

# POLITECNICO DI TORINO

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



**Politecnico  
di Torino**

### TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Sviluppo di un programma eseguibile per la valutazione dello stato di salute delle gallerie autostradali a supporto delle strategie di intervento

Relatore  
Prof. Marco Barla

Candidato  
Andrea Sersale

Correlatore  
Ing. Alessandra Insana

Ottobre 2021



# Sommario

La manutenzione delle infrastrutture è oggetto di forte discussione in Italia a causa di recenti avvenimenti quali il collasso del ponte Morandi (14 agosto 2018, con 43 vittime) e la caduta di due tonnellate di detriti dalla volta della galleria Bertè (30 dicembre 2019). Soffermandosi sulle gallerie, il 10 gennaio 2020, a seguito di uno studio svolto dal Consiglio superiore dei Lavori Pubblici, ne sono state evidenziate 105 a rischio nel territorio italiano. È stato quindi avviato un piano di manutenzione in Italia basato su una rigida gerarchia di ispezione strutturata in una fase primaria e in una fase secondaria più dettagliata. Alla luce di tale piano di manutenzione e del catalogo dei difetti definito dal Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, è stato sviluppato il metodo SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels). Il metodo consente di definire una priorità di intervento per le gallerie in funzione del punteggio associato a 5 classi di attenzione: strutturale e geotecnica, geologica, sismica, incendio e geometrica.

Il lavoro di tesi ha lo scopo di realizzare un programma eseguibile in grado di automatizzare l'applicazione del metodo SMART per renderlo speditivo e di semplice applicazione.

È stato svolto inizialmente uno studio bibliografico basato sulla manutenzione delle gallerie sia autostradali che ferroviarie a livello internazionale (Giappone, Iran, Cina e Francia) ai fini di una comprensione maggiore di come tale tematica sia stata affrontata negli anni passati negli altri paesi. Successivamente, una volta analizzato il metodo SMART, si è proceduto con la progettazione del programma eseguibile. Dopo una serie di considerazioni, la scelta del linguaggio di programmazione da usare è ricaduta su Visual Basic. Il programma analizza ogni parametro che caratterizza le classi di attenzione sia per ciascun concio appartenente alla galleria, laddove necessario, sia per l'intera galleria. La modalità di immissione dei dati differisce in funzione della tipologia di dato da inserire (nel programma sono presenti principalmente radiobutton e caselle di testo). Grazie a tale lavoro, l'utente viene guidato nell'applicazione del metodo SMART, rendendo l'analisi dello stato di salute della galleria più facile e veloce. Inoltre il programma sfruttando Microsoft Excel, oltre che ai punteggi associati ai vari parametri e alle classi di attenzione, fornisce in output anche dei grafici relativi alla classe di attenzione strutturale e geotecnica e a quella geometrica utili per la comprensione dell'area della galleria con maggiore necessità di intervento. Per dimostrare l'efficacia del programma, è stato svolto un lavoro di validazione tramite lo studio delle gallerie Vallesaccarda, Scampitella e Castello sulla base dei risultati delle ispezioni e degli output forniti

dal metodo. Tuttavia, sono in corso test su un certo numero di gallerie per convalidare il metodo. Per di più numerosi risultati possono ancora essere implementati in futuro al fine di facilitare il processo di manutenzione delle gallerie. Infine il lavoro propone di sviluppare una base di approccio per la definizione di una legge di degrado tramite l'analisi della difettosità di sette gallerie, al fine di ottenere considerazioni utili alla scelta tra intervento SID (intervento definitivo) o MES (intervento di messa in sicurezza).

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>12</b>
1.1	Struttura della tesi.....	13
<b>2</b>	<b>La manutenzione delle gallerie nel mondo.....</b>	<b>15</b>
2.1	Introduzione.....	15
2.2	Manutenzione gallerie: Giappone.....	15
2.2.1	Tsukayama Tunnel.....	18
2.2.2	Fukuoka Tunnel.....	20
2.3	Manutenzione gallerie: Iran.....	21
2.3.1	Payambar tunnel.....	22
2.3.2	Azadi tunnel.....	26
2.4	Manutenzione gallerie: Cina.....	28
2.4.1	Interventi di riparazione.....	31
2.4.2	Interventi aggiuntivi.....	32
2.4.3	Interventi di sostituzione.....	34
2.5	Manutenzione gallerie: Francia.....	35
2.5.1	Caratterizzazione del rivestimento in muratura e della superficie di contatto ...	36
2.5.2	Caratterizzazione geofisica.....	37
2.5.3	Modalità di assegnazione del punteggio.....	39
2.6	Conclusioni.....	41
<b>3</b>	<b>Ispezione delle gallerie in Italia e tipologie dei difetti.....</b>	<b>43</b>
3.1	Introduzione.....	43
3.2	Fasi del processo di assesment delle gallerie.....	47

3.3	Classificazione dei difetti .....	50
3.4	Linee Guida sulle gallerie stradali .....	52
<b>4</b>	<b>Metodo S.M.A.R.T. ....</b>	<b>54</b>
4.1	Introduzione.....	54
4.2	Classe di attenzione Strutturale e Geotecnica.....	56
4.3	Classe di attenzione Geologica.....	59
4.4	Classe di attenzione Sismica.....	60
4.5	Classe di attenzione Incendio .....	62
4.6	Classe di attenzione Geometrica.....	64
4.7	Classe di attenzione della galleria.....	66
<b>5</b>	<b>Sviluppo di un programma eseguibile per l'applicazione del metodo S.M.A.R.T. ...</b>	<b>68</b>
5.1	Introduzione.....	68
5.2	Finestra n.1: Maschera applicazione.....	70
5.3	Finestra n.2: CdA Strutturale & Geotecnica.....	75
5.3.1	Carico rivestimento .....	77
5.3.2	Livello di incertezza del modello geologico geotecnico .....	79
5.3.3	Qualità dell'ammasso roccioso/terreno .....	81
5.3.4	Peculiarità dell'ammasso roccioso/terreno.....	82
5.3.5	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento .....	83
5.3.6	Livello di difettosità .....	84
5.3.7	Rapidità di evoluzione del degrado .....	85
5.3.8	Tipologia di galleria .....	87
5.3.9	Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione.....	90
5.3.10	Complessità costruttiva .....	91
5.3.11	Influenza dell'acqua .....	92
5.4	Finestra n.3: CdA Geologica .....	94
5.5	Finestra n.4: CdA Sismica .....	98
5.5.1	Caratteristiche del sisma.....	99

5.5.2	Inclusione in zone sismogenetiche .....	100
5.5.3	Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali .....	101
5.5.4	Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica .....	102
5.5.5	Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno.....	104
5.5.6	Profondità dell'asse della galleria .....	105
5.5.7	Geometria della galleria e caratteristiche delle armature .....	106
5.5.8	Resistenza e stato di conservazione del rivestimento.....	107
5.5.9	Norme di progettazione del rivestimento .....	108
5.6	Finestra n.5: CdA Incendio.....	109
5.7	Finestra n.6: CdA Geometrica .....	116
5.8	Output Excel.....	119
5.9	Validazione programma: Vallesaccarda DX .....	119
5.9.1	Classe di Attenzione strutturale e geotecnica.....	120
5.9.2	Classe di Attenzione geologica .....	122
5.9.3	Classe di Attenzione sismica.....	122
5.9.4	Classe di Attenzione incendio .....	124
5.9.5	Classe di Attenzione geometrica .....	125
5.9.6	Risultato Excel .....	125
5.10	Validazione programma: Scampitella DX.....	130
5.11	Validazione programma: Castello DX.....	132
<b>6</b>	<b>Legge di Degrado.....</b>	<b>134</b>
6.1	Introduzione.....	134
6.2	Degrado delle gallerie.....	135
6.2.1	Modalità: RANGO .....	136
6.2.2	Modalità: MAX .....	138
6.2.3	Osservazioni .....	139
<b>7</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>141</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>143</b>

## Elenco delle figure

Figura 1.1: Crollo detriti galleria Bertè (Prato 2019). .....	12
Figura 2.1: Flow chart manutenzione galleria (Asakura e Kojima,2003).....	16
Figura 2.2: Rottura a compressione del Tunnel Tsukayama (Asakura e Kojima,2003).....	19
Figura 2.3: Schema degli interventi (Asakura e Kojima,2003).....	19
Figura 2.4: Blocco del rivestimento ceduto (Asakura e Kojima,2003) .....	20
Figura 2.5: Meccanismo di <i>spalling</i> del tunnel di Fukuouka (Asakura e Kojima,2003).....	21
Figura 2.6: Posizione dove è avvenuto il fenomeno del “rockburst” (Moradi et al., 2021) .....	23
Figura 2.7: Rimozione detriti a seguito dello <i>spalling</i> del rivestimento in muratura (Moradi et al., 2021) .....	23
Figura 2.8: Sostituzione del rivestimento in muratura instabile con uno in cemento armato (Moradi et al., 2021) .....	24
Figura 2.9: Quattro punti selezionati della galleria per analizzarne i risultati (Moradi et al., 2021).....	25
Figura 2.10: Tre differenti approcci di riabilitazione (Moradi et al., 2021).....	25
Figura 2.11: <i>Spalling</i> del rivestimento in cemento armato nell’Azadi Tunnel (Moradi et al., 2021) .....	27
Figura 2.12: Formazione di stalattiti di ghiaccio nell’Azadi Tunnel durante la stagione invernale (Moradi et al., 2021) .....	27
Figura 2.13: Sostituzione della muratura con il cemento armato (Moradi et al., 2021) .....	28
Figura 2.14: Flow chart della manutenzione delle gallerie autostradali in Cina (Ye et al., 2021) .....	29
Figura 2.15: Statistica delle cause di difetti nelle gallerie in Cina (Ye et al., 2021) .....	30
Figura 2.16: Interventi di riparazione (Ye et al., 2021). .....	32
Figura 2.17: Interventi aggiuntivi (Ye et al., 2021). .....	33
Figura 2.18: Interventi di sostituzione (Ye et al., 2021). .....	34
Figura 2.19: Componenti della galleria in muratura (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).....	36
Figura 2.20: Caratterizzazione locale del rivestimento in muratura tramite endoscopia (Llanca, Breul e Bacconnet 2017). .....	37
Figura 2.21: <i>Flow chart</i> per l'assegnazione del punteggio (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).....	40
Figura 3.1: Flusso documentale (MIT, 2020).....	47
Figura 3.2: Immagini del rilievo laser-scanner (MIT,2020) .....	48
Figura 3.3: Scheda identificativa difetti (Nuovo Catalogo dei Difetti) .....	50
Figura 3.4: Classificazione IQOA per difetti civili (Manuale Ispezione Gallerie) .....	51
Figura 3.5: Classificazione IQOA per venute d'acqua (Manuale Ispezione Gallerie).....	51
Figura 4.1: Valutazione della Classe di Attenzione della galleria (Barla 2021). .....	55
Figura 4.2: Determinazione della CdA a partire da una combinazione algebrica delle CdA dei fattori di rischio (Barla 2021).....	67
Figura 5.1: Schermata principale Visual Studio 2019. ....	69
Figura 5.2: Schermata iniziale dell'applicazione. ....	70

Figura 5.3: Titolo della schermata iniziale.....	71
Figura 5.4: Inserimento lunghezza della galleria e pulsante START per iniziare.....	72
Figura 5.5: Schermata di progettazione maschera iniziale.....	73
Figura 5.6: Schermata codice per la classe di attenzione strutturale e geotecnica.....	74
Figura 5.7: Schermata iniziale della classe di attenzione strutturale e geotecnica.....	75
Figura 5.8: Comandi per poter scorrere tra le diverse schede.....	76
Figura 5.9: Interfaccia “Carico rivestimento”.....	78
Figura 5.10: MessageBox di errore compilazione.....	78
Figura 5.11: Esempio trasformazione dell'etichetta "Concio" con caselle di testo.....	79
Figura 5.12: Interfaccia "Livello di incertezza del modello geologico geotecnico".....	80
Figura 5.13: Esempio trasformazione dell'etichetta "Concio" con radiobutton.....	81
Figura 5.14: Interfaccia "Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno".....	82
Figura 5.15: Interfaccia "Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno".....	83
Figura 5.16: Interfaccia "Presenza di sotto-spessore nel rivestimento".....	84
Figura 5.17: Interfaccia "Livello di difettosità".....	85
Figura 5.18: Interfaccia "Rapidità di evoluzione del degrado" (Barla et al., 2021).....	86
Figura 5.19: Interfaccia "Tipologia di galleria".....	88
Figura 5.20: Adattamento del pannello "Materiale" rispetto alla scelta geometrica.....	89
Figura 5.21: Completamento del parametro tramite l'inserimento del diametro.....	89
Figura 5.22: Interfaccia “Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione”.....	90
Figura 5.23: Interfaccia "Complessità costruttiva".....	91
Figura 5.24: Interfaccia "Influenza dell'acqua".....	93
Figura 5.25: Abilitazione del pulsante per procedere alla CdA Geologica.....	93
Figura 5.26: Schermata iniziale della CdA Geologica coincidente con l'interfaccia del parametro "Magnitudo dell'instabilità di versante".....	94
Figura 5.27: Interfaccia "Magnitudo dell'instabilità di versante".....	96
Figura 5.28: Interfaccia "Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti) / Grado di criticità per le frane potenziali".....	97
Figura 5.29: Interfaccia "Sistemi di monitoraggio".....	97
Figura 5.30: Interfaccia "Estensione dell'interferenza instabilità-struttura".....	98
Figura 5.31: Schermata iniziale della CdA Sismica coincidente con l'interfaccia del parametro "Caratteristiche del sisma".....	99
Figura 5.32: Interfaccia "Caratteristiche del sisma".....	100
Figura 5.33: Interfaccia “Inclusione in zone sismogenetiche”.....	101
Figura 5.34: Interfaccia "Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali".....	102
Figura 5.35: Interfaccia “Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica”.....	103
Figura 5.36: Interfaccia “Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno”.....	104
Figura 5.37: Interfaccia "Profondità dell'asse della galleria".....	105
Figura 5.38: Interfaccia “Geometria della galleria e caratteristiche delle armature”.....	106

Figura 5.39: Interfaccia “Resistenza e stato di conservazione del rivestimento”.....	107
Figura 5.40: Interfaccia “Norme di progettazione del rivestimento”.....	108
Figura 5.41: Schermata iniziale della CdA Incendio in caso di lunghezza inferiore a 500 m della galleria. ....	109
Figura 5.42: Adozione Piano Sicurezza Gallerie.....	110
Figura 5.43: <i>TabControl</i> della classe di attenzione incendio. ....	111
Figura 5.44: Interfaccia “Trasporto di merci pericolose”. ....	113
Figura 5.45: Interfaccia "Frequenza di occorrenza di eventi di incendio". ....	114
Figura 5.46: Interfaccia "Lunghezza". ....	114
Figura 5.47: Interfaccia "Difetti/Assenza di misure strutturali". ....	115
Figura 5.48: Interfaccia “Difetti/Assenza di misure impiantistiche”. ....	115
Figura 5.49: Interfaccia "Piani di intervento in caso di emergenza". ....	116
Figura 5.50: Schermata iniziale della CdA Geometrica coincidente con l'interfaccia del parametro "Difetta di altezza libera". ....	116
Figura 5.51: Interfaccia "Difetti di altezza libera (gabarit)". ....	118
Figura 5.52: Interfaccia “Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti”. ....	118
Figura 5.53: Estratto di planimetria con la posizione della galleria Vallesaccarda (Google Earth, 2021).....	120
Figura 5.54: Estratto della cartografia online (IFFI, 2021). ....	122
Figura 5.55: Inclusione della galleria Vallesaccarda nelle zone sismogenetiche (INGV, 2021). ....	123
Figura 5.56: Categorie di sottosuolo (NTC2018, 2018). ....	124
Figura 5.57: Schermata file di output excel. ....	125
Figura 5.58: Andamento punteggio della CdA strutturale e geotecnica lungo la galleria. ....	127
Figura 5.59: Andamento punteggio della CdA geometrica lungo la galleria.....	129
Figura 5.60: Estratto di planimetria con la posizione della galleria Scampitella (Google Earth, 2021). ....	131
Figura 5.61: Estratto di planimetria con la posizione della galleria Castello (Google Earth, 2021). ....	132
Figura 6.1 : Legge di degrado individuata con il RANGO. ....	137
Figura 6.2: Legge di degrado individuata con il MAX. ....	139

## Elenco delle tabelle

Tabella 2.1: Selezione di contromisure contro la pressione esterna (Asakura e Kojima,2003).....	17
Tabella 2.2: Confronto tra le varie strategie di manutenzione (Moradi et al., 2021) .....	22
Tabella 2.3: Dati dei 7 terremoti utilizzati nel modello numerico (Moradi et al., 2021).....	24
Tabella 4.1: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione strutturale e geotecnica e relativi punteggi (Barla 2021). ....	56
Tabella 4.2: Classificazione per la definizione della CdA strutturale e geotecnica (Barla 2021). ....	58
Tabella 4.3: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione geologica e relativi punteggi (Barla 2021). ....	59
Tabella 4.4: Classificazione per la definizione della CdA geologica (Barla 2021).....	60

Tabella 4.5: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione sismica e relativi punteggi (Barla 2021).	60
Tabella 4.6: Classificazione per la definizione della CdA sismica (Barla 2021).	62
Tabella 4.7: Assegnazione del punteggio alla CdA incendio in funzione della lunghezza della galleria e in presenza/assenza del Piano Sicurezza Gallerie (Barla 2021).	63
Tabella 4.8: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione incendio e relativi punteggi (Barla 2021).	63
Tabella 4.9: Classificazione per la definizione della CdA incendio (Barla 2021).	64
Tabella 4.10: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione geometrica e relativi punteggi (Barla 2021).	65
Tabella 4.11: Classificazione per la definizione della CdA geometrica (Barla 2021).	65
Tabella 4.12: Classificazione proposta per la Classe di Attenzione della galleria (Barla 2021).	66
Tabella 5.1: Sollecitazioni sul rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 15 (Barla 2021).	77
Tabella 5.2: Livello di incertezza del modello geologico geotecnico – punteggio variabile tra 0 e 3 (Barla 2021).	79
Tabella 5.3: Qualità dell'ammasso roccioso/terreno – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	81
Tabella 5.4: Peculiarità dell'ammasso roccioso/terreno – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	82
Tabella 5.5: Presenza di sotto-spessore nel rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	83
Tabella 5.6: Rapidità di evoluzione del degrado – punteggio variabile tra 0 e 3 (Barla 2021).	86
Tabella 5.7: Tipologia di galleria – punteggio variabile tra 0 e 4 (Barla 2021).	87
Tabella 5.8: Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla et al., 2021).	90
Tabella 5.9: Complessità costruttiva – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla et al., 2021).	91
Tabella 5.10: Magnitudo dell'instabilità di versante – punteggio variabile tra 0 e 5 (Barla 2021).	95
Tabella 5.11: Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti) / Grado di criticità per le frane potenziali – punteggio variabile tra 0 e 5 (Barla, 2021).	95
Tabella 5.12: Sistemi di monitoraggio – punteggio variabile tra -5 e 0 (Barla 2021).	95
Tabella 5.13: Estensione dell'interferenza instabilità-struttura – punteggio variabile tra 0 e 5 (Barla 2021).	96
Tabella 5.14: Caratteristiche del sisma – punteggio variabile tra 0 e 4 (Barla 2021).	99
Tabella 5.15: Inclusione in zone sismogenetiche – punteggio variabile tra 0 e 1.5 (Barla 2021).	100
Tabella 5.16: Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali – punteggio variabile tra 0 e 3 (Barla 2021).	101
Tabella 5.17: Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	103
Tabella 5.18: Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	104
Tabella 5.19: Profondità dell'asse della galleria – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	105
Tabella 5.20: Geometria della galleria e caratteristiche delle armature – punteggio variabile tra 0 e 0.5 (Barla 2021).	106

Tabella 5.21: Resistenza e stato di conservazione del rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	107
Tabella 5.22: Norme di progettazione del rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	108
Tabella 5.23: Trasporto di merci pericolose – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	111
Tabella 5.24: Frequenza di occorrenza di eventi di incendio – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	112
Tabella 5.25: Lunghezza – punteggio variabile tra 1 e 3 (Barla 2021).	112
Tabella 5.26: Difetti/Assenza di misure strutturali – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	112
Tabella 5.27: Difetti/Assenza di misure impiantistiche – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	112
Tabella 5.28: Piani di intervento in caso di emergenza– punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).	113
Tabella 5.29: Difetti di altezza libera (gabarit) – punteggio variabile tra 0 e 8 (Barla 2021).	117
Tabella 5.30: Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).	117
Tabella 5.31: Tabella dei punteggi della classe di attenzione strutturale e geotecnica.	126
Tabella 5.32: Tabella dei punteggi della classe di attenzione geologica.	127
Tabella 5.33: Tabella dei punteggi della classe di attenzione sismica.	128
Tabella 5.34: Tabella dei punteggi della classe di attenzione incendio.	128
Tabella 5.35: Tabella dei punteggi della classe di attenzione geometrica.	129
Tabella 5.36: CdA dell'intera galleria ottenuta da programma.	130
Tabella 5.37: CdA dell'intera galleria ottenuta manualmente.	130
Tabella 5.38: CdA dell'intera galleria ottenuta da programma.	131
Tabella 5.39: CdA dell'intera galleria ottenuta manualmente.	132
Tabella 5.40: CdA dell'intera galleria ottenuta da programma.	133
Tabella 5.41: CdA dell'intera galleria ottenuta manualmente.	133
Tabella 6.1: Schema attività di assessment della galleria (ASPI, 2021).	134
Tabella 6.2: Dati legge di degrado determinati tramite il RANGO.	136
Tabella 6.3: Pendenze delle rette delle gallerie ottenute tramite il RANGO.	137
Tabella 6.4: Dati legge di degrado determinati tramite il MAX.	138
Tabella 6.5: Pendenze delle rette delle gallerie ottenute tramite il MAX.	139



# 1 Introduzione

Ad oggi in Italia la manutenzione delle gallerie risulta oggetto di forte discussione a causa degli eventi recentemente avvenuti, che hanno portato le autorità competenti ad intraprendere una serie di interventi al fine di salvaguardare l'utenza. Nel 2018 è stato firmato il decreto di approvazione della Convenzione tra MIT e l'ANAS per la realizzazione delle opere del secondo "Programma di manutenzione straordinaria di ponti, gallerie e interventi mirati alla sicurezza del piano viabile", previsto dalla Legge di Stabilità 2014 (MIMS 2018). L'obiettivo centrale nell'ambito della manutenzione infrastrutturale è stato quello di recuperare il rilevante gap accumulato negli anni dalla rete stradale del nostro Paese. Ciononostante, eventi quali il crollo del ponte Morandi (14 agosto 2018, con 43 vittime) e quello del viadotto Madonna del Monte, sulla A6 Torino-Savona, nonché la caduta di due tonnellate di detriti che si sono staccati dalla volta della galleria Bertè sulla A26 (Figura 1.1), tra Ovada e Masone, direzione Genova (Prato 2019), sono stati un forte campanello d'allarme sull'evidente situazione di degrado delle infrastrutture italiane.



Figura 1.1: Crollo detriti galleria Bertè (Prato 2019).

L'indagine sulle gallerie stradali è iniziata prima del crollo di detriti della galleria Bertè, che solo per fortuna non ha causato vittime, ma sorge da un'inchiesta più ampia svolta dal Consiglio superiore dei Lavori Pubblici dopo i crolli dei viadotti, che comprende anche le barriere antirumore (che in alcuni casi sarebbero a rischio di cedimento). Il 7 novembre 2019, il Consiglio ha inviato al ministero dei Trasporti una relazione sulle gallerie, ma solo il 10 gennaio

2020 i quotidiani hanno pubblicato i risultati principali: 105 gallerie della rete autostradale gestita da Autostrade per l'Italia sono a rischio, cui si aggiungono novanta gallerie nelle tratte gestite da altre concessionarie. Questo rapporto è stato acquisito dalla Guardia di Finanza nell'ambito dell'indagine sul crollo del ponte Morandi a Genova (TE, Trasporto europa 2020). All'inizio di dicembre 2020, la Commissione Europea ha deciso d'inviare pareri motivati al Belgio, alla Bulgaria, alla Croazia, all'Italia e alla Spagna per non aver rispettato la totalità delle prescrizioni previste dalla Direttiva 2004/54/CE che stabilisce requisiti minimi di sicurezza relativi all'infrastruttura e all'esercizio delle gallerie. Questa Direttiva si applica a tutte le gallerie stradali della rete transeuropea più lunghe di 500 metri, e gli Stati che hanno ricevuto la comunicazione della Commissione Europea non hanno rispettato tutti gli obblighi che prescrive (TE, Trasporto europa 2020).

A seguito di tali solleciti, con la circolare n. 152 del 9.04.2021 il MIMS (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili) punta ad aggiornare il quadro tecnico-regolatorio definito dalla circolare emessa nel 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, confermando l'uso di modalità innovative e tecnologie avanzate (sistemi georadar, scanner, ecc.) per le verifiche sullo stato delle opere e sulla loro sicurezza, tenendo conto del grado di obsolescenza dei diversi elementi strutturali, prevede la predisposizione del "Piano di Sorveglianza" per ogni galleria, nel quale confluiscono tutti i dati tecnici della stessa e sono riportati organicamente le modalità dei controlli da porre in essere, gli interventi programmati e quelli già eseguiti (TEKNORING 2021).

Dato il quadro generale appena esposto, il lavoro di tesi è incentrato sulla tematica della manutenzione delle gallerie, andandone ad analizzare diversi aspetti per poi soffermarsi sullo sviluppo di un programma eseguibile per la valutazione dello stato di salute delle gallerie autostradali a supporto delle strategie di intervento.

## **1.1 Struttura della tesi**

Il corpo centrale della tesi è suddiviso in cinque capitoli, escludendo il presente di introduzione e quello relativo alle conclusioni, che vengono descritti nel seguito.

Il *Capitolo 2* "La manutenzione delle gallerie nel mondo" è di carattere bibliografico: viene analizzato del materiale reperito in letteratura inerente alla manutenzione delle gallerie sia

autostradali che ferroviarie in diversi paesi quali Giappone, Iran, Cina e Francia per determinare eventuali differenze e similitudini con l'approccio italiano che si sta sviluppando negli ultimi anni e per analizzare eventuali tecniche innovative di monitoraggio.

Il *Capitolo 3* "Ispezione delle gallerie in Italia e tipologie dei difetti" riassume sinteticamente il diagramma di flusso di ispezione e manutenzione delle gallerie in Italia basato sul "Manuale Ispezione Gallerie" e la struttura della classificazione dei difetti IQOA definita dal "Nuovo Catalogo dei Difetti".

Nel *Capitolo 4* "Metodo S.M.A.R.T." viene esposto il metodo SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels) utilizzato come nuovo approccio per la definizione di priorità di intervento delle gallerie. In particolare viene riassunto il suo sviluppo e definito il funzionamento tramite lo studio delle cinque classi di attenzione che costituiscono il metodo. Data la mole di tempo necessaria per l'applicazione del metodo su una galleria (specialmente per quelle relativamente lunghe), si è ritenuto necessario lo sviluppo di un programma eseguibile che automatizzasse tale metodo.

Il *Capitolo 5* "Sviluppo di un programma eseguibile per l'applicazione del metodo S.M.A.R.T." mostra quindi il processo che ha portato allo sviluppo del programma eseguibile e alla spiegazione di tutte le sue caratteristiche. Come ogni applicazione in fase di sviluppo, i paragrafi finali sono dedicati alla validazione del programma tramite lo studio di tre gallerie: Vallesaccarda DX, Scampitella DX e Castello DX.

Infine il *Capitolo 6* "Legge di Degrado" espone le basi per lo sviluppo di una legge di degrado delle gallerie al fine di ottenere un mezzo utile per la valutazione di convenienza tra interventi provvisori di messa in sicurezza (definiti MES) e interventi definitivi (cosiddetti SID).

# 2 La manutenzione delle gallerie nel mondo

## 2.1 Introduzione

Prima di addentrarci nel merito della manutenzione delle gallerie in Italia, il lavoro di tesi si propone di analizzare tale problematica da un punto di vista esterno da quello del nostro Paese. Si è deciso di sviluppare una parte bibliografica che espone modalità e tecniche di manutenzione delle gallerie applicate in altri paesi quali Giappone, Iran, Cina e Francia. In particolare nei primi tre paesi si analizzeranno gallerie sia autostradali che ferroviarie con i relativi metodi di ispezione ed eventuali casi studio. Per quanto concerne la Francia, il lavoro si sofferma su un nuovo sistema di monitoraggio proposto per la rete metropolitana di Parigi dotata di gallerie in muratura.

## 2.2 Manutenzione gallerie: Giappone

In Giappone la tematica della manutenzione delle gallerie è stata affrontata intorno al 1999, a seguito di fenomeni di *spalling* del rivestimento in calcestruzzo della galleria Fukuoka e Kita-Kyushu. Per tale motivo sono stati sviluppati metodi di indagine e di intervento per contrastare la deformazione delle gallerie (Asakura e Kojima 2003).

Per eseguire gli opportuni interventi di manutenzione, è necessario prima svolgere un lavoro di ispezione. Quest'ultimo risulta essere diviso in due fasi:

1. *Ispezione preliminare*: viene eseguita in modo tale da scoprire se è presente o meno deformazione. In caso di deformazione rilevata, in tale fase si stabilisce se è necessario procedere con l'ispezione secondaria e/o l'applicazione di interventi temporanei in base all'entità della deformazione. L'ispezione generalmente avviene massimo una volta ogni due anni. La metodologia di tale fase si basa principalmente su un approccio di

osservazione del rivestimento, il quale viene spesso studiato tramite tecnica di martellamento per verificarne la solidità.

2. *Ispezione secondaria*: si attua in modo più dettagliato rispetto alla prima. Si verificano i risultati ottenuti dall'ispezione primaria, e si stabilisce la necessità dell'applicazione di interventi urgenti. Inoltre, è anche utile per ottenere dati corretti per la progettazione degli adeguati interventi da svolgere per la messa in sicurezza dell'area di interesse (Asakura e Kojima 2003).

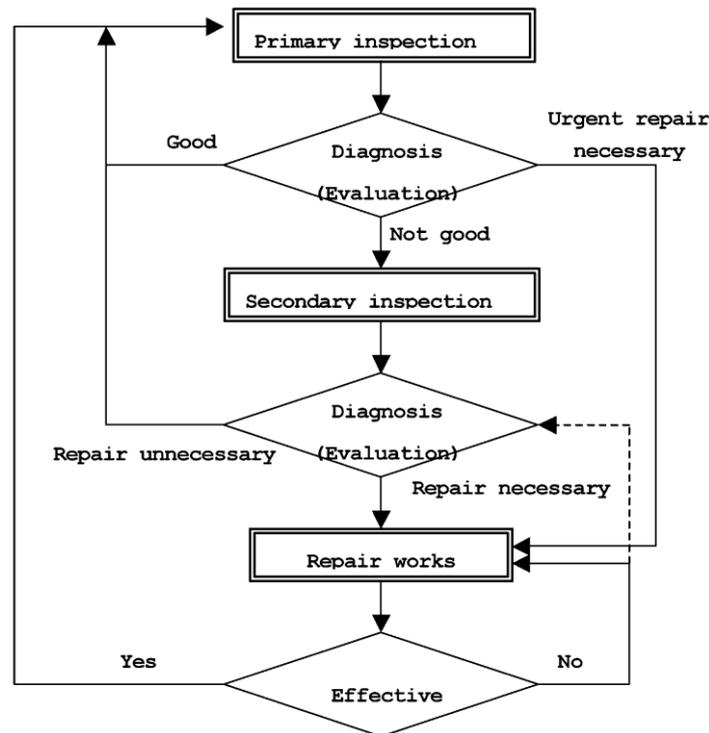


Figura 2.1: Flow chart manutenzione galleria (Asakura e Kojima, 2003)

La valutazione di una galleria non è oggettiva e dipende da numerosi fattori: lunghezza, locazione, tipologia, ecc. In generale essa viene svolta da ingegneri qualificati in grado di fornire un giudizio adeguato. Tuttavia, dato che in Giappone è aumentato notevolmente il numero di gallerie ferroviarie, è stato sviluppato un sistema tramite tecnologie che sfruttano intelligenza artificiale in modo tale da ottenere razionalizzazione dei metodi di diagnosi e giudizi oggettivi (Asakura e Kojima 2003).

I problemi relativi alle gallerie sono principalmente legati allo stato tensionale presente, agli ammaloramenti, alle venute d'acqua, al congelamento e ovviamente al fenomeno di *spalling*. Per ciascuna entità si applicano le relative contromisure. Ad esempio, per contrastare gli effetti dovuti alla pressione geostatica, si usa la tecnica del *backfill grouting*, in grado di incrementare

notevolmente la resistenza del rivestimento ed evitare lo sviluppo di ammaloramenti a seguito di aperture nel terreno. In generale le contromisure da applicare in questo caso sono riassunte nella Tabella 2.1:

Tabella 2.1: Selezione di contromisure contro la pressione esterna (Asakura e Kojima,2003)

Selection of countermeasures against external pressure

Countermeasures	Causes of deformation (external pressure)								
	Plastic earth pressure	Unbalanced pressure and slope creeping	Landslides	Vertical earth pressure due to the loosening of the ground	Water pressure	Frost heaving force	Ground settlement	Insufficient bearing capacity	Earthquakes
Pointing	△	△	△	○	△	△	△	△	○
Plasters and/or netting	△	△	△	○	△	△	△	△	○
Backfill grouting	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Inner lining									
Shotcreting*	○	○	○	△	△	△	△	-	○
Cast-in-place concrete lining	○	○	○	△	△	△	-	-	○
Centering	○	○	○	○	△	△	◇	-	○
Rock bolting	◇	◇	○	△	△	○	△	○	○
Concrete for foot protection	-	○	△	-	-	-	-	◇	△
Strutting	○	○	○	-	△	△	△	△	△
Placement of invert concrete	○	○	○	-	△	○	○	◇	○
Grout injection into the ground	-	△	-	△	△	-	△	○	○
Improvement or construction of drainage works	△	△	○	△	◇*	◇	-	○	△
Thermal insulation	-	-	-	-	-	◇	-	-	-
Slope stabilization	-	○	◇	-	-	-	-	-	◇

Note: Any combination of effective control measures (◇, ○, △) may be taken for each cause of disturbance.

◇, Optimum.

○, Applicable.

△, Occasionally effective.

- , Not applicable.

☆, Spraying of steel fiber reinforced concrete (SFRC) is effective where there is large deformation.

★, Improvement of drainage by betterment or construction of drainage works.

Sono state sviluppate tecniche di intervento anche contro le venute d'acqua e il congelamento. Tuttavia lo studio ha evidenziato che, nonostante l'applicazione di tali interventi, si registrano spesso problemi legati a tali fenomeni nel breve periodo. È quindi necessario selezionare in modo opportuno l'intervento adeguato considerandone l'efficacia e la fattibilità.

Da quando nel 1999 si sono verificati una serie di incidenti di *spalling* nelle gallerie ferroviarie, è stato obbligatorio rilevare eventuali segni di esso durante l'ispezione primaria e adottare adeguate contromisure il più rapidamente possibile.

Nei casi in cui tale fenomeno derivi da un aumento delle deformazioni dovute a forze esterne e al deterioramento del materiale, è necessario condurre un'indagine e misurazioni dettagliate e

quindi giudicare la necessità di rinforzi per l'intera galleria e di contromisure preventive contro il deterioramento.

La pulizia della superficie e la rimozione del calcestruzzo deteriorato sono generalmente considerati pretrattamenti per le altre contromisure. In particolare la rimozione del calcestruzzo deteriorato viene condotta in primo luogo dove si ottiene un certo suono durante l'ispezione sonora. Nella maggior parte dei casi la sola rimozione di questo elemento può raggiungere lo scopo immediato. Nei casi in cui la sola rimozione del calcestruzzo deteriorato non sia sufficiente, devono essere prese altre contromisure. Altre contromisure comuni includono l'installazione di materiale di riparazione della superficie e l'applicazione di stuccatura di crepe, piastre, barre, reti, supporti in acciaio, rinforzi interni, calcestruzzo interno e bullonatura (Asakura e Kojima 2003).

### *2.2.1 Tsukayama Tunnel*

Il tunnel Tsukayama è stato costruito nel 1967 con una lunghezza totale di 1766 m come una galleria ferroviaria a doppio binario. È geologicamente nella regione del Tufo Verde, di fronte al Mar del Giappone, dove principalmente vi è roccia sedimentaria. La profondità è di circa 70 m e il terreno circostante è di fango con una resistenza assiale di 3-6 MPa (Asakura e Kojima 2003). La galleria è stata scavata con il *Bottom drift method*, un metodo che consiste nello scavare un certo numero di fori per poi allargarli tramite esplosivo per raggiungere la dimensione della sezione desiderata.

Lo spessore del rivestimento è pari a 50 cm e non è stato inserito l'arco rovescio. Poco dopo il completamento il tunnel si è deformato in modo tale che entrambe le pareti laterali sono state spinte verso l'interno della galleria, e ciò ha causato un rigetto di fango sui binari e un rigonfiamento alla base. Inoltre la calotta è stata spinta verso l'alto ed è arrivata a rottura a causa della compressione e del momento flettente presenti (Figura 2.2).



Figura 2.2: Rottura a compressione del Tunnel Tsukayama (Asakura e Kojima,2003)

Per contrastare tale deformazione è stato installato l'arco rovescio. Prima dell'installazione di questo, la convergenza della galleria era di 40 mm/anno. Nonostante l'intervento avvenuto, la convergenza è stata semplicemente rallentata ma non fermata.

Vent'anni dopo nel 1990 un'area estesa della calotta è ceduta a causa dello stato compressivo, e si sono generate numerose fessure a taglio proprio in prossimità di quella zona. Per tale motivo, per evitare il totale collasso, sono stati svolti degli interventi temporanei e successivamente definitivi come l'uso di ancoraggi, riempimento delle fessure e l'applicazione di spritz-beton con fibre di acciaio.

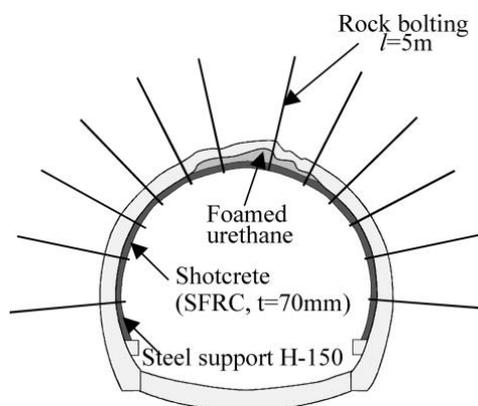


Figura 2.3: Schema degli interventi (Asakura e Kojima,2003)

Dall'esperienza maturata a seguito degli avvenimenti di tale galleria si è osservato che quando si usa l'arco rovescio per sopprimere la deformazione causata dalla spinta del terreno, va

rinforzato allo stesso tempo anche il punto debole strutturale (in questo caso la corona della sezione) (Asakura e Kojima 2003).

### 2.2.2 Fukuoka Tunnel

Il tunnel di Fukuoka è stato costruito nel 1975 con una lunghezza totale di 8488 m. Lo scavo è avvenuto tramite la tecnica del *Bottom Pilot Tunnel Method*, il metodo prevede normalmente lo scavo di due gallerie, vale a dire una galleria pilota e una galleria principale. La galleria pilota ha una sezione trasversale che misura solitamente circa 2,4 m x 2,4 m ed è condotta parallelamente alla galleria principale, collegandosi a quest'ultima tramite una serie di tagli trasversali in molti punti. La galleria principale viene quindi scavata da un certo numero di punti. Il rivestimento è stato attuato tramite calcestruzzo non armato gettato in opera. La profondità è di circa 100 m all'interno di un'area geologica composta principalmente da scisti duri verdi.

Il 27 giugno del 1999 il treno Hikari si è fermato all'interno della galleria a seguito di una rottura del pantografo della dodicesima carrozza. Dopo indagini approfondite è stata rilevata la causa del danno (Figura 2.4): un blocco di rivestimento ha ceduto in prossimità di un rene della sezione della galleria.



Figura 2.4: Blocco del rivestimento ceduto (Asakura e Kojima,2003)

Le indagini, oltre a rilevare il deterioramento del tunnel, ne hanno definite le cause. In particolare il deterioramento è avvenuto a causa di una combinazione di fattori quali la formazione di discontinuità all'interno della parte inferiore della calotta, l'influenza delle venute d'acqua e delle vibrazioni del treno che hanno indebolito la struttura, e infine le

vibrazioni generate dai treni e la pressione dell'aria a seguito del cambio di temperatura, che hanno causato la caduta del blocco di rivestimento.

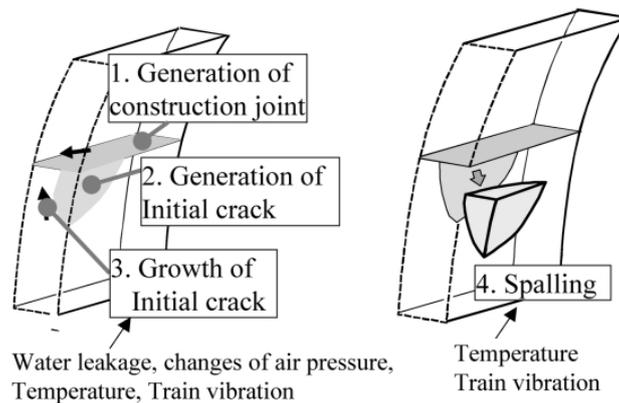


Figura 2.5: Meccanismo di *spalling* del tunnel di Fukuouka (Asakura e Kojima,2003)

## 2.3 Manutenzione gallerie: Iran

Anche in Iran il recupero delle infrastrutture quali le gallerie stradali è oggetto di notevole interesse. Le tecniche di manutenzione adoperate non differiscono particolarmente da quelle già prima citate. Partendo dal principio, anche in questo caso la manutenzione inizia da una fase di ispezione che rispetta un “ordine gerarchico”, partendo quindi prima da una fase macroscopica per poi terminare con una più dettagliata. Le ispezioni preliminari hanno lo scopo di identificare l'eventuale esistenza di una particolare situazione e di esprimere un parere sulla necessità di una specifica ispezione o di un lavoro di riparazione temporanea. Se il difetto è già stato osservato, viene eseguita un'ispezione specifica per decidere se è necessario o meno un intervento di riabilitazione e per misurarne l'urgenza.

Le tecniche diagnostiche per la stabilità della galleria differiscono a seconda della funzione e dell'importanza della galleria. I danni alle gallerie possono essere separati in lievi, moderati e gravi in funzione del livello di deformazione. Danni leggeri rilevati durante l'ispezione visiva che non influiscono sul traffico, non necessitano di ispezione immediata. Tuttavia in caso di *spalling*, fessurazioni, perdite d'acqua, degrado del materiale o danni gravi come cedimenti di pendii, crolli strutturali, spostamenti differenziali, inondazioni e terremoti, che in alcuni casi comportano un'interruzione totale del traffico, è essenziale un'ispezione rapida per proteggere la sicurezza e la funzionalità del tunnel.

Il lavoro di manutenzione può essere classificato in tre gruppi: manutenzione immediata a causa di un danneggiamento importante, manutenzione preventiva e manutenzione proattiva. La manutenzione preventiva viene eseguita entro un periodo di tempo specifico per evitare il verificarsi di danni, il tempo viene stabilito sulla base dell'esperienza di manutenzione o del monitoraggio dei dati. Il ciclo di manutenzione proattiva è simile alla manutenzione preventiva; tuttavia quest'ultima si occupa della determinazione delle possibili fonti di distruzione mentre la prima si basa sulla ricerca di fenomeni straordinari e indaga sulla loro origine. Il livello di funzionamento, l'interferenza con il traffico della galleria, i tempi di riparazione e i costi per questi approcci di manutenzione sono dimostrati e confrontati nella Tabella 2.2.

Tabella 2.2: Confronto tra le varie strategie di manutenzione (Moradi et al., 2021)

Maintenance strategy	Degree of interference during each maintenance	Period of interference for each maintenance	Frequency of interference (maintenance)	User cost (long-term)	Administrative cost (long-term)
Breakdown maintenance	Extremely high	Extremely high	Low	High	High
Preventive maintenance	Low (short-term)	Low (short-term)	a	Middle	Middle
Proactive maintenance	Middle (long-term) Middle	Middle (long-term) Middle	Low	Low	Low

La fase di manutenzione e il monitoraggio delle gallerie vengono supportati tramite metodi di analisi numerica sia 2D che 3D al fine di verificare lo stato delle gallerie, prevedere possibili deterioramenti e verificare l'efficacia di eventuali interventi. In particolare l'analisi numerica viene svolta tramite il software "MIDAS GTS NX". Tale programma di simulazione costruito sulla base dell'approccio agli elementi finiti per l'analisi dell'interazione suolo-struttura e fondato su un linguaggio C ++, aiuta gli ingegneri a eseguire analisi dettagliate di scavi, banchine, posizionamento della struttura, carico e altri fattori che influenzano direttamente la progettazione e la costruzione.

A seguito di quanto appena scritto, risulta interessante esaminare tre casi studio di gallerie stradali all'interno della provincia di Ilam.

### 2.3.1 Payambar tunnel

La galleria Payambar lunga 1480 m ha un'altezza di 765 cm e una larghezza di 1100 cm. La costruzione della galleria è stata completata nel 2009. Entrambi gli ingressi sono rivestiti con rivestimento in muratura, mentre la parte mediana è un tunnel in roccia non rivestito stabilizzato

con bulloni. La maggior parte dei bulloni ha perso una parte significativa della sua prestazione negli ultimi anni a causa della corrosione, dell'ambiente ostile e del carico asimmetrico.

Su varie superfici del tunnel sono visibili segni di agenti atmosferici e perdite d'acqua oltre a crepe di varie larghezze. Inoltre, durante e dopo il terremoto di Sarpol-Zahab, i rapporti indicano l'esplosione (rockburst) della calotta all'interno della zona intermedia dove è presente una zona di parcheggio (Figura 2.6) con superficie rocciosa non rivestita, pur essendo stata monitorata frequentemente durante il suo attuale periodo di vita.



Figura 2.6: Posizione dove è avvenuto il fenomeno del “rockburst” (Moradi et al., 2021)

Inoltre, il 18 aprile del 2018 vi è stato un evento di *spalling* del rivestimento in muratura come mostrato in Figura 2.7.



Figura 2.7: Rimozione detriti a seguito dello *spalling* del rivestimento in muratura (Moradi et al., 2021)



Figura 2.8: Sostituzione del rivestimento in muratura instabile con uno in cemento armato (Moradi et al., 2021)

A seguito di quanto appena mostrato, si è ritenuto necessario ricorrere all'analisi numerica al fine di individuare le zone più fragili della galleria e di prevedere, per quanto fosse possibile, eventuali danneggiamenti futuri. Si è quindi proceduto tramite MIDAS GTS NX alla creazione del modello numerico. In particolare, una volta modellata la geometria effettiva (rivestimento in muratura) e quella prevista (ancoraggi e rivestimento di cemento armato) in campo tridimensionale, si è quindi proceduto con la definizione delle proprietà dei materiali ottenuti tramite test di laboratorio e in situ. Infine sono stati applicati 7 diversi eventi di terremoto nelle direzioni x e y per valutare la deformazione massima e predire eventuali collassi in determinate zone della galleria. I terremoti scelti (Tabella 2.3) sono forniti dal database ISMN (Iran Strong Motion Network) il quale raccoglie tutti gli eventi sismici storici.

Tabella 2.3: Dati dei 7 terremoti utilizzati nel modello numerico (Moradi et al., 2021)

Earthquake	Sarpol Zahab	Soomar	Taze Abad	Eyvan	Ilam	Eslamabad Gharb	Loomar
Record Number	7384/01	7694-05	8045	6338	7341	7313	7385
Latitude	34.459	33.88	33.738	33.823	33.645	34.11	33.569
Longitude	45.868	45.641	46.154	46.312	46.428	46.529	46.815
Date	12-Nov-17	11-Jan-18	25-Aug-18	18-Aug-14	12-Nov-17	12-Nov-17	12-Nov-17
Time	18:18:16	7:21:38	22:13:25	2:32:06	18:18:16	18:18:16	18:18:16
Max g (L comp) cm/s/s	685.73881	268.3594	799.65677	15.01767	59.30235	122.07083	138.06018
Max g (T comp) cm/s/s	570.958	427.8289	724.45362	17.2434	73.48445	128.19769	79.30906

Successivamente sono stati scelti quattro punti della galleria al fine di analizzare 4 zone ben distinte della galleria (Figura 2.9).

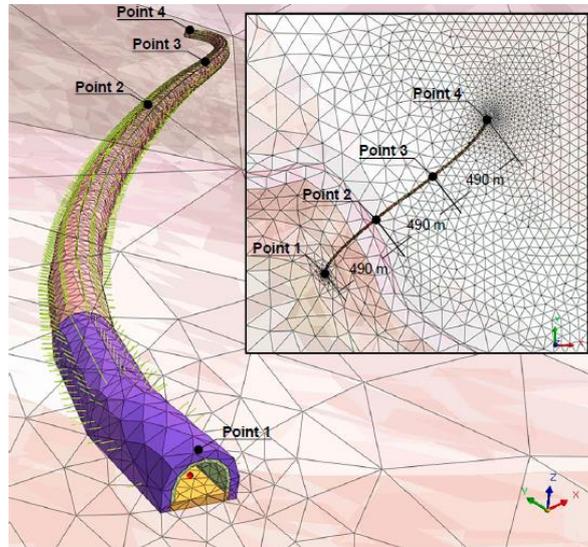


Figura 2.9: Quattro punti selezionati della galleria per analizzare i risultati (Moradi et al., 2021)

Si è osservato che il punto 4 risulta quello più sollecitato in quanto, non solo si osservano deformazioni evidenti, ma è soggetto a delle traslazioni relative molto più elevate rispetto al punto 1. In pratica si è verificato che zone in cui vi è un alto rischio sismico e strati molto inclinati di ammassi rocciosi collocati vicino faglie attive (dove appunto si trova il punto 4), sono assolutamente da evitare per la costruzione delle gallerie.

Nonostante l'analisi numerica abbia evidenziato la vulnerabilità maggiore dell'estremità finale della galleria, quest'ultima risulta rivestita solo per i primi 35 m dalla sezione d'ingresso. Pertanto, era necessaria l'installazione di ancoraggi impermeabilizzati e di un rivestimento in cemento armato al fine di riabilitare la zona della galleria non rivestita. Sono stati quindi ipotizzati tre sistemi di rinforzo della galleria (Figura 2.10).

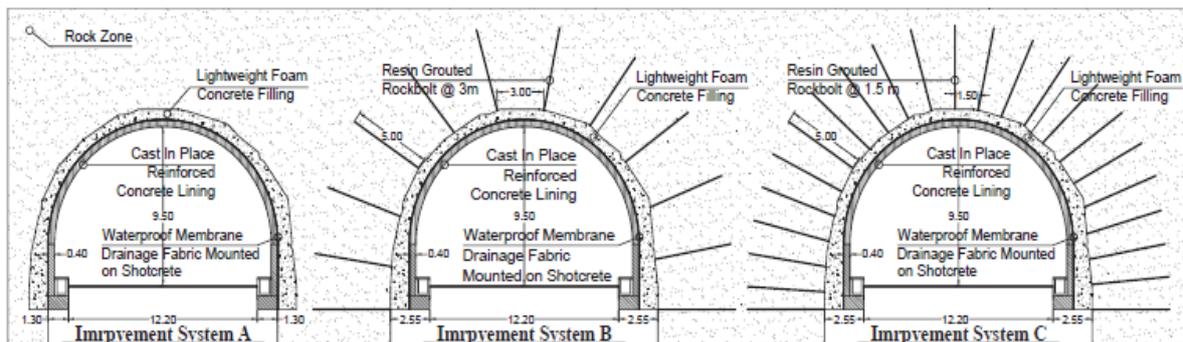


Figura 2.10: Tre differenti approcci di riabilitazione (Moradi et al., 2021)

Come si evince dalla figura, il sistema A è l'unico dei tre che non prevede l'uso di ancoraggi, mentre nel sistema B e C sono presenti ma con una spaziatura diversa. Ciononostante, l'analisi FEM (Finite Element Method) ha evidenziato che ciascuno dei tre sistemi di miglioramento non influenzano particolarmente la traslazione relativa durante il terremoto, ma riducono la deformazione e migliorano la stabilità della galleria (Moradi, et al. 2021). Per quanto concerne il rivestimento in muratura presente, sono state rilevate delle perdite d'acqua e ammaloramento dei materiali, per cui si è deciso di intervenire con l'iniezione di una malta dietro il rivestimento al fine di migliorare la stabilità dello stesso e di ridurre la permeabilità. Inoltre, è stata prevista la sostituzione dei mattoni in evidente stato di degrado. Avendo evidenziato la presenza dell'acqua, per evitare problemi durante la stagione invernale dovuti al congelamento, è stato necessario programmare interventi con iniezioni di malta per chiudere le fessure e l'applicazione di uno strato temporaneo impermeabile con lo scopo di convogliare nei canali di drenaggio l'acqua presente. Ovviamente è preferibile attuare quest'ultimo intervento in modo sistematico lungo l'intera galleria per evitare di spostare l'acqua semplicemente dalla sezione interessata a quella vicina. Alcune parti dei canali di drenaggio erano gravemente danneggiate o piene di detriti, con conseguente blocco del sistema di trasferimento dell'acqua che ha richiesto un programma di manutenzione immediata.

La bassa qualità dell'aria dovuta alla lunga lunghezza del tunnel è stata risolta progettando un sistema di ventilazione con ventilatori longitudinali. Inoltre, vengono proposti sistemi di estinzione incendi, squadra di soccorso, sorveglianza e monitoraggio per aumentare la qualità del servizio e prevenire la chiusura delle gallerie (Moradi, et al. 2021).

### 2.3.2 *Azadi tunnel*

La galleria Azadi è collocata sulla strada tra Ilam e Sarableh. La sua lunghezza è pari a 1200 m, larghezza 10.4 m e altezza minima 7.2 m. Il rivestimento utilizzato è particolare, in quanto vi sono zone sia in muratura, sia cemento gettato in opera, sia con spritz-beton, o in alcuni casi una combinazione di tutte e tre le tipologie. A causa della presenza di una falda, l'acqua corrode le armature e degrada il cemento presente. Si può osservare dalla Figura 2.11 che tale situazione ha generato problemi di fessurazione e di *spalling*.



Figura 2.11: *Spalling* del rivestimento in cemento armato nell'Azadi Tunnel (Moradi et al., 2021)

Inoltre, durante i mesi più freddi, a causa delle venute d'acqua si generano delle stalattiti di ghiaccio come mostrato in Figura 2.12.



Figura 2.12: Formazione di stalattiti di ghiaccio nell'Azadi Tunnel durante la stagione invernale (Moradi et al., 2021)

Per evitare la formazione di queste stalattiti, che possono essere pericolose per l'utenza, è stato proposto un sistema di drenaggio temporaneo dell'acqua.

Al fine di riabilitare la galleria, sono stati installati degli archi in cemento armato che poggiano su delle superfici laterali in muratura già esistenti aventi un'altezza pari a 2 m. Per evitare ulteriori spostamenti e danneggiamenti al rivestimento esistente, è stata prevista la demolizione parziale delle superfici in muratura. È stato quindi proposta la sostituzione della muratura con dei muri in cemento armato che verranno collegati all'arco preinstallato tramite dei ferri di ripresa (Figura 2.13).

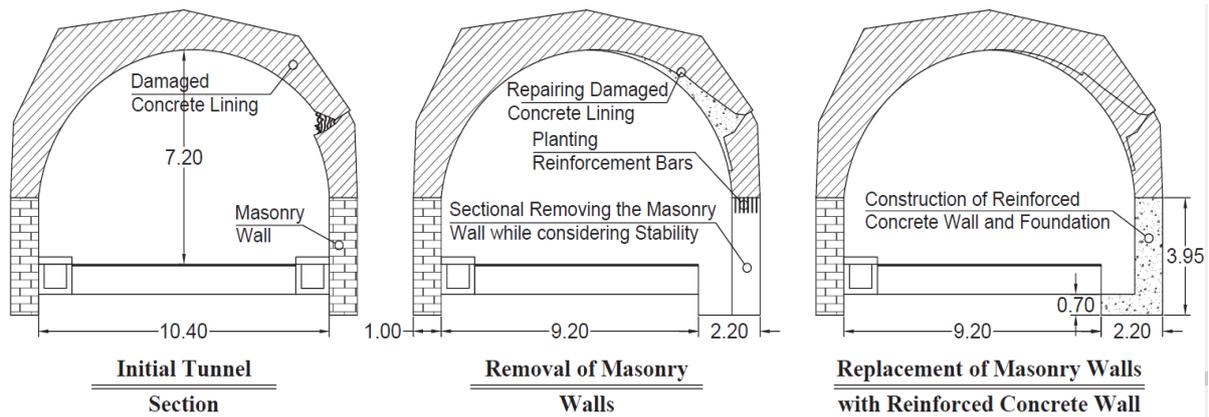


Figura 2.13: Sostituzione della muratura con il cemento armato (Moradi et al., 2021)

## 2.4 Manutenzione gallerie: Cina

Negli ultimi anni la costruzione di gallerie in Cina ha subito rapidi sviluppi; in particolare la Cina possiede attualmente il maggior numero e la maggiore lunghezza di autostrade del mondo. Nel 2018 la lunghezza totale delle autostrade cinesi è stata segnalata pari a 4.846.500 km, inclusi 17.236 km di tunnel autostradali. Dopo un'iniziale politica di costruzione delle gallerie autostradali, negli ultimi anni è nata l'esigenza di provvedere alla manutenzione delle gallerie già esistenti, a causa di numerosi deterioramenti rilevati. Tramite l'analisi statistica di 90 gallerie nella nazione cinese sono stati quindi riclassificati i difetti e i deterioramenti in funzione delle loro cause e sono state messe a punto misure di manutenzione proattiva e preventiva (Ye, et al. 2021). Il *flow chart* del procedimento di manutenzione viene indicato nella Figura 2.14:

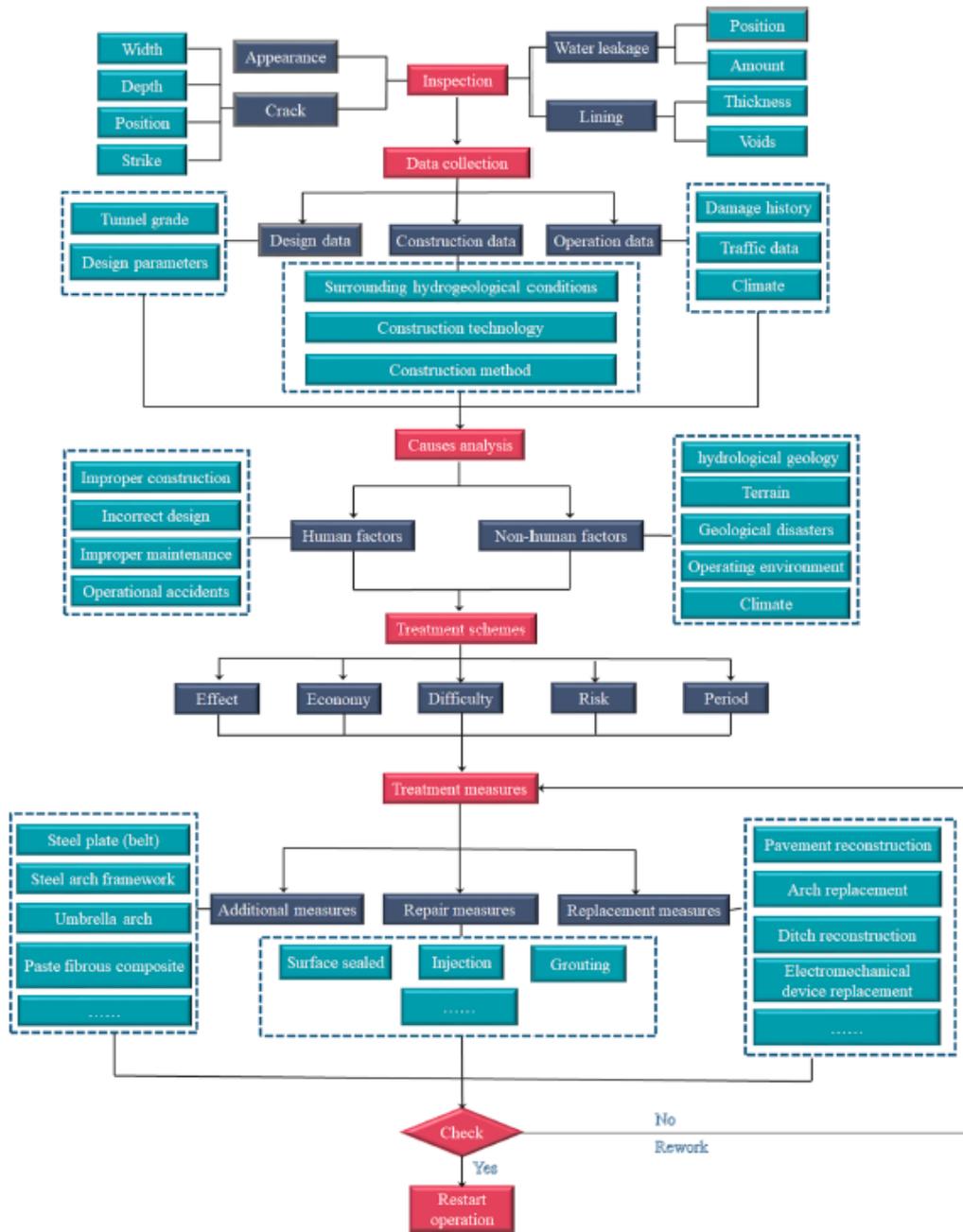


Figura 2.14: Flow chart della manutenzione delle gallerie autostradali in Cina (Ye et al., 2021)

Facendo riferimento al *flow chart* (Figura 2.14), si possono osservare i vari step necessari per determinare il processo di manutenzione delle gallerie utilizzato in Cina. Innanzitutto si procede con il rilevamento dei difetti della galleria in esame. Data la difficoltà nell'individuare quest'ultimi, tale passaggio è diviso in due fasi: una prima fase basata su un approccio visivo per individuare difetti macroscopici (danni e deformazioni strutturali, venute d'acqua e problemi di congelamento), mentre la seconda fase si svolge tramite prove non distruttive basate

sull'elettromagnetismo o sui raggi infrarossi come ad esempio l'uso di georadar, in grado di individuare difetti nascosti come l'eventuale presenza di fessurazioni.

Una volta individuati e classificati tutti i difetti, è necessario svolgere un'analisi dettagliata dei dati in possesso relativi alla galleria in esame così da poterne determinare le cause. L'individuazione della causa consente di conoscere l'origine del difetto e di intervenire quindi solo su una porzione esatta della galleria, evitando di danneggiare il rivestimento con prove distruttive inutili. Successivamente avendo analizzato i difetti, è possibile procedere con l'intervento più adeguato in funzione di vari parametri di natura tecnica ed economica in modo tale da intervenire nel modo ottimale. Infine vi è una fase di validazione degli interventi applicati: tramite analisi numerica si verifica che gli interventi applicati siano effettivamente in grado di risolvere le problematiche riscontrate. In generale si può affermare che in Cina viene adottata una politica di prevenzione più che di riparazione, al fine di ridurre i danni e i costi di intervento.

Le misure di prevenzione utilizzate in Cina vengono distinte in funzione della causa dell'ammaloramento o del difetto. In particolare, le cause sono distinte in due grandi macrocategorie: quelle dipendenti da fattori umani e quelle invece indipendenti.

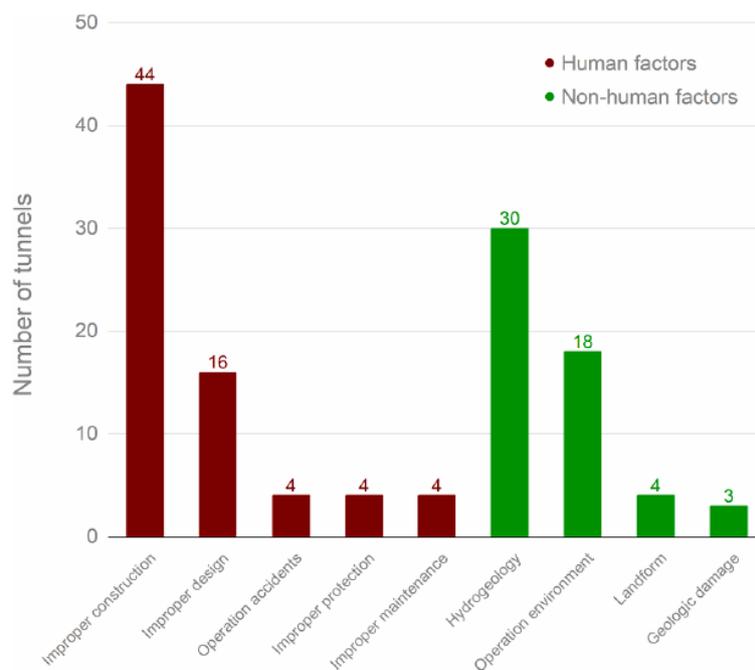


Figura 2.15: Statistica delle cause di difetti nelle gallerie in Cina (Ye et al., 2021)

Come mostrato in Figura 2.15, i fattori umani sono le cause principali dei difetti nei tunnel autostradali cinesi. I difetti causati da fattori umani possono essere prevenuti migliorando la

gestione della costruzione, che dovrebbe essere la chiave per la prevenzione dei difetti delle gallerie. Difetti come spessore insufficiente del rivestimento e vuoti sono causati da un'esecuzione impropria; quindi, è necessario migliorare i processi di costruzione corrispondenti, garantire una gestione appropriata durante tutto il processo di esecuzione del progetto e includere ispezioni di qualità del rivestimento durante la costruzione della galleria. Inoltre, dovrebbero essere introdotti schemi di costruzione e progettazione più avanzati; si dovrebbe inoltre fornire regolarmente una formazione sulla prevenzione dei difetti per aumentare la consapevolezza degli operai e dei progettisti riguardo ai difetti e ai loro pericoli. Inoltre, la frequenza delle ispezioni periodiche dovrebbe essere aumentata e le valutazioni dello stato di salute della galleria dovrebbero essere eseguite in sequenza dopo ogni incidente operativo (Ye, et al. 2021). Le misure preventive per i difetti causati da fattori non umani dovrebbero essere basate su dati dettagliati di indagini idrologiche e geologiche. Per condizioni idrologiche, topografiche e geologiche estremamente dure, dovrebbero essere adottate, per quanto possibile, misure di prevenzione come il cambio della traccia della galleria e la manutenzione preventiva. Inoltre devono essere considerate anche le caratteristiche regionali dei difetti: in base alla locazione della galleria vi possono essere difetti sistematici. Di conseguenza dovrebbe essere stabilita una serie di politiche di progettazione, costruzione e manutenzione di gallerie autostradali per aree specifiche. Sarebbero utili anche la ricerca centralizzata e un trattamento congiunto dei difetti dei tunnel in aree particolari.

A seconda della gravità dei difetti e delle caratteristiche della galleria devono essere applicate diverse misure di intervento. In tale studio queste misure sono classificate come interventi di riparazione, interventi aggiuntivi e interventi di sostituzione, che saranno descritti nel seguito (Ye, et al. 2021).

#### *2.4.1 Interventi di riparazione*

Tale tipologia di interventi viene utilizzata principalmente per difetti che non minano la stabilità della galleria nel breve termine. Si distinguono tre tipi appartenenti a questa categoria: iniezione, sigillatura superficiale e pompaggio. L'ultimo intervento viene principalmente usato per i vuoti che si creano sotto il rivestimento, mentre gli altri due metodi vengono applicati per chiudere eventuali fessure con una larghezza di massimo 0.5 mm all'interno del rivestimento. Queste tre misure sono semplici e veloci e sono generalmente applicabili per il trattamento di difetti relativamente minori. La loro applicazione viene illustrata nella Figura 2.16.

Repair measures.		Renderings
Repair measures	Scope of application	
	Deep cracks with widths of 0.2-0.5 mm and no evident fault in the lining.	
Surface sealing	Cracks with widths of less than 0.2 mm, no evident shear displacement, and water leakage in the lining. Water leakage is low, water pressure is small, but the concrete is dense (Wang et al., 2017).	
Grouting	Water leakage in large areas of the lining with structural damage. The grouting method can be divided into two types: grouting in surrounding rock and grouting beside lining.	

Figura 2.16: Interventi di riparazione (Ye et al., 2021).

#### 2.4.2 Interventi aggiuntivi

Nel caso di difetti più avanzati rispetto ai primi citati, se vi è spazio disponibile, è possibile applicare dei componenti aggiuntivi quali fibre rinforzanti, piastre in acciaio, e telai ad arco in acciaio (centine) e archi a “ombrello”. Questi ultimi sono quelli che vengono maggiormente usati. La loro installazione funge da secondo rivestimento in calcestruzzo della galleria al fine di per migliorarne l’integrità strutturale e la capacità portante.

Per quanto concerne il problema del congelamento, vengono adottate due strategie: sistemi di drenaggio e isolamento termico o calefazione. L’isolamento termico consiste nel definire uno strato di rivestimento secondario in grado di svolgere un’azione di antigelo. Il metodo di calefazione invece prevede l’uso di fonti di calore elettriche, geotermiche o di altro tipo per evitare il congelamento dell’acqua nelle fessure del rivestimento, anche a temperature ambiente

notevolmente basse. Bisogna inoltre tener conto che, installando dei sistemi di drenaggio, è necessario fornire un isolamento termico anche ad essi, in quanto le basse temperature potrebbero congelare l'acqua e ostruire tali sistemi. L'applicazione di tali metodi è illustrata nella Figura 2.17.

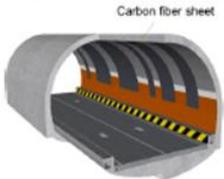
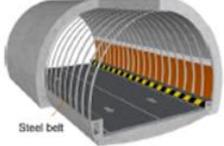
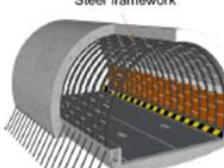
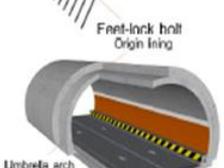
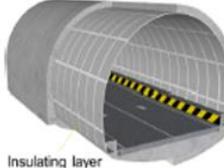
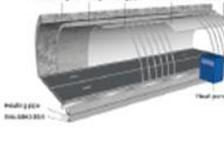
Additional measures.		Before	After
Paste fibrous composite	Strengthen the tensile strength, shear strength, and earthquake-resistant strength of the lining.	 Carbon fiber sheet	 (Longxi Tunnel)
Steel plate (belt)	The cracks are denser, deeper, and wider, the secondary lining may be subject to larger deformations, and there is less surplus clearance.	 Steel belt	
Steel arch framework	Lining deteriorates with small areas peeling off in chips and without leakage, and there is less surplus clearance.	 Steel framework	
Umbrella arch	Lining is severely cracked or crushed, the tunnel structure still has a certain bearing capacity, and the clearance cannot be narrower.	 Umbrella arch	
Heat insulation	Planar water leakage and freezing occur, reconstruction needs to be conducted partly or overall, and there is a large surplus clearance.	 Insulating layer	
Heat preservation and drainage	The degree of coldness is severe, linear water leakage and freezing occur, and there is a large surplus clearance.	 Heating pipe Heat pump	 (Qiu et al., 2017)

Figura 2.17: Interventi aggiuntivi (Ye et al., 2021).

### 2.4.3 Interventi di sostituzione

È logico che, in caso di danni ingenti rilevati durante la fase di ispezione, è necessario procedere direttamente con la sostituzione dell'elemento ormai danneggiato. Tale operazione richiede un lavoro più lungo e sicuramente un costo elevato, ma è sicuramente la tipologia di intervento che fornisce la migliore efficienza. Gli interventi appartenenti a tale categoria adoperati in questo studio sono: ricostruzione della pavimentazione e sostituzione dell'arco.

Attualmente, le gallerie autostradali in Cina sono principalmente pavimentate con calcestruzzo poiché soddisfa i requisiti per la stabilità di guida e quelli per la prevenzione degli incendi e l'illuminazione. Tuttavia, se tali pavimentazioni subiscono un cedimento, è spesso difficile ripararle; l'unico metodo praticabile è la ricostruzione (Ye, et al. 2021).

Inoltre nel caso di danni ingenti al rivestimento della galleria, se la luce di quest'ultima è relativamente piccola, è possibile procedere direttamente con la sostituzione dell'arco. Un'altra tipologia di intervento di sostituzione è sicuramente quella legata all'illuminazione la quale è solitamente irreparabile. La Figura 2.18 riassume quanto appena visto.

Replacement measures.		Before	After
Pavement reconstruction	Severe pavement surface distress, insufficient anti-slide performance		
Arch replacement	Lining with extremely serious crack or crushing, high quality for clearance		
Electromechanical device replacement	Aging and failure of mechanical and electrical equipment, failure of lighting and fans, aging of power supply line		

Figura 2.18: Interventi di sostituzione (Ye et al., 2021).

## 2.5 Manutenzione gallerie: Francia

A differenza di quanto fatto nei paragrafi precedenti, quest'ultimo si sofferma su particolari tecniche di ispezione e diagnosi delle gallerie della rete metropolitana di Parigi gestita dalla compagnia francese RATP (Régie Autonome des Transports Parisien). La rete, costituita principalmente da gallerie in muratura costruite varie decine di anni fa, è soggetta ad un processo di ispezioni visive periodiche che forniscono informazioni essenziali per la valutazione dello stato delle gallerie, nonostante tali informazioni siano per lo più di carattere qualitativo (Llanca, Breul e Bacconnet 2017). Ovviamente in caso di rilevamento di ingenti deterioramenti, vengono svolte ulteriori ispezioni più approfondite. Entrando nel merito della metodologia applicata da RATP per la manutenzione della rete di gallerie, il processo parte quindi da ispezioni visive condotte con cadenza annuale e una più dettagliata effettuata almeno ogni cinque anni. Ad ogni difetto o deterioramento (fessure, macchie di umidità, ...) viene assegnato un punteggio che varia da 1 a 7 in base alla sua natura e al suo grado di ammaloramento: 1 per danni superficiali e 7 per danni ingenti o difetti di tipo strutturale. Il punteggio attribuito è il risultato della combinazione di una classe indicante lo stato della struttura e di un indice opzionale che valuta il rischio di anomalia. Una volta registrati i difetti, viene stabilito un punteggio di salute generale della struttura (punteggio globale). In generale, il punteggio globale è correlato al punteggio predefinito più frequente e varia da 1 a 6 (dove 1 caratterizza lo stato di una nuova struttura, 6 quello di uno stato prossimo al rudere). Successivamente, in base al punteggio di salute globale ottenuto, può essere presa una decisione in merito all'operazione di manutenzione da eseguire (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

Tuttavia, come evidenziato all'inizio, tale metodologia di assegnazione di punteggi si basa su informazioni poco dettagliate fornite da ispezioni visive. Inoltre in caso di rilevamento di difetti gravi sono necessari interventi complessi che richiedono l'uso di mezzi pesanti e invadenti. Per tale motivo è stato proposto un nuovo sistema di monitoraggio complementare a quello appena citato basato sull'utilizzo di diverse modalità di ispezione quali test geofisici e prove endoscopiche. L'applicazione di tali esami non distruttivi fornisce un grande risparmio di tempo in quanto l'approccio tradizionale, essendo molto invadente e distruttivo, richiede tempistiche elevate. L'uso di tale nuova metodologia di monitoraggio mira alla definizione di un nuovo punteggio associato a tre aspetti principali (Figura 2.19): rivestimento in muratura, interfaccia tra la galleria e il terreno circostante e stato di quest'ultimo.

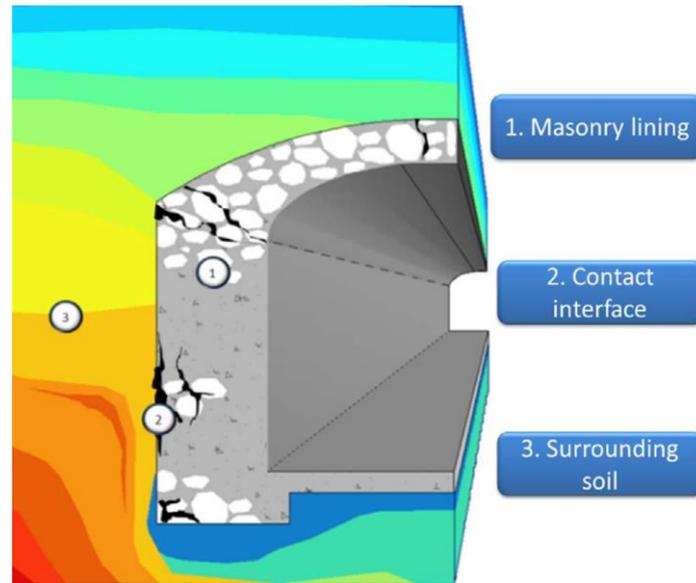


Figura 2.19: Componenti della galleria in muratura (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

### 2.5.1 Caratterizzazione del rivestimento in muratura e della superficie di contatto

“La caratterizzazione locale del rivestimento in muratura è stata eseguita mediante un'ispezione endoscopica del rivestimento del tunnel e dello strato di interfaccia di contatto all'interno di fori di piccola dimensione ( $\phi = 22 \text{ mm}$ ). L'elaborazione automatica delle immagini è stata utilizzata per rilevare anomalie (vuoti, crepe, ecc.) nel rivestimento e la presenza (o assenza) di contatto tra il rivestimento e il terreno circostante. Il risultato ha fornito un'analisi locale dello spessore e del deterioramento del rivestimento” (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

In base ai dati ottenuti da tali prove geoendoscopiche, è stato definito un sistema per valutare lo stato del rivestimento in muratura (Llanca, Breul e Haddani, et al. 2013) basato sui valori di parametri ottenuti da prove meccaniche di laboratorio sui provini e tenendo conto dello stato di degrado. L'approccio consiste nella definizione di tre sotto-strati rilevabili dalle prove endoscopiche (Figura 2.20):

- Zona 1 (spessore  $t_1$ ): strato di muratura privo di difetti e discontinuità;

- Zona 2 (spessore  $t_2$ ): strato di muratura danneggiato che presenta deterioramento e presenza di discontinuità. Per tale motivo si considera una riduzione delle proprietà meccaniche in base al grado di deterioramento e alla frequenza di discontinuità;
- Zona 3 (spessore  $t_3$ ): strato di muratura completamente disaggregato, privo di continuità meccanica e quindi di coesione.

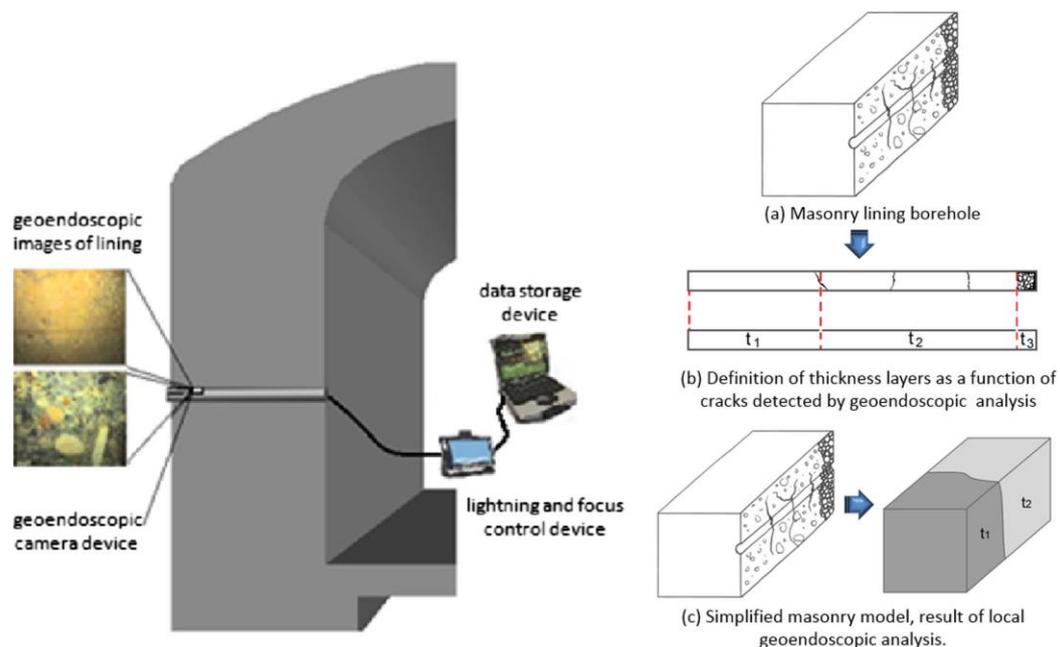


Figura 2.20: Caratterizzazione locale del rivestimento in muratura tramite endoscopia (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

La zona 3 viene rilevata in genere in prossimità dell'estradosso della galleria. Difatti la zona 3 rappresenta una zona di transizione tra il rivestimento della galleria e il terreno circostante, per cui le proprietà, meccaniche assunte sono quelle di un materiale sciolto. L'applicazione di tale sistema consente di calcolare lo spessore effettivo  $t_{\text{eff}} = t_1 + t_2$  del rivestimento della galleria. Tale spessore corrisponde a quello che effettivamente assicura la resistenza strutturale della galleria (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

### 2.5.2 Caratterizzazione geofisica

Questo tipo di caratterizzazione è basato principalmente su due tipi di test: *GPR- ground penetration radar* e *l'impulse-response method*. Queste due prove forniscono lo spessore del rivestimento ed eventuali differenze fisiche e meccaniche della struttura tramite una rapida mappatura. L'*impulse-response test* è basato sulle caratteristiche di propagazione delle onde all'interno dell'elemento esaminato. Il funzionamento consiste nell'uso di un martello dotato di

un sensore di forza che impatta l'elemento e la risposta viene recepita tramite un trasduttore di velocità. In funzione della velocità e della forza applicata, relazionati alla frequenza delle onde, sono stati considerati tre parametri quali S\*M (*slope\*mobility of the element under test*), l'indice dei vuoti e la rigidità dinamica derivanti da tale test. Infine si è verificato un'eventuale relazione tra questi e le proprietà meccaniche della muratura tenendo conto di condizioni specifiche quali l'eterogeneità dell'elemento, lo spessore e la geometria variabile. Si è evidenziato che il parametro S\*M è strettamente correlato alle caratteristiche meccaniche del materiale appartenente al primo strato del rivestimento (quello meno danneggiato). Difatti tramite alcuni sondaggi effettuati in diverse stazioni della metropolitana, è stato possibile sviluppare la seguente relazione tra S\*M e lo spessore  $t_1$  (Llanca, Breul e Bacconnet 2017):

$$t_1(m) = 1.64 - 0.47 * \ln(S * M) \quad (2.1)$$

Nonostante la grande efficienza di tale relazione che consente di definire lo spessore  $t_1$  da uno studio di impedenza, bisogna tener conto che maggiore risulta essere lo spessore della muratura, minore è l'accuratezza del test.

Per quanto concerne il GPR, quest'ultimo consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche all'interno del materiale tramite un'antenna. In funzione della conducibilità e della dielettricità del materiale, le onde ad alta frequenza vengono interamente o parzialmente riflesse e in base al tempo di ritorno e alla costante dielettrica del materiale è possibile definire lo spessore della muratura, nonché la presenza di eventuali discontinuità e vuoti. Tale tecnologia richiede un uso complementare alle prove endoscopiche al fine di effettuarne la calibrazione.

È stato rilevato che l'evoluzione del degrado del rivestimento della galleria è collegato all'ambiente circostante come l'evoluzione dei terreni circostanti, il cambio di condizioni climatiche, nonché modifiche del livello dell'acqua (riduzione delle caratteristiche meccaniche quando le condizioni dell'acqua diventano più severe, rigonfiamenti dovuti all'idratazione di alcuni tipi di argille e rocce, ecc.). A tal proposito è nata la necessità di studiare anche il terreno tramite test in situ quali prove penetrometriche leggere e prove endoscopiche che forniscono una caratterizzazione e una stima del modulo di elasticità.

### 2.5.3 Modalità di assegnazione del punteggio

L'applicazione delle prove prima citate fornisce una serie di dati utili per il nuovo sistema di monitoraggio proposto:

- Spessore della muratura intatta ( $t_1$ );
- Spessore effettivo della muratura ( $t_{eff}$ );
- Stato dell'interfaccia tra terreno e rivestimento;
- Caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno circostante.

È stato quindi necessario analizzare questi dati per sviluppare un sistema di punteggi da assegnare alla galleria. In particolare, per quanto concerne la muratura, si è stabilito di tener conto di  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_{eff}$ . Considerando quest'ultimo, dopo aver effettuato una serie di analisi, sono stati definiti degli intervalli in funzione dello stato effettivo del rivestimento considerando lo spessore iniziale della muratura  $t_{init}$  fornito da prove endoscopiche e documenti di costruzione delle gallerie.

- $t_{eff} > 2/3 t_{init}$ : è una condizione ottima della galleria in quanto si tiene in conto che il rivestimento in muratura era sovradimensionato all'epoca, per cui si accetta che una parte di esso non partecipi alla resistenza strutturale;
- $1/2 t_{init} < t_{eff} < 2/3 t_{init}$ : una situazione che indica una muratura con un degrado importante che provoca una redistribuzione dei carichi, portando ad una perdita di resistenza strutturale;
- $t_{eff} < 1/2 t_{init}$ : in questo caso la muratura è ampiamente danneggiata e richiede un intervento urgente.

Per quel che riguarda l'interfaccia i limiti da considerare sono in funzione dei risultati determinati dalle prove endoscopiche in base alla percentuale di contatto che vi è tra il terreno e il rivestimento analizzato.

- il contatto esiste nel 100% dei test endoscopici;
- il contatto esiste nel 50% dei test endoscopici;
- il contatto esiste nel 0% dei test endoscopici.

Infine per la valutazione del terreno circostante si tiene in conto delle sue caratteristiche meccaniche, del grado di compattazione e dello stato idrogeologico. Sulla base di questi tre dati, lo stato del terreno circostante viene dichiarato “in evoluzione” (o rischioso), o “non in evoluzione”. Ad esempio, un'argilla umida e con debole resistenza sarà dichiarata “terreno in evoluzione o rischioso”. Al contrario, la sabbia compattata sarà dichiarata “terreno non in evoluzione” (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

Sulla base dei limiti appena citati, è stato sviluppato il *flow chart* (Figura 2.21) rappresentante il sistema di assegnazione del punteggio, in conformità con il punteggio tradizionale applicato dagli ispettori RATP menzionato in precedenza.

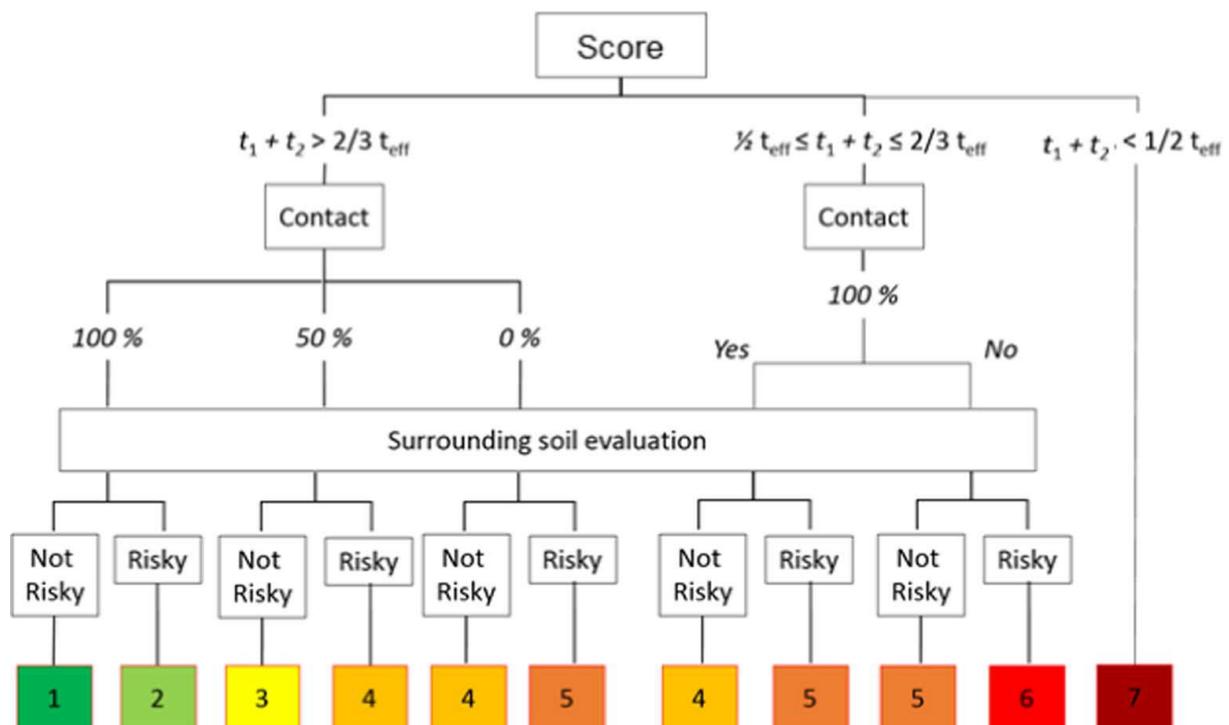


Figura 2.21: *Flow chart* per l'assegnazione del punteggio (Llanca, Breul e Bacconnet 2017).

Si osserva che il punteggio varia da 1 a 7 dove al crescere del punteggio, aumenta il grado di danneggiamento. Considerando che i dati relativi a tale sistema di monitoraggio sono riferiti a test locali, al fine di determinare il punteggio di un'intera area, si procede in due modi: se più del 20% dei punteggi locali è pari a 6 o a 7, allora si assegna un punteggio pari a 7 all'area, altrimenti si applica semplicemente una media.

Come anticipato in precedenza, tale nuovo metodo di assegnazione di punteggi è complementare a quello tradizionale prima citato, in quanto il punteggio ottenuto tramite la

modalità esposta in Figura 2.21 deve essere unito a quello determinato dagli ispettori RATP durante le ispezioni visive. Vi sono tre modalità da seguire:

- 1) Se è disponibile solo il punteggio inerente alle ispezioni visive, si considera questo come punteggio finale;
- 2) Se sono disponibili entrambi i punteggi, si stabilisce come punteggio finale quello inerente al nuovo metodo;
- 3) Infine se è disponibile unicamente il punteggio definito con il nuovo metodo, allora si adopera come punteggio finale.

## 2.6 Conclusioni

Sono stati analizzati i processi di manutenzione delle gallerie sia autostradali che ferroviarie in diversi paesi quali Giappone, Iran e Cina. Inoltre è risultato di notevole interesse il nuovo metodo di monitoraggio proposto per la metropolitana di Parigi riguardante le gallerie in muratura. Per quanto concerne i diversi processi di manutenzione studiati, si è osservato una forte similitudine tra i diversi approcci. Difatti ciascuno applica un ordine gerarchico di ispezione che garantisce l'individuazione di eventuali difetti sia superficiali che interni alla struttura, poiché in ogni caso vi è sempre un'ispezione preliminare e poi una più dettagliata. I problemi che sono stati maggiormente rilevati nei casi studio analizzati sono relativi principalmente alle venute d'acqua e a fenomeni di *spalling*, le cui cause sono spesso state legate a effetti idrogeologici che con il tempo hanno deteriorato la galleria. Nella documentazione reperita vengono citate diverse tecniche di intervento in base alla natura del difetto quale l'installazione di strati impermeabili per deviare le venute d'acqua, sostituzione della muratura con il cemento armato, sigillatura delle fessure, pompaggio ecc. Inoltre un passaggio che viene spesso preso in considerazione è la modellazione numerica delle gallerie in esame che ha un duplice funzionalità: individuare la natura dei difetti rilevati durante le fasi di ispezione e validare gli interventi da attuare nel processo di manutenzione. Per quanto riguarda l'ultimo paragrafo riguardante la metropolitana di Parigi, è stato interessante studiare un nuovo metodo di monitoraggio per le gallerie in muratura, basato sull'uso di diverse

tipologie di prove per assegnare un punteggio che definisce lo stato della muratura. Difatti nei capitoli successivi si andrà ad analizzare il metodo SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels) che definisce una priorità di intervento della galleria tramite un sistema basato proprio sull'assegnazione di un punteggio.

# 3 Ispezione delle gallerie in Italia e tipologie dei difetti

## 3.1 Introduzione

Le gallerie autostradali sono spesso soggette a difetti e deterioramenti che richiedono un'adeguata ispezione e, se necessario, lo svolgimento di interventi al fine di garantire la condizione ottimale di tali infrastrutture. Un difetto può essere definito come il risultato di un evidente errore di esecuzione o di una mancata attuazione di una specifica. Tale imperfezione che può essere visibile o invisibile, una tantum o sistematica, in generale non ha conseguenze, ma può in alcuni casi provocare un problema o aggravarlo. In realtà la maggior parte dei difetti non influenzano in modo determinante la stabilità della galleria (Centre d'Etudes des Tunnels 2015). Esempi di difetti sono:

- Difetti nell'aspetto del rivestimento;
- Difetto di allineamento tra i segmenti durante la costruzione;
- Deformazione della cassaforma;
- Imperfezione di allineamento in vecchie gallerie non rivestite che si sono manifestate durante la costruzione;
- Nidi d'ape, segregazioni, sfiatatoi, *bleeding*, o perdita di fini nel calcestruzzo.

Il deterioramento invece si riferisce ad un qualsiasi problema che interessa un elemento o una parte della struttura e che si manifesta gradualmente o improvvisamente e che denota un cambiamento. È diverso da un difetto, che è un'imperfezione una tantum o sistematica, il più delle volte derivante dalla costruzione (Centre d'Etudes des Tunnels 2015). Le cause del deterioramento sono molteplici. Le principali cause di degrado sono l'alterazione di materiali e strutture, il comportamento del terreno circostante e l'azione dell'acqua.

Durante un'ispezione della struttura è importante cercare il prima possibile le probabili cause del deterioramento osservato:

- Apparizione di crepe o deformazioni evidenti;
- Presenza di macerie, ridimensionamento ecc.;
- Afflusso di acqua (Centre d'Etudes des Tunnels 2015).

Al fine di determinare la presenza o meno di tali difetti e deterioramenti, è necessario attuare un sistema di sorveglianza rappresentante il complesso di attività di controllo, ispezione e monitoraggio delle gallerie. Tale sistema deve essere svolto per assicurare la disponibilità, la funzionalità e il mantenimento delle condizioni di sicurezza dell'infrastruttura stessa.

Le attività di sorveglianza e monitoraggio sono strutturate in modo da comprendere sia ispezioni ordinarie e straordinarie sia l'esecuzione di campagne di indagini diagnostiche e l'installazione di sistemi per il monitoraggio strumentale temporaneo o permanente.

La documentazione di riferimento per la definizione di tutti gli aspetti tecnici e burocratici è fornita dal Manuale di Ispezione Gallerie del 2020 fornito dal MIT (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), il quale si basa su una manualistica relativa alle modalità di esecuzione delle ispezioni in galleria, e su un modello di classificazione dei difetti, redatto in aderenza alle Linee Guida CETU (Centre d'Etudes des Tunnels, 2015) riguardanti le opere di genio civile.

Tale documentazione è articolata nel seguente modo:

Classificazione dei difetti IQOA: Per la restituzione dello stato di salute delle gallerie si è scelto di fare affidamento alla Classificazione "IQOA", "Image qualité des ouvrages d'art", che rappresenta il sistema di classificazione in uso al Traforo del Monte Bianco (TMB) e in altri trafori internazionali, approvato dal Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) e conforme alle prescrizioni delle Circolari del Ministero LL.PP. n. 6736/61 del 19.7.1967 e n. 34233 del 25.02.1991.

Manuale delle Ispezioni: Alla luce dell'esperienza positiva maturata al Traforo del Monte Bianco (TMB), si è scelto di dotarsi dello stesso Manuale delle Ispezioni adottato per l'attività di sorveglianza di tale tunnel. Il suddetto manuale, oltre a contenere un ampio catalogo dei difetti, fornisce le indicazioni necessarie a correlare ogni difetto alla sua potenziale causa scatenante, formulando ipotesi di diagnosi e proposte di rimedio.

Catalogo dei Difetti: A completamento del Manuale delle Ispezioni è stato messo a punto il Catalogo dei Difetti, che descrive i difetti tipici che possono essere osservati nelle gallerie a seconda del materiale di cui sono costituiti i rivestimenti. Tale documento si compone di una serie di schede difettologiche comprensive dei parametri di valutazione da adottare in fase di ispezione.

Schede Identificative di Ispezione: Elemento fondamentale del Manuale di Ispezione sono le Schede Identificative di Ispezione (SII) che vengono utilizzate, in forma cartacea oppure informatizzata su tablet, per le ispezioni in galleria.

Altre attività di sorveglianza: A corredo delle ispezioni visive sono inoltre previste ulteriori attività di sorveglianza che prevedono l'esecuzione di prove non distruttive e semidistruttive, prove di misura tensionale (ad es. con martinetti piatti) ed indagini di vario tipo (ad es. georadar, termografia, tomografia, videoendoscopie, prelievi di carote, etc).

Monitoraggio periodico o continuo: Ove richiesto dagli specialisti coinvolti nelle attività di sorveglianza, in particolare per i casi in cui sono state riscontrate particolari criticità o problematiche di dubbia valutazione, è previsto che vengano eseguite attività di monitoraggio, che potranno essere di due tipi:

- monitoraggio occasionale o periodico: di durata relativamente breve, eventualmente ripetuto, con regolarità per verificare l'evoluzione di un determinato difetto;
- monitoraggio permanente: concepito per rimanere funzionante a lungo periodo, sino a coprire, se necessario, l'intera vita dell'opera.

Il sistema di monitoraggio di volta in volta necessario dovrà essere progettato attenendosi alle indicazioni riportate nel documento UNI TR 11634:2016 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale".

Tipologici di interventi: Al fine di garantire una pronta attivazione dei lavori nei casi in cui le ispezioni evidenziano problematiche da risolvere con urgenza o nell'immediato, si rende necessario predisporre una serie di interventi progettuali tipologici da attuare al fine di risolvere le problematiche più frequentemente riscontrabili durante l'ispezione. Resta inteso che per criticità di elevata complessità e/o di notevole estensione debbano essere predisposti tutti i necessari approfondimenti e approntati gli opportuni interventi specifici per risolvere la problematica nel suo complesso.

Tunnel Management System: Per il successo delle strategie di sorveglianza e monitoraggio è fondamentale l'utilizzo di un sistema unico e strutturato di raccolta, archiviazione e gestione di tutti i dati. Tale sistema di gestione dovrà essere in grado di raccogliere ed organizzare la seguente documentazione:

- Documentazione storica (as-built);
- Interventi di manutenzione ordinaria/straordinaria pregressa;
- Risultanze delle indagini eseguite (laser-scanner, georadar, carotaggi, etc);
- Schede Identificative di Ispezione con relativa relazione;
- Risultanze di eventuali sistemi di monitoraggio;
- Progetti dei nuovi interventi;
- Pianificazione della manutenzione ordinaria e straordinaria.

A partire dalle informazioni derivanti dalle attività di monitoraggio/sorveglianza delle gallerie, il sistema dovrà anche fornire un supporto decisionale all'ente gestore che permetta di definire i flussi di lavoro e individuare i migliori scenari di manutenzione per attuare gli interventi necessari nelle varie gallerie.

La funzione del Tunnel Management System è pertanto duplice, ovvero di database e di strumento di supporto programmatico-organizzativo-decisionale (Morisco e Migliorino 2020).

## 3.2 Fasi del processo di assesment delle gallerie

L'ispezione di una galleria è caratterizzata da un flusso documentale ben preciso (Figura 3.1). Quest'ultimo ci consente di avere una uniformità di valutazione dello stato delle gallerie.

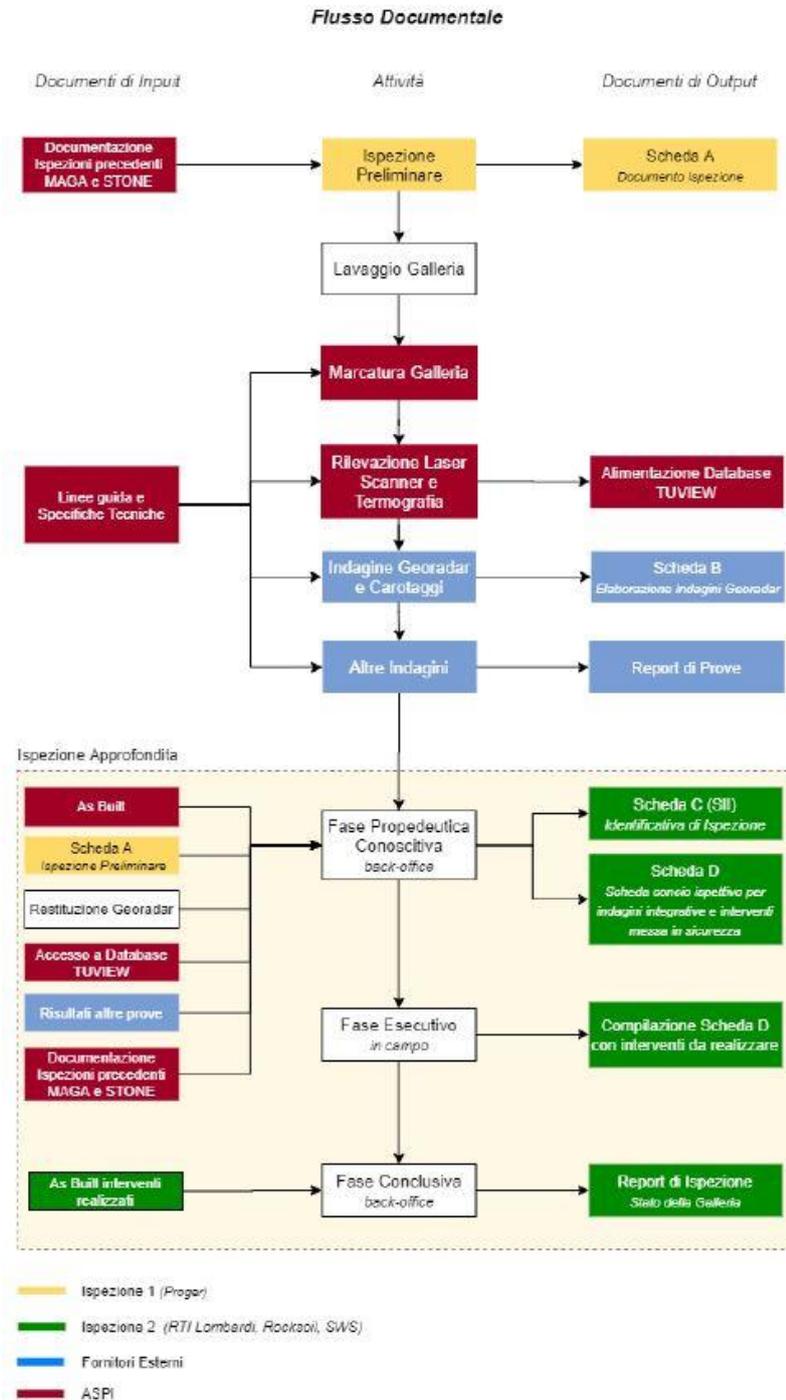


Figura 3.1: Flusso documentale (MIT, 2020)

La prima fase è l'ispezione preliminare, la quale viene definita come: *“parte del processo di assesment, risponde principalmente all'obiettivo di avviare da zero una fase ricognitiva. Consentirà infatti, con notevole anticipo rispetto alla conclusione dell'intero processo di assesment, di disporre di un controllo accurato della stabilità e tenuta di tutti i rivestimenti installati nella galleria nel corso degli anni per la captazione e convogliamento delle acque di infiltrazione e degli altri presidi di contenimento (es. reti) delle parti potenzialmente instabili”* (Morisco e Migliorino 2020).

Tuttavia, prima di procedere con l'ispezione della galleria, è necessario preparare quest'ultima tramite lavaggio. Infatti, con tale azione si rende visibile la superficie di calcestruzzo dei rivestimenti. Inoltre, bisogna definire i “conci ispettivi”. Questi vengono considerati al fine di assegnare una valutazione ben precisa per ogni concio (20 m di lunghezza), invece di farne una macroscopica sull'intera galleria. Il concio ispettivo è diverso da quello costruttivo in quanto quest'ultimo non è visivamente definibile, per cui è necessario ridefinire i conci ex novo. In questo modo avviene la marcatura della galleria in quanto su ogni concio ispettivo viene collocata una targhetta identificativa.

Successivamente l'ispezione preliminare viene supportata da un contributo tecnico fornito dall'utilizzo di:

- Rilievo laser-scanner termografico e fotografico ad alta risoluzione: consente di effettuare un calco digitale 3D della superficie rilevata con elevata velocità.

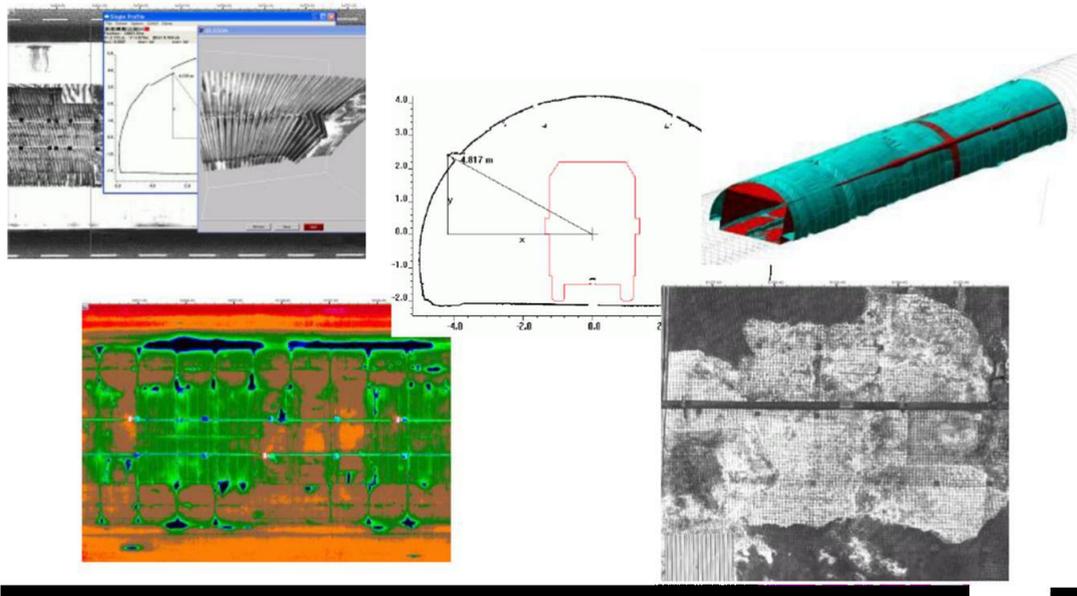


Figura 3.2: Immagini del rilievo laser-scanner (MIT,2020)

- Georadar: fornisce informazioni affidabili sullo spessore delle calotte, sulla presenza di vuoti a tergo e sulla presenza di armature. Fornisce inoltre informazioni riguardanti la difettosità nel rivestimento, tuttavia i risultati ottenuti non sempre consentono una interpretazione oggettiva e coerente con la realtà, in assenza di un'appropriata taratura (Morisco e Migliorino 2020).
- Altre Indagini: In aggiunta a tali indagini si possono applicare fioretatura e videoendoscopie nei punti di interesse, estrazione di campioni del rivestimento, prove pull-out per osservare lo stato del calcestruzzo dietro le reti metalliche e martinetto piatto per verificare lo stato tensionale del rivestimento.

Facendo sempre riferimento alla Figura 3.1, si osserva che in seguito all'ispezione preliminare si procede con l'"Ispezione approfondita". Quest'ultima a sua volta si divide in tre diverse fasi:

- 1) Fase propedeutica conoscitiva: l'ispettore è tenuto a studiare la documentazione "as built". Egli deve conoscere la galleria in anticipo da un esame approfondito degli archivi o documenti che vengono forniti.
- 2) Fase esecutiva ispettiva: rappresenta il fulcro dell'ispezione approfondita e avviene tramite una modalità ben precisa che viene denominata "treno ispettivo". Quest'ultimo consiste nella rimozione di elementi quali onduline, al fine di ottenere una corretta superficie di applicazione dei test e di osservazione. Al termine dell'ispezione le onduline vengono opportunamente reinserite, salvo difettosità con la lettera "S" (rappresenta il massimo livello di difettosità).
- 3) Fase conclusiva: consiste nella redazione della Scheda identificativa di ispezione (SII) per ogni concio. Questa raccoglie tutti i dati inerenti alle ispezioni svolte. Al termine dell'ispezione è poi necessario redigere il "Report d'ispezione della galleria" contenente una descrizione dettagliata e più esaustiva possibile dello stato della galleria al momento dell'ispezione. (Morisco e Migliorino 2020)

### 3.3 Classificazione dei difetti

Lo scopo di tali ispezioni consiste nell'identificare eventuali deterioramenti che si verificano nel tempo, al fine di definire al meglio le condizioni della galleria e per comprendere la tipologia di intervento necessario da applicare.

A tale scopo al “Manuale Ispezione Gallerie” viene allegato il “Nuovo Catalogo dei Difetti”. Quest'ultimo contiene sotto forma di catalogo tutti i difetti/deterioramenti che possono essere osservati nelle strutture. In particolare, ogni difetto del catalogo viene presentato tramite una scheda di questo tipo:

Nome del difetto	foglio
<b>Descrizione (evidenze della presenza del difetto)</b>	
Come il deterioramento si manifesta all'osservatore	
<b>Metodo d'ispezione</b>	
Metodo per rilevare il deterioramento, specialmente se non è visibile.	
<b>Parametri da caratterizzare</b>	
Materiale o elementi misurabili ad esso collegati.	
<b>Difetti associati di cui valutare la presenza</b>	
Elementi utili per la diagnosi.	
<b>Origini e possibili cause</b>	
Interpretazioni fatte, basate sulla conoscenza della struttura.	
<b>Fattori aggravanti</b>	
Elementi in grado di aggravare o accelerare l'evoluzione del difetto.	
<b>Conseguenze, possibile evoluzione</b>	
Descrizione delle conseguenze in assenza di lavori di manutenzione o riparazione del difetto.	
<b>Pericoli per gli utenti</b>	
Immediata possibilità di pericolo per gli utenti (ove applicabile, il colore rosso della banda indica la possibile esistenza di un pericolo dovuto alla presenza del difetto).	
<b>Pericoli per il tunnel e i suoi elementi strutturali</b>	
Possibile variazione a breve o medio termine della stabilità della struttura o degli elementi strutturali (il colore delle bande corrisponde al voto massimo IQOA che può essere assegnato al difetto).	
<b>Monitoraggio</b>	
Misure da adottare e osservazioni a breve o medio termine.	
<b>Misure correttive</b>	
Considerazioni su possibili rimedi per prevenire, eliminare o rallentare l'evoluzione del difetto.	
<b>Osservazioni</b>	
Elementi legati ad altri difetti o che presentano alcuni dei punti precedenti.	
<b>Informazioni aggiuntive</b>	
Descrizioni, fotografie e diagrammi che spiegano e illustrano il difetto.	

Figura 3.3: Scheda identificativa difetti (Nuovo Catalogo dei Difetti)

Considerando un generico difetto, la scheda ne definisce molteplici aspetti per rendere lo studio del primo il più semplice possibile. Inoltre tra le varie voci della scheda si può osservare che

vengono indicate anche considerazioni su possibili rimedi per prevenire, eliminare o rallentare l'evoluzione del difetto.

L'ispezione di una struttura è un approccio basato principalmente sull'osservazione e la descrizione del difetto e/o deterioramento. Durante l'ispezione l'obiettivo è l'individuazione ed il rilievo dei deterioramenti e difetti piuttosto che definire le cause e/o i fattori che li hanno generati. Preme evidenziare che la loro gravità non è sempre necessariamente proporzionale alla loro "visibilità" (Morisco e Migliorino 2020).

A tale scopo si fa riferimento alla "Classificazione IQOA", che come definito dal nome permette di avere una visione dello stato di salute della struttura (Morisco e Migliorino 2020). Tale classificazione si divide in due parti inerenti rispettivamente ai difetti civili ed alle venute d'acqua:

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

Figura 3.4: Classificazione IQOA per difetti civili (Manuale Ispezione Gallerie)

CLASSIFICAZIONE Venute d'acqua	
1	nessun problema, solo macchie d'umidità
2	presenza d'acqua importante, possibile evoluzione dei degrading a lungo termine
2E	presenza d'acqua importante, possibile rischio per l'opera, rafforzare sorveglianza e adottare provvedimenti
S	sicurezza per gli utenti

Figura 3.5: Classificazione IQOA per venute d'acqua (Manuale Ispezione Gallerie)

Con riferimento alla parte civile, la Classificazione IQOA prende in considerazioni quadri fessurativi, lesioni ed alterazioni in genere, identificandole, durante la fase di ispezione, con un codice alfanumerico che ne individua la gravità/pericolosità, in relazione alla quale l'intervento può essere programmato nel tempo, programmato urgentemente (nel giro di qualche giorno/settimana), immediato, in quanto riguarda la sicurezza degli utenti (Morisco e Migliorino 2020).

La Classificazione IQOA considera anche le difettosità relativa alle venute d'acqua, la cui presenza, come ovvio, può esaltare ed accelerare il degrado strutturale, in relazione anche alle caratteristiche chimiche dell'acqua, sia sulla matrice di calcestruzzo che sulle barre di armatura qualora presenti (Morisco e Migliorino 2020).

Si precisa che queste valutazioni indicano zone puntuali presenti nelle diverse tratte, e non riguardano quindi tutta l'opera; per cui anche una singola anomalia classificata 3U può far apparire grave la situazione, sebbene essa non riguardi la sicurezza strutturale dell'intero tratto dell'opera, ma solo un singolo punto che potrebbe costituire, comunque, un pericolo per l'utenza (p.e. caduta di frammenti) e che, pertanto, richiede un intervento urgente se classificato 3U o immediato se alla classificazione si aggiunge la lettera S (Morisco e Migliorino 2020).

Infatti, ad ogni classe (3, 3U, S) è associata una tempistica di intervento diversa, al fine di riparare o ridurre l'entità del difetto:

- Votazione 3: intervento nell'arco di pochi mesi;
- Votazione 3U: intervento nell'arco di poche settimane;
- Votazione S: intervento immediato.

Va osservato che in caso di classe S del difetto, la fruizione dell'opera necessita di essere interrotta fin quando la criticità non risulta essere risolta. In particolare tale fase si svolge durante il processo di ispezione e non al termine di essa. Infatti durante la fase conclusiva, se è stata rilevata una difettologia di classe S, si attiva automaticamente un protocollo di intervento. Al termine della fase ispettiva si può quindi procedere con le opportune tecniche di manutenzione delle gallerie. Quest'ultime variano in funzione del deterioramento rilevato (Morisco e Migliorino 2020).

### **3.4 Linee Guida sulle gallerie stradali**

Alla luce di quanto scritto nel capitolo precedente, il Consiglio Superiore per i Lavori Pubblici (CSLLPP) ha fondato una Commissione di lavoro cui hanno partecipato componenti di ambito istituzionale, accademico e professionale, con competenze specialistiche non solo nell'ambito

delle discipline dell'ingegneria, al fine di redigere delle Linee Guida sulle gallerie stradali esistenti a valle di quanto già fatto per i ponti (Barla 2021).

Difatti tale documento interessa le gallerie stradali e non quelle ferroviarie. Infatti, nonostante le gallerie presenti lungo le infrastrutture stradali e ferroviarie presentino caratteri comuni per quanto riguarda le indagini, le attività progettuali e le modalità realizzative, le condizioni connesse alle esigenze di esercizio sono però differenti nei due ambiti. Affinché le linee guida in linea generale possano costituire un riferimento anche per l'ambito ferroviario, è necessario tener conto degli specifici requisiti funzionali delle gallerie ferroviarie (A.Dari 2021).

In passato interventi manutentivi per le gallerie ne sono stati attuati, ma è necessario pervenire ad un approccio più sistematico, per prevenire situazioni che hanno messo in luce a seguito di singoli episodi non idoneità di condotte e metodi di manutenzione rivelatisi non sufficienti (A.Dari 2021).

A tal proposito il Politecnico di Torino si è avvalso del contributo precedentemente sviluppato dal RTP di ASPI, che prevedeva l'impostazione dell'analisi di rischio con riferimento a quattro fattori di rischio principali (strutturale, idrogeologico, sismico e incendio), e si è sviluppato mediante ricerca bibliografica, analisi di dati di indagini e ispezioni, definizione di tabelle e punteggi nonché simulazioni su casi reali. L'insieme delle attività condotte hanno consentito di mettere a punto un metodo che è stato denominato SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels) da intendersi quale strumento di definizione della classe di attenzione di una galleria stradale finalizzata alla prioritizzazione degli interventi di manutenzione. Successivamente il metodo è stato impostato con riferimento a cinque fattori di rischio principali (strutturale e geotecnico, geologico, sismico, incendio e geometria) e a 4 livelli progressivi di attenzione. Queste modifiche dell'impostazione iniziale sono state implementate anche al fine di rendere il metodo SMART maggiormente allineato rispetto alle anticipazioni emerse dall'attività della Commissione del CSLPP per la redazione delle Linee Guida per la classificazione del rischio delle gallerie (Barla 2021).

Il prossimo capitolo spiega nel dettaglio le funzionalità del metodo SMART.

# 4 Metodo S.M.A.R.T.

## 4.1 Introduzione

Come già anticipato nel capitolo precedente, il metodo SMART mira alla definizione di cinque classi di attenzione. Definite quest'ultime, si determina la classe di attenzione della galleria in esame, la quale fornisce un dato importante sulla necessità di applicazione di interventi di messa in sicurezza e/o di sistemazione definitiva. Al fine di determinare tale informazione, è necessaria l'elaborazione di vari dati reperibili da diverse fonti (progetti, ispezioni, indagini e informazioni bibliografiche), che possono essere separati in diverse sottoclassi di attenzione in funzione delle loro caratteristiche. Tali classi sono legate ai 5 fattori di rischio menzionati precedentemente:

- Classe di Attenzione Strutturale e Geotecnica
- Classe di Attenzione Geologica
- Classe di Attenzione Sismica
- Classe di Attenzione Incendio
- Classe di Attenzione Geometrica

A ogni classe si associa una valutazione di rischio che viene espressa tramite la seguente scala: bassa, medio-bassa, medio-alta, alta. Infine la somma delle cinque classi di attenzione fornisce quella totale della galleria. Lo schema appena esposto viene riassunto in Figura 4.1:

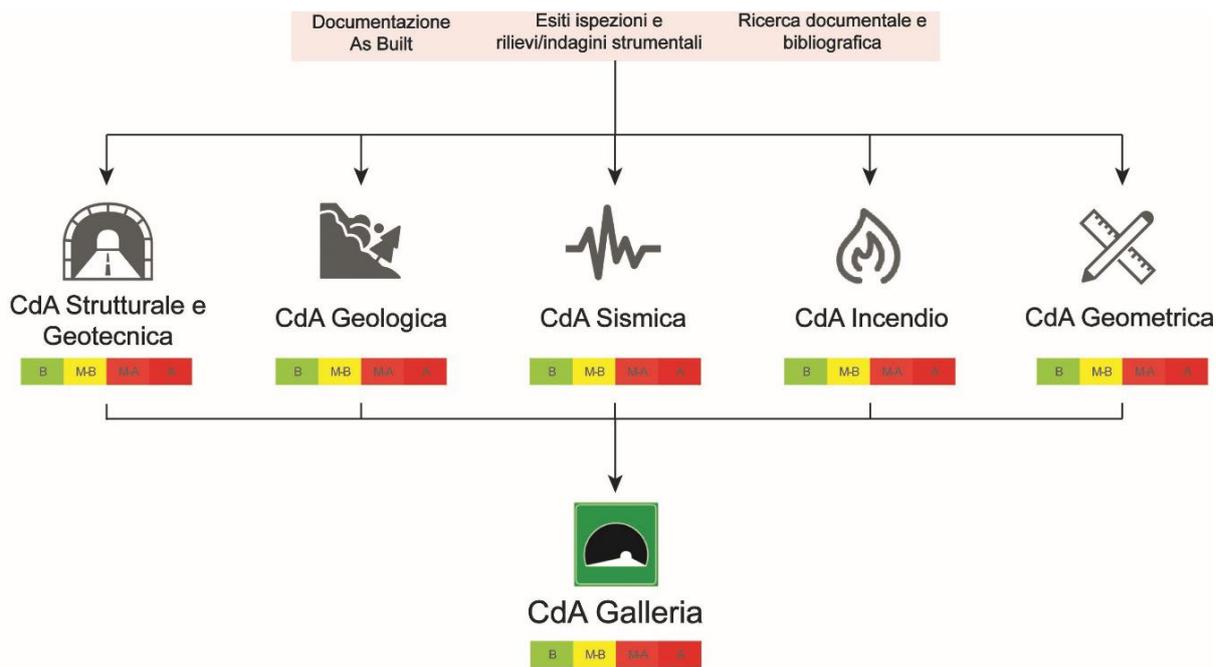


Figura 4.1: Valutazione della Classe di Attenzione della galleria (Barla 2021).

La valutazione di ciascuna CdA viene effettuata tramite un sistema di assegnazione di punteggi da applicare ad ogni aspetto inerente alla classe di attenzione in esame. Il punteggio risulta tanto più alto quanto più marcate sono la probabilità di accadimento ovvero il danno atteso relativo. La combinazione dei singoli punteggi comporta l'identificazione di un totale relativo alla pericolosità e di un totale relativo alla vulnerabilità, i quali tramite la loro somma conducono ad un punteggio complessivo relativo a ognuno dei cinque rischi considerati al quale corrisponde infine la relativa CdA (Barla 2021).

Nel seguito viene quindi riportato il calcolo di ciascuna classe di attenzione. Nella definizione delle scale di punteggio di tali parametri si è tenuto conto della loro interattività all'interno del problema in esame attraverso il metodo RES-Rock Engineering System (Hudson e J. 1992). *“Il metodo si basa sulla definizione dei parametri, soggetti o concetti che interagiscono con il problema in esame e sulla costruzione, a partire da queste informazioni, della matrice delle interazioni. Tale matrice contiene sulla diagonale principale gli elementi interagenti e nelle altre celle le interazioni. Queste ultime possono essere descritte da un meccanismo di interazione, in modo che la generica cella (i,j) della matrice descriva l'influenza dell'elemento i sull'elemento j. Il problema in esame viene mappato mediante un metodo semi-quantitativo esperto in termini di componenti rilevanti (da disporre sulla diagonale principale della matrice), e di loro reciproche interazioni (proporzionali ai valori degli elementi fuori*

diagonale). Durante questa fase è necessario quantificare l'importanza di ogni parametro, cioè stabilire quanto esso influenzi il sistema e quanto ne sia influenzato (attraverso i meccanismi identificati)” (Barla 2021).

L'interattività di un parametro permette di valutare quanto esso influenza ed è influenzato dagli altri aspetti che concorrono alla definizione del rischio, propri delle cinque Classi di Attenzione; perciò, un valore di interattività elevato definisce un parametro che è strettamente legato al sistema e a cui potrebbe essere assegnata una maggiore importanza (per esempio un maggior peso).

## 4.2 Classe di attenzione Strutturale e Geotecnica

Come si evince dalla relazione “METODO S.M.A.R.T. Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels” (Barla 2021) la seguente classe di attenzione può essere determinata tramite l'osservazione di parametri inerenti sia la galleria che il contesto in cui quest'ultima è inserita. La Tabella 4.1 fornisce gli 11 parametri suddivisi nelle 2 macrocategorie di pericolosità e vulnerabilità.

Tabella 4.1: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione strutturale e geotecnica e relativi punteggi (Barla 2021).

Componente del rischio	Aspetti quali-quantitativi per l'attribuzione di punteggio	Punteggio	
Pericolosità	Sollecitazione sul rivestimento	0÷15	0÷20
	Livello di incertezza del modello geologico/geotecnico	0÷3	
	Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno	0÷2	
	Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	0÷2	
	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	0÷2	
Vulnerabilità	Livello di difettosità	0÷20	0÷30
	Rapidità di evoluzione del degrado	0÷3	
	Tipologia di galleria	0÷4	
	Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione	0÷2	
	Complessità costruttiva	0÷2	
	Influenza dell'acqua	0÷4	
		<b>0÷50</b>	

Ogni aspetto quali-quantitativo per l'attribuzione di punteggio è caratterizzato da un intervallo di punteggio che, come menzionato in precedenza, varia in funzione dell'interattività che il

generico aspetto possiede con gli altri. La determinazione del punteggio avviene in diversi modi dipendentemente dall'aspetto che si sta considerando (qualitativo o quantitativo) (Barla 2021). È opportuno precisare che a differenza di alcune CdA che osserveremo in seguito, quella strutturale e geotecnica si determina per ciascun concio ispettivo di 20 m. Inoltre si osserva dalla Tabella 4.1 che la somma tra i diversi aspetti risulta pari a 50 nonostante quella reale equivalga a 59. *“La ragione è legata al fatto che si è cercato di tenere in considerazione sia situazioni caratterizzate da notevoli ammaloramenti del rivestimento ma con livelli di carico trascurabili sia situazioni con livelli di sollecitazione notevoli ma con rare occorrenze di difettosità. Infatti la CdA così definita risulta elevata in entrambe le situazioni suddette e non esclusivamente nel caso di livelli di difettosità e sollecitazioni sul rivestimento entrambi elevati”* (Barla 2021).

Studiando nel dettaglio la Tabella 4.1, i parametri che influenzano la classe di attenzione in esame sono:

- *Sollecitazione sul rivestimento*: differenti condizioni di carico in funzione della resistenza del rivestimento possono comportare diversi rischi strutturali;
- *Livello di incertezza del modello geologico/geotecnico*: parametro relativo alla reperibilità di documenti di carattere geologico/geotecnico;
- *Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno*: un terreno di scarsa qualità comporta logicamente un rischio maggiore;
- *Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno*: per peculiarità si intendono comportamenti rigonfianti, gas nocivi/esplosivi, rocce radioattive, ecc. L'eventuale presenza di almeno una di queste peculiarità determina un punteggio più elevato;
- *Presenza di sotto-spessore nel rivestimento*: indica la percentuale di vuoto presente nel rivestimento;
- *Livello di difettosità*: tale parametro si basa sulle classi di difettosità elencate nella classificazione IQOA;
- *Rapidità di evoluzione del degrado*: parametro funzione del livello di difettosità e dell'età della galleria in esame;
- *Tipologia di galleria*: differenti combinazioni geometria e materiale della galleria possono comportare situazione di rischio differenti;

- *Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione*: si tiene conto dell'eventuale presenza di un sistema di impermeabilizzazione nonché di quella di macchie dovute all'umidità e di venute d'acqua locali;
- *Complessità costruttiva*: si tiene conto dell'uso di interventi di rinforzo/consolidamento in fase di costruzione;
- *Influenza dell'acqua*: come per il livello di difettosità, anche qui si fa riferimento alla classificazione IQOA per le venute d'acqua.

La somma degli aspetti inerenti alla pericolosità e alla vulnerabilità fornisce l'indice  $I_{STR\&GEO,T}$ , rappresentante il punteggio della classe di attenzione strutturale e geotecnica del singolo concio. Per ottenere la classe di attenzione dell'intera galleria si procede con l'applicazione della seguente equazione:

$$I_{STR\&GEO} = \frac{\sum_{i=1}^n [I_{STR\&GEO,i} \cdot Rango(I_{STR\&GEO,i})]}{\sum_{i=1}^n Rango(I_{STR\&GEO,i})} \quad (4.1)$$

Dove:

- $I_{STR\&GEO}$ : punteggio della classe di attenzione strutturale e geotecnica della galleria;
- $I_{STR\&GEO, i}$ : punteggio della classe di attenzione strutturale e geotecnica del generico concio  $i$  ( $n$  è il numero di conci componente l'intera galleria in esame).

Successivamente al punteggio ottenuto si associa una valutazione di rischio dipendente dagli intervalli riportati nella Tabella 4.2.

Tabella 4.2: Classificazione per la definizione della CdA strutturale e geotecnica (Barla 2021).

$I_{STR\&GEO}$	0 – 10	10 – 17.5	17.5 – 25	25 – 50
$CdA_{STR\&GEO}$	Bassa	Medio-bassa	Medio-alta	Alta

### 4.3 Classe di attenzione Geologica

“La definizione della classe di attenzione geologica può essere desunta prendendo in considerazione il contesto geomorfologico nel quale è inserita la galleria e tenendo conto del livello di coinvolgimento della struttura in eventuali fenomeni di instabilità di versante. Gli aspetti che possono contribuire a definire il punteggio della CdA geologica sono riassunti nella Tabella 4.3 ed includono l’effettiva quantificazione dell’eventuale instabilità di versante che potrebbe coinvolgere l’opera e la presenza di sistemi di monitoraggio” (Barla 2021).

Tabella 4.3: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione geologica e relativi punteggi (Barla 2021).

Componente del rischio	Aspetti quali-quantitativi per l’attribuzione di punteggio	Punteggio	
Pericolosità	Magnitudo dell’instabilità di versante	0÷5	0÷10
	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/ Grado di criticità per le frane potenziali	0÷5	
	Sistemi di monitoraggio	-5÷0	
Vulnerabilità	Estensione dell’interferenza instabilità-struttura	0÷5	0÷5
		<b>0÷15</b>	

Come evidenziato in precedenza, anche nella classe in esame gli aspetti vengono divisi in due macrocategorie di pericolosità e vulnerabilità (così come verrà fatto nelle successive classi di attenzione). La magnitudo dell’instabilità di versante, lo stato di attività di frane riconosciute o il grado di criticità di quelle potenziali e la presenza di sistemi di monitoraggio incidono sulla prima categoria. Questi possono essere rilevati tramite documentazione storica ed ispezioni visive. Per quanto riguarda i sistemi di monitoraggio è logico che la presenza di quest’ultimi contribuisce ad un abbassamento della valutazione di rischio e quindi della priorità di intervento.

Per quanto concerne la vulnerabilità, quest’ultima è caratterizzata dall’aspetto *estensione dell’interferenza instabilità-struttura* che sottolinea l’influenza di un potenziale collasso geologico sulla stabilità della struttura; tanto maggiore è l’estensione dell’interferenza, maggiore è il punteggio associato (Barla 2021).

A differenza di quanto visto in precedenza, la classe di attenzione geologica viene valutata con riferimento diretto all’intera galleria. Il punteggio finale ottenuto viene quindi elaborato con la scala in Tabella 4.4 per determinare il livello della CdA.

Tabella 4.4: Classificazione per la definizione della CdA geologica (Barla 2021).

$I_{GEOL}$	0 – 3	3 – 5.25	5.25 – 7.5	7.5 – 15
$CdA_{GEOL}$	Bassa	Medio-bassa	Medio-alta	Alta

#### 4.4 Classe di attenzione Sismica

“Sebbene sia generalmente accertata una minore suscettibilità delle opere sotterranee all’azione sismica, appare comunque opportuno considerare come la completa inclusione delle opere negli ammassi rocciosi/terreni possa comportare interazioni assolutamente non trascurabili dal punto di vista della definizione delle classi di attenzione dell’opera” (Barla 2021).

Gli aspetti riguardanti la classe di attenzione sismica sono riportati nella Tabella 4.5.

Tabella 4.5: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione sismica e relativi punteggi (Barla 2021).

Componente del rischio	Aspetti quali-quantitativi per l’attribuzione di punteggio	Punteggio	
Pericolosità	Caratteristiche del sisma	0÷4	0÷4
Vulnerabilità	Inclusione in zone sismogenetiche	0÷1.5	0÷11
	Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali	0÷3	
	Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica	0÷2	
	Condizioni geologiche dell’ammasso roccioso o del terreno	0÷1	
	Profondità dell’asse della galleria	0÷1	
	Geometria della galleria e caratteristiche delle armature	0÷0.5	
	Resistenza e stato di conservazione del rivestimento	0÷1	
	Norme di progettazione del rivestimento	0÷1	
		<b>0÷15</b>	

La pericolosità è legata alle *caratteristiche del sisma*: PGA-Peak Ground Acceleration (con riferimento allo Stato Limite di Collasso SLC) e Magnitudo di momento sono dati relativi al sisma che determinano il livello di pericolo della galleria in esame. Tali dati sono reperibili tramite l’INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: <http://www.ingv.it/it/>) il quale fornisce una mappa di pericolosità interattiva in grado di fornire dati relativi a spostamenti, accelerazione, velocità, ecc. relativi all’area di interesse. Successivamente è possibile determinare in termini probabilistici l’intervallo di magnitudo a cui è soggetta l’area ed il potenziale epicentro.

Per quanto concerne la vulnerabilità si osserva dalla Tabella 4.5 che gli aspetti principali sono i seguenti:

- *Inclusione in zone sismogenetiche*: la vicinanza dell'asse della galleria a zone sismogenetiche può influenzare le caratteristiche del moto;
- *Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali*: la presenza di tali elementi rilevabili tramite carte geologiche e documentazione As Built lungo la linea d'asse della galleria può comportare gravi scostamenti geologici con conseguenti danni strutturali relativi alla galleria;
- *Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*: si tiene conto dell'interazione tra lo stato delle frane riconosciute o potenziali e le caratteristiche del sisma;
- *Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno*: un sottosuolo di categoria inferiore è soggetto ad una maggiore vulnerabilità in caso di sisma;
- *Profondità dell'asse della galleria*: opere sotterranee più profonde sono in generale meno soggette a fenomeni di amplificazione stratigrafica e topografica;
- *Geometria della galleria e caratteristiche delle armature*: differenti tipologie di sezione e dimensioni possono comportare criticità diverse (Barla 2021);
- *Resistenza e stato di conservazione del rivestimento*: la resistenza, nonché la duttilità del rivestimento, contribuiscono all'assorbimento di sollecitazioni derivanti dal sisma decrementando la vulnerabilità della galleria rispetto l'azione sismica. Lo stato di tali caratteristiche è strettamente correlato a quello della conservazione del rivestimento;
- *Norme di progettazione del rivestimento*: si verifica se in fase di progettazione si è tenuto conto di misure costruttive al fine di ridurre la suscettibilità sismica (Barla 2021).

Anche in questo caso il punteggio dei vari aspetti principali della classe di attenzione sismica viene calcolato in relazione all'intera galleria. Per cui, una volta ottenuto il punteggio totale, si verifica il grado della CdA tramite la Tabella 4.6.

Tabella 4.6: Classificazione per la definizione della CdA sismica (Barla 2021).

Isis	0 – 3	3 – 5.25	5.25 – 7.5	7.5 – 15
CdA <sub>sis</sub>	Bassa	Medio-bassa	Medio-alta	Alta

## 4.5 Classe di attenzione Incendio

*“La definizione della classe di attenzione incendio può essere valutata in base al rischio di occorrenza di eventi eccezionali di incendio all’interno della galleria. L’azione di confinamento esercitata dalla galleria comporta infatti una rapida saturazione dell’ambiente da parte delle fiamme e dei fumi, rendendo rapidamente l’aria irrespirabile, limitando la visibilità, innalzando la temperatura e aumentando progressivamente la difficoltà di esodo dei soggetti che al momento dell’innescò si trovano all’interno dell’infrastruttura sotterranea. L’incendio può inoltre mettere a repentaglio l’integrità del rivestimento della galleria”* (Barla 2021).

Il calcolo della seguente classe è dipendente dalla normativa di riferimento fornita dal D.Lgs. 264/2006 riguardante i Requisiti Minimi di Sicurezza per le Gallerie Stradali della Rete Transeuropea. Infatti tale normativa fornisce i requisiti minimi di sicurezza che le gallerie in esercizio e in fase di costruzione o di progettazione debbono rispettare se caratterizzate da una lunghezza uguale o superiore a 500 m (Barla 2021).

In effetti la valutazione della classe di attenzione segue diversi approcci in funzione della lunghezza della galleria in esame: se la galleria ha una lunghezza inferiore a 500 m allora si può assumere un valore della CdA direttamente nullo, mentre se la lunghezza è uguale o eccede il mezzo chilometro, è necessario determinare la classe di attenzione incendio tramite la valutazione di diversi parametri.

Tabella 4.7: Assegnazione del punteggio alla CdA incendio in funzione della lunghezza della galleria e in presenza/assenza del Piano Sicurezza Gallerie (Barla 2021).

Condizioni	Punteggio $I_{INC}$
Gallerie di lunghezza superiore a 500 m per le quali il Piano Sicurezza Gallerie sia già stato adottato oppure Gallerie di lunghezza inferiore a 500 m	0
Gallerie di lunghezza superiore a 500 m per le quali il Piano Sicurezza abbia indicato la necessità di adeguamenti strutturali e/o impiantistici e questi non siano stati ancora attuati oppure Gallerie di lunghezza superiore a 500 m per le quali non sia disponibile il Piano Sicurezza Gallerie	1 - 10

Dalla Tabella 4.7 si osserva che la determinazione della classe di attenzione incendio è dipendente anche dall'eventuale adozione del Piano Sicurezza Gallerie. *Tale Piano nasce con lo scopo di elevare gli standard di sicurezza in galleria, garantendo un livello delle dotazioni di sicurezza maggiore rispetto ai requisiti minimi introdotti dal D.Lgs. 264/2006. Esso non è necessario per le gallerie la cui lunghezza è inferiore a 500 m* (Barla 2021).

Nel seguito (Tabella 4.8) vengono riportati i parametri necessari per la determinazione della CdA incendio tramite il secondo approccio secondo cui il punteggio totale varia in un intervallo da 1 a 10.

Tabella 4.8: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione incendio e relativi punteggi (Barla 2021).

Componente del rischio	Aspetti quali-quantitativi per l'attribuzione di punteggio	Punteggio	
Pericolosità	Trasporto di merci pericolose	0÷1	0÷2
	Frequenza di occorrenza di eventi di incendio	0÷1	
Vulnerabilità	Lunghezza	1÷3	1÷8
	Difetti/Assenza di misure strutturali	0÷2	
	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	0÷2	
	Piani di intervento in caso di emergenza	0÷1	
		<b>1÷10</b>	

Il *trasporto di merci pericolose* e la *frequenza di occorrenza di eventi di incendio* sono sicuramente aspetti che possono influenzare la valutazione di rischio in termini di pericolosità.

Per quanto concerne la vulnerabilità:

- *Lunghezza*: rappresenta il parametro più incisivo della classe di attenzione (può assumere il punteggio maggiore). È infatti logico che la lunghezza di una galleria non solo detta le misure di sicurezza necessarie ma, in caso di incendio, influenza le tempistiche di soccorso e di evacuazione nonché la loro effettiva fattibilità;
- *Difetti/Assenza di misure strutturali*: geometria della galleria, presenza di uscite di emergenza (almeno ogni 500 m), banchine pedonabili di emergenza, possibilità di accesso per i servizi di pronto intervento, presenza di sistemi di drenaggio di liquidi infiammabili e tossici in modo da impedire incendi nonché il propagarsi degli stessi all'interno di un fornice e tra i fornici, resistenza al fuoco delle strutture. Difetti o assenza di tali entità incidono sulla valutazione di rischio;
- *Difetti/Assenza di misure impiantistiche*: in questo caso si fa riferimento a misure impiantistiche come ventilazione, illuminazione, erogazione idrica, ecc.;
- *Piani di intervento in caso di emergenza*: presenza o meno di un piano di intervento (Barla 2021).

Infine si procede con la stessa modalità prima citata, seguendo la scala rappresentata nella Tabella 4.9:

Tabella 4.9: Classificazione per la definizione della CdA incendio (Barla 2021).

$I_{INC}$	0 – 2	2 – 3.5	3.5 – 5	5 – 10
$CdA_{INC}$	Bassa	Medio-bassa	Medio-alta	Alta

La classe di attenzione incendio viene valutata direttamente per l'intera galleria.

## 4.6 Classe di attenzione Geometrica

*“La definizione della classe di attenzione geometrica tiene conto dei rischi legati sia a difetti della sezione trasversale (pericolosità) sia a inadeguatezze di tipo funzionale (vulnerabilità), così come stabilito dal Decreto Ministeriale 5 novembre 2001, n. 6792 e da successive emanazioni (ad esempio il documento della Commissione Permanente Gallerie del 22 febbraio*

2012). Si richiede, infatti, che l'altezza libera nella galleria, misurata sulla verticale a partire da qualsiasi punto della piattaforma, non sia inferiore a 4.70 m" (Barla 2021). Inoltre in merito alla vulnerabilità bisogna valutare la presenza di un profilo ridirettivo addossato ai piedritti ai margini della banchina (sia a destra che a sinistra).

Tabella 4.10: Aspetti di interesse per la definizione della classe di attenzione geometrica e relativi punteggi (Barla 2021).

Componente del rischio	Aspetti quali-quantitativi per l'attribuzione di punteggio	Punteggio	
Pericolosità	Difetti di altezza libera (gabarit)	0÷8	0÷8
Vulnerabilità	Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti	0÷2	0÷2
		<b>0÷10</b>	

Come per la classe di attenzione strutturale e geotecnica, anche in questo caso la valutazione della classe di attenzione geometrica viene svolta in riferimento ai singoli conci ispettivi (di lunghezza pari a 20 m) della galleria. È necessario quindi procedere con la seguente equazione per ottenere il punteggio relativo all'intera galleria:

$$I_{GEOM} = \max\{I_{GEOM,1}; I_{GEOM,2}; \dots; I_{GEOM,i}; \dots; I_{GEOM,n}\} \quad (4.2)$$

Dove:

- $I_{GEOM}$ : punteggio della classe di attenzione geometrica della galleria;
- $I_{GEOM, i}$ : punteggio della classe di attenzione geometrica del generico concio  $i$  ( $n$  è il numero di conci componente l'intera galleria in esame).

Infine la valutazione di rischio della classe di attenzione geometrica viene svolta in riferimento alla Tabella 4.11.

Tabella 4.11: Classificazione per la definizione della CdA geometrica (Barla 2021).

$I_{GEOM}$	0 – 2	2 – 3.5	3.5 – 5	5 – 10
$CdA_{GEOM}$	Bassa	Medio-bassa	Medio-alta	Alta

## 4.7 Classe di attenzione della galleria

*“La determinazione separata delle cinque CdA sopra esposte è propedeutica all’analisi e alla stima della CdA complessiva della galleria, rappresentativa del suo stato di salute, da inquadrare nell’ambito dell’attività di prioritizzazione e programmazione degli interventi manutentivi. A tal fine si illustra nel presente paragrafo il flusso di calcolo proposto, fermo restando che, come già evidenziato, la scelta della modalità di combinazione è funzione dello scopo per cui si intende utilizzare la CdA. Al fine di prioritizzare gli interventi, appare giustificato tenere conto di tutti i fattori per definire la CdA dell’intera galleria”* (Barla 2021). L’identificazione del punteggio totale della galleria viene svolta tramite una semplice sommatoria dei punteggi relativi alle 5 classi di attenzione calcolate in precedenza. L’approccio risulta essere giustificato a seguito degli intervalli definiti nelle precedenti tabelle che le varie CdA possono assumere. Infatti il limite superiore dei vari punteggi già considera il peso di ciascuna classe nella valutazione finale. L’equazione da applicare è la seguente:

$$I_{GALLERIA} = I_{STR\&GEO} + I_{GEOL} + I_{SIS} + I_{INC} + I_{GEOM} \quad (4.3)$$

Svolta la sommatoria (4.3), si procede nel medesimo modo osservato in precedenza: si determina il punteggio della classe di attenzione della galleria e si confronta con una scala che fornisce gli intervalli di rischio (Tabella 4.12).

Tabella 4.12: Classificazione proposta per la Classe di Attenzione della galleria (Barla 2021).

$I_{GALLERIA}$	0 - 20	20 - 35	35 - 50	50 - 100
$CdA_{GALLERIA}$	Bassa	Medio-bassa	Medio-alta	Alta

Quanto appena descritto, si può riassumere tramite lo schema in Figura 4.2.

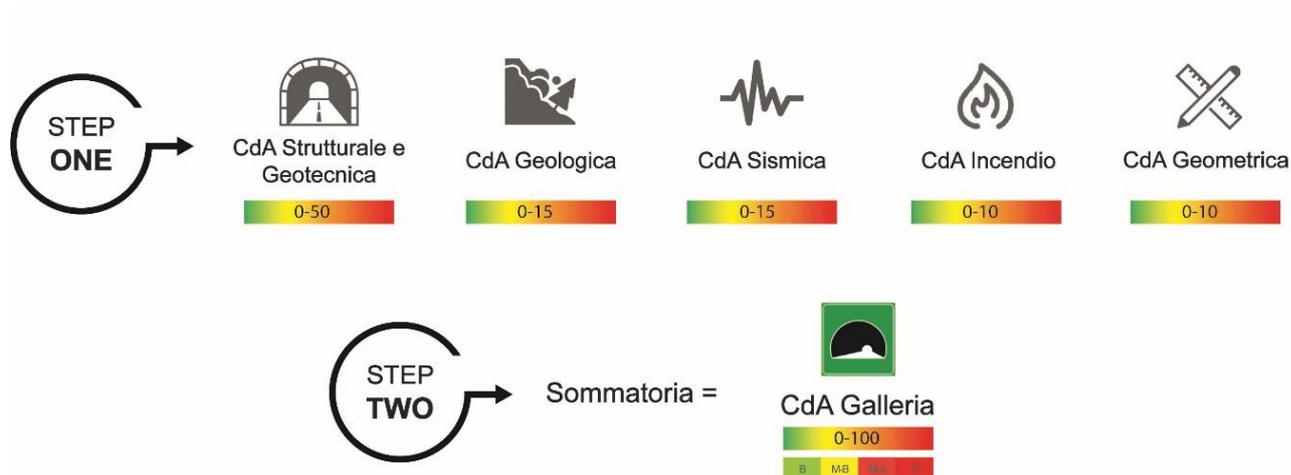


Figura 4.2: Determinazione della CdA a partire da una combinazione algebrica delle CdA dei fattori di rischio (Barla 2021).

*“Sulla base dell’analisi multi-rischio finalizzata alla classificazione della galleria nel suo complesso, sarà possibile stabilire le priorità per le azioni da intraprendere in termini di indagini/controlli/verifiche/interventi ed eventualmente procedere all’analisi della CdA di una specifica tratta autostradale di cui quella galleria fa parte” (Barla 2021).*

# 5 Sviluppo di un programma eseguibile per l'applicazione del metodo S.M.A.R.T.

## 5.1 Introduzione

Quanto esposto nel capitolo precedente, rappresenta un iter piuttosto lungo per la prioritizzazione degli interventi di manutenzione delle gallerie autostradali. Per tale motivo è nata la necessità di sviluppare un'applicazione in grado di svolgere il metodo fornendo numerosi vantaggi:

- Velocità d'impiego del metodo
- Precisione di calcolo
- Archiviazione di progetti con relativi dati
- Generazione di fogli excel già preimpostati
- Ottenimento di grafici

Partendo da conoscenze basilari dell'informatica, il primo passo per lo sviluppo dell'eseguibile è consistito nella modalità di programmazione. Sono stati sondati diversi ambienti di lavoro:

- Microsoft Excel
- Java
- MATLAB
- Python
- Visual Basic

La prima opzione (Microsoft Excel) è stata scartata a priori a causa della finalità del lavoro: creare un'applicazione user friendly. Le opzioni restanti sono state quindi esaminate in base alla loro praticità, all'interfaccia finale e all'accessibilità di materiale inerente al fine di un

rapido apprendimento. La scelta è quindi ricaduta sul linguaggio di programmazione Visual Basic: “*Visual Basic è un linguaggio di programmazione object-oriented sviluppato da Microsoft. L'uso di Visual Basic rende più semplice e rapida la creazione di app .NET indipendenti dai tipi*” (Microsoft 2021). L’ambiente di sviluppo utilizzato per l’utilizzo di tale linguaggio è *Visual Studio 2019*, fornito da Microsoft nella versione gratuita *Community*.



Figura 5.1: Schermata principale Visual Studio 2019.

Tuttavia uno svantaggio legato a tale scelta riguarda la compatibilità dell’applicazione che sarà supportata unicamente da Windows e non da altri sistemi operativi quali Apple, Linux, ecc. Ciononostante tale difetto non è stato ritenuto rilevante ai fini del lavoro di tesi in quanto da uno studio di mercato condotto tra gennaio e aprile 2021 si è evidenziato che l’utilizzo di Windows in Italia è pari a circa il 78%, per cui molto maggiore rispetto all’utilizzo di altri sistemi operativi quali Apple o Linux che corrisponde rispettivamente al 15% e 4.7% (la percentuale restante è occupata da altri sistemi operativi minori) (Hostingsolutions 2021).

L’applicazione chiamata “SMART” conta circa 3600 righe di codice per la sua produzione. Il passaggio preliminare per la realizzazione del progetto è consistito nello stabilire la struttura del programma: si doveva definire un’interfaccia che fosse intuitiva e comprensibile per l’utente. A tal proposito l’applicazione è stata strutturata tramite 6 finestre le quali compaiono in modo sequenziale in base all’immissione di alcuni dati che ne consentono il procedimento (tale aspetto si osserverà nel dettaglio in seguito). Le 6 finestre sono:

- 1) Maschera iniziale chiamata “SMART”
- 2) CdA Strutturale & Geologica

- 3) CdA Geologica
- 4) CdA Sismica
- 5) CdA Incendio
- 6) CdA Geometrica

Risulta quindi evidente che oltre la prima finestra, le restanti sono inerenti alle 5 classi di attenzione relative ovviamente al metodo SMART. La finalità di tale scelta è quella di incanalare l'utente in un procedimento sequenziale per evitare un uso improprio del programma che possa causare problemi di elaborazione dati da parte dell'applicazione. Nel seguito si andrà quindi ad analizzare nel dettaglio ciascuna finestra del programma "SMART" per definirne alcuni passaggi della progettazione, le funzionalità e le caratteristiche.

## 5.2 Finestra n.1: Maschera applicazione

La schermata iniziale del programma si presenta come mostrato in Figura 5.2.

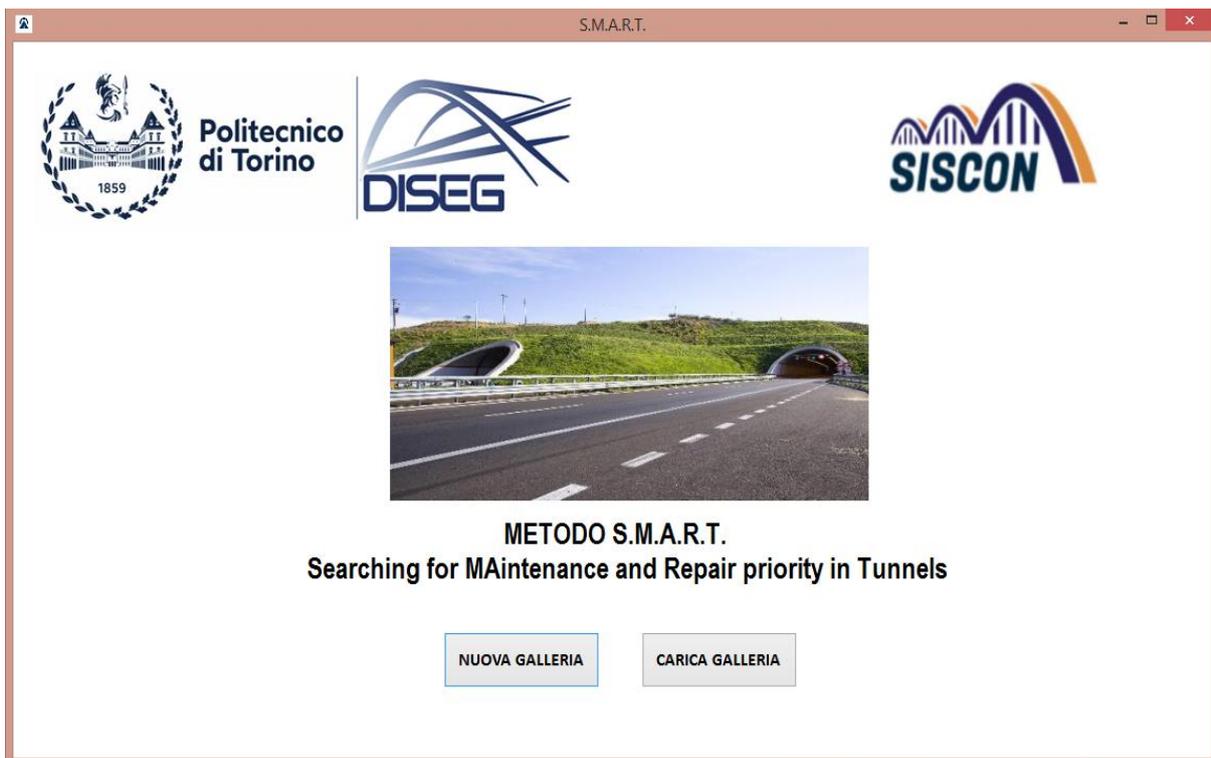


Figura 5.2: Schermata iniziale dell'applicazione.



Figura 5.3: Titolo della schermata iniziale.

Nel dettaglio nella Figura 5.3 si osserva il titolo della prima finestra. Per quanto concerne la maschera in generale, facendo riferimento alla Figura 5.2, viene richiesto all'utente di attuare una prima scelta tramite l'utilizzo di due tasti, creati in progettazione tramite lo strumento *Button*:

- NUOVA GALLERIA: l'utente può iniziare un nuovo progetto e svolgere il procedimento dall'inizio;
- CARICA GALLERIA: l'utente può caricare un file esistente (creato tramite il programma SMART) così da poter riprendere il lavoro da dove si era interrotto o modificarlo in caso di necessità.

L'esigenza di dare la possibilità all'utente di caricare un file esistente è nata in seguito ad alcune valutazioni inerenti all'utilizzo dell'applicazione. Data la natura del metodo, in caso di gallerie di lunghezza elevata e quindi con numerosi conci ispettivi, l'applicazione del procedimento richiederebbe un lavoro piuttosto oneroso in termini di tempo. Inoltre in caso di modifiche da apportare ad un lavoro già precedentemente svolto, sarebbe stato sfavorevole per l'utente dover riprendere il progetto da zero. Si è quindi sviluppato un sistema di salvataggio e caricamento. Infatti si osserverà in seguito che ogni finestra (ad eccezione della prima) sarà dotata di un pulsante "Salva" che consente all'utente di salvare il lavoro in qualsiasi momento. Il formato del file è stato denominato "smartgal", in questo modo in fase di caricamento, l'applicazione sarà in grado di riconoscere tutti i file aventi tale formato e caricarli.

Ipotizzando di iniziare un nuovo progetto quindi di cliccare sul pulsante NUOVA GALLERIA, la schermata cambia come mostrato in Figura 5.4.



Figura 5.4: Inserimento lunghezza della galleria e pulsante START per iniziare.

Si evidenzia che l'utente, prima di iniziare con l'applicazione del metodo, deve fornire la lunghezza della galleria in esame. Grazie quindi alla casella di testo creata in progettazione tramite il tool denominato *NumericUpDown* l'utente inserisce la lunghezza della galleria in metri, tenendo conto che la casella legge unicamente numeri interi. Tale richiesta è alla base del procedimento in quanto sapendo che la classe di attenzione strutturale e geotecnica e quella geometrica sono applicate per concio, per tali classi l'applicazione deve generare tanti comandi quanti sono i conci di riferimento.

È opportuno precisare che avendo i conci ispettivi una lunghezza di 20 m, nel caso in cui il numero immesso nella casella di testo ecceda anche solo di 1 il multiplo di 20, il programma genera automaticamente il concio successivo (es.: numero immesso 41 => 3 conci).

La generazione dei comandi in funzione del numero di conci ha richiesto un lavoro diverso da quello pronosticato inizialmente in quanto ha reso impossibile lo sviluppo del programma tramite l'uso della fase di progettazione, ma è stato necessario generare i vari comandi "da codice" in modo da renderli dinamici, rendendo i successivi passaggi di programmazione più complessi. Per rendere il quadro più chiaro possibile, è necessario fare distinzione tra *progettazione e codice*:

- **Progettazione:** Visual Studio consente di visualizzare una finestra del programma in fase di progettazione. In tale fase è possibile aggiungere degli strumenti utili per le finalità del progetto come TabPage, Textbox, Radiobutton, ecc. Tutto ciò che viene aggiunto in questa fase risulta essere statico in quanto sarà presente indipendentemente dalla lunghezza della galleria. Tutti gli strumenti vanno poi programmati da codice per i fini del programmatore. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 5.5 la schermata inerente alla progettazione della maschera iniziale.



Figura 5.5: Schermata di progettazione maschera iniziale.

- **Codice:** In tale fase, oltre a programmare tutti gli strumenti inseriti in fase di progettazione, si possono creare gli stessi strumenti in modo dinamico. Difatti dato che ho bisogno di tanti strumenti quanti sono i conchi da ispezionare, tramite la scrittura di determinati codici, si possono generare in modo dinamico dei controlli. In Figura 5.6 si riporta una parte di codice per la creazione delle caselle di testo per la prima finestra della classe di attenzione strutturale e geotecnica.

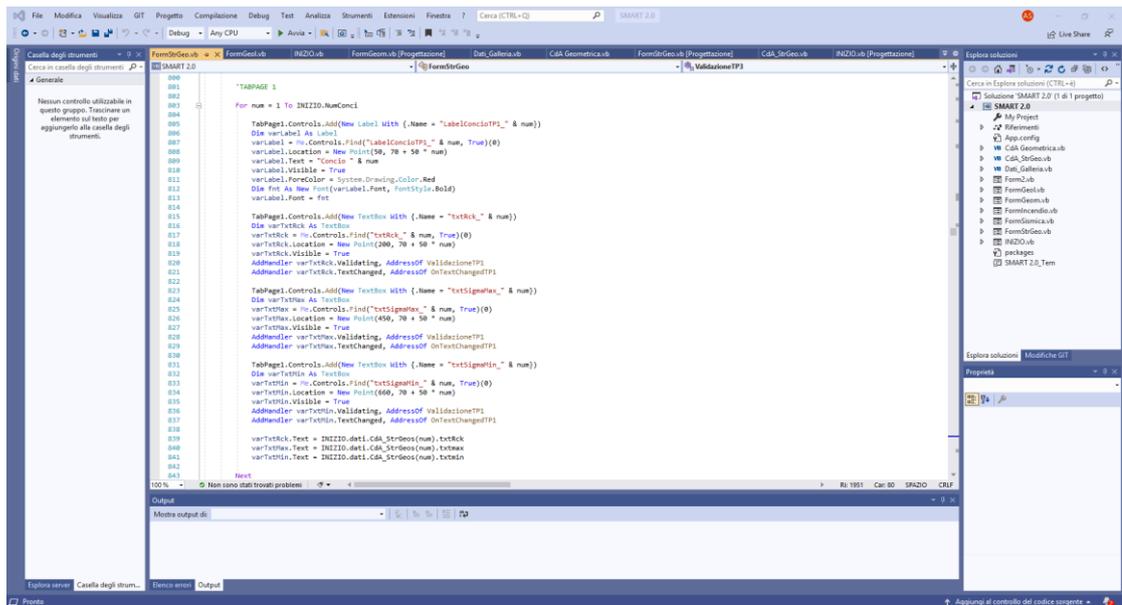


Figura 5.6: Schermata codice per la classe di attenzione strutturale e geotecnica.

Una volta immesso il valore della lunghezza relativa alla galleria in esame, l'utente deve cliccare sul pulsante START evidenziato anch'esso in Figura 5.4, per poter accedere alla prossima finestra inerente alla classe di attenzione strutturale e geotecnica. A titolo esemplificativo, si deve tenere conto che le finestre mostrate in seguito sono riferite ad una galleria di lunghezza pari a 100 m (5 concii).

### 5.3 Finestra n.2: CdA Strutturale & Geotecnica

La schermata iniziale della classe di attenzione strutturale e geotecnica è stata progettata come presentato in Figura 5.7.

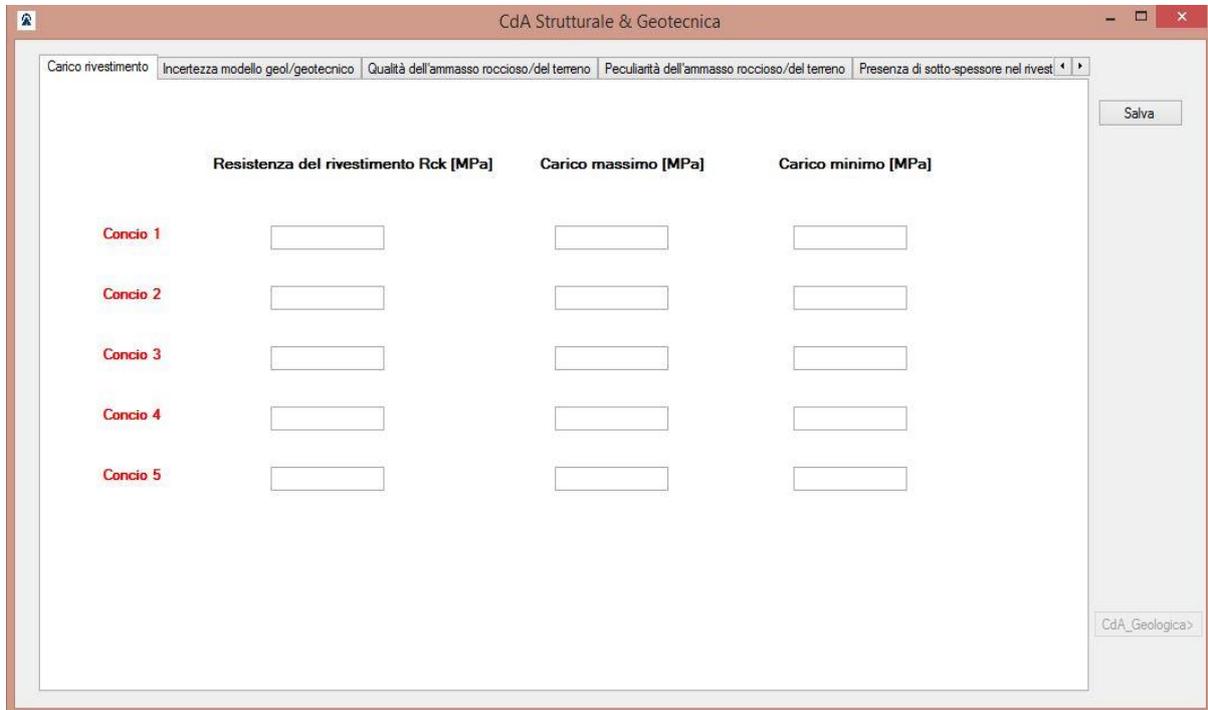


Figura 5.7: Schermata iniziale della classe di attenzione strutturale e geotecnica.

Prima di analizzare nel dettaglio lo sviluppo di ciascun parametro inerente alla classe di attenzione strutturale e geotecnica, è di notevole interesse evidenziare la struttura della finestra. Dalla Figura 5.7 si osserva che la finestra è caratterizzata da una sottofinestra denominata *TabControl* la quale raccoglie un numero arbitrario di schede. Ogni scheda fa riferimento ad un aspetto principale della classe di attenzione. L'utente può spostarsi tra una scheda e l'altra semplicemente cliccando su ciascuna di essa. Inoltre per poter spostarsi tra le varie schede è possibile scorrerle tramite il comando evidenziato in Figura 5.8.



Figura 5.8: Comandi per poter scorrere tra le diverse schede.

La scelta della seguente struttura (applicata anche in seguito per le successive classi di attenzione) è risultata la più congeniale in termini di utilizzo da parte dell'utente, così da poter scorrere in modo fluido tra un parametro e l'altro. Si tenga presente che è possibile scorrere tra un parametro e l'altro senza doverli compilare completamente in modo sequenziale. Tuttavia al momento del passaggio alla successiva CdA, sarà necessario aver compilato tutti i parametri correttamente.

Sul lato destro della Figura 5.7 sono presenti due tasti: Salva e CdA Geologica>. Il pulsante Salva è legato logicamente alla funzionalità di salvataggio e, come anticipato in precedenza, è presente in ciascuna finestra dell'applicazione. Come per ciascun programma, nel caso l'utente clicchi sul pulsante seguente, comparirebbe la classica schermata di salvataggio in cui si stabilisce il nome del file e la sua cartella di destinazione (il formato è già predefinito come “.smartgal”).

Il pulsante CdA Geologica> consente all'utente di procedere alla finestra successiva inerente alla prossima classe di attenzione (in questo caso quella geologica). Tuttavia dalla Figura 5.7 si osserva che il pulsante risulta “sbiadito”, in quanto è disabilitato. Difatti il pulsante sarà abilitato solo al termine della compilazione di tutti i campi inerenti alla classe di attenzione attuale. Tale scelta di programmazione è dovuta a diversi aspetti:

- Sequenzialità del metodo
- Evitare un uso improprio dell'applicazione
- Fornire la certezza all'utente non aver lasciato elementi vuoti

Al termine della compilazione quindi si potrà procedere alla classe di attenzione successiva. Analizziamo nel dettaglio ciascun parametro della classe strutturale e geotecnica osservando la

modalità di assegnazione del punteggio e l'implementazione del procedimento tramite l'applicazione.

### 5.3.1 Carico rivestimento

Il primo parametro inerente al carico del rivestimento si determina come osservato in Tabella 5.1.

Tabella 5.1: Sollecitazioni sul rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 15 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Concio scarico, cioè caratterizzato da una sollecitazione compresa tra lo 0 e il 10% della resistenza caratteristica a compressione del rivestimento ( $R_{ck}$ nel caso di rivestimento in calcestruzzo o calcestruzzo armato, $f$ nel caso di rivestimento in muratura).
3	Concio debolmente carico, cioè caratterizzato da una sollecitazione compresa tra il 10 e il 20% della resistenza caratteristica a compressione del rivestimento ( $R_{ck}$ nel caso di rivestimento in calcestruzzo o calcestruzzo armato, $f$ nel caso di rivestimento in muratura). Oppure Concio scarico con sollecitazione non uniformemente distribuita ( $\sigma_{misurata\ max} / \sigma_{misurata\ min} > 1.5$ ).
8	Concio mediamente carico, cioè caratterizzato da una sollecitazione compresa tra il 20 e il 50% della resistenza caratteristica a compressione del rivestimento ( $R_{ck}$ nel caso di rivestimento in calcestruzzo o calcestruzzo armato, $f$ nel caso di rivestimento in muratura). Oppure Concio debolmente carico con sollecitazione non uniformemente distribuita ( $\sigma_{misurata\ max} / \sigma_{misurata\ min} > 1.5$ ).
13	Concio molto carico, cioè caratterizzato da una sollecitazione maggiore del 50% della resistenza caratteristica a compressione del rivestimento ( $R_{ck}$ nel caso di rivestimento in calcestruzzo o calcestruzzo armato, $f$ nel caso di rivestimento in muratura). Oppure Concio mediamente carico con sollecitazione non uniformemente distribuita ( $\sigma_{misurata\ max} / \sigma_{misurata\ min} > 1.5$ ).
15	Concio molto carico con sollecitazione non uniformemente distribuita ( $\sigma_{misurata\ max} / \sigma_{misurata\ min} > 1.5$ ).

Dato che l'assegnazione del punteggio è funzione di dati quantitativi inerenti alla galleria quali resistenza caratteristica del rivestimento  $R_{ck}$ , sollecitazione massima  $\sigma_{max}$  e quella minima  $\sigma_{min}$ , lo sviluppo del parametro è avvenuto tramite tre caselle di testo definite *Textbox* all'interno delle quali l'utente inserisce i dati relativi al concio in esame. Ad ogni gruppo di caselle di testo

viene associata un'etichetta indicante il concio di riferimento con un carattere rosso come mostrato in Figura 5.9.

	Resistenza del rivestimento Rck [MPa]	Carico massimo [MPa]	Carico minimo [MPa]
Concio 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 5.9: Interfaccia “Carico rivestimento”.

La *TextBox* nasce come strumento all'interno del quale l'utente può inserire qualsiasi formato di carattere (numeri, lettere e simboli). Tuttavia per garantire una lettura corretta del dato inserito da parte dell'applicazione, ciascuna casella di testo è stata programmata da codice in modo tale il dato inserito venga accettato solo se assumibile come un valore intero o decimale. Difatti se l'utente digita un contenuto non valido, non gli sarà possibile procedere ai prossimi campi se non attua prima una modifica per correggere l'errore. Inoltre compare una *MsgBox* che lo avverte del problema come mostrato in Figura 5.10.

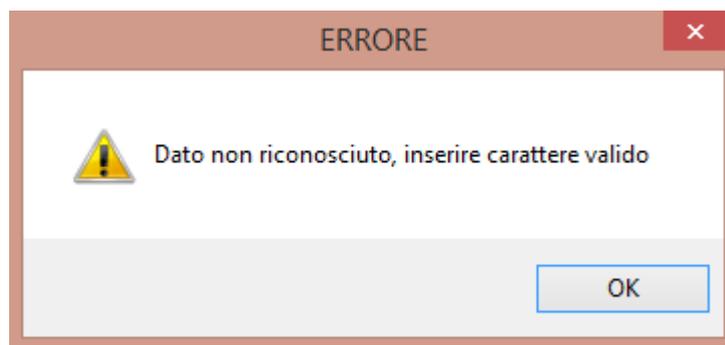


Figura 5.10: MessageBox di errore compilazione.

Le etichette relative alla numerazione dei conci create tramite lo strumento *Label* hanno una colorazione rossa per indicare che i dati inseriti sono incompleti. Se i campi inerenti ad un concio vengono riempiti, la scritta diventa verde. Tale funzionalità creata tramite codice è molto utile per fornire un impatto visivo migliore all'utente in caso di ricerca di campi vuoti. Infatti se una delle tre caselle relative al concio è vuota, la scritta è rossa e l'applicazione non può elaborare i dati per assegnare un punteggio al parametro. Un esempio viene rappresentato nella Figura 5.11.

	Resistenza del rivestimento Rck [MPa]	Carico massimo [MPa]	Carico minimo [MPa]
Concio 1	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="5"/>
Concio 2	<input type="text" value="20"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="8"/>

Figura 5.11: Esempio trasformazione dell'etichetta "Concio" con caselle di testo.

Una volta inseriti i dati, l'applicazione elabora il punteggio svolgendo in *background* i calcoli per verificare la percentuale di resistenza a cui il carico massimo arriva e l'uniformità di carico.

### 5.3.2 Livello di incertezza del modello geologico geotecnico

Il sistema di assegnazione del punteggio viene descritto dalla seguente Tabella 5.2.

Tabella 5.2: Livello di incertezza del modello geologico geotecnico – punteggio variabile tra 0 e 3 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Presenza di risultati di prove in situ e di laboratorio che definiscono i parametri geo-meccanici del terreno/ammasso roccioso. Informazioni esaustive sull'assetto geologico. Presenza di altre informazioni che consentono di definire i parametri del terreno/ammasso roccioso con ottima approssimazione.
1	Informazioni reperibili da carte geologiche con aggiunta di parziali informazioni specifiche riferite all'intorno della galleria (ad esempio sondaggi). Presenza di altre informazioni che consentono di definire i parametri del terreno/ammasso roccioso con sufficiente approssimazione.
2	Informazioni reperibili solamente da carte geologiche che descrivono l'area nel suo insieme.
3	Nessuna informazione.

Dato che dalla Tabella 5.2 si evince che il punteggio viene associato ad una proprietà qualitativa e non quantitativa, si è stabilito di programmare un'interfaccia che dia la possibilità all'utente di selezionare la descrizione di riferimento al concio in esame (Figura 5.12).

Figura 5.12: Interfaccia "Livello di incertezza del modello geologico geotecnico".

Utilizzando quindi lo strumento *RadioButton* sono state generate per ogni concio le quattro opzioni inerenti al livello di incertezza del modello geologico geotecnico. L'utente non deve fare altro che "spuntare" l'opzione desiderata e l'applicazione elabora il punteggio associato. Si osserva inoltre che come fatto per il parametro precedente, anche in questo caso l'etichetta "Concio 1", "Concio 2", ecc. diventa verde dopo che è stata selezionata un'opzione (Figura 5.13).

**Concio 1**

Presenza di risultati di prove in situ e di laboratorio che definiscono i parametri geo-meccanici del terreno/ammasso roccioso. Informazioni esaustive sull'assetto geologico. Presenza di altre informazioni che consentono di definire i parametri del terreno/ammasso roccioso con ottima approssimazione.

Informazioni reperibili da carte geologiche con aggiunta di parziali informazioni specifiche riferite all'intorno della galleria (ad esempio sondaggi). Presenza di altre informazioni che consentono di definire i parametri del terreno/ammasso roccioso con sufficiente approssimazione.

Informazioni reperibili solamente da carte geologiche che descrivono l'area nel suo insieme.

Nessuna informazione

Figura 5.13: Esempio trasformazione dell'etichetta "Concio" con radiobutton.

### 5.3.3 Qualità dell'ammasso roccioso/terreno

La valutazione del seguente parametro viene effettuata come mostrato nella Tabella 5.3.

Tabella 5.3: Qualità dell'ammasso roccioso/terreno – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Ammasso roccioso di ottima qualità: poco fratturato e con parametri di resistenza elevati.
Tra 0 e 2	Casi intermedi.
2	Terreno di scarsa qualità: molto deformabile e con parametri di resistenza scarsa.

Osservando la Tabella 5.3, nonostante la descrizione di tale parametro risulti essere qualitativa, data la variabilità del caso intermedio, non sono stati usati i *radiobutton*. Infatti si è stabilito di fornire all'utente una casella di testo per ogni concio, all'interno della quale deve direttamente inserire il punteggio relativo al parametro. Al fine di rendere chiara la procedura di quanto appena descritto, l'interfaccia, come mostrato in Figura 5.14, è dotata di un'etichetta che spiega l'elaborazione del parametro. Si consideri che, dato il limite superiore del punteggio pari a 2, le caselle di testo sono programmate per non accettare valori inferiori a 0 o superiori a 2, ma possono accettare qualsiasi valore decimale all'interno di tale intervallo.

Carico rivestimento	Incertezza modello geol/geotecnico	Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno	Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	Presenza di sotto-spessore nel rivest
<p>Inserire nelle caselle di testo un punteggio compreso tra 0 e 2 sulla base delle seguenti indicazioni:</p>				
<p>0 -Ammasso roccioso di ottima qualità: poco fratturato e con parametri di resistenza elevati.</p>		<b>Concio 1</b>	<input type="text"/>	
<p>0-2 -Casi intermedi.</p>		<b>Concio 2</b>	<input type="text"/>	
<p>2 -Terreno di scarsa qualità: molto deformabile e con parametri di resistenza scarsa.</p>		<b>Concio 3</b>	<input type="text"/>	
		<b>Concio 4</b>	<input type="text"/>	
		<b>Concio 5</b>	<input type="text"/>	

Figura 5.14: Interfaccia "Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno".

### 5.3.4 Peculiarità dell'ammasso roccioso/terreno

Lo schema di assegnazione di punteggio per tale parametro viene definito in Tabella 5.4.

Tabella 5.4: Peculiarità dell'ammasso roccioso/terreno – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Assenza di comportamenti peculiari (comportamento rigonfiante, fragile, creep, presenza di gas nocivi/esplosivi, rocce radioattive).
Tra 0 e 2	Casi intermedi.
2	Presenza di almeno un aspetto peculiare (comportamento rigonfiante, fragile, creep, presenza di gas nocivi/esplosivi, rocce radioattive) che influenza notevolmente il comportamento dell'ammasso roccioso/terreno.

Come nel caso precedente, data la variabilità del punteggio nel caso intermedio Tabella 5.4, l'interfaccia è stata progettata tramite l'uso di caselle di testo e un'etichetta esplicativa del procedimento da seguire (Figura 5.15). Anche in questo caso le caselle di testo sono state progettate per non accettare valori inferiori a 0 o superiori a 2.

Carico rivestimento	Incertezza modello geol/geotecnico	Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno	Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	Presenza di sotto-spessore nel rivest
<p>Inserire nelle caselle di testo un punteggio compreso tra 0 e 2 sulla base delle seguenti indicazioni:</p> <p>0 -Assenza di comportamenti peculiari (comportamento rigonfiante, fragile, creep, presenza di gas nocivi/esplosivi, rocce radioattive).</p> <p>0-2 -Casi intermedi.</p> <p>2 -Presenza di almeno un aspetto peculiare (comportamento rigonfiante, fragile, creep, presenza di gas nocivi/esplosivi, rocce radioattive) che influenza notevolmente il comportamento dell'ammasso roccioso/terreno.</p>			<b>Punteggio</b>	
			<b>Concio 1</b>	<input type="text"/>
			<b>Concio 2</b>	<input type="text"/>
			<b>Concio 3</b>	<input type="text"/>
			<b>Concio 4</b>	<input type="text"/>
			<b>Concio 5</b>	<input type="text"/>

Figura 5.15: Interfaccia "Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno".

### 5.3.5 Presenza di sotto-spessore nel rivestimento

Il punteggio di tale parametro si definisce tramite lo schema definito in Tabella 5.5.

Tabella 5.5: Presenza di sotto-spessore nel rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Sotto-spessore inferiore al 10% dello spessore di progetto.
1	Sotto-spessore compreso tra il 10 e il 30 % dello spessore di progetto.
2	Sotto-spessore maggiore del 30% dello spessore di progetto.

Il punteggio viene associato in base alla percentuale di sotto-spessore rilevato rispetto a quello effettivo del rivestimento. Il dato viene fornito tramite indagini videoendoscopiche e/o georadar che forniscono la profondità di vuoti e vespai all'interno del rivestimento. Inizialmente l'interfaccia era stata impostata tramite l'utilizzo di caselle di testo all'interno delle quali l'utente poteva inserire direttamente la percentuale di sotto-spessore per ogni concio. Tuttavia,

per rendere più flessibile la scelta in quanto alcune volte i dati delle indagini non sono disponibili, si è deciso di progettare l'interfaccia tramite i *radiobutton* (Figura 5.16) per consentire all'utente di scegliere arbitrariamente quale condizione associare al concio in esame.

Figura 5.16: Interfaccia "Presenza di sotto-spessore nel rivestimento".

### 5.3.6 Livello di difettosità

Per la valutazione di tale parametro è necessario fare riferimento alle ispezioni approfondite e alle aree percentuali dei difetti classificati 2E, 3, 3U ed S secondo la classificazione IQOA (Barla 2021). Lo schema di assegnazione del punteggio è il seguente:

$$\left. \begin{array}{l} P_{2E} = 45 \cdot A_{2E\%} \text{ con } P_{2E} \leq 20 \\ P_3 = 60 \cdot A_{3\%} \text{ con } P_3 \leq 20 \\ P_{3U} = 100 \cdot A_{3U\%} \text{ con } P_{3U} \leq 20 \\ P_S = 120 \cdot A_{S\%} \text{ con } P_S \leq 20 \end{array} \right\} P_{IQOA} = \max_i P_i$$

Ad ogni classe di difetto si associa un punteggio  $P_i$  in funzione della corrispettiva percentuale areale moltiplicata per un opportuno coefficiente. Infine il punteggio associato al livello di

difettosità risulterà essere il massimo tra quelli ottenuti per le diverse classi. Si osserva inoltre che il punteggio ha un limite superiore pari a 20.

	Qualità dell'ammasso roccioso/del terreno	Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	Livello di difettosità	Rapidità di evoluzione del degrado
				A2E %      A3 %      A3U %      AS % <small>Inserire valore percentuale. es.: A2E=15% =&gt; inserire "15".</small>	
Concio 1				<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 2				<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 3				<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 4				<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 5				<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 5.17: Interfaccia "Livello di difettosità".

Il sistema di equazioni è stato rappresentato tramite l'interfaccia definita in Figura 5.17. Per ogni concio l'utente deve inserire la percentuale areale di ciascuna classe di difetto all'interno della casella di testo inerente (nel caso in cui una classe sia assente, bisogna associare il valore 0). Ogni casella di testo è stata programmata per accettare solo valori decimali per evitare l'immissione di dati non leggibili dall'applicazione. Tramite codice quest'ultima svolge i prodotti delle percentuali per i rispettivi coefficienti per poi elaborare il massimo punteggio tenendo conto del limite superiore di 20.

La procedura appena esposta è valida solo nel caso di ispezioni approfondite disponibili. Altrimenti il metodo SMART prevede un secondo approccio tramite l'utilizzo delle sole ispezioni preliminari. Tuttavia si è deciso di trascurare quest'ultimo in quanto lo sviluppo dell'applicazione si è basato sulla completa disponibilità di indagini e prove inerenti alla galleria in esame.

### 5.3.7 Rapidità di evoluzione del degrado

La valutazione del seguente parametro dipende dall'età della galleria calcolata in anni e dal punteggio associato al livello di difettosità definito in precedenza.

Tabella 5.6: Rapidità di evoluzione del degrado – punteggio variabile tra 0 e 3 (Barla 2021).

		Punteggio livello di difettosità				
		0	≤5	≤10	≤15	≤20
Età della galleria	>50 anni	0	0	0	1	2
	30-50 anni	0	0	1	2	2
	10-30 anni	0	1	1	2	3
	<10 anni	0	1	2	3	3

Dato che il punteggio relativo al livello di difettosità è stato già elaborato, l’utente deve inserire solo l’età della galleria. L’interfaccia è stata quindi progettata come mostrato in Figura 5.18.

Figura 5.18: Interfaccia "Rapidità di evoluzione del degrado" (Barla et al., 2021).

Dalla Figura 5.18 si osserva una casella di testo associata all’etichetta “Età della galleria [anni]” all’interno della quale l’utente inserisce il dato inerente alla galleria tenendo conto che la casella accetta unicamente numeri interi. Inoltre il metodo prevede che “*se la galleria negli anni ha subito interventi di messa in sicurezza che ne hanno ridotto il livello di difettosità, si aumenta il punteggio di 1 punto*” (Barla 2021). Per cui l’applicazione fornisce l’opportunità di tener conto di tale aspetto aumentando il punteggio in caso presenza di interventi di messa in sicurezza.

### 5.3.8 Tipologia di galleria

La valutazione del seguente parametro fa riferimento alla Tabella 5.7.

Tabella 5.7: Tipologia di galleria – punteggio variabile tra 0 e 4 (Barla 2021).

Geometria	Materiale	$D_{eq} \leq 7 \text{ m}$	$7 \text{ m} < D_{eq} < 11 \text{ m}$	$11 \text{ m} \leq D_{eq} < 15 \text{ m}$	$D_{eq} \geq 15 \text{ m}$
Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)*	muratura	2	3	4	4
	cls	1	2	3	4
	c.a.	1	2	2	3
	misto**	2	3	4	4
Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto sub-orizzontale)*	muratura	2	3	4	4
	cls	0	1	2	3
	c.a.	0	1	1	2
	misto**	2	3	4	4
Galleria (con arco rovescio)*	Qualsiasi (muratura, cls, c.a.)	0	1	2	3
Galleria circolare (conci prefabbricati)*	c.a.	0	1	2	3
Galleria scatolare*	c.a.	0	1	2	3

\* In presenza di sezioni allargate (piazzole, nicchioni, ecc.) e/o sezioni ribassate tali da non consentire il funzionamento ad arco si consiglia di aumentare di una unità il punteggio

\*\* Con il termine "misto" si fa riferimento ad una struttura composita (getto di calcestruzzo-muratura).

Il punteggio viene assegnato tramite una combinazione di geometria, materiale e diametro della galleria (valutato per ogni concio). L'interfaccia grafica è stata progettata come illustrato in Figura 5.19.

Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	Livello di difettosità	Rapidità di evoluzione del degrado	Tipologia di galleria	Presenza ed e
				Diametro della galleria Deq [m]	
<b>Concio 1</b>	<b>Geometria</b>		<b>Materiale</b>		
	<input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto suborizzontale)* <input type="radio"/> Galleria (con arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria circolare (conci prefabbricati)* <input type="radio"/> Galleria scatolare*				
<b>Concio 2</b>	<b>Geometria</b>		<b>Materiale</b>		
	<input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto suborizzontale)* <input type="radio"/> Galleria (con arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria circolare (conci prefabbricati)* <input type="radio"/> Galleria scatolare*				

Figura 5.19: Interfaccia "Tipologia di galleria".

Il pannello della “Geometria” consente di selezionare le diverse possibilità descritte nella Tabella 5.7. Il pannello del “Materiale” invece si presenta inizialmente vuoto in quanto le opzioni descritte nella Tabella 5.7 si riducono in funzione della geometria selezionata. Per evitare che l’utente possa realizzare combinazioni non previste dal metodo, la progettazione presentata obbliga a selezionare prima l’opzione inerente alla geometria e una volta fatto ciò, compariranno le opzioni disponibili. Un esempio di tale procedimento è descritto nella Figura 5.20.

Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	Livello di difettosità	Rapidità di evoluzione del degrado	Tipologia di galleria	Presenza ed e
<b>Concio 1</b>	<b>Geometria</b>	<input checked="" type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto suborizzontale)* <input type="radio"/> Galleria (con arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria circolare (conci prefabbricati)* <input type="radio"/> Galleria scatolare*		<b>Materiale</b>	<input checked="" type="radio"/> muratura <input type="radio"/> cls <input type="radio"/> c.a. <input type="radio"/> misto
		<input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto suborizzontale)* <input type="radio"/> Galleria (con arco rovescio)* <input checked="" type="radio"/> Galleria circolare (conci prefabbricati)* <input type="radio"/> Galleria scatolare*			

Diametro della galleria Deq [m]

Figura 5.20: Adattamento del pannello "Materiale" rispetto alla scelta geometrica.

Osservando la Figura 5.20 si evidenzia che le etichette “Concio 1” e “Concio 2” sono rosse in quanto l’immissione di dati è incompleta. È necessario completare il parametro inserendo il valore del diametro all’interno della casella di testo evidenziata in Figura 5.21. Il valore è unico per l’intera galleria. Una volta immesso il diametro, le etichette diventano verdi per confermare che il programma ha potuto elaborare il punteggio.

Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	Livello di difettosità	Rapidità di evoluzione del degrado	Tipologia di galleria	Presenza ed e
<b>Concio 1</b>	<b>Geometria</b>	<input checked="" type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto suborizzontale)* <input type="radio"/> Galleria (con arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria circolare (conci prefabbricati)* <input type="radio"/> Galleria scatolare*		<b>Materiale</b>	<input checked="" type="radio"/> muratura <input type="radio"/> cls <input type="radio"/> c.a. <input type="radio"/> misto
		<input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (senza arco rovescio)* <input type="radio"/> Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto suborizzontale)* <input type="radio"/> Galleria (con arco rovescio)* <input checked="" type="radio"/> Galleria circolare (conci prefabbricati)* <input type="radio"/> Galleria scatolare*			

Diametro della galleria Deq [m]

Figura 5.21: Completamento del parametro tramite l’inserimento del diametro.

### 5.3.9 Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione

Il punteggio di tale parametro viene definito tramite il seguente schema rappresentato in Tabella 5.8.

Tabella 5.8: Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla et al., 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Il sistema di impermeabilizzazione è presente ed efficace.
0.5	Il sistema di impermeabilizzazione è presente ma sono presenti macchie di umidità e locali venute d'acqua.
1	Il sistema di impermeabilizzazione è presente ma vi sono diffuse macchie di umidità, stilocidi e venute d'acqua.
2	Il sistema di impermeabilizzazione è assente o del tutto inefficace.

In questo caso, essendo la descrizione di tipo qualitativa, l'interfaccia è stata progettata tramite *radiobutton*:

The screenshot shows a software interface with a tabbed menu at the top. The active tab is 'Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione'. Below the menu, there are three sections labeled 'Concio 1', 'Concio 2', and 'Concio 3'. Each section contains four radio button options corresponding to the descriptions in Table 5.8:

- Il sistema di impermeabilizzazione è presente ed efficace.
- Il sistema di impermeabilizzazione è presente ma sono presenti macchie di umidità e locali venute d'acqua.
- Il sistema di impermeabilizzazione è presente ma vi sono diffuse macchie di umidità, stilocidi e venute d'acqua.
- Il sistema di impermeabilizzazione è assente o del tutto inefficace.

Figura 5.22: Interfaccia "Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione".

### 5.3.10 Complessità costruttiva

Il parametro viene valutato come in Tabella 5.9.

Tabella 5.9: Complessità costruttiva – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla et al., 2021).

Punteggio	Descrizione
0	In fase costruttiva non si evidenziano interventi di rinforzo/consolidamento (jet grouting, blindaggi del rivestimento, iniezioni, centinature, infilaggi, ...). Dopo la costruzione non sono accaduti eventi rilevanti (splaccaggi, formelli, collassi, ...) e non sono rilevabili danni correlabili ad un comportamento anomalo del terreno.
1	In fase costruttiva si evidenziano interventi di rinforzo/consolidamento. Dopo la costruzione non sono accaduti eventi rilevanti e non sono rilevabili danni correlabili ad un comportamento anomalo del terreno. Oppure In fase costruttiva non si evidenziano interventi di rinforzo/consolidamento, ma dopo la costruzione sono accaduti eventi e sono rilevabili danni.
2	In fase costruttiva si evidenziano interventi di rinforzo/consolidamento. Dopo la costruzione sono accaduti eventi rilevanti e sono rilevabili danni correlabili ad un comportamento anomalo del terreno.

Anche in questo caso la descrizione del parametro è qualitativa, per cui si è proceduto allo stesso modo del parametro precedente (Figura 5.23).

The screenshot shows a software interface with a tabbed menu at the top. The 'Complessità costruttiva' tab is selected. Below the menu, there are two main sections labeled 'Concio 1' and 'Concio 2'. Each section contains a list of radio button options corresponding to the descriptions in Table 5.9. In the 'Concio 1' section, the first option (score 0) is selected. In the 'Concio 2' section, the first option (score 0) is also selected. The interface includes a scrollbar on the right side.

Figura 5.23: Interfaccia "Complessità costruttiva".

### 5.3.11 Influenza dell'acqua

Per la valutazione di questo parametro si fa riferimento alle ispezioni approfondite e alle aree percentuali dei difetti per venute d'acqua classificati 1, 2, 2E ed S secondo la classificazione IQOA (Barla 2021). Il sistema è il seguente:

$$P_{\text{acqua}} = \max \left\{ \begin{array}{l} P_1 = \begin{cases} 0 & \text{se } A_1 < 10\% \\ 1 & \text{se } A_1 > 10\% \end{cases} \\ P_2 = \begin{cases} 0 & \text{se } A_2 = 0\% \\ 1 & \text{se } A_2 < 20\% \\ 2 & \text{se } A_2 < 50\% \\ 3 & \text{se } A_2 > 50\% \end{cases} \\ P_{2E} = \begin{cases} 0 & \text{se } A_{2E} = 0\% \\ 2 & \text{se } A_{2E} < 10\% \\ 3 & \text{se } A_{2E} < 20\% \\ 4 & \text{se } A_{2E} > 20\% \end{cases} \\ P_S = \begin{cases} 0 & \text{se } A_S = 0\% \\ 3 & \text{se } A_S < 10\% \\ 4 & \text{se } A_S > 10\% \end{cases} \end{array} \right.$$

Ad ogni percentuale di area ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_{2E}$ ,  $A_S$ ) viene associato il relativo punteggio ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_{2E}$ ,  $P_S$ ) in base all'intervallo in cui ricade il valore della percentuale di area. Successivamente il punteggio relativo all'influenza dell'acqua sarà il massimo tra quelli calcolati. Alla luce di quanto appena visto, è risultato logico adottare la stessa interfaccia definita per il parametro "livello di difettosità": sono state inserite quattro caselle di testo all'interno delle quali l'utente inserisce i dati relativi alle percentuali di area e il programma elabora il punteggio massimo associato all' "Influenza dell'acqua". L'interfaccia appena descritta è rappresentata nella Figura 5.24.

	A1 [%]	A2 [%]	A2E [%]	AS [%]
Concio 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Concio 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Inserire valore percentuale, es.: A2E=15% => inserire "15".

Figura 5.24: Interfaccia "Influenza dell'acqua".

Nel caso in cui le ispezioni approfondite non siano reperibili, si applica un'altra metodologia per definire il parametro sulla base delle ispezioni preliminari. Tuttavia, come menzionato in precedenza, l'applicazione non tiene conto dell'indisponibilità dei dati.

Una volta terminata la compilazione dell'ultimo parametro, il pulsante CdA Geologica> che era disabilitato, come mostrato in Figura 5.7, viene abilitato in quanto il programma ha potuto elaborare correttamente tutti i dati inseriti dall'utente (Figura 5.25).

The screenshot shows the same form as Figure 5.24, but with the number '1' entered in every input field. The text 'Concio 1' through 'Concio 5' is now green. A 'Salva' button is visible in the top right. At the bottom right, a button labeled 'CdA\_Geologica>' is circled in red, with a red arrow pointing down to it from above.

Figura 5.25: Abilitazione del pulsante per procedere alla CdA Geologica.

Si tenga presente che i dati inseriti in Figura 5.25 sono puramente casuali e al solo scopo illustrativo. Cliccando quindi sul pulsante, si procede alla prossima finestra.

## 5.4 Finestra n.3: CdA Geologica

A differenza della precedente classe di attenzione, quella geologica viene valutata direttamente per l'intera galleria, per cui non vi è bisogno di inserire i dati per ciascun concio. La finestra di tale classe di attenzione si presenta come mostrato in Figura 5.26.

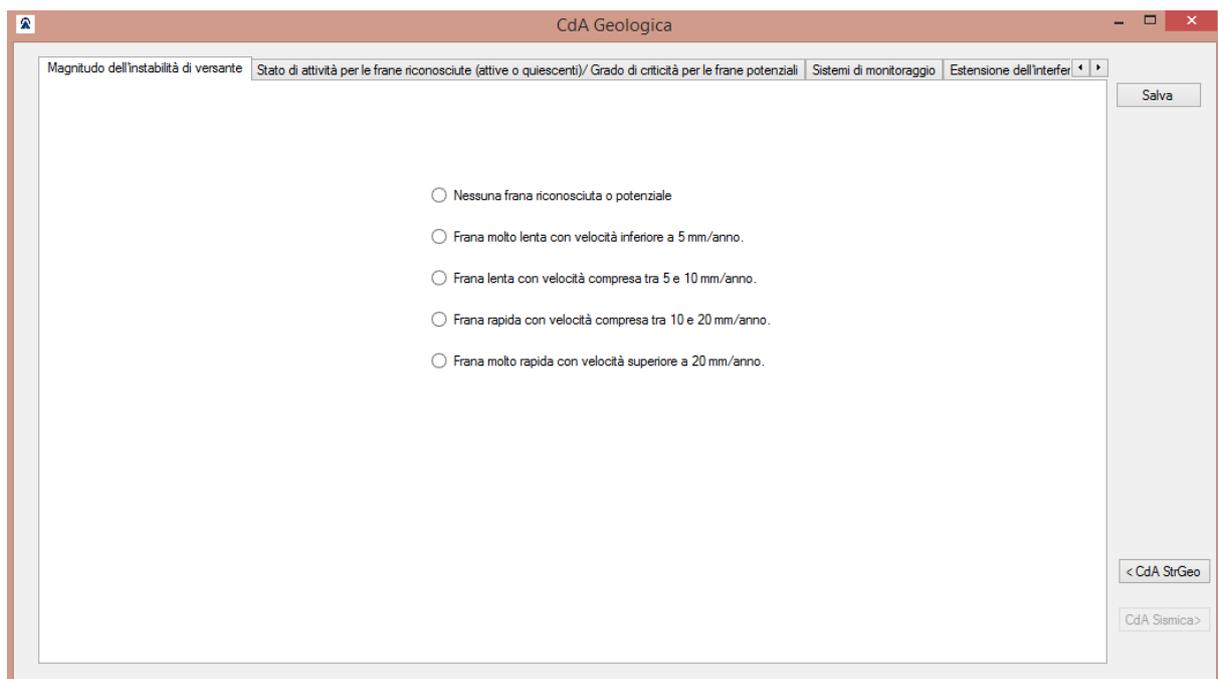


Figura 5.26: Schermata iniziale della CdA Geologica coincidente con l'interfaccia del parametro "Magnitudo dell'instabilità di versante".

Si osserva che la struttura dell'interfaccia è la medesima della precedente finestra: vi è una *TabControl* con all'interno tante schede quanti sono i parametri della classe di attenzione geologica e il pulsante di salvataggio per consentire all'utente di salvare in qualunque momento. Nell'angolo inferiore destro sono presenti i seguenti tasti: <CdA StrGeo e CdA Sismica>.

Il primo pulsante risulta già abilitato in quanto consente di tornare alla finestra precedente per eventuali modifiche. Il secondo invece consente di passare alla successiva finestra riguardante la classe di attenzione sismica. Tuttavia quest'ultimo pulsante rimane disabilitato finché tutti i parametri della classe di attenzione geologica non vengono completati.

Come osservato nel capitolo precedente (Tabella 4.3), i parametri necessari per la valutazione della classe di attenzione geologica sono 4. Gli schemi per definire quest'ultimi sono riportati nelle seguenti tabelle.

Tabella 5.10: Magnitudo dell'instabilità di versante – punteggio variabile tra 0 e 5 (Barla 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
0	Nessuna frana riconosciuta o potenziale
0.5	Frana molto lenta con velocità inferiore a 5 mm/anno.
1.5	Frana lenta con velocità compresa tra 5 e 10 mm/anno.
3	Frana rapida con velocità compresa tra 10 e 20 mm/anno.
5	Frana molto rapida con velocità superiore a 20 mm/anno.

Tabella 5.11: Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti) / Grado di criticità per le frane potenziali – punteggio variabile tra 0 e 5 (Barla, 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
0	Nessuna frana riconosciuta o potenziale.
2	Frana quiescente oppure frana potenziale con basso livello di criticità.
5	Frana attiva oppure frana potenziale con elevato livello di criticità.

Tabella 5.12: Sistemi di monitoraggio – punteggio variabile tra -5 e 0 (Barla 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
-5	Presenza di sistema di monitoraggio del tipo Early Warning System e/o indagini conoscitive approfondite.
-3	Presenza di un sistema di monitoraggio e/o indagini conoscitive sufficienti.
0	Assenza di un sistema di monitoraggio

Tabella 5.13: Estensione dell'interferenza instabilità-struttura – punteggio variabile tra 0 e 5 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	La galleria è inserita in un versante non soggetto a fenomeni di instabilità oppure questi ultimi sono superficiali e non interferiscono con l'opera oppure il fenomeno di instabilità interferisce con l'opera solamente agli imbocchi.
3	La galleria interagisce in maniera limitata con un fenomeno di instabilità
5	La galleria interagisce con un fenomeno di instabilità rilevante e/o per un'estensione significativa della sua lunghezza

Le tabelle evidenziano che tutti i parametri riguardanti la classe di attenzione geologica sono di tipo qualitativo. La modalità di progettazione dell'interfaccia è ricaduta quindi sull'uso dei *radiobutton* per ogni parametro della classe di attenzione. Bisogna ricordare che, a differenza della classe di attenzione precedente, in questo caso il parametro viene valutato per l'intera galleria; quindi, non vi sono più le etichette indicanti i conci, ma vi sarà un unico gruppo di *radiobutton* per ciascun parametro. Quanto appena descritto viene riportate nelle seguenti figure rappresentanti l'interfaccia di ciascun parametro.

Figura 5.27: Interfaccia "Magnitudo dell'instabilità di versante".

Magnitudo dell'instabilità di versante	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/ Grado di criticità per le frane potenziali	Sistemi di monitoraggio	Estensione dell'interfer
--	---	-------------------------	--------------------------

Nessuna frana riconosciuta o potenziale.

Frana quiescente oppure frana potenziale con basso livello di criticità.

Frana attiva oppure frana potenziale con elevato livello di criticità.

Figura 5.28: Interfaccia "Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti) / Grado di criticità per le frane potenziali".

Magnitudo dell'instabilità di versante	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/ Grado di criticità per le frane potenziali	Sistemi di monitoraggio	Estensione dell'interfer
--	---	-------------------------	--------------------------

Presenza di sistema di monitoraggio del tipo Early Warning System e/o indagini conoscitive approfondite.

Presenza di un sistema di monitoraggio e/o indagini conoscitive sufficienti.

Assenza di un sistema di monitoraggio

Figura 5.29: Interfaccia "Sistemi di monitoraggio".

Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/Grado di criticità per le frane potenziali Sistemi di monitoraggio Estensione dell'interferenza instabilità-struttura

La galleria è inserita in un versante non soggetto a fenomeni di instabilità oppure questi ultimi sono superficiali e non interferiscono con l'opera oppure il fenomeno di instabilità interferisce con l'opera solamente agli imbocchi.

La galleria interagisce in maniera limitata con un fenomeno di instabilità

La galleria interagisce con un fenomeno di instabilità rilevante e/o per un'estensione significativa della sua lunghezza

Figura 5.30: Interfaccia "Estensione dell'interferenza instabilità-struttura".

Si vuole evidenziare che dalla Tabella 4.3 si evince che il punteggio associato alla CdA geologica non può essere inferiore a 0. Per tale motivo l'elaborazione del punteggio è stata programmata in modo tale che non si superi tale limite inferiore.

Una volta scelta un'opzione per ciascun parametro della classe di attenzione geologica, il programma elabora i punteggi associati e abilita il pulsante <CdA Sismica> mostrato in Figura 5.26 per procedere con la classe di attenzione successiva.

## 5.5 Finestra n.4: CdA Sismica

La classe di attenzione sismica viene trattata nel medesimo modo di quella geologica in quanto anche la prima è riferita all'intera galleria. La schermata raffigurata in Figura 5.31 si presenta quindi con la solita *TabControl* contenente le schede rappresentanti i vari parametri. Inoltre sono presenti i tasti <CdA Geologica e CdA Incendio> per potersi spostare tra le finestre. Anche in questo caso il pulsante per procedere alla classe di attenzione successiva risulta disabilitato finché non saranno inseriti correttamente tutti i dati necessari.

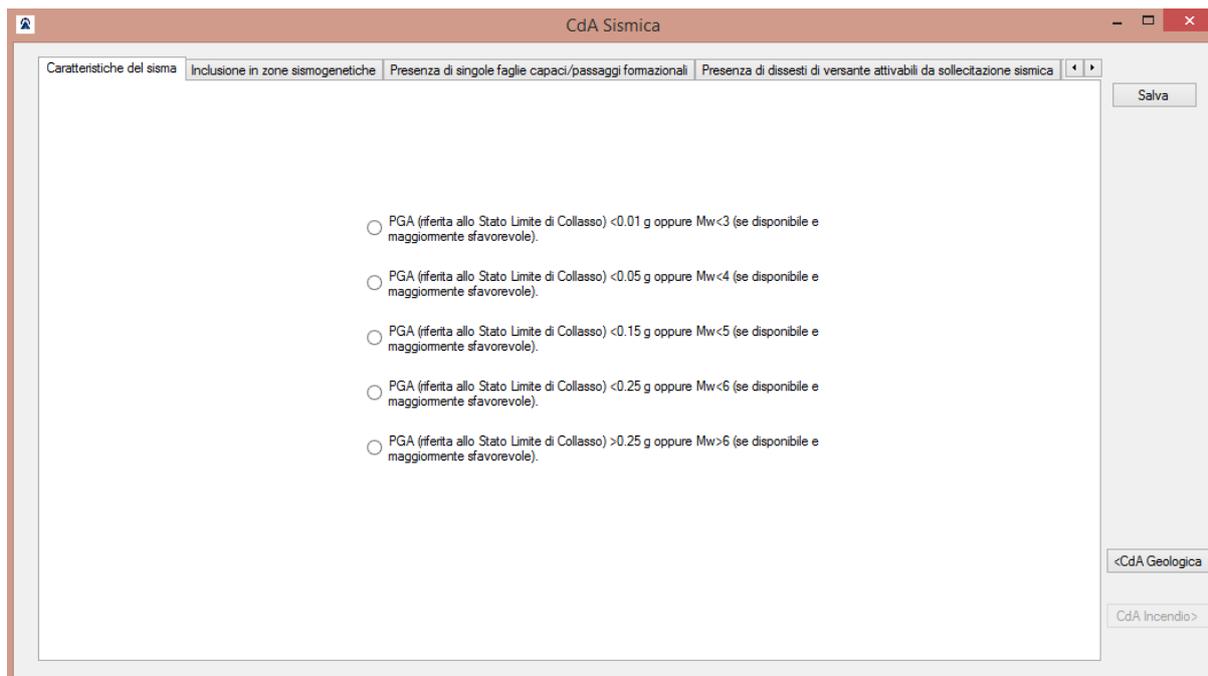


Figura 5.31: Schermata iniziale della CdA Sismica coincidente con l'interfaccia del parametro "Caratteristiche del sisma".

In questo caso i diversi parametri verranno analizzati separatamente in quanto alcuni hanno richiesto una progettazione diversa rispetto a quanto finora esposto.

### 5.5.1 Caratteristiche del sisma

La valutazione del seguente parametro segue lo schema riportato in Tabella 5.14.

Tabella 5.14: Caratteristiche del sisma – punteggio variabile tra 0 e 4 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) $<0.01\text{ g}$ oppure $Mw<3$ (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
1	PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) $<0.05\text{ g}$ oppure $Mw<4$ (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
2	PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) $<0.15\text{ g}$ oppure $Mw<5$ (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
3	PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) $<0.25\text{ g}$ oppure $Mw<6$ (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
4	PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) $>0.25\text{ g}$ oppure $Mw>6$ (se disponibile e maggiormente sfavorevole).

Nonostante la descrizione rappresenti valori quantitativi quali la PGA e la magnitudo dei momenti, si è deciso di progettare il parametro con i *radiobutton*. Quanto appena descritto è rappresentato in Figura 5.32:

The screenshot shows a software interface titled "Caratteristiche del sisma" with four tabs: "Caratteristiche del sisma", "Inclusione in zone sismogenetiche", "Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali", and "Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica". The main content area contains five radio button options:

- PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) <0.01 g oppure Mw<3 (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
- PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) <0.05 g oppure Mw<4 (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
- PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) <0.15 g oppure Mw<5 (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
- PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) <0.25 g oppure Mw<6 (se disponibile e maggiormente sfavorevole).
- PGA (riferita allo Stato Limite di Collasso) >0.25 g oppure Mw>6 (se disponibile e maggiormente sfavorevole).

Figura 5.32: Interfaccia "Caratteristiche del sisma".

### 5.5.2 Inclusione in zone sismogenetiche

La definizione del seguente parametro è descritta dalla Tabella 5.15:

Tabella 5.15: Inclusione in zone sismogenetiche – punteggio variabile tra 0 e 1.5 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Distanza da zone sismogenetiche > 30 km.
0.5	Distanza da zone sismogenetiche > 20 km.
1	Distanza da zone sismogenetiche > 10 km.
1.5	Distanza da zone sismogenetiche < 10 km.

Anche in questo caso si è deciso di progettare come se tale aspetto fosse di tipo qualitativo. L'interfaccia è quella mostrata in Figura 5.33.

Figura 5.33: Interfaccia “Inclusione in zone sismogenetiche”.

### 5.5.3 Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali

Il seguente parametro viene valutato come mostrato in Tabella 5.16.

Tabella 5.16: Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali – punteggio variabile tra 0 e 3 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Assenza di faglie capaci e di passaggi formazionali.
1	Assenza di faglie capaci e contatto tettonico con presenza di salbande di fratturazione.
2	Assenza di faglie capaci e contatto tettonico con materiale metamorfico/basamento cristallino. Presenza di passaggi stratigrafici con significativa variazione di rigidità.
3	Presenza di faglie capaci e/o contatto tettonico con materiale mioctico.

Data la natura qualitativa del parametro, l'interfaccia è stata progettata come in Figura 5.34.

Caratteristiche del sisma	Inclusione in zone sismogenetiche	Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali	Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica
---------------------------	-----------------------------------	---	---

Assenza di faglie capaci e di passaggi formazionali.

Assenza di faglie capaci e contatto tettonico con presenza di salbande di fratturazione.

Assenza di faglie capaci e contatto tettonico con materiale metamorfo/basamento cristallino.  
 Presenza di passaggi stratigrafici con significativa variazione di rigidità.

Presenza di faglie capaci e/o contatto tettonico con materiale mioceno.

Figura 5.34: Interfaccia "Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali".

#### 5.5.4 Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica

La valutazione del seguente parametro risulta diversa rispetto a quella dei precedenti in quanto la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica* viene valutata come mostrato nella Tabella 5.17, in funzione di altri 2 parametri già precedentemente valutati. In particolare la valutazione è funzione del punteggio associato alle *caratteristiche del sisma* (CdA sismica) e di quello associato allo *stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti) / Grado di criticità per le frane potenziali* (CdA geologica).

Tabella 5.17: Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

		Punteggio stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/ Grado di criticità per le frane potenziali (CdA GEOL)		
		0	2	5
Punteggio caratteristiche del sisma (CdA SIS)	0	0	0	0.5
	1	0	0.5	1
	2	0	1	1.5
	3	0	1.5	2
	4	0	2	2

Dato che i parametri di cui è funzione quello in esame sono stati già elaborati, l'utente non necessita di inserire dei dati all'interno del programma. Sarebbe quindi superfluo inserire una scheda *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*. Tuttavia, come mostrato in Figura 5.35, per completezza e per rendere il più chiaro possibile il processo all'utente, è stata progettata comunque una scheda che indica all'utente quanto appena descritto tramite un'etichetta verde con scritto: "PARAMETRO GIÀ CALCOLATO AUTONOMAMENTE, PROCEDERE ALLA PROSSIMA SCHEDA".



Figura 5.35: Interfaccia "Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica".

### 5.5.5 Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno

La valutazione del seguente parametro segue lo schema riportato in Tabella 5.18:

Tabella 5.18: Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Categoria di sottosuolo A (NTC 2018).
0.25	Categoria di sottosuolo B (NTC 2018).
0.5	Categoria di sottosuolo C (NTC 2018).
1	Categoria di sottosuolo D/E (NTC 2018).

Di conseguenza, data la natura qualitativa del parametro, è stato progettato tramite l'uso dei *radiobutton*:

Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali | Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica | Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno

Categoria di sottosuolo A (NTC 2018).

Categoria di sottosuolo B (NTC 2018).

Categoria di sottosuolo C (NTC 2018).

Categoria di sottosuolo D/E (NTC 2018).

Figura 5.36: Interfaccia "Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno".

### 5.5.6 Profondità dell'asse della galleria

Per tale parametro si associa un punteggio in base alla profondità della galleria come mostrato in Tabella 5.19:

Tabella 5.19: Profondità dell'asse della galleria – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Profondità media della galleria > 100 m.
0.25	Profondità media della galleria > 50 m.
0.75	Profondità media della galleria > 25 m.
1	Profondità media della galleria < 25 m.

In questo caso nonostante la natura quantitativa del parametro, si è stabilito di progettare come in Figura 5.37, in quanto l'uso di una casella di testo risultava eccessivo.

The image shows a software interface with a tabbed menu at the top. The active tab is 'Profondità dell'asse della galleria'. Below the menu, there are four radio button options, all of which are currently unselected:

- Profondità media della galleria > 100 m.
- Profondità media della galleria > 50 m.
- Profondità media della galleria > 25 m.
- Profondità media della galleria < 25 m.

Figura 5.37: Interfaccia "Profondità dell'asse della galleria".

### 5.5.7 Geometria della galleria e caratteristiche delle armature

La valutazione di tale parametro avviene come descritta dalla Tabella 5.20.

Tabella 5.20: Geometria della galleria e caratteristiche delle armature – punteggio variabile tra 0 e 0.5 (Barla 2021).

		Armatura		
		Presente e continua	Presente e discontinua	Assente
Geometria	Circolare o a ferro di cavallo con arco rovescio	0	0.25	0.5
	A ferro di cavallo senza arco rovescio	0.25	0.5	0.5
	Scatolare	0.5	0.5	0.5

Si osserva quindi che bisogna inserire una combinazione di dati (geometria e armatura) al fine di elaborare un punteggio. La scheda è stata quindi progettata con 2 elenchi di *radiobutton*, uno riguardante la geometria e l'altro l'armatura. In base alla combinazione inserita dall'utente, il programma elabora il punteggio associato. Inoltre gli elenchi sono stati programmati in modo tale che l'utente possa scegliere prima uno o l'altro senza dover seguire un ordine di compilazione. Quanto appena descritto è rappresentato in Figura 5.38.

Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno | Profondità dell'asse della galleria | Geometria della galleria e caratteristiche delle armature | Resistenza e stato di conservazione

**Geometria**

- Circolare o a ferro di cavallo con arco rovescio
- A ferro di cavallo senza arco di rovescio
- Scatolare

**Armatura**

- Presente e continua
- Presente e discontinua
- Assente

Figura 5.38: Interfaccia "Geometria della galleria e caratteristiche delle armature".

### 5.5.8 Resistenza e stato di conservazione del rivestimento

Il seguente parametro viene valutato in funzione del punteggio associato alla classe di attenzione strutturale e geotecnica per l'intera galleria. Lo schema di valutazione è descritto nella seguente Tabella 5.21:

Tabella 5.21: Resistenza e stato di conservazione del rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	$0 < I_{STR\&GEO} < 10$
0.25	$10 < I_{STR\&GEO} < 20$
0.5	$20 < I_{STR\&GEO} < 30$
0.75	$30 < I_{STR\&GEO} < 40$
1	$40 < I_{STR\&GEO} < 50$

Dato che il punteggio della classe di attenzione strutturale e geotecnica è stato elaborato in *background* dal programma, l'utente non necessita di inserire alcun dato ai fini del calcolo del parametro in esame. Tuttavia, per le stesse motivazioni citate nel paragrafo 5.5.4, la progettazione della scheda è stata effettuata come mostrato in Figura 5.39.

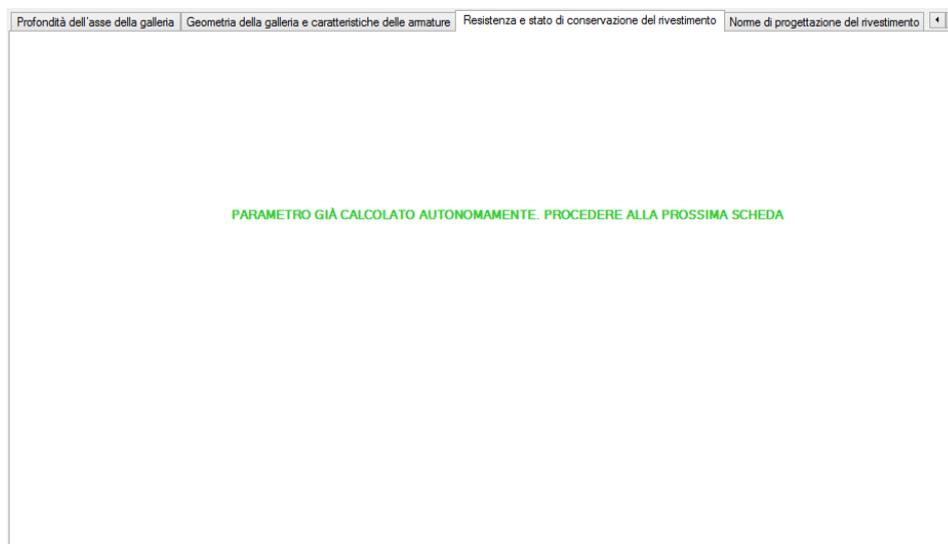


Figura 5.39: Interfaccia “Resistenza e stato di conservazione del rivestimento”.

### 5.5.9 Norme di progettazione del rivestimento

In questo caso il punteggio associato al parametro viene stabilito in base all'uso o meno di norme di progettazione antisismiche. La valutazione è descritta nella Tabella 5.22, mentre la progettazione è rappresentata in Figura 5.40.

Tabella 5.22: Norme di progettazione del rivestimento – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Norme di progettazione antisismiche.
1	Norme di progettazione standard.

The image shows a software interface with a tabbed menu at the top. The active tab is 'Norme di progettazione del rivestimento'. Below the tabs, there are two radio button options:

- Norme di progettazione antisismiche.
- Norme di progettazione standard.

Figura 5.40: Interfaccia "Norme di progettazione del rivestimento".

Una volta terminata la compilazione di quest'ultimo parametro, il pulsante per procedere alla finestra della prossima classe di attenzione CdA Incendio> (Figura 5.31) verrà quindi abilitato.

## 5.6 Finestra n.5: CdA Incendio

Come visto nel paragrafo 4.5, la classe di attenzione incendio viene valutata diversamente in base alla lunghezza della galleria in esame. Infatti se la galleria ha una lunghezza inferiore a 500 m, il punteggio associato alla classe di attenzione incendio viene considerato pari a 0 per l'intera galleria (Barla 2021). Per cui se nella schermata iniziale viene inserita una lunghezza inferiore a 500 m, la finestra inerente alla classe di attenzione incendio avrà l'interfaccia mostrata in Figura 5.41.

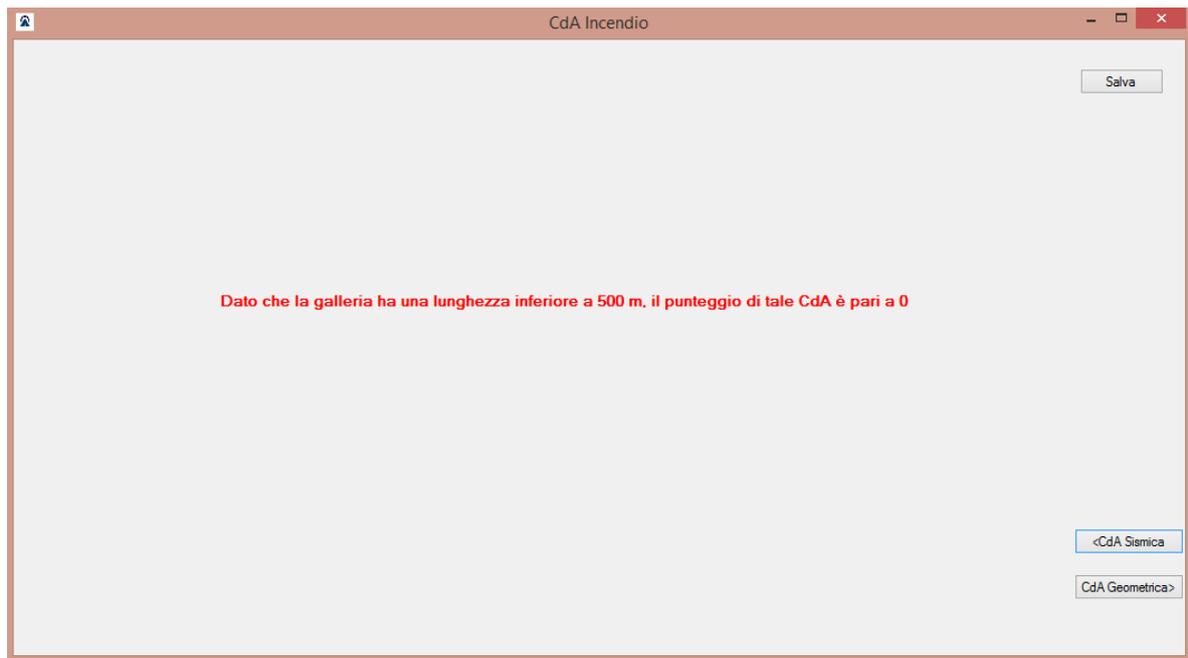


Figura 5.41: Schermata iniziale della CdA Incendio in caso di lunghezza inferiore a 500 m della galleria.

La schermata si presenta con la seguente etichetta in rosso "Dato che la galleria ha una lunghezza inferiore a 500 m, il punteggio di tale CdA è pari a 0". In questo modo l'utente capisce che il programma ha tenuto in conto di tale fattore. Inoltre si osserva che oltre al solito pulsante Salva per il salvataggio, sono presenti anche i tasti <CdA Sismica e CdA Geometrica> per andare rispettivamente indietro e avanti con le finestre. Si osserva sempre in Figura 5.41 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** che il pulsante CdA Geometrica> è abilitato sin da subito in quanto il programma ha già elaborato un punteggio nullo.

Nel caso in cui la lunghezza della galleria sia uguale o superiore a 500 m, è necessario verificare se sia stato adottato o meno il Piano Sicurezza Gallerie: se quest'ultimo è stato adottato, allora si può comunque assumere un valore nullo della classe di attenzione incendio, altrimenti

quest'ultima deve essere valutata tramite la somma dei parametri già definiti precedentemente in Tabella 4.8 calcolati per l'intera galleria.

Per cui in caso di gallerie con lunghezza superiore o uguale a 500 m l'etichetta rossa presente in Figura 5.42 è sostituita dalla seguente interfaccia:

The image shows a light gray dialog box with a white background. At the top right, there are two radio buttons: the first is labeled 'SI' and the second is labeled 'NO'. In the center of the dialog, the text 'Per la galleria in esame è stato adottato il Piano Sicurezza Gallerie?' is displayed. At the bottom center, there is a rectangular button with a blue border and the text 'Avanti' inside.

Figura 5.42: Adozione Piano Sicurezza Gallerie.

Dalla Figura 5.42 si osserva che all'utente viene richiesto di dare una risposta positiva o negativa in merito all'adozione del Piano Sicurezza Gallerie tramite l'uso di due *radiobutton*. Successivamente dovrà premere sul pulsante AVANTI, il quale è stato programmato in modo tale da comportarsi diversamente in funzione della scelta fatta dall'utente:

- “SI”: si passa direttamente alla valutazione della quinta ed ultima classe di attenzione (classe di attenzione geometrica);
- “NO”: l'interfaccia della finestra della CdA incendio cambia presentando una *TabControl* avente tante schede quanti sono i parametri per determinare tale classe di attenzione.

Nell'ipotesi di essere nel secondo caso, l'interfaccia si presenta come mostrato in Figura 5.43:

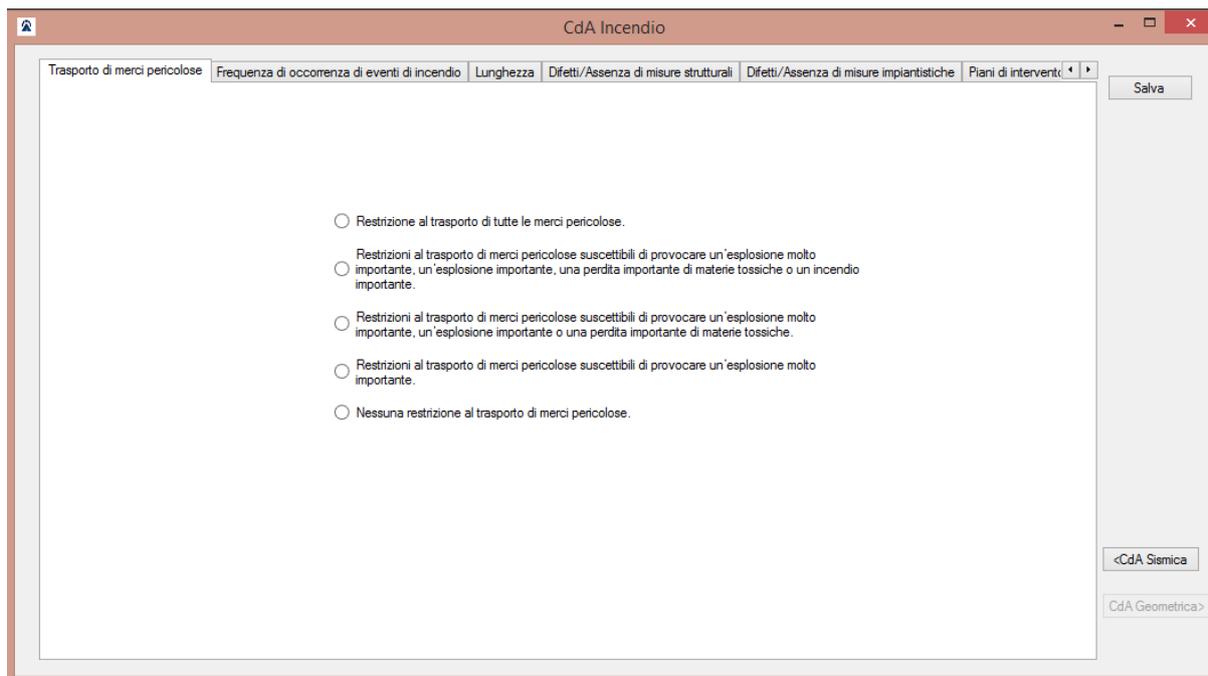


Figura 5.43: *TabControl* della classe di attenzione incendio.

Si procede con la definizione di ciascun parametro e la progettazione dell'interfaccia corrispettiva. Gli schemi di valutazione di ciascuno dei 6 parametri della classe di attenzione incendio sono descritti dalle seguenti tabelle:

Tabella 5.23: Trasporto di merci pericolose – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Restrizione al trasporto di tutte le merci pericolose.
0.25	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante, un'esplosione importante, una perdita importante di materie tossiche o un incendio importante.
0.5	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante, un'esplosione importante o una perdita importante di materie tossiche.
0.75	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante.
1	Nessuna restrizione al trasporto di merci pericolose.

Tabella 5.24: Frequenza di occorrenza di eventi di incendio – punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
0	Da 0 a 1 eventi di incendio per 10 <sup>8</sup> veicoli per km.
0.25	Da 1 a 5 eventi di incendio per 10 <sup>8</sup> veicoli per km.
0.5	Da 5 a 10 eventi di incendio per 10 <sup>8</sup> veicoli per km.
0.75	Da 10 a 30 eventi di incendio per 10 <sup>8</sup> veicoli per km.
1	Più di 30 eventi di incendio per 10 <sup>8</sup> veicoli per km.

Tabella 5.25: Lunghezza – punteggio variabile tra 1 e 3 (Barla 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
1	Lunghezza della galleria compresa tra 500 m e 750 m.
2	Lunghezza della galleria compresa tra 750 m e 1000 m.
3	Lunghezza della galleria maggiore di 1000 m.

Tabella 5.26: Difetti/Assenza di misure strutturali – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
0	Tutti gli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.
1	Molti degli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.
2	La maggior parte degli aspetti sopra citati non sono valutati positivamente.

Tabella 5.27: Difetti/Assenza di misure impiantistiche – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

<b>Punteggio</b>	<b>Descrizione</b>
0	Tutti gli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.
1	Molti degli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.
2	La maggior parte degli aspetti sopra citati non sono valutati positivamente.

Tabella 5.28: Piani di intervento in caso di emergenza– punteggio variabile tra 0 e 1 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Presenza di piani di intervento in caso di emergenza.
1	Assenza di piani di intervento in caso di emergenza.

Si può notare che tutti i parametri ad eccezione della *lunghezza* sono qualitativi. Di conseguenza sono stati tutti progettati tramite l’uso dei *radiobutton* (si ricorda che ad ognuno viene associato il corrispettivo punteggio da assegnare). Per quanto concerne il parametro dipendente dalla lunghezza della galleria, dato che è stata già stabilita a inizio progetto, la scheda inerente è stata progettata con un’etichetta che avverte l’utente del calcolo già avvenuto (Figura 5.46). Per quanto riguarda invece la Tabella 5.26 e Tabella 5.27, entrambe fanno riferimento ad “aspetti sopra citati” che vengono inseriti nell’interfaccia (Figura 5.47 e Figura 5.48). Le schede sono quindi state progettate nel seguente modo:

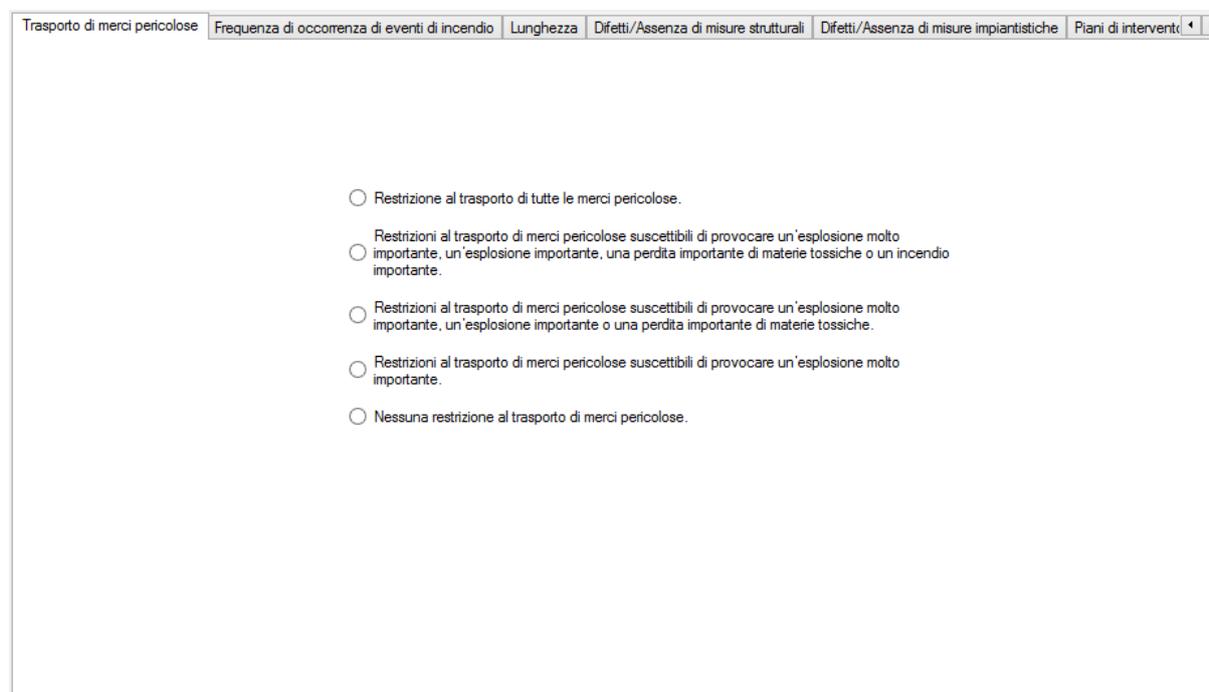


Figura 5.44: Interfaccia “Trasporto di merci pericolose”.

Trasporto di merci pericolose	Frequenza di occorrenza di eventi di incendio	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure strutturali	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Piani di intervento
-------------------------------	---	-----------	---------------------------------------	--	---------------------

Da 0 a 1 eventi di incendio per  $10^8$  veicoli per km.

Da 1 a 5 eventi di incendio per  $10^8$  veicoli per km.

Da 5 a 10 eventi di incendio per  $10^8$  veicoli per km.

Da 10 a 30 eventi di incendio per  $10^8$  veicoli per km.

Più di 30 eventi di incendio per  $10^8$  veicoli per km.

Figura 5.45: Interfaccia "Frequenza di occorrenza di eventi di incendio".

Trasporto di merci pericolose	Frequenza di occorrenza di eventi di incendio	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure strutturali	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Piani di intervento
-------------------------------	---	-----------	---------------------------------------	--	---------------------

**PARAMETRO GIÀ CALCOLATO AUTONOMAMENTE. PROCEDERE ALLA PROSSIMA SCHEDA**

Figura 5.46: Interfaccia "Lunghezza".

Trasporto di merci pericolose	Frequenza di occorrenza di eventi di incendio	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure strutturali	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Piani di interventi
-------------------------------	---	-----------	---------------------------------------	--	---------------------

L'analisi dovrà tenere conto di: dislivelli, larghezza corsia, presenza di uscite di emergenza, banchine pedonabili di emergenza, accesso per i servizi di pronto intervento, (es.: collegamenti trasversali carrabili tra fornici, varchi nello spartitraffico agli imbocchi), sistemi di drenaggio di liquidi infiammabili e tossici, resistenza al fuoco delle strutture, etc.  
È necessario valutarne anche lo stato attuale di funzionamento/manutenzione.

Tutti gli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.  
 Molti degli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.  
 La maggior parte degli aspetti sopra citati non sono valutati positivamente.

Figura 5.47: Interfaccia "Difetti/Assenza di misure strutturali".

Trasporto di merci pericolose	Frequenza di occorrenza di eventi di incendio	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure strutturali	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Piani di interventi
-------------------------------	---	-----------	---------------------------------------	--	---------------------

L'analisi dovrà tenere conto di: illuminazione, ventilazione meccanica, stazioni di emergenza, erogazione idrica, segnaletica stradale di emergenza, centro di controllo con impianti di sorveglianza con telecamere e impianto di rilevamento automatico di incidenti stradali e/o incendi, semafori prima degli ingressi e all'interno, dispositivi supplementari quali altoparlanti, pannelli a messaggio variabile e barriere, sistemi di comunicazione (impianti per ritrasmissioni radio ad uso dei servizi di pronto intervento, messaggi di emergenza via radio destinati agli utenti, altoparlanti nei rifugi e presso le uscite), alimentazione elettrica di emergenza, caratteristiche ignifughe di impianti e sistemi, etc.  
È necessario valutarne anche lo stato attuale di funzionamento/manutenzione.

Tutti gli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.  
 Molti degli aspetti sopra citati sono valutati positivamente.  
 La maggior parte degli aspetti sopra citati non sono valutati positivamente.

Figura 5.48: Interfaccia "Difetti/Assenza di misure impiantistiche".

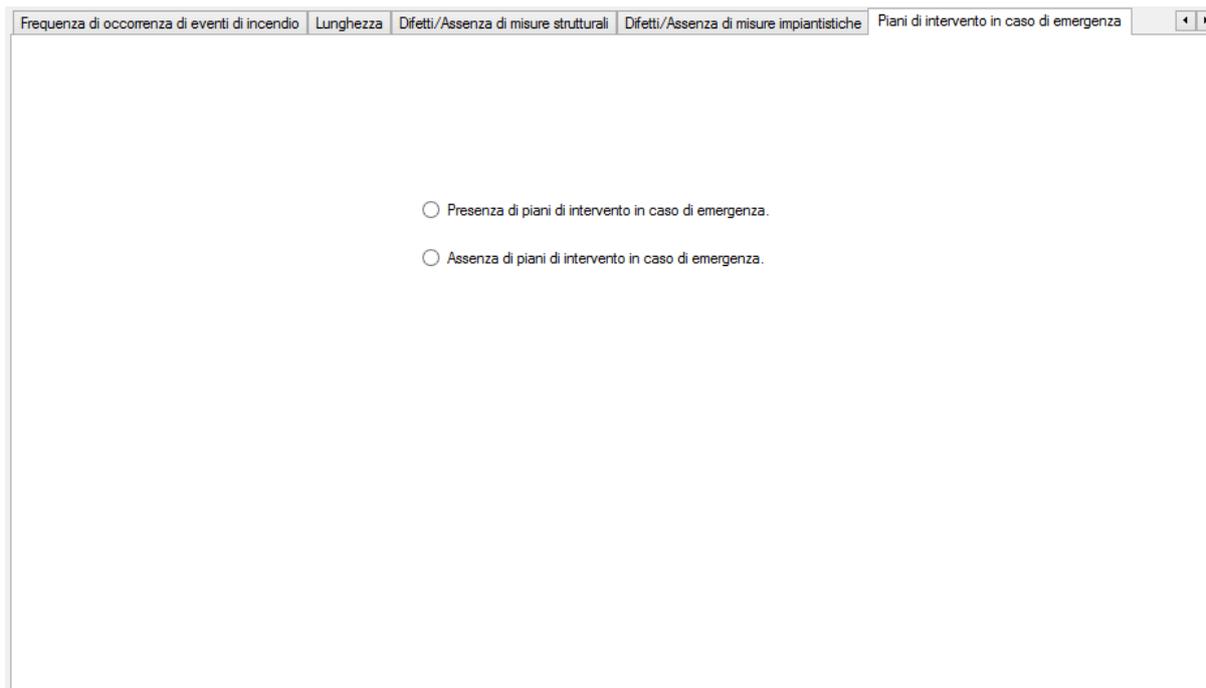


Figura 5.49: Interfaccia "Piani di intervento in caso di emergenza".

Una volta completata la compilazione di ciascun parametro in riferimento all'intera galleria, il pulsante CdA Geometrica> viene abilitato e si procede verso l'ultima classe di attenzione.

## 5.7 Finestra n.6: CdA Geometrica

La finestra inerente alla classe di attenzione geometrica si presenta come mostrato in Figura 5.50 (si consideri sempre l'ipotesi di valutare solo 100 m di galleria).

Figura 5.50: Schermata iniziale della CdA Geometrica coincidente con l'interfaccia del parametro "Difetta di altezza libera".

La finestra è dotata della solita *TabControl* contenente i parametri, del pulsante Salva e dei pulsanti <CdA Incendio (per tornare alla finestra precedente) e Risultato Excel di cui si parlerà in seguito. La classe di attenzione geometrica viene definita tramite soli 2 parametri (Tabella 4.10) valutati per ciascun concio di ispezione. Per tale motivo le interfacce dei parametri saranno dinamiche presentando le etichette relative al concio in esame. La valutazione dei parametri segue quanto descritto nelle seguenti tabelle:

Tabella 5.29: Difetti di altezza libera (gabarit) – punteggio variabile tra 0 e 8 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Altezza libera maggiore di 4.70 m.
2	Altezza libera compresa tra 4.50 m e 4.70 m.
4	Altezza libera compresa tra 4.30 m e 4.50 m.
6	Altezza libera compresa tra 4.00 m e 4.30 m.
8	Altezza libera minore di 4.00 m.

Tabella 5.30: Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti – punteggio variabile tra 0 e 2 (Barla 2021).

Punteggio	Descrizione
0	Presenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.
2	Assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.

Dalla Tabella 5.29 si evince che il parametro *difetti di altezza libera (gabarit)* si determina in modo quantitativo in quanto funzione dell'altezza libera, per cui si è stabilito di progettare l'interfaccia tramite l'uso della casella di testo (Figura 5.51). Quest'ultima è programmata come quelle precedenti in modo tale da accettare solo dati inseriti correttamente.

Nella Tabella 5.30 si osserva invece che il parametro *assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti* è qualitativo per cui l'interfaccia è stata costruita tramite *radiobutton* (Figura 5.52).

Difetti di altezza libera (gabarit) Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti

**Altezza libera [m]**

<b>Concio 1</b>	<input type="text"/>
<b>Concio 2</b>	<input type="text"/>
<b>Concio 3</b>	<input type="text"/>
<b>Concio 4</b>	<input type="text"/>
<b>Concio 5</b>	<input type="text"/>

Figura 5.51: Interfaccia "Difetti di altezza libera (gabarit)".

Difetti di altezza libera (gabarit) Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti

<b>Concio 1</b>	<input type="radio"/> Presenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti. <input type="radio"/> Assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.
<b>Concio 2</b>	<input type="radio"/> Presenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti. <input type="radio"/> Assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.
<b>Concio 3</b>	<input type="radio"/> Presenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti. <input type="radio"/> Assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.
<b>Concio 4</b>	<input type="radio"/> Presenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti. <input type="radio"/> Assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.
	<input type="radio"/> Presenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti.

Figura 5.52: Interfaccia "Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti".

Come fatto in precedenza per la classe di attenzione strutturale e geotecnica, anche in questo caso le etichette indicanti il concio di riferimento diventano verdi una volta inserito il dato correttamente.

Al termine della compilazione di tutti i campi richiesti, il pulsante Risultato Excel viene abilitato.

## 5.8 Output Excel

La programmazione Visual Basic tramite la libreria denominata `Microsoft.Office.Interop` consente di generare un file excel impostato direttamente da codice. Sfruttando tale qualità, si è deciso di programmare l'eseguibile in modo tale che una volta premuto il pulsante Risultato Excel, il programma restituisca un file excel già impostato con tutti i dati elaborati delle diverse classi di attenzione. Inoltre insieme alla generazione del file in formato “.xlsx”, il pulsante è programmato in modo tale che faccia comparire automaticamente la finestra di salvataggio per consentire all'utente di salvare il file immediatamente.

La scelta di restituire un file excel come output si è basata sulla semplicità e sul comune utilizzo di Microsoft Excel: si è voluta dare la possibilità, una volta ottenuti i risultati, di poterli gestire facilmente con un programma che fosse di uso molto comune in ambito ingegneristico.

Per entrare nel merito del file generato, al fine di mostrare valori dei parametri verosimili, si procede con il processo di validazione del programma tramite lo studio delle gallerie Vallesaccarda, Scampitella e Castello.

## 5.9 Validazione programma: Vallesaccarda DX

In una fase di *debug* per verificare eventuali criticità del programma, si è deciso di validare quest'ultimo tramite diverse gallerie a cui è stato già applicato il metodo SMART manualmente. In particolare si è scelta la galleria Vallesaccarda canna destra – direzione Candela situata lungo l'autostrada A16 (Figura 5.53). Si riportano i passaggi per la definizione dei parametri di ciascuna classe di attenzione.



Figura 5.53: Estratto di planimetria con la posizione della galleria Vallesaccarda (Google Earth, 2021)

### 5.9.1 Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

I dati relativi alle *sollecitazioni sul rivestimento* sono stati ottenuti dalle prove di martinetto piatto (Socotec 2020a) e dal report conclusivo della galleria (Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a e SWS Engineering S.p.a. 2020a), i quali hanno fornito i carichi massimi e minimi per ogni concio ispettivo, nonché la resistenza media del rivestimento pari a 15.85 MPa. Per cui le caselle di testo sono state compilate con i dati reperiti.

Per quanto concerne l'*incertezza del modello geologico/geotecnico*, si è fatto sempre riferimento al report conclusivo della galleria (Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a e SWS Engineering S.p.a. 2020a), il quale evidenzia che la galleria Vallesaccarda attraversa la formazione della “Baronia” costituita da una successione sedimentaria completa, dove spicca una variabilità dei caratteri litologici e sedimentologici nella porzione basale. Le informazioni relative al contesto geologico e geotecnico sono scarse in quanto non ne è stata svolta la caratterizzazione, per cui sono disponibili solo dati da carte geologiche.

Per i parametri inerenti alla *qualità* e alla *peculiarità dell’ammasso roccioso/del terreno* sono stati inseriti dei valori di punteggio all’interno delle caselle di testo, che tengono conto della presenza di terreno conglomeratico-sabbioso. Nel dettaglio per il parametro *qualità dell’ammasso roccioso/del terreno* è stato assegnato un punteggio pari a 1.5 per ciascun concio

data la natura sabbiosa del terreno. *Peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno* non sono presenti per cui è stato assegnato un punteggio pari a 0 per ciascun concio.

La presenza di sotto-spessore nel rivestimento è stata valutata con l'ausilio dei risultati ottenuti tramite videoendoscopie (Socotec 2020b) e indagini georadar (Socotec 2020c). In particolare si è osservato che la maggior parte dei conci presenta una percentuale di vuoto compresa tra il 10% e il 30%. Solo i conci 6 e 13 eccedono tale intervallo superando il 30%, mentre i conci 3, 7, 8 e 10 hanno una percentuale di sotto-spessore inferiore al 10%. corretta scelta

Il *livello di difettosità* è stato stabilito inserendo all'interno del programma le percentuali areali relative a ciascuna classe di difetto per ogni concio. Tali dati sono stati ottenuti dalla relazione contenente il resoconto percentuale difetti per codice IQOA (Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a. e SWS Engineering S.p.a. 2020b).

Per determinare la *rapidità di evoluzione del degrado* è stato necessario inserire l'età della galleria ottenibile a partire dall'anno di realizzazione riconducibile al 1965 (Barla, Progetto strutturale di messa in sicurezza della galleria naturale Vallesaccarda canna destra direzione Candela dell'autostrada A16 nella tratta Napoli-Candela 2020).

Per quanto riguarda il parametro inerente alla *tipologia di galleria*, tramite report conclusivo si è osservato che la galleria presenta per ciascun concio una sezione con arco rovescio con rivestimento in calcestruzzo, mentre il diametro della sezione è pari a 10 m (Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a e SWS Engineering S.p.a. 2020a). Inoltre si evince che vi è una totale assenza dello strato di impermeabilizzazione che determina la scelta più gravosa per quanto concerne il parametro *presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione*.

La presenza di centinature dichiarata all'interno del report conclusivo (Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a e SWS Engineering S.p.a. 2020a) ha portato alla selezione della seconda opzione riguardante il parametro complessità costruttiva, stabilendo un punteggio pari a 1.

Infine l'*influenza dell'acqua* viene determinata inserendo le percentuali per ogni concio, ricavate dalle indagini approfondite (Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a. e SWS Engineering S.p.a. 2020d). Si osserva che i difetti legati all'influenza dell'acqua sono minimi se non inesistenti, per cui il punteggio associato sarà pari a 0.

### 5.9.2 Classe di Attenzione geologica

La definizione di tale classe di attenzione è stata attuata tramite l'ausilio dell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI), il quale ha evidenziato che il versante a cui la galleria in esame appartiene non è interessato da instabilità (Figura 5.54), per cui il parametro *magnitudo dell'instabilità di versante* assume il punteggio minimo.

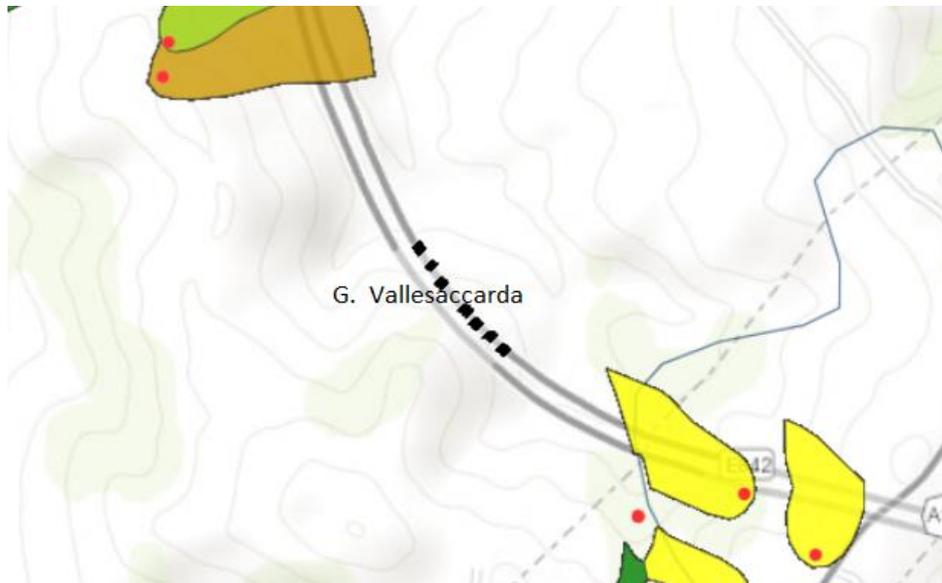


Figura 5.54: Estratto della cartografia online (IFFI, 2021).

In generale, data la situazione geologica in cui verte la galleria Vallesaccarda, nel programma sono state selezionate tutte le opzioni a cui corrisponde il punteggio minimo ad eccezione del parametro *sistemi di monitoraggio*, il quale assume un valore pari a 0 data l'assenza di strumentazioni di monitoraggio. In caso contrario, il punteggio associato avrebbe assunto un valore negativo per ridurre la CdA geologica.

### 5.9.3 Classe di Attenzione sismica

Il parametro relativo alle *caratteristiche del sisma* è stato determinato tramite la mappa interattiva fornita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) la quale ha consentito di individuare la PGA dell'area interessata. In particolare verificando che la PGA del sito è pari a 0.2359g (50° percentile e tempo di ritorno di 475 anni), si è potuto selezionare nel programma l'opzione corrispondente.

Per l'inclusione nelle zone sismogenetiche si è sempre fatto riferimento all'INGV il quale fornisce una mappa che evidenzia tutte le zone a rischio. Dalla Figura 5.55 si evidenzia che la galleria Vallesaccarda si trova a meno di 10 km dalla zona sismogenetica più vicina.

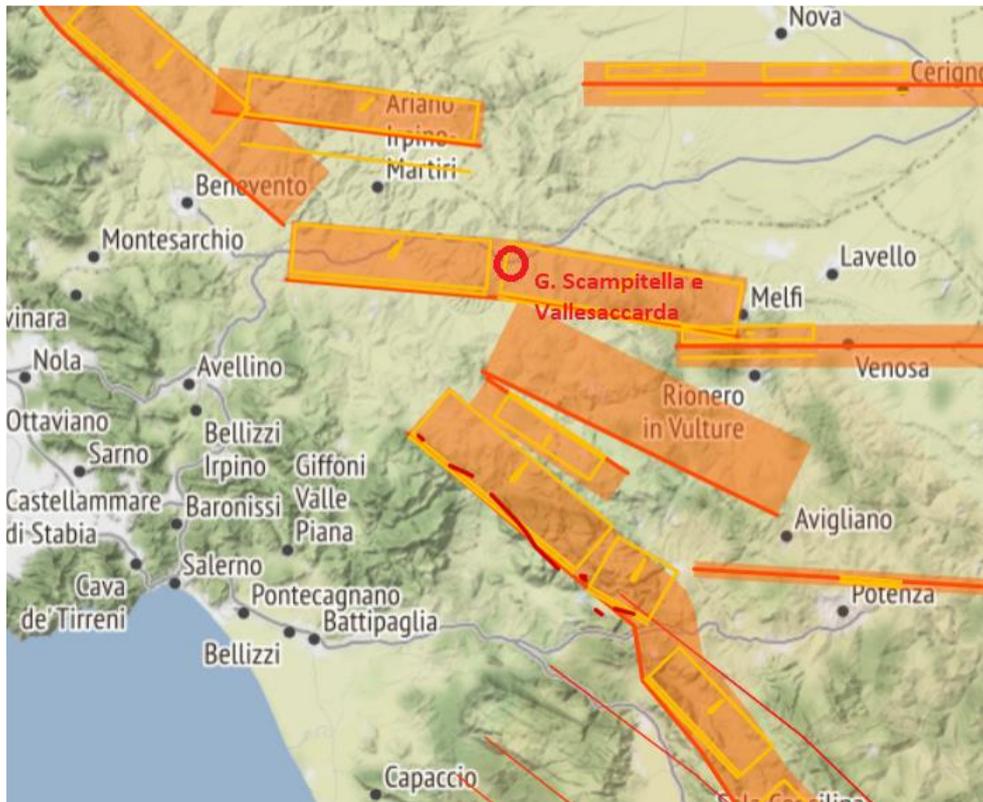


Figura 5.55: Inclusione della galleria Vallesaccarda nelle zone sismogenetiche (INGV, 2021).

Per quanto concerne la *presenza di singole frane capaci/passaggi formazionali* si è considerato la presenza di una faglia che attraversa la galleria.

Per il parametro riguardante la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica* invece, data l'assenza di eventi franosi, si è considerata l'opzione meno gravosa.

Successivamente è stato necessario determinare la categoria di terreno in cui è inserita la galleria Vallesaccarda per determinare il parametro *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno*. Seguendo la classificazione della NTC 2018, la categoria è la C.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Figura 5.56: Categorie di sottosuolo (NTC2018, 2018).

Per determinare la *profondità dell'asse della galleria*, ci si è avvalsi di *Google Earth* che ha consentito di leggere la profondità della galleria tramite uno studio altimetrico. Si è evidenziata per l'intera galleria una profondità media di 20 m.

Il parametro riguardante *geometria della galleria e caratteristiche delle armature* è stato compilato nel programma considerando una geometria con arco rovescio e l'assenza di armature.

Data la progettazione del rivestimento tramite l'adozione di norme di progettazione standard, l'ultima voce da compilare riguardante *norme di progettazione del rivestimento* è stata valutata con l'opzione più gravosa.

#### 5.9.4 Classe di Attenzione incendio

Facendo riferimento alla Tabella 4.7 si osserva che non è stato necessario compilare alcun parametro inerente a tale classe, data la lunghezza della galleria inferiore a 500 m. Per tale motivo, una volta visionata la schermata mostrata in Figura 5.41, si è potuto procedere direttamente con la compilazione dell'ultima classe di attenzione.

### 5.9.5 Classe di Attenzione geometrica

Le informazioni necessarie alla compilazione degli unici due parametri caratterizzanti tale classe di attenzione (*difetti di altezza libera e assenza di profilo ridirettivo*) sono state fornite da ASPI. A questo punto si può analizzare nel dettaglio l'output di excel fornito dal programma.

### 5.9.6 Risultato Excel

Il programma ha generato un file excel costituito da 6 fogli di calcolo (più uno vuoto di default denominato "Foglio1") indicanti le 5 classi di attenzione (strutturale e geotecnica, geologica, sismica, incendio e geometrica) e la classe di attenzione dell'intera galleria.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
CONCIO														
Carico sul rivestimento	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Incertezza modello geol-geot	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Qualità terreno	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Peculiarità terreno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sottospessore rivestimento	1	1	0	1	1	2	0	0	1	0	1	1	2	1
Difetti IQDA	8.28	20	20	17.46	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19.5
Rapidità evoluzione degrado	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Tipologia di galleria	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sistema impermeabilizzazione	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Complessità costruttiva	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Influenza dell'acqua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pericolosità	6.5	6.5	5.5	6.5	6.5	7.5	5.5	5.5	6.5	5.5	6.5	6.5	7.5	11.5
Vulnerabilità	12.28	26	26	23.46	26	26	26	26	26	26	26	26	26	25.5
Pericolosità + Vulnerabilità	18.78	32.5	31.5	29.96	32.5	33.5	31.5	31.5	32.5	31.5	32.5	32.5	33.5	37
Classe di attenzione (P+V)	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta	Medio-alta
Rango	1	7	3	2	7	12	3	3	7	3	7	7	12	14
Rango IS&G	18.78	227.5	94.5	59.92	227.5	402	94.5	94.5	227.5	94.5	227.5	227.5	402	518
ISTR&GEO	33.13863636													
CdASTR&GEO	Medio-alta													

Figura 5.57: Schermata file di output excel.

Andando ad analizzare ciascun foglio e quindi ciascuna classe di attenzione, si osserva in merito a quella strutturale e geotecnica che il programma restituisce la seguente tabella.

Tabella 5.31: Tabella dei punteggi della classe di attenzione strutturale e geotecnica.

CONCIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Carico sul rivestimento	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	8
Incertezza modello geol-geot	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Qualità terreno	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Peculiarità terreno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sottospessore rivestimento	1	1	0	1	1	2	0	0	1	0	1	1	2	1
Difetti IQOA	8.28	20	20	17.46	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19.5
Rapidità evoluzione degrado	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Tipologia di galleria	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sistema impermeabilizzazione	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Complessità costruttiva	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Influenza dell'acqua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pericolosità	6.5	6.5	5.5	6.5	6.5	7.5	5.5	5.5	6.5	5.5	6.5	6.5	7.5	11.5
Vulnerabilità	12.28	26	26	23.46	26	26	26	26	26	26	26	26	26	25.5
Pericolosità + Vulnerabilità	18.78	32.5	31.5	29.96	32.5	33.5	31.5	31.5	32.5	31.5	32.5	32.5	33.5	37
Classe di attenzione (P+V)	Medio-alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Rango	1	7	3	2	7	12	3	3	7	3	7	7	12	14
Rango*IS&G	18.78	227.5	94.5	59.92	227.5	402	94.5	94.5	227.5	94.5	227.5	227.5	402	518
ISTR&GEO	33.14													
CdA STR&GEO	Alta													

La Tabella 5.31 presenta alla prima riga il concio di riferimento: data la lunghezza della galleria Vallesaccarda pari a 278 m, i conci ispettivi sono 14, tuttavia il foglio può generare in modo dinamico tante colonne quanti sono i numeri di conci della galleria in esame. Nelle successive righe invece vengono indicati i punteggi elaborati dal programma per i relativi parametri inerenti alla classe strutturale e geotecnica. Dopo aver sommato i punteggi ottenuti per i vari parametri raggruppandoli nelle categorie di “pericolosità” e “vulnerabilità”, il programma fornisce la classe di attenzione strutturale e geotecnica per i singoli conci inserendo una tra le diverse opzioni disponibili: bassa, medio-bassa, medio-alta e alta. L’output è stato programmato in modo tale che la cella indicante la classe di attenzione, al momento della generazione del foglio, segua la classificazione indicata nel precedente capitolo in Tabella 4.2. Infine sfruttando la funzione RANGO.UG di excel e programmandola da codice, è stato possibile determinare il punteggio della classe strutturale e geotecnica per l’intera galleria e la valutazione di rischio associato seguendo sempre la Tabella 4.2. In questo caso la classe di attenzione strutturale e geotecnica è “Alta”.

Oltre ai risultati ottenuti in Tabella 5.31, il foglio inerente alla classe di attenzione strutturale e geotecnica contiene anche un grafico a colonne avente sull’asse delle ascisse i conci della

galleria e su quello delle ordinate il punteggio totale associato alla classe di attenzione in esame (Figura 5.58). Tale strumento è utile per individuare quale zona della galleria presenta una priorità di intervento maggiore.

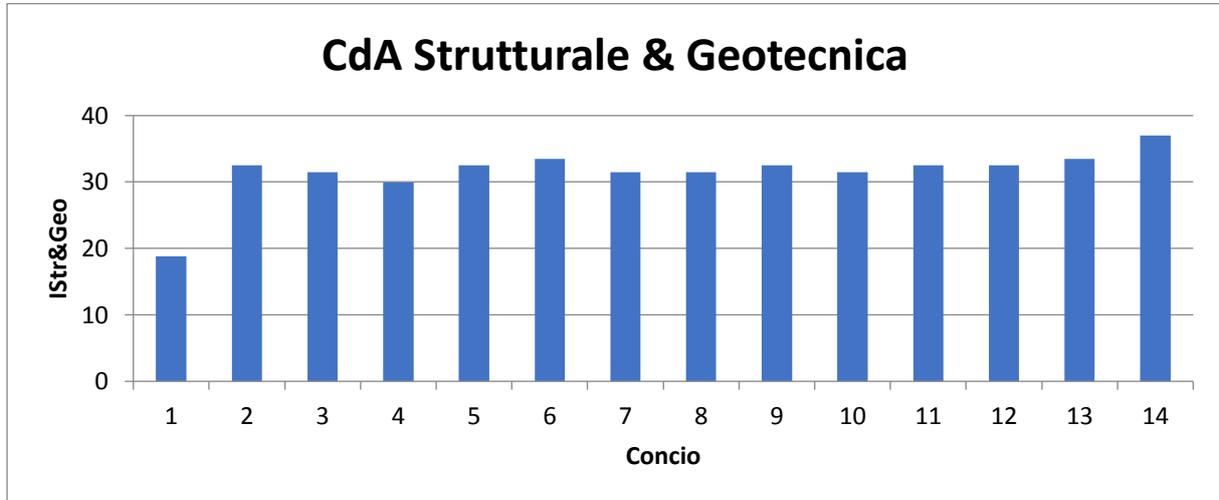


Figura 5.58: Andamento punteggio della CdA strutturale e geotecnica lungo la galleria.

Per quanto riguarda i fogli inerenti alle classi di attenzione geologica, sismica e incendio, ciascuno presenterà la stessa tipologia di tabella in riferimento all'intera galleria (Tabella 5.32, Tabella 5.33 e Tabella 5.34). Ovviamente ciascuna tabella si riferisce ai parametri della corrispettiva classe di attenzione.

Tabella 5.32: Tabella dei punteggi della classe di attenzione geologica.

<b>CONCIO</b>	<b>ALL</b>
Magnitudo	0
Stato di attività	0
Sistemi di monitoraggio	0
Volumi/estensione interferenza	0
Pericolosità	0
Vulnerabilità	0
Igeol	0
<b>CdA Geologica</b>	<b>Bassa</b>

Tabella 5.33: Tabella dei punteggi della classe di attenzione sismica.

CONCIO	ALL
Caratteristiche del sisma	3
Zone sismogenetiche	1.5
Faglie capaci/passaggi formazionali	3
Dissesti attivabili	0
Condizioni geologiche A.R./ Terreno	0.5
Profondità asse galleria	1
Geometria e armature	0.5
Resistenza rivestimento e stato conservazione	0.75
Norme progettazione	1
Pericolosità	3
Vulnerabilità	8.25
Isism	11.25
CdA Sismica	Alta

Tabella 5.34: Tabella dei punteggi della classe di attenzione incendio.

CONCIO	ALL
Trasporto merci pericolose	0
Incidentalità caratteristica	0
Lunghezza	0
Misure impiantistiche	0
Misure strutturali	0
Piani di intervento in caso di emergenza	0
Pericolosità	0
Vulnerabilità	0
linc	0
CdA Incendio	Bassa

Nella Tabella 5.34 si osserva che i punteggi relativi ai diversi parametri sono tutti pari a 0, in quanto, avendo considerato una galleria di lunghezza inferiore a 500 m, il punteggio generale è pari 0. In generale si deduce che la classe di attenzione sismica, riferendosi alla Tabella 4.6, è “Alta”, mentre quella geologica è “Bassa” come quella incendio.

Infine la classe di attenzione geometrica viene riportata nel foglio corrispettivo dotato di una tabella avente i punteggi associati ai relativi parametri per ciascun concio. Si ricorda infatti che la classe di attenzione geometrica viene definita inizialmente per ciascun concio come quella

strutturale e geotecnica. Per tale motivo la Tabella 5.35 presenta una prima riga con il numero di conci che si adatta alla lunghezza della galleria (in questo caso 14), mentre nelle successive righe sono presenti i punteggi dei parametri e della CdA per l'intera galleria.

Tabella 5.35: Tabella dei punteggi della classe di attenzione geometrica.

CONCIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Difetti di altezza libera	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Profilo ridirettivo	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Pericolosità	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Vulnerabilità	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Pericolosità + Vulnerabilità	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Classe di attenzione (P+V)	Medio-alta													
Igeom	4													
CdA Geometrica	Medio-alta													

Inoltre viene fornito anche un grafico avente sull'asse delle ascisse i conci della galleria e su quello delle ordinate il punteggio totale associato alla classe di attenzione geometrica (Figura 5.59). Si può osservare che l'andamento è costante in quanto già dalla Tabella 5.35 si evince un punteggio uguale per tutti i conci della galleria.

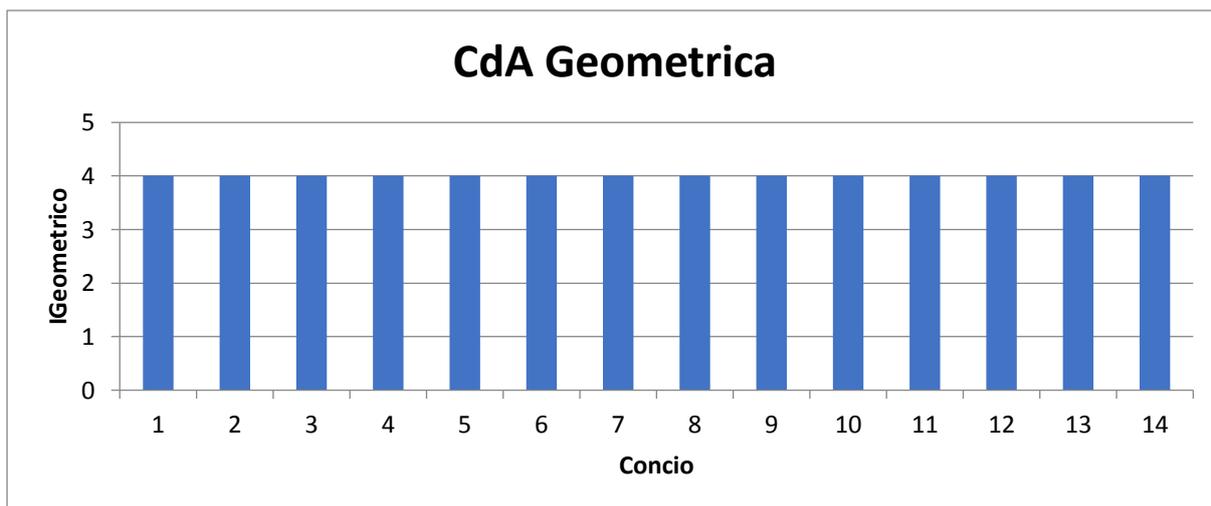


Figura 5.59: Andamento punteggio della CdA geometrica lungo la galleria.

L'ultimo foglio del file riguarda la CdA dell'intera galleria, calcolata con la modalità definita in Figura 4.2. All'interno del foglio vi è la Tabella 5.36, la quale fornisce un riassunto dei punteggi totali di ciascuna classe di attenzione e infine la loro sommatoria per determinare la CdA della galleria.

Tabella 5.36: CdA dell'intera galleria ottenuta da programma.

<b>I strutturale&amp;geotecnico</b>	33.1
<b>I geologico</b>	0
<b>I sismico</b>	11.3
<b>I incendio</b>	0
<b>I geometrico</b>	4
<b>I galleria</b>	48.4
<b>CdA Galleria</b>	<b>Medio-alta</b>

In questo caso si osserva che la valutazione di rischio viene definita “Medio-alta”. Tale risultato era prevedibile dato il punteggio elevato delle diverse classi di attenzione ad eccezione di quella geologica e incendio. Inoltre il programma risulta essere validato in quanto i valori ottenuti, riportati in Tabella 5.36, sono i medesimi di quelli ottenuti tramite l’applicazione manuale del metodo SMART (Tabella 5.37).

Tabella 5.37: CdA dell'intera galleria ottenuta manualmente.

<b>I<sub>STR&amp;GEO</sub></b>	33.1
<b>I<sub>GEOLOG</sub></b>	0.0
<b>I<sub>SIS</sub></b>	11.3
<b>I<sub>INC</sub></b>	0.0
<b>I<sub>GEOG</sub></b>	4.0
<b>I<sub>GALLERIA</sub></b>	48.4
<b>CdA<sub>GALLERIA</sub></b>	<b>Medio-alta</b>

Per completezza del lavoro di validazione nel seguito si descrive l’applicazione dell’eseguibile sviluppato nel presente lavoro di tesi ad altre gallerie di lunghezza uguale o maggiore a 500 m, in modo da calcolare i singoli parametri della classe di attenzione incendio, che nel caso della galleria Vallesaccarda destra sono stati posti direttamente pari a 0.

## 5.10 Validazione programma: Scampitella DX

La galleria Scampitella è situata lungo l’autostrada A16 (Figura 5.60) in prossimità della galleria Vallesaccarda precedentemente studiata. In tale studio viene considerata la canna destra in direzione Canosa.



Figura 5.60: Estratto di planimetria con la posizione della galleria Scampitella (Google Earth, 2021).

Ai fini della validazione del programma, vengono riportati direttamente i risultati finali dell'applicazione. La lunghezza superiore ai 500 m (c.a.790 m) e quindi il calcolo dei parametri inerenti alla classe di attenzione incendio ha evidenziato alcune anomalie del programma, che hanno richiesto una revisione e riscrittura di determinate righe di codice. Ciononostante, il programma ha restituito i medesimi risultati finali dell'applicazione del metodo manuale come evidenziato tramite la Tabella 5.38 e Tabella 5.39.

Tabella 5.38: CdA dell'intera galleria ottenuta da programma.

<b>I strutturale&amp;geotecnico</b>	23.6
<b>I geologico</b>	3.5
<b>I sismico</b>	12.8
<b>I incendio</b>	6.5
<b>I geometrico</b>	4
<b>I galleria</b>	50.3
<b>CdA Galleria</b>	<b>Alta</b>

Tabella 5.39: CdA dell'intera galleria ottenuta manualmente.

$I_{STR\&GEO}$	23.6
$I_{GEOLOG}$	3.5
$I_{SIS}$	12.8
$I_{INC}$	6.5
$I_{GEO}$	4.0
$I_{GALLERIA}$	50.3
<b>CdA<sub>GALLERIA</sub></b>	<b>Alta</b>

## 5.11 Validazione programma: Castello DX

Infine il programma è stato applicato alla galleria Castello. Quest'ultima si colloca sull'autostrada A26 Genova – Gravellona Toce. È stata considerata la canna destra della galleria in direzione Gravellona Toce.

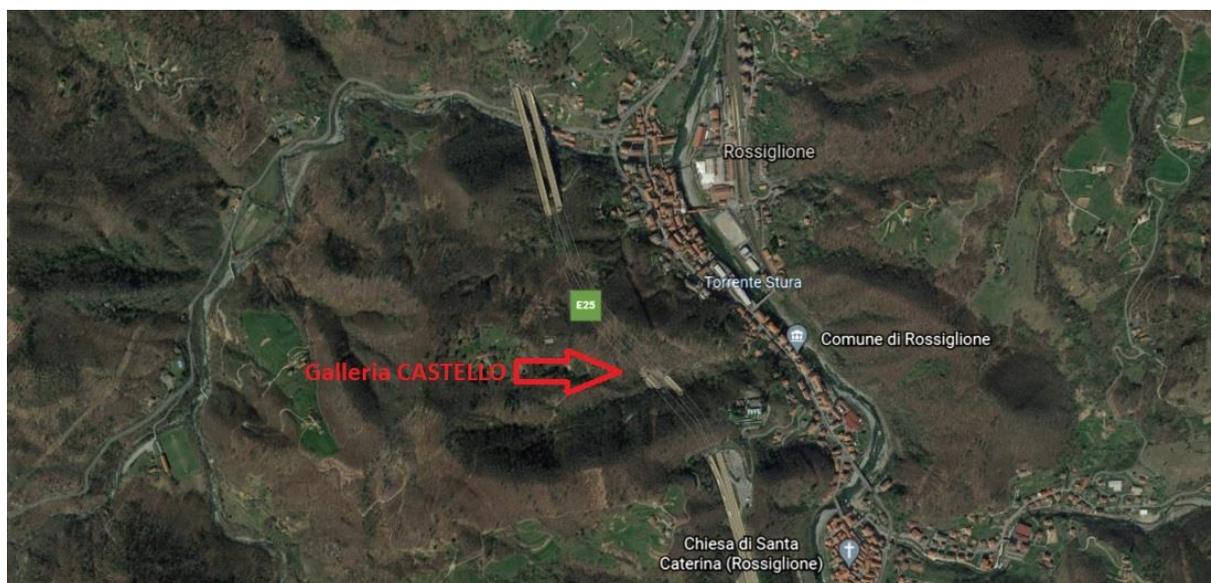


Figura 5.61: Estratto di planimetria con la posizione della galleria Castello (Google Earth, 2021).

Anche in questo caso non vengono riportati i ragionamenti che hanno condotto alla scelta dei dati da inserire all'interno del programma. Tuttavia è lecito evidenziare che la situazione limite verificatasi con tale galleria, la cui lunghezza è precisamente pari a 500 m, ha messo in risalto alcuni errori di codici che sono stati opportunamente corretti. Difatti i risultati finali sono i medesimi dell'applicazione manuale del metodo (Tabella 5.40 e Tabella 5.41).

Tabella 5.40: CdA dell'intera galleria ottenuta da programma.

<b>I strutturale&amp;geotecnico</b>	23.6
<b>I geologico</b>	3.5
<b>I sismico</b>	12.8
<b>I incendio</b>	6.5
<b>I geometrico</b>	4
<b>I galleria</b>	50.3
<b>CdA Galleria</b>	<b>Alta</b>

Tabella 5.41: CdA dell'intera galleria ottenuta manualmente.

<b>I<sub>STR&amp;GEO</sub></b>	21.4
<b>I<sub>GEO</sub></b>	0.0
<b>I<sub>SIS</sub></b>	5.3
<b>I<sub>INC</sub></b>	5.8
<b>I<sub>GEO</sub></b>	4.0
<b>I<sub>GALLERIA</sub></b>	36.4
<b>CdA<sub>GALLERIA</sub></b>	<b>Medio-alta</b>

Tale studio di validazione ha evidenziato una serie di errori che sono stati opportunamente corretti per rendere il programma sempre più affidabile e di facile utilizzo. Sicuramente in futuro sarà necessario svolgere ulteriori fasi di validazione e di sviluppo del programma, per rendere l'esperienza di utilizzo più semplice e conveniente possibile. Un esempio potrebbe essere la rimozione dell'inserimento manuale delle percentuali areali di difetto tramite un sistema più automatico, che consentirebbe all'utente di risparmiare una notevole quantità di tempo.

# 6 Legge di Degrado

## 6.1 Introduzione

In merito alla tematica della manutenzione ampiamente discussa nei capitoli precedenti, ASPI in collaborazione con il Politecnico di Torino ha avviato uno studio per impostare e valutare le possibili strategie di intervento per la manutenzione delle gallerie. Difatti l'impostazione dell'attività di *assessment* delle gallerie è costituita da una sequenza di attività, partendo dall'ispezione approfondita della galleria, passando per la definizione della strategia di intervento e concludendosi con la condivisione della scelta finale con il Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, MIT.

Come schematizzato nella Tabella 6.1, nell'attività di *assessment* vi è una fase di valutazione di convenienza tra SID (interventi definitivi) e MES (interventi di messa in sicurezza e quindi provvisori).

Tabella 6.1: Schema attività di assessment della galleria (ASPI, 2021).

	Assessment	Durata
0	Ispezione approfondita galleria	
1	Indagini integrative	15 gg
2	Progettazione interventi di messa in sicurezza (MES)	30 gg
3	Valutazione di convenienza MES vs SID	3 gg
	<i>NB: In fase di avvio studio in collaborazione con Polito per criteri ed impostazione della valutazione</i>	
	- Individuazione puntuale conci (o porzioni di galleria) dove intervenire in via definitiva	
	- Suddivisione in conci primari (stima a T=0) e secondari (stima a T=50 anni)	
4	Condivisione scelta finale su strategia di intervento con MIT	1 gg

Naturalmente la valutazione di convenienza è basata su aspetti non solo strutturali ma anche economici. Per quel che riguarda il MES, l'analisi dei costi si basa sulla somma di tre contributi inerenti rispettivamente al costo iniziale, di manutenzione e della sorveglianza. Il costo di manutenzione corrisponde al costo del rifacimento ogni 3 anni della percentuale di intervento

che si è nel frattempo degradata. Per quanto concerne i SID le tipologie di contributi economici risultano i medesimi ma stabiliti con differenti modalità. Difatti i costi di manutenzione e sorveglianza debbono essere sostenuti solo dopo 10 anni dall'esecuzione dell'intervento.

In merito a tale analisi di costi e benefici risulta di notevole interesse sviluppare per via sperimentale una legge di degrado delle gallerie.

## 6.2 Degrado delle gallerie

L'approfondimento sulla legge di degrado delle gallerie è avvenuto con una prima fase bibliografica che non ha fornito risultati esaustivi. Le informazioni reperibili in letteratura sono scarse e riguardano tipologie di degrado specifiche. Tale problematica ha spinto all'individuazione di una legge di degrado empirica basata sul concetto di *livello di difettosità* così come definito nel metodo SMART. Le classi di difetto legate alla classificazione IQOA (Figura 3.4) sono relative a diverse tipologie di deterioramento delle gallerie, per cui è certamente il parametro che meglio può rappresentare il degrado generale della galleria. In riferimento alle operazioni svolte per determinare il punteggio di difettosità per ogni classe, si è stabilito di adottare il medesimo approccio basandosi però non sui punteggi ma su delle percentuali areali corrette con opportuni coefficienti.

Determinata la percentuale totale di difetto per diverse gallerie, si è proceduto con la generazione di un diagramma avente sull'asse dell'ascisse l'età della galleria definita in anni, mentre sull'asse delle ordinate vi sono le percentuali di difetto relative a ciascuna galleria in esame.

In particolare sono state considerate diverse gallerie le cui indagini approfondite erano disponibili: Castello DX, Manfreida DX, Scampitella DX, Vallesaccarda DX, Solagne DX, FontedaCapo DX e Pianacce DX. La disponibilità di dati di 7 gallerie ha fornito risultati attendibili.

In dettaglio per ogni concio appartenente alla galleria in esame sono state calcolate le percentuali areali moltiplicate per opportuni coefficienti basati sullo studio della metodologia SMART:

$$P_{2E\%} = A_{2E\%} * 0.45 \quad (6.1)$$

$$P_{3\%} = A_{3\%} * 0.6$$

$$P_{3U\%} = A_{3U\%} * 1$$

$$P_{S\%} = A_{S\%} * 1$$

Una volta determinate le percentuali di ogni classe di difetto tramite (6.1), è stata calcolata la loro somma per ottenere la percentuale areale totale per ogni concio.

$$P_{\%} = P_{2E\%} + P_{3\%} + P_{3U\%} + P_{S\%} \quad (6.2)$$

In seguito all'ottenimento della percentuale areale totale di ogni concio ( $P_{\%}$ ), bisogna ricondurla all'intera galleria in esame ( $P_{\%,GAL}$ ). Sono state stabilite due modalità di prosecuzione dello studio:

- 1) *RANGO*: sfruttando il rango delle diverse percentuali di ogni concio, è stata applicata la seguente equazione:

$$P_{\%,GAL} = \frac{\sum_{i=1}^n [P_{\%,i} \cdot Rango(P_{\%,i})]}{\sum_{i=1}^n Rango(P_{\%,i})} \quad (6.3)$$

- 2) *MAX*: è stato individuato direttamente il massimo valore tra i diversi conci e applicato all'intera galleria.

$$P_{\%,GAL} = \max (P_{\%,1}, P_{\%,2}, \dots, P_{\%,n}) \quad (6.4)$$

Una volta determinato  $P_{\%,GAL}$  con le due modalità, si è proceduto con la determinazione dei grafici per individuare una legge di degrado. Visioniamo nel dettaglio i risultati ottenuti tramite le due diverse modalità prima citate.

### 6.2.1 Modalità: *RANGO*

Tale modalità ha fornito i risultati esposti in Tabella 6.2.

Tabella 6.2: Dati legge di degrado determinati tramite il *RANGO*.

Galleria	Età [anni]	$P_{\%,GAL}$
Castello DX	50	13.2%
Manfreida DX	50	14.7%

Scampitella DX	60	29.6%
Vallesaccarda DX	56	58.8%
Solagne DX	48	10.9%
Fonte da Capo DX	48	20.3%
Pianacce DX	48	16.5%

L'età delle gallerie è stata reperita dalla documentazione *As Built* di ciascuna. Calcolati i dati, è stato generato il grafico per la legge di degrado rappresentato in Figura 6.1.

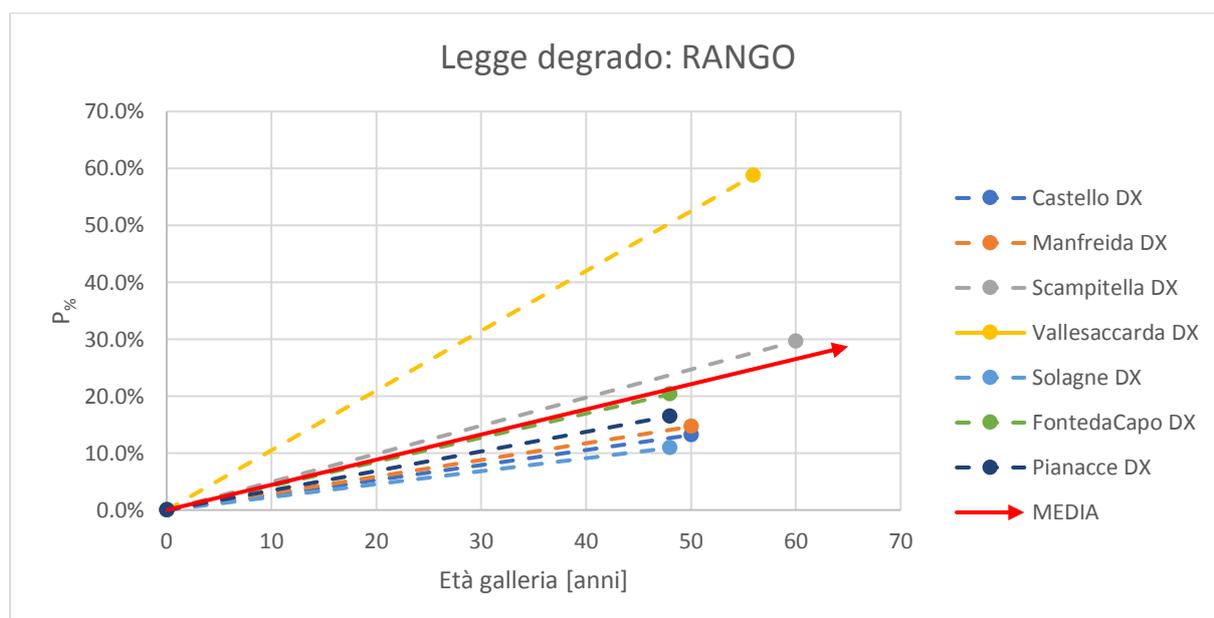


Figura 6.1 : Legge di degrado individuata con il RANGO.

Ogni galleria è stata rappresentata tramite due punti: origine e combinazione di percentuale di difetto ed età. Si osserva che tutte le gallerie hanno un andamento del degrado simile con valori di percentuale di difetto che oscillano tra il 10% e il 30% (valori riferiti all'anno 2020). Solo la galleria Vallesaccarda DX presenta un valore nettamente più elevato rispetto all'intervallo definito in precedenza. Ai fini dell'individuazione di una legge di degrado è stata riportata un'altra retta in Figura 6.1 denominata "MEDIA". Quest'ultima è stata rappresentata tramite il calcolo di una pendenza media delle diverse rette rappresentanti le gallerie.

Tabella 6.3: Pendenze delle rette delle gallerie ottenute tramite il RANGO.

Pendenza rette	
Castello DX	0.0026
Manfreida DX	0.0029
Scampitella DX	0.0049

Vallesaccarda DX	0.0105
Solagne DX	0.0023
Fonte da Capo DX	0.0042
Pianacce DX	0.0034
<b>MEDIA</b>	<b>0.0044</b>

L'applicazione di tale pendenza definita in Tabella 6.3 ha consentito l'individuazione di una possibile legge di degrado caratterizzata da un degrado annuo dello 0.4%.

### 6.2.2 Modalità: MAX

In questo caso, utilizzando il massimo, sono stati ottenuti i risultati mostrati in Tabella 6.4.

Tabella 6.4: Dati legge di degrado determinati tramite il MAX.

<b>Galleria</b>	<b>Età [anni]</b>	<b>P<sub>%,GAL</sub></b>
Castello DX	50	21.8%
Manfreida DX	50	24.9%
Scampitella DX	60	82.2%
Vallesaccarda DX	56	100.3%
Solagne DX	48	30.8%
Fonte da Capo DX	48	27.5%
Pianacce DX	48	35.1%

Dalla Tabella 6.4 si osserva che i valori di P<sub>%,GAL</sub> sono più elevati rispetto a quelli ottenuti tramite il *RANGO*. È stato quindi determinato il grafico rappresentato in Figura 6.2.

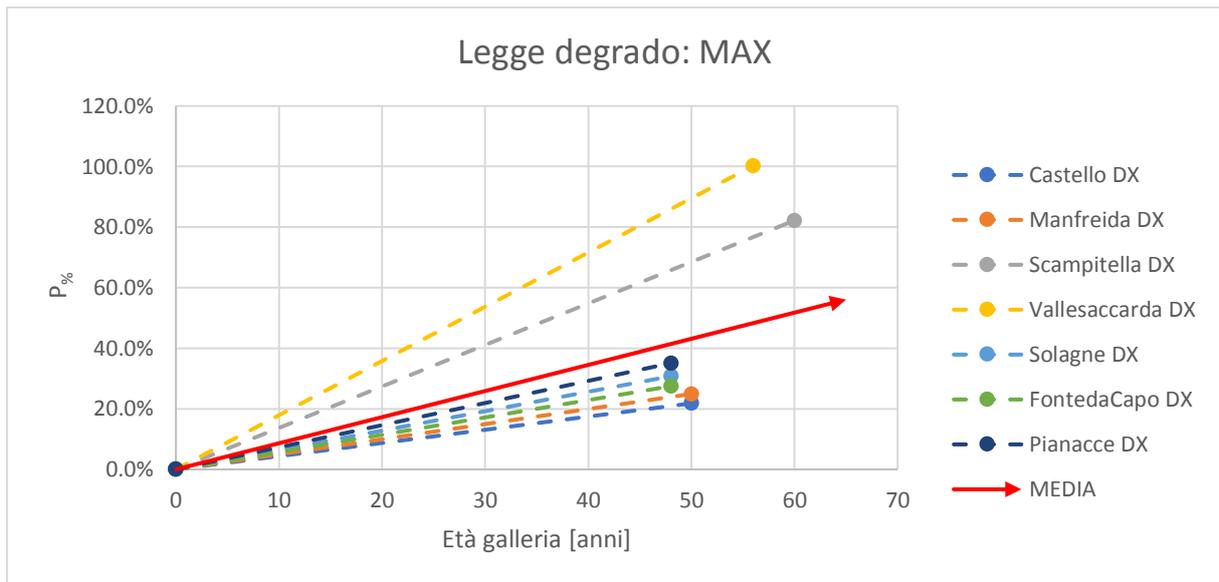


Figura 6.2: Legge di degrado individuata con il MAX.

Anche in questo caso il grafico mostra un andamento comune delle diverse gallerie che oscilla tra valori compresi nell'intervallo dal 20% al 40% (valori riferiti all'anno 2020). Tuttavia, oltre alla galleria Vallesaccarda DX, anche la galleria Scampitella DX si discosta in maniera evidente rispetto al range individuato. La pendenza della linea media è stata ottenuta dai valori rappresentati in Tabella 6.5 e corrisponde ad un degrado annuo dello 0.86%, cioè circa il doppio rispetto al metodo del rango ma comunque inferiore all'1%.

Tabella 6.5: Pendenze delle rette delle gallerie ottenute tramite il MAX.

Pendenza rette	
Castello DX	0.44%
Manfreida DX	0.50%
Scampitella DX	1.37%
Vallesaccarda DX	1.79%
Solagne DX	0.64%
Fonte da Capo DX	0.57%
Pianacce DX	0.73%
<b>MEDIA</b>	<b>0.86%</b>

### 6.2.3 Osservazioni

I grafici mostrati in Figura 6.1 e Figura 6.2 evidenziano due andamenti diversi in quanto il primo definisce un degrado molto più lento rispetto al secondo. Nonostante la forte diversità

dei due andamenti, entrambi i grafici costituiscono una concreta premessa per lo sviluppo di un'adeguata legge di degrado. In particolare i possibili sviluppi di tale lavoro possono consistere nella ricerca di dati pregressi delle gallerie in esame al fine di ottenere più punti nel grafico per ottenere un andamento più attendibile. Infine la definizione di tale legge di degrado può determinare un valido strumento per la valutazione di convenienza tra SID e MES.

# 7 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi è stato svolto con lo scopo di sviluppare un programma eseguibile in grado di automatizzare l'applicazione del metodo SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels). Tale metodo consiste nell'analisi di cinque classi di attenzione, CdA: strutturale e geotecnica, geologica, sismica, incendio e geometrica. Ad ogni CdA viene assegnato un punteggio ottenibile tramite l'analisi di diversi parametri e in seguito viene definito il punteggio totale della CdA dell'intera galleria, che ne definisce il rischio e di conseguenza la priorità di intervento. Data la mole di tempo richiesta per l'applicazione del metodo, in quanto alcune CdA richiedono l'analisi di ogni singolo concio ispettivo di lunghezza pari a 20 m, è stato deciso di sviluppare un programma eseguibile in grado di automatizzare il procedimento. Tale lavoro ha richiesto una prima fase di approccio al fine di determinare la corretta scelta del linguaggio di programmazione da adottare. Successivamente si è stabilito di procedere con l'uso di *Visual Basic* che ha consentito di ottenere un'interfaccia user-friendly e di poter generare facilmente un output in formato excel che fosse familiare all'utente. Il programma (compatibile solo con i sistemi operativi Windows) è strutturato con diverse finestre che trattano le classi di attenzione da analizzare. Ogni finestra è dotata di *TabPage* rappresentanti i vari parametri la cui determinazione dipende dai dati che l'utente deve inserire tramite le diverse modalità richieste in base alla tipologia di parametro da analizzare. Tra le varie *features* del programma, quelle che sicuramente pesano di più sono la sua adattabilità in funzione della lunghezza della galleria in esame, la possibilità di poter salvare e caricare il file nel formato dedicato *smartgal* della galleria in esame al fine di avere traccia di tutti i valori inseriti e delle opzioni selezionate per poi poterli modificare in qualsiasi momento, e infine l'ottenimento diretto di grafici di sintesi. Infatti l'output di excel oltre ai risultati numerici della metodologia SMART, fornisce l'andamento delle classe di attenzione strutturale e geotecnica e di quella geometrica, da valutare concio per concio, lungo l'intera galleria. Il programma ha necessitato di una fase di validazione consistita nella sua applicazione su tre diverse gallerie: Vallesaccarda, Scampitella e Castello. Tale lavoro di validazione ha evidenziato diverse problematiche relative ad errori di codici e di progettazione poco chiara delle finestre. Ciononostante questi problemi sono stati opportunamente risolti. Ciò non toglie che bisogna

procedere con ulteriori casi studio per validare al 100% il programma e per avere spunti utili al suo miglioramento.

Infine sempre in relazione al metodo SMART, data la collaborazione del Politecnico di Torino con ASPI per la valutazione di convenienza tra interventi SID e MES, si è deciso di sviluppare una legge di degrado empirica basata sul parametro inerente al *livello di difettosità*. Sono state considerate sette gallerie con le rispettive percentuali areali di difetto, al fine di determinare una legge di degrado tramite due diverse modalità (RANGO e MAX). Il fine di tale studio è quello di definire una legge di degrado che consideri tutte le tipologie di deterioramento che possono influenzare la galleria, in quanto in letteratura vengono affrontati solo degradi molto specifici. Seppur la definizione di tale legge è ancora in una sua fase primordiale, i risultati ottenuti sono ritenuti un buon punto di partenza per un'analisi più dettagliata. Ad esempio, sarebbe utile determinare nuovi valori delle percentuali areali di difetto delle gallerie in esame riguardanti gli anni precedenti a quelli dei documenti consultati, in modo tale da avere un andamento del degrado non lineare che sia più fedele a quello reale delle gallerie.

# Bibliografia

- A.Dari. *INGENIO*. 2021. <https://www.ingenio-web.it/31197-linee-guida-sulla-classificazione-del-rischio-delle-gallerie-il-punto>.
- Asakura, e Kojima. «Tunnel maintenance in Japan.» *Tunnelling and Underground Space Technology* 18 (2003) 161-169, 2003.
- Barla, Marco. «METODO S.M.A.R.T. Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels.» 2021.
- Barla, Marco. «Progetto strutturale di messa in sicurezza della galleria naturale Vallesaccarda canna destra direzione Candela dell'autostrada A16 nella tratta Napoli-Candela.» 2020.
- Centre d'Etudes des Tunnels. «Road tunnel civil engineering inspection guide book 2: catalogue of deterioration.» 2015.
- Centre d'Etudes des Tunnels. «Road tunnel civil engineering inspection guide, book1: from disorder to analysis, from analysis to rating.» 2015.
- Hostingsolutions. *Internetpost.it*. 2021. <https://www.internetpost.it/mercato-dei-sistemi-operativi-gennaio-aprile-2021/>.
- Hudson, e J. *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. New York: Ellis Horwood, 1992.
- IFFI. *Piattaforma Idrogeo*. 2021. <https://idrogeo.isprambiente.it>.
- INGV. *Database of individual seismogenic sources*. 2021. <http://diss.rm.ingv.it/dissGM/>.
- Llanca, D., P. Breul, e C. Bacconnet. «Improving the diagnosis methodology for masonry tunnels.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017.
- Llanca, D., P. Breul, Y. Haddani, e P. Goirand. «Methodology of diagnosis of urban tunnel in service.» Ginevra: World Tunnel Congress, 2013.
- Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a, e SWS Engineering S.p.a. «Report conclusivo - relazione tecnico descrittiva e di calcolo interventi messa in sicurezza. Opera 0473.0 carr 7.» 2020a.
- Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a., e SWS Engineering S.p.a. «Ispezione approfondita, tabella sintesi difetti.» 2020d.
- Lombardi S.r.l., Rocksoil S.p.a., e SWS Engineering S.p.a. «Resoconto percentuale difetti per cod. iqoa - difetti del rivestimento. Opera 0473.0 carr 7.» 2020b.
- Microsoft. *Microsoft Docs*. 2021. <https://docs.microsoft.com/it-it/dotnet/visual-basic/>.

- MIMS. *Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili*. 16 Febbraio 2018.  
<https://www.mit.gov.it/connettere-litalia/piano-viadotti-e-strade>.
- Moradi, Asadi, Ebrahimzadeh, e Yarahmadi. «Ilam tunnels inspections, maintenance, and rehabilitation: A case study.» *Tunnelling and Underground Space Technology 110 (2021)*, 2021.
- Morisco, Felice, e Placido Migliorino. «Manuale Ispezione Gallerie.» Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma, 2020.
- NTC2018. *Norme tecniche per le costruzioni*. 2018.
- Prato, Daniele. *La Stampa*. 30 Dicembre 2019.  
<https://www.lastampa.it/alessandria/2019/12/30/news/crollo-nella-galleria-berte-chiusa-la-carreggiata-a26-tra-masone-e-genova-1.38270418>.
- Socotec. «Georadar longitudinale con indagini di taratura. Opera 0473.0 carr 7.» 2020c.
- Socotec. «Report martinetti piatti. Opera 0473.0 carr 7.» 2020a.
- Socotec. «Report videoendoscopie. Opera 0473.0 carr 7.» 2020b.
- TE, Redazione. *Trasporto europa*. Venerdì 10 Gennaio 2020.  
<https://www.trasportoeuropa.it/notizie/infrastrutture/ducento-gallerie-autostradali-a-rischio/>.
- . *Trasporto europa*. Venerdì 18 Dicembre 2020.  
<https://www.trasportoeuropa.it/notizie/infrastrutture/ue-chiede-a-italia-di-rispettare-la-sicurezza-delle-gallerie/>.
- TEKNORING. Mercoledì 14 Aprile 2021.  
<https://www.teknoring.com/news/infrastrutture/gallerie-sicurezza-piano-giovannini/>.
- Ye, N.Qin, Liang, Ouyang, Z.Qin, e Su. «Analyses of the defects in highway tunnels in China.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021.