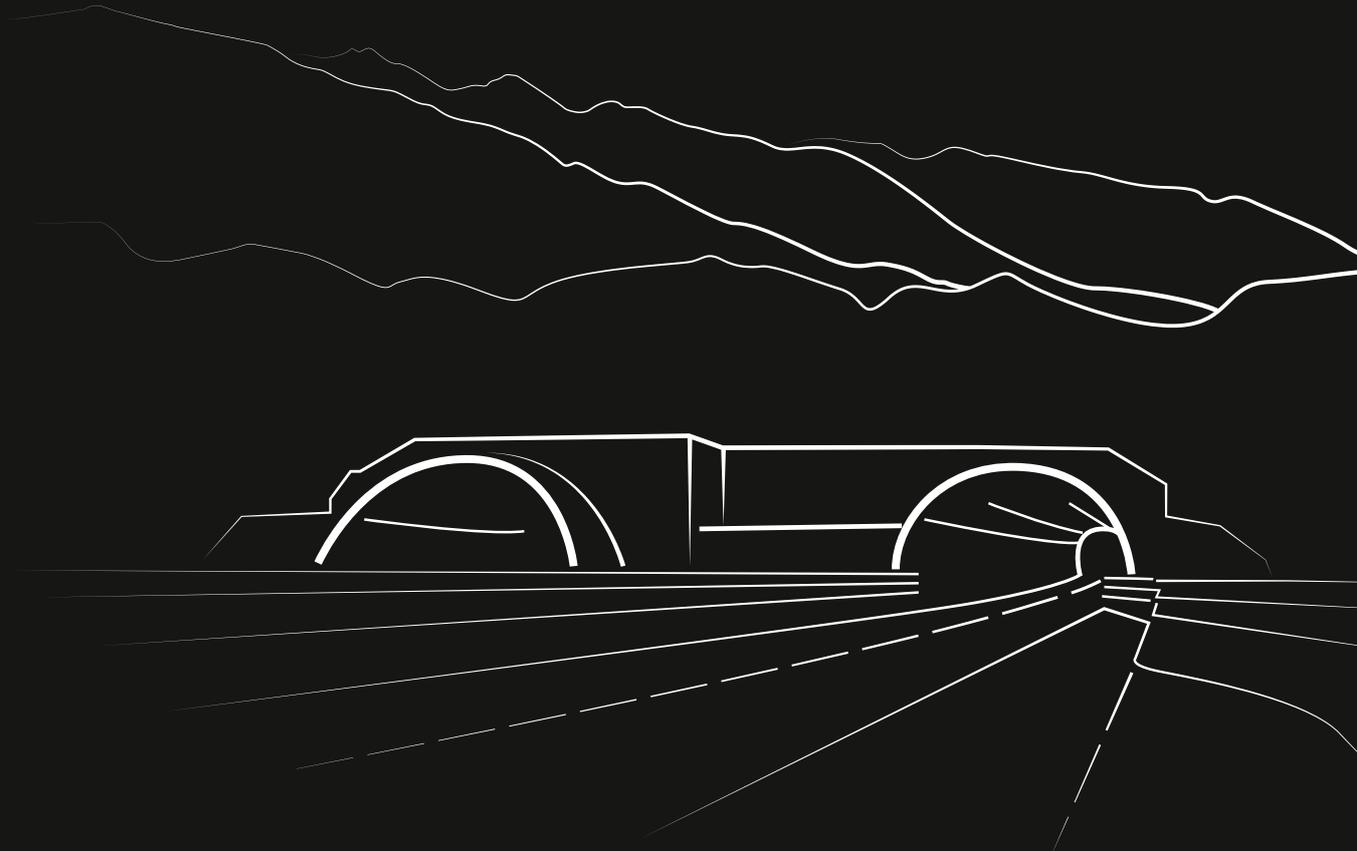




POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA
MAGISTRALE IN
INGEGNERIA CIVILE

Infrastrutture e
Sistemi di Trasporto



SILVIA JANNON

LA SICUREZZA DEI RIVESTIMENTI IN GALLERIA: IL PIANO DI SORVEGLIANZA

Caso studio della galleria Prapontin dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE
Infrastrutture e Sistemi di Trasporto

Tesi in Azienda: SITAF S.p.A.

**LA SICUREZZA DEI RIVESTIMENTI IN GALLERIA:
IL PIANO DI SORVEGLIANZA**

Caso studio della galleria Prapontin
dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia

Relatore:

Prof. Bernardino CHIAIA

Correlatori aziendali:

Ing. Luca PERRONE

Ing. Federico SANDRETTI

Candidato:

Silvia JANNON

Matricola: 269294

Anno Accademico 2021/2022

Gran parte delle gallerie presenti nel patrimonio infrastrutturale italiano, essendo state costruite durante la rapida espansione della rete di trasporto dovuta al boom economico del dopoguerra, hanno attualmente superato i 50 anni di vita utile. In quegli anni, inoltre, le soluzioni progettuali per la costruzione delle gallerie erano principalmente finalizzate a superare le difficoltà di realizzazione degli scavi, con limitata contezza dei problemi di manutenzione nel lungo termine.

Di conseguenza, la necessità di effettuare dei controlli sempre più frequenti al fine di verificare la durabilità della struttura nel tempo, unitamente alle riflessioni generate dal crollo del viadotto Polcevera (denominato dai mass media come ponte Morandi) nel 2018 e della volta della galleria Bertè sulla A26 nel 2019, hanno dato il via ad una svolta culturale improntata sull'adozione di un piano particolareggiato nazionale di controllo delle infrastrutture.

Per quanto riguarda il contesto delle gallerie autostradali, un vero e proprio cambio di passo sulle modalità di ispezione è avvenuto il 9 aprile 2021, quando il Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS), con l'obiettivo di aumentare la sicurezza delle gallerie stradali e migliorarne l'efficienza, ha firmato la Circolare n. 152, introducendo un nuovo approccio per le attività di sorveglianza e manutenzione della rete, prevedendo lo sviluppo di un Piano di Sorveglianza specifico per ciascuna galleria.

Questa Tesi di Laurea tratta proprio questo argomento: la redazione del Piano di Sorveglianza applicato al caso della galleria Prapontin che, con i suoi di 4 441 metri, dal 1995 attraversa i paesi di Bussoleno, Mattie e Susa e rappresenta la seconda galleria più lunga dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia.

Con la disponibilità della concessionaria SITAF SpA (Società Italiana Traforo Autostradale del Frejus), è stato possibile esaminare tutta la documentazione di progetto della galleria, così da poter desumere importanti informazioni sulle sue caratteristiche geometriche, costruttive e relative al suo inserimento nel contesto circostante. Sono inoltre stati esaminati i più recenti esiti di indagine per la valutazione del reale stato di consistenza della galleria e del suo rivestimento definitivo, ponendo attenzione sulla presenza di spessori ridotti, sulla formazione di fessurazioni o danni locali e sullo stato tensionale del calcestruzzo.

Assumendo come riferimento le "Linee Guida per la redazione del piano di sorveglianza delle gallerie", è stato infine redatto il documento sopracitato che, sulla base dell'effettivo stato di conoscenza dell'opera, rilevato mediante una preventiva attività d'indagine, prevede una programmazione delle attività di verifica periodica e degli interventi di ripristino.

La realizzazione di tale elaborato vuole essere un riferimento e un punto di partenza per la stesura di un Piano di Sorveglianza per tutte le altre gallerie dell'Autostrada A32, garantendo così un monitoraggio costante e processi più rapidi nella definizione delle priorità d'intervento e programmazione delle opere manutentive da realizzare.

Indice

1. INTRODUZIONE	11
2. IL CONTESTO	15
2.1. LA SITAF SPA	16
2.2. L'AUTOSTRADA A32	17
2.3. LA GALLERIA PRAPONTIN	21

PARTE A

Le gallerie

3. COS'È UNA GALLERIA	27
3.1. LA CLASSIFICAZIONE	27
3.2. LA STORIA	29
4. LA COSTRUZIONE DI UNA GALLERIA	35
4.1. LA PROGETTAZIONE	35
4.2. LE TECNICHE COSTRUTTIVE	36
4.2.1. LO SCAVO TRADIZIONALE	38
4.2.2. LO SCAVO MECCANIZZATO	41
5. I PROBLEMI RISCONTRABILI IN GALLERIA	45
5.1. I PROBLEMI DURANTE LA PROGETTAZIONE	46
5.2. I PROBLEMI DURANTE LA COSTRUZIONE	47
5.3. I PROBLEMI DURANTE IL MANTENIMENTO	51

PARTE B

Dalle prime normative sulla sicurezza delle gallerie ad oggi

6. L'EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA	55
6.1. LE PRIME REGOLAMENTAZIONI	55
6.2. LA SVOLTA	58
6.2.1. IL VIADOTTO POLCEVERA	58
6.2.2. LA GALLERIA BERTÈ	61
6.3. L'ULTIMO AGGIORNAMENTO	63

PARTE C

Le nuove soluzioni finalizzate ad una maggiore sicurezza in galleria

7. L'ASSESSMENT DELLE GALLERIE	67
7.1. GLI STRUMENTI E LE TECNICHE DI INDAGINE	67
7.1.1. IL TUNNEL SCANNER SYSTEM	70
7.1.2. IL GEORADAR	73
7.1.3. I CAROTAGGI	75
7.1.4. LE PROVE DI LABORATORIO	76
7.1.5. LE INDAGINI TENSIONALI	78
7.1.6. LE PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)	79
7.1.7. LE PROVE SCLEROMETRICHE	79
7.1.8. I RILIEVI SISMICI A RIFRAZIONE	80
7.1.9. LE ATTREZZATURE PER UN'INDAGINE ISPETTIVA	80
7.1.10. LE ALTRE PROVE NON DISTRUTTIVE	81
7.2. LA CLASSIFICAZIONE DEI DIFETTI E DEL RISCHIO	81
7.2.1. IL CATALOGO DEI DIFETTI E LA CLASSIFICAZIONE IQOA	82
7.2.2. UNA NUOVA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA IN GALLERIA	89
8. IL PIANO DI SORVEGLIANZA DELL'OPERA: LE LINEE GUIDA	93
8.1. DEFINIZIONE DEGLI STANDARD MINIMI DI CONTROLLO PER LE PARTI DELLA GALLERIA NON OGGETTO DI INTERVENTI	95
8.1.1. LE GALLERIE CON IL RIVESTIMENTO IN CALCESTRUZZO	96
8.2. LA STRUTTURA DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DEGLI INTERVENTI	97
8.2.1. LA DESCRIZIONE DELL'OPERA	98
8.2.2. L'INQUADRAMENTO DELLE ISPEZIONI	100
8.2.3. IL MANUALE D'USO	102
8.2.4. IL MANUALE DI MANUTENZIONE	105
8.2.5. IL PROGRAMMA DI MANUTENZIONE	108
8.2.6. AGGIORNAMENTO DEL PIANO DI SORVEGLIANZA	111

PARTE D

Il caso studio della galleria Prapontin

9. L'ANALISI DELLA DOCUMENTAZIONE ESISTENTE SULLA GALLERIA	115
9.1. LA DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO	115
9.2. GLI INTERVENTI POST-COSTRUZIONE	117
9.2.1. LA RISTRUTTURAZIONE DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	118
9.2.2. L'ADEGUAMENTO DELLE SAGOME DI RIFERIMENTO	119
9.2.3. L'INNalzAMENTO DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA	121

9.3. LE INDAGINI STRUMENTALI	124
9.4. LE ISPEZIONI DI SORVEGLIANZA	127
<u>10. LO SVILUPPO DELLA PROPOSTA DEL PIANO DI SORVEGLIANZA</u>	133
10.1. L'ELABORAZIONE DEI DATI DISPONIBILI	134
10.1.1. LO SPESSORE DEL RIVESTIMENTO	134
10.1.2. I DIFETTI DEL RIVESTIMENTO	138
10.1.3. LO STATO TENSIONALE DEL RIVESTIMENTO	140
10.1.4. LO STATO DI CONSISTENZA DEL RIVESTIMENTO	141
10.2. LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA	143
<u>11. CONCLUSIONI</u>	151
<u>12. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</u>	153
<u>13. ALLEGATI</u>	159

Indice delle figure

FIGURA 1 – SEDE LEGALE E UFFICI DIRETTIVI DELLA SITAF SPA E RAPPRESENTAZIONE DEL LOGO DELLA SOCIETÀ. FONTE: HTTPS://WWW.SITAF.IT/	15
FIGURA 2 – INGRESSO DEL TRAFORO DEL FREJUS DAL LATO ITALIANO. FONTE: HTTPS://TECNOSITAF.COM/	16
FIGURA 3 – TRACCIATO DELL' AUTOSTRADA A32 TORINO-BARDONECCHIA. FONTE: HTTPS://IT.WIKIPEDIA.ORG/	17
FIGURA 4 – VISTA DEL VIADOTTO CLAREA E, SULLO SFONDO, DELL'IMBOCCO DELLA GALLERIA GIAGLIONE. FONTE: HTTP://WWW.SITAFUNNELFREJUS.IT/	18
FIGURA 5 – INQUADRAMENTO DELLE SETTE GALLERIE DELL' AUTOSTRADA A32. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	19
FIGURA 6 – EVOLUZIONE DEL TRAFFICO TOTALE (VEICOLI LEGGERI E PESANTI) PASSANTE PER LE DUE BARRIERE DELL' AUTOSTRADA A32.	20
FIGURA 7 – IMBOCCO DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	21
FIGURA 8 – COROGRAFIA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	22
FIGURA 9 – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE GENERICA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	23
FIGURA 10 – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN PIAZZOLA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	24
FIGURA 11 – IMBOCCO DEL PERTUS DI COLOMBANO ROMEAN. FONTE: FOTOGRAFIA DI SILVIA JANNON	30
FIGURA 12 – IMBOCCO DEL TRAFORO FERROVIARIO DEL FREJUS DAL LATO ITALIANO. FONTE: HTTPS://WWW.LABORATORIOVALSUSA.IT/	31
FIGURA 13 – A SINISTRA UN MANIFESTO DEL 1906 COL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA DEL SEMPIONE E GLI ORARI DEI TRENI; A DESTRA UN MANIFESTO CELEBRATIVO DEL TRAFORO. FONTE: COLLEGIO DEGLI INGEGNERI E ARCHITETTI DELLA PROVINCIA DI VERONA, <i>GALLERIE. MODI DI PROGETTAZIONE, TECNICHE COSTRUTTIVE, RELAZIONI COL TERRITORIO: IERI E OGGI.</i> , CONVEGNO, 17/05/2002	32
FIGURA 14 – IL 16 LUGLIO 1965 DE GAULLE E SARAGAT INAUGURARONO IL TRAFORO DEL MONTE BIANCO. FONTE: HTTPS://WWW.REGIONE.VDA.IT/	33
FIGURA 15 – CENTINE METALLICHE USATE PER LA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI CONSERVATIVI IN GALLERIA. FONTE: CASTALDO SPA	38
FIGURA 16 – FASI DELLO SCAVO TRADIZIONALE. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	39
FIGURA 17 – PERFORAZIONE DEL FRONTE PER LA VOLATA. FONTE: HTTPS://WWW.TERZOVALICO.IT/	40
FIGURA 18 – TBM "MARTINA" (S-574) UTILIZZATA PER LA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SPARVO, FACENTE PARTE DEL PROGETTO DI AMPLIAMENTO DELLA "VARIANTE DI VALICO" DELL' AUTOSTRADA A1. FONTE: HTTPS://WWW.HERRENKNECHT.COM/	41

FIGURA 19 - TBM A PRESSIONE DI TERRA (EPB EARTH PRESSURE BALANCE). FONTE: HTTPS://WWW.IFRFIRENZE.IT/	43
FIGURA 20 – CARATTERISTICHE DI DETERIORAMENTO NEL TEMPO DELLA STRUTTURA. FONTE: RICCARDO SPOTTI, <i>LA VULNERABILITÀ DELLE GALLERIE ESISTENTI IN CALCESTRUZZO ARMATO</i> , LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE, POLITECNICO DI TORINO, A.A. 2020/2021	46
FIGURA 21 – FESSURA ORIZZONTALE E VUOTO SUPERFICIALE NEL RIVESTIMENTO PRESENTI NELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN – MONITORAGGIO APPROFONDITO ANNUALE DEL 25.05.2020. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	48
FIGURA 22 – INFILTRAZIONI D'ACQUA E CONCREZIONI PRESENTI NELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN – MONITORAGGIO APPROFONDITO ANNUALE DEL 25.05.2020. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	50
FIGURA 23 – DETERIORAMENTO DEL GIUNTO IN CALCESTRUZZO PRESENTE NELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN – MONITORAGGIO APPROFONDITO ANNUALE DEL 25.05.2020. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	50
FIGURA 24 – CROLLO DEL PONTE DI ARICCIA NEL 1967. FONTE: HTTPS://WWW.CASTELLINOTIZIE.IT/	55
FIGURA 25 – PONTE MORANDI NEL 2010. FONTE: HTTPS://IT.WIKIPEDIA.ORG/	58
FIGURA 26 – IL CROLLO DEL PONTE MORANDI AVVENUTO IL 14/08/2018. FONTE: HTTPS://WWW.ILFATTOQUOTIDIANO.IT/	59
FIGURA 27 – CROLLO DELLA VOLTA DELLA GALLERIA BERTÈ AVVENUTO IL 30/12/19. FONTE: HTTPS://WWW.GENOVA24.IT/	61
FIGURA 28 – RESTITUZIONE GRAFICA DELLE RISULTANZE DI ISPEZIONE CON IL TSS PER UNA TRATTA DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN, ANNO 2019. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SINA SPA	71
FIGURA 29 – RESTITUZIONE GRAFICA DELLE RISULTANZE DI ISPEZIONE CON IL TSS PER UNA TRATTA DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN, ANNO 2019. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SINA SPA	72
FIGURA 30 – RESTITUZIONE GRAFICA DEI RISULTATI DELL'INDAGINE GEORADAR PER UNA TRATTA DELLA CANNA DI SALITA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SOCOTEC ITALIA SRL	74
FIGURA 31 – CAROTAGGI CON RILIEVO DELLA PRESENZA DI CLORURI ESEGUITI NELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	76
FIGURA 32 – ESEMPIO DI STRUMENTAZIONE PER ESEGUIRE LA PROVA DI MARTINETTO PIATTO DOPPIO. FONTE: HTTPS://WWW.STRUCTURALSURVEYS.IT/	78
FIGURA 33 – ESEMPIO DI STRUMENTAZIONE PER ESEGUIRE LA PROVA DI PULL-OUT PER TASSELLI. FONTE: HTTPS://WWW.ANCHORIV.COM/	79
FIGURA 34 – FLOW-CHART DELL'APPROCCIO MULTILIVELLO E RELAZIONI TRA I DIVERSI LIVELLI DI ANALISI. FONTE: MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILI CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI (MIMS), <i>LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO, LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ED IL MONITORAGGIO DELLE GALLERIE ESISTENTI</i> , GIUGNO 2021	92
FIGURA 35 – WORKFLOW DEI CONTROLLI DA ESEGUIRE SULLE VARIE ZONE DELLA GALLERIA A SEGUITO DELL'ISPEZIONE DI ASSESSMENT. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	102

FIGURA 36 – ESEMPIO DI UNA TAVOLA DI CONTABILITÀ DELLA GALLERIA PRAPONTIN: DISEGNO N. 5/B RELATIVO ALLA SEZIONE TIPO DELLA GALLERIA NATURALE IN CLASSE IV. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	116
FIGURA 37 – ESEMPIO DELLA VERIFICA DELLE ALTEZZE UTILI DI UNA SEZIONE CRITICA DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SPA	120
FIGURA 38 – PARTICOLARE DELLA RICOSTRUZIONE DELLO SMUSSO DEL MARCIAPIEDE E DELLA PARTE ORIZZONTALE A SEGUITO DELLA SCARIFICA DELLA SUPERFICIE ALL'INTERNO DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	122
FIGURA 39 – ESEMPIO DI INSTALLAZIONE LED A MARCIAPIEDE CONDOTTA NELLA GALLERIA PEROSA DELLA A32. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	123
FIGURA 40 – GRAFICO DI QUANTIFICAZIONE IN M ² DELLE ANOMALIE PER UNA TRATTA DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SINA SPA	125
FIGURA 41 – RESTITUZIONE GRAFICA DEI RISULTATI DELL'INDAGINE GEORADAR (SEZIONI GEORADAR E INTERPRETAZIONE) PER UNA TRATTA DELLA CANNA DI SALITA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SOCOTEC ITALIA SRL	126
FIGURA 42 – DISPOSIZIONE DEGLI ISPETTORI IN SEZIONE DURANTE L'ISPEZIONE APPROFONDATA DI OTTOBRE 2020 ALL'INTERNO DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	128
FIGURA 43 – SCHEDA IDENTIFICATIVA DI ISPEZIONE DI UN TRATTO DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	129
FIGURA 44 – GRAFICO RIASSUNTIVO DEL NUMERO DI DIFETTI PER CONCIO DI ISPEZIONE DI UN TRATTO DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	130
FIGURA 45 – DISPOSIZIONE DEGLI ISPETTORI IN SEZIONE DURANTE L'ISPEZIONE PRELIMINARE DI MARZO 2021 ALL'INTERNO DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	131

Indice delle tabelle

TABELLA 1 – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE GENERICA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DALLA SITAF SpA	23
TABELLA 2 – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN PIAZZOLA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA SITAF SpA	23
TABELLA 3 – CHECK-LIST DEGLI OBIETTIVI DELLE ISPEZIONI PER LA VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI STATICHE DEI RIVESTIMENTI DELLE GALLERIE CORRELATE ALLE INDAGINI CORRISPONDENTI. FONTE: PINI ITALIA, SINA, ALPINA, <i>ASSESSMENT GALLERIE - MESSA IN SICUREZZA DELLE GALLERIE DELLA RETE AUTOSTRADALE DEL GRUPPO ASTM (PARTE 1)</i> , SETTEMBRE 2020	69
TABELLA 4 – CLASSIFICAZIONE DEI DIFETTI PER LA VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DELLA GALLERIA. FONTE: CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS (CETU), <i>ROAD TUNNEL CIVIL ENGINEERING INSPECTION GUIDE (BOOK 1)</i> , 2015	84
TABELLA 5 – FATTORI DI INFLUENZA DEI DIVERSI DIFETTI E DETERIORAMENTI OSSERVATI. FONTE: CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS (CETU), <i>ROAD TUNNEL CIVIL ENGINEERING INSPECTION GUIDE (BOOK 1)</i> , 2015	85
TABELLA 6 – CLASSI CON RIFERIMENTO ALLE CONDIZIONI STATICHE DEL RIVESTIMENTO DELLA GALLERIA. FONTE: CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS (CETU), <i>ROAD TUNNEL CIVIL ENGINEERING INSPECTION GUIDE (BOOK 1)</i> , 2015	88
TABELLA 7 – CLASSI CON RIFERIMENTO ALLA PRESENZA DI ACQUA. FONTE: FONTE: CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS (CETU), <i>ROAD TUNNEL CIVIL ENGINEERING INSPECTION GUIDE (BOOK 1)</i> , 2015 89	89
TABELLA 8 – REQUISITI MINIMI DA ADOTTARE PER LE ISPEZIONI DI LEGGE SULLE PARTI DELLA GALLERIA NON OGGETTO DI INTERVENTI. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	95
TABELLA 9 – ESEMPIO DELLA TABELLA RIPORTATA AL PAR. A.2.1. DELLE LLGG CONTENENTE LE ANOMALIE RISCOINTRABILI SUL RIVESTIMENTO DELLA GALLERIA. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	96
TABELLA 10 – ESEMPIO DELLA TABELLA RIPORTATA AL PAR. A.2.2. DELLE LLGG CONTENENTE I CONTROLLI DA EFFETTUARE SULLE PORZIONI VISIBILI DEL RIVESTIMENTO. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	97
TABELLA 11 – CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLA GALLERIA DA INDICARE ALL'INTERNO DEL PIANO DI SORVEGLIANZA. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	99
TABELLA 12 – CARATTERISTICHE DELLE ISPEZIONI DI TIPO 1, 2 E 3. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	101
TABELLA 13 – INTERVENTI DI NATURA PROVVISORIALE RICADENTI IN ZONA 2. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	104
TABELLA 14 – INTERVENTI DI NATURA DEFINITIVA RICADENTI IN ZONA 3. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	105

TABELLA 15 – ESEMPIO DELLA TABELLA CONTENENTE LE ANOMALIE RISCONTRABILI SULL'ELEMENTO "RETI METALLICHE ES". FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	107
TABELLA 16 – ESEMPIO DELLA TABELLA CONTENENTE LE MODALITÀ CON CUI EFFETTUARE I CONTROLLI SULL'ELEMENTO "RETI METALLICHE ES". FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	107
TABELLA 17 – ESEMPIO DELLA TABELLA CONTENENTE I REQUISITI ASSOCIATI ALL'ELEMENTO "RETI METALLICHE ES". FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	107
TABELLA 18 – ESEMPIO DELLA TABELLA CONTENENTE LE MISURE CORRETTIVE PER L'ELEMENTO "RETI METALLICHE ES". FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	108
TABELLA 19 – FREQUENZE DI ISPEZIONE DELLA ZONA 2. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	109
TABELLA 20 – FREQUENZE DI ISPEZIONE DELLA ZONA 3. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	110
TABELLA 21 – CLASSIFICAZIONE PER I DIFETTI CIVILI. FONTE: MORISCO F., MIGLIORINO P., <i>LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DI SORVEGLIANZA DELLE GALLERIE</i> , 10/04/2021	110
TABELLA 22 – SCHEDA ISPETTIVA DI UN TRATTO DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN. FONTE: ELABORATI PRODOTTI DA MUSINET ENGINEERING SPA	132
TABELLA 23 – LEGENDA DELLE TABELLE A.1.1_S E A.1.1_D RELATIVE ALLA "VERIFICA DELLO SPESSORE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO – PARTE 1" DELLA GALLERIA PRAPONTIN.	136
TABELLA 24 – PRIME RIGHE DI ESEMPIO DELLA TABELLA A.1.1_S RELATIVA ALLA "VERIFICA DELLO SPESSORE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO – PARTE 1" DELLA CANNA DI SALITA DELLA GALLERIA PRAPONTIN.	137
TABELLA 25 – PRIME RIGHE DI ESEMPIO DELLA TABELLA A.1.2_D RELATIVA ALLA "VERIFICA DELLO SPESSORE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO – PARTE 2" DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN.	138
TABELLA 26 – PRIME RIGHE DI ESEMPIO DELLA TABELLA A.2_S RELATIVA ALLA "VERIFICA DEI DIFETTI DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO" DELLA CANNA DI SALITA DELLA GALLERIA PRAPONTIN.	140
TABELLA 27 – ESEMPIO DELLA TABELLA A.3 RELATIVA ALLA "VERIFICA DELLO STATO TENSIONALE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO CON MARTINETTO PIATTO" DELLA CANNA DI SALITA DELLA GALLERIA PRAPONTIN.	141
TABELLA 28 – PRIME RIGHE DI ESEMPIO DELLA TABELLA A.4_D RELATIVA ALLA "VERIFICA DELLO STATO DI CONSISTENZA DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO" DELLA CANNA DI DISCESA DELLA GALLERIA PRAPONTIN.	143

1. Introduzione

Lungo la rete stradale che interessa il territorio nazionale italiano, da quella a carattere autostradale fino alle reti di ambito urbano, sono presenti numerose tratte in galleria. Le particolari condizioni geomorfologiche del nostro territorio hanno infatti richiesto, nella realizzazione dei collegamenti viari, l'adozione di tunnel per il superamento in sotterraneo di morfologie in rilievo. Negli anni più recenti, inoltre, si è fatto ricorso a tratte in galleria anche per vincoli di natura paesaggistico ambientale, mentre nelle zone urbane sono presenti attraversamenti in sotterraneo con separazione dei flussi del traffico di scorrimento da quello locale.

La gestione di tutte queste opere esistenti è un tema che richiama da tempo una progressiva attenzione che non è solo in termini di sicurezza, ma anche di garanzia di continuità nella fruizione delle stesse. Infatti, se la mancata realizzazione di una nuova opera può lasciare insoddisfatta una domanda da parte della collettività, con le conseguenze del mancato sviluppo, l'impossibilità d'utilizzo di un'opera esistente, anche parziale come nel caso di interventi manutentivi, è percepita come inaccettabile.

Da qui nasce la necessità di effettuare controlli sempre più frequenti al fine di verificare la funzionalità e la durabilità della struttura nel tempo. La programmazione di una condotta di manutenzione preventiva, di fatto, induce benefici non solo in termini di sicurezza e continuità di esercizio, ma consente anche una corretta programmazione e ottimizzazione nell'impiego delle risorse finanziarie. Questa consapevolezza, unitamente alle riflessioni generate dal crollo del viadotto Polcevera (denominato dai mass media come ponte Morandi) nel 2018 e della volta della galleria Bertè sulla A26 nel 2019, hanno posto l'attenzione sullo stato di salute dei ponti e delle gallerie presenti sul nostro territorio e sull'esigenza di definire un nuovo approccio per le attività di sorveglianza e manutenzione della rete.

Per quanto riguarda il contesto delle gallerie autostradali, una vera e propria svolta sulle modalità d'ispezione è avvenuta con la Circolare

integrativa prot. 152 del 09.04.2021, firmata dal Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, Enrico Giovannini, la quale aggiorna il quadro tecnico-regolatorio definito dalla previgente normativa sulla materia, risalente al luglio del 1967. Tale provvedimento prevede che il gestore autostradale e l'Anas sviluppino un "Piano di Sorveglianza dell'Opera" per ciascuna galleria in base alle sue caratteristiche fisiche e tecniche. Tenendo conto del grado di obsolescenza dei diversi elementi strutturali, all'interno di tale piano devono confluire tutti i dati tecnici della galleria e devono essere riportate le modalità e le frequenze dei controlli da effettuare, la programmazione degli interventi futuri e la descrizione di quelli già eseguiti.

In tale ottica, grazie alla disponibilità della concessionaria SITAF SpA (Società Italiana Traforo Autostradale del Frejus), è stato possibile svolgere la presente Tesi di Laurea, il cui argomento verte proprio sull'applicazione del Piano di Sorveglianza al caso della galleria Prapontin che, con i suoi 4 441 metri, dal 1995 attraversa i paesi di Bussoleno, Mattie e Susa e rappresenta la seconda galleria più lunga dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia.

Si è scelto di iniziare tale lavoro con una parte preliminare, la Parte A, dedicata a diversi aspetti generali riguardanti una galleria stradale. In seguito ad un primo capitolo introduttivo all'argomento, vengono infatti affrontate le questioni relative alla realizzazione di una galleria (in particolare i metodi di scavo) e i problemi che è possibile riscontrare nelle varie fasi della sua vita.

La Parte B si concentra invece sull'evoluzione delle norme inerenti alla valutazione della sicurezza ed al monitoraggio delle opere d'arte esistenti lungo la rete stradale italiana. In particolare, si fa riferimento ai tragici fatti che hanno portato alla svolta legislativa avvenuta negli ultimi anni, arrivando così alla Circolare oggetto del presente documento.

Proseguendo si incontra la Parte C, la quale si divide in due capitoli basati sulle ultime direttive di cui alla parte precedente. Il primo riguarda l'analisi di una galleria, partendo dagli strumenti e le tecniche di indagine utilizzati per il monitoraggio fino ad arrivare alla sua classificazione. Il secondo,

invece, ha come argomento principe il Piano di Sorveglianza ed una descrizione delle Linee Guida corrispondenti.

Infine, la Parte D ha come obiettivo la redazione della proposta del piano di Sorveglianza della galleria Prapontin. In seguito ad un capitolo introduttivo in cui si descrive la vita della galleria e tutto ciò che è stato effettuato fino ai giorni nostri, si procede sviluppando i vari passi che sono stati effettuati, dall'elaborazione dei dati disponibili alla stesura del Piano stesso, per giungere ad un documento il più possibile dinamico e facilmente riutilizzabile in futuro.

Infatti, partendo da uno studio di tutta la documentazione di progetto della galleria e dei più recenti esiti di indagine per valutare il suo reale stato di consistenza, in particolare il suo rivestimento definitivo mediante l'analisi di spessori ridotti, problemi superficiali e stato tensionale del calcestruzzo, sono state assunte come riferimento le "Linee Guida per la redazione del piano di sorveglianza delle gallerie" ed è stato infine composto il documento sopracitato che, sulla base dell'effettivo stato di conoscenza dell'opera, prevede quindi una programmazione delle attività di verifica periodica e degli interventi di ripristino.

2. Il contesto

La nostra società da tempo vede e considera la catena alpina come una barriera orografica e una linea di confine geopolitica. In realtà, da quando i territori alpini hanno cominciato ad essere densamente popolati e vissuti, dunque all'incirca dall'anno Mille, le Alpi hanno sempre rappresentato un motivo e uno stimolo possente per il transito, la collaborazione, lo scambio e sovente l'unione sociale, culturale e politica. Questo perché un tempo veniva naturale alle genti di un versante alpino andare a vedere cosa e chi vi fosse dall'altra parte, principalmente per motivi di commercio e affari. A tal proposito, con l'obiettivo di liberare la Regione Piemonte e Torino stessa dall'inevitabile isolamento costituito dalle Alpi e per consentire un migliore interscambio commerciale e sociale fra l'Italia e i Paesi dell'Europa nord-occidentale, su impulso di enti quali Comune e Provincia di Torino, Camera di Commercio, Unione Industriale, senza dimenticare primarie compagnie di assicurazione e prestigiosi istituti bancari, è stata costituita a Torino il 29 ottobre 1960 la SITAF S.p.A. (Società Italiana Traforo Autostradale del Frejus).



Figura 1 – Sede legale e uffici direttivi della SITAF SpA e rappresentazione del logo della Società. Fonte: <https://www.sitaf.it/>

Oggi, la Società è concessionaria dell'Autostrada Torino-Bardonecchia e, con la francese SFTRF (Société Française du Tunnel Routier du Fréjus), ha in gestione il Traforo del Frejus.

2.1. La SITAF SpA

Guardando l'inizio della storia della SITAF SpA si ritorna al 1965, quando in occasione dell'inaugurazione del Traforo del Monte Bianco a Courmayeur, i due governi italiano e francese siglarono un protocollo di intesa con il quale si impegnarono a realizzare il Traforo Autostradale del Frejus, attraverso i comuni di Bardonecchia e Modane, e ad affidare i lavori di progettazione, realizzazione e gestione dell'opera a due concessionarie: una francese, la SFTRF, e una italiana, la SITAF. I lavori preliminari partirono, rispettivamente in Francia e sul versante italiano, negli anni 1974 e 1975 e, il 12 luglio 1980, fu così inaugurato il Traforo del Frejus (Figura 2).

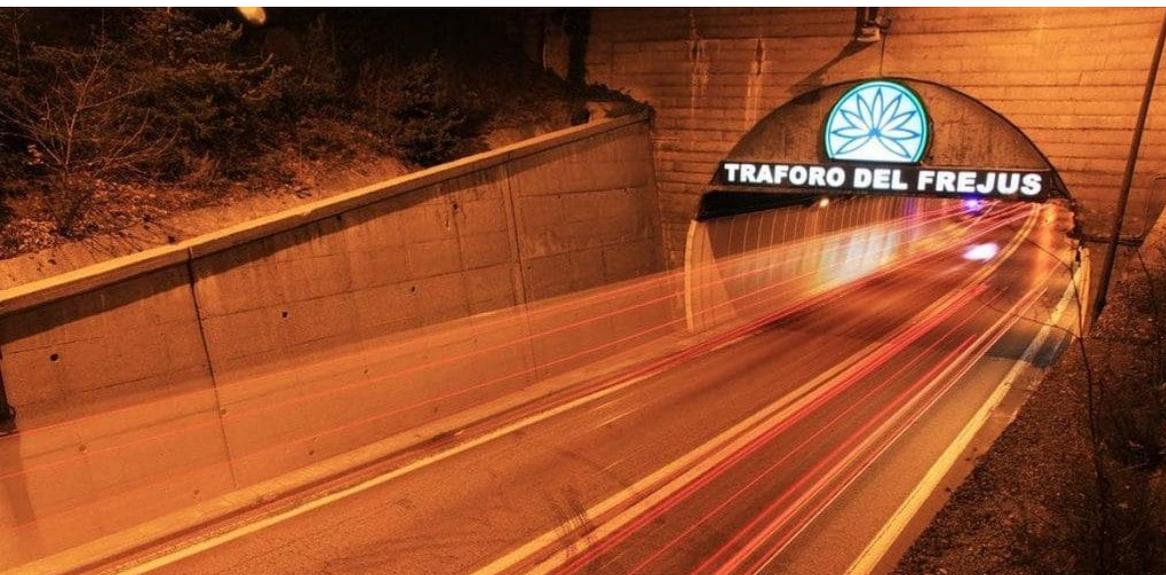


Figura 2 – Ingresso del Traforo del Frejus dal lato italiano. Fonte: <https://tecnositaf.com/>

I due decenni successivi, gli anni '80 e '90, furono invece gli anni che ebbero come protagonista la realizzazione dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia, del quale si parlerà in seguito.

Proseguendo attraverso la vita di questa società, si arriva al nuovo millennio: nel corso del 2000, le suggestioni delle problematiche economico-produttive e le esigenze di miglioramento del rapporto fra infrastruttura e veicoli, portarono SITAF ad espandere il proprio ambito d'azione con la creazione di quattro società controllate per lo sviluppo di attività collaterali negli ambiti della progettazione, della costruzione, delle

tecnologie avanzate e della gestione del traffico. Proprio in questi anni venne inoltre stipulato un accordo di collaborazione con ENEA e Centro Ricerche Fiat che diede l'avvio ad una collaborazione su progetti concernenti lo sviluppo di un dialogo tra veicoli e galleria per una maggiore sicurezza dei transiti.

Infine, l'attribuzione a Torino delle Olimpiadi Invernali 2006 segnò l'avvio di una nuova stagione di lavori e, nel frattempo, con la pubblicazione della Direttiva comunitaria 2004/54/CE relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie e la conseguente emissione del D. Lgs 264/2006, si parlò nuovamente di una galleria parallela al Traforo del Frejus, poiché solo questo progetto avrebbe consentito l'adeguamento dell'infrastruttura agli obblighi di legge. Nel 2014 venne così abbattuto l'ultimo diaframma della nuova galleria del Frejus e, per il 2022, si prevede la messa in esercizio della seconda galleria.

2.2. L'Autostrada A32

L'Autostrada A32, nota anche come Autostrada del Frejus o Torino-Bardonecchia, si sviluppa interamente nella provincia di Torino e, passando per la Valle di Susa, collega il capoluogo piemontese alla Francia tramite il Traforo del Frejus (Figura 3).



Figura 3 – Tracciato dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia. Fonte: <https://it.wikipedia.org/>

Per quanto riguarda le strade europee, fa parte della E70, dorsale ovest-est che attraversa dieci nazioni europee e unisce La Coruna in Spagna con la Trebisonda in Turchia, con un percorso lungo 5 114 km.

Ripercorrendo la storia dell'infrastruttura, si vede che i primi passi furono mossi subito dopo l'apertura del Traforo del Frejus, nel luglio del 1980: vista la tortuosità delle strade statali presenti, ci fu la necessità di creare un percorso più lineare e veloce che avrebbe fornito al traffico locale un'alternativa più diretta e, per vari tratti, fruibile senza varcare barriere di pedaggio; al tempo stesso, unendosi al traforo realizzato negli anni precedenti, avrebbe creato un collegamento con la Francia decisamente più funzionale, in particolar modo per quanto riguarda il traffico pesante. Il primo tratto realizzato fu quello compreso tra Savoulex e il Traforo stesso, dove venne costruita un'unica carreggiata a tre corsie (di cui due per la salita), inaugurata nel 1983. Qualche anno dopo, nel 1987, venne aperto al traffico il proseguimento fino a Deveys, costituito da due carreggiate separate. Nel frattempo, nel 1985 iniziarono i lavori della tratta più complessa dal punto di vista orografico, la Susa-Deveys (conclusa nel 1992), e parallelamente si partì anche a Valle, aprendo così entro il 1990 i tratti Avigliana-Bussoleno e Rivoli-Avigliana.



Figura 4 – Vista del viadotto Clarea e, sullo sfondo, dell'imbocco della galleria Giaglione.
Fonte: <http://www.sitaftunnelfrejus.it/>

L'ultimo tassello mancante risultava quindi essere il tratto Bussoleno-Susa Est, il quale fu completato nel 1994 con la lunga galleria Prapontin,

protagonista della presente Tesi di Laurea. Gli ultimi lavori che vennero effettuati furono l'apertura del nuovo svincolo Oulx Ovest - S.S. 24 del Monginevro nel 1997 e, grazie ai fondi speciali per le Olimpiadi Invernali di Torino 2006, il raddoppio della tratta da cui iniziò la storia dell'autostrada, la Savoulx-Trafofo del Frejus, e la realizzazione della Variante alla S.S. 589 "dei laghi di Avigliana".

Come si può osservare dalla storia, l'infrastruttura venne realizzata in epoche diverse, in parte direttamente dall'ANAS (tratto Deveys-Bardonecchia) e in parte dalla SITAF (la restante parte), collegando i vari tratti, messi in esercizio appena possibile, alla viabilità esistente della Valle di Susa (S.S. 24 del Monginevro e S.S. 25 del Moncenisio). In particolare, analizzando qualche dato tecnico, l'autostrada si sviluppa per una lunghezza totale pari a 73 chilometri, dislocati per 19 chilometri in viadotto, 18 in sette gallerie (Figura 5) e 36 in rilevato, con il quale si supera un dislivello di circa 1 000 metri.



Figura 5 – Inquadramento delle sette gallerie dell'Autostrada A32. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Dal punto di vista morfologico, invece, l'autostrada è scomponibile in tratte aventi caratteristiche omogenee:

1. **“Tratta 1” Rivoli-Susa** (dal km 0+000 al km 34+800 circa): sezione stradale tipo II CNR con 2+2 corsie da 3,75 m, andamento altimetrico semi-pianeggiante, velocità limite compresa tra i 100 km/h ed i 130 km/h (a seconda dei tratti);
2. **“Tratta 2” Susa-Savoulx** (dal km 34+800 al km 65+000 circa): sezione stradale tipo III CNR con 2+2 corsie da 3,50 m, notevole pendenza longitudinale, velocità limite di 100 km/h;

3. **“Tratta 3” Savoulx-Bardonecchia** (dal km 65+000 al km 72+330 circa): carreggiate di 2+2 corsie da 3,75 m, notevole pendenza longitudinale, velocità limite di 90 km/h.

Analizzando invece la Torino-Bardonecchia dal punto di vista dei pedaggi e del traffico, si riscontra che essa, a differenza della maggioranza delle autostrade italiane, ai vari collegamenti con la viabilità ordinaria non è dotata di caselli per il pagamento, ma sono presenti solamente due barriere per la riscossione del pedaggio: una in Bassa Val di Susa, nel comune di Avigliana, e una in Alta Val di Susa, nel comune di Salbertrand. Proprio in corrispondenza di queste due barriere, negli anni è stato possibile esaminare il traffico che ha interessato l'infrastruttura e la sua evoluzione nel tempo (Figura 6): a partire dal 1999, per ogni anno fino ad oggi, la SITAF fornisce il numero di veicoli passanti per i due caselli, suddividendoli in veicoli leggeri e pesanti.

Evoluzione del traffico totale dell'Autostrada A32

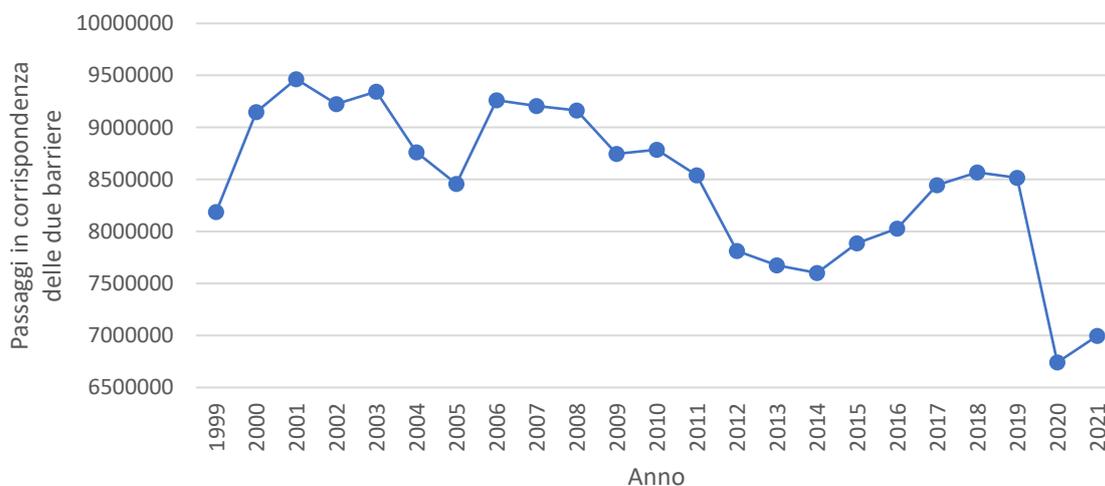


Figura 6 – Evoluzione del traffico totale (veicoli leggeri e pesanti) passante per le due barriere dell'Autostrada A32.

Considerando il traffico totale, il numero veicoli che hanno transitato attraverso le due barriere varia tra circa 6,5 milioni e 9,5 milioni all'anno: studiando l'andamento dei dati nei diversi anni, si osserva che dal 1999 al 2011 è presente un'oscillazione abbastanza costante intorno a circa 9 milioni di veicoli all'anno, valore che scende a 7,6 milioni nell'arco dei tre anni successivi per poi risalire a 8,5 milioni nel 2019. Negli ultimi due anni,

invece, a causa del difficile periodo storico e dell'emergenza pandemica che si sta attraversando, si è visto un drastico calo del traffico toccando il minor numero di transiti dall'inizio del monitoraggio, ovvero 6,7 milioni di veicoli all'anno. Nello specifico, vista l'affluenza turistica a livello internazionale che le rinomate mete della Valle di Susa portano sul territorio sia nelle stagioni invernali che estive, i dati evidenziano un picco del traffico dei veicoli leggeri proprio durante questi mesi; i veicoli pesanti, invece, si distribuiscono in modo piuttosto omogeneo durante l'anno e interessano circa il 30% del traffico totale.

2.3. La galleria Prapontin

Il Piano di Sorveglianza dell'Opera oggetto della presente Tesi di Laurea sarà applicato al caso studio della galleria Prapontin (Figura 7 e Figura 8) che, attraversando i paesi di Bussoleno, Mattie e Susa con uno sviluppo di 4 441 metri, è la seconda galleria più lunga dell'Autostrada A32, dopo la galleria Cels lunga 5 245 metri.



Figura 7 – Imbocco della canna di discesa della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Entrata in esercizio nel 1995, è costituita da due fornici, di due corsie ciascuno e collegati da 10 by-pass interni, con traffico monodirezionale di lunghezza rispettivamente 4 327 m per la canna nord, con direzione Bardonecchia (dalla Pk 29+045 alla Pk 33+372), e 4 363 m per la canna sud, con direzione Torino (dalla Pk 33+397 alla Pk 29+034). All'imbocco di valle (lato Torino) la galleria termina con un tratto in artificiale, di sviluppo

rispettivamente 316 m per il fornice nord e 307 m per il fornice sud, con rivestimento armato e sezione trasversale dotata di soletta piana alla base. Parimenti, all'imbocco di monte (lato Bardonecchia), la galleria è stata realizzata prevedendo un tratto in artificiale di sviluppo complessivo rispettivamente di 62 m per il fornice nord e 63 m per il fornice sud.

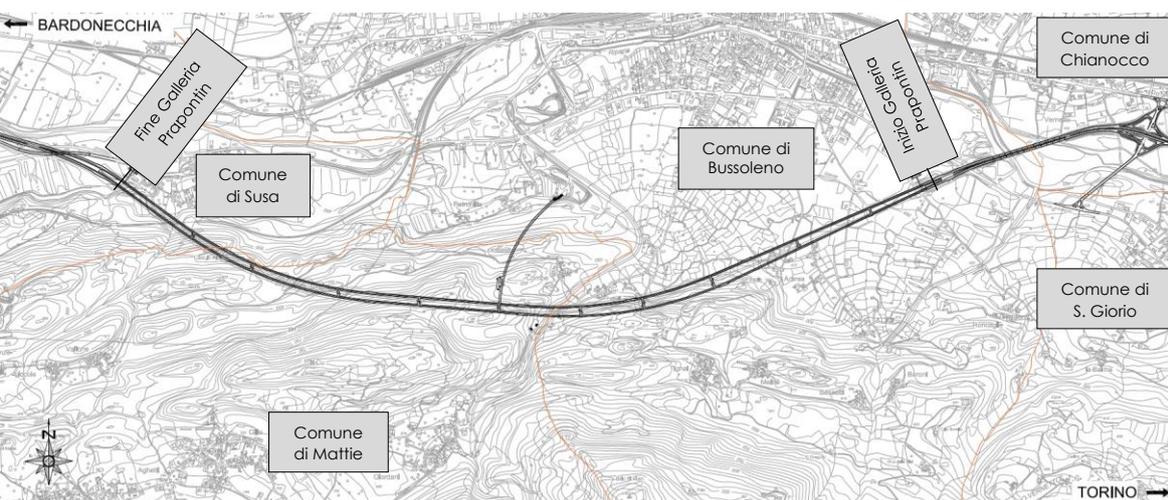


Figura 8 – Corografia della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

La galleria, i cui imbocchi non si trovano a ridosso di opere d'arte rilevanti tali da condizionare la livelletta stradale, è stata costruita mediante scavo meccanico tradizionale ed è di tipo naturale con rivestimento in calcestruzzo; è inoltre presente un'impermeabilizzazione esterna con teli e tubi di drenaggio al piede delle murette. La sua sezione trasversale è dotata di arco rovescio per uno sviluppo complessivo rispettivamente di 1 164 m per il fornice nord e 1 477 per il fornice sud mentre, per la restante parte, è per entrambi i fornici senza arco rovescio. Le corsie nelle tratte all'aperto adiacenti alla galleria sono di larghezza pari a 3,75 m, mentre all'interno della galleria sono di larghezza minima pari a 3,50 m, risultando così conformi al limite di velocità ivi imposto, pari a 100 km/h (come previsto dal Bollettino CNR 78/80). Le ulteriori caratteristiche geometriche della generica sezione e della sezione nelle piazzole della galleria (4 nel fornice di discesa e 5 in quello di salita) sono riassumibili nelle tabelle (Tabella 1 e Tabella 2) e figure seguenti (Figura 9 e Figura 10).

Tabella 1 – Caratteristiche geometriche della generica sezione della galleria Prapontin.
Fonte: Elaborati prodotti dalla SITAF SpA

SEZIONE GENERICA	
Tipologia	Circolare
Distanza tra i piedritti [m]	9,83
Raggio [m]	5,05
Altezza al centro della piattaforma [m]	6,42
Larghezza della piattaforma [m]	8,00
Larghezza del marciapiede sinistro [m]	0,91
Larghezza del marciapiede destro [m]	0,91

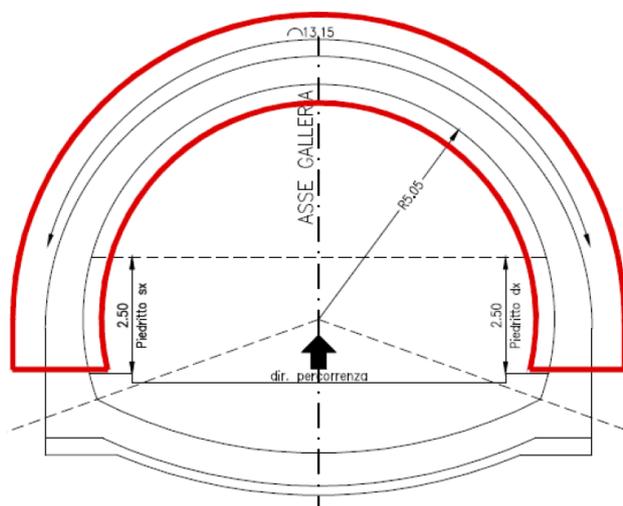


Figura 9 – Caratteristiche geometriche della generica sezione della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Tabella 2 – Caratteristiche geometriche della sezione in piazzola della galleria Prapontin.
Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

SEZIONE IN PIAZZOLA	
Tipologia	Circolare
Distanza tra i piedritti [m]	12,35
Raggio [m]	5,05 - 7,10
Altezza al centro della piattaforma [m]	7,08
Larghezza della piattaforma [m]	9,90
Larghezza del marciapiede sinistro [m]	0,93
Larghezza del marciapiede destro [m]	0,93

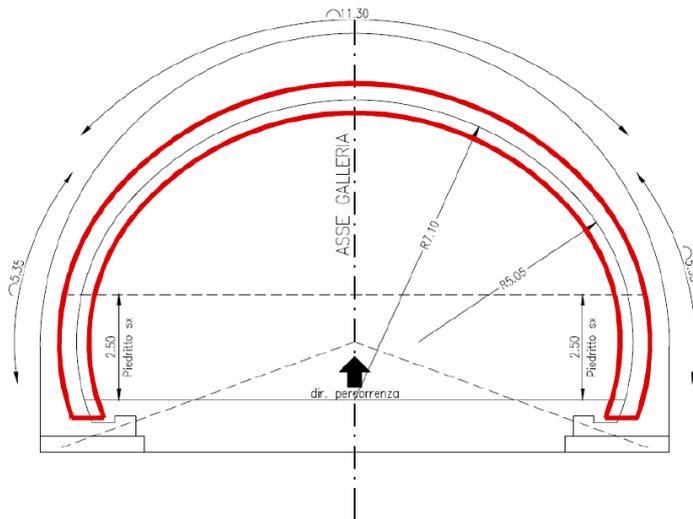


Figura 10 – Caratteristiche geometriche della sezione in piazzola della galleria Prapontin.
Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Analizzando infine il contesto geologico e geotecnico, si osserva che il tracciato della galleria in oggetto attraversa un complesso di rocce e depositi estremamente vario, sia per i tipi litologici che caratterizzano le unità geologiche sia per il particolare assetto geologico-strutturale. Dal punto di vista geologico, l'area studio ricade all'interno del dominio Pennidico delle Alpi Occidentali: sono presenti le unità di basamento del Dora Maira, del Massiccio d'Ambin con le relative coperture e le unità oceaniche generalmente attribuite alla Zona Piemontese. Tali unità sono separate da potenti orizzonti di scollamento che, nella fattispecie, costituiscono la Zona a Scaglie tettoniche di Venaus. In corrispondenza degli imbocchi di monte e valle i tunnel attraversano generalmente orizzonti di potenza variabile di depositi quaternari di differente natura e caratteristiche.



PARTE

A

Le gallerie

Questa Parte è dedicata ai diversi aspetti riguardanti una galleria stradale. In seguito ad un primo capitolo introduttivo all'argomento, vengono affrontate le questioni relative alla realizzazione di una galleria (in particolare i metodi di scavo) e i problemi che è possibile riscontrare nelle varie fasi della sua vita.

3. Cos'è una galleria

Una galleria, denominata anche tunnel o traforo, nel campo dell'ingegneria civile consiste in una perforazione del suolo, approssimativamente orizzontale, nella quale la lunghezza domina sulle altre due dimensioni e, essendo aperta alle estremità, permette il passaggio sotterraneo e la comunicazione tra due luoghi. Oggi le gallerie sono considerate elementi progettuali costituenti parte integrante delle opere ingegneristiche: la necessità di rendere più diretti e rapidi i collegamenti viari così da minimizzare tempi e consumi, l'opportunità di salvaguardare l'ambiente limitando l'impatto paesaggistico e visivo delle infrastrutture, l'obbligo di ridurre l'inquinamento del traffico veicolare o l'esigenza di un più razionale uso delle superfici libere ancora esistenti, insieme all'affinamento delle tecniche di scavo e costruzione che permettono di operare in ogni tipo di suolo, sono solo alcune delle molteplici ragioni che hanno incoraggiato il ricorso sempre più frequente al "tunneling".

3.1. La classificazione

Una prima distinzione tipologica dei tunnel viene fatta in base all'uso in quanto, sebbene si verifichi anche l'impiego combinato, generalmente essi sono destinati ad un gruppo target specifico, quale galleria stradale, ferroviaria, metropolitana, ciclopedonale o destinata a servizi, comunicazioni idriche, scopi minerari, ecc.

Per i casi in esame, un'importante classificazione che può essere effettuata è relativa al metodo costruttivo, ovvero:

- **Galleria naturale**, realizzata con tecniche di scavo diretto nell'ammasso roccioso/terroso da attraversare;
- **Galleria artificiale**, nella maggior parte dei casi si colloca nella parte di approccio della galleria naturale, cioè nelle zone di imbocco, e generalmente sono realizzate a cielo aperto per poi essere ricoperte di terreno, parzialmente o totalmente, nella fase finale di sistemazione delle aree di accesso. Una sottospecie di

gallerie artificiali sono le trincee coperte o *cut and cover*, che si effettuano soprattutto quando è presente una scarsa copertura ed è necessario effettuare uno scavo preliminare di trincea e successiva copertura.

Dal punto di vista morfologico, a seconda della copertura della galleria, è possibile distinguere:

- **Galleria superficiale:** sono caratterizzate da coperture costantemente ridotte, mai superiori a qualche diametro di galleria (da 5-10 m fino a 60 m di profondità). A causa della ridotta copertura e della conseguente presenza di materiali sciolti, sono soggette a fenomeni deformativi e di rottura del terreno nell'intorno del cavo che si propagano sino al piano campagna causando problemi in superficie;
- **Galleria profonda:** si sviluppano oltre i 60 metri di profondità. I loro problemi consistono soprattutto nella difficoltà di previsione del comportamento geologico nelle diverse tratte e, quindi, nell'incertezza dei parametri in gioco;
- **Galleria parietale:** si collocano all'interno di un fianco vallivo con andamento trasversale allo stesso, mantenendo condizioni di copertura particolarmente esigue in corrispondenza del paramento di valle. Le problematiche connesse sono le medesime delle gallerie superficiali sommate alla presenza di carichi asimmetrici nei pressi dell'asse verticale del foro di scavo.

In funzione della pendenza, invece, si definiscono galleria di rampa quelle che hanno gli imbocchi a quote diverse e hanno un'unica livelletta, e galleria di colmo quelle con due livellette spioventi verso gli imbocchi.

L'ultima classificazione dei tunnel riguarda la capienza: tutte le gallerie stradali si collocano in un contesto che prevede un determinato volume di traffico, determinate caratteristiche geologiche, urbanistiche e di viabilità. Questi tre fattori portano alla scelta della tipologia di galleria, che può essere a canna singola o a canna doppia a seconda dei forni disponibili. Le gallerie a canna singola, nonostante possiedano evidenti vantaggi in termini di tempi di costruzione, uso di materiali, costi, ecc.,

hanno lo svantaggio di raggiungere la saturazione del traffico in tempi minori rispetto alle gallerie a canna doppia. Quest'ultime solitamente fruiscono di due fornicie in ognuno dei quali è ospitato un senso di marcia: esse richiedono tempi di costruzione, investimenti iniziali e di manutenzione superiori rispetto alla tipologia precedente, a fronte però di un maggior guadagno in termini di volume di traffico e, soprattutto, di sicurezza.

3.2. La storia

La storia delle costruzioni sotterranee è la storia di un confronto intenso e costante, soprattutto sul piano tecnico, tra le innovazioni umane e la natura. L'inizio va ricercato nell'epoca preistorica delle caverne, quando in Sudafrica furono scoperte le più remote tracce di un'attività di scavo in sotterraneo probabilmente esercitate dall'uomo di Neanderthal ma, riferendosi in particolar modo alle gallerie, sulla base di reperti archeologici e descrizioni di antichi storici, si hanno notizie sicure dell'esistenza di scavi minerari già sul finire dell'Età della Pietra. In particolare, nel passato furono di rilievo le realizzazioni sotterranee degli antichi egizi, quali le gallerie della Valle dei Re e delle Regine o le cavità al di sotto delle piramidi, degli antichi greci, i quali riuscirono a scavare mediante metodi manuali una galleria di oltre 1 km nell'isola greca di Samos (530 a.C.), considerata la più lunga galleria di tutta l'antichità, e dai romani con i loro acquedotti. Riferendosi più approfonditamente alla zona transalpina, si possono osservare una serie di piccole gallerie post-medievali che dimostrano la genialità tecnica degli uomini nonostante i secoli più bui, quali il Buco di Viso (o buco delle Traversette) nel 1475, che fu il primo traforo stradale alpino per uomini e muli collegante Provenza e Piemonte, o il Gran Pertus (o Pertus di Colombano Romean) nel 1526, piccola galleria idraulica di 433 metri a circa 2000 metri d'altitudine scavata completamente a mano da un solo uomo in 7 anni (Figura 11).



Figura 11 – Imbocco del Pertus di Colombano Romean. Fonte: Fotografia di Silvia Jannon

Effettuando un salto in avanti nel tempo fino al 1676, si assiste ad una svolta in quanto, nella costruzione della galleria di Malpas in Francia, si fece uso per la prima volta della polvere da sparo mentre, nel 1707, fu realizzata la prima galleria carrozzabile delle Alpi sulla strada del San Gottardo, la Buca D'Uri, la quale rappresentò l'inizio di numerose opere sotterranee realizzate in quella zona. Un secolo più tardi, sempre in Francia, si iniziarono ad impiegare i primi metodi di attacco, con razionale ed organica divisione del lavoro nelle diverse fasi di scavo, sostegno e rivestimento. A partire da quel momento, gli anni successivi furono interessati da un continuo perfezionarsi degli ordinari metodi di costruzione che, insieme alla realizzazione e messa a punto di nuove tecniche, permisero di arrivare ad una vera e propria "scienza delle gallerie". Specialmente dalla seconda metà dell'Ottocento, con il continuo progresso e il risveglio delle attività industriali e commerciali, l'esigenza di aprire nuove vie di comunicazione attraverso le Alpi divenne improrogabile e portò alla realizzazione di una serie di trafori ferroviari.

Sulla base di questi concetti, l'origine effettiva della Storia delle Gallerie viene posta nel 1850, periodo della costruzione del Traforo Ferroviario del Frejus (Figura 12), dove, per la prima volta nella storia, nel corso dello scavo furono brevettate tecniche di scavo meccanizzate ideate dall'ingegnere Medaille. Per questo, ciò che è accaduto prima di tale data viene definito Preistoria delle Gallerie.

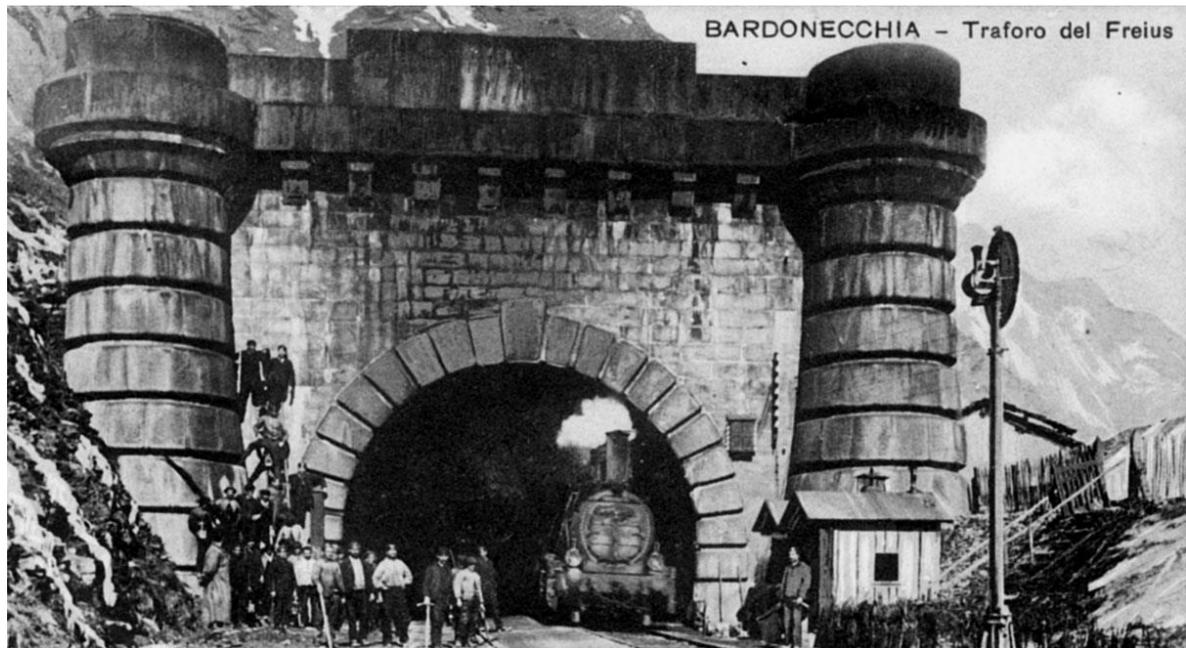


Figura 12 – Imbocco del Traforo Ferroviario del Frejus dal lato italiano. Fonte: <https://www.laboratoriovalsusa.it/>

Inizìò così il cosiddetto "Cinquantennio di Fuoco", compreso tra gli anni 1857-1906, durante il quale comparvero svariate proposte di tunnel ferroviari, spesso in competizione tra loro, motivate da esigenze sociopolitiche e sostenute da indagini di prevalente carattere topografico-ingegneristico.

Il primo grande traforo realizzato fu, come accennato precedentemente, il Traforo Ferroviario del Frejus (1857-1871), ovvero la galleria dell'epoca più lunga del mondo e considerata, come opera ingegneristica, seconda solo al canale di Suez: lo scavo della galleria, lunga 12 234 metri, impiegò dodici anni in meno rispetto a quanto previsto grazie all'efficacia di una nuova perforatrice a rotopercussione azionata ad aria compressa con avanzamento automatico.

Nel frattempo, nel 1858, fu presentato il progetto di una nuova linea ferroviaria Torino-Ginevra con traforo sotto il Monte Bianco, un'idea già accennata agli inizi dell'Ottocento ma che, anche in questo caso, per preminenti ragioni politiche e commerciali non ebbe seguito. Si scelse infatti, a tergo di valutazioni geologiche preventive in genere trascurate, di realizzare il traforo italo-svizzero del San Gottardo (1872-1882). Un anno dopo l'inizio dei lavori partì lo scavo per il traforo del Tenda (1873-1882), il primo tunnel stradale più lungo del mondo (3 186 metri), al quale venne affiancato anche quello ferroviario qualche anno più tardi (1890-1898). Nello stesso periodo furono presentati dei nuovi progetti e la competizione tra il traforo ferroviario del Monte Bianco e del Sempione vide quest'ultimo vincitore: fu così realizzato il terzo grande traforo transalpino che, costruito negli anni 1898-1906 con un solo binario e poi raddoppiato nel 1922, fu per tre quarti di secolo la galleria ferroviaria più lunga del mondo, con 19 800 metri.



Figura 13 – A sinistra un manifesto del 1906 col tracciato della nuova linea del Sempione e gli orari dei treni; a destra un manifesto celebrativo del traforo. Fonte: Collegio degli Ingegneri e Architetti della Provincia di Verona, *GALLERIE. Modi di progettazione, tecniche costruttive, relazioni col territorio: ieri e oggi.*, Convegno, 17/05/2002

Le prime grandi gallerie di attraversamento dell'Appennino, invece, furono realizzate negli anni 1850 al passo dei Giovi, così da dare continuità alla linea ferroviaria Torino-Genova; la forte pendenza della linea, insieme alla trazione a vapore dei mezzi, rendeva il tratto estremamente pericoloso soprattutto per i fumi, motivo per cui negli anni 1905-1911 si procedette all'elettificazione della linea. Un ulteriore tratto ferroviario transappenninico, denominato la Porrettana, fu aperto nel 1864: si sviluppava in 46 gallerie (diventate in seguito 49) su un percorso molto faticoso e pericoloso a causa del ristagnamento dei fumi. Per affrontare questi problemi e le crescenti esigenze di traffico, a partire dalla fine

dell'800 venne elaborato un progetto per una nuova linea direttissima Bologna-Firenze, costruita negli anni fra le due guerre, il quale prevedeva la realizzazione di una nuova galleria che, con i suoi 18 510 metri, si poneva al secondo posto dopo quella del Sempione.

Passando alle autostrade che attraversano gli Appennini, si fa riferimento in particolare a due casi: il primo, negli anni Trenta, riguarda una delle autostrade di prima generazione mentre il secondo, negli anni Sessanta, appartiene alla seconda generazione che ha formato la spina dorsale della rete di asfalto italiana. Riferendosi al primo caso menzionato, si torna indietro al 1932 quando fu realizzata l'autocamionale da Genova a Serravalle Scrivia, che successivamente avrebbe dovuto raggiungere Torino e Milano: il tortuoso andamento plano-altimetrico richiese la costruzione di molti viadotti, ponti, sottopassi, cavalcavia e gallerie, le quali comportarono lo scavo di 359 000 metri cubi di roccia. Una trentina di anni dopo, nel 1960, fu aperto il tratto da Bologna a Firenze che, in meno di 90 km, racchiudeva 67 fra ponti e viadotti e 24 gallerie, la cui realizzazione interessò importanti innovazioni, quali l'applicazione del nuovo sistema spritz-beton.



Figura 14 – Il 16 luglio 1965 De Gaulle e Saragat inaugurarono il Traforo del Monte Bianco.
Fonte: <https://www.regione.vda.it/>

Sempre in quegli anni, in particolare tra il 1958 e il 1964, col traforo del Gran San Bernardo si aprì la stagione delle gallerie al servizio dei grandi collegamenti autostradali attraverso le Alpi. Nel 1965 entrò finalmente in servizio "la più lunga galleria del mondo sotto la più alta vetta d'Europa", ovvero il traforo del Monte Bianco (Figura 14): l'idea di realizzare un tunnel stradale invece che ferroviario, così da non avere più i limiti di pendenza imposti dalla ferrovia, era già stata ventilata per la prima volta nel 1934 ma, ancora una volta, senza successo. Qualche anno più tardi, nel 1980, entrarono infine in funzione il tunnel del San Gottardo e quello autostradale del Frejus, il quale fu considerato un modello e per molti aspetti diede il via ad una nuova generazione di lavori in galleria.

4. La costruzione di una galleria

La costruzione delle opere in sotterraneo avviene per sottrazione di materiale e si differenzia da quella delle opere in superficie per due aspetti principali: il terreno, con la sua incertezza, è il vero materiale da costruzione e, nonostante le tecniche di miglioramento, risulta difficoltoso modificare le proprietà dell'ammasso roccioso; inoltre, i carichi sono influenzati dal processo di costruzione e la loro stima è possibile solamente mediante delle assunzioni. Negli anni, l'evoluzione delle tecniche di scavo e la realizzazione di gallerie diversificate e idonee a risolvere ogni tipo di problema progettuale, hanno fatto sì che le scelte pianificatorie, più che le difficoltà costruttive, abbiano orientato il *tunneling* verso soluzioni complesse, specifiche e mirate. Si evidenzia però che, nonostante questo, la procedura di scavo non possa prescindere dalle condizioni locali di intervento e dalle tecniche realizzative disponibili: il tipo di roccia o terreno, la consistenza e lo stato dell'ammasso, le condizioni idrologiche, l'ambito di intervento, le caratteristiche della galleria e il risultato conseguibile restano sempre i criteri su cui viene tutt'oggi improntata la costruzione dei trafori.

4.1. La progettazione

In passato, la scarsità di conoscenze e la carenza di macchinari specifici portavano ad una progettazione improvvisata della galleria, con interventi di stabilizzazione e rivestimenti definiti in corso d'opera con l'avanzare del fronte di scavo; oggi, invece, lo scavo di una galleria implica un'approfondita fase di progettazione: a partire dal modello geologico e geotecnico e sulla base dei requisiti funzionali che sono richiesti all'opera, la progettazione di una galleria porta alla determinazione della sua geometria, della tecnica di scavo, della tipologia di sostegno o stabilizzazione e del rivestimento definitivo. Si evidenzia, inoltre, che particolare importanza va posta nei riguardi della geologia poiché gioca un ruolo dominante in molte decisioni progettuali, influenzando in modo importante la fattibilità, il costo e il comportamento di qualsiasi tunnel.

I punti chiave nella progettazione di una galleria possono essere quindi schematizzati nel seguente modo:

1. **Impostazione generale dell'opera e della sua progettazione:** requisiti funzionali (geometria, posizione, percorso, interferenze), vincoli di progettazione, aspetti ambientali, analisi comparative con percorsi alternativi;
2. **Caratterizzazione geologica del sito:** studio (geomorfologico, geologico, idrogeologico, sismico) della zona, definizione delle caratteristiche fisiche del suolo, della roccia e delle acque sotterranee, selezione del metodo di scavo;
3. **Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica del sito:** pianificazione delle indagini e delle prove in sito e in laboratorio, caratterizzazione del suolo e dell'ammasso roccioso, definizione dello stato di stress naturale;
4. **Previsione del comportamento meccanico delle masse:** formulazione di un modello geotecnico per la valutazione delle condizioni di stabilità dello scavo e dei vincoli del sottosuolo, così da definire una progettazione preliminare delle modalità di scavo e di supporto;
5. **Scelte progettuali e dimensionamento della galleria:** scelta delle tecniche di scavo, progettazione strutturale, valutazione dell'indice di sicurezza;
6. **Progettazione delle opere ausiliarie;**
7. **Pianificazione del monitoraggio** durante la costruzione e l'operatività.

4.2. Le tecniche costruttive

Durante gli anni, ma ancor più durante i secoli, nei vari aspetti riguardanti la costruzione delle opere sotterranee sono state osservate significative e fondamentali evoluzioni sulla base di diversi criteri, quali aumentare le condizioni di sicurezza, aumentare la velocità di scavo, ridurre il disturbo ambientale o, più in generale, migliorare la produzione di galleria finita nell'unità di tempo. In passato, i problemi che si incontravano con l'avanzamento del fronte di scavo venivano risolti attraverso soluzioni

basate sull'esperienza e, solamente in un secondo momento, si cercava di interpretare i fenomeni incontrati per poterne dare una spiegazione scientifica. Di conseguenza, nel tempo sono nati diversi metodi di scavo, noti come metodi tradizionali e solitamente denominati con il nome del Paese in cui sono stati proposti, i quali rappresentano la prima grande tipologia di avanzamento nello scavo delle gallerie naturali: tale tecnica consiste nell'esecuzione di un processo ciclico, nel quale all'escavazione vera e propria segue la rimozione del materiale abbattuto, detto smarino, e l'installazione di eventuali supporti. La seconda, sviluppata in tempi più recenti, è stata possibile con l'introduzione delle frese, dette anche Tunnel Boring Machine (TBM), grazie alle quali è nato lo scavo meccanizzato, ovvero un processo di escavazione continuo in quanto, mentre la macchina avanza, rimuove il materiale ed installa l'eventuale supporto provvisorio e/o il rivestimento finale della galleria.

La scelta del metodo di scavo (tradizionale o meccanizzato) risulta essere di fondamentale importanza nella costruzione di una galleria e dipende da diversi fattori, come ad esempio la lunghezza e la profondità dello scavo, le caratteristiche dei terreni, le possibilità economiche o le tempistiche di costruzione. Sia lo scavo tradizionale, sia quello meccanizzato, solitamente necessitano di interventi di consolidamento che migliorino le condizioni di stabilità del cavo ed evitino la generazione di zone di rottura indesiderate per mantenere le condizioni di sicurezza in fase di scavo ed esercizio della galleria; tali interventi si possono distinguere in:

- **Interventi migliorativi** (iniezioni, jet grounding, congelamento, compattazione e drenaggio) effettuati con tecniche di consolidamento finalizzate a mobilitare e preservare la resistenza propria della massa rocciosa in modo che si autosostenga;
- **Interventi conservativi** (centine - Figura 15, chiodature, tecniche di consolidamento) per conservare il più possibile indisturbate le condizioni di tensione e deformazione dell'ammasso terroso/roccioso. Generalmente vengono utilizzati elementi strutturali che portano, interamente o in parte, il peso dei blocchi isolati da discontinuità o porzioni di roccia rilasciatesi, senza

modificare le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso al contorno del fronte di scavo.



Figura 15 – Centine metalliche usate per la realizzazione di interventi conservativi in galleria.
Fonte: Castaldo SpA

4.2.1. Lo scavo tradizionale

La tecnica di scavo tradizionale, utilizzata fin dalla seconda metà del XIX secolo, generalmente affronta il problema effettuando un attacco parziale, ovvero le operazioni di scavo e rivestimento vengono suddivise nelle singole parti componenti la sezione, così da poter controllare la stabilità del fronte, tramite l'utilizzo di sostegni provvisori, ed evitare la chiusura del cavo. In caso di situazioni geologiche favorevoli, o dopo opportuni preconsolidamenti, è anche possibile adottare un avanzamento a sezione piena, tecnica che più si tende ad utilizzare recentemente: in questo caso l'intera sezione della galleria, per una certa profondità, viene scavata, armata e rivestita nel suo insieme e, di conseguenza, il fattore più critico risulta essere la stabilità del fronte di scavo.

Un tempo, i vari tratti scavati venivano man mano sostenuti da numerosi puntoni in legno, che rendevano molto difficile il movimento all'interno del cantiere, motivo per cui questa tecnica viene definita "pesante". Oggi si parla invece di tecnica di scavo tradizionale "leggera" in cui,

invece che puntellare il terreno in seguito allo scavo (approccio passivo), si interviene preventivamente in maniera attiva per limitare l'effetto di allentamento del materiale. Lo scavo tradizionale, nonostante sia caratterizzato da un avanzamento piuttosto lento (1-3 metri al giorno), rappresenta un metodo flessibile, molto efficace in qualsiasi condizione geotecnica, in casi di geometrie delle sezioni di dimensioni variabili e complesse e in gallerie a grandi profondità.

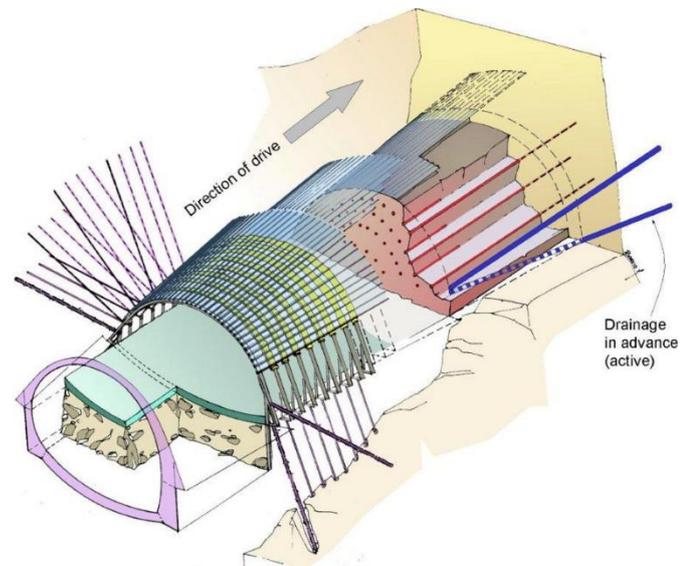


Figura 16 – Fasi dello scavo tradizionale. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

La metodologia tradizionale, da calibrare in base alla natura del mezzo oggetto di scavo, prevede l'impiego di mezzi meccanici (pale meccaniche, martelli demolitori, ecc.) o, principalmente, l'uso di sostanze esplosive (dinamite o tritolo). Quest'ultima tecnica, detta di perforazione e sparo (*drill & blast*), è ideale per rocce di media durezza e prevede l'esecuzione ciclica di diverse fasi che permettono di avanzare lungo il tracciato:

1. **Consolidazione** del fronte di scavo;
2. **Perforazione e carica della volata**: inizialmente vengono realizzati i fori da mina nel fronte di scavo mediante appositi mezzi perforatori (ad esempio i jumbo, dotati di una serie di perforatrici, Figura 17).



Figura 17 – Perforazione del fronte per la volata. Fonte: <https://www.terzovalico.it/>

Nei fori realizzati vengono quindi inserite le mine, il cui insieme costituisce la cosiddetta volata, che vengono fatte brillare secondo lo schema di volata, da progettare in relazione alla geometria e alle caratteristiche del fronte di scavo (lo schema può infatti prevedere un brillamento contemporaneo delle cariche o in fasi successive distanziate tra loro di pochi millisecondi);

3. **Disgaggio** del fronte di scavo da elementi instabili e rimozione dei detriti;
4. **Rivestimento di prima fase** finalizzato alla messa in sicurezza e raggiungimento delle condizioni di equilibrio a breve termine dell'area, realizzato mediante calcestruzzo proiettato, ancoraggi, centine metalliche e reti di armatura. Conclusa questa fase si ripetono i cicli di brillamento fino alla fine dello scavo della tratta di galleria;
5. **Impermeabilizzazione**: costituita da un manto in P.V.C. al fine di impedire scambi di acqua con la falda;
6. **Rivestimento definitivo o di seconda fase**: getto di calcestruzzo eventualmente armato e di spessore variabile (generalmente da 30 a 120 cm) a seconda delle condizioni geomeccaniche esistenti.

Il cuore di questo metodo è insito nell'abbattimento della giusta porzione di roccia, così da realizzare al contorno dello scavo una re-distribuzione delle forze nota come "effetto arco".

4.2.2. Lo scavo meccanizzato

Lo scavo meccanizzato prevede l'impiego di una fresa meccanica a piena sezione, o TBM, che può eseguire ogni tipo di operazione necessaria alla realizzazione di una galleria, dallo scavo alla finitura. Questa tipologia di scavo, ideale per gallerie di diametri di 3-16 m e di lunghezza superiore a 2-3 km, si distingue per la velocità di esecuzione (da 10 fino a 40 metri al giorno a seconda della consistenza del materiale), la continuità realizzativa, l'economia dei costi e la sicurezza dei lavoratori.

Le TBM (Figura 18) sono delle vere e proprie fabbriche mobili lunghe anche centinaia di metri che permettono, nella maggior parte dei casi, di evitare il consolidamento preventivo dell'area e realizzare le fasi di scavo e rivestimento in contemporanea. La macchina avanza nel terreno grazie a dei martinetti idraulici che puntano sulla roccia, se sufficientemente sana, o sul rivestimento appena posizionato spingendo in avanti la testa fresante; la parte retrostante, inoltre, è ancorata alla bocca del tunnel così da contribuire alla spinta.

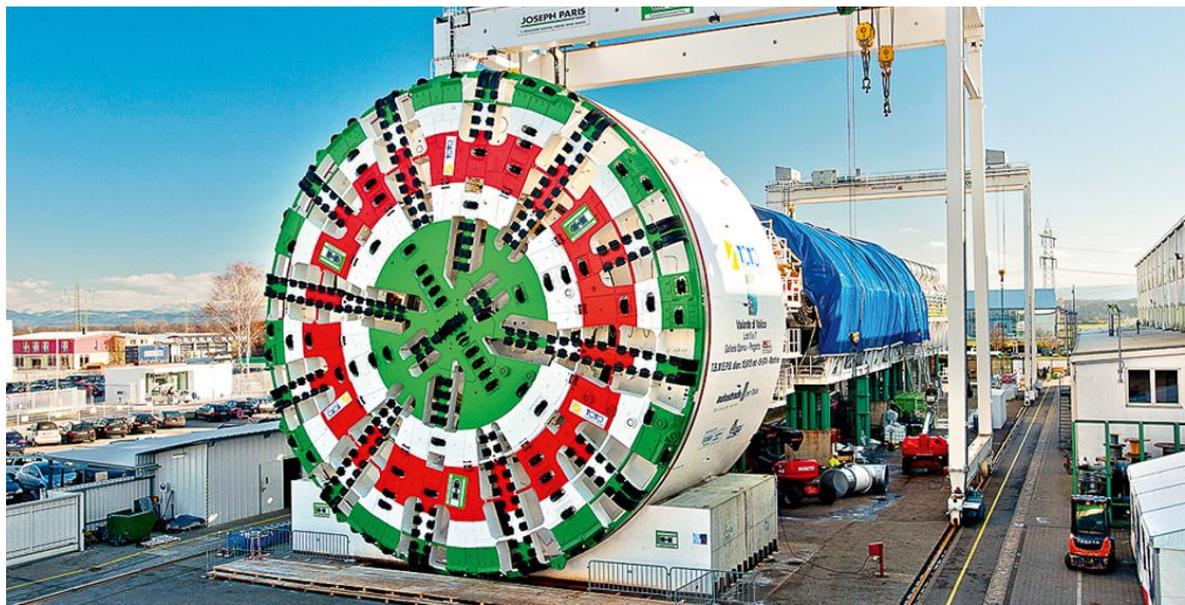


Figura 18 – TBM "Martina" (S-574) utilizzata per la realizzazione della galleria Sparvo, facente parte del progetto di ampliamento della "Variante di Valico" dell'Autostrada A1. Fonte: <https://www.herrenknecht.com/>

Nonostante oggi esistano diversi mezzi meccanici non tradizionali con caratteristiche differenti, essi sono costituiti essenzialmente dalle medesime parti:

- Una **testa**, ovvero la parte anteriore a diretto contatto con il fronte di scavo utile a scavare, sostenere il fronte, raccogliere e convogliare lo smarino verso un sistema di evacuazione;
- Un **sistema di guida e propulsione** che fornisce la spinta necessaria all'avanzamento della macchina;
- Un **sistema di messa in opera del rivestimento** della galleria, mediante ancoraggi, reti e spritz beton o con conci prefabbricati di cemento a seconda del metodo di scavo utilizzato;
- Un **sistema di trasporto** dello smarino verso l'esterno della galleria;
- Diversi **carri di back-up**, ovvero strutture che viaggiano al seguito della fresa vera e propria e contengono tutti gli strumenti necessari alle operazioni di scavo e costruzione.

In generale, è possibile suddividere le TBM in due categorie in funzione del materiale in cui devono operare: le frese, nel caso di materiale roccioso con caratteristiche meccaniche da medie a elevate e condizioni di buona stabilità, e gli scudi, utilizzati in terreni sciolti o rocce così frantumate da avere un comportamento ad essi assimilabili. Le frese, il cui problema principale consiste nella frantumazione della roccia, si possono a loro volta suddividere in frese ad attacco puntuale o ad attacco integrale. Le prime sono delle macchine abbastanza lente ma versatili, poco ingombranti e che permettono lo scavo di sezioni di qualsiasi forma e dimensione entro i 30 metri quadrati. Le seconde, caratterizzate da una testa rotante di diametro pari a quello della galleria, sono invece poco versatili e necessitano di un buon grado di stabilità dell'ammasso roccioso per consentirne l'avanzamento. Se l'ammasso risulta essere di scarsa stabilità, entrano invece in gioco gli scudi, che possono essere classificati ulteriormente in aperti o chiusi. Gli scudi aperti, semi-meccanizzati o meccanizzati, sono simili a delle frese collocate all'interno di un grosso cilindro la cui funzione è quella di proteggere lo scavo da possibili distacchi localizzati. Gli scudi chiusi, detti anche a pressione, sono costituiti anch'essi da una camicia esterna sulla cui parte anteriore è collocato il

sistema di scavo a fronte chiuso, diverso a seconda del tipo di scudo e della pressione che esercitano per mantenere la stabilità (a pressione meccanica, d'aria, di terra - Figura 19, di fanghi), che non permette alcuna comunicazione tra il fronte di scavo e l'interno della galleria.

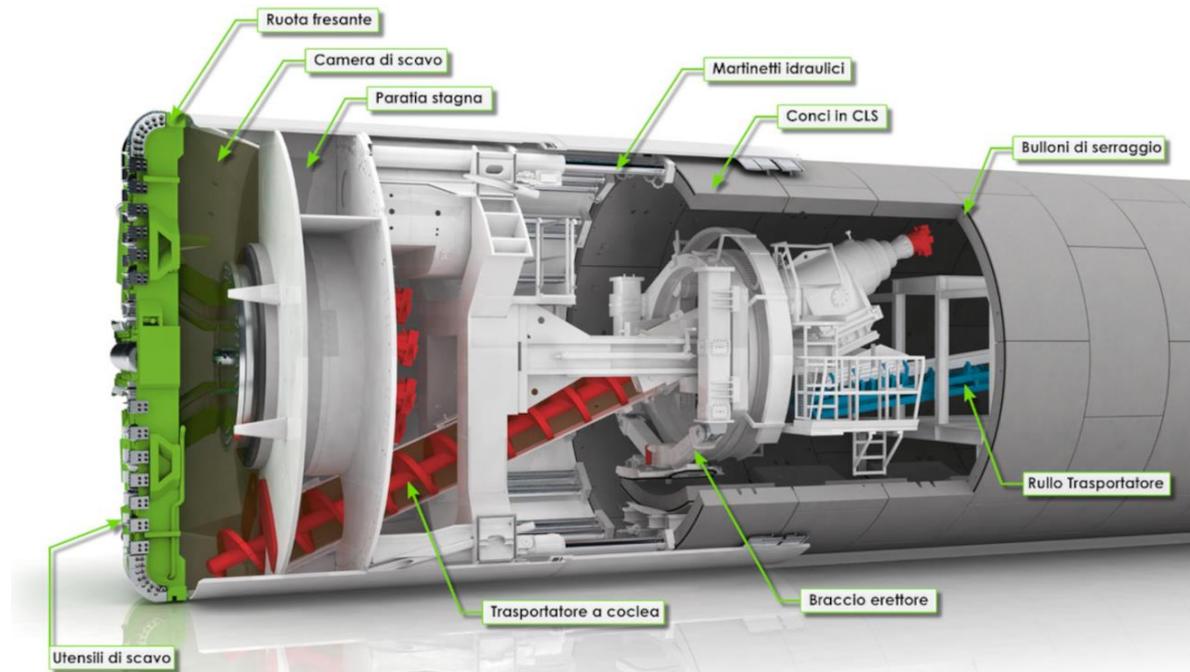


Figura 19 - TBM a pressione di terra (EPB Earth Pressure Balance). Fonte: <https://www.ifrfirenze.it/>

5. I problemi riscontrabili in galleria

La progettazione e la costruzione delle gallerie sono attività estremamente complesse e, nonostante i numerosi sviluppi che sono stati effettuati in quest'ambito negli ultimi decenni, rimangono ancora dei problemi tutt'ora aperti.

Il più importante, che si manifesta in particolare nelle gallerie lunghe soggette ad elevate coperture, è quello dovuto alla difficile possibilità di previsione dettagliata delle caratteristiche geologiche e geomeccaniche del terreno, che si verifica nonostante l'innovazione dei metodi di esplorazione ed indagine ed il miglioramento delle loro prestazioni. A tal proposito, vista l'incidenza economica sul costo di realizzazione dell'opera derivante dalla precisione ed affidabilità della previsione geologica e geotecnica, lo studio approfondito del sito e delle problematiche riscontrabili sono il primo fondamentale passo da eseguire in sede progettuale, così da poter definire i tratti critici e prevederne l'estensione.

La seconda tipologia di problematiche che si possono incontrare sono quelle che si verificano durante la realizzazione vera e propria dell'opera: tali tematiche sono particolarmente importanti sia per i fattori di rischio per i lavoratori, maggiori rispetto ad un "normale" luogo di lavoro a causa delle caratteristiche dell'ambiente, sia per la vita utile della galleria, visto il sostanziale impatto che eventuali errori costruttivi possono avere sulla sua durabilità.

Infine, un'efficace ed organica gestione di un tunnel non può prescindere dalla messa in opera di un piano di controllo e monitoraggio dell'opera che tenga conto delle problematiche precedentemente accennate ed oggetto dei seguenti sottoparagrafi: la "buona regola d'arte" vorrebbe che fosse creata una struttura di controlli atta a rilevare l'innescio di meccanismi o fenomeni di degrado e che fornisca la valutazione e la proiezione dell'evoluzione dei fenomeni stessi, così da mantenere adeguate le performances dell'opera stessa (Figura 20).

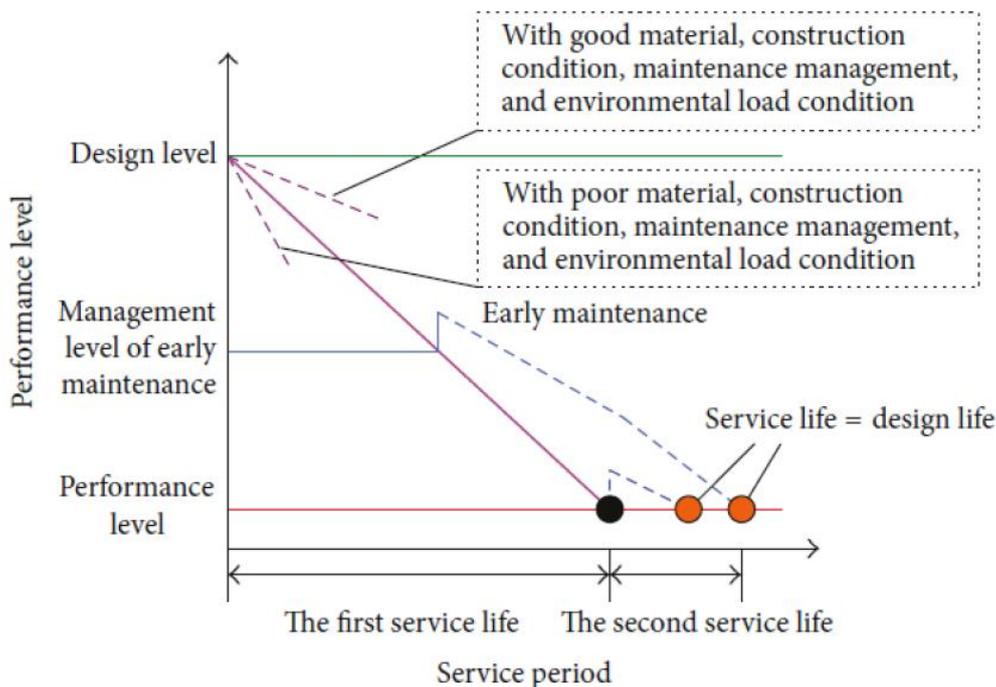


Figura 20 – Caratteristiche di deterioramento nel tempo della struttura. Fonte: Riccardo Spotti, *La vulnerabilità delle gallerie esistenti in calcestruzzo armato*, Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021

Proprio con il Piano di Sorveglianza oggetto della presente Tesi di Laurea, con questo fine si introduce un nuovo approccio per le attività di sorveglianza e gli interventi di manutenzione per le gallerie della rete stradale nazionale e delle autostrade.

5.1. I problemi durante la progettazione

Una galleria può essere scavata in terreni sciolti o in materiali lapidei e, a seconda della litologia, della giacitura delle rocce e del loro stato di fratturazione, può incontrare problematiche molto differenziate. I terreni sciolti, a causa delle scarse caratteristiche di resistenza e della presenza d'acqua, costituiscono le situazioni più sfavorevoli: se si tratta di terreni coesivi, rocce rigonfianti, spingenti o sottoposte ad elevati carichi litostatici, è possibile che si riscontrino fenomeni di convergenza del cavo e deformazioni di tipo duttile in corrispondenza del fronte di scavo. Invece, se lo scavo interessa mezzi rocciosi, le problematiche dipendono principalmente dal grado di fratturazione e dalle giaciture nelle rocce. Le gallerie possono infatti incontrare diverse giaciture di strati che, tendendo ad interferire con il cavo, influenzano le spinte orientate sulle pareti e sulla

calotta della galleria. Per quanto riguarda l'assetto tettonico invece, si possono incontrare pieghe, le quali ospitano tensioni residue di varia natura che a profondità elevate possono causare il cosiddetto "colpo di montagna", le faglie, caratterizzate da condizioni di autoportanza scarse o nulle con circolazione di acqua e gas, e i sovrascorrimenti, in cui le problematiche sono simili a quelle delle faglie.

Dal punto di vista geomorfologico si possono verificare problematiche diverse a seconda che si faccia riferimento a gallerie profonde, superficiali o parietali. Nel primo caso, si è in presenza di convergenze elevate con fenomeni di plasticizzazione, bruschi detensionamenti con possibile violenta proiezione di materiale in galleria (colpo di montagna) ed elevate temperature. Nel caso di gallerie superficiali o parietali, invece, si presentano problemi legati alla rilevante alterazione superficiale della roccia, resi più gravi dalla circolazione idrica che si può instaurare. In alcune zone, infatti, tali gallerie hanno la funzione di un dreno che convoglia le acque delle falde superficiali, danneggiando la stabilità e le operazioni di scavo; queste zone, dette attive, sono in corrispondenza delle zone di frattura, dei depositi detritici e delle morene.

5.2. I problemi durante la costruzione

La realizzazione di un'opera sotterranea è collegata ad una serie di problemi tecnici e, quello più rilevante, riguarda gli eventuali errori costruttivi che si possono verificare durante la costruzione della galleria. L'importanza di questo problema deriva dal fatto che può avere inesorabili conseguenze sulla durabilità dell'opera: questo aspetto, infatti, può avere come origine le carenze presenti nelle previsioni di progetto (sottostimando le sezioni tipo di avanzamento, ponendo rivestimenti definitivi con spessori ridotti, ecc.), l'errata o la scarsa qualità dei materiali applicati nel corso dell'opera, la posa impropria in opera degli elementi o le carenze di controllo in fase di esecuzione. Il degrado più o meno rapido dello stato di conservazione di un tunnel può quindi essere correlato ai seguenti elementi:

- **Qualità dei materiali:** la costruzione di un tunnel richiede l'utilizzo di materiali molto diversi tra loro che devono rispettare

determinate caratteristiche in base all'ambiente in cui devono essere posizionati. L'uso di materiali con una qualità inferiore a quella richiesta dal progetto, quali calcestruzzi, acciai, impermeabilizzanti o rivestimenti di prima fase, può portare ad una serie di problemi durante la fase di esercizio della galleria. Al giorno d'oggi, questa non è ritenuta una delle cause maggiori dei problemi che si verificano in un tunnel in quanto i controlli sui materiali svolti in accordo alla normativa vigente (NTC 2018, Capitolo 11) durante la costruzione sono piuttosto frequenti e rigidi;

- **Carpenterie errate:** questo è uno dei principali problemi riguardanti le gallerie costruite mediante il metodo tradizionale.



Figura 21 – Fessura orizzontale e vuoto superficiale nel rivestimento presenti nella canna di discesa della galleria Prapontin – Monitoraggio approfondito annuale del 25.05.2020. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Tale sistema, infatti, prevede che venga prima realizzato lo scavo mediante mezzi meccanici e/o esplosivi e, in un secondo momento, venga gettato il rivestimento definitivo, con possibilità

che gli allineamenti principali dello scavo e del cassero siano leggermente traslati tra di loro. Nel peggiore dei casi, questo può provocare la determinazione indesiderata di spessori ridotti nel rivestimento definitivo, i quali sono una delle principali cause che portano alla formazione di fessurazioni nei rivestimenti (Figura 21), ovvero una riduzione della funzionalità strutturale e/o architettonica del rivestimento.

Un ulteriore problema provocato dai sottospessori presenti nella volta della galleria riguarda l'interferenza con gli impianti: nel caso meno grave, è possibile che, quando si predispone la posa di una canalina per il contenimento degli impianti, venga perforata anche l'impermeabilizzazione ma, se si tratta dell'installazione di ventilatori, la situazione è peggiore poiché si sta ancorando un elevato carico puntuale al materiale presente dietro il rivestimento, che può avere caratteristiche scadenti.

- **Errata posa dei materiali:** per i casi in esame questa problematica si verifica in particolare in due situazioni, ovvero durante la posa dell'impermeabilizzante e durante il getto del calcestruzzo:
 1. **L'impermeabilizzazione** risulta essere uno degli elementi più importanti per assicurare la durabilità dell'opera. Tuttavia, durante la messa in opera del telo, questo può essere facilmente perforato, lacerato o posizionato in maniera errata, ad esempio non effettuando le saldature delle estremità degli elementi contigui in modo corretto. Questa è una delle maggiori cause che portano ad avere venute d'acqua in galleria, causando, nel lungo termine, danni locali importanti (Figura 22).



Figura 22 – Infiltrazioni d'acqua e concrezioni presenti nella canna di discesa della galleria Prapontin – Monitoraggio approfondito annuale del 25.05.2020. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

2. **Il getto del calcestruzzo**, invece, se non viene effettuato nel giusto modo può portare a problemi strutturali del rivestimento definitivo (Figura 23). I principali errori che vengono fatti possono riguardare le riprese del getto effettuate con tempi di attesa eccessivi, errori nella gestione del rapporto acqua/cemento in cantiere o errori nella vibrazione del cassero che possono portare alla separazione o segregazione dei componenti creando vespai o nidi di ghiaia.



Figura 23 – Deterioramento del giunto in calcestruzzo presente nella canna di discesa della galleria Prapontin – Monitoraggio approfondito annuale del 25.05.2020. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

5.3. I problemi durante il mantenimento

La valutazione dell'integrità strutturale è un aspetto chiave per mantenere le prestazioni di una galleria durante la sua vita di servizio. L'ambiente sotterraneo in cui i tunnel vengono costruiti è infatti estremamente complesso e variabile e presenta numerose criticità: la struttura di una galleria è quindi soggetta ad azioni meccaniche, fisiche e chimiche, la cui valutazione presenta un alto grado di incertezza, che possono causare meccanismi di degrado strutturale e la generazione di difetti fino a compromettere la funzionalità della struttura stessa. Di conseguenza, la creazione di una struttura di controlli e la manutenzione delle infrastrutture esistenti sono alcune delle questioni più importanti per il mercato delle costruzioni, soprattutto negli ultimi anni. È quindi necessario seguire un approccio metodologico da applicare per definire lo stato di conservazione delle strutture sotterranee, per valutare il livello degli eventuali danneggiamenti presenti e per scegliere le soluzioni più adeguate al ripristino, il tutto considerando che, in molti casi, tali attività andranno svolte con le gallerie in servizio. Proprio con questo scopo, negli anni sono state emanate una serie di circolari, decreti e linee guida, descritte nella *Parte B* di questo documento, fino ad arrivare all'oggetto della presente Tesi di Laurea, ovvero la redazione di un Piano di Sorveglianza per ciascuna galleria.



PARTE

B

Dalle prime normative sulla sicurezza delle gallerie ad oggi

Questa Parte è dedicata all'evoluzione delle norme inerenti alla valutazione della sicurezza ed al monitoraggio delle opere d'arte esistenti lungo la rete stradale italiana. In particolare, si fa riferimento ai tragici fatti che hanno portato alla svolta legislativa avvenuta negli ultimi anni, arrivando così alla circolare oggetto del presente documento.

6. L'evoluzione della normativa

Aumentare la sicurezza delle gallerie stradali e autostradali e migliorarne l'efficienza: questo è l'obiettivo della circolare firmata il 9 aprile 2021 dal Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS), Enrico Giovannini, la quale introduce un nuovo approccio per le attività di sorveglianza e gli interventi di manutenzione della rete, prevedendo lo sviluppo di un Piano di Sorveglianza per ciascuna galleria in base alle sue caratteristiche fisiche e tecniche. Prima di parlare del 2021, però, è necessario tornare indietro di circa cinquant'anni, ovvero quando si è iniziato a porre maggiore attenzione nei riguardi della stabilità delle strutture e del controllo dello stato di conservazione delle opere infrastrutturali stradali.

6.1. Le prime regolamentazioni

Nel gennaio del 1967, infatti, il crollo delle due arcate centrali del ponte di Ariccia (Figura 24) portò a prendere in considerazione la necessità di organizzare in modo più efficiente il controllo periodico delle opere stesse, dando il via ad una produzione legislativa.



Figura 24 – Crollo del ponte di Ariccia nel 1967. Fonte: <https://www.castellinotizie.it/>

Venne così redatta la Circolare Min. LL.PP. 19 luglio 1967 n. 6736/61A1, la quale prevedeva controlli periodici delle opere stradali, quali ponti o gallerie, inerenti alle condizioni di stabilità delle varie strutture, in particolare quelle portanti, ed il controllo dello stato di conservazione ai fini del mantenimento in efficienza delle stesse e delle altre parti accessorie.

Tale circolare quindi, "intende mettere a fuoco il problema della sorveglianza assidua, agile, sistematica del patrimonio di opere d'arte stradali, ai fini essenziali della pubblica incolumità, senza escludere gli aspetti economici della buona conservazione di tale patrimonio [...]. La vigile ed intelligente sorveglianza consentirà, così, di prevenire danni, o maggiori dissesti, mediante la tempestiva adozione di provvedimenti adeguati. In ogni caso consentirà di scoprire in tempo segni premonitori di eventuali cedimenti, o lesioni, crolli incipienti e quindi permetterà mediante pronti interventi, allarmi, sbarramenti, provvedimenti limitativi e cautelativi, ecc. di scongiurare eventi drammatici e vere e proprie catastrofi". In particolare, è previsto che:

1. Il personale addetto alla manutenzione, ispezioni, durante la sua normale attività quotidiana, i manufatti e le opere d'arte mediante **un esame di superficie** delle strutture visibili;
2. I capireparto, i geometri addetti alla zona, i tecnici di tronco o capizona, effettuino, almeno una volta ogni trimestre, **un'ispezione** a tutti i manufatti di loro pertinenza, così da accertare lo stato di consistenza e di conservazione delle strutture ed eventuali dissesti;
3. Venga effettuato **un controllo straordinario** ogni qualvolta un sintomo, una notizia o un fatto faccia pensare che qualcosa non sia come dovrebbe;
4. Gli ingegneri di zona o di tronco effettuino, almeno una volta all'anno, **un esame generale e completo** dei manufatti più importanti, anche mediante saggi ed ispezioni delle parti non visibili ricadenti a quota inferiore a quella del terreno.

¹ Fonte: Circolare Min. LL.PP. 19 luglio 1967 n. 6736/61A1

La circolare, nonostante si riferisca come indirizzo prevalente ai ponti stradali, risulta applicabile a tutte le opere d'arte principali e, a valle dell'emanazione della Circolare MIMS n. 152 del 9 aprile 2021 (di cui si parlerà in seguito), rimane tuttora di riferimento per i tratti sui quali non sono stati eseguiti interventi di ripristino e/o consolidamento e per i quali non viene prodotto il Piano di Sorveglianza di cui alla presente Tesi.

Analizzando i decenni successivi, è necessario effettuare una distinzione tra la normativa riguardante i ponti e quella riguardante le gallerie: se per i primi furono emanate ulteriori due circolari negli anni '80 e '90, le gallerie furono invece caratterizzate, sotto il punto di vista della sicurezza, da un lungo periodo di silenzio; solamente con il D.P.R. n. 207/2010, emanato per dare attuazione al D. Lgs. n. 163/2006 sui contratti pubblici, si torna a definire determinati obblighi in materia di manutenzione e sorveglianza. L'Articolo 38 di tale Decreto, infatti, disciplina lo scopo e i contenuti del Piano di Manutenzione dell'Opera e delle sue parti, ovvero "il documento complementare al progetto esecutivo che prevede, pianifica e programma, tenendo conto degli elaborati progettuali esecutivi effettivamente realizzati, l'attività di manutenzione dell'intervento al fine di mantenerne nel tempo la funzionalità, le caratteristiche di qualità, l'efficienza ed il valore economico²". Tale documento deve essere redatto dal progettista, e validato o integrato dal Direttore dei Lavori, in tutti i casi in cui l'attività di sorveglianza porti all'esecuzione di interventi di consolidamento e deve contenere tutte le informazioni necessarie per una corretta manutenzione e gestione di tutte le parti dell'opera.

Se per i ponti, qualche anno più tardi, si torna a parlare di valutazione della sicurezza grazie al D.M. del 14/01/2008, "Norme Tecniche per le Costruzioni", all'interno delle quali è presente un breve sotto-capitolo dedicato a tali opere, le gallerie invece continuano ad essere prese meno in considerazione fino ai giorni nostri.

² Fonte: D.P.R. n. 207/2010 Art. 38

6.2. La svolta

Com'era già successo nel '67, a seguito di due tragedie è sorta la necessità di dare avvio ad una svolta culturale che veda finalmente l'adozione di un vero piano nazionale di manutenzione dell'edificato e di controllo del territorio. Solo dopo il crollo del viadotto Polcevera (denominato dai mass media come ponte Morandi), avvenuto il 14 agosto 2018, e della volta della galleria Bertè, il 30 dicembre 2019, sono infatti iniziate alcune riflessioni e alcune proposte concrete per garantire la sicurezza, dapprima dei ponti e poi delle gallerie, mediante una manutenzione programmata delle reti infrastrutturali.

6.2.1. Il viadotto Polcevera

Il viadotto Polcevera, noto anche come ponte Morandi o ponte delle Condotte (Figura 25), è stato un ponte autostradale, facente parte del tracciato dell'Autostrada A10, che attraversava il torrente Polcevera e i quartieri di Sampierdarena e Cornigliano, nella città di Genova, rappresentando un tassello strategico per il collegamento stradale fra l'Italia settentrionale ed il sud della Francia.



Figura 25 – Ponte Morandi nel 2010. Fonte: <https://it.wikipedia.org/>

Progettato dall'ingegnere Riccardo Morandi e inaugurato dopo 4 anni di lavori nel settembre 1967, la realizzazione del viadotto rappresentò un

compito alquanto arduo data la quasi totale occupazione del suolo: il problema fu risolto con una struttura strallata a due campate principali, sorrette da tre alti piloni e tiranti in calcestruzzo armato, a cui seguivano verso ovest ulteriori campate minori tradizionali. Lungo 1 182 metri e con un'altezza del piano stradale di 45 metri, fu definito "un'opera ardita e immensa" riferendosi alla campata lunga 210 metri, la più estesa d'Europa e la seconda del mondo.

Nell'arco di alcuni anni, però, il ponte iniziò a mostrare i primi problemi, palesando in particolare un veloce e grave degrado dei materiali a causa della brezza marina e dei fumi corrosivi delle vicine acciaierie, come evidenziato alla fine degli anni Settanta da Morandi stesso. Relativamente agli aspetti statici, si manifestò anche un comportamento strutturale diverso da quello previsto, dovuto alle conoscenze poco approfondite sugli effetti della viscosità nel calcestruzzo.



Figura 26 – Il crollo del Ponte Morandi avvenuto il 14/08/2018. Fonte: <https://www.ilfattoquotidiano.it/>

Infine, con l'avanzare degli anni, si verificò un'accelerazione del degrado della struttura a causa del traffico notevolmente maggiore rispetto a quello progettato che, insieme agli altri fattori menzionati e ai mancati interventi di manutenzione, portò al crollo del viadotto: il 14 agosto 2018, la sezione del ponte sovrastante la zona fluviale e industriale di Sampierdarena collassò improvvisamente insieme al pilone di sostegno

numero 9 (Figura 26), provocando 43 vittime tra gli automobilisti che transitavano e gli operai presenti nell'area sottostante.

Il crollo sollevò una serie di dubbi sulla sicurezza di diversi altri ponti e viadotti in Italia: molte delle infrastrutture viarie sono state costruite negli anni '60 e '70 e si riferiscono quindi a normative tecniche non adeguate agli utilizzi e ai carichi di esercizio attuali, senza contare che molte di esse sono anche carenti dal punto di vista della sicurezza geologica e sismica, visto che questi non erano temi trattati dalle allora vigenti normative. Per evitare che si ripetano tragedie simili è quindi indispensabile attuare una politica, finalizzata alla sicurezza, alla pubblica incolumità dei cittadini e ad un risparmio economico, basata su un piano straordinario di manutenzione (normato con la legge quadro sui lavori pubblici dell'11 febbraio 1994 n. 109 e successive discipline) e messa in sicurezza delle opere esistenti e del territorio, obiettivo richiamato dopo ogni tragedia ma subito dopo destinato al dimenticatoio.

Con questo proposito, il D.M. 109/2018 (Decreto Genova), ha disposto l'adozione di apposite Linee Guida per assicurare l'omogeneità della classificazione e gestione del rischio, della valutazione della sicurezza e del monitoraggio di ponti, viadotti, cavalcavia e opere similari esistenti. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP) ha approvato, con parere n. 88/2019 nella seduta del 17/04/2020, le "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti". Con il Decreto del Ministero delle Infrastrutture n. 578 del 17/12/2020 è stata disposta, infine, l'adozione delle Linee Guida in via sperimentale per un periodo non superiore a 24 mesi su infrastrutture stradali e autostradali e, all'esito di tale sperimentazione, esse potranno fornire uno strumento avanzato, univoco ed uniforme per tutti i gestori sul territorio nazionale che, superando il concetto del semplice censimento dei ponti esistenti, mediante un approccio generale, multilivello, multicriterio e multiobiettivo, consentirà la determinazione di una "classe di attenzione" per la gestione del rischio e la verifica di sicurezza delle infrastrutture.

6.2.2. La galleria Bertè

Il secondo disastro che ha aperto un nuovo filone di indagini sulle manutenzioni autostradali, dopo quelli innescati dal crollo del ponte Morandi, è stato il collasso della volta della galleria Bertè, sulla A26 in direzione Genova (Figura 27).

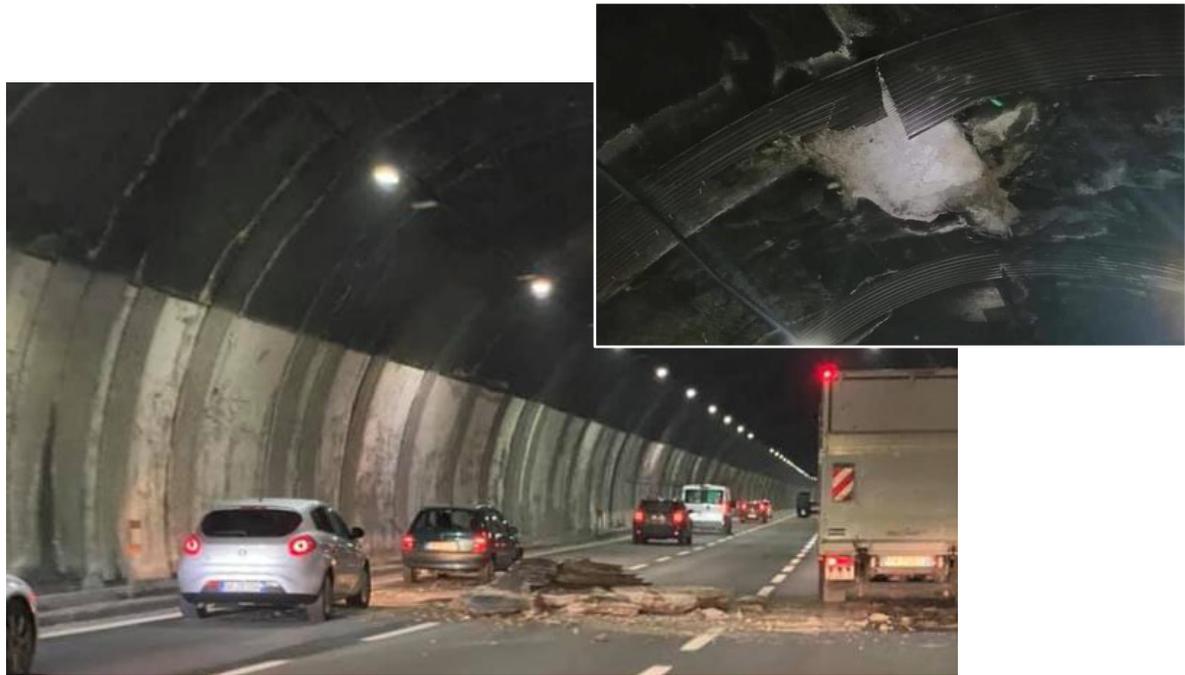


Figura 27 – Crollo della volta della galleria Bertè avvenuto il 30/12/19. Fonte: <https://www.genova24.it/>

Il 30 dicembre 2019, infatti, si sfiorò la tragedia all'interno della galleria ligure in quanto, a causa di gravissimi ammaloramenti dovuti a inadeguati monitoraggi, due tonnellate di detriti (comprendenti onduline, pezzi di cemento e calcinacci) si staccarono dalla volta, fortunatamente senza colpire nessun automobilista. Conseguentemente a quell'episodio, scaturirono le ispezioni dei Tecnici del Ministero che misero in luce la grave situazione manutentiva di centinaia di opere, portando, come era avvenuto per i ponti, all'emanazione di nuove linee di indirizzo, manuali e standard per la valutazione e classificazione delle gallerie.

A seguito di un periodo di applicazione pilota sulla rete Aspi (Autostrade per l'Italia S.p.A.) in Liguria, venne quindi introdotto il "Manuale di Ispezione Gallerie" e relativo "Nuovo Catalogo Difetti" che, in coerenza con le Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici dell'aprile

2020, si pone l'obiettivo di esplorare i livelli di degrado conservativo delle strutture e il loro grado di robustezza e resilienza rispetto a tutto lo spettro di sollecitazioni previste dalle normative vigenti, definendone la classe di attenzione come valutazione del rischio e le priorità di intervento. Emesso nel maggio del 2020 dalla Direzione Generale per la Vigilanza Sulle Concessionarie Autostradali (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti MIT), si basa principalmente sugli studi effettuati nel Traforo del Monte Bianco dall'organo ministeriale francese Centre D'Etudes des Tunnels (CETU) e fornisce le indicazioni necessarie a correlare ogni difetto alla sua potenziale causa scatenante, formulando inoltre ipotesi di diagnosi e proposte di rimedio.

Questo organismo francese consiste in un servizio tecnico centrale del Ministero dell'Ecologia, dell'Energia, dello Sviluppo Sostenibile e della Pianificazione Regionale (MEEDDAT), che si occupa delle tecniche e dei metodi relativi alla progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e messa in sicurezza delle gallerie stradali. Il CETU nel 2015 ha emanato una guida strutturata, "Road Tunnel Civil Engineering Inspection Guide", da utilizzare come riferimento per le ispezioni delle gallerie della rete stradale francese non soggette a gestione privata (ma anche impiegata da eventuali altri proprietari di tunnel) e, insieme al sistema di classificazione dei difetti IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art), costituisce ad oggi il più autorevole e completo sistema di valutazione applicabile in ambito europeo.

Proprio sulla base di queste Linee Guida francesi, il MIT, con il parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ha annunciato l'arrivo di nuove Linee Guida (non ancora approvate ma valutate positivamente durante l'Assemblea Generale del CSLPP del 3 febbraio 2022) per assicurare l'omogeneità della classificazione e gestione del rischio, della valutazione della sicurezza e del monitoraggio dei viadotti e delle gallerie esistenti lungo tutta la rete stradale e autostradale. La predisposizione di tali Linee Guida è prevista dall'art. 49 del Decreto Legge 16 luglio 2020 n. 76, convertito con legge 11 settembre 2020 n. 120 (Decreto Semplificazione), approvata dal Consiglio dei Ministri su proposta della Ministra delle Infrastrutture e dei Trasporti, Paola de Micheli, per definire un quadro di

regole tecniche certe e valide per tutti i gestori sull'intero territorio nazionale. Inoltre, attraverso la Circolare integrativa del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti prot. 269 del 07/07/2020, è stata introdotta la possibilità di svolgere indagini sullo stato della superficie della volta in calcestruzzo delle gallerie mediante metodi innovativi, favorendo così l'accelerazione del piano di verifiche in corso.

6.3. L'ultimo aggiornamento

In seguito a questa breve descrizione dell'evoluzione delle normative riguardanti la stabilità delle strutture e il controllo dello stato di conservazione delle opere infrastrutturali stradali, si ritorna quindi ai giorni nostri e, in particolare, all'argomento della presente Tesi di Laurea: l'ultima prescrizione effettuata dal Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, Enrico Giovannini, riguarda la nuova Circolare integrativa prot. 152 del 09/04/2021, la quale aggiorna il quadro tecnico-regolatorio definito dalla previgente normativa sulla materia, risalente al luglio del 1967.

Il provvedimento prevede che il gestore autostradale e l'Anas sviluppino un Piano di Sorveglianza per ciascuna galleria in base alle sue caratteristiche fisiche e tecniche. In particolare, conferma l'uso di modalità innovative e tecnologie avanzate, quali sistemi georadar o scanner, per le verifiche sullo stato delle opere e sulla loro sicurezza, come definito nella circolare del 07/07/2020. Tenendo conto del grado di obsolescenza dei diversi elementi strutturali, all'interno di tale piano devono confluire tutti i dati tecnici della galleria e devono essere riportate le modalità dei controlli, gli interventi programmati e quelli già eseguiti. La circolare, quindi, estende alle opere già esistenti gli obblighi ai quali ottemperare in base ai criteri già delineati dal D.P.R. n. 207/2010 menzionato precedentemente.

Per la stesura di tale documento, il 10 aprile 2021 sono state pubblicate le "Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza", a firma del dott. Felice Morisco e dell'ing. Placido Migliorino del MIMS, con riferimento a quanto previsto dalla circolare appena menzionata. Le Linee Guida, di cui si parlerà in modo più approfondito successivamente, sono state

redatte dalle strutture tecniche della Direzione Generale per la Vigilanza sulle Concessionarie Autostradali del MIMS, sulla base dell'esperienza maturata successivamente all'applicazione del citato Manuale di Ispezione delle Gallerie, e sono state sottoposte alla valutazione del Politecnico di Torino che ne ha effettuato l'asseverazione (Prof. Ing. Daniele Peila e Prof. Ing. Bernardino Chiaia).



PARTE

C

**Le nuove soluzioni
finalizzate ad una
maggiore sicurezza
in galleria**

Questa Parte si divide in due capitoli basati sulle ultime direttive di cui alla parte precedente. Il primo riguarda l'analisi di una galleria, partendo dagli strumenti e le tecniche di indagine utilizzati per il monitoraggio fino ad arrivare alla sua classificazione. Il secondo, invece, ha come argomento principe il Piano di Sorveglianza e le Linee Guida corrispondenti.

7. L'assessment delle gallerie

La maggior parte delle gallerie presenti nella rete italiana sono state costruite durante il boom economico del dopoguerra, quando ebbe luogo una rapida espansione della rete di trasporto. In quegli anni, le soluzioni progettuali per la costruzione delle gallerie erano principalmente finalizzate a superare le difficoltà di realizzazione degli scavi con le tecnologie allora disponibili, senza preoccuparsi dei problemi di manutenzione nel lungo termine.

Tuttavia, poiché nella maggior parte dei casi le gallerie italiane hanno attualmente superato i 50 anni di vita utile, queste necessitano di controlli sempre più frequenti al fine di verificare la funzionalità e la durabilità della struttura nel tempo: con questo scopo la circolare del 09/04/2021 inaugura un vero e proprio cambio di passo per quel che riguarda le modalità di indagine ed ispezione, che consentono l'aggiornamento del rilievo dei rivestimenti definitivi e l'identificazione di eventuali anomalie presenti nelle gallerie. Tali anomalie dovranno poi essere catalogate in base alla tipologia, in relazione al catalogo dei difetti, e alla loro valutazione IQOA, così da poter stabilire la priorità degli interventi di ripristino previsti.

Al medesimo fine puntano le Linee Guida in previsione dal MIT, le quali illustrano una procedura per la gestione delle attività finalizzate alla sicurezza delle gallerie stradali esistenti, al fine di prevenire livelli inadeguati di danno tali da incidere sulla sicurezza dell'opera e, in senso più generale, dell'intera infrastruttura, rendendo accettabile il rischio.

7.1. Gli strumenti e le tecniche di indagine

Per pervenire ad un accurato livello di conoscenza delle gallerie risulta estremamente utile poter disporre della documentazione storica di progetto e/o contabilità, da cui desumere importanti informazioni sulla configurazione geometrica dell'opera, le sue modalità costruttive ed il suo inserimento nel contesto geologico, idrogeologico e geomeccanico. Nonostante sulla base dei dati storici raccolti si possa svolgere un'analisi

qualitativa di rischio della galleria nel suo complesso, è necessario verificare l'attendibilità della documentazione disponibile con alcuni controlli mirati in sito. In particolare, risulta di prioritaria importanza constatare gli effettivi spessori dei rivestimenti, la presenza di zone dotate di armatura e la presenza di centine utilizzate in fase di costruzione per il sostegno e il rivestimento di prima fase.

In conclusione, allo scopo di individuare tutti i difetti di ciascuna galleria e classificarli secondo quanto proposto dalle Linee Guida CETU, come descritto nel paragrafo successivo, le ispezioni generalmente hanno le finalità indicate nella check-list riportata nella tabella alla pagina seguente (Tabella 3), le quali sono correlate alle indagini che vengono adottate per perseguire ciascuno degli obiettivi previsti.

Nei seguenti sottoparagrafi si affronteranno quindi le diverse tecniche e strumentazioni, distruttive e non, utilizzate in galleria per svolgere le indagini necessarie a permettere la stesura di un quadro diagnostico del costruito il più possibile preciso e dettagliato.

Tabella 3 – Check-list degli obiettivi delle ispezioni per la valutazione delle condizioni statiche dei rivestimenti delle gallerie correlate alle indagini corrispondenti. Fonte: PINI ITALIA, SINA, ALPINA, *Assessment gallerie - Messa in sicurezza delle gallerie della rete autostradale del gruppo ASTM (Parte 1)*, Settembre 2020

		TSS (impiego contemporaneo di raggi infrarossi e laser)	Indagine georadar a doppia frequenza (200-600 MHz o 400-900 MHz)	Georadar ad alta frequenza (> 2 MHz)	Microcarotaggio a distribuzione di nucleo con esame endoscopico per tutto lo sviluppo della perforazione	Carotaggi e prove di laboratorio	Prove di pull-out	Prove doortopper e di marinetto piatto	Tomografia sismica
1	Geometria, sagoma interna della galleria	X							
2	Spessori del rivestimento (calotta, reni, piedritti, arco rovescio.)		X						
3	Presenza di eventuali armature in intradosso e valutazione del copriferro		X						
4	Presenza e posizione di centine nel rivestimento di prima fase della galleria		X						
5	Quadro fessurativo del rivestimento della galleria	X							
6	Presenza di infiltrazioni e/o venute d'acqua e zone di umidità	X							
7	Presenza di possibili vuoti a tergo del rivestimento		X						
8	Presenza di discontinuità e/o lesioni all'interno dello spessore del rivestimento		X						
9	Presenza di situazioni di degrado o disomogeneità all'interno dello spessore del rivestimento		X						
10	Analisi dello stato più corticale (primi 20-25 cm a partire dall'intradosso) del rivestimento			X					
11	Quadro deformativo	X							
12	Determinazione e verifica delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo del rivestimento per tutto il suo spessore					X			
13	Determinazione e verifica delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo nella parte corticale d'intradosso del rivestimento						X		
14	Definizione dello stato tensionale del rivestimento definitivo e definizione di un eventuale piano di monitoraggio delle situazioni più critiche							X	
15	Verifica dello stato di consistenza del rivestimento coperto da reti di protezione				X				
16	Verifica dello stato di consistenza del rivestimento coperto da canalette				X				
17	Analisi mediante indagini geofisiche dello stato di detensionamento e di alterazione dell'ammasso presente a tergo del rivestimento								X

7.1.1. Il Tunnel Scanner System

Il Tunnel Scanner System (TSS) è un sistema di rilievo automatico non distruttivo basato sull'impiego contemporaneo di raggi infrarossi e laser, che consente di ottenere simultaneamente un'immagine fotografica e termografica completa del cavo di galleria (geometria del fornice, piattaforma stradale, impianti ed eventuali dotazioni di sicurezza presenti) e di acquisire tutti i dati necessari per il calcolo e la definizione di sezioni trasversali in corrispondenza di una qualsiasi progressiva. L'elemento chiave di questa tecnica d'indagine è la luce laser, che vede la sua nascita grazie ad A. Einstein nel 1917 con la scoperta del fenomeno di amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Il TSS, ideato e progettato specificatamente per rilievi di gallerie ferroviarie e stradali, consiste in un rilevamento continuo, su 360°, della superficie dell'interno del cavo della galleria, contenendo al massimo i disservizi derivanti da un rilievo tradizionale, con la prerogativa di ottenere tre tipologie di dati:

- **Il dato fotografico:** l'elaborazione dei dati, eseguita mediante appositi software, consente di acquisire l'immagine fotografica continua dell'intero cavo di galleria (Figura 28). Dall'analisi di dettaglio delle immagini è possibile interpretare, localizzare e dimensionare i principali ammaloramenti, creando così una mappatura completa del quadro fessurativo del rivestimento (lesioni, distacchi, presenza di sali e/o incrostazioni, venute d'acqua, ecc.) e ricavando in automatico tabelle e grafici di quantificazione, nonché verificare la consistenza degli impianti presenti lungo il fornice;

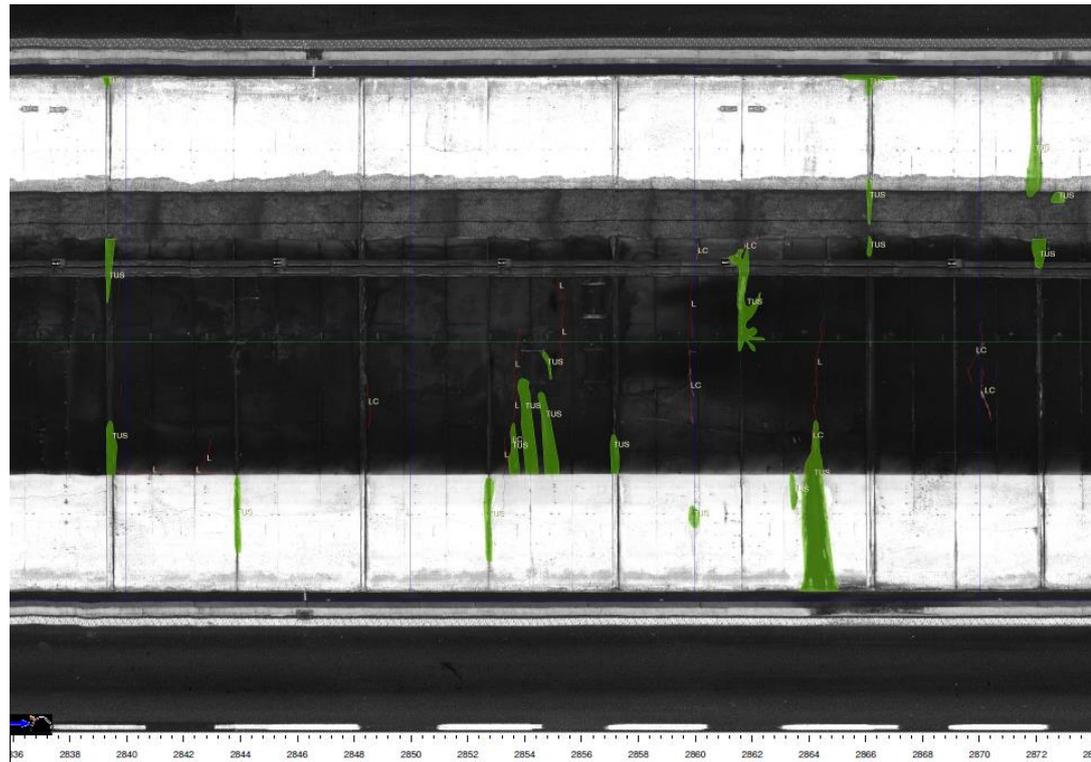
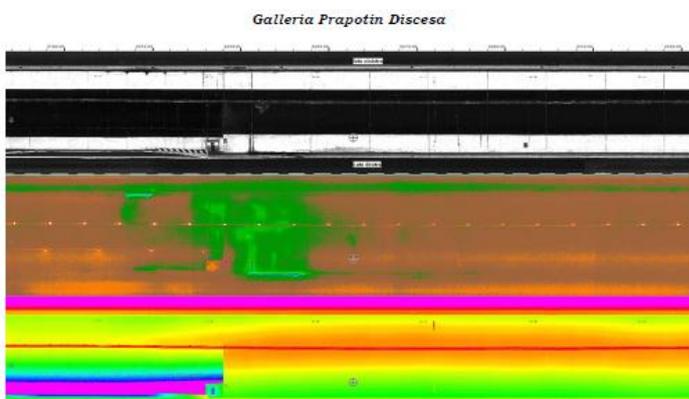


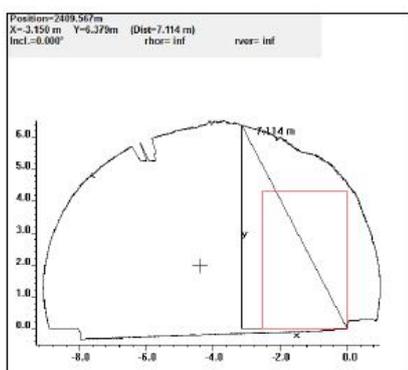
Figura 28 – Restituzione grafica delle risultanze di ispezione con il TSS per una tratta della canna di discesa della galleria Prapontin, anno 2019. Fonte: Elaborati prodotti da SINA SpA

- **Il dato geometrico:** le immagini fotografiche permettono inoltre di visualizzare, ingrandire e stampare profili trasversali in corrispondenza di qualsiasi punto della galleria. Analizzando i risultati del rilievo profilometrico, risulta agevole identificare tutte le tratte in cui l'altezza libera (di gabarit) presenta scostamenti da quella teorica, consentendo allo stesso tempo di relazionare dette difformità con la larghezza della carreggiata e la sua pendenza trasversale;
- **Il dato termografico:** contestualmente ai rilievi fotografici e profilometrici, viene eseguito anche un rilievo termografico tramite una termocamera ad infrarossi, la quale rileva le radiazioni infrarosse emesse dai corpi in misura differente a seconda del loro valore di emissività. Il dato termografico, raffigurato solitamente tramite un'immagine a colori che rappresenta graficamente le differenze della distribuzione termica superficiale, fornisce un

supporto alla visualizzazione dello stato di fatto del rivestimento della galleria (dilavamento, venute d'acqua, ecc.).



Imm. 9
Tronco galleria
Da Progr. 2176,00 a Progr. 2339,00
Note: rilievo fotografico, termografico e profilometrico.



Imm. 10
Sezione Trasversale
Alla Progr.2409,56.
Note: sezione lato marcia con sagoma standard.

Figura 29 – Restituzione grafica delle risultanze di ispezione con il TSS per una tratta della canna di discesa della galleria Prapontin, anno 2019. Fonte: Elaborati prodotti da SINA SpA

L'insieme di tutti i dati costituisce una banca dati aggiornabile nel tempo contenente tutte le anomalie e i servizi installati nelle gallerie, permettendo di verificare l'evoluzione dello stato conservativo dell'opera e collocare nel tempo l'evolversi o l'innescarsi di situazioni particolari.

Come qualsiasi strumentazione, anche il TSS presenta vantaggi e criticità: i benefici derivanti dall'applicazione di tale metodologia consistono principalmente nell'abbattimento dei tempi di acquisizione dei dati e, allo stesso tempo, la possibilità di ottenere un alto livello di precisione dell'indagine, anche in presenza di geometrie complesse. Un ulteriore punto di forza è l'annullamento dell'errore derivante dall'operatore, essendo un processo automatico, che però è seguito da un alto costo dello strumento e della formazione del singolo operatore. Inoltre, risulta

impossibile misurare superfici fuori dal campo visivo dello scanner e quindi rilevare geometrie nascoste o interne, quali fori, fratture o vuoti.

Ulteriori analisi topografiche, come ad esempio il rilievo celerimetrico con la stazione totale, possono essere utilizzate al fine di comprendere meglio l'andamento degli elementi presenti all'interno del cavo della galleria, quali la geometria dei marciapiedi o l'andamento delle tubazioni.

7.1.2. Il georadar

La prospezione georadar (GPR Ground Penetrating Radar) è una metodologia di indagine geofisica che si basa sulla propagazione di onde elettromagnetiche ad elevata frequenza. Il GPR rappresenta un rapido metodo di indagine non invasiva utilizzata in diversi ambiti, quali quello dell'ingegneria civile, della geologia, dell'archeologia o dell'ambiente. In particolare, ai fini del monitoraggio in galleria, risulta di fondamentale importanza per la valutazione dello spessore del rivestimento definitivo, in quanto la presenza di sottospessori generati da problemi di getto durante la costruzione è una delle principali cause che portano alla fessurazione nei rivestimenti. Inoltre, questa tecnica è anche in grado di valutare la compattezza del calcestruzzo, evidenziando la possibile presenza di vuoti a tergo del rivestimento e analizzando così le condizioni del suo strato più corticale, individuare la presenza e l'eventuale posizione della centinatura e delle armature, evidenziare possibili discontinuità, lesioni o presenze di degrado.

Il georadar è un dispositivo caratterizzato da un acquirente e due antenne, una trasmittente ed una ricevente: queste costituiscono l'elemento fondamentale poiché determinano la risoluzione e la massima profondità di penetrazione. L'indagine prevede l'immissione di un breve impulso elettromagnetico sinusoidale nel rivestimento mediante l'uso della prima antenna, la cui frequenza può variare da 400 a 2600 MHz, il quale si propaga nel materiale con una velocità che dipende principalmente dalla costante dielettrica del materiale stesso; esso viene quindi ricevuto dalla seconda antenna posta ad una certa distanza. Attraverso il segnale acquisito lo strumento genera differenti figure 2D, caratterizzate dall'asse delle ascisse, rappresentante la distanza in metri,

e dall'asse delle ordinate, rappresentante il tempo di ascolto del segnale. Durante l'acquisizione in movimento le antenne raccolgono i diversi radiogrammi, in punti diversi lungo la linea di azione, che vengono realizzati associando ad ogni valore di ampiezza dell'onda riflessa un codice RGB o in scala di grigi: il profilo analizzato viene visualizzato andando a collocare i vari radiogrammi in successione (Figura 30).

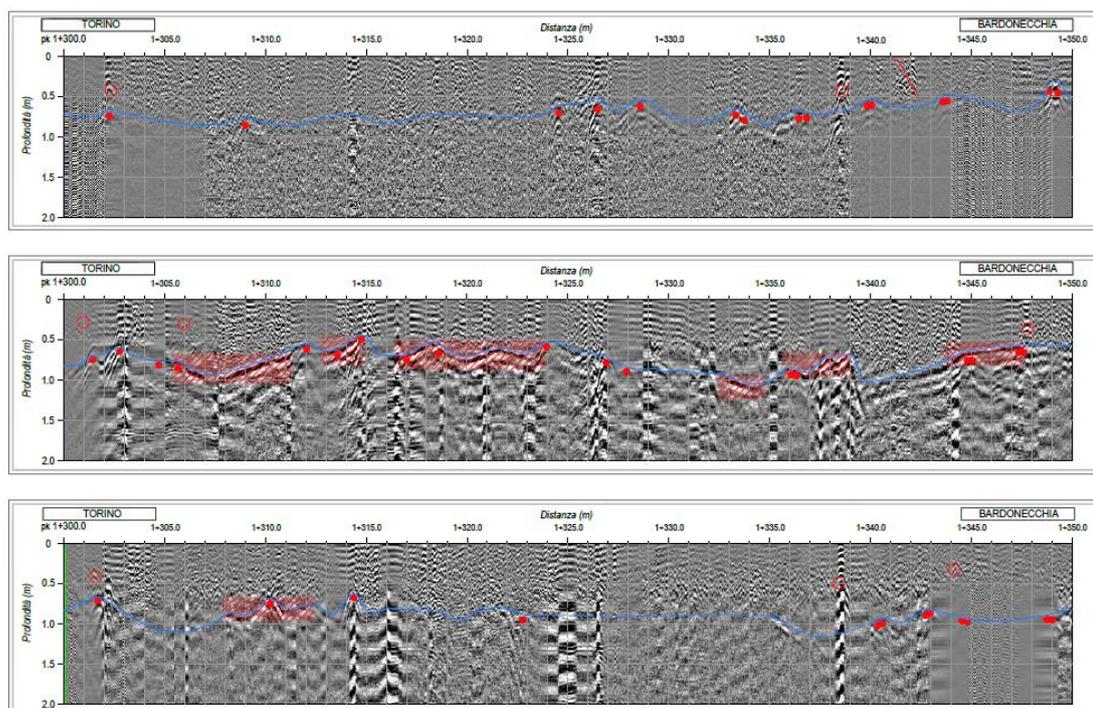


Figura 30 – Restituzione grafica dei risultati dell'indagine georadar per una tratta della canna di salita della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SOCOTEC Italia Srl

Relativamente alla mappatura degli spessori del rivestimento e la presenza di situazioni di degrado all'interno dello stesso, sono previste le seguenti frequenze dell'antenna:

- **400-900 MHz:** spessori standard;
- **200-600 Mhz:** spessori anomali o presenza di significative quantità d'acqua;
- **> 2000 MHz:** analisi dello spettro corticale del rivestimento.

Nel caso siano presenti lamiere, canalette o reti metalliche, invece, l'indagine non può ritenersi efficace poiché si tratta di elementi che pregiudicano l'esito dei risultati ottenibili.

La metodologia indiretta del GPR è particolarmente vantaggiosa in termini di risparmio economico e facilità di esecuzione ma, allo stesso tempo, necessita di essere tarata con i risultati derivanti da altri tipi di indagine simili per poter comprendere meglio le diverse correlazioni. In particolare, questo metodo di analisi non presenta un alto grado di chiarezza circa i materiali che, pur avendo proprietà differenti, si presentano al radar in modo simile. Inoltre, nonostante la conduttività all'interno del calcestruzzo renda tale materiale adatto all'uso del georadar, le condizioni di applicabilità diventano più scarse nel caso sia presente dell'acqua, causa di riflessione e attenuazione del segnale. Ulteriori situazioni non ottimali per l'applicazione del georadar si verificano nel caso di zone disomogenee, lesioni, distacchi, vuoti e cavità. Queste criticità possono essere smorzate attraverso la definizione di un'apposita campagna di taratura dello strumento, ovvero un diverso numero di indagini integrative con lo scopo di costruire una libreria statisticamente significativa in grado di rendere possibili delle correlazioni efficaci dei dati rilevati. Tali tecniche integrative non sono altro che carotaggi e ispezioni videoendoscopiche.

7.1.3. I carotaggi

Al fine di comprendere meglio i fenomeni locali legati alle criticità rilevate nel corso dell'indagine georadar, spesso si ritiene necessario effettuare il prelievo di un significativo numero di campioni (carotaggi), che successivamente potranno essere sottoposti a prove di laboratorio per la caratterizzazione del calcestruzzo dal punto di vista meccanico (UNI EN 12504-1:2009 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Parte 1: Carote – Prelievo, esame e prova di compressione") o ad altre tipologie di prove (Figura 31). Le carote di calcestruzzo, solitamente estratte mediante una carotatrice elettrica, devono avere un diametro D funzione del diametro massimo dell'inerte d ($D \geq 3 d$) e una lunghezza compresa tra D e $2D$. Esse dovranno essere immediatamente identificate con un codice univoco, posizionate in opportune cassette e fotografate, avendo l'accortezza di affiancare al campione una scala metrica di riferimento.



Figura 31 – Carotaggi con rilievo della presenza di cloruri eseguiti nella canna di discesa della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Un'ulteriore tecnica di supporto al georadar può essere quella dei microcarotaggi a distruzione di nucleo, o con prelievo di carote, con esame endoscopico (o videoendoscopico). Tale metodo permette di verificare direttamente le anomalie individuate dalle indagini georadar e di tarare le informazioni restituite da una prima elaborazione di quest'ultime. L'esame endoscopico risulta particolarmente utile nei casi in cui il georadar ha rilevato la presenza di possibili vuoti. Effettuando infatti una fioretatura in corrispondenza delle posizioni selezionate in funzione della restituzione georadar, è possibile introdurre una telecamera per verificare direttamente la presenza o meno di una cavità e valutarne l'effettiva profondità ed estensione, nonché visionare lo stato delle pareti, la consistenza dei materiali e l'eventuale presenza di interventi di consolidamento attuati in passato. Anche nel caso di lesioni e/o discontinuità, questo esame si rivela molto utile in quanto consente di esaminare le superfici distaccate e di quantificare l'entità e la propagazione delle lesioni.

7.1.4. Le prove di laboratorio

Al fine di verificare le caratteristiche chimiche, meccaniche e fisiche dei provini di calcestruzzo prelevati dal rivestimento definitivo della galleria è

necessario effettuare delle prove di laboratorio; le principali si possono riassumere in:

- **Prove di carbonatazione** (UNI 14630:2007): tale prova deve essere effettuata immediatamente dopo il prelievo e permette di rilevare lo stato di conservazione degli elementi strutturali in calcestruzzo attraverso il processo chimico della carbonatazione, il quale prevede che per azione dell'anidride carbonica presente nell'aria si venga a neutralizzare la calce all'interno del calcestruzzo. Conclusa la prova, verrà fornita una scheda con la documentazione fotografica e l'indicazione dello strato carbonato espresso in millimetri, visibile grazie alla colorazione che assume il materiale in corrispondenza dell'abbassamento del pH;
- **Determinazione della resistenza a compressione** (UNI 6131, UNI 6132, UNI EN 12390-1, UNI EN 12390-3, UNI EN 12504-1): i campioni di calcestruzzo prelevati vengono sottoposti ad un'accurata preparazione, che porterà ad avere dei provini di forma cilindrica aventi come rapporto tra le dimensioni $h/d = 1$. Questi, dopo essere stati pesati e misurati, vengono disposti sul piatto della pressa in modo da consentire l'applicazione del carico assiale, che consentirà di determinare la loro resistenza a compressione;
- **Determinazione del modulo di elasticità secante** (UNI 12390-13:2013): tale prova permette di determinare, dopo un certo numero di cicli di carico, il modulo elastico secante a compressione, ovvero il rapporto tra la tensione e la corrispondente deformazione misurata nella direzione della tensione.

Ulteriori prove di laboratorio che possono essere effettuate sono la prova di rottura a trazione di campioni di armatura (UNI EN 10002/1, NTC2018), le analisi chimiche di laboratorio delle acque di percolazione, dei calcestruzzi per la determinazione della resistenza ai cloruri (UNI 8520-22:2017) e per la valutazione della reazione alcali-aggregati (UNI 11530_2014, UNI 11530:2014, UNI 11604:2015).

7.1.5. Le indagini tensionali

Questa tipologia di indagini è utile a valutare se i quadri fessurativi o gli eventuali splaccaggi sono correlati o meno a problemi di natura statica: a tal fine è necessario eseguire delle prove in sito di *doorstopper* o martinetto piatto.

La prova *doorstopper* prevede la misurazione delle deformazioni che si verificano sul fondo di un carotaggio di calcestruzzo a seguito del rilascio delle sollecitazioni ottenute mediante sovracarotaggio al suo contorno. Queste prove generalmente vengono realizzate sia nell'intradosso che nell'estradosso del rivestimento, così da ottenere lo stato di sollecitazione su tutta la sua sezione trasversale, in corrispondenza della calotta e delle reni.

Alternativamente, è possibile utilizzare la prova di martinetto piatto (Figura 32) che però, nonostante siano più semplici da eseguire, permettono la valutazione delle sollecitazioni solo nell'intradosso e nel caso di sollecitazione di compressione (assiale e perpendicolare al piano del taglio). Una variante di tale prova è quella con il martinetto doppio, con cui si produce una compressione monoassiale del calcestruzzo mediante l'utilizzo di due martinetti che ne isolano una porzione.



Figura 32 – Esempio di strumentazione per eseguire la prova di martinetto piatto doppio.
Fonte: <https://www.structuralsurveys.it/>

7.1.6. Le prove di estrazione (*pull-out*)

La prova di estrazione (UNI EN 12504-3:2005) è una prova di tipo non distruttivo che consente la caratterizzazione meccanica della porzione corticale del calcestruzzo costituente il rivestimento e, in particolare, delle zone ricoperte da reti di protezione o da canalette, al fine di avere un'indicazione sull'adeguatezza della resistenza del calcestruzzo superficiale dove risultano immorsati i tasselli di aggancio delle reti. La misura della resistenza del materiale mediante prova di *pull-out* avviene infatti attraverso la misura diretta della forza necessaria ad un martinetto idraulico per estrarre un tassello di acciaio inserito nel calcestruzzo (Figura 33).



Figura 33 – Esempio di strumentazione per eseguire la prova di pull-out per tasselli.
Fonte: <https://www.anchoriv.com/>

7.1.7. Le prove sclerometriche

L'indagine sclerometrica (UNI EN 12504-2) è una prova non distruttiva che consente di individuare la resistenza del calcestruzzo, in strutture già realizzate, con un'approssimazione di circa 15-20% a causa della non omogeneità e non isotropicità del materiale. La lettura con lo sclerometro, leggibile su una scala graduata in funzione della restituzione di energia in

seguito al rimbalzo della massa pesante legata alla molla del percussore, è influenzata dalla superficie del calcestruzzo, dal suo grado di carbonatazione, dalla sua umidità, dal tipo e contenuto di cemento e dal tipo di inerte impiegato.

7.1.8. I rilievi sismici a rifrazione

Un metodo geofisico che può essere applicato all'interno delle gallerie è la sismica a rifrazione, che si basa sulla propagazione di onde sismiche da una sorgente di energia artificiale ad una serie di ricevitori. Tali rilievi vengono impiegati sia in misure di dettaglio (microrifrazione) per la valutazione dello spessore dell'anello di roccia o terreno rilasciato al contorno del cavo per effetto dello scavo, sia in misure a media e grande scala per la valutazione delle caratteristiche medie della roccia indisturbata. Con tali rilievi potrà anche essere possibile l'identificazione di faglie, zone di taglio o tratte particolarmente fratturate e tettonizzate.

7.1.9. Le attrezzature per un'indagine ispettiva

La caratterizzazione della galleria è quasi sempre contraddistinta da una fase esecutiva ispettiva, durante la quale mediante un controllo visivo e sonoro della superficie vengono visionati i due piedritti, le reni e la calotta, al fine di rilevare eventuali fessurazioni, calcificazioni delle lesioni, umidità superficiale, efflorescenze, percolazioni o venute d'acqua, distacchi superficiali, esfoliazioni, rigonfiamenti corticali del calcestruzzo, presenza di vespai, ruggine o ferri a vista. Ciascun ispettore che esegue l'ispezione, solitamente si avvale della seguente attrezzatura: martello, metro a nastro, distanziometro laser, fessurimetro, calibro, lampada manuale, bomboletta spray e apparecchio fotografico.

In particolare, per capire se i fenomeni di fessurazione siano ancora in evoluzione o si siano stabilizzati, è di fondamentale importanza prevedere una campagna di monitoraggio con fessurimetri in grado di rilevare con precisione eventuali movimenti. Solitamente si ricorre all'uso di due tipologie di fessurimetri, quelli elettrici dotati di *datalogger* automatico (UAD) e termometro e quelli meccanici, utilizzati come confronto con le letture automatiche.

7.1.10. Le altre prove non distruttive

Ulteriori prove non distruttive che possono essere realizzate sul rivestimento definitivo della galleria sono le seguenti:

- **Indagini termografiche** (UNI EN 16714, UNI ISO 18434-1) per l'individuazione di zone umide, infiltrazioni, venute d'acqua, ecc.;
- **Prove ultrasoniche** (UNI EN 12504-4) per la verifica dello stato di aggregazione del rivestimento. Queste prove possono essere anche eseguite in combinazione con le battute sclerometriche;
- **Indagini magnetometriche/pacometriche** (BS 1881-204);
- **Prove di corrosione delle barre di armatura** (UNI 10174, ASTM C 876-91).

7.2. La classificazione dei difetti e del rischio

La maggior parte delle gallerie esistenti nel panorama infrastrutturale italiano sono caratterizzate dalla presenza di un rivestimento definitivo in cemento armato che negli anni, inevitabilmente, subisce un processo di degrado. Di conseguenza, l'analisi dei deterioramenti e dei difetti che si manifestano all'interno di una galleria, individuabili mediante delle ispezioni visive eventualmente integrate da controlli strumentali, è di fondamentale importanza al fine di stabilire una diagnosi delle condizioni della struttura ed una programmazione dei controlli e degli interventi da effettuare.

Per la restituzione dello stato di salute di una galleria, si procede quindi definendo il tipo di difetto e la sua valutazione. Relativamente alla tipologia dei difetti, il MIT ha emesso, allegato al "Manuale Ispezioni Gallerie" pubblicato a maggio 2020, un "Nuovo Catalogo dei Difetti" in cui sono catalogati, attraverso appropriate schede identificative, i vari possibili deterioramenti che possono registrarsi nelle strutture. Per quanto riguarda invece la loro valutazione, ci si affida al sistema di classificazione IQOA precedentemente menzionato, che è stato sviluppato e pubblicato del CETU, il quale fornisce anche un proprio catalogo dei difetti per quanto concerne le gallerie con il rivestimento in calcestruzzo.

Per assicurare l'omogeneità della classificazione e gestione del rischio, della valutazione della sicurezza e del monitoraggio delle gallerie esistenti lungo tutta la rete stradale e autostradale, è inoltre in previsione l'approvazione delle già menzionate Linee Guida che forniscono, attraverso un approccio multilivello, gli strumenti per la conoscenza a livello territoriale delle gallerie e per definire le priorità per l'esecuzione delle eventuali operazioni di sorveglianza, monitoraggio, verifica e intervento.

7.2.1. Il catalogo dei difetti e la classificazione IQOA

L'organo francese CETU ha sviluppato e pubblicato, nel 2015, le Linee Guida "Road Tunnel Civil Engineering Inspection Guide", le quali definiscono il significato del monitoraggio strutturale inteso come l'insieme delle ispezioni, controlli e pratiche che rilevano le condizioni attuali e qualunque mutamento da una condizione di riferimento precedente, con lo scopo di definire lo stato di salute dell'intera struttura. Le Linee Guida sono costituite da due volumi: il primo, "Book 1: from disorder to analysis to rating", fornisce le raccomandazioni per stabilire le procedure di osservazione, analisi e classificazione dei deterioramenti che si manifestano nelle varie parti di una galleria mentre il secondo, "Book 2: Catalogue of deteriorations", racchiude sotto forma di catalogo tutti i deterioramenti che possono essere osservati nelle strutture. Questa guida contestualizza le ispezioni, indica le attrezzature e le risorse necessarie per svolgere i controlli con competenza e fornisce definizioni dei deterioramenti più comuni riscontrabili in galleria. Inoltre, presenta anche gli elementi per analizzare i difetti rilevati: individuato un particolare problema, fornisce assistenza per la valutazione dello stato della struttura in quella zona, permettendo all'ispettore di stabilire una priorità tra i deterioramenti, in termini di gravità, e consigliare azioni di monitoraggio, manutenzione o riparazioni da attuare. Infine, la guida propone il metodo di valutazione IQOA per le gallerie, il quale fa parte del processo di valutazione periodica dello stato delle opere di ingegneria civile stabilito dalla "Instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages" (ITSEO).

Il primo passo consiste quindi nel riconoscimento dei deterioramenti che più spesso si osservano durante l'ispezione in galleria (Tabella 4), che sono stati raggruppati e classificati per tema sotto forma di un catalogo, il quale, oltre ad una descrizione dei difetti, fornisce anche le modalità per la loro identificazione e valutazione. Eventuali difetti rilevati sono quindi le conseguenze di un meccanismo di deterioramento che può avere differenti cause:

- Le condizioni geologiche, idrogeologiche e geomeccaniche dell'ammasso terroso/roccioso nel quale è situata la galleria e che insistono sull'estradosso del cavo;
- La costruzione della galleria nel caso di lacune progettuali o nell'impiego o nella natura stessa dei materiali che costituiscono il rivestimento della galleria;
- L'invecchiamento dei materiali impiegati per la costruzione, causati dai vari attacchi chimici a cui è sottoposta la struttura.

A questo riguardo, nella Tabella 5 sono confrontati i deterioramenti con i relativi fattori di influenza sopra menzionati; da essa è possibile osservare che la maggior parte dei difetti ha diverse origini (simbolo +) con un fattore dominante (simbolo ++).

Tabella 4 – Classificazione dei difetti per la valutazione delle condizioni della galleria. Fonte: Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), *Road tunnel civil engineering inspection guide (Book 1)*, 2015

DETERIORAMENTI CAUSATI DALLA PRESENZA DELL'ACQUA	
HY-1	Infiltrazioni e/o venute d'acqua
HY-2	Concrezioni
HY-3	Effetti del gelo
HY-4	Efflorescenze su malta o calcestruzzo
DETERIORAMENTI CAUSATI DAL TERRENO CIRCOSTANTE	
ZI-1	Carsi e cavità
ZI-2	Deterioramenti ai portali di imbocco
ZI-3	Instabilità dei pendii
DETERIORAMENTI DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO IN CALCESTRUZZO	
RB-1	Scheggiatura
RB-2	Rigonfiamento
RB-3	Lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione
RB-4	Lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature
RB-5	Deterioramento del calcestruzzo proiettato
DETERIORAMENTO DEL SISTEMA IMPERMEABILIZZANTE, DRENAGGIO E RACCOLTA DELLE ACQUE SUPERFICIALI	
ED-1	Deterioramento del drenaggio in intradosso
ED-2	Deterioramento del sistema di drenaggio e raccolta delle acque a tergo del rivestimento in calotta
ED-3	Deterioramento del sistema di raccolta delle acque della piattaforma autostradale
ED-4	Deterioramento della membrana impermeabile all'estradosso del rivestimento definitivo
ED-5	Deterioramento delle canalette
ED-6	Rigonfiamento della membrana impermeabilizzante
ED-7	Deterioramento dei rivestimenti in malta
ED-8	Deterioramento dei pannelli isolanti impermeabili
ED-9	Deterioramento dei waterstop costituiti da cordoli idroespansivi
DETERIORAMENTI RELATIVI AGLI ELEMENTI STRUTTURALI E ALLA GEOMETRIA DELLA GALLERIA - FESSURE	
FI-1	Fessure orizzontali
FI-2	Fessure diagonali
FI-3	Fessure verticali
FI-4	Fessure da ritiro
FI-5	Fessure curvilinee
DETERIORAMENTI RELATIVI AGLI ELEMENTI STRUTTURALI E ALLA GEOMETRIA DELLA GALLERIA - DEFORMAZIONI	
DF-1	Abbassamento in chiave, deformazione simmetrica o asimmetrica
DF-2	Imbozzamento localizzato
DF-3	Disassamento dei conci e/o giunti strutturali
DF-4	Deterioramento/rottura dell'arco rovescio
DF-5	Rottura dell'arco
DETERIORAMENTI RELATIVI AGLI ELEMENTI STRUTTURALI E ALLA GEOMETRIA DELLA GALLERIA - DEFORMAZIONI	
MO-1	Fonti di fori di scoppio instabili
MO-2	Presenza di vuoti in prossimità dell'intradosso del rivestimento
MO-3	Vespai, sgretolamenti
MO-4	Deterioramenti dei giunti in calcestruzzo
MO-5	Difetti superficiali nel calcestruzzo, efflorescenze
ALTRI DETERIORAMENTI DEGLI ELEMENTI DI INGEGNERIA CIVILE	
EQ-1	Difetti della carreggiata stradale
EQ-2	Deterioramento di lastre e tamponature
DETERIORAMENTI ASSOCIATI AL FUOCO	
IN-1	Deterioramenti dovuti al fuoco
DETERIORAMENTI ASSOCIATI ALLA SCARSA MANUTENZIONE	
EN-1	Scarsa manutenzione, ripristini ammalorati, canalette ammalorate o inefficienti

Tabella 5 – Fattori di influenza dei diversi difetti e deterioramenti osservati. Fonte: Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), Road tunnel civil engineering inspection guide (Book 1), 2015

		FATTORI DI INFLUENZA							
		SITO			COSTRUZIONE			VITA DELLA STRUTTURA	
		Terreno circostante	Azione dell'acqua	Condizioni ambientali	Progetto	Metodi costruttivi	Natura dei materiali	Esercizio	Monitoraggio e manutenzione
DETERIORAMENTI CAUSATI DALLA PRESENZA DELL'ACQUA									
HY-1	Infiltrazioni e/o venute d'acqua	++	++	+				+	
HY-2	Concrezioni	+	++	+					
HY-3	Effetti del gelo		++	+				++	
HY-4	Efflorescenze su malta o calcestruzzo	+	++					+	
DETERIORAMENTI CAUSATI DAL TERRENO CIRCOSTANTE									
ZI-1	Carsi e cavità	++	+						
ZI-2	Deterioramenti ai portali di imbocco	+	+	+		+			+
ZI-3	Instabilità dei pendii	++	+						
DETERIORAMENTI DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO IN CALCESTRUZZO									
RB-1	Scheggiatura			+		+			++
RB-2	Rigonfiamento		++	+		+	+		
RB-3	Lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione	++				+			
RB-4	Lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature		++		+	+			
RB-5	Deterioramento del calcestruzzo proiettato	+	+			+			
DETERIORAMENTO DEL SISTEMA DI IMPERMEABILIZZAZIONE, DRENAGGIO E RACCOLTA DELLE ACQUE SUPERFICIALI									
ED-1	Deterioramento del drenaggio in intradosso		+	+	+	++	+	+	++
ED-2	Deterioramento del sistema di drenaggio e raccolta delle acque a tergo del rivestimento in calotta		+		+	++	+		+
ED-3	Deterioramento del sistema di raccolta delle acque della piattaforma autostradale		+		+	++	+		+
ED-4	Deterioramento della membrana impermeabile all'estradosso del rivestimento definitivo					++			
ED-5	Deterioramento delle canalette		+			+	+	++	+
ED-6	Rigonfiamento della membrana impermeabilizzante		++	+	+	+	+		
ED-7	Deterioramento dei rivestimenti in malta		++	+	+	+	+		
ED-8	Deterioramento dei pannelli isolanti impermeabili				+	+			
ED-9	Deterioramento dei waterstop costituiti da cordoli idroespansivi		++			++	+		
DETERIORAMENTI RELATIVI AGLI ELEMENTI STRUTTURALI E ALLA GEOMETRIA DELLA GALLERIA - FESSURE									
FI-1	Fessure orizzontali	++							
FI-2	Fessure diagonali	++							
FI-3	Fessure verticali	++							
FI-4	Fessure da ritiro					+	+		
FI-5	Fessure curvilinee					++			
DETERIORAMENTI RELATIVI AGLI ELEMENTI STRUTTURALI E ALLA GEOMETRIA DELLA GALLERIA - DEFORMAZIONI									
DF-1	Abbassamento in chiave, deformazione simmetrica o asimmetrica	++			+	+	+		
DF-2	Imbozzamento localizzato	+	+		+	++	++		
DF-3	Disassamento dei conci e/o giunti strutturali					++			
DF-4	Deterioramento/rottura dell'arco rovescio	+	+		+	+		+	
DF-5	Rottura dell'arco	+	+		+	+	+		
DETERIORAMENTI RELATIVI AGLI ELEMENTI STRUTTURALI E ALLA GEOMETRIA DELLA GALLERIA - DEFORMAZIONI									
MO-1	Fonti di fori di scoppio instabili	+				++			+
MO-2	Presenza di vuoti in prossimità dell'intradosso del rivestimento					++	+		
MO-3	Vespai, sgretolamenti					++	+		
MO-4	Deterioramenti dei giunti in calcestruzzo				+	++			
MO-5	Difetti superficiali nel calcestruzzo, efflorescenze					++	+		
ALTRI DETERIORAMENTI DEGLI ELEMENTI DI INGEGNERIA CIVILE									
EQ-1	Difetti della carreggiata stradale	+	+			+	+	+	+
EQ-2	Deterioramento di lastre e tamponature				+	+		+	
DETERIORAMENTI ASSOCIATI AL FUOCO									
IN-1	Deterioramenti dovuti al fuoco				+		+	+	+
DETERIORAMENTI ASSOCIATI ALLA SCARSA MANUTENZIONE									
EN-1	Scarsa manutenzione, ripristini ammalorati, canalette ammalorate o inefficienti							+	++

Il secondo passo riguarda la classificazione di tali difetti, mediante la valutazione IQOA, "Image Qualité des Ouvrages d'Art", la quale rappresenta il sistema di classificazione in uso al Traforo del Monte Bianco (TMB) e in altri trafori internazionali (approvata dal CETU e conforme alle prescrizioni delle Circolari del Ministero LL.PP. n. 6736/61 del 19.07.1967 e n. 34233 del 25.02.1991). Tale valutazione, condotta in prima istanza dagli ispettori al momento delle ispezioni dettagliate, ha lo scopo di fornire due risultati: una valutazione delle effettive condizioni strutturali dell'opera civile, e della conseguente presenza di difetti, ed una valutazione delle condizioni del rivestimento definitivo con riferimento alla presenza di infiltrazioni e/o venute d'acqua con gocciolamento, le quali possono accentuare ed accelerare il degrado strutturale del calcestruzzo e delle eventuali barre di armatura. Prendendo in considerazione tutte le fessure, fratture, lesioni, zone di degrado e ammaloramenti dei rivestimenti, identificati durante le ispezioni di dettaglio e le indagini selettive, la classificazione IQOA provvede ad assegnare una classe che individua le condizioni statiche di ciascuna tratta della galleria, sulla base della quale si stabilisce l'eventuale necessità di un intervento di riparazione e/o rinforzo strutturale, indicandone l'urgenza e permettendone la programmazione.

L'approccio proposto dalle Linee Guida CETU si basa sui seguenti punti fondamentali:

- **Divisione della galleria in sezioni**, ovvero una tratta della galleria definita da due progressive di inizio e di fine con caratteristiche omogenee, con riferimento alla classe assegnata dal sistema di classificazione IQOA;
- **Suddivisione di ciascuna sezione in tratte e sotto-tratte**, con riferimento alla struttura, ovvero al rivestimento della galleria, e alla presenza di acqua. Per la prima parte si distinguono in particolare tre aspetti: l'area di influenza che caratterizza l'ambiente nel quale è inserita la galleria, in quanto può influenzare le sue condizioni statiche, la struttura vera e propria della galleria (calotta, reni, piedritti e arco rovescio) e le finiture e l'impiantistica;

- **Valutazione degli elementi** che compongono le diverse tratte e sotto-tratte;
- **Assegnazione di una delle classi** previste dal sistema di classificazione IQOA dei difetti sulla base della valutazione al punto precedente;
- **Suddivisione della galleria in zone** in base alla medesima classe di danneggiamento identificata.

Le condizioni statiche di ciascuna sezione, tratta e sotto-tratta della galleria sono caratterizzate da cinque classi, la cui definizione si basa sul tipo e sulla gravità dei deterioramenti che interessano la struttura. In alcuni casi eccezionali, è possibile utilizzare anche l'indicazione NE (non valutato): questa sigla si impiega quando si valuta una sezione o una sotto-sezione che non è visibile, oppure non può essere ispezionata mediante le tecniche di ispezione tradizionali, e deve essere sempre giustificata nel rapporto di ispezione o durante l'aggiornamento della classificazione.

Con riferimento alla presenza di acqua, lo stato di un'area della galleria può essere invece caratterizzato da tre classi, la cui definizione è basata sull'estensione e sulle modalità di infiltrazione dell'acqua attraverso il rivestimento definitivo. Anche in questo caso, l'indicazione NE (non valutata) può essere utilizzata per le aree in cui non è noto se è presente dell'acqua (assente, invisibile o non rilevabile con le tecniche di ispezione tradizionali).

Le classi sono definite e descritte nelle tabelle alle pagine seguenti (Tabella 6 e Tabella 7).

Tabella 6 – Classi con riferimento alle condizioni statiche del rivestimento della galleria. Fonte: Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), *Road tunnel civil engineering inspection guide (Book 1)*, 2015

CLASSE 1
Area in buone condizioni. Le aree di classe 1 richiedono solo manutenzione ordinaria e manutenzione preventiva programmata.
CLASSE 2
Area con lievi deterioramenti sulla struttura o sulle finiture ed impiantistica della galleria, che non mettono in pericolo la stabilità della struttura Le aree di classe 2 possono richiedere una manutenzione correttiva specializzata non urgente, oltre alla manutenzione necessaria per le aree di classe 1.
CLASSE 2E
Area che include i deterioramenti di classe 2 (sulla struttura e nella sua area d'influenza), che potrebbero degradarsi e aumentare di estensione, mettendo in pericolo la stabilità della struttura oppure Aree che includono impianti civili che sono stati seriamente danneggiati o di cui la stabilità può essere compromessa. Le aree di classe 2E richiedono un monitoraggio specifico e un'urgente manutenzione correttiva per prevenire il rapido sviluppo di un deterioramento più sostanziale della struttura, oltre alla manutenzione necessaria per le aree di classe 1. L'indice "E" riflette una possibile evoluzione a breve termine del difetto.
CLASSE 3
Area con degrado profondo in cui i difetti rilevati indicano che la struttura (rivestimento) è stata alterata o che la stabilità dell'area in questione è probabilmente compromessa. Le aree di classe 3 richiedono lavori di protezione, riparazione o rinforzo non urgenti. Tuttavia, è necessaria un'analisi e diagnosi rapida.
CLASSE 3U
Area nella quale il deterioramento osservato mostra un degrado profondo e che la stabilità complessiva dell'area è stata compromessa a breve o medio termine. Le aree di classe 3U richiedono riparazioni urgenti per garantire la conservazione a lungo termine della struttura o impedire qualsiasi rapido sviluppo di difetti più gravi. I lavori di riparazione devono essere generalmente preceduti da indagini che rendano possibile stabilire anche le condizioni del terreno circostante, che spesso sono poco conosciute. L'indice "U" riflette la natura urgente delle azioni da intraprendere.
INDICE "S"
Questa sigla aggiuntiva "S" è assegnata ad una delle 5 classi, di cui sopra, quando specifici difetti rilevati, indipendentemente dall'area in questione, possono mettere in pericolo la sicurezza degli utenti e quindi richiedere un'azione correttiva estremamente urgente. La sigla aggiuntiva "S" riflette l'esistenza di un difetto in una sezione della struttura che influenza la sicurezza degli utenti e una non conformità con le norme di sicurezza o un non adeguato livello di sicurezza.

Tabella 7 – Classi con riferimento alla presenza di acqua. Fonte: Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), *Road tunnel civil engineering inspection guide (Book 1)*, 2015

CLASSE 1
Area senza flusso d'acqua visibile; o
Area nella quale vengono rilevate macchie di umidità sul rivestimento o in corrispondenza dei marciapiedi. Le aree di classe 1 richiedono solo manutenzione ordinaria e manutenzione preventiva specializzata con adeguate soluzioni di drenaggio e controllo dell'inquinamento.
CLASSE 2
Area con presenza di un flusso d'acqua importante: (a) gocciolamento (di qualsiasi portata); (b) pozzanghera locale con una profondità non superiore a cinque millimetri; (c) macchia di umidità sull'asfalto; (d) flusso continuo tale da creare un film d'acqua lungo il rivestimento, con una profondità inferiore di un millimetro; (e) entità d'acqua come in (a) o (d) con raccolta da una canaletta . Le aree di classe 2 sono caratterizzate da una possibile evoluzione dei degradi a lungo termine e devono essere soggette a sorveglianza regolare da parte del gestore in aggiunta alle azioni necessarie per le aree di classe 1.
CLASSE 3
Area con presenza di un flusso d'acqua importante: (a) flusso continuo tale da creare un film d'acqua lungo il rivestimento, con una profondità maggiore di un millimetro; (b) ingresso di acqua in pressione; (c) flusso continuo sull'asfalto (di qualsiasi portata); (d) pozzanghera con una superficie di oltre 10 metri quadrati o una profondità superiore a cinque millimetri; (e) come in (a) o (b) con raccolta da una canaletta. La classe 3 viene utilizzata quando la portata d'acqua in ingresso, o la presenza di grandi volumi d'acqua (pozzanghera) è significativa. In questi casi sono richiesti urgenti interventi correttivi.
INDICE "S"
Questa sigla aggiuntiva "S" è assegnata a una delle 3 classi, di cui sopra, quando la presenza di acqua è tale da mettere in pericolo la sicurezza degli utenti e richiede pertanto interventi di manutenzione immediati. La sigla aggiuntiva "S" è specificamente utilizzata quando la presenza di acqua è: (a) suscettibile al congelamento, ciò potrebbe portare alla formazione di stalattiti, superfici ghiacciate sull'asfalto o influenzare negativamente l'uso di dispositivi di sicurezza; (b) combinata con sostanze disciolte può ridurre l'attrito tra la pavimentazione stradale e i pneumatici e pertanto causare scivolamenti; (c) potrebbe rappresentare un pericolo per il traffico stradale, a causa dell'assenza o del blocco del sistema di drenaggio, inondando la carreggiata.

7.2.2. Una nuova valutazione della sicurezza in galleria

In questo sottoparagrafo si affronta, in maniera sintetica, il contenuto delle Nuove Linee Guida che attendono uno specifico decreto dal MIMS per diventare cogenti, "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio delle gallerie esistenti". Esse forniscono una procedura per gestire e omogeneizzare le condizioni delle attività finalizzate alla sicurezza delle gallerie stradali esistenti, perseguendo una condotta di prevenzione rispetto all'emergere di situazioni potenzialmente pericolose e programmando l'adozione di interventi di manutenzione preventiva, senza incorrere in condizioni di intervento d'emergenza.

Tali Linee Guida, come quelle relative ai ponti, illustrano come la classificazione del rischio si inquadri in un approccio generale multilivello, che dal livello di conoscenza delle opere d'arte da analizzare, scaturito dall'esame preventivo e dalla sintesi di tutte le informazioni già disponibili, perviene alla determinazione di una classe di attenzione. Sulla base di questa classe si potrà ricavare una valutazione della sicurezza, riferita sia ai possibili dissesti di carattere locale sia al comportamento globale dell'opera, a cui dovrà seguire una programmazione degli interventi e dei piani di sorveglianza necessari. L'obiettivo di un approccio multilivello non è solo la sicurezza in termini di incolumità degli utenti e degli addetti, ma anche la sicurezza per garantire la continuità di esercizio e dei livelli di servizio della rete stradale: la manutenzione programmata è infatti una condizione essenziale per una migliore finalizzazione della spesa pubblica per le strade in gestione diretta e per una più mirata articolazione dei piani economici finanziari delle infrastrutture affidate in concessione.

Tale approccio si sviluppa su sei livelli differenti, aventi un grado di approfondimento e complessità crescenti:

- **Livello 0:** prevede il censimento delle opere e delle loro caratteristiche principali, la raccolta di tutte le informazioni e la documentazione disponibile e un'individuazione preliminare degli indicatori di pericolosità di maggiore interesse per ciascuna galleria;
- **Livello 1:** prevede l'esecuzione di ispezioni iniziali della struttura e delle caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche ed idrauliche dell'area, così da individuare lo stato di conservazione e le principali caratteristiche strutturali e geometriche delle opere, nonché potenziali condizioni di rischio;
- **Livello 2:** consente di giungere alla classe di attenzione di ogni galleria sulla base di parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, determinati elaborando i risultati ottenuti dai livelli precedenti. La classe di attenzione è qualificata secondo un indice di diffusione, espresso come percentuale della lunghezza della galleria caratterizzata dalla classe attribuita;

- **Livello 3:** prevede l'esecuzione di valutazioni preliminari finalizzate a comprendere, unitamente all'analisi della tipologia ed entità dei dissesti rilevati nelle ispezioni eseguite al Livello 1, il livello di sicurezza nei confronti dei possibili dissesti locali, che interessano il rivestimento, e dei dissesti correlati all'interazione del rivestimento con le formazioni naturali attraversate;
- **Livello 4:** prevede l'esecuzione di valutazioni accurate della sicurezza della galleria nei confronti delle azioni agenti e di fattori esterni all'ambiente galleria in senso stretto, tenendo in debito conto quanto indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti;
- **Livello 5:** si applica a gallerie considerate di significativa importanza all'interno della rete. Per tali opere è utile svolgere analisi più sofisticate quali quelle di resilienza, valutando la rilevanza trasportistica, analizzando l'interazione tra la struttura e la rete stradale di appartenenza e le conseguenze di una possibile interruzione dell'esercizio della galleria sul contesto socioeconomico in cui essa è inserita.

Il flusso logico che definisce le relazioni tra un livello e l'altro è rappresentato nella figura alla pagina seguente (Figura 34). Come si evince dalla figura, il fulcro centrale di tale approccio risulta essere il Livello 2: esso consiste nel determinare, per ogni galleria, una Classe di Attenzione (CdA), funzione dei fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, classificata in alta, medio-alta, medio-bassa e bassa, riferita alla tratta nelle peggiori condizioni e qualificata secondo le specifiche tipologie di potenziale pericolo. Ad ogni classe di attenzione corrispondono determinate conseguenti azioni, in termini di indagini/monitoraggio/verifiche, graduate in relazione all'indice di diffusione e agli eventuali caratteri speciali:

- **Classe Alta:** immediato avvio di valutazioni accurate (Livello 4), sia in termini di valutazioni di sicurezza sia di approfondimenti sulle caratteristiche idrauliche, geologiche, geotecniche e/o strutturali, stradali, mediante ispezioni approfondite ed eventuali sistemi di monitoraggio;

8. Il Piano di Sorveglianza dell'Opera: le Linee Guida

Il Capitolo 8 entra nel vivo dell'argomento principe della Tesi di Laurea, ovvero il "Piano di Sorveglianza dell'Opera", già introdotto precedentemente nel paragrafo 6.3 e menzionato più volte nell'arco del presente documento. Si fa riferimento alla Circolare del Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili n. 152 del 9 aprile 2021, con la quale sono state contemplate delle modalità di verifica e sorveglianza delle gallerie stradali e autostradali integrative rispetto ai criteri indicati con la Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 6736-61-A1 del 19 luglio 1967, in particolare prevedendo delle attività di verifica periodica e degli interventi di ripristino mediante una programmazione che tiene conto dell'effettivo stato di conoscenza di ciascuna infrastruttura, rilevato sulla base di una preventiva attività d'indagine.

Fino a quel momento, infatti, la normativa (Circolare Min. LL.PP. 19 luglio 1967 n. 6736/61A1) prevedeva che i gestori stradali e autostradali procedessero ad accertamenti periodici delle strutture mediante un'ispezione dei manufatti almeno trimestrale, così da accertarne lo stato di conservazione, ed un esame generale e completo annuale. L'obiettivo del nuovo provvedimento, come accennato precedentemente, consiste invece nell'aumentare la sicurezza e l'efficienza delle gallerie stradali e autostradali introducendo un Piano di Sorveglianza che pianifichi, in modo dettagliato e specifico per ogni opera, le modalità delle attività di sorveglianza, in modo da garantire un monitoraggio costante delle gallerie italiane e processi più rapidi nella definizione delle priorità d'intervento e programmazione delle opere da realizzare.

Tuttavia, tenendo conto che dovrebbero essere approvate a breve delle specifiche Linee Guida sulle gallerie, con l'introduzione delle classi di attenzione e correlate informazioni sulla sorveglianza, oggi si limita l'ambito applicativo del Piano di Sorveglianza a quello strettamente individuato dalla norma italiana esistente (vedi paragrafi 6.1 e 6.2) e dalle Linee Guida fornite da CETU (vedi paragrafo 7.2).

La Direzione Generale del MIMS ha condotto, per tramite degli Uffici Territoriali, uno studio con coinvolgimento dei centri di ricerca universitari al fine di individuare le migliori pratiche operative per consentire un'attuazione organica ed uniforme della suindicata circolare e, più in generale, assicurare l'espletamento delle attività di verifica delle infrastrutture da parte dei gestori secondo principi efficienti, omogenei e trasparenti. L'attività di ricerca è confluita nel documento "Linee Guida per la redazione del piano di sorveglianza delle gallerie", il quale costituisce lo standard minimo di sicurezza da assumere per la redazione del Piano di Sorveglianza dell'opera, non rappresentando un vincolo per il professionista incaricato della redazione ma piuttosto un punto di riferimento per armonizzare e standardizzare modalità, contenuti e frequenze di controlli e manutenzioni sulle più ricorrenti tipologie e situazioni di interventi riscontrabili in galleria al completamento di un percorso di sorveglianza e risoluzione dei difetti emersi. Tali fattispecie sono sinteticamente classificabili in:

- **Zona 1:** rivestimento della galleria privo di interventi o presidi e quindi tale da non richiedere, in relazione al suo buono stato di conservazione, la realizzazione di interventi specifici;
- **Zona 2:** presenza di interventi, a carattere provvisorio, di stabilizzazione, consolidamento o rinforzo del rivestimento;
- **Zona 3:** presenza di interventi, a carattere definitivo, di ricostruzione del rivestimento della galleria.

Le Linee Guida (LLGG) sono sviluppate in due sezioni, descritte nei paragrafi successivi, rappresentate dagli standard minimi di controllo per le parti della galleria sulle quali non sono stati fatti interventi e dalla definizione di un Piano di Sorveglianza, relativo alle sole componenti strutturali dell'opera. Inoltre, forniscono come allegati le specifiche di esecuzione di tre tipologie di controlli: le prove di *pull-out* sui tasselli, le prove di serraggio sui bulloni autoperforanti e le prove di *pull-out* sui bulloni.

8.1. Definizione degli standard minimi di controllo per le parti della galleria non oggetto di interventi

Il Piano di Sorveglianza redatto ai sensi della Circolare MIMS potrebbe, sotto il profilo strettamente tecnico, riguardare anche le parti del rivestimento della galleria non interessate da interventi, purché esse siano state indagate con tutte le fasi ispettive e con le indagini e caratterizzazioni previste dal Manuale MIT del maggio 2020. Tuttavia, in attesa di eventuali nuove indicazioni che potrebbero essere inserite nelle future Linee Guida del CSLPP, su tali parti del rivestimento le ispezioni dovranno sempre svolgersi con riferimento generale alle indicazioni della Circolare del 1967. Una sintesi indicativa dei requisiti minimi da adottare per le ispezioni di legge viene mostrata nella tabella seguente (Tabella 8):

Tabella 8 – Requisiti minimi da adottare per le ispezioni di legge sulle parti della galleria non oggetto di interventi. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

	ISPEZIONE DI BASE	ISPEZIONE APPROFONDATA
TIPOLOGIA CONTROLLI	CONTROLLI VISIVI INTEGRATI, OVE PREVISTO, DA CONTROLLI PER CONTATTO E STRUMENTALI O DIAGNOSTICI	CONTROLLI VISIVI A DISTANZA DI CONTATTO INTEGRATI DA BATTITURA E, OVE PREVISTO, DA CONTROLLI STRUMENTALI E/O DIAGNOSTICI
OGGETTO DI CONTROLLO	TUTTA LA SUPERFICIE DEL RIVESTIMENTO	TUTTA LA SUPERFICIE DEL RIVESTIMENTO
FREQUENZA MINIMA	TRIMESTRALE	ANNUALE
MODALITA' ESECUTIVA	DA TERRA CON AUSILIO DI TORCIA E BINOCOLO E DISPONIBILITA' DI PLE PER APPROFONDIMENTI IN QUOTA, OVE PREVISTI	CON PLE
PERSONALE TECNICO	TECNICI DIPLOMATI	INGEGNERE

In via più specifica, nelle zone in cui non sono stati realizzati interventi di sistemazione temporanea/definitiva, il Piano di Sorveglianza deve fornire le istruzioni di dettaglio relative alle frequenze, modalità e tipologie di osservazione e indagine dei fenomeni. Tali ispezioni dovranno essere organizzate in funzione degli esiti delle attività di *assessment* e dei precedenti cicli ispettivi, affinché l'ispettore possa individuare gli eventuali punti sui quali operare gli approfondimenti ritenuti necessari. Infatti,

durante queste fasi potrebbero essere stati segnalati difetti o anomalie che, pur non avendo richiesto misure correttive (difetti di tipo 1, 2, 2E), necessitano di un controllo del potenziale aumento di gravità, secondo la frequenza indicata nelle Linee Guida in oggetto, classificato sempre mediante la classificazione IQOA.

8.1.1. Le gallerie con il rivestimento in calcestruzzo

La prima parte delle Linee Guida ("Parte A") riserva alle gallerie con il rivestimento in calcestruzzo un capitolo contenente le connotazioni specifiche di tali strutture. In particolare, è presente una tabella (Tab. riportata al par. A.2.1. delle LLGG) in cui è riportata l'estensiva casistica delle anomalie riscontrabili, superficiali e strutturali, le quali sono da considerarsi sia per il rivestimento esistente che per le porzioni di rivestimento rifatte "ex-novo" a seguito della demolizione di quello originario. Tali anomalie sono classificate mediante due codici, di cui uno riferito al Nuovo Codice Difetti del Manuale MIT, e sono correlate ad una breve descrizione qualitativa, nonché ai pericoli connessi differenziati in pericoli per l'utenza e pericoli per la struttura stessa (Tabella 9). Inoltre, tra le possibili anomalie sono elencate anche delle difettosità relative all'arco rovescio che, essendo una porzione dell'opera non direttamente ispezionabile, richiede un'osservazione indiretta volta ad individuare eventuali anomalie su elementi visibili che possano essere sintomatiche di problematiche su quelli non accessibili.

Tabella 9 – Esempio della tabella riportata al par. A.2.1. delle LLGG contenente le anomalie riscontrabili sul rivestimento della galleria. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Codice anomalia	Anomalia	Codice	Descrizione	Pericolo utenti	Pericolo galleria
01.01.A01	Infiltrazioni d'acqua	HY-1	Infiltrazioni d'acqua provenienti dal terreno circostante (in particolare da faglie, fratture, pieghe, intere superficiali). Nel caso di gallerie rivestite, si manifesta tramite un'evidenza nel rivestimento (fessura, foro) o in corrispondenza di un altro elemento (giunto, foro di drenaggio).	Caduta di stalattiti e materiali deteriorati – Disturbo e pericolo per il traffico in passaggio (allagamenti della carreggiata, formazione di ghiaccio, etc.)	Indebolimenti localizzati di elementi strutturali o di porzioni di suolo. Possibili danni permanenti al tunnel.
01.01.A02	Concrezioni	HY-2	Concrezione calcarea: cristallizzazioni solide, talvolta spesse di calcite, in colori diversi (impurità), che si attaccano al rivestimento e provengono da crepe, aree porose o articolazioni umide Concrezione di solfato: cristallizzazioni di gesso su articolazioni o	Caduta di pezzi di concrezioni (molto raro)	Minimi se nessun attacco di solfato è dimostrato

Per le anomalie presenti è quindi necessario prevedere una serie di controlli, che possono essere di tipo visivo e/o di tipo uditivo tramite

battitura o martellamento, sulle sole porzioni visibili della struttura e, ove necessario, essi saranno integrati con rilievi strumentali e/o diagnostici. A tale scopo viene fornita un'ulteriore tabella (Tab. riportata al par. A.2.2. delle LLGG) contenente il codice del controllo, l'anomalia e il relativo tipo di controllo, il quale dovrà riguardare sia le ispezioni di base che quelle approfondite, da effettuare su tutte le porzioni di rivestimento non interessate da interventi (Tabella 10).

Tabella 10 – Esempio della tabella riportata al par. A.2.2. delle LLGG contenente i controlli da effettuare sulle porzioni visibili del rivestimento. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Codice controllo	Anomalia	Ispezione di base	Ispezione approfondita
01.01.C01	Infiltrazioni d'acqua	Controllo della presenza di macchie di umidità e/o di infiltrazioni d'acqua	Controllo della presenza di macchie di umidità e/o di infiltrazioni d'acqua
01.01.C02	Concrezioni	Controllo della presenza di concrezioni	Controllo della presenza di concrezioni
01.01.C03	Effetti del gelo	Controllo della presenza di effetti del gelo, ovvero presenza di stalattiti, blocchi o lastre di ghiaccio, sgretolamento superficiale del materiale o formazione di cavità, danneggiamento di canali di scolo non isolati, espulsione di giunti rimovibili, rigonfiamenti, etc	Controllo della presenza di effetti del gelo, ovvero presenza di stalattiti, blocchi o lastre di ghiaccio, sgretolamento superficiale del materiale o formazione di cavità, danneggiamento di canali di scolo non isolati, espulsione di giunti rimovibili, rigonfiamenti, etc
01.01.C04	Efflorescenze su malta o calcestruzzo	Controllo della presenza di efflorescenze	Controllo della presenza di efflorescenze
01.02.C01	Scheggiatura	Controllo della presenza di scheggiature nel rivestimento in corrispondenza dei giunti	Controllo della presenza di scheggiature nel rivestimento in corrispondenza dei giunti

Nel caso di nuovi difetti emergenti nelle parti di rivestimento prive di interventi, si potrà operare con i tipologici di intervento già asseverati dal Politecnico di Torino e approvati dal MIT o, in alternativa, proporre nuove soluzioni di intervento da sottoporre preventivamente all'approvazione del MIT previa asseverazione di un organismo universitario.

8.2. La struttura del Piano di Sorveglianza degli interventi

Nella "Parte B" delle Linee Guida viene descritta la struttura del Piano di Sorveglianza: come indicato nella circolare MIMS, esso recepisce le specifiche del Piano di Manutenzione redatto ai sensi del D.P.R. n. 207/2010 e articolato in tre documenti operativi, il Manuale d'Uso, il Manuale di Manutenzione e il Programma di Manutenzione. Di conseguenza, in seguito a due capitoli riguardanti la descrizione dell'opera e l'inquadramento delle ispezioni, il Piano di Sorveglianza sarà formato da questi tre documenti, ai quali seguirà un capitolo finale con le direttive sull'aggiornamento del Piano.

Poiché la redazione di tale piano è frutto di una serie di azioni e documentazioni, si elencano i documenti facenti parte del pacchetto progettuale da produrre per ciascuna specifica galleria, fino ad arrivare al Piano stesso:

- Report Ispezione Approfondita oppure, nel caso in cui l'ispezione di *assessment* non fosse ancora stata eseguita, Report Ispezione Preliminare;
- Schede Identificative Ispettive;
- Report conclusivo di *assessment*;
- Schede degli interventi;
- Tavole degli interventi tipologici e/o specifici a carattere provvisorio, ove presenti;
- Tavole degli interventi di sistemazione definitiva, ove presenti;
- Piano di Manutenzione degli interventi ai sensi del D.P.R. n. 207/2010;
- Piano di Sorveglianza della galleria.

Infine, dal momento che il Piano di Sorveglianza deve essere redatto tenendo conto delle risultanze delle ispezioni e degli interventi effettivamente realizzati, costituirà per i cicli ispettivi successivi il principale documento di riferimento, sulla base del quale registrare ogni eventuale evoluzione dello stato della galleria secondo le modalità di accertamento ivi indicate.

8.2.1. La descrizione dell'opera

Il primo passo per la stesura del Piano riguarda l'inquadramento dell'opera sotto molteplici punti di vista, a partire dalla descrizione delle caratteristiche generali della galleria (Tabella 11) e dalla presentazione delle sezioni tipo da "*as-built*", indicando la loro distribuzione lungo il profilo.

Tabella 11 – Caratteristiche principali della galleria da indicare all'interno del Piano di Sorveglianza. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Nome galleria e canna	
Tratto autostradale di appartenenza	
Pk inizio e fine	
Apertura al traffico	
Numero corsie	
Contesto geotecnico	
Presenza di arco rovescio	
Presenza di impermeabilizzazione	
Quantità di acqua drenata	
Presenza di faglie e progressive	
Tipologia del rivestimento	
Spessore del rivestimento	
Lunghezza della galleria	

In seguito, il progettista dovrà specificare la data in cui è stata effettuata l'ispezione di "punto zero" oppure, nel caso non fosse stata ancora eseguita l'ispezione approfondita di *assessment* prevista dal Manuale MIT, la data della cosiddetta ispezione preliminare. Tale ispezione è finalizzata a valutare "ex-novo" lo stato di consistenza dei rivestimenti in galleria e a rilevare i difetti presenti, che saranno catalogati in funzione della loro gravità secondo il modello di classificazione prescritto nel Catalogo dei Difetti allegato al Manuale MIT, derivato dall'organismo francese CETU e dal sistema di classificazione IQOA (vedi sottoparagrafo 7.2.1). In particolare, tutte le criticità contrassegnate dal codice 3, 3U o S (S indipendentemente dalla difettosità di carattere strutturale) saranno sanate con degli interventi di messa in sicurezza a carattere provvisorio (MES) o con degli interventi di sistemazione definitiva (SID).

Per ogni intervento, il progettista dovrà assegnare una vita utile nominale, ovvero il periodo durante il quale si ritiene restino validi i presupposti che hanno determinato la scelta del tipo di intervento, che solitamente varia da 18 mesi a 3 anni. Questa scelta, dipendente sia dalle condizioni del rivestimento prima dell'intervento sia dal contributo dell'intervento stesso alla stabilizzazione nel tempo dello stato raggiunto con esso, si traduce in

due azioni, assoltte dal Piano di Sorveglianza stesso: come prima cosa, nel periodo di vita utile degli interventi deve essere verificato il loro stato di efficienza e, conseguentemente, in considerazione alle oggettive difficoltà che potrebbero insorgere nella realizzazione di tutti gli interventi di carattere definitivo, entro la vita utile nominale assegnata all'intervento temporaneo, è necessario prevedere anche una verifica straordinaria di efficienza. Quest'ultima è finalizzata ad accertare che non siano intervenute, alla scadenza della vita utile nominale assegnata in origine, modifiche dei presupposti di progetto così da permettere l'assegnazione di una proroga della vita utile nominale stessa.

Con riferimento invece agli interventi di sistemazione definitiva, nei tratti in cui l'ispezione di punto zero abbia rivelato una situazione di difettosità diffusa per la quale è stato ritenuto opportuno provvedere alla rimozione del rivestimento originario e al suo rifacimento "ex-novo", per la manutenzione si applicano le prescrizioni relative al rivestimento in calcestruzzo.

8.2.2. L'inquadramento delle ispezioni

Per ogni galleria, al fine di gestire e pianificare al meglio i controlli sui singoli elementi che la costituiscono, il Piano di Sorveglianza deve prevedere due livelli di ispezione per i controlli di manutenzione ("tipo 1" e "tipo 2"), più un'ulteriore tipologia di controlli ("tipo 3") da eseguirsi una tantum. Le prime due tipologie di ispezioni, svolte con cadenza regolare secondo quanto prescritto nel Programma di Manutenzione, hanno come scopo l'individuazione e la diagnosi dei fenomeni di decadimento prestazionale delle componenti degli interventi e, in caso di anomalie, diventano un ausilio indispensabile per la definizione degli interventi di ripristino o restauro funzionale delle parti ammalorate. La terza ispezione è invece volta a tenere sotto controllo una particolare problematica connessa ad un elemento o ad un difetto specifico che possa avere conseguenze più gravose per l'utenza. Le tre tipologie di ispezione appena descritte si differenziano per il grado di approfondimento dei controlli previsti, per le modalità esecutive e per il personale tecnico chiamato ad effettuarle (Tabella 12):

Tabella 12 – Caratteristiche delle ispezioni di tipo 1, 2 e 3. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

	ISPEZIONE TIPO 1	ISPEZIONE TIPO 2	ISPEZIONE "UNA TANTUM" TIPO 3
TIPOLOGIA CONTROLLI	CONTROLLI VISIVI (DA TERRA) E/O (EVENTUALI) STRUMENTALI	CONTROLLI VISIVI (A DISTANZA DI CONTATTO) E STRUMENTALI	CONTROLLI VISIVI (A DISTANZA DI CONTATTO) E STRUMENTALI
OGGETTO DI CONTROLLO	TUTTI GLI ELEMENTI MANUTENIBILI A VISTA	TUTTI GLI ELEMENTI MANUTENIBILI SIA A VISTA SIA COPERTI LAMIERE	TASSELLI E CHIODI A VISTA, RIVESTIMENTO RICOSTRUITO CON ANELLI PREFABBRICATI
FREQUENZA	VARIABILE IN FUNZIONE DELLA ZONA 1-2-3 DELLA GALLERIA	VARIABILE IN FUNZIONE DELLA ZONA 1-2-3 DELLA GALLERIA	UNA TANTUM CON PERIODICITA' DIFFERENZIATA IN FUNZIONE DELL'OGGETTO
MODALITA' ESECUTIVA	DA TERRA (A PIEDI) E/O CON EVENTUALE SUPPORTO DI PLE SU ZONE PUNTUALI	DA TERRA E CON PLE	CON PLE
PERSONALE TECNICO	TECNICI DIPLOMATI	INGEGNERE	INGEGNERE

Infine, è presente un'altra tipologia di ispezione, l'ispezione straordinaria, che però, non essendo programmabile a priori, non viene considerata all'interno delle LLGG. Questa ispezione è necessaria nel caso in cui l'opera presenti segni di gravi anomalie, a seguito di ispezioni o attività di sorveglianza, tali da richiedere ulteriori controlli specialistici: poiché i controlli supplementari richiesti potrebbero non essere eseguibili immediatamente, è pertanto possibile che sia necessario programmare una nuova ispezione, che prenderà il carattere di ispezione straordinaria.

Su richiesta degli asseveratori e su specifica condivisione da parte dei tecnici del MIT, le Linee Guida dedicano un apposito paragrafo ai controlli da effettuare sugli interventi con lamiera grecate (o onduline). Tali elementi, indispensabili in tutte le situazioni in cui il rivestimento è interessato da infiltrazioni d'acqua, sono prodotti in acciaio per finalità antincendio e quindi risultano impermeabili alle indagini radar, impedendo la visibilità di ciò che è presente a tergo. Di conseguenza, le LLGG definiscono i criteri sulla base dei quali il progettista dovrà indicare le modalità di ispezione delle lamiere, ed eventualmente degli interventi retrostanti, nonché la frequenza delle stesse, correlata alla periodicità di smontaggio delle lamiere.

8.2.3. Il Manuale d'Uso

Il Manuale d'Uso è il primo documento del Piano di Manutenzione che viene redatto ai sensi del D.P.R. n. 207/2010 e recepito dal Piano di Sorveglianza. In esso si deve descrivere l'opera nel suo stato di conservazione al momento dell'ispezione di "punto zero" e gli interventi di sistemazione temporanea effettuati, specificando per ognuno di essi gli elementi manutenibili. Conseguentemente, il Manuale deve fornire un insieme di informazioni che permettono di conoscere le corrette modalità di uso dell'opera, al fine di evitarne il degrado anticipato, basate su un'attenta e regolare attività di ispezione disciplinata dal successivo Manuale di Manutenzione, che si traduce nell'illustrazione dei principali fenomeni di degrado in atto sui rivestimenti in calcestruzzo. Considerando che per le finalità del Piano di Sorveglianza l'opera viene considerata per zone, come descritto precedentemente, si illustra il flusso di lavoro (Figura 35) che viene eseguito per la definizione dei controlli da attuare sulle gallerie in cui è già stata effettuata l'ispezione approfondita di assessment:

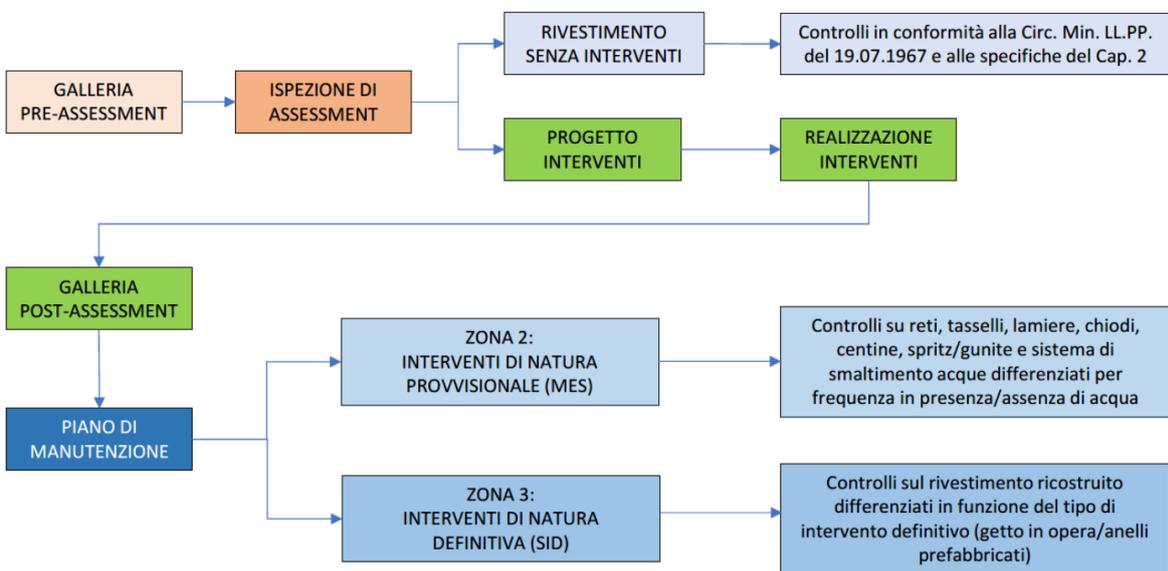


Figura 35 – Workflow dei controlli da eseguire sulle varie zone della galleria a seguito dell'ispezione di assessment. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Per il corretto svolgimento delle ispezioni in galleria, l'ispettore dedicato ai controlli di manutenzione dovrà individuare le zone sopra richiamate sulla base di quanto riportato nella documentazione di progetto o, in caso

di ispezione approfondita di *assessment*, negli album progettuali delle Schede di intervento, distinte generalmente per interventi di risanamento superficiale (tipo A-B) e profondo (tipo C). Nel caso, invece, in cui sia stata effettuata la sola ispezione preliminare, l'ispettore potrà dedurre l'ubicazione degli interventi dalle tabelle presenti nel report ispettivo dove, in funzione della metrica della galleria e della posizione trasversale (calotta, reni, piedritti), vengono riportati i vari interventi a carattere provvisoria messi in opera. In seguito, una volta individuate le aree ricadenti in Zona 2 e 3, l'ispettore dovrà controllare l'eventuale presenza di anomalie sugli interventi realizzati.

A questo punto, all'interno delle LLGG sono riportati molteplici esempi di indicazioni di interventi ricadenti in Zona 2 (Tabella 13) e Zona 3 (Tabella 14), facendo riferimento agli interventi tipologici già approvati dal MIT previa asseverazione del Politecnico di Torino ai sensi della Circolare DGVCA 24600 del 14.10.20. In particolare, ad ogni intervento di sistemazione temporanea viene dedicato un paragrafo in cui esso è descritto con un maggior grado di dettaglio.

Infine, il Manuale d'Uso deve chiudersi con l'elenco degli elementi manutenibili specifici per gli interventi effettuati. A tal proposito, nelle LLGG sono riportate tre tabelle, una per ogni zona, contenenti gli elementi da sottoporre a controllo e manutenzione, coerentemente alla descrizione dei vari interventi riportati nei paragrafi precedenti.

Tabella 13 – Interventi di natura provvisoria ricadenti in Zona 2. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Tipo	Descrizione	Presenza acqua
Tipo A	Ammaloramenti superficiali con spessore fino a 5 cm	No
Tipo A2	Distacchi corticali profondi (spessore ≤ 15 cm)	Si
Tipo A3	Cavità a tergo del rivestimento o sul rivestimento o laminazione, con dimensioni max pari a 2.0 m lungo lo sviluppo della centina, in assenza di acqua	No
Tipo A4	Cavità a tergo del rivestimento o sul rivestimento o laminazione, con dimensioni max pari a 2.0 m lungo lo sviluppo della centina, in presenza di acqua	Si
Tipo B1	Venute d'acqua diffuse o concentrate in assenza di ammaloramenti superficiali	Si
Tipo B2	Venute d'acqua diffuse o concentrate in presenza di ammaloramenti superficiali, con spessore fino a 2 cm	Si
Tipo A+B1	Venute d'acqua diffuse o concentrate in presenza di ammaloramenti superficiali con spessore fino a 5 cm	Si
Tipo C1	Distacchi profondi con spessore fino a 20 cm in assenza di venuta d'acqua	No
Tipo C2	Distacchi profondi con spessore di 20-40 cm in assenza di venuta d'acqua	No
Tipo C5	Distacchi profondi con spessore di 20-40 cm in ammassi terrosi in assenza di venuta d'acqua	No
Tipo D1	Tipo D1 - Cavità al contorno in assenza di venuta d'acqua	No
Tipo D2	Cavità al contorno in presenza di venuta d'acqua	Si
Tipo E1	Distacchi profondi con spessore fino a 20 cm in presenza di venuta d'acqua	Si
Tipo E2	Distacchi profondi con spessore di 20-40 cm in presenza di venuta d'acqua	Si
Tipo E5	Distacchi profondi con spessore di 20-40 cm in ammassi terrosi con venute diffuse o concentrate	Si
Tipo G1	Reticolo fessurativo con cunei potenzialmente instabili di $V > 1$ mc in presenza di venute d'acqua	Si
Tipo G4	Reticolo fessurativo con cunei potenzialmente instabili di $v > 1$ mc in ammassi terrosi con venute d'acqua diffuse o concentrate	Si
Tipo G5	Lesioni aperte e persistenti in presenza di significativi stati tensionali dei rivestimenti in ammassi terrosi con venute d'acqua diffuse o concentrate	Si
Tipo H1	Ammaloramenti di copriferro e armature fino a 20 cm in assenza di venute d'acqua	No
Tipo H2	Ammaloramenti di copriferro e armature fino a 20 cm in presenza di venute d'acqua	Si
Tipo I	Ammaloramenti zona piedritti	No
Tipo L1	Vuoti significativi nei rivestimenti con eventuali cavità al contorno in assenza di venute d'acqua	No
Tipo L2	Vuoti significativi nei rivestimenti con eventuali cavità al contorno in presenza di venute d'acqua	Si
Tipo N1	Reticolo fessurativo con cunei potenzialmente instabili di $v > 1$ mc e cavità al contorno in presenza di venute d'acqua	Si
Tipo N3	Quadri fessurativi persistenti associati a significativi stati tensionali e cavità al contorno in presenza di venute d'acqua	Si

Tabella 14 – Interventi di natura definitiva ricadenti in Zona 3. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Tipo n1	Demolizione parziale del rivestimento esistente (minimo dei primi 40 cm a intradosso) su tutto l'arco di calotta (la demolizione si interrompe in corrispondenza dei piedritti ovvero a circa 2.5 m dal piano carrabile) e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito con cassero tradizionale
Tipo n2	Demolizione parziale del rivestimento esistente (minimo dei primi 40 cm a intradosso) su tutto l'arco di calotta (la demolizione si interrompe in corrispondenza dei piedritti ovvero a circa 2.5 m dal piano carrabile) e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito a tergo di elementi prefabbricati che fungono da cassero (anello prefabbricato)
Tipo n3	Demolizione dell'intero spessore del rivestimento esistente su tutto l'arco di calotta (la demolizione si interrompe in corrispondenza dei piedritti ovvero a circa 2.5 m dal piano carrabile) e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito con cassero tradizionale
Tipo n4	Demolizione dell'intero spessore del rivestimento esistente su tutto l'arco di calotta (la demolizione si interrompe in corrispondenza dei piedritti ovvero a circa 2.5 m dal piano carrabile) e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito a tergo di elementi prefabbricati che fungono da cassero (anello prefabbricato)
Tipo n5	Demolizione parziale del rivestimento esistente (minimo dei primi 40 cm a intradosso) su tutto il fornice e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito con cassero tradizionale
Tipo n6	Demolizione parziale del rivestimento esistente (minimo dei primi 40 cm a intradosso) su tutto il fornice e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito a tergo di elementi prefabbricati che fungono da cassero (anello prefabbricato)
Tipo n7	Demolizione dell'intero spessore del rivestimento esistente su tutto il fornice e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito con cassero tradizionale
Tipo n8	Demolizione dell'intero spessore del rivestimento esistente su tutto il fornice e ripristino dello spessore mediante getto in opera eseguito a tergo di elementi prefabbricati che fungono da cassero (anello prefabbricato)
Tipo n9	Rifacimento dell'arco rovescio (eventualmente in abbinamento a uno degli interventi sopra descritti)

8.2.4. Il Manuale di Manutenzione

Si introducono quindi i contenuti obbligatori del Manuale di Manutenzione, il quale fornisce per ciascuno degli interventi realizzati in galleria le indicazioni necessarie per una corretta manutenzione. In particolare, per ciascun elemento costituente l'opera si individuano le anomalie riscontrabili, i controlli effettuabili, il livello minimo delle prestazioni e gli interventi di manutenzione possibili con indicazione dell'eventuale necessità di personale specializzato. Per consentire una corretta manutenzione dell'opera, oltre al livello minimo di prestazione associato ai vari elementi è necessario indicare anche il massimo livello di difettosità ad esso corrispondente, così da valutare in modo oggettivo l'effettiva necessità di un intervento di manutenzione e procedere al ripristino/sostituzione degli elementi affetti da anomalia, a meno che non si proceda ad una verifica specifica di accettabilità del degrado.

Relativamente ai controlli, le LLGG forniscono anche un paragrafo in cui sono descritte le assunzioni e i riferimenti adottati per la definizione delle percentuali di elementi manutenibili da assoggettare a controllo per

ciascun ciclo ispettivo, basate sulla norma ISO 2859-1 "Sampling procedures for inspection by attributes", tarata sui dati medi emersi dai primi *assessment* eseguiti (un campione di 45 gallerie appartenenti alle tratte liguri delle A10, A12 e A26).

Le dieci unità tecnologiche principali facenti parte degli interventi di consolidamento temporaneo(utilizzati da soli o in combinazione tra loro negli interventi tipologici già approvati dal MIT) per cui si riporta all'interno delle LLGG un approfondimento dei fattori sopra richiamati sono le seguenti:

- Reti metalliche ES;
- Tasselli;
- Lamiere grecate;
- Bulloni autoperforanti;
- Bulloni tipo Swellex;
- Sistemi di smaltimento acque;
- Pannelli di rete a fune;
- Spritz-beton/gunite;
- Centine;
- Reti in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers).

In particolare, per ognuno di essi si riporta una tabella contenente le anomalie riscontrabili sull'elemento considerato con una breve descrizione e con i pericoli connessi differenziati in pericoli per l'utenza e per la struttura stessa (Tabella 15), una tabella con le modalità con cui effettuare i controlli, suddividendoli in base al tipo di ispezione (Tabella 16), una tabella in cui si riportano sintetizzati i requisiti associati all'elemento, così da poter valutare la necessità di realizzare interventi in seguito all'individuazione delle anomalie(Tabella 17) e, infine, una tabella in cui vengono individuati per ciascuna anomalia le misure correttive da attuare nel caso in cui venga superato il livello di difettosità massimo (Tabella 18).

Tabella 15 – Esempio della tabella contenente le anomalie riscontrabili sull'elemento "reti metalliche ES". Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Codice anomalia	Anomalia	Codice	Descrizione	Pericolo utenti	Pericolo galleria
02.01.A01	Lesioni	RE-1	Fenomeni di rottura e/o danneggiamenti dovuti ad urti accidentali.	Rottura della rete e caduta di materiale accumulato a tergo della rete	-
02.01.A02	Corrosione (per reti a maglia fina non strutturali in acciaio zincato)	RE-2	Presenza di fenomeni di corrosione dovuti al contatto diretto delle reti con l'atmosfera esterna e quindi al decadimento dei materiali metallici a causa della combinazione con sostanze presenti nell'ambiente (ossigeno, acqua, anidride carbonica, ecc.). Non rientra in questa anomalia l'ossidazione del materiale.	Rottura della rete e caduta di materiale accumulato a tergo della rete	-
02.01.A03	Deformazioni localizzate	RE-3	Deformazioni dovute a cause esterne che alterano la normale configurazione di posa delle reti.	Rottura della rete e caduta di materiale accumulato a tergo della rete	-
02.01.A04	Presenza di eventuali depositi a tergo	RE-4	Presenza di accumuli di frammenti a tergo delle reti che possano provocare alterazioni delle condizioni normali di carico.	Rottura della rete e caduta di materiale accumulato a tergo della rete	-
02.01.A05	Inadeguatezza fissaggio	RE-5	Presenza di un numero inadeguato di tasselli che possa alterare il corretto funzionamento della rete	Caduta della rete e del materiale accumulato a tergo	-

Tabella 16 – Esempio della tabella contenente le modalità con cui effettuare i controlli sull'elemento "reti metalliche ES". Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Codice controllo	Difetto	Ispezione "tipo 1"	Ispezione "tipo 2"	Ispezione "una tantum" tipo 3
02.01.C01	Lesioni	Controllo dell'eventuale presenza di lesioni nelle reti strutturali a vista	Controllo dell'eventuale presenza di lesioni nelle reti strutturali a vista e a campione in quelle sotto le lamiere grecate	-
02.01.C02	Corrosione (per reti a maglia fina non strutturali in acciaio zincato)	Non necessario	Controllo dell'eventuale presenza di corrosione nelle reti strutturali in acciaio zincato a vista e a campione in quelle sotto le lamiere grecate	-
02.01.C03	Deformazioni localizzate	Controllo dell'eventuale presenza di deformazioni nelle reti strutturali a vista	Controllo dell'eventuale presenza di deformazioni nelle reti strutturali a vista e a campione in quelle sotto le lamiere grecate	-
02.01.C04	Presenza di eventuali depositi a tergo	Controllo dell'eventuale accumulo di materiale nelle reti a vista	Controllo dell'eventuale accumulo di materiale nelle reti a vista e a campione in quelle sotto le lamiere grecate	-
02.01.C05	Inadeguatezza fissaggio	Controllo della presenza di un numero adeguato di tasselli e della loro corretta posizione (omogeneità ed uniformità) nelle reti strutturali a vista	Controllo della presenza di un numero adeguato di tasselli e della loro corretta posizione nelle reti strutturali a vista e a campione in quelle sotto le lamiere grecate	-

Tabella 17 – Esempio della tabella contenente i requisiti associati all'elemento "reti metalliche ES". Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Classe di Esigenza	Classe di Requisiti	Requisiti	Prestazioni	Livello minimo di Prestazione
1. Sicurezza	1.1	Stabilità	1.1.1 Resistenza meccanica	Le reti strutturali devono assicurare stabilità e resistenza. Per i livelli minimi si rimanda alle prescrizioni di legge e di normative vigenti in materia. In particolare, D.M. 17/01/2018: "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» e Circolare n.7 del 21/01/2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»"
	1.2	Protezione dagli agenti chimici ed organici	1.2.1 Resistenza agli agenti aggressivi	Le reti strutturali devono conservare nel tempo, sotto l'azione di agenti chimici (anidride carbonica, solfati, ecc.) presenti nell'ambiente, le proprie caratteristiche meccaniche. Per i livelli minimi si rimanda alle prescrizioni di legge e di normative vigenti in materia. In particolare D.M. 17/01/2018: "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» e Circolare n.7 del 21/01/2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»"

Tabella 18 – Esempio della tabella contenente le misure correttive per l'elemento "reti metalliche ES". Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Codice intervento	Anomalia	Soglia limite di intervento	Misure correttive
02.01.101	Lesioni	Se presente	Sostituzione
02.01.102	Corrosione (per reti a maglia fina non strutturali in acciaio zincato)	Se presente	Sostituzione
02.01.103	Deformazioni localizzate	Deformazione che comporta un ingombro della sagoma interna di galleria > 5 cm	Sostituzione
02.01.104	Presenza di eventuali depositi a tergo	Se accumulo di porzioni di dimensioni superiori ai 5 cm di diametro	Sostituzione rete secondo le seguenti fasi: - Rimozione della rete - Pulizia e scarifica superficiale - Posa rete sostitutiva e installazione dei tasselli di ancoraggio
02.01.105	Inadeguatezza fissaggio	Se presente	Interventi di integrazione e/o sostituzione dei tasselli di ancoraggio

Dato che la galleria è un sistema complesso, si evidenzia che i difetti individuati per le sue singole componenti, ove ripetutamente presenti su aree contigue, richiedono anche una valutazione d'insieme per accertarne l'effettiva rilevanza. Per facilitare la restituzione dei risultati per ciascun intervento tipologico e una visione d'insieme sul quadro difettologico della galleria, nell'ambito di ogni ispezione, l'ispettore dovrà compilare una scheda di valutazione dell'intervento nella quale devono essere indicati, oltre ai dati della galleria, le anomalie riscontrate tra quelle possibili. Nel caso di concomitanza di più anomalie è possibile fornire agli ispettori degli strumenti per valutare in modo speditivo la gravità del fenomeno di degrado in atto, in attesa degli approfondimenti necessari. All'interno di ciascun intervento di carattere strutturale è infatti possibile individuare degli elementi cardine che, se colpiti da degrado, metterebbero a rischio la funzionalità dell'intervento stesso e quindi costituirebbero un pericolo per la struttura.

8.2.5. Il Programma di Manutenzione

L'ultima parte del Piano di Sorveglianza dovrà includere quello che è anche l'ultimo documento facente parte del Piano di Manutenzione, ovvero il Programma di Manutenzione, suddiviso in sottoprogramma delle prestazioni, sottoprogramma dei controlli e sottoprogramma degli interventi. Esso deve fornire le indicazioni necessarie e programmare nel tempo le attività descritte dal Manuale d'Uso e dal Manuale di Manutenzione.

Il sottoprogramma delle prestazioni, secondo il D.P.R. n. 207/2010, descrive le prestazioni ammissibili fornite dall'opera e dalle sue parti nel corso del suo ciclo di vita, le quali possono variare dal valore di progetto a quello minimo di norma. Tuttavia, non si ritengono accettabili riduzioni del livello prestazionale di progetto a meno di specifiche verifiche che dimostrino la compatibilità ai requisiti minimi di norma della capacità strutturale dell'opera affetta da degrado.

Il sottoprogramma dei controlli permette un'agevole gestione e pianificazione dei controlli sui singoli elementi che costituiscono l'opera, definendo la cadenza temporale e le modalità delle ispezioni che prevedono l'esecuzione di determinati controlli in funzione del loro livello di approfondimento. Programmare l'attività di sorveglianza dell'opera in funzione dello stato e della natura di ciascun elemento costituente l'insieme strutturale della galleria risulta di fondamentale importanza, in quanto gli interventi di manutenzione dipendono dalla gravità del degrado e dalla sua presumibile velocità di evoluzione. Anche in questo caso, le frequenze di ispezione sono differenziate per le tre zone individuate all'interno della galleria e, in particolare, si approfondisce il discorso per quanto riguarda le Zone 2 e 3:

- **Zona 2** (Tabella 19): le frequenze di ispezione sono differenziate in funzione del tipo di intervento di natura provvisoria. Inoltre, nel caso di interventi che prevedano la presenza di lamiere grecate, il progettista è tenuto a definire anche la periodicità delle operazioni di smontaggio;

Tabella 19 – Frequenze di ispezione della Zona 2. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

2) Zone con interventi di natura provvisoria			
Tipo intervento	Controlli	Smontaggio lamiere grecate	Frequenze
A	Tipo 1; Tipo 2; Tipo 3	N.A.	ogni 6 mesi per Tipo 1; ogni anno e mezzo per Tipo 2; una tantum dopo 6 mesi da fine lavori per Tipo 3
B1 o B2	Tipo 1; Tipo 2; Tipo 3	Smontaggio nei punti con le venute d'acqua più significative	ogni 6 mesi per Tipo 1; ogni anno e mezzo per Tipo 2; una tantum dopo 6 mesi da fine lavori per Tipo 3
A+B1	Tipo 1; Tipo 2; Tipo 3	Non richiesto per Tipo 1 e Tipo 3; pari al 20%* per Tipo 2	ogni 6 mesi per Tipo 1; ogni anno e mezzo per Tipo 2; una tantum dopo 6 mesi da fine lavori per Tipo 3
D2, E1, E2, E5, F2, G1, G2, G3, G4, G5, H2, L2, N1 e N3	Tipo 1; Tipo 2; Tipo 3	Non richiesto per Tipo 1 e Tipo 3; pari al 20%* per Tipo 2	ogni 6 mesi per Tipo 1; ogni anno per Tipo 2; una tantum dopo 6 mesi da fine lavori per Tipo 3
C1, C2, C5, D1, H1, I, F1 e L1	Tipo 1; Tipo 2; Tipo 3	N.A.	ogni 6 mesi per Tipo 1; ogni anno e mezzo per Tipo 2; una tantum dopo 6 mesi da fine lavori per Tipo 3

- **Zona 3** (Tabella 20): le frequenze di ispezione sono differenziate in funzione della tipologia costruttiva adottata per la ricostruzione del rivestimento nell'ambito dell'intervento a carattere strutturale di natura definitiva. A tal proposito si distingue il caso di ricostruzione del rivestimento con getto in opera realizzato con cassero metallico dal caso di adozione di casseri di tipo prefabbricato.

Tabella 20 – Frequenze di ispezione della Zona 3. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

3) Zone con interventi di natura definitiva			
Tipo intervento	Controlli	Smontaggio Lamiera grecate	Frequenze
SID (demolizione parziale/totale + anelli prefabbricati)	Tipo 1; Tipo 2; Tipo 3	N.A.	ogni 3 anni per Tipo 1; ogni 6 anni per Tipo 2; una tantum dopo un anno dalla realizzazione per Tipo 3
SID (demolizione parziale/totale + getto in opera)	Tipo 1; Tipo 2	N.A.	ogni 3 anni per Tipo 1; ogni 6 anni per Tipo 2

Infine, il sottoprogramma degli interventi, a seguito del rilevamento dello stato di efficienza degli interventi realizzati in galleria, fornisce le indicazioni per la programmazione e le tempistiche dei lavori di ripristino, decisi stabilendo una priorità di intervento finalizzata a razionalizzare e ottimizzare la gestione della manutenzione. In questa sede viene associata una tempistica massima di esecuzione, stabilita in funzione della gravità dell'anomalia riscontrata e ad esso associata, a ciascun intervento di manutenzione definito nel Manuale di Manutenzione. In sede di ispezione, ciascuna anomalia riscontrata dovrà essere classificata secondo il "Nuovo Catalogo dei Difetti" allegato al Manuale MIT a cui deve seguire una classificazione della sua gravità secondo il metodo IQOA (Tabella 21).

Tabella 21 – Classificazione per i difetti civili. Fonte: Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

CLASSIFICAZIONE IQOA Fessure / alterazioni	
1	in buono stato apparente
2	difetti superficiali
2E	difetti superficiali con evoluzione
3	degrado profondo che necessita intervento
3U	degrado profondo che necessita intervento urgente
S	sicurezza per gli utenti

Le massime tempistiche di intervento verranno definite proprio sulla base di questa classificazione:

- **Classe 1 o 2:** nessuna azione prevista;
- **Classe 2E:** nessun intervento di manutenzione previsto ma è necessario segnalare la loro presenza ed estensione;
- **Classe 3:** intervento di ripristino/manutenzione da realizzare nei 6 mesi successivi alla restituzione del rapporto di ispezione;
- **Classe 3U:** intervento di ripristino/manutenzione da realizzare nei 3 mesi successivi alla restituzione del rapporto di ispezione;
- **Classe S:** opera non più fruibile se non dopo l'esecuzione dell'intervento di manutenzione relativo.

8.2.6. Aggiornamento del Piano di Sorveglianza

L'ultimo capitolo fornito dalle LLGG riguarda i criteri adottati per l'aggiornamento del Piano di Sorveglianza, che dovrà avvenire in funzione degli esiti delle verifiche straordinarie volte alla conferma o all'aggiornamento della vita utile nominale dell'intervento temporaneo o in funzione dell'intervallo temporale stabilito per la ripetizione di un ciclo di *assessment* della galleria. Infatti, per una corretta manutenzione e controllo nel tempo delle gallerie in esercizio, è opportuno prevedere, secondo cicli comunque pluriennali, la ripetizione di un'ispezione generale approfondita, finalizzata alla rivalutazione complessiva dell'opera, cui seguirà l'aggiornamento del Piano di Sorveglianza in funzione delle modifiche rilevate. Ad oggi, in attesa dell'emissione delle linee guida del CSLPP, si indica il termine massimo di 6 anni per tale rinnovo.

PARTE

D

Il caso studio della galleria Prapontin

Questa Parte ha come obiettivo la redazione di una proposta del Piano di Sorveglianza della galleria Prapontin dell'Autostrada A32. In seguito ad un capitolo introduttivo in cui si descrive la vita della galleria e tutto ciò che è stato effettuato fino ai giorni nostri, si procede sviluppando i vari passi che sono stati effettuati per giungere ad un documento il più possibile completo, dall'elaborazione dei dati disponibili alla stesura del piano stesso.

9. L'analisi della documentazione esistente sulla galleria

L'ispezione approfondita di *assessment*, anche detta di "punto zero", prevista dal Manuale Ispezioni Gallerie del MIT e finalizzata a valutare "ex novo" lo stato di consistenza del rivestimento in galleria, deve essere preceduta da una fase di analisi di tutta la documentazione storica di base relativa alla costruzione e all'esercizio dell'opera. Questo passo è di fondamentale importanza poiché permette di conoscere in anticipo le condizioni della struttura della galleria mediante un esame approfondito del materiale disponibile, quali documenti di progetto, interventi effettuati, ispezioni precedenti, misurazioni ed indagini strumentali.

Lo studio della documentazione esistente, generalmente, rende possibile l'identificazione delle "zone critiche" della galleria che hanno subito deterioramenti durante la costruzione, l'esercizio o durante le fasi di riparazione. In questo modo, il personale addetto all'ispezione può svolgere un'analisi qualitativa di rischio della galleria nel suo complesso e venire a conoscenza delle tratte particolarmente critiche su cui prestare maggiore attenzione.

In questo caso, invece, questa fase è sostanziale proprio ai fini della redazione del Piano di Sorveglianza stesso: poiché è prevista per il mese di Marzo 2022 una campagna di indagine selettiva diretta all'*assessment* di tutte le gallerie dell'Autostrada A32, al momento della redazione del presente documento non è disponibile l'ispezione di punto zero in seguito alla quale deve essere determinata la gestione dei controlli di manutenzione. Di conseguenza, la proposta del Piano di Sorveglianza per la galleria Prapontin, trattata nella presente Tesi, verrà effettuata basandosi solamente sulle indagini e sulle ispezioni effettuate negli anni passati.

9.1. La documentazione di progetto

Lo studio della documentazione esistente sulla galleria Prapontin si è concentrato inizialmente sull'analisi dei progetti originali, ovvero le Tavole

di Contabilità redatte per conto della SITAF SpA aventi come oggetto: "Tronco IV: Susa (Autoporto) – Bussoleno. Nuovo progetto esecutivo del tratto compreso tra il km 0+000 e il km 5+508.19 per modifica di tracciato. Galleria Prapontin".

La galleria, la quale si sviluppa tra le progressive di lotto 845,807 - 5170,940 e 812,020 - 5219,370 rispettivamente per il fornice di salita e quello di discesa, è stata suddivisa nei seguenti tre tratti:

- Tratto A: dall'imbocco lato Bardonecchia alla P.K. 1860,000;
- Tratto B: dalla fine del tratto A alla P.K. 3479,320 per la canna nord e 3482,060 per la canna sud;
- Tratto C: dalla fine del tratto B all'imbocco lato Torino.

Per ognuno di questi tratti sono stati quindi sviluppati tutti i documenti necessari alla costruzione della galleria, riassumibili nei seguenti elaborati: profili schematici dei campi di intervento, sezioni tipo di scavo in sotterraneo, sezioni tipodegli interventi di preconsolidamento, sezioni longitudinali dei campi di avanzamento, sezioni tipo di intervento, sezioni di rivestimento, planimetrie di dettaglio, planimetrie schematiche, computi, riepiloghi, schemi di posizionamento, disegni d'insieme, ecc.

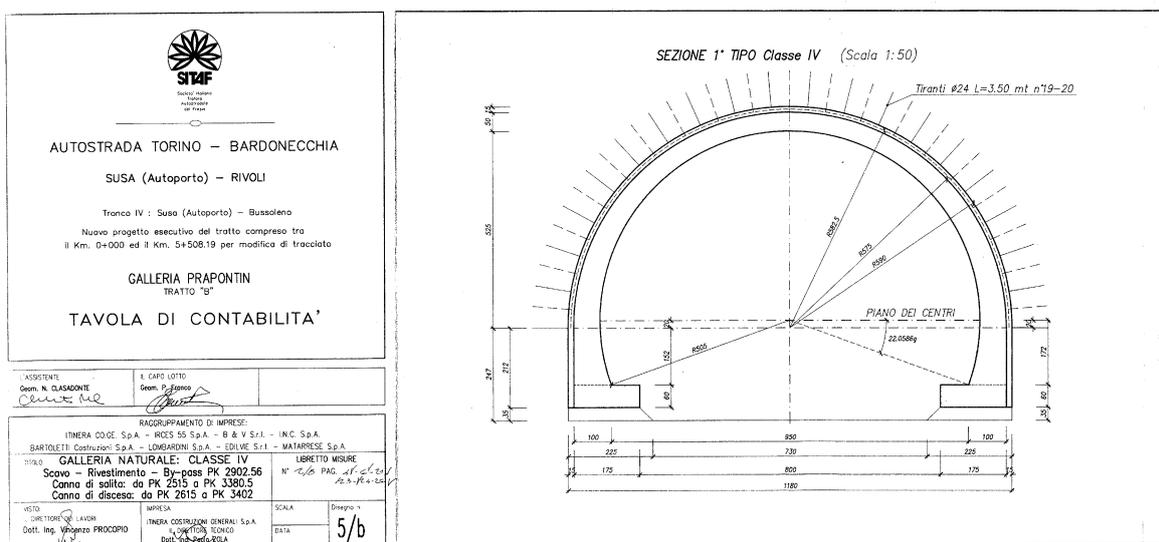


Figura 36 – Esempio di una tavola di contabilità della galleria Prapontin: Disegno n. 5/b relativo alla sezione tipo della galleria naturale in Classe IV. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

9.2. Gli interventi post-costruzione

“Operazioni efficienti e un ambiente cooperativo tra le diverse parti interessate responsabili della galleria e della gestione delle emergenze costituiscono un elemento chiave per la sicurezza e il comfort degli utenti e degli operatori in condizioni normali e in caso di incidente.”³

Considerando il contesto europeo, la Direttiva 2004/54/CE relativa ai "requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea" stabilisce chiaramente che la sicurezza non riguarda soltanto le strutture e i sistemi, ma attribuisce un ruolo speciale alle attività relative all'operatività e alla manutenzione. Per tutto il ciclo di vita della galleria, infatti, è necessario che venga eseguita la manutenzione delle opere di ingegneria civile e dei sistemi presenti, con l'obiettivo finale di garantire un livello appropriato di servizio e di qualità agli utenti. Il raggiungimento di tale obiettivo dipende ovviamente dalla natura e dalla performance generale dei sistemi e dei componenti. Quando i sistemi della galleria non soddisfano più le esigenze dell'operatore e i requisiti normativi, o quando cambia la natura o il livello del traffico, può quindi rendersi necessario riqualificare o ristrutturare la galleria.

Con questo proposito, negli ultimi vent'anni la galleria Prapontin è stata oggetto di alcuni interventi finalizzati a garantire un livello minimo di sicurezza agli utenti della strada e, quindi, prevenire situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria. In particolare, gli interventi post-costruzione hanno interessato aspetti differenti dell'opera: il primo, nell'anno 2002, ha riguardato una ristrutturazione dell'impianto di illuminazione al fine di realizzare impianti funzionali e flessibili in conformità alle vigenti prescrizioni normative e legislative. Nell'anno 2012, invece, dopo una campagna di rilievi di sagoma, sono stati effettuati una serie di interventi di riprofilatura finalizzati all'adeguamento delle altezze utili all'interno della galleria. Infine, nel medesimo anno, sono stati realizzati una serie di approfondimenti conoscitivi dello stato di fatto e, successivamente, di attività finalizzate all'innalzamento delle condizioni di sicurezza lungo la galleria.

³ Fonte: PIARC Manuale delle gallerie stradali – Cap. 4. Operatività e manutenzione

Al fine di ottenere un quadro generale della storia della galleria Prapontin, tali interventi vengono descritti sinteticamente nei sottoparagrafi seguenti (per informazioni più specifiche si faccia riferimento ai documenti di progetto originali). Si evidenzia inoltre che i documenti relativi a questi ultimi due interventi hanno permesso di ricavare gran parte delle informazioni utilizzate per redigere la proposta del Piano di Sorveglianza oggetto della presente Tesi di Laurea.

9.2.1. La ristrutturazione dell'impianto di illuminazione

Nel luglio del 2002 è stato avviato un progetto esecutivo degli impianti elettrici, speciali e relative opere edili finalizzate alla ristrutturazione totale dell'impianto di illuminazione della galleria Prapontin. I criteri di progetto su cui si è basato l'intervento in oggetto sono stati i seguenti:

- Realizzazione degli impianti in conformità alle vigenti prescrizioni normative e legislative;
- Realizzazione di impianti funzionali, flessibili e facilmente manutenibili;
- Realizzazione di impianti basati sull'uso di componenti affidabili;
- Predisposizione di impianti che consentano frazionamenti, eventuali prossimi ampliamenti ed il futuro interfacciamento con il sistema di automazione e supervisione.

L'impianto di illuminazione è stato suddiviso su più fonti di alimentazione, ovvero in privilegiata sottesa a gruppi elettrogeni per l'illuminazione normale, da gruppi di continuità statici (UPS) per l'alimentazione di sicurezza, con funzione no-break per i tempi di commutazione da rete pubblica a rete privilegiata e viceversa. Inoltre, il progetto ha previsto l'adeguamento delle cabine elettriche di trasformazione MT/BT a servizio dell'impianto luce e di alcune cabine di ventilazione, il quale ha comportato la riorganizzazione strutturale delle cabine luce esterna con conseguente ampliamento edile tra i fornicci e la creazione di nuovi locali. Infine, l'impianto luce della galleria è stato dotato di un sistema di regolazione automatica del livello di illuminamento, sia per compensare i livelli esterni (luce diurna e notturna), sia per adeguare lo stesso in funzione del reale traffico veicolare in transito all'interno della galleria.

9.2.2. L'adeguamento delle sagome di riferimento

A seguito della richiesta del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Commissione Permanente per le Gallerie (cfr. nota prot. 9447 del 13/10/2011), sono stati avviati all'interno di tutte le gallerie della Autostrada A32 Torino-Bardonecchia i rilievi di sagoma con la tecnologia "laser scanner", così da poter conoscere in modo dettagliato lo stato di ciascuna galleria ed i franchi altimetrici ivi garantiti. Successivamente a tale verifica, è stato quindi effettuato il progetto esecutivo relativo agli interventi di adeguamento delle sagome all'interno delle gallerie, tra cui anche la Prapontin oggetto del presente documento.

In particolare, la progettazione si è sviluppata secondo diverse fasi successive: dopo un'analisi della documentazione esistente che ha permesso la predisposizione del piano sinottico delle due canne della galleria, si è proceduto all'elaborazione dei dati provenienti dal rilievo laser scanner, ottenendo così una serie di sezioni trasversali disposte ad un interasse di circa 24 metri (184 sezioni per la canna di discesa e 180 per quella di salita). Su tali sezioni è stata quindi eseguita la verifica delle altezze utili per individuare eventuali sotto-profili: questo controllo viene effettuato sovrapponendo alle sezioni disponibili il gabarit (Figura 37), ovvero una sagoma rettangolare di riferimento che misura 4,75 m di altezza a distanza di 3,75 m dall'asse stradale.

Durante tale analisi sono stati individuati dei tratti in cui si evidenzia un'intersezione tra il profilo di intradosso del rivestimento e il gabarit stesso. Poiché tali sezioni critiche sono troppo distanti al fine di definire correttamente l'entità del sotto-profilo e l'estensione della zona di intervento, sono state eseguite delle sezioni d'infittimento ad un interasse di circa 2 metri immediatamente a valle e a monte del punto critico. Infine, per poter definire le tipologie di intervento più idonee, in alcune sezioni critiche sono state eseguite ulteriori indagini di approfondimento:

- Georadar: per valutare lo spessore del rivestimento;
- Pacometro/georadar: per valutare l'eventuale presenza di ferri di armatura;
- Martinetto piatto: per valutare lo stato tensionale della galleria.

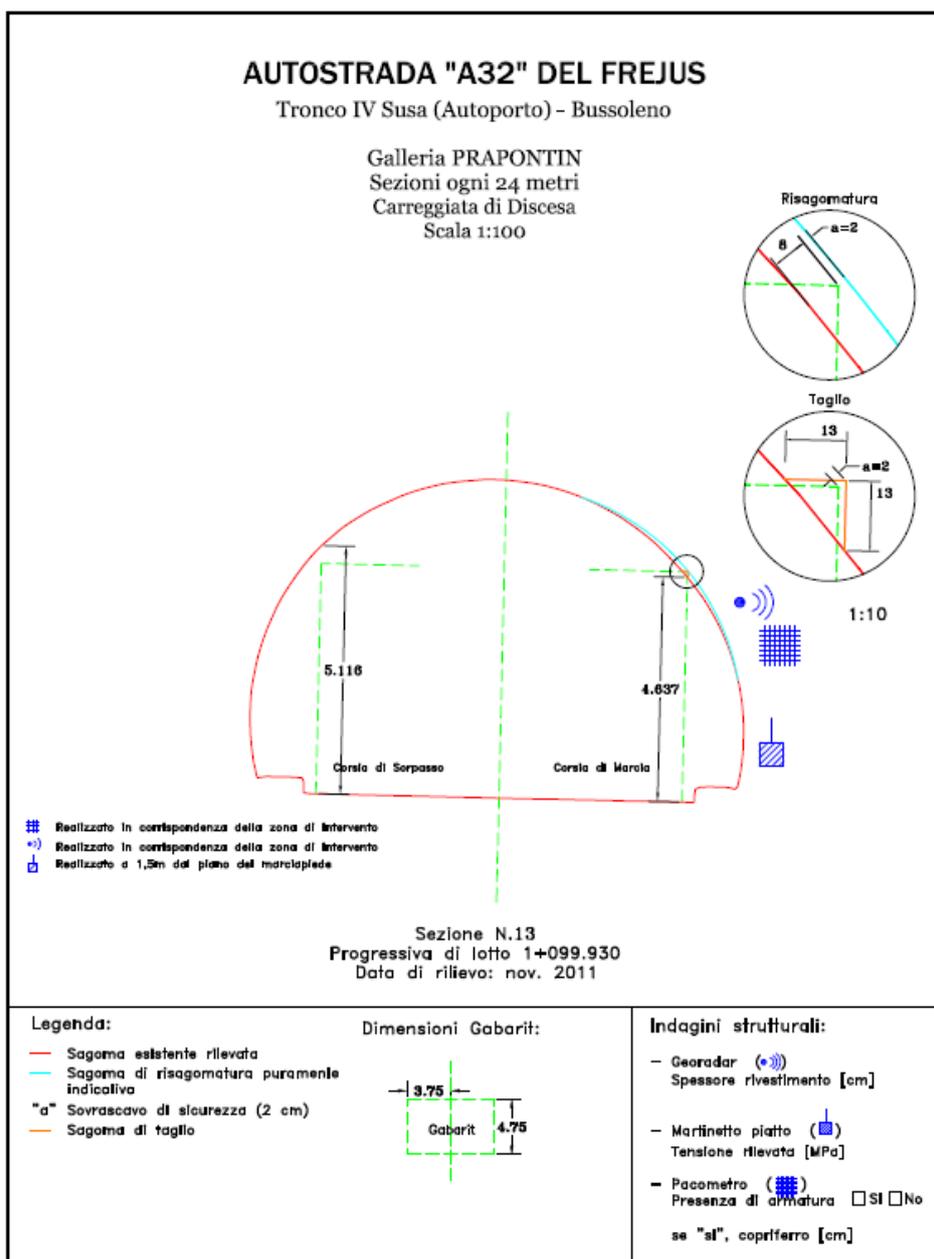


Figura 37 – Esempio della verifica delle altezze utili di una sezione critica della canna di discesa della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SITAF SpA

Le fasi appena descritte hanno permesso di determinare le attività necessarie al recupero delle altezze utili minime, differenziandole in due modalità di intervento:

- La riprofilatura del rivestimento mediante l'utilizzo di frese rotanti puntuali;
- La riprofilatura del rivestimento mediante l'utilizzo di dischi diamantati (da prevedersi solo per le zone in cui è presente ferro

di armatura nel rivestimento e lo spessore dell'intervento è superiore al copriferro).

Infine, l'ultimo step ha riguardato la finitura superficiale delle zone oggetto di intervento: al termine della riprofilatura e della successiva verifica topografica delle altezze, è stata infatti eseguita una verifica di integrità delle porzioni di rivestimento fresate/tagliate, provvedendo a rimuovere eventuali elementi instabili presenti, e una rasatura della superficie mediante malte tixotropiche fibrorinforzate.

9.2.3. L'innalzamento delle condizioni di sicurezza

Le gallerie presenti lungo l'Autostrada A32 ricadono nell'ambito di applicazione della sopracitata Direttiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 29 aprile 2004, recepita dallo Stato Italiano mediante il D. Lgs. 5 ottobre 2006 pubblicato sulla Gazzetta ufficiale serie Generale n. 264 del 9 ottobre 2006. Pertanto, in seguito alla richiesta del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Commissione Permanente per le Gallerie, in tutte le gallerie dell'A32 sono stati avviati una serie di rilievi puntuali finalizzati a conoscere in modo dettagliato lo stato di ciascuna galleria in rapporto ai livelli di sicurezza da garantire nei confronti dell'utenza autostradale. La concessionaria SITAF SpA ha quindi provveduto ad elaborare un'articolata proposta di interventi correttivi volti ad incrementare gli standard di sicurezza dell'autostrada, che per la galleria Prapontin riguardano le seguenti macrovoci:

- Geometria delle banchine pedonabili di emergenza;
- Protezione dei by-pass di collegamento tra i fornic;
- Miglioramento della percezione dei limiti di carreggiata;
- Impianti elettrici.

Come nell'intervento discusso al sottoparagrafo precedente, anche in questo caso sono state effettuate diverse attività che, preliminarmente, hanno riguardato una serie di verifiche e approfondimenti conoscitivi dello stato di fatto finalizzati a definire le tipologie d'intervento da eseguire. In particolare, sono stati effettuati i rilievi topografici dei marciapiedi, così da fornire un quadro delle loro dimensioni e della

relativa variabilità, i quali sono stati successivamente integrati da ulteriori indagini topografiche e georadar relative al posizionamento delle tubazioni dei sottoservizi esistenti all'interno dei marciapiedi, alla loro profondità e alla presenza dei ferri d'armatura. Infine, sono stati effettuati dei carotaggi per verificare lo stato di carbonatazione del calcestruzzo e la penetrazione degli ioni cloruro all'interno della matrice cementizia, oltre che la presenza di cloruri, così da determinare il loro stato di degrado.

Sulla base di quanto rilevato dalle prove, sono stati definiti degli interventi volti al risanamento complessivo dei marciapiedi, anche attraverso lavorazioni atte ad asportare completamente le porzioni di calcestruzzo ammalorato, finalizzati sia a ricondurre la geometria del ciglio lato strada delle banchine rialzate di emergenza all'altezza originaria di 20 cm (Figura 38), sia ad evitare le discontinuità dovute alle nicchie presenti nella banchina di destra in corrispondenza delle caditoie.

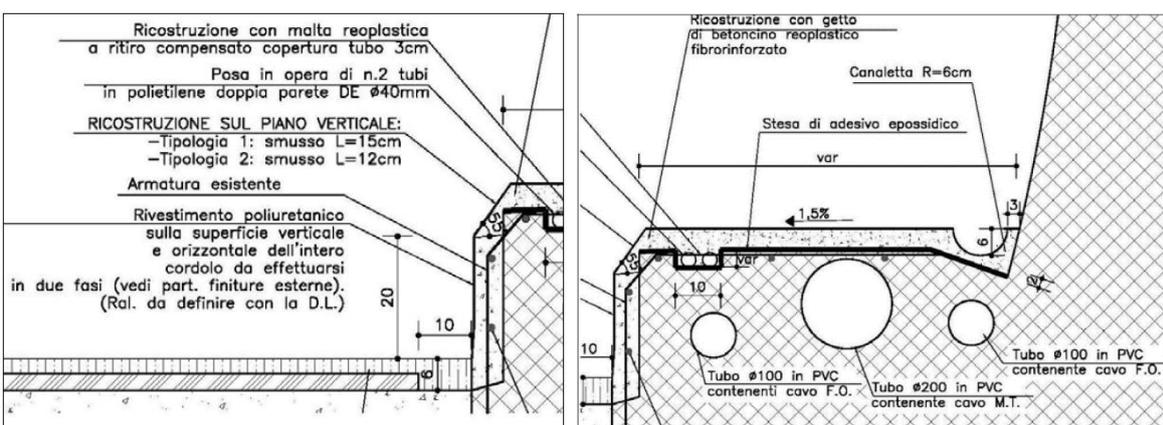


Figura 38 – Particolare della ricostruzione dello smusso del marciapiede e della parte orizzontale a seguito della scarifica della superficie all'interno della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

La seconda tipologia di interventi effettuata all'interno della galleria Prapontin riguarda la protezione dei by-pass di collegamento tra i forni: la Committenza ha condotto uno studio di approfondimento tecnico volto a determinare una possibile soluzione per proteggere gli spigoli esposti al traffico presenti in corrispondenza dei bypass. Tale soluzione è stata individuata nell'installazione di un apposito attenuatore d'urto re-direttivo di "classe 80" a filo del marciapiede esistente, il quale presenta il vantaggio di non richiedere modifiche alla geometria della galleria, facilità di installazione ed un rapido ripristino in caso di impatto.

Al fine di ottenere un incremento generale delle condizioni di sicurezza lungo le gallerie autostradali, ricercando un miglioramento della percezione da parte dell'utenza dei limiti di carreggiata, la SITAF ha inoltre programmato le seguenti lavorazioni:

- Realizzazione di un impianto segnaletico led a marciapiede (Figura 39);



Figura 39 – Esempio di installazione LED a marciapiede condotta nella galleria Perosa della A32. Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

- Rifacimento parziale degli ultimi 3 cm di usura della pavimentazione stradale;
- Esecuzione della segnaletica orizzontale di margine a rilievo con effetto sonoro;
- Verniciatura con colore chiaro dell'alzata dei marciapiedi.

Infine, si è provveduto all'adozione di una serie di provvedimenti volti a garantire sia un miglioramento nelle prestazioni del sistema di gestione degli impianti, sia un aumento delle protezioni agli apparati impiantistici da eventuali danneggiamenti per effetto di incidenti. È stata quindi realizzata una protezione dagli incendi dei cavi MT all'interno dei pozzetti di ispezione, mediante fornitura e posa in opera di cuscinetti o sacchetti in tessuto minerale riempito con una combinazione di materiali in granuli che si espandono per l'azione del calore, diventando un blocco solido resistente al fuoco REI 180.

9.3. Le indagini strumentali

Nel corso del seguente documento è già stata introdotta più volte l'importanza di svolgere all'interno delle gallerie una serie di controlli mirati in sito al fine di constatare il reale stato di consistenza dell'opera. Inoltre, la Circ. Min. Infrastrutture e Trasp. 07/07/2020, n. 269 (vedi sottoparagrafo 6.2.2) ha introdotto la possibilità di indagare lo stato delle infrastrutture con sistemi di rilevazione strumentali innovativi, i quali possono costituire un utile strumento di indagine.

In particolare, all'interno della galleria Prapontin sono state svolte due tipologie di indagini strumentali, le cui modalità sono state precedentemente descritte nel paragrafo 7.1:

- Con TSS, svolta nell'anno 2019 dalla SINA SpA.
- Con georadar, svolta nell'anno 2020 dalla SOCOTEC Italia Srl.

Relativamente alla prima ispezione approfondita, la strumentazione utilizzata consiste in un Tunnel Scanner System 360° con applicativi Tuvieview e Tunnel Inspector. Le principali caratteristiche tecniche dell'apparecchiatura possono essere riassunte in:

- Velocità massima di rotazione dello scanner: 150 giri al secondo;
- Risoluzione massima del rilievo fotografico: 10000 pixel per scansione;
- Risoluzione massima del rilievo profilometrico: 10000 pixel per scansione;
- Passo di campionamento: circa 1 sezione al cm;
- Acquisizione in contemporanea dei dati finalizzati al rilievo fotografico e profilometrico;
- Possibilità di riconoscimento degli oggetti posti a una distanza fino a 15 metri;
- Temperatura d'esercizio compresa tra 0° e 40°;
- Velocità di traslazione longitudinale in acquisizione: 3.5 Km/h;
- Tolleranza delle misure contenuta al di sotto dello 0.3%.

Le risultanze di tale ispezione hanno infine prodotto i seguenti elaborati:

- “Schede ispezione”, riportanti le principali anomalie interpretate sulla base dell'analisi delle immagini laser, le quali contengono la legenda e le schede grafiche in formato A3 e ad un passo di 40 m (vedi Figura 28);
- “Tabulati e grafici di quantificazione anomalie”, suddivise in blocchi pari a 10 e/o 100 m per ciascuna anomalia (Figura 40);

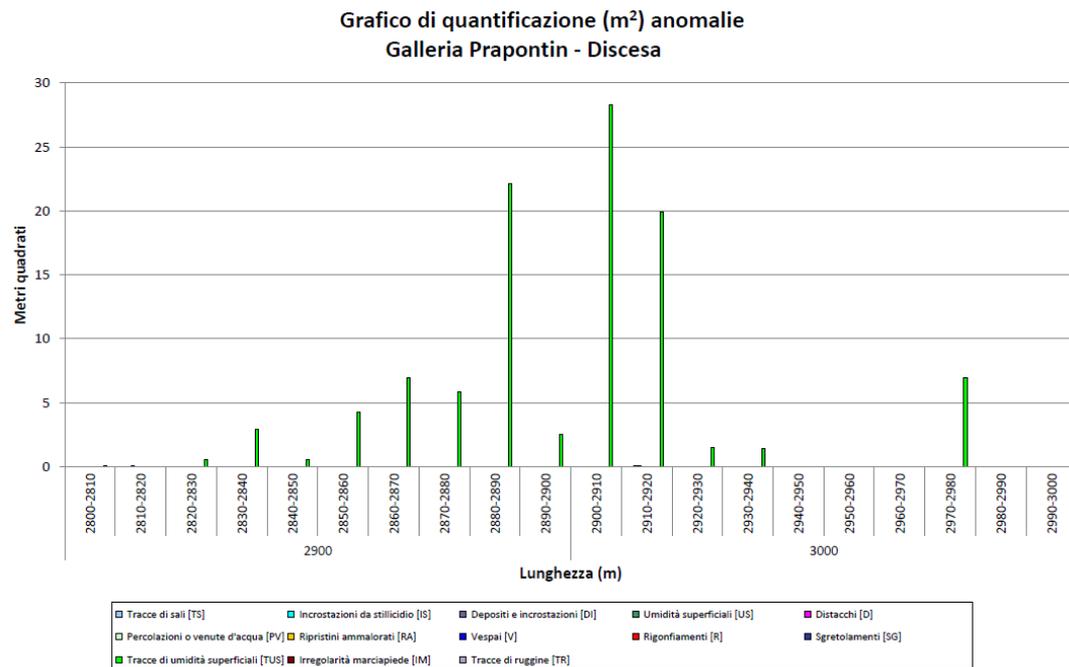


Figura 40 – Grafico di quantificazione in m² delle anomalie per una tratta della canna di discesa della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SINA SpA

- “Rappresentazioni grafiche dei dati geometrici della piattaforma stradale e dei gabarit”;
- “Estrapolazione ed approfondimenti aree d’interesse”, contenenti un estratto di sintesi delle immagini rappresentative (vedi
- Figura 29).

L'indagine georadar, invece, è stata condotta lungo specifici allineamenti longitudinali (uno a circa 45° alla sinistra della chiave della galleria, uno sulla chiave e uno a circa 45° a destra della chiave) e integrata con apposite perforazioni del rivestimento per la calibrazione del segnale. Tale indagine è stata eseguita utilizzando un sistema radar di tipo Hi-MOD della “IDS - Ingegneria dei Sistemi S.p.A.”, costituito da:

- Computer laptop Panasonic Toughbook CF 19;
- Unità di controllo antenne DAD K1 a 2 canali;
- Antenna di tipo Hi-Mod multifrequenza 400/900 MHz;
- Rotella encoder per la misurazione delle distanze;
- Alimentazione: 12 Volt;
- Cavo multipolare.

I radargrammi ottenuti rappresentano la sezione della galleria del profilo indagato. Sull'asse orizzontale sono rappresentate le distanze, mentre sull'asse verticale si trovano le profondità considerando come zero la superficie su cui il georadar striscia. Le risultanze di tale ispezione hanno quindi prodotto tre tipologie di tavole:

- I profili longitudinali non interpretati;
- I profili longitudinali con l'interpretazione del tecnico (Figura 41);

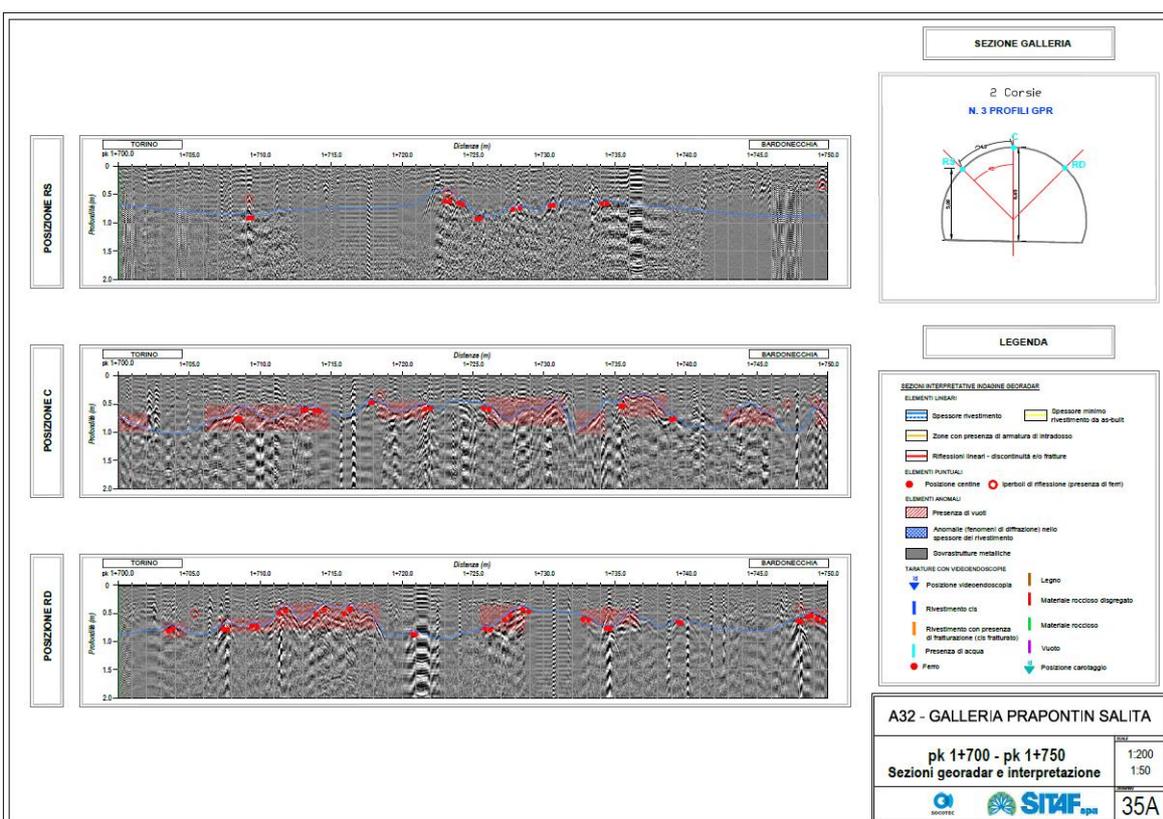


Figura 41 – Restituzione grafica dei risultati dell'indagine georadar (sezioni georadar e interpretazione) per una tratta della canna di salita della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da SOCOTEC Italia Srl

- I profili longitudinali interpretati.

In ogni scheda grafica di formato A3 è riportata la restituzione dell'indagine, raffigurante con un passo di 50 metri i tre profili analizzati (rene sinistro, chiave e rene destro), e la legenda, la quale riporta gli elementi interpretati (paramento esterno del rivestimento in calcestruzzo, discontinuità/disomogeneità interne al rivestimento, vuoti, centine, presenza di ferri, tratti di galleria armata, ecc.)

9.4. Le ispezioni di sorveglianza

Questo ultimo paragrafo relativo all'analisi della documentazione esistente sulla galleria Prapontin tratta del piano di indagini necessario per acquisire un adeguato grado di conoscenza dello stato di conservazione delle gallerie, il quale deve essere necessariamente propedeutico alla successiva valutazione della sicurezza strutturale oltreché della circolazione autostradale. Il piano di azione generalmente viene sviluppato in più fasi:

1. Ispezione preliminare della struttura;
2. Rilievo con laser scanner, termografico e fotografico ad alta risoluzione;
3. Caratterizzazione profonda della struttura.

In questo caso, sono disponibili i documenti relativi alle ispezioni di sorveglianza trimestrali e annuali effettuati negli ultimi due anni all'interno della galleria in oggetto, le quali sono finalizzate ad illustrare i principali difetti presenti ed effettuare proposte su misure di sicurezza, indagini ed interventi.

La prima ispezione di sorveglianza è stata effettuata nel mese di Maggio 2020 ed è conforme alla "Circolare n. 6736-61-A1 del 19 Luglio 1967 – Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali". Nella relativa relazione viene segnalato che, in entrambe le canne della galleria, non sono state riscontrate evoluzioni o ulteriori degradi rispetto a quanto emerso dagli esiti del monitoraggio approfondito condotto l'anno precedente con l'ausilio della tecnologia TSS (vedi paragrafo 9.3).

Qualche mese più tardi, a Settembre/Ottobre 2020, è stato invece effettuato un monitoraggio approfondito annuale secondo il “Manuale Ispezioni Gallerie – anno 2020” emesso dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. La caratterizzazione profonda della galleria è definita da una prima fase propedeutica conoscitiva, in cui viene studiata la documentazione “as-built”, ed una fase esecutiva ispettiva: dopo aver suddiviso la galleria in “conci di ispezione” di lunghezza pari a 20 metri, è stata quindi svolta l’ispezione in fasce orarie notturne e in totale assenza di traffico. Ciascuna ispezione è stata condotta da un team ispettivo composto da due squadre, per un totale di sei ispettori (Figura 42), con il compito di visionare i piedritti, le reni e la calotta contemporaneamente.

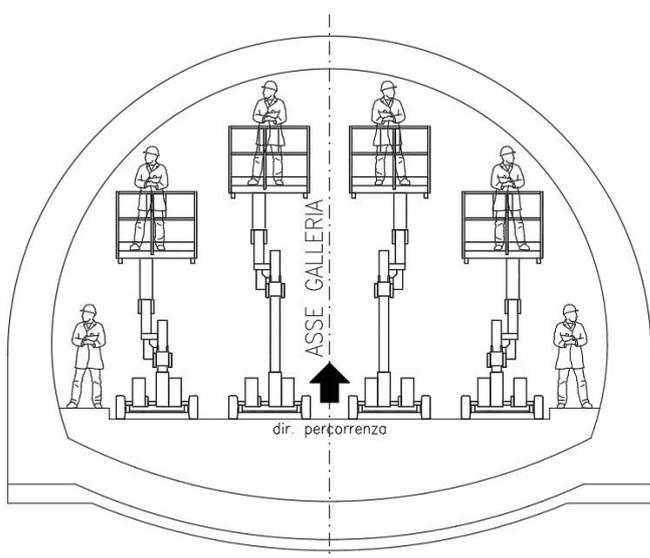


Figura 42 – Disposizione degli ispettori in sezione durante l’ispezione approfondita di settembre/ottobre 2020 all’interno della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

Al fine di annotare l’ubicazione e la dimensione dei difetti in loco sono state utilizzate le Schede Identificative di Ispezione (SII, Figura 43), ovvero dei supporti cartacei/digitali in cui sono riportate le seguenti informazioni: data e fascia oraria dell’ispezione, tratta autostradale, nome e direzione della galleria, identificazione del concio ispettivo, tipologia di struttura esaminata, eventuale personale presente, nome degli ispettori e note eventuali. Durante l’ispezione, gli ispettori, mediante un controllo visivo e sonoro della superficie della galleria, identificano e annotano sulla scheda i seguenti parametri:

- Tipo di difetto in relazione al catalogo dei difetti;
- Valutazione IQOA del difetto;

- Ubicazione del difetto;
- Forma ed estensione del difetto.

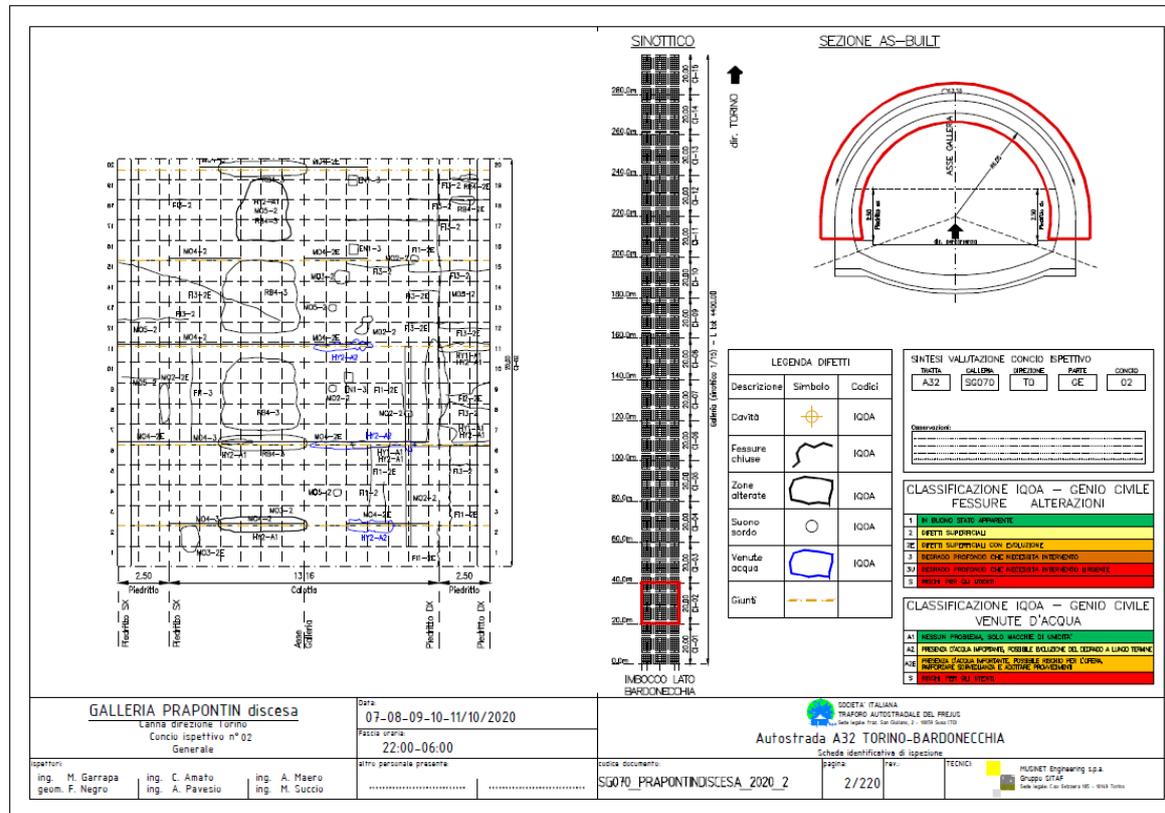


Figura 43 – Scheda Identificativa di Ispezione di un tratto della canna di discesa della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

L'ispezione ha rilevato, a titolo di esempio non esaustivo, la presenza di fessurazioni, calcificazioni delle lesioni, umidità superficiale, efflorescenze, percolazioni o venute d'acqua, distacchi superficiali, esfoliazioni, rigonfiamenti corticali del calcestruzzo, presenza di vespai corticali, tracce di ruggine, ferri a vista e reti di protezione. I risultati ottenuti, incrociati con i rapporti tecnici delle ispezioni eseguite con Tunnel Scanner System (TSS) nel 2019, sono stati quindi organizzati in quattro tabelle differenti contenenti il numero di difetti, le aree dei difetti suddivisi tra estensivi e lineari e la percentuale dei difetti rispetto alla superficie del concio, il tutto con le relative votazioni e per ciascun concio di ispezione. Infine, sono stati riportati anche i grafici riassuntivi relativi alle difettologie riscontrate in galleria (Figura 44):

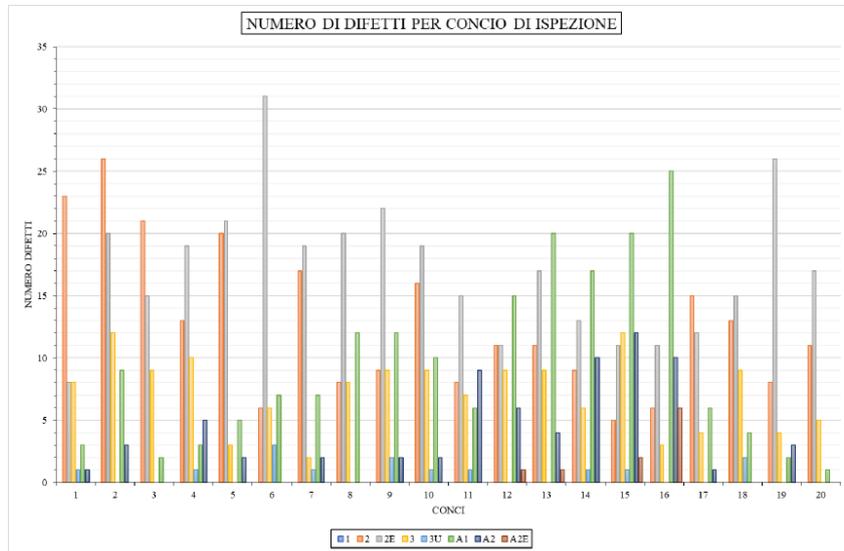


Figura 44 – Grafico riassuntivo del numero di difetti per concio di ispezione di un tratto della canna di discesa della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

L'ultima ispezione effettuata, di tipo trimestrale, risale ai mesi di Febbraio/Marzo 2021 ed è stata eseguita anch'essa secondo la "Circolare n. 6736-61-A1 del 19 Luglio" del Ministero dei Lavori Pubblici ed incrociando i risultati con i rapporti tecnici delle ispezioni eseguite con Tunnel Scanner System (TSS) nel 2019.

Tale ispezione preliminare ha l'obiettivo di disporre un controllo visivo delle principali criticità che interessano la galleria ed è previsto il controllo dell'integrità degli eventuali pannelli di rivestimento, il rilievo dei difetti che interessano le parti a vista dell'arco della galleria e la pronta segnalazione al referente tecnico di eventuali anomalie di maggiore rilievo per le quali si rendesse necessario un intervento tempestivo di consolidamento. Ciascuna ispezione, svolta in notturna e con chiusura parziale del traffico, è stata condotta da un team ispettivo composto da una squadra formata da tre ispettori (Figura 45), che avevano il compito di visionare i due

piedritti, le reni e la calotta contemporaneamente in modo tale da procedere nella direzione di marcia.

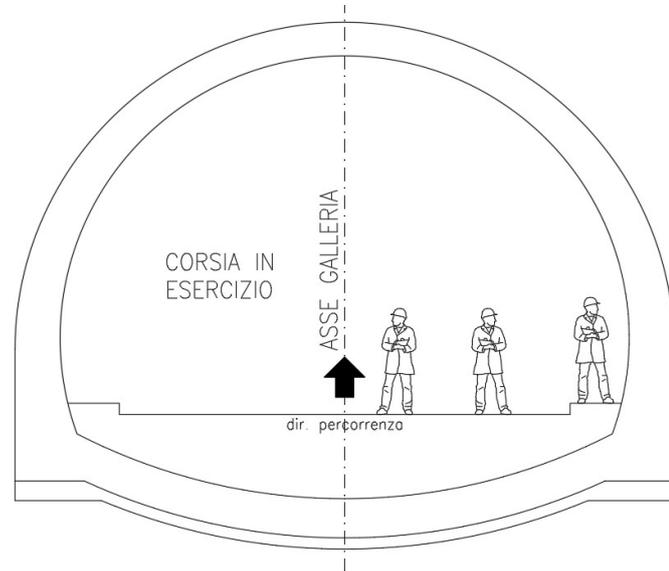


Figura 45 – Disposizione degli ispettori in sezione durante l'ispezione preliminare di febbraio/marzo 2021 all'interno della galleria Prapontin. Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

Durante l'ispezione, gli ispettori, mediante un controllo visivo della superficie della galleria, hanno rilevato in prevalenza i medesimi difetti descritti precedentemente, i quali sono stati annotati in una scheda ispettiva contenente:

- Data di ispezione;
- Nome e direzione della galleria;
- Nome degli ispettori;
- Tipologia di struttura esaminata;
- Codice e voto IQOA del difetto rilevato;
- Metrica a cui è stato rilevato il difetto;
- Note eventuali.

Tabella 22 – Scheda ispettiva di un tratto della canna di discesa della galleria Prapontin.
 Fonte: Elaborati prodotti da Musinet Engineering SpA

GALLERIA:				Prapontin discesa		
ISPEZIONE:				I TRIMESTRE		
DATA ISPEZIONE:				01/03/2021		
ISPETTORI:				Amato - Rasetti - Vezzano		
METRICA	MSX	CAL	MDX	DIFETTO	VOTO	NOTE
22	X			MO4	3	
58		X	X	MO4	3U	
115		X		MO4	3U	
143	X	X	X	FI5	3	
165		X		MO4	3	
187		X		RB4	3	
199		X		FI3	3	
199		X		HY1	A2	
199		X		HY2	A2	
237		X	X	MO4	3	
237		X	X	HY1	A2	
237		X	X	HY2	A2	
287		X		MO4	3U	
287		X		HY1	A2	
287		X		HY2	A2	
316		X		FI3	3	
316		X		HY1	A2	
316		X		HY2	A2	
449		X	X	FI3	2E	
466		X		FI3	3	Bypass
466		X		HY1	A2	Bypass
466		X		HY2	A2	Bypass
471		X		FI1	3	
471		X		HY1	A2	
471		X		HY2	A2	
485		X		MO4	3	
485		X		FI1	3	
485		X		HY1	A2	
485		X		HY2	A2	
621		X	X	MO4	3	
621		X	X	HY1	A2	
621		X	X	HY2	A2	
683		X		MO4	3	
688		X		FI5	3	
688		X		HY1	A2	
688		X		HY2	A2	
728	X			MO4	3	
764		X		MO4	2E	
764		X		HY1	A2	
764		X		HY2	A2	
789		X		FI3	2E	
789		X		HY1	A2	

10. Lo sviluppo della proposta del Piano di Sorveglianza

L'oggetto della presente Tesi di Laurea consiste nella redazione di una proposta del Piano di Sorveglianza per la galleria Prapontin dell'Autostrada A32 Torino-Bardonecchia. In seguito ad una serie di capitoli all'interno dei quali sono state introdotte le principali nozioni sulle gallerie, in cui si è percorsa l'evoluzione che ha avuto la normativa in merito, sono state analizzate le nuove direttive pubblicate al fine di raggiungere una maggior sicurezza in galleria e si è studiata la documentazione disponibile sul caso studio in esame, si è infine giunti al capitolo conclusivo relativo alla stesura vera e propria del piano.

Tale documento, come detto precedentemente, si basa su un nuovo approccio per le attività di sorveglianza e gli interventi di manutenzione delle gallerie, finalizzate ad aumentarne la sicurezza e migliorarne l'efficienza. Esso deve essere realizzato a seguito dell'ispezione approfondita di *assessment* effettuata per valutare "ex novo" lo stato di consistenza dei rivestimenti della galleria. Tuttavia, come già riportato, poiché l'ispezione di "punto zero" all'interno della galleria Prapontin è prevista per il mese di Marzo 2022, alla data di elaborazione del presente documento non è ancora disponibile. Di conseguenza, la valutazione del reale stato di consistenza della galleria necessario alla redazione del piano è avvenuta basandosi sulle ispezioni svolte negli ultimi anni. Per questo motivo, il Piano di Sorveglianza della galleria Prapontin effettuato rappresenta solamente una proposta di quello reale, il quale potrà essere realizzato in seguito all'ispezione approfondita con un aggiornamento di tale documento.

Il lavoro di composizione del piano è stato quindi caratterizzato da una parte iniziale riguardante l'analisi e la rielaborazione dei dati ottenuti dai documenti sopracitati. In seguito, sulla base di tali risultati e appoggiandosi alle relative Linee Guida, si è proceduto alla redazione di un Piano di Sorveglianza il più possibile dinamico e facilmente riutilizzabile in futuro.

10.1. L'elaborazione dei dati disponibili

Tra tutti i dati forniti dalle innumerevoli indagini e ispezioni svolte in passato all'interno della galleria Prapontin, si è deciso di concentrare l'attenzione sullo stato di conservazione del rivestimento definitivo, al fine di poter definire una programmazione dei controlli e degli eventuali interventi di manutenzione da effettuare per mantenere adeguate le performances dell'opera stessa.

In particolare, sono stati analizzati tre fattori differenti caratteristici della condizione del calcestruzzo: il suo spessore, la presenza di difetti superficiali e il suo stato tensionale. Per ognuno di essi, sono state quindi realizzate delle tabelle specifiche (vedi Allegati 1, 2, e 3) e, infine, i dati più significativi di ciascuna di esse sono stati riassunti in una tabella generale (vedi Allegato 4), così da evidenziare le progressive in corrispondenza delle quali la situazione risulta essere maggiormente critica e necessita di controlli più approfonditi. Nei sottoparagrafi successivi si esplicitano le analisi svolte, per ciascun fornice della galleria, e il percorso che ha portato alla realizzazione di ciascuna tabella.

10.1.1. Lo spessore del rivestimento

Il primo fattore analizzato è lo spessore del rivestimento definitivo: tale parametro è di fondamentale importanza in quanto la presenza di spessori ridotti rappresenta una delle principali cause che portano alla formazione di fessurazioni nei rivestimenti, ovvero ad una riduzione della sua funzionalità strutturale e/o architettonica. Inoltre, eventuali sottospessori nella volta della galleria possono rivelarsi particolarmente problematici relativamente all'interferenza con gli impianti.

L'analisi di questo dato è stata effettuata studiando lo stato attuale del rivestimento definitivo, ottenibile mediante le indagini georadar, e confrontandolo con lo spessore del rivestimento da progetto, visibile dalle tavole di contabilità originarie e, in particolare, dalle sezioni tipo e dalle classi di scavo della galleria. Sulla base di tali informazioni, la tabella relativa alla verifica dello spessore del rivestimento definitivo è stata suddivisa in due parti:

- La **Parte 1**: contiene le informazioni ottenute dalle indagini georadar effettuate dalla società SOCOTEC Italia Srl nel 2020 (vedi paragrafo 9.3);
- La **Parte 2**: contiene le informazioni ottenute dalle indagini georadar effettuate in corrispondenza degli interventi di adeguamento delle sagome in galleria progettati dalla Lombardi Ingegneria Srl (vedi sottoparagrafo 9.2.2).

La Parte 1 di tale tabella (Tabella 24) riporta, sia per la canna di salita che per quella di discesa, i seguenti dati (vedi Allegato 1: Tabella A.1.1_S e Tabella A.1.1_D):

- **Pk attuale**: nella direzione di marcia, ovvero da Torino verso Bardonecchia per la canna di salita e viceversa per quella di discesa, sono riportate le progressive ad intervalli di 50 metri (poiché i radargrammi ottenuti dai georadar sono rappresentati in tavole aventi tale passo), nonché le progressive in corrispondenza della quali si ha un cambio della tipologia del rivestimento;
- **Pk di lotto**: le medesime progressive del punto precedente sono riportate anche rispetto alle progressive di lotto del progetto originale;
- **Pk iniziale e finale del tratto indagine**: per ogni tratto di 50 metri sono riportate le sue progressive di inizio e fine rispetto all'imbocco della galleria, nonché, anche in questo caso, i punti in cui si ha un cambio della tipologia del rivestimento;
- **Tipologia del rivestimento**: si riporta se il rivestimento è di tipo tronco conico o cilindrico e tale dato viene correlato dalla classe di scavo e dall'eventuale presenza dell'arco rovescio;
- **Spessore del rivestimento da progetto**: funzione della classe di scavo di cui al punto precedente;
- **Zona non indagata**: zone oscurate all'interno delle tavole interpretative del georadar poiché in corrispondenza di zone del rivestimento con presenza di canalette di captazione delle acque, griglie metalliche o, più in generale, tratti che, a causa della presenza di rivestimenti superficiali, risultano impossibili da interpretare con un sufficiente grado di affidabilità. Inoltre, confrontando tali zone con i risultati delle indagini del TSS (vedi

paragrafo 9.3), è stata fornita una motivazione, dove possibile, della causa per cui tali tratti non sono stati indagati (Tabella 23);

- **Tratti con spessori del rivestimento non rispettati:** su ogni tratto di 50 metri (o meno in corrispondenza dei cambi della tipologia del rivestimento) è stata effettuata un'analisi della lunghezza in cui lo spessore del rivestimento restituito dal georadar è minore rispetto a quello di progetto. Tale dato è stato riportato per i tre profili longitudinali analizzati dal georadar (rene sinistro, chiave e rene destro) e, per ognuno di questi, sia in metri lineari, sia in percentuale rispetto alla lunghezza del tratto in questione;
- **Entità dei sottospessori:** gli spessori ridotti evidenziati dal georadar sono stati analizzati e catalogati in base alla percentuale di sottospessore rispetto allo spessore del rivestimento di progetto in quel punto. Sulla base di questo, ad ogni tratto è stato assegnato un codice, accompagnato da un colore, compreso tra 1 (meno grave, colore verde) e 4 (più grave, colore rosso), come meglio rappresentato nella legenda alla Tabella 23.

Tabella 23 – Legenda delle Tabelle A.1.1_S e A.1.1_D relative alla “Verifica dello spessore del rivestimento definitivo – Parte 1” della galleria Prapontin.

LEGENDA	
Entità	Sottospessore (% rispetto allo spessore del rivestimento nei vari tratti)
1	0-25%
2	25-50%
3	50-75%
4	75-100%
Zone non indagate	
	Becco di fauto
	By-pass/piazzole
	Impianti
	Incognito
ACRONIMI	
RS	Rene sinistro
C	Chiave di volta
RD	Rene destro

Nei tratti caratterizzati da più sottospessori con un'entità differente è stato assegnato il codice corrispondente al caso peggiore. Infine, ai tratti in cui si è presenza di una situazione più grave (codici 3 e 4) è stata correlata una nota contenente informazioni relative alla criticità di quella zona;

- **Presenza di vuoti:** segnalazione dei vuoti registrati dal georadar in corrispondenza del rene sinistro, della chiave o del rene destro della galleria.

Tabella 25 – Prime righe di esempio della Tabella A.1.2_D relativa alla “Verifica dello spessore del rivestimento definitivo – Parte 2” della canna di discesa della galleria Prapontin.

Pk attuale	Pk di lotto	Pk iniziale tratto indagine	Pk finale tratto indagine	Spessore del rivestimento DA PROGETTO [cm]	INTERVENTO DI ADEGUAMENTO DELLE SAGOME IN GALLERIA (LOMBARDI)											
					INDAGINE GEORADAR				INTERVENTI DI ADEGUAMENTO							
					Pk di lotto	Corsia	Spessore rivestimento [cm]		n.	Pk iniziale	Pk finale	Spessore intervento [cm]		Spessore rivestimento post intervento [cm]		
Med	Min	Med	Max	Med			Min									
Imbocco lato Bardonecchia																
33+397	0+812,020	0,000	50,000	70												
32+347	0+862,020	50,000	63,610													
33+333	0+875,630	63,610	100,000													
33+297	0+912,020	100,000	150,000													
33+247	0+962,020	150,000	200,000													
33+197	1+012,020	200,000	250,000	55	0+980	Sorpasso (RS)	120	100	7	986,005	1042,005	12	17	108	83	
					1+052											
33+147	1+062,020	250,000	300,000		1+076	Marcia (RD)	90	70	8	1072,948	1105,948	10	10	80	60	
33+097	1+112,020	300,000	350,000		1+124											
33+047	1+162,020	350,000	364,010		1+172											
33+033	1+176,030	364,010	400,000	60		Sorpasso (RS)	120	120	9	1184,996	1222,996	17	25	103	95	
32+997	1+212,020	400,000	450,000		1+220											
32+947	1+262,020	450,000	459,480		1+268											
32+938	1+271,500	459,480	500,000	50		Sorpasso (RS)	80	40	10	1281,067	1311,067	14	18	66	22	
32+897	1+312,020	500,000	550,000		1+315											
32+847	1+362,020	550,000	600,000													

In conclusione, si evidenzia che i risultati delle due indagini georadar riportati all'interno delle due parti della tabella in quasi tutti i casi non risultano essere congruenti. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che l'indagine georadar può portare a delle ambiguità sull'interpretazione dei dati e, in particolare, sulla definizione dei materiali che si presentano al radar in modo affine: essa, infatti, necessita di essere tarata con i risultati derivanti da altri tipi di indagini simili che permettano di comprendere al meglio le diverse correlazioni.

10.1.2. I difetti del rivestimento

La conoscenza dei difetti presenti sulla superficie del rivestimento della galleria rappresenta un fattore chiave per acquisire un adeguato grado di conoscenza dello stato di conservazione della galleria. A tale scopo, è necessario un piano di indagini finalizzato a identificare i principali difetti, i quali vengono catalogati in base alla loro entità, valutarne l'evoluzione nel tempo e, infine, effettuare proposte su misure di sicurezza, future indagini ed interventi.

In particolare, per la galleria Prapontin, la verifica dei difetti del rivestimento definitivo è stata effettuata basandosi sulle ispezioni visive e sonore realizzate negli ultimi anni:

- L'**ispezione approfondita annuale**, ai sensi del "Manuale Ispezioni Gallerie" del MIT, effettuata nei mesi di Settembre/Ottobre 2020;
- L'**ispezione preliminare trimestrale**, ai sensi della "Circolare LL.PP. n. 06736-61-A1 del 19/07/1967, effettuata nei mesi di Febbraio/Marzo 2021.

Tali ispezioni hanno rilevato in prevalenza fessurazioni sul rivestimento, calcificazioni delle lesioni, umidità superficiale, efflorescenze, percolazioni o venute d'acqua, distacchi superficiali, esfoliazioni, rigonfiamenti corticali del calcestruzzo, presenza di vespai corticali, tracce di ruggine e ferri a vista. I difetti individuati in questa sede sono stati classificati mediante la valutazione IQOA, coerentemente a quanto prescritto nel Manuale di Ispezione, in funzione della loro gravità: 5 categorie per i difetti civili (1, 2, 2E, 3, 3U) e 3 categorie per le venute d'acqua (A1, A2, A2E) e, in caso fosse associato un pericolo per la sicurezza degli utenti, contrassegnati dalla lettera S.

Tuttavia, al fine di realizzare un documento il più immediato e comprensibile possibile, all'interno delle tabelle realizzate (vedi Allegato 2: Tabella A.2_S e Tabella A.2_D) si è deciso di concentrarsi esclusivamente sui difetti catalogati mediante un codice 3 o 3U, così da evidenziare le zone maggiormente critiche. In particolare, per entrambi i forni sono stati riportati i seguenti dati (Tabella 26):

- **Pk attuale**: nella direzione di marcia, ovvero da Torino verso Bardonecchia per la canna di salita e viceversa per quella di discesa, sono riportate le progressive ad intervalli di 20 metri (poiché i conci di ispezione sono definiti come le porzioni longitudinali di galleria aventi tale lunghezza);
- **Pk di lotto**: le medesime progressive del punto precedente sono riportate anche rispetto alle progressive di lotto del progetto originale;
- **Pk concio**: le medesime progressive sono riportate anche rispetto all'imbocco della galleria;
- **Concio da 20 m**: numerazione dei vari conci in cui è stata suddivisa la galleria;

- **Ispezione preliminare trimestrale:** vengono riportati i difetti di tipo 3 e 3U individuati in tale sede, in particolare si evidenzia la loro posizione, la tipologia e la loro votazione;
- **Suono sordo:** si evidenziano i suoni sordi caratterizzati da una difettologia 3U individuati durante l'ispezione approfondita annuale, ponendo attenzione alla posizione e alla porzione in cui essi sono stati individuati;
- **Ispezione approfondita annuale:** vengono indicati, per ciascun concio di ispezione e con le relative votazioni di tipo 3 e 3U, il numero di difetti, le aree dei difetti, suddivise tra estensivi e lineari, e la percentuale dei difetti rispetto alla superficie del concio.

Tabella 26 – Prime righe di esempio della Tabella A.2_S relativa alla “Verifica dei difetti del rivestimento definitivo” della canna di salita della galleria Prapontin.

Pk attuale	Pk di lotto	Pk concio	Concilio da 20 m	Ispezione preliminare trimestrale (mar. 2021) "Circolare n. 6736-61-A1 del 19.07.1967"			Ispezione approfondita annuale (ott. 2020) "Manuale Ispezione Gallerie - anno 2020"												
				Metrica	Difetto	Voto	Suono sordo "Difettologia 3U"		Numero dei difetti		Venute d'acqua [mq]		Fessure [ml]		Percentuale dei difetti [%]				
							Metrica	Porzione	3	3U	3	3U	3	3U	3	3U			
29+045	5+171	0	1																
29+045	5+151	20	2																
29+085	5+131	40	3																
29+105	5+111	60	4																
29+125	5+091	80	5																
29+145	5+071	100	6																
29+165	5+051	120	7	130	MO4	3U													
29+185	5+031	140	8	154	MO4	3U													
29+205	5+011	160	9	167	MO4	3U													
29+225	4+991	180	10	199	MO5	3U													
29+245	4+971	200	11																
29+265	4+951	220	12																
29+285	4+931	240	13																
29+305	4+911	260	14																
29+325	4+891	280	15																

Si evidenzia il fatto che entrambe le ispezioni sono state eseguite incrociando i risultati ottenuti con i rapporti tecnici delle ispezioni eseguite mediante Tunnel Scanner System (TSS) nel 2019.

10.1.3. Lo stato tensionale del rivestimento

Il terzo fattore riguarda lo stato tensionale presente nel rivestimento definitivo di entrambe le canne della galleria, il quale è stato analizzato mediante una prova di martinetto piatto. Tale prova è infatti utilizzata per determinare lo stato di sollecitazione assiale (perpendicolare al piano del taglio) sulla porzione superficiale di una parete in muratura o in calcestruzzo (vedi sottoparagrafo 7.1.5).

In particolare, relativamente alla galleria Prapontin, tali prove, eseguite per definire le tipologie di intervento più idonee al fine di realizzare le

operazioni di riprofilatura per l'adeguamento delle sagome all'interno della galleria, sono state effettuate con un martinetto piatto costituito da due lamine di acciaio saldate lungo il perimetro, tra le quali viene immesso olio in pressione in grado di consentire una deformazione pressoché parallela alle due lamine. Lo spessore del martinetto, la cui forma è semicircolare con dimensioni di 350x260 mm, è compreso tra 4 mm e 6 mm. I risultati ottenuti sono stati quindi riportati all'interno della tabella relativa alla verifica dello stato tensionale del rivestimento definitivo (vedi Allegato 3: Tabella A.3), la quale contiene (Tabella 27):

- **Pk attuale:** progressiva del punto in cui è stata realizzata la prova;
- **Pk di lotto:** le medesime progressive del punto precedente sono riportate anche rispetto alle progressive di lotto del progetto originale;
- **N. intervento di adeguamento delle sagome in galleria:** riferimento al numero dell'intervento di riprofilatura per cui è stata svolta tale prova;
- **Corsia:** corsia in cui è stata eseguita la prova;
- **Posizione dal cordolo:** altezza dal cordolo a cui è stata eseguita la prova;
- **Pressione di compensazione e spostamento medio al ripristino:** letture dirette dello strumento;
- **Verifica:** verifica rispetto al calcestruzzo C25/30 utilizzato per le verifiche della galleria in artificiale (resistenza di calcolo a compressione $f_{cd} = 14,16$ Mpa).

Tabella 27 – Esempio della Tabella A.3 relativa alla “Verifica dello stato tensionale del rivestimento definitivo con martinetto piatto” della canna di salita della galleria Prapontin.

Canna di salita (TORINO - BARDONECCHIA)								
Pk attuale	Pk di lotto	N. intervento di adeguamento delle sagome in galleria	Corsia	Posizione dal cordolo [cm]	Pressione di compensazione [bar]	Spostamento medio al ripristino [mm]	Stato tensionale	Verificato*
Imbocco lato Torino								
29+554	4+662,240	21	sorpasso	90	-	-	TRAZIONE	✓
30+033	4+182,506	14	sorpasso	90	-	-	TRAZIONE	✓
32+722	1+493,944	7	sorpasso	90	-	-	TRAZIONE	✓
33+154	1+061,928	2	marcia	90	14,0	0,04	COMPRESSIONE	✓

10.1.4. Lo stato di consistenza del rivestimento

Infine, i dati più significativi di ciascuna delle tabelle spiegate precedentemente sono stati riassunti in una tabella complessiva (vedi Allegato 4: Tabella A.4_S e Tabella A.4_D), la quale permette di

individuare, in maniera più immediata, le progressive più critiche in cui si ha una concomitanza di diverse problematiche. Di conseguenza, questa tabella sarà presa come riferimento per prevedere, pianificare e programmare l'attività di manutenzione della struttura, in particolare del rivestimento definitivo, e degli interventi di ripristino al fine di mantenere nel tempo la funzionalità e la qualità dell'opera.

Nello specifico, tale tabella (Tabella 28) contiene, sia per la canna di salita che quella di discesa, le seguenti informazioni già esplicate nei sottoparagrafi precedenti:

- **Prog.:** la progressiva ad intervalli di 50 metri, nonché le progressive in corrispondenza della quali si ha un cambio della tipologia di rivestimento;
- **Pk inizio concio da 50 m:** le medesime progressive del punto precedente sono riportate anche rispetto all'imbocco della galleria;
- **Tipologia del rivestimento;**
- **Spessore del rivestimento da progetto;**
- **Indagine strumentale georadar:** si riportano l'entità dei sottospessori e la presenza di vuoti;
- **Ispezione approfondita annuale:** si riportano i suoni sordi catalogati con il codice 3U, la progressiva d'inizio dei vari conci di lunghezza pari a 20 metri rispetto all'imbocco della galleria, il numero di difetti, le aree dei difetti, suddivise tra estensivi e lineari, e la percentuale dei difetti rispetto alla superficie del concio, per ciascun concio di ispezione e con le relative votazioni di tipo 3 e 3U.

Infine, in corrispondenza delle colonne relative alle progressive sono riportate, tramite una sigla evidenziata in colore rosa, le prove di martinetto piatto eseguite sul rivestimento definitivo della galleria: inizialmente è riportata la progressiva in cui è stata eseguita la prova, seguita da una lettera ad apice indicante la corsia in oggetto (la lettera M indica che l'indagine è stata eseguita sulla corsia di marcia mentre la

vengono riportate le sezioni tipo in funzione della classe di scavo, fino al contesto geologico e geotecnico presente in sito. Infine, è riportata la definizione dell'ispezione di "punto zero", applicata al caso in esame, della classificazione dei difetti IQOA e delle tipologie di intervento possibili;

3. **Inquadramento delle ispezioni:** capitolo in cui sono descritte le tipologie di ispezioni previste dalle Linee Guida;
4. **Manuale d'Uso:** vedi sottoparagrafo 8.2.3;
5. **Manuale di Manutenzione:** vedi sottoparagrafo 8.2.4;
6. **Programma di Manutenzione:** vedi sottoparagrafo 8.2.5.

Il Manuale d'Uso, il Manuale di Manutenzione e il Programma di Manutenzione vengono sviluppati sulla base di una suddivisione a cascata dei vari elementi che compongono la galleria che, in questo caso, è stata definita come l'unico corpo d'opera presente. Tale corpo d'opera è stato quindi scomposto nelle seguenti unità tecnologiche, che a loro volta sono formate da una serie di elementi manutenibili su cui si concentra lo studio finalizzato alla realizzazione del piano:

- **Struttura della galleria:** rivestimento, arco rovescio, impermeabilizzazione;
- **Superficie stradale:** sistema di drenaggio, carreggiata, marciapiedi di servizio, piazzole di sosta;
- **By-pass:** composto da strutture in acciaio, infissi e portoni metallici/maniglioni e leveraggi, area pavimentata fronte by-pass;
- **Segnaletica stradale:** segnaletica di sicurezza, cartelli segnaletici verticali, sostegni supporti e accessori vari, inserti stradali, strisce longitudinali;
- **Sistemi di sicurezza stradale:** sistema di illuminazione, sistema di sicurezza, dispositivi di ritenuta, attenuatore d'urto;
- **Impianti:** impianto di illuminazione, impianto di ventilazione, impianto elettrico, impianto SOS, impianto idrico antincendio.

In particolare, per lo svolgimento del presente documento, come specificato precedentemente, si è posta maggiore attenzione sullo stato di conservazione del rivestimento definitivo, facente parte dell'unità

tecnologica "Struttura della galleria", mediante l'analisi dei tre fattori sopracitati. Sulla base di queste analisi, si procede quindi a definire i controlli e le ispezioni, eventualmente integrati da indagini strumentali, che devono essere svolti su un campione esemplificativo della struttura oggetto di ispezione al fine di identificare una possibile evoluzione delle difettosità presenti. Infine, viene proposta una programmazione di tali attività, inclusi i possibili interventi di manutenzione che devono essere effettuati per mantenere adeguate le performances dell'opera stessa. Questo iter viene sviluppato all'interno degli ultimi tre capitoli del Piano di Sorveglianza, di cui di seguito si specifica lo svolgimento relativo al solo rivestimento definitivo.

Il primo di questi capitoli consiste nel Manuale d'Uso: esso contiene, per ogni elemento manutenibile, una breve descrizione del suo stato di conservazione al momento dell'ispezione e le relative modalità d'uso corretto. Relativamente allo stato di consistenza del rivestimento definitivo, tali informazioni sono state dedotte dalle tabelle descritte al paragrafo precedente e, in particolare, dalla Tabella Generale A.4 (vedi sottoparagrafo 10.1.4):

- All'interno della galleria sono presenti una serie di **soffospessori** che, nei casi peggiori (e isolati), raggiungono un'entità pari al 90% rispetto allo spessore di progetto corrispondente (per maggiori informazioni vedi Allegato 1: Tabella A.1.1_S e Tabella A.1.1_D). Questo si verifica sia nella canna di salita che in quella di discesa e, in particolar modo, nella zona centrale più lontana dagli imbocchi di monte e di valle. Inoltre, la lunghezza dei tratti in cui lo spessore effettivo del rivestimento è minore rispetto a quello di progetto, relativamente all'intero sviluppo della galleria, è pari, rispettivamente per il rene sinistro, la chiave di volta e il rene destro, al 19%, 23% e 17 % per la canna di salita e 17%, 23 % e 19 % per la canna di discesa;
- Sulla superficie del rivestimento è stata inoltre rilevata la presenza di **difetti**, di gravità più o meno accentuata, che possono essere sintetizzati in fessurazioni, calcificazioni delle lesioni, umidità superficiale, efflorescenze, percolazioni o venute d'acqua,

distacchi superficiali, esfoliazioni, rigonfiamenti corticali del calcestruzzo, presenza di vespai corticali, tracce di ruggine, ferri a vista e reti di protezione. In particolare, si è deciso di concentrare l'attenzione sui difetti classificati con i valori 3 e 3U della classificazione IQOA che sono, rispettivamente, pari a 958 e 182 per la canna di salita e 834 e 79 per quella di discesa. Tali difetti corrispondono ad una superficie di venute d'acqua pari a 262,4 e 51,4 mq e ad una lunghezza di fessure di 1922,1 e 296,7 ml per la canna di salita. Analogamente per la canna di discesa, facendo sempre riferimento ai difetti 3 e 3U, si hanno i seguenti valori: 669,9 e 396,1 mq e 1517,7 e 99,4 ml. Infine, la percentuale dei difetti rispetto all'intera superficie della galleria è pari, rispettivamente per le classi 3 e 3U, a 0,33 % e 0,06 % per la canna di salita e 0,83% e 0,49% (per maggiori informazioni vedi Allegato 2: Tabella A.2_S e Tabella A.2_D).

- Le misure rilevate mediante le prove di martinetto piatto, infine, hanno evidenziato la quasi totale assenza di **stati tensionali** all'interno dei rivestimenti. Diversi martinetti hanno infatti fornito dei valori di sollecitazione di trazione: dai documenti di progetto si osserva che la divergenza tra le basi di misura centrali ha un valore massimo pari a 0,046 mm (Pk 4+662,24 della canna di salita), valore confrontabile con il valore di convergenza in corrispondenza dell'intervento n. 2_S, a cui corrisponde un valore di tensione pari a 1,4 MPa (circa 10 volte inferiore alla resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo C25/30 utilizzato per le verifiche della galleria in artificiale). Di conseguenza, le sollecitazioni di trazione sono minime e non rappresentano criticità (per maggiori informazioni vedi Allegato 3: Tabella A.3).

Al fine di conservare l'opera nel migliore dei modi, la modalità di uso corretto consiste nel controllare periodicamente l'integrità delle superfici del rivestimento attraverso valutazioni visive e uditive mirate a riscontrare anomalie evidenti, quali fessurazioni, screpolature, sbollature superficiali, ecc.

Infine, si conclude passando al Manuale e al Programma di Manutenzione: in questi due capitoli vengono descritti, per ciascun elemento manutenibile, i requisiti e le prestazioni dell'elemento, le anomalie riscontrabili, i controlli e le manutenzioni eseguibili da personale specializzato, nonché la programmazione di questi ultimi sulla base di ciò che è espresso nel Manuale d'Uso. Sempre facendo riferimento al rivestimento definitivo, si evidenzia che nessuna parte della struttura, con il passare del tempo, deve presentare degli inconvenienti tecnici che possano influire sul regolare funzionamento della stessa e/o che ne compromettano la funzionalità nel tempo, nonché la stabilità complessiva e di ogni singola parte. Inoltre, lo stato dei rivestimenti della galleria deve essere tale da impedire alle acque di falda provenienti dall'ammasso roccioso di penetrare all'interno dei rivestimenti stessi.

Le principali anomalie riscontrabili su questo elemento possono essere riassunte in:

- **Deposito superficiale:** accumulo di pulviscolo atmosferico o di altri materiali estranei, di spessore variabile, poco coerente e poco aderente alla superficie del rivestimento;
- **Distacco:** disgregazione e distacco di parti notevoli del materiale che può manifestarsi anche mediante espulsione di elementi prefabbricati dalla loro sede;
- **Fessurazioni:** presenza di discontinuità nel materiale con distacchi macroscopici delle parti;
- **Penetrazione di umidità:** comparsa di macchie di umidità dovute all'assorbimento di acqua;
- **Presenza di vegetazione:** presenza di vegetazione caratterizzata dalla formazione di licheni, muschi e piante lungo le superfici.

Per quanto riguarda i controlli eseguibili da personale specializzato, sono previste tipologie di indagini diverse a seconda della finalità:

- **Controllo generale:** si tratta di un controllo da effettuare con una cadenza semestrale indipendentemente dalle condizioni attuali della galleria e consiste nel verificare la presenza di eventuali anomalie lungo la superficie dei rivestimenti. Viene effettuato a

cadenza fissa così da mantenere sotto osservazione lo stato della galleria e la sua eventuale evoluzione;

- **Controllo approfondito:** si tratta di un controllo effettuato in maniera più approfondita rispetto a quello precedente; viene eseguito ogni anno al fine di verificare l'integrità delle parti a vista dell'opera e individuare eventuali danni, deformazioni o deterioramenti dei materiali sfuggiti al controllo generale;
- **Controlli da effettuare per il primo anno successivo alla redazione del presente Piano di Sorveglianza:** sulla base dello stato di conservazione effettivo della galleria Prapontin sono state programmate una serie di indagini, riguardanti il primo anno successivo alla redazione del seguente piano, finalizzate a valutare l'evoluzione dei difetti e delle problematiche presenti e arrivare così a stabilire un piano di controllo futuro più consapevole e corretto. In particolare, sono stati previsti dei controlli periodici visivi e uditivi (per individuare i suoni sordi all'interno del rivestimento mediante prove di battitura) a cadenza trimestrale; una serie di controlli approfonditi con prove a cadenza semestrale, quali indagini strumentali per indagare lo spessore e la superficie del rivestimento (georadar e/o TSS), lo stato tensionale (martinetto piatto e/o doorstopper) e il degrado del calcestruzzo (prove di carbonatazione); monitoraggio topografico a cadenza trimestrale al fine di verificare la convergenza del cavo e la stabilità globale della galleria.

Infine, a seguito di tali controlli, sarà possibile identificare la frequenza degli interventi da effettuare all'interno della galleria Prapontin, i quali possono essere riassunti come segue:

- **Pulizia e rimozione dello sporco superficiale** mediante spazzolatura manuale degli elementi o con tecniche di rimozione dei depositi, adatte al tipo di rivestimento, mediante getti di acqua a pressione e detergenti appropriati;
- **Ripristino degli strati protettivi**, previa accurata pulizia delle superfici, con soluzioni chimiche appropriate;

- **Installazione di una rete protettiva leggera**, avente funzione di “filtro anticaduta” di materiale fine in distacco, eventualmente con sovrapposta una rete protettiva pesante, avente funzione strutturale;
- **Installazione di un blindaggio** interno della volta della galleria mediante lamiera di spessore ridotto, rese solidali tra loro a mezzo di saldature e al rivestimento definitivo mediante ancoraggi a vite, finalizzate a rispondere ad una eventuale chiusura del cavo della galleria.

11. Conclusioni

“Aumentare la sicurezza delle gallerie stradali e autostradali e migliorarne l'efficienza”.

Questa frase, ripetuta più volte nel corso della presente Tesi di Laurea, è stata la prima frase che ho letto sul sito del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili quando ho iniziato a cercare le prime informazioni in merito a quello che è stato l'argomento principe di questo elaborato.

Questa frase, infatti, introduce l'obiettivo della Circolare integrativa prot. 152 firmata il 9 aprile 2021 dal MIMS, la quale introduce un nuovo approccio per le attività di sorveglianza e gli interventi di manutenzione della rete, prevedendo lo sviluppo di un Piano di Sorveglianza per ciascuna galleria in base alle sue caratteristiche fisiche e tecniche.

Questa frase, infine, racchiude perfettamente lo scopo del lavoro che ho effettuato insieme alla concessionaria SITAF SpA dell'Autostrada A32, ovvero la redazione della proposta di un Piano di Sorveglianza per la galleria Prapontin.

Si sottolinea l'uso del termine “proposta” di tale documento, principalmente perché esso deve essere realizzato in seguito all'ispezione approfondita di *assessment* necessaria a valutare “ex-novo” lo stato di consistenza dei rivestimenti della galleria in oggetto. Questa ispezione di “punto zero”, però, è in previsione per il mese di Marzo 2022 e quindi non risultava ancora disponibile al momento dell'elaborazione della Tesi. Nonostante questo, ho cercato di raggiungere la conoscenza del reale stato di conservazione dell'opera mediante le ispezioni e le indagini effettuate negli ultimi anni all'interno dei fornicelli della Prapontin.

Sulla base di queste informazioni, ho quindi redatto il documento oggetto della presente Tesi di Laurea, concentrandomi in particolar modo sulla conoscenza dello stato del rivestimento definitivo, ponendo attenzione sulla presenza di eventuali spessori ridotti, sulla formazione di fessurazioni o

danni locali e sullo stato tensionale del calcestruzzo. Inoltre, ho previsto una programmazione delle attività di controllo, concentrate soprattutto durante il primo anno successivo all'emissione di tale documento, così da monitorare un'eventuale evoluzione dei problemi presenti all'interno della galleria e poter definire degli interventi di ripristino in modo più consapevole e mirato.

In conclusione, con la redazione di tale elaborato ho cercato di fornire all'Azienda SITAF Spa un documento il più possibile dinamico e facilmente riutilizzabile in futuro, in particolare in seguito all'ispezione approfondita. Inoltre, esso vuole essere un riferimento e un punto di partenza per la stesura di un Piano di Sorveglianza per tutte le altre gallerie dell'Autostrada A32, garantendo così un monitoraggio costante e processi più rapidi nella definizione delle priorità d'intervento e programmazione delle opere manutentive da realizzare.

12. Bibliografia e sitografia

BIBLIOGRAFIA

LINEE GUIDA

Bernardino C., Peila D., *Asseverazione delle Linee Guida del MIMS per la redazione del Piano di Sorveglianza*, 10/04/2021

Morisco F., Migliorino P., *Linee Guida per la redazione del Piano di Sorveglianza delle gallerie*, 10/04/2021

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (MIMS), *Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio delle gallerie esistenti*, Giugno 2021

Carlo Ricciardi, *Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio delle gallerie esistenti – Relazione illustrativa*, Giugno 2021

PINI ITALIA, SINA, ALPINA, *Assessment gallerie - Messa in sicurezza delle gallerie della rete autostradale del gruppo ASTM (Parte 1 – Parte 2)*, Settembre 2020

Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), *Road tunnel civil engineering inspection guide (Book 1 – Book 2)*, 2015

NORMATIVE:

Circ. Min. LL.PP. 19 luglio 1967, n. 6736/61

D.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207, *Regolamento di esecuzione ed attuazione del decreto legislativo 12 aprile 2006, n. 163, recante «Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE»*

Registro Decreti n. 269 del 7 luglio 2020

Registro Decreti n. 152 del 9 aprile 2021

ARTICOLI:

Del Piaz Giorgio Vittorio, Argentieri Alessio, *Sessant'anni del Traforo del Monte Bianco, la storia di un'impresa. Prologo: Da Annibale alle grandi gallerie alpine, Acque sotterranee*, Vol. 8 (3), Pag. 75-81, 30/09/2019

DISPENSE:

Massimo Rinaldi, *Opere di Ingegneria*, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze

Daniele Peila, *Tunneling – General aspects*, DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture), Politecnico di Torino

Claudio Scavia, *Meccanica delle rocce – Gallerie: introduzione e sistemi di sostegno*, DISEG (Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino)

TESI:

Giovanni Lombardi, *Evoluzione della costruzione di opere sotterranee*, Dottorato in Ingegneria Strutturale, Sismica e Geotecnica, Politecnico di Milano, 12/07/2007

Riccardo Spotti, *La vulnerabilità delle gallerie esistenti in calcestruzzo armato*, Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021

Salvatore Aiello, *L'intelligenza artificiale per caratterizzare il degrado del calcestruzzo nelle gallerie*, Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021

DOCUMENTAZIONE FORNITA DALLA SITAF SpA:

Tavole di contabilità della galleria Prapontin: profili schematici campi di intervento, sezioni tipo di scavo in sotterraneo, sezioni tipo interventi preconsolidamento, sezioni longitudinali campi di avanzamento, sezioni tipo di intervento, sezioni di rivestimento, planimetrie di dettaglio, planimetrie schematiche, computi, riepiloghi, schemi posizionamento, disegni d'insieme, ecc.

Indagini geognostiche propedeutiche alla progettazione definitiva delle opere in sotterraneo relative all'interconnessione in corrente continua tra Italia e Francia svolte dalla società TERNA SpA (anno 2010): indagini geognostiche, indagini tomografiche e indagini di laboratorio

Elaborati relativi al progetto di ristrutturazione dell'impianto di illuminazione della galleria Prapontin (anno 2002): relazione tecnica, capitolato generale e tecnico, calcoli dimensionali, elaborati grafici, elaborati estimativi, piano di manutenzione, cronoprogramma dei lavori

Elaborati relativi agli interventi volti all'innalzamento delle condizioni di sicurezza lungo le gallerie autostradali - Galleria Prapontin (anno 2012): relazione generale, relazioni specialistiche, elaborati grafici, piano di manutenzione, piano di sicurezza e coordinamento, cronoprogramma dei lavori, elaborati estimativi, capitolato speciale d'appalto

Elaborati relativi all'adeguamento delle sagome nella galleria Prapontin (anno 2012): relazione descrittiva, relazione tecnica e di calcolo, rapporto interpretativo delle indagini, elaborati grafici, elaborati economici, capitolato speciale d'appalto, piano di sicurezza e coordinamento

Rapporto tecnico dell'ispezione approfondita con Tunnel Scanner System della galleria Prapontin svolta dalla società SINA SpA (anno 2019)

Rapporto tecnico dell'ispezione approfondita con georadar della galleria Prapontin svolta dalla società SOCOTEC Italia Srl

Monitoraggio visivo delle opere d'arte maggiori - Relazione dell'ispezione di sorveglianza della galleria Prapontin (anno 2020)

Ispezioni delle gallerie ai sensi del "Manuale di Ispezione Gallerie" – Monitoraggio approfondito annuale della galleria Prapontin (anno 2020 – IV trimestre)

Ispezioni delle gallerie ai sensi della "Circolare LL. PP. N. 06736-61-A1 del 19/07/1967" – Sorveglianza trimestrale della galleria Prapontin (anno 2021 – I trimestre)

ULTERIORE DOCUMENTAZIONE:

Autostrade per l'Italia SpA, Lombardi Ingegneria Srl, SWS Engineering SpA, Rocksoil SpA, *Piano di manutenzione, Galleria Post-Assessment*, 18/11/2020

Westfield Milan Spa, Erre.Vi.A. Srl, *Potenziamento della S.P. n. 103 "Antica di Cassano" 1° lotto – 2° stralcio tratta B – Piano di manutenzione*, Maggio 2015

Società Autostrada Tirrenica p.A, Prometeo Engineering Srl, *Galleria Rimazzano, Autostrada A12 Livorno-Rosignano Marittimo – Piano di manutenzione*, Giugno 2015

SEPI Srl, *Lavori di costruzione della Variante alla S.S.45 BIS tra i Comuni di Arco e Riva del Garda, 27^ perizia suppletiva e di variante – Piano di manutenzione*, Marzo 2011

SITOGRAFIA

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili <https://www.mit.gov.it/>

Sitaf S.p.A. <https://www.sitaf.it/>

Autostrada A32-Wikipedia https://it.wikipedia.org/wiki/Autostrada_A32

SITAF Tunnel Frejus <http://www.sitaftunnelfrejus.it/sitaf/opere/a32/>

PIARC "Manuale delle gallerie stradali" <https://tunnels.piarc.org/it/>

PARTE A:

[https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria_\(ingegneria\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria_(ingegneria))

<https://www.sapere.it/enciclopedia/galler%C3%ACa+%28edilizia%29.html>

<https://www.ingegneri.cc/interventi-di-consolidamento-e-scavo-gallerie.html/>

<https://www.scienzafacile.it/2012/05/22/come-si-scava-una-galleria-curiosita-per-i-non-addetti-ai-lavori/>

<https://www.chiarellimassimo.it/index.php/2018/10/15/monitoraggio-strutturale-tunnel/>

<https://www.stradeeautostrade.it/gallerie-e-tunnelling/>

Sebastiano Pelizza, *La storia delle gallerie*,
<http://www.societaitalianagallerie.it/notizia/1614/santa-barbara-2020-milano-04-dicembre-2020/download/5817/>, Convegno in onore di "Santa Barbara",
4/12/2020

Collegio degli Ingegneri e Architetti della Provincia di Verona, *GALLERIE. Modi di progettazione, tecniche costruttive, relazioni col territorio: ieri e oggi.*,
http://www.trasportiecultura.net/public/convegni/atti_pdf/Gallerie.pdf,
Convegno, 17/05/2002

V. Francani, C. Rampolla, *Appunti di geologia applicata – Capitolo 5: Le gallerie*,
http://www.engeology.eu/sites/default/files/didattica-attach/capitolo_5_-_le_gallerie.pdf

Carmelo G. Catanoso, *Sicurezza e tutela della salute nella realizzazione delle gallerie*,
https://www.eseb.it/web/images/allegati/Seminari/SEMINARICAMPUS_2017_2018/2018-12-01/Gallerie.pdf, Seminario, 01/12/2018

PARTE B:

<https://www.certifico.com/>

https://it.wikipedia.org/wiki/Viadotto_Polcevera

<https://www.ingenio-web.it/20966-il-crollo-del-ponte-morandi-a-genova>

<https://www.ingenio-web.it/25663-gestione-dei-ponti-esistenti-il-quadro-normativo-italiano-e-il-confronto-con-alcune-normative-internazionali>

<https://www.ediltecnico.it/99043/linee-guida-gallerie-esistenti-frcm-barre-in-frp/>

Consiglio Nazionale dei Geologi, *Crollo del ponte di Genova, geologi: necessaria una politica di prevenzione attraverso un piano straordinario di manutenzione e messa in sicurezza delle opere esistenti e del territorio*, <https://www.cngeologi.it/2018/08/20/crollo-ponte-genova-geologi-necessaria-una-politica-di-prevenzione-attraverso-un-piano-straordinario-di-manutenzione-e-messa-in-sicurezza-delle-opere-esistenti-e-del-territorio/>, Comunicato stampa, 14/10/2018

Genova24, *"Gravissimi ammaloramenti nella galleria Bertè". Depositata la consulenza della procura: "Anni di monitoraggi inadeguati"*, <https://www.genova24.it/2021/07/gravissimi-ammaloramenti-nella-galleria-berte-depositata-la-consulenza-della-procura-anni-di-monitoraggi-inadeguati-268690/>, Articolo, 15/07/2021

13. Allegati

- ALLEGATO 1 - Tabella A.1: Verifica dello spessore del rivestimento definitivo – Galleria Prapontin (Autostrada A32)
- ALLEGATO 2 - Tabella A.2: Verifica dei difetti del rivestimento definitivo – Galleria Prapontin (Autostrada A32)
- ALLEGATO 3 - Tabella A.3: Verifica dello stato tensionale del rivestimento definitivo – Galleria Prapontin (Autostrada A32)
- ALLEGATO 4 - Tabella A.4: Verifica dello stato di consistenza del rivestimento definitivo – Galleria Prapontin (Autostrada A32)
- ALLEGATO 5 - Proposta del Piano di Sorveglianza – Galleria Prapontin – Autostrada A32 Torino-Bardonecchia