93.75
Cop1.2	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop1.3	Vernice	Distacco vernice	<10%	3	1	1	8.125	96.25

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Cop1.3	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop1.4	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop1.5	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop2.1	cemento armato	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
Cop2.2	cemento armato	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
Cop2.3	cemento armato	Distacco copriferro	<10%	4	1	5	7.5	75
Cop2.4	cemento armato	Fessura	// lato VC	2	1.75	5	7.8125	78.125
Cop2.5	cemento armato	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop2.6	cemento armato	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop3.1	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop3.2	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop3.3	cemento armato	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
Cop3.4	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop3.5	cemento armato	Fessurazione	// lato VC	2	2	5	7.5	75
Cop3.6	cemento armato	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
Cop4.1	laterocemento	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop4.2	laterocemento	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop4.3	laterocemento	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop4.4	laterocemento	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
Cop5.1	cemento armato	\		0	0	5	10	100
Cop5.2	cemento armato	Fessurazione	// lato VC	2	1.75	5	7.8125	78.125
Cop5.3	cemento armato	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
		Perdita d'acqua	1 punto	3	2	5		
Cop5.4	cemento armato	Macchie di umidità	<10%	1	1	5	9.375	93.75
Cop5.5	cemento armato	Fessurazione	// lato VC	2	1.75	5	7.8125	78.125

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Cop5.6	cemento armato	Distacco copriferro con armatura esposta	<30%	4	2	5	5	50
		Perdita d'acqua		3	2	5		
Cop5.7	cemento armato	\		0	0	0	10	100
Cop5.8	cemento armato	\		0	0	0	10	100
Cop5.9	cemento armato	\		0	0	0	10	100

Pavimentazione

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Pavn.1	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.2	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.3	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.4	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.5	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.6	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.7	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.8	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.9	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.10	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.11	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.12	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.13	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.14	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.15	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.16	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.17	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.18	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.19	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.20	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.21	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.22	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.23	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.24	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.25	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.26	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.27	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.28	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.29	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.30	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.31	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavn.32	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.1	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Pavg.2	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.3	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.4	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.5	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.6	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.7	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.8	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.9	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.10	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.11	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.12	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.13	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.14	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.15	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.16	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.17	lastre in acciaio rivestite con boiacca	Difetto di posa in opera	danno estetico	2	1	2	8.8	95
Pavg.18	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.19	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.20	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Pavg.21	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.22	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.23	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.24	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.25	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.26	lastre in acciaio rivestite con boiacca	Fessurazione	1 fessura trasversale, da estremo a estremo, chiaramente visibile	2	2	2	7.5	90
Pavg.27	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.28	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100
Pavg.29	lastre in acciaio rivestite con boiacca	Porosità superficiale	>60%	2	2	2	7.5	90
Pavg.30	lastre in acciaio rivestite con boiacca	Porosità superficiale	>30%	2	1	2	8.8	95
Pavg.31	lastre in acciaio rivestite con boiacca	Porosità superficiale	>30%	2	1	2	8.8	95
Pavg.32	lastre in acciaio rivestite con boiacca	Fessurazione	1 fessura su un angolo, chiaramente visibile	2	2	2	7.5	90
Pavg.33	lastre in acciaio rivestite con boiacca	\		0	0	2	10.0	100

Pareti

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Porta.1	Pietra	\		0	0	2	10.0	100
Porta.2	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.3	Pietra	Distacchi e rottura	<30%	3	2	2	6.3	85
Porta.4	Pietra	Erosione e scalfiture	<30%	1	2	2	8.8	95
Porta.5	Pietra	Erosione e scalfiture	<30%	1	2	2	8.8	95

Elemento	Materiale	Difetto	Estensione	d_i	e_i	r_i	I_c	I_p
Porta.6	Pietra	Erosione e scalfiture	<10%	1	1	2	9.4	97.5
Porta.7	Pietra	Erosione e scalfiture	<10%	1	1	2	9.4	97.5
Porta.8	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.9	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.10	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.11	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.12	Pietra	Distacco parziale	<30%	3	2	2	6.3	85
Porta.13	Pietra	Distacco parziale	<30%	3	2	2	6.3	85
Porta.14	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.15	Pietra	\	\	0	0	2	10.0	100
Porta.16	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.17	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.18	Pietra	Erosione e scalfiture	<10%	1	1	2	9.4	97.5
Porta.19	Pietra	Erosione e scalfiture	<10%	1	1	2	9.4	97.5
Porta.20	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.21	Pietra	Distacco parziale	<30%	3	2	2	6.3	85
Porta.22	Pietra	Distacco parziale	<30%	3	2	2	6.3	85
Porta.23	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Porta.24	Pietra	Macchie di sporcizia		0	0	2	10.0	100
Porta.25	Pietra	Erosione e scalfiture	<10%	1	1	2	9.4	97.5
Porta.26	Pietra	Erosione e scalfiture	<10%	1	1	2	9.4	97.5
Porta.27	Pietra	\	\	0	0	2	10.0	100
Porta.28	Pietra	Distacco parziale	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Riv.1	Pietra	Spanciamento	<1/250	3	1	2	8.1	92.5
Riv.2	Pietra	Rottura di parte di elemento	1/23	3	1	2	8.1	92.5
Riv.3	Pietra	Rottura di parte di elemento	1/17	3	1	2	8.1	92.5
Riv.4	Pietra	Rottura di parte di elemento	1/17	3	1	2	8.1	92.5
Riv.5	Pietra	Rottura di parte di elemento	10/66	3	2	2	6.3	85
Riv.6	Pietra	Rottura di parte di elemento	6/36	3	2	2	6.3	85
Riv.7	Pietra	Rottura di parte di elemento	3/18	3	2	2	6.3	85
Riv.8	Pietra	Rottura di parte di elemento	<10%	3	1	2	8.1	92.5
Riv.9	Pietra	Rottura di parte di elemento	2/21	3	1	2	8.1	92.5
Riv.10	Pietra	Rottura di parte di elemento	2/63	3	1	2	8.1	92.5
Riv.11	Pietra	Rottura di parte di elemento	1/18	3	1	2	8.1	92.5
		Macchie (sporco o umidità?)	7/18	1	3	2		
Riv.12	Pietra	Rottura di parte di elemento	3/43	3	1	2	8.1	92.5

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va al professor Chiaia, per aver capito sin dal nostro primo colloquio che tipo di studentessa sono e che ingegnere voglio diventare e per avermi guidato di conseguenza.

Questa tesi non sarebbe mai nata se non fosse stato per il lavoro congiunto con Tecsa s.r.l.. Un caloroso ringraziamento va a Luca Fiorentini per l'opportunità di crescita offertami e ad Andrea Respighi per aver sempre ascoltato i miei ragionamenti con attenzione, aver chiarito i miei dubbi e indicato la strada migliore senza far pesare la mia inesperienza.

Non posso non ringraziare Damiano Tranquilli, Liborio Giannetto e Steny Rolla di Grandi Stazioni Rail, per aver letteralmente aperto le porte della Stazione di Porta Nuova e avermi mostrato i luoghi più affascinanti. La vostra esperienza è stata preziosa per questo studio.

Un sentito ringraziamento alla Dott.ssa Miucci per la consulenza medica sugli effetti della caduta dei gravi sul corpo umano.

Senza il lavoro di Andrea Giuliodori e Mauro Aimar non sarei riuscita a completare la laurea magistrale pur continuando a vivere il mondo e le esperienze al di fuori del Politecnico. Un enorme grazie ad entrambi.