

# POLITECNICO DI TORINO

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



## TESI DI LAUREA MAGISTRALE

# Il rischio nelle gallerie autostradali italiane: proposta di un metodo per definire le priorità di intervento

Relatore

Prof. Marco BARLA

Correlatori

Prof.ssa Monica BARBERO

Ing. Alessandra INSANA

Candidato

Tiziana VARETTO

Dicembre 2020



*A Celeste,  
Al bravo medico che diventerà  
e alla sua determinazione che tanto mi ispira*



# Sommario

Le gallerie sono importanti opere geotecniche che permettono di attraversare velocemente e facilmente territori la cui morfologia consentirebbe solamente la costruzione di strade tortuose e impervie.

Queste opere sono soggette all'invecchiamento e possono sviluppare degli ammaloramenti in grado di compromettere la loro funzionalità ed il livello di sicurezza degli utenti. Per questo motivo diventa imprescindibile effettuare delle ispezioni al fine di attribuire a ciascuna galleria una valutazione dello stato di salute sulla base delle evidenze riscontrate. Alla ricognizione completa ed esaustiva di tutte le gallerie appartenenti alla rete autostradale esistente segue necessariamente la loro messa in sicurezza definitiva. Nel corso di questa fase si potrebbe commettere l'errore di avviare la manutenzione dando la precedenza a gallerie a rischio moderato, trascurando invece quelle che necessitano di un'azione più tempestiva.

Per questo motivo, in questo lavoro di tesi, si propone un metodo basato su 'Classi di Attenzione' con l'obiettivo di definire le priorità di intervento per una razionale programmazione e gestione della manutenzione delle infrastrutture.

Lo studio bibliografico presenta una descrizione dettagliata delle metodologie costruttive adottate durante lo scavo di gallerie autostradali italiane dal 1930 ad oggi e riporta delle evidenze storiche relative alla costruzione di alcune di queste gallerie percorribili ancora oggi. Si illustrano inoltre tutte le difettologie riscontrabili durante le ispezioni ed il metodo, proposto dal Centre d'Études des Tunnels, per definire la loro gravità.

Successivamente si descrive il metodo di classificazione del rischio proposto per le gallerie esistenti, con l'obiettivo di attribuire una Classe di Atten-

zione complessiva della galleria (alta, medio-alta, media, medio-bassa, bassa) che permetta di stabilire su quali opere d'arte l'intervento risulti prioritario. La valutazione si basa sull'analisi di cinque Classi di Attenzione che coincidono con i principali ambiti che caratterizzano l'analisi del rischio per queste infrastrutture: strutturale-geotecnico, geologico, sismico, incendio e geometrico. Il metodo impiega un sistema a punteggi che devono essere assegnati ai parametri selezionati per ciascuna delle cinque classi sopra citate.

La definizione degli intervalli entro cui far variare i punteggi attribuibili a ciascun parametro è una parte fondamentale nell'ideazione del metodo: risulta infatti evidente che ci siano delle Classi di Attenzione il cui contributo dovrebbe influenzare maggiormente la valutazione complessiva della galleria. Questa connessione è riscontrabile anche tra i parametri e la Classe di Attenzione a cui questi appartengono. In questa tesi viene illustrata la strategia che è stata adottata per affrontare il problema: particolare attenzione viene posta sul contributo del Rock Engineering System, metodo proposto da J. A. Hudson nel 1992 e qui applicato, capace di mettere in luce quali siano i parametri che governano maggiormente l'analisi del rischio che si sta effettuando.

La bontà del metodo messo a punto viene infine verificata e validata presentandone l'applicazione a quattro gallerie autostradali italiane recentemente ispezionate: Castello, Manfreida, Scampitella e Vallesaccarda.

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>9</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>15</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>17</b>
1.1 Struttura della tesi . . . . .	18
<b>2 Gallerie autostradali italiane: sviluppo delle tipologie costruttive</b>	<b>19</b>
2.1 Introduzione . . . . .	19
2.2 Metodi costruttivi utilizzati dagli anni '30 ai '50 del Novecento	21
2.3 Metodi costruttivi degli anni '60 e '70 del Novecento . . . . .	25
2.4 Metodi costruttivi degli anni '80 e '90 del Novecento . . . . .	30
2.5 Metodi costruttivi dal 2000 ad oggi . . . . .	32
2.6 Alcune gallerie autostradali italiane . . . . .	33
<b>3 Tipologie di difetti e manutenzione delle gallerie</b>	<b>39</b>
3.1 Introduzione . . . . .	39
3.2 Gli ammaloramenti . . . . .	40
3.3 Classificazione IQOA . . . . .	57
<b>4 Analisi del rischio per gallerie esistenti</b>	<b>61</b>
4.1 Premessa . . . . .	61
4.2 La metodologia SMART . . . . .	62

4.3	Relazione tra parametri . . . . .	65
4.3.1	Il Rock Engineering System . . . . .	65
4.3.2	Applicazione del metodo . . . . .	69
4.4	Attribuzione dei punteggi e valutazione della Classe di Atten- zione della galleria . . . . .	83
4.4.1	Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . . . .	85
4.4.2	Classe di Attenzione geologica . . . . .	92
4.4.3	Classe di Attenzione sismica . . . . .	95
4.4.4	Classe di Attenzione incendio . . . . .	100
4.4.5	Classe di Attenzione geometrica . . . . .	105
4.4.6	Classe di Attenzione della galleria . . . . .	107
<b>5</b>	<b>Applicazione del metodo SMART</b>	<b>109</b>
5.1	Galleria Castello . . . . .	111
5.1.1	Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geo- tecnica . . . . .	111
5.1.2	Valutazione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	115
5.1.3	Valutazione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	116
5.1.4	Valutazione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	121
5.1.5	Valutazione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	122
5.1.6	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Ca- stello . . . . .	123
5.2	Galleria Manfreida . . . . .	124
5.2.1	Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geo- tecnica . . . . .	124
5.2.2	Valutazione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	128
5.2.3	Valutazione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	129
5.2.4	Valutazione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	132
5.2.5	Valutazione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	133
5.2.6	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Man- freida . . . . .	134
5.3	Galleria Scampitella . . . . .	135

5.3.1	Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . . . .	135
5.3.2	Valutazione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	139
5.3.3	Valutazione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	140
5.3.4	Valutazione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	144
5.3.5	Valutazione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	145
5.3.6	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Scampitella . . . . .	147
5.4	Galleria Vallesaccarda . . . . .	147
5.4.1	Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . . . .	147
5.4.2	Valutazione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	152
5.4.3	Valutazione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	153
5.4.4	Valutazione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	156
5.4.5	Valutazione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	157
5.4.6	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Vallesaccarda . . . . .	158
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>161</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>165</b>



## Elenco delle figure

2.1	Rivestimenti in ghisa con particolare sugli elementi di chiusura (Desimon, 1939) . . . . .	24
2.2	Sezione procedimento scavi in galleria (Astrua, 1961) . . . . .	26
2.3	Dettaglio di posa dei marciavanti (Astrua, 1961) . . . . .	26
2.4	Dettaglio di un quadro di avanzata (Astrua, 1961) . . . . .	27
2.5	Messa in opera del getto di calcestruzzo (Gentili, 1969) . . . . .	29
2.6	Scudo non meccanizzato (Innaurato, 2001) . . . . .	31
2.7	Scudo semi-meccanizzato ( <a href="http://www.skyscrapercity.com">www.skyscrapercity.com</a> ) . . . . .	31
2.8	TBM ( <a href="http://www.herrenknecht.com">www.herrenknecht.com</a> ) . . . . .	34
2.9	Sezione C1 ETJ della galleria Cavallo (Lunardi et al., 2013) . . . . .	35
2.10	Sezioni della galleria Calavà, <i>trattamento a sandwich</i> (Garassi, 2015) . . . . .	35
2.11	Galleria Serra dell'Ospedale, schema del trattamento a regime di avanzamento (Balossi Restelli, 1969) . . . . .	37
3.1	Esempio di concrezione (HY-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	42
3.2	Esempio di portale deformato da instabilità del versante (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	43
3.3	Scherma del meccanismo di distacco da roccia stratificata (NR-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	44
3.4	Esempio di deterioramento della malta (RM-5) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	46
3.5	Esempio di assottigliamento dello shotcrete (RB-5) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	47

3.6	Esempio di deterioramento delle onduline (ED-5) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	50
3.7	Esempio di fessure diagonali (FI-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	51
3.8	Esempio di imbozzamento (DF-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	52
3.9	Esempio di vespaio (MO-3) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)	54
3.10	Esempio di deterioramento di lastre (EQ-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	55
3.11	Esempio di deterioramento dovuto al fuoco (IN-1) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	55
3.12	Esempio di scarsa manutenzione del portale (EN-1) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b) . . . . .	56
4.1	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria . . . . .	63
4.2	Esempio di compilazione della matrice . . . . .	67
4.3	Esempio di definizione di causa ed effetto . . . . .	68
4.4	Esempio della creazione del grafico a dispersione . . . . .	68
4.5	Esempio della creazione del grafico a barre dell'interattività .	69
4.6	Matrice di interazione tra i parametri considerati nell'analisi del rischio . . . . .	78
4.7	Grafico a dispersione causa-effetto . . . . .	80
4.8	Grafico a barre dell'interattività . . . . .	82
4.9	Interattività dei cinque ambiti dell'analisi del rischio . . . . .	84
4.10	Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . . . .	86
4.11	Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . .	87
4.12	Tabella per la definizione della tipologia di galleria. Politecnico di Torino (2020) . . . . .	89
4.13	Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione strutturale e geotecnica (modificato da Politecnico di Torino (2020)) . . . . .	91

<i>ELENCO DELLE FIGURE</i>	11
4.14 Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione geologica . . . . .	92
4.15 Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione geologica . . . . .	93
4.16 Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione geologica (modificato da Politecnico di Torino (2020)) . . . . .	95
4.17 Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione sismica . . . . .	96
4.18 Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione sismica . . . . .	97
4.19 Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione sismica (modificato da Politecnico di Torino (2020)) . . . . .	99
4.20 Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione incendio . . . . .	101
4.21 Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione incendio . . . . .	102
4.22 Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione incendio (modificato da Politecnico di Torino (2020)) . . . . .	104
4.23 Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione geometrica . . . . .	105
4.24 Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione geometrica . . . . .	106
4.25 Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione geometrica (modificato da Politecnico di Torino (2020)) . . . . .	107
5.1 Collocazione delle quattro gallerie in esame . . . . .	110
5.2 Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e) . . . . .	112
5.3 Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . . . .	114
5.4 Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020) . . . . .	115
5.5 Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	116

5.6	Inclusione delle gallerie Castello e Manfreida nelle zone sismogenetiche. (INGV, 2020a) . . . . .	117
5.7	Categorie di sottosuolo. (NTC2018, 2018) . . . . .	118
5.8	Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	120
5.9	Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	122
5.10	Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	123
5.11	Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f) . . . . .	125
5.12	Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . .	127
5.13	Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020) . . . . .	128
5.14	Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	129
5.15	Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	131
5.16	Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	133
5.17	Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	134
5.18	Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g) . . . . .	136
5.19	Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . .	138
5.20	Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020) . . . . .	139
5.21	Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	140
5.22	Inclusione delle gallerie Scampitella e Vallesaccarda nelle zone sismogenetiche. (INGV, 2020a) . . . . .	141
5.23	Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	143

5.24	Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	145
5.25	Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	146
5.26	Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h) . . . . .	148
5.27	Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . .	151
5.28	Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020) . . . . .	152
5.29	Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione geologica . . . . .	153
5.30	Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione sismica . . . . .	155
5.31	Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione incendio . . . . .	157
5.32	Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	158
5.33	Confronto tra i punteggi assegnati alle quattro gallerie in esame	159



## Elenco delle tabelle

3.1	Classificazione IQOA: difetti civili . . . . .	57
3.2	Classificazione IQOA venute d'acqua . . . . .	59
4.1	Causa, effetto ed interattività dei parametri . . . . .	79
4.2	Classi di Attenzione della galleria . . . . .	83
4.3	Intervallo di punteggio per ciascuna Classe di Attenzione . . .	84
4.4	Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica . . . . .	87
4.5	Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione geologica . . . . .	93
4.6	Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione sismica . . . . .	96
4.7	Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione incendio . . . . .	100
4.8	Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione geometrica . . . . .	106
5.1	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Castello .	124
5.2	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Manfreida	135
5.3	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Scampitella	147
5.4	Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Vallesac- carda . . . . .	159



# Capitolo 1

## Introduzione

Il concetto di autostrada nacque nel 1921 quando l'ingegnere Piero Puricelli ottenne l'autorizzazione per dichiarare di pubblica utilità una tipologia di strada caratterizzata dalla grande dimensione e riservata al solo traffico automobilistico. Nel 1924 fu inaugurato il primo tratto autostradale italiano: la Milano-Laghi. La costruzione della rete venne interrotta durante il secondo conflitto mondiale e riprese durante gli anni del boom economico. Nel 1960 la tratta Milano-Firenze divenne completamente percorribile e vennero inaugurate molte gallerie autostradali che permisero l'attraversamento degli Appennini.

Le gallerie autostradali, come tutte le opere ingegneristiche, nel corso della loro vita subiscono danneggiamenti dovuti al tempo e all'usura. Gli ammaloramenti possono compromettere la funzionalità dell'opera e ridurre il livello di sicurezza. Quando si devono ispezionare molte gallerie e programmare gli interventi per la messa in sicurezza di queste, sarebbe utile poter definire una gerarchia per riuscire a stabilire a quali opere attribuire la priorità di intervento. Il metodo SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels), descritto in questo lavoro di tesi, nasce dal contratto tra il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino e Autostrade per l'Italia S.p.a con l'obiettivo di definire le priorità di intervento per una razionale programmazione della manutenzione delle gallerie gestite dalla concessionaria. La metodologia sfrutta l'analisi del rischio per poter as-

segnare a ciascuna galleria una 'Classe di Attenzione' sulla cui base definire le tempistiche di intervento.

## 1.1 Struttura della tesi

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

Il capitolo 2 'Gallerie autostradali italiane: sviluppo delle tipologie costruttive' riporta la descrizione dei metodi costruttivi che sono stati adoperati per la creazione delle gallerie autostradali dal 1930 ad oggi. Particolare attenzione viene posta all'evoluzione delle attrezzature utilizzate: dalle perforatrici montate su carrello alla moderna e mastodontica TBM Martina. Vengono inoltre riportati degli esempi di gallerie autostradali italiane di cui sono note le tecnologie utilizzate ed i problemi che sono stati riscontrati e risolti durante la loro costruzione.

Il capitolo 3 'Tipologie di difetti e manutenzione delle gallerie' riporta l'elenco completo di tutti gli ammaloramenti riscontrabili in galleria durante le ispezioni. In questa parte viene anche descritta la classificazione IQOA che permette di determinare lo stato di salute della galleria sulla base della gravità dei difetti riscontrati.

Nel capitolo 4 'Analisi del rischio per gallerie esistenti' viene descritta la metodologia SMART. Partendo dalla definizione di cinque Classi di Attenzione corrispondenti a cinque aspetti dell'analisi del rischio, si definisce la Classe di Attenzione della galleria. All'interno di questo capitolo vengono descritti i parametri, veri protagonisti del metodo in esame, la cui valutazione, basata su un sistema di punteggi, determina la Classe di Attenzione. Per stabilire quali aspetti influenzino maggiormente l'analisi del rischio si è utilizzato il Rock Engineering System, metodo ideato da Hudson e descritto in questo capitolo.

Nel capitolo 5 'Applicazione del metodo SMART' vengono riportati i ragionamenti che hanno condotto alla definizione delle Classi di Attenzione di quattro gallerie autostradali italiane: Castello, Manfreida, Scampitella e Valle-saccarda.

## **Capitolo 2**

# **Gallerie autostradali italiane: sviluppo delle tipologie costruttive**

### **2.1 Introduzione**

L'introduzione del concetto di autostrada si deve all'ingegnere Piero Puricelli (Milano, 4 aprile 1883 – Milano, 8 maggio 1951) che ebbe l'idea di costruire delle grandi strade riservate al solo traffico automobilistico (Lamberti, 2004). Queste sarebbero state a pedaggio, ideate per consentire alle auto di viaggiare a velocità sostenute. Nel 1921 Puricelli riuscì ad ottenere l'autorizzazione per dichiarare 'di pubblica utilità' alcuni suoi progetti: venne così consentito l'esproprio dei beni sui terreni necessari alla costruzione.

Nel 1924 fu inaugurato il primo tratto autostradale italiano: la Milano-Laghi che collegava Milano ai laghi Maggiore, di Como e di Varese. Negli anni successivi vennero costruite altre autostrade, chiamate di prima generazione, quali la Milano-Bergamo (1927), Napoli-Pompei (1929), Torino-Milano (1932), Firenze-Mare e Padova-Mestre (1933).

Le autostrade della prima generazione furono pavimentate con lastroni di cemento, ad eccezione del tratto Padova-Mestre dove si usarono trattamenti bituminosi. Si impose fin da subito la questione dell'arredo autostradale: vi

era la tendenza a raggruppare tutte le funzioni per cui anche la riscossione del pedaggio veniva effettuata presso le aree di servizio.

La nascita delle prime autostrade italiane è legata al clima politico nel quale tale impresa nacque: il fascismo. L'atteggiamento che il partito ebbe nei confronti delle autostrade cambiò dagli anni '20 agli anni '30: se inizialmente il progetto venne utilizzato come mezzo per propaganda e fu accolto con entusiasmo, successivamente le difficoltà di realizzazione portarono il parlamento a dimostrarsi ostile alle imprese autostradali. Il progetto venne definitivamente sospeso nel 1935. In quell'anno venne limitato il commercio della benzina e vi fu un aumento delle tasse sui rimorchi, sui carburanti e sul peso delle merci destinate ad essere trasportate.

La scelta politica di investire sullo sviluppo stradale avvenne dopo la Seconda guerra mondiale. Negli anni del boom economico la nascita della rete autostradale fece parte della rivoluzione che aveva come obiettivo la nascita di una società più moderna e dinamica. Una spinta a tale visione venne data dalle grandi fabbriche di automobili del Nord Italia, principali sostenitrici della necessità di costruire autostrade. La Fiat, ad esempio, avrebbe sfruttato lo sviluppo delle autostrade per adeguare la propria produzione agli standard europei, potendo aumentare la cilindrata delle auto rendendole adatte all'alta velocità e a percorrere maggiori distanze.

La rete autostradale può essere considerata come l'opera che rese possibile la rinascita del dopoguerra dal momento che fu un fattore di unificazione, capace di collegare e unire tante piccole realtà regionali dal punto di vista sia culturale sia economico. Negli anni del boom economico nacque negli italiani una nuova passione: viaggiare. Avere a disposizione un mezzo proprio divenne quasi una necessità per molte famiglie e il simbolo di questo cambiamento fu la 'Fiat 600'. Questa automobile diede inizio alla motorizzazione di massa con la conseguenza che si rese necessaria una nuova rete stradale che consentisse lunghi spostamenti nel minor tempo possibile. Fu così che nel 1955 il Governo varò un piano decennale di costruzioni stradali: nacque la seconda generazione di autostrade.

L'articolo 3 della legge 21.5.1955, n 463, nota come Legge Romita, decretava l'impegno dell'IRI (Istituto per la Ricostruzione Industriale) sul fronte

di progettazione, costruzione e gestione della nuova rete autostradale. Il 14 aprile 1956 si stipulò la prima convenzione tra L'ANAS e la Società Autostrade per la costruzione dell'autostrada Milano-Roma-Napoli, chiamata anche A1 e conosciuta come 'Autostrada del Sole'.

Nel 1962 venne completata la tratta Roma-Napoli e cominciò la costruzione di nuove autostrade e l'ammodernamento di quelle di prima generazione. L'autostrada del Sole fu inaugurata e divenne completamente percorribile da Milano a Napoli il 4 ottobre 1964.

Tornando indietro di quattro anni, nel 1960, la tratta Milano-Firenze dell'A1 divenne completamente percorribile e vennero approvati nuovi progetti per la costruzione di nuove autostrade. Quell'anno fu molto importante dal punto di vista ingegneristico perché la tratta riuscì a superare un grande ostacolo: gli Appennini. Per farlo vennero costruiti 304 ponti e viadotti e 63 gallerie. È proprio di queste ultime che in questo capitolo si vuole trattare, analizzando l'evoluzione dei metodi costruttivi adottati da allora fino ad oggi. Le gallerie autostradali sono caratterizzate da una sezione molto grande, che le differenzia da quelle utilizzate per il traffico stradale ordinario.

Nel seguito verranno esposti i metodi utilizzati per la costruzione di queste grandi opere a partire dagli anni '30, in cui nacquero le autostrade di prima generazione, fino ad oggi.

## **2.2 Metodi costruttivi utilizzati dagli anni '30 ai '50 del Novecento**

Negli anni in esame l'ingegneria geotecnica che si occupava di gallerie coincideva con quella mineraria. Le modalità di scavo prevedevano l'utilizzo di dinamite per la creazione del varco e il successivo uso di scalpelli pneumatici (Barla, 2005). Un numero di perforatrici, variabile tra 7 e 12, potevano essere montate su un carrello: questo sistema può considerarsi l'antenato dei moderni carri 'jumbo'. L'aria compressa espulsa dai martelli perforatori e dalle motrici consentiva di migliorare la scarsa aerazione delle zone di lavoro. Il trasporto dello smarino, ovvero dei detriti provenienti dalla lavorazione di

scavo della galleria, si avvelava dell'ausilio di piccoli vagoni che scorrevano su rotaie e che lo depositavano fuori dal tunnel.

Per quanto riguardava la stabilità dello scavo, il calcolo razionale degli anelli di rivestimento delle gallerie richiedeva la previsione delle spinte agenti su essi (Desimon, 1939): si doveva quindi conoscere la direzione, il centro e la grandezza di tali forze. Tuttavia, questo calcolo si poteva fare soltanto in corso d'opera. In fase progettuale venivano stabiliti due o tre profili, denominati 'normali', da introdurre a seconda del terreno che si sarebbe incontrato durante la costruzione. Il 'profilo leggero' era scelto qualora venissero trovate rocce resistenti. La sua funzione era quella di proteggere le pareti del cavo dagli agenti atmosferici e di evitare il distacco di piccole porzioni di roccia dalla calotta o dai piedritti. Il 'profilo medio' era previsto per il rivestimento di rocce con caratteristiche di resistenza inferiori alle precedenti e che si presentavano fessurate o stratificate. Nel caso di terreni spingenti si utilizzava il 'profilo pesante'. I profili venivano montati utilizzando grandi e ingombranti impalcature in legno che occupavano gran parte dello spazio in prossimità del fronte di scavo.

Le gallerie di grande comunicazione venivano tutte rivestite. La costruzione e la manutenzione delle murature in galleria comportavano grandi difficoltà a causa della ristrettezza dello spazio causato dall'ingombro delle armature in legno. Nella scelta del tipo di muratura si prediligevano quelle che richiedevano poca mano d'opera e che risultavano non suscettibili agli effetti di acqua e gelo. Per evitare di dover costruire rivestimenti troppo spessi, si sceglievano materiali caratterizzati da una grande resistenza. Esempi di pietre che venivano utilizzate sono il granito, il porfido, il gabbro, lo gneiss e il basalto. Queste pietre venivano reperite presso cave che sorgevano nei dintorni dell'opera; solo raramente venivano adoperate quelle ricavate dallo scavo della galleria perché le esplosioni di dinamite tendevano a creare blocchi fessurati che non potevano essere riutilizzati.

I mattoni comuni, porosi e caratterizzati da una mediocre resistenza a compressione, venivano utilizzati per il rivestimento di scavi in rocce asciutte e che non dovevano sopportare pressioni eccessive.

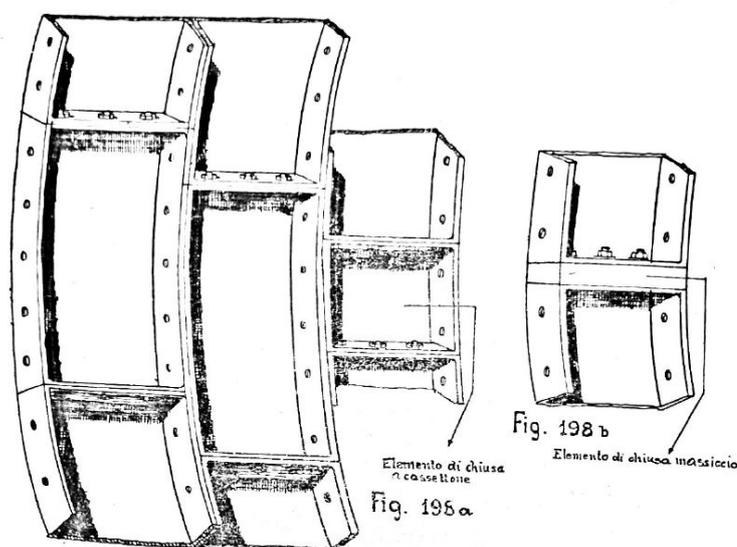
I conci artificiali in beton, innovativi per l'epoca, erano spesso utilizzati

perché pressoché impermeabili: il problema dell'attesa dell'indurimento poteva essere evitato confezionando i blocchi qualche mese prima del loro utilizzo. Un ulteriore vantaggio dei conci artificiali, oltre al basso costo, consisteva nella possibilità di dare a questi la forma più conveniente, specialmente per il rivestimento delle volte.

Nel caso di terreni spingenti che non permettevano che si potesse aspettare il tempo di presa della malta, usate nelle murature, si ricorreva ai rivestimenti metallici che offrivano alcuni vantaggi: una soddisfacente resistenza a pressioni e spinte elevate che si otteneva subito dopo la costruzione del supporto, il poco spessore del rivestimento e l'elevata impermeabilità. I rivestimenti di questa categoria si distinguono in due categorie: quelli in ghisa e quelli in ferro.

Gli anelli circolari del rivestimento in ghisa erano composti di singoli elementi dotati di flange, radili e circolari, che aumentavano notevolmente la resistenza del rivestimento. Gli elementi in forma di cassette (Figura 2.1) che venivano connessi tra loro tramite bullonatura, erano tutti di ugual misura e potevano essere prodotti in serie e facilmente sostituiti. Gli unici pezzi ad essere diversi dagli altri erano quelli di chiusa che potevano essere in forma di cassettoni oppure di massiccio.

Le gallerie costruite in ghisa avevano solamente sezione circolare. Il peso di un singolo elemento doveva essere tale da permettere a quattro operai di trasportarlo poiché all'interno della galleria non era possibile effettuare le lavorazioni di taglio. Il numero di elementi che componevano un anello di rivestimento variava da 6 a 15 a seconda del diametro dell'opera. Lo spessore del rivestimento e la lunghezza delle flange dipendevano dalle dimensioni della galleria e dalle pressioni che gravavano sul cavo. I rivestimenti in ghisa non erano in grado di sopportare deformazioni elastiche. Questo comportava che gli anelli si rompessero e dovessero essere sostituiti causando un grande dispendio di tempo e denaro. In questi casi si preferiva cambiare il materiale del supporto optando per il ferro profilato. Per evitare l'arrugginimento del materiale la parte esterna del rivestimento veniva ricoperta da uno strato di cemento e poi rivestita con malta e calce grassa. Lo spazio che si veniva a creare tra le pareti del cavo e il rivestimento era riempito con beton in pressione.



**Figura 2.1:** Rivestimenti in ghisa con particolare sugli elementi di chiusa (Desimon, 1939)

Gli anelli del supporto in ferro profilato erano composti da elementi simili a quelli in ghisa; la giunzione, però, avveniva tramite chiodatura.

Dal momento in cui le costruzioni in cemento armato si affacciarono nel mondo ingegneristico, si tentò di utilizzare tale materiale anche per il supporto definitivo delle gallerie. L'esito fu però negativo e le ragioni furono molteplici. In primo luogo, vi era il rischio che le spinte del terreno impedissero al conglomerato cementizio di fare presa; inoltre era difficoltoso manovrare i ferri e i casseri in un ambiente molto ristretto a causa della presenza delle impalcature in legno che non potevano essere rimosse senza compromettere la stabilità del cavo.

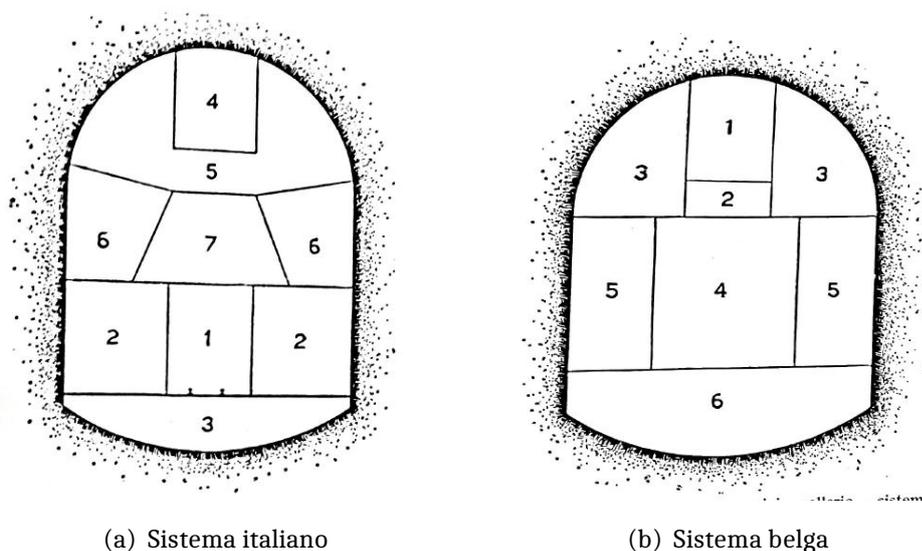
Le gallerie autostradali di prima generazione furono oggetto di successivi ammodernamenti e per questo motivo oggi appaiono diverse da quelle che erano originariamente.

## **2.3 Metodi costruttivi degli anni '60 e '70 del Novecento**

Negli anni in esame vennero costruite moltissime gallerie autostradali poiché nacquero le tratte che ancora oggi utilizziamo. Nella costruzione si introdussero grandi innovazioni, di cui si tratterà nel seguito, quali l'utilizzo dello spritz beton e l'adozione di reti metalliche per la caduta massi (Facchinelli, 2002).

Lo scavo, qualora la sezione della galleria fosse di grandi dimensioni, veniva effettuato per fasi, evitando il procedimento a piena sezione (Astrua, 1961). Per effettuare tale lavoro vi erano diversi sistemi che prendevano il nome dallo stato in cui erano maggiormente utilizzati: il sistema italiano, belga, austriaco, inglese. Ognuno di questi metodi risultava più indicato a seconda del tipo di terreno che si sarebbe incontrato durante la costruzione della galleria. Il sistema italiano (Figura 2.2(a)) era indicato per terreni spingenti. La prima operazione da effettuare era l'attacco in cunetta, successivamente la zona veniva allargata lateralmente ed inferiormente. Si proseguiva poi creando un cunicolo in calotta che, nelle fasi di scavo successive, veniva ampliato fino a raggiungere l'intera sezione di scavo.

Il metodo belga, a differenza di quello italiano, era caratterizzato dall'attacco in calotta (Figura 2.2(b)). Nelle fasi successive si provvedeva ad ampliare prima la zona superiore della sezione e poi la parte inferiore.

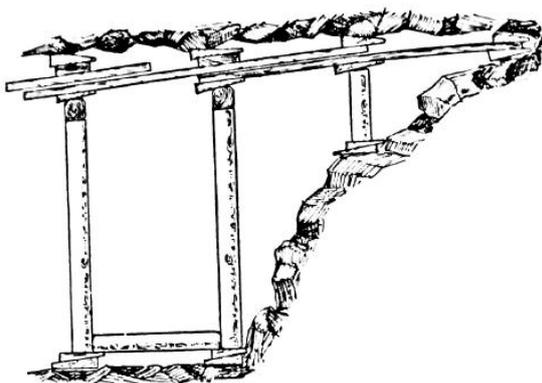


(a) Sistema italiano

(b) Sistema belga

**Figura 2.2:** Sezione procedimento scavi in galleria (Astrua, 1961)

Lo scavo era sorretto da un'armatura che consisteva in due ritte, o gambe, laterali aventi uno spessore di circa 20 cm, superiormente collegati da una trave, detta cappello. Su questo elemento venivano fatte avanzare delle tavole, denominate marciavanti, che avevano la funzione di sorreggere la volta appena scavata. Un esempio di questo sistema è riportato in Figura 2.3.

**Figura 2.3:** Dettaglio di posa dei marciavanti (Astrua, 1961)

I ritte venivano disposti ad una distanza variabile tra 0,80 e 1,20 metri a seconda del tipo di terreno incontrato durante la costruzione. Quando il terreno si

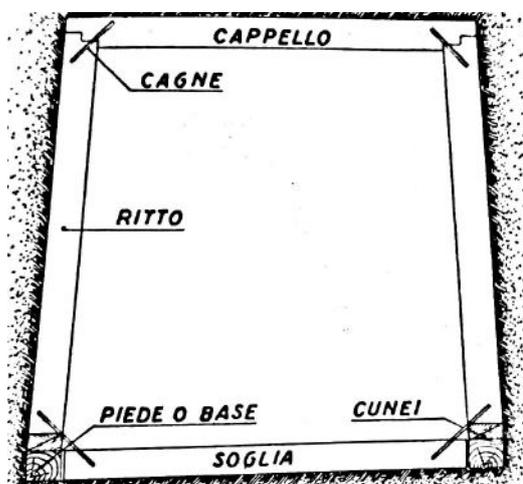


Figura 2.4: Dettaglio di un quadro di avanzata (Astrua, 1961)

rivelava essere molto spingente le gambe venivano collegate anche inferiormente con dei travetti chiamati soglie. L'insieme di cappello, ritti e soglia si chiamava quadro (Figura 2.4).

Durante la costruzione delle gallerie veniva utilizzata una grande quantità di legno che doveva essere sano, robusto e di dimensioni adeguate alla lavorazione. Per gli elementi che componevano il quadro si prediligevano i legni di larice, pino rosso o castagno selvatico; per i marciavanti si utilizzavano tavole spesse 4-5 centimetri di legno di larice, castagno e quercia. L'unione degli elementi veniva effettuata da carpentieri specializzati. Dal momento che il costo del legno era elevato, si cercava di disporre le armature in modo tale che queste potessero essere recuperate una volta terminata la costruzione.

Le armature dovevano essere disposte in modo da consentire lo svolgimento dello scavo e dello sgombero dello smarino senza che si presentasse il rischio di violenti urti che potessero comprometterne la stabilità. Dovendo far brillare qualche mina, per la rimozione di trovanti e per il proseguimento nello scavo, era importante che le impalcature resistessero anche a questo tipo di eventi.

Lo scavo veniva effettuato nel tratto che separava le armature del fronte e si cercava di costruire un nuovo quadro nel minor tempo possibile in modo da armare sempre il cavo. Si era ormai diffuso l'impiego delle perforatrici

meccaniche e dei martelli perforatori: questi venivano azionati da aria compressa, da un motore elettrico o a scoppio. Le mine venivano azionate ad orari prestabiliti in modo da permettere agli operai di raggiungere un luogo sicuro. La carica avveniva elettricamente, collegando l'ordigno con l'esterno.

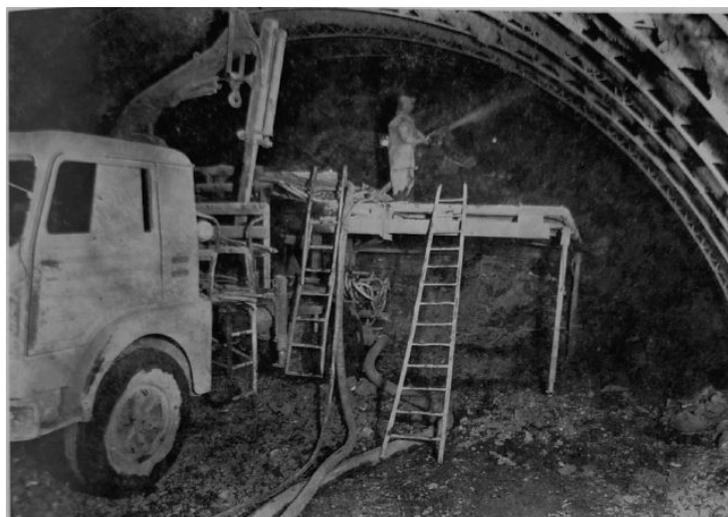
Per lo smaltimento dello smarino si ricorreva, come nei decenni precedenti, all'utilizzo di piccoli vagoni, trainati a mano da uno o due operai, che scorrevano su un binario e che conducevano al luogo di deposito fuori dalla galleria. Ci si avvaleva anche di pale cariatrici di grande capacità e di dumpers (Viespoli, 1969).

Nei cantieri di gallerie autostradali l'illuminazione era garantita dall'installazione di una vera e propria rete elettrica. L'energia veniva prodotta all'esterno e condotta mediante fili ricoperti di guttaperca, materiale isolante simile ad una gomma naturale, alle lampade che erano protette dagli urti da una rete metallica.

I sistemi di ventilazione venivano distinti in longitudinali e trasversali: i primi permettevano all'aria di scorrere parallelamente all'asse della galleria, poiché questa veniva introdotta nei pressi di un imbocco ed estratta all'altra estremità; i secondi facevano sì che l'aria venisse introdotta ed estratta localmente in direzione perpendicolare all'asse della galleria. Per aumentare la capacità di ventilazione si costruivano camini e condotti ausiliari di piccola sezione che conducevano alle centrali di ventilazione meccanica.

Intorno al 1965 si iniziò a parlare di calcestruzzo spruzzato (Martinelli and Minghetti, 1965) e con questo termine si intendeva un vero e proprio calcestruzzo, caratterizzato da elevata resistenza, che veniva applicato alle pareti del cavo con un getto violento (Figura 2.5). Grazie alla pressione del getto, parte del materiale riusciva a filtrare nei giunti della matrice rocciosa saldando tra loro gli elementi: questo produceva un risanamento superficiale dell'ammasso roccioso che in molti casi era sufficiente per prevenire il disgregamento. Il calcestruzzo proiettato, avendo un'elevata resistenza a compressione, era in grado di sopportare le pressioni radiali comportandosi da arco portante.

Il limite del calcestruzzo spruzzato consisteva nel fatto che si dovesse aspettare il tempo di maturazione per il raggiungimento della resistenza. Qualora



**Figura 2.5:** Messa in opera del getto di calcestruzzo (Gentili, 1969)

le condizioni del terreno attraversato fossero tali da non poter attendere, il problema veniva superato utilizzando delle centine metalliche che venivano poi ricoperte con il getto di calcestruzzo. Questi elementi si comportavano come una serie di archi in cemento armato che resistevano anche al taglio, alla flessione e alle distribuzioni irregolari delle spinte. In aggiunta alle centine, per garantire un supporto nei primi istanti dell'applicazione del calcestruzzo, vennero utilizzate le reti metalliche.

Se si fosse verificata la necessità di aumentare lo spessore del rivestimento in calcestruzzo spruzzato, sarebbe stato sufficiente ripetere il getto dal momento che questo materiale offriva la possibilità di poter essere applicato in più riprese senza sfogliarsi. Questo consentiva di poter utilizzare il calcestruzzo spruzzato come supporto definitivo della galleria: era infatti sufficiente eseguire un ulteriore strato che potesse conferire all'opera un aumento del grado di sicurezza. Il ragionamento che si faceva era quello di ammettere che il primo strato, eseguito durante lo scavo, permettesse di raggiungere un fattore di sicurezza prossimo all'unità ed il secondo strato servisse ad incrementare tale coefficiente.

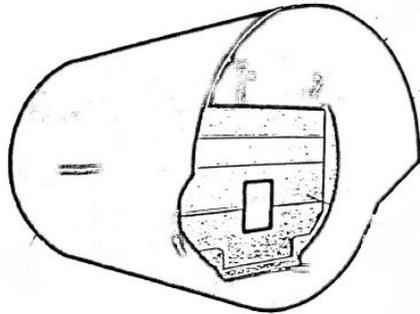
## 2.4 Metodi costruttivi degli anni '80 e '90 del Novecento

Negli anni in esame il numero di gallerie autostradali in costruzione fu molto ridotto in confronto ai decenni precedenti: molte tratte, infatti, vennero inaugurate e divennero completamente percorribili già negli anni '70. Un importante progetto di questo periodo fu il potenziamento della tratta appenninica dell'autostrada del Sole (Bergamo, 2002) che prevedeva anche la costruzione di alcune gallerie per evitare tratti molto tortuosi che venivano percorsi ad una velocità compresa tra i 40 e i 60 km/h, troppo bassa per gli standard autostradali.

Il metodo di scavo che veniva utilizzato per la costruzione di gallerie con grande diametro era quello per fasi (Innaurato, 2001). L'attacco in cunetta permetteva di costruire subito il rivestimento definitivo dal basso verso l'alto e di drenare la parte di sezione che sarebbe stata scavata nelle fasi successive. L'attacco in calotta era da preferire in presenza di rocce mediamente stabili perché permetteva la costruzione del rivestimento definitivo che avrebbe protetto il fronte di scavo, ma il procedere a scavare dall'alto verso il basso poteva rendere poco stabile il supporto. Tale metodo era inoltre evitato in presenza di venute d'acqua.

Lo scavo era effettuato, come negli anni precedenti, con macchine o con esplosivo, ma nei terreni incoerenti il mezzo utilizzato era lo scudo. Esso permetteva l'avanzamento a piena sezione, il sostegno del terreno fino al fronte e l'immediata messa in opera del sostegno definitivo. Le parti che costituivano uno scudo (Figura 2.6) erano un anello tagliente che serviva per facilitare la penetrazione della macchina nel terreno e che era dotato di una tettoia in lamiera, un corpo centrale che conteneva i martinetti a spinta per l'infissione nel terreno della macchina, la coda che serviva a proteggere gli operai durante la messa in opera del rivestimento definitivo.

Vi erano poi alcune varianti dello scudo descritto in precedenza: quello semi-meccanizzato (Figura 2.7) era provvisto di un braccio escavatore, quello meccanizzato era munito di una testa rotante dotata di utensili in grado



**Figura 2.6:** Scudo non meccanizzato (Innaurato, 2001)



**Figura 2.7:** Scudo semi-meccanizzato ([www.skyscrapercity.com](http://www.skyscrapercity.com))

di disgregare il terreno. Lo scudo meccanizzato può essere definito come l'antenato delle moderne TBM di cui si parlerà in seguito.

L'armatura del cavo avveniva mediante calcestruzzo proiettato il cui effetto poteva essere migliorato dall'utilizzo di bulloni e centine. I bulloni e le chiodature venivano inseriti per aumentare la stabilità del fronte di scavo e delle pareti. Questa operazione poteva essere preceduta o seguita da un getto di calcestruzzo proiettato. Le centine erano inglobate nel calcestruzzo in modo tale da costituire un rivestimento simile ad un anello in calcestruzzo armato. Queste potevano essere deformabili e si utilizzavano quando era ammessa una certa convergenza della sezione trasversale della galleria: il loro

vantaggio era la riduzione del carico sull'armatura. La maglia metallica che veniva annegata nel calcestruzzo, in funzione di armatura, venne poi sostituita con fibre metalliche che erano addizionate al composto prima del getto. Altri tipi di calcestruzzo fibrorinforzato prevedevano l'aggiunta di fibre di nylon, polipropilene, vetro, acciaio e ghisa. Il rivestimento definitivo completava le funzioni strutturali già assegnate ai sostegni provvisori. Gli archi che componevano il sostegno potevano essere di calcestruzzo gettato in opera, utilizzato in gallerie con grande diametro e scavate in terreni di buona qualità, oppure composti da conci prefabbricati, qualora lo scavo fosse avvenuto con scudo. I rivestimenti prefabbricati consistevano in anelli, composti da conci, che venivano riposti nella coda dello scudo e messi in posa a mano a mano che lo scavo procedeva. Il serraggio dei pezzi che componevano l'anello era garantito dal concio di chiave che era foggato a cuneo. Il materiale migliore da utilizzare era la ghisa poiché resisteva alla corrosione, all'acqua, alla compressione e agli urti.

## 2.5 Metodi costruttivi dal 2000 ad oggi

Negli ultimi venti anni tutte le tecnologie citate in precedenza sono state modernizzate ed automatizzate grazie allo sviluppo della meccanica e dell'informatica di avanguardia.

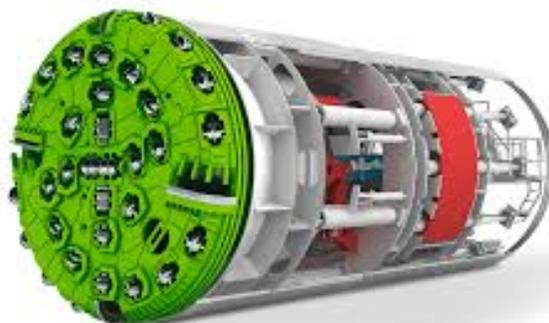
Nella costruzione di gallerie autostradali lo scavo tradizionale per fasi viene tuttora adottato: un esempio prevede l'attacco in calotta a cui segue poi lo scavo del ribasso e dell'arco rovescio (Barla, 2010). Il rivestimento provvisorio è costituito da centine metalliche e calcestruzzo proiettato. Quando la stabilità della calotta non può essere garantita a causa della scadente qualità dell'ammasso roccioso, si procede con gli infilaggi: si crea un ombrello di tubi, che possono essere iniettati o cementati, sul perimetro del cavo, in modo tale da proteggere la zona di avanzamento e ridistribuire uniformemente gli sforzi sulle centine. Un altro tipo di scavo tradizionale per fasi ancora oggi utilizzato è l'avanzamento ad attacchi laterali, in cui si divide la sezione in tre parti, due laterali ed una centrale, e si inizia a scavare dai bordi.

Lo scavo a piena sezione è utilizzato nei terreni che possono garantire una buona stabilità del fronte di scavo: questa può essere migliorata aumentando la rigidità del nucleo con l'inserimento di tubi in vetroresina e jet-grouting. I mezzi di scavo utilizzati sono gli esplosivi e le frese ad attacco localizzato: il vantaggio di queste ultime consiste nella possibilità di creare sezioni di forma qualsiasi. Le frese possono essere protette da scudi che permettono di svolgere lo scavo anche in presenza di terreni instabili. Lo smarino viene trasportato all'esterno della galleria attraverso nastri trasportatori.

Nella costruzione di gallerie autostradali è sempre più utilizzato lo scavo meccanizzato che prevede l'utilizzo di una fresa a piena sezione: la TBM (tunnel boring machine) (Figura 2.8). Questa macchina è costituita da tre corpi: la testa rotante, il sistema meccanico capace di far avanzare lo scavo, un apparato di sgombero dei detriti prodotti dalla perforazione. La testa rotante è dotata di diversi utensili capaci di tagliare e disgregare i terreni e le rocce attraversate durante lo scavo. Le TBM si differenziano in base al tipo di terreno che sono in grado di attraversare: quelle idonee allo scavo della roccia devono essere dotate di utensili molto duri e resistenti, quelle capaci di penetrare nei terreni sciolti devono essere in grado di contrastare le pressioni dovute all'instabilità del fronte di scavo. Queste macchine si suddividono poi in aperte e scudate. Le prime, essendo prive di scudo protettivo, vengono utilizzate in rocce di buona qualità. Le seconde sono caratterizzate dalla presenza di una struttura cilindrica altamente resistente che protegge il corpo centrale della macchina e sotto il quale vengono montati i conci prefabbricati che compongono il sostegno definitivo.

## 2.6 Alcune gallerie autostradali italiane

La costruzione della **galleria autostradale del Frejus**, iniziata nel 1974 e conclusa nel 1980, che collega Bardonecchia, comune italiano, con Modane, in Francia, si caratterizza per una serie di innovazioni dal punto di vista progettuale. La perforazione ad aria compressa fu sostituita con quella elettroidraulica, sperimentata per la prima volta in un tratto di galleria così esteso. La stabilità del cavo era garantita dalla messa in opera di bulloni, il cui dia-



**Figura 2.8:** TBM ([www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com))

metro era di 24 millimetri, di lunghezza variabile tra i 3 e i 5 metri (Barla, 2005).

La **galleria Apparizione**, localizzata sulla A12 in provincia di Genova, fu inaugurata nel 1969 (Martinelli e Minghetti, 1965). Per la sua realizzazione fu adottato il calcestruzzo proiettato, ma a causa della bassa qualità dell'ammasso roccioso attraversato, fu necessario aumentare lo spessore dello strato in calotta e rinforzare il getto con centine metalliche a sezione triangolare e con una rete metallica capace di supportare gli sforzi durante la fase di presa del calcestruzzo. I primi 80 metri della galleria furono scavati per fasi, a mezza sezione, e successivamente, visti i buoni risultati ottenuti con il sistema di supporto sopra citato, si proseguì con lo scavo a sezione completa.

Sulla A14 la **galleria Cavallo**, in provincia di Ancona, inaugurata nel 1969, è stata oggetto di un recente ammodernamento (Lunardi et al., 2013): la galleria riservata al traffico in direzione nord è stata dismessa ed è stata sostituita, dopo il suo ampliamento, da quella che fino a quel momento era destinata al traffico nella direzione opposta. Una nuova galleria è stata costruita per condurre verso sud. La sezione predisposta per la nuova opera è di tipo C1 ETJ (Figura 2.9) e per realizzarla sono stati eseguiti dei trattamenti di jet-grouting sul contorno, è stata disposta una centina al piede e sul fronte sono stati inseriti tubi in vetroresina per garantirne la stabilità.

Nel 1977, per la costruzione della A20 e della **galleria Calavà**, in provin-

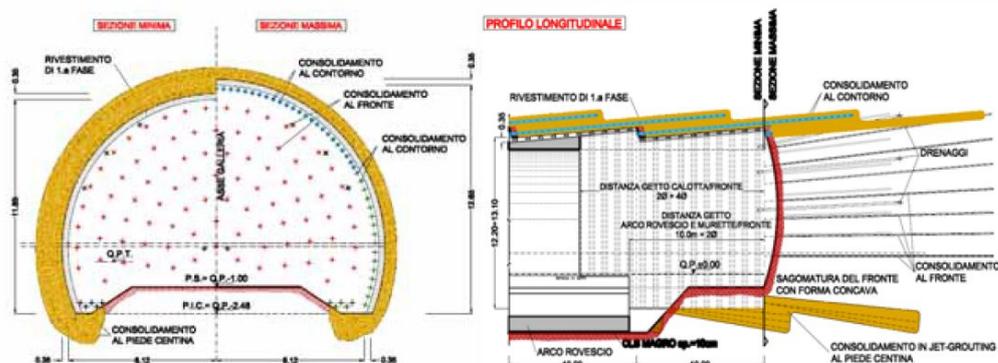


Figura 2.9: Sezione C1 ETJ della galleria Cavallo (Lunardi et al., 2013)

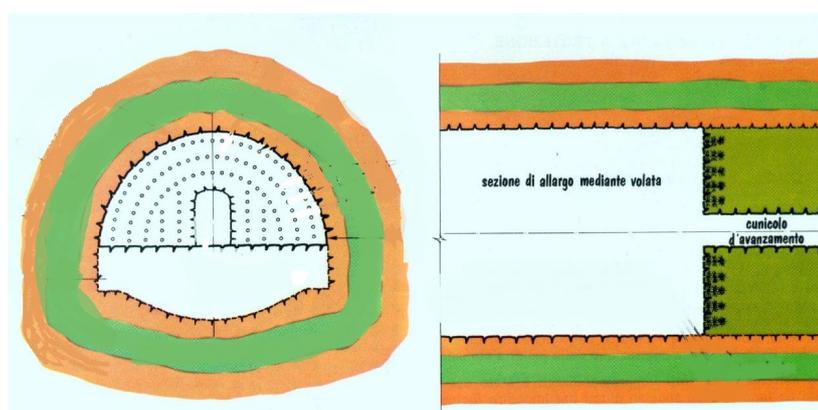


Figura 2.10: Sezioni della galleria Calavà, *trattamento a sandwich* (Garassi, 2015)

cia di Messina, lo scavo fu fatto in presenza di gas tossici in pressione (Garassi, 2015). La soluzione al problema consistette in una serie di trattamenti e procedure eseguite durante l'avanzamento dei lavori. Le iniezioni cementizie e chimiche resero la roccia impermeabile al gas, lo scavo fu effettuato per fasi a partire da un cunicolo di 6 metri quadrati che veniva poi allargato mediante volata. Per contorno della galleria fu utilizzato il 'trattamento a sandwich' che prevedeva uno strato di roccia trattata con resina acrilica, rappresentato in verde nella Figura 2.10, circondato da due strati trattati con miscela cementizie, indicate in rosso.

La **galleria Sparvo**, sulla A1 Variante di Valico, inaugurata nel dicembre 2015, è stata costruita impiegando la più grande TBM al mondo: 'Martina', acquistata nel 2010 da Toto Costruzioni Generali (Toto Costruzioni Generali,

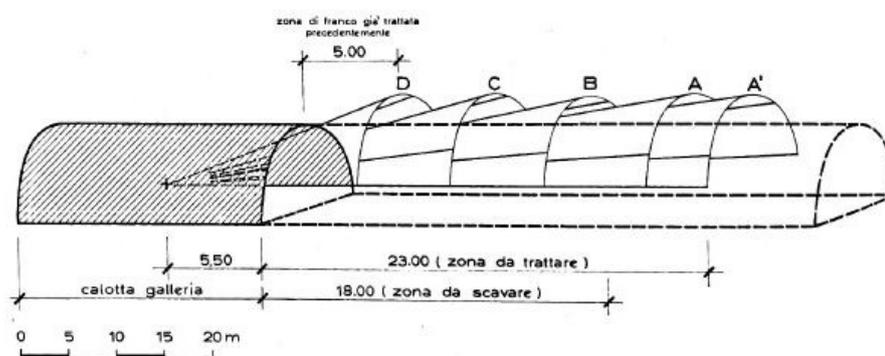
2019). Grazie a questa macchina il tunnel è stato scavato e rivestito in tempi da record: sono stati raggiunti i 24 metri al giorno. Martina ha un diametro di scavo pari a 15,62 metri, è lunga 130 metri e pesa 4.500 tonnellate.

I lavori per l'autostrada della Valle D'Aosta iniziarono nel febbraio 1965 (Grasso, 1969). La prima **galleria** ad essere perforata fu quella **di Hone**. Le buone caratteristiche della roccia attraversata permisero lo scavo a piena sezione con utilizzo di esplosivo. Una volta scavata la galleria, la roccia risultò ancora di buona qualità per cui non venne posto in opera nessun sostegno provvisorio se non qualche sporadico bullonaggio. Presso gli imbocchi del tunnel, dove la qualità del terreno era più scadente, furono utilizzate centine metalliche a distanza di un metro le une dalle altre. Per il rivestimento definitivo si utilizzò il calcestruzzo con spessore variabile tra i 50 e 100 centimetri a seconda della stabilità del cavo.

Nel 1966, sulla stessa autostrada destinata a collegare Quincinetto ed Aosta, vennero costruite altre gallerie tra cui quella doppia di **Montjovet**. Per la costruzione di queste due gallerie parallele fu previsto lo scavo a piena sezione ed in parallelo, ma a causa della cattiva qualità della roccia si dovette cambiare metodologia costruttiva. Si optò per la costruzione delle due gallerie in tempi diversi e si proseguì con lo scavo per fasi: l'attacco in calotta, eseguito a piena sezione, era seguito dall'abbattimento dello strozzo e dei piedritti adottando il jumbo Ingersoll a quattro bracci montato su autocarro. Appena terminato lo scavo, il cavo veniva rivestito con calcestruzzo di spessore 70 centimetri.

La **galleria Petit Monde**, sulla stessa tratta delle precedenti, fu realizzata con lo scavo per fasi: a partire dagli imbocchi a nord il tunnel venne realizzato con scavo a piena sezione della calotta, che veniva successivamente ampliato. Il cavo era sostenuto da centine metalliche su cui poggiavano i marciavanti tondi. Con il procedere della lavorazione veniva costruito il rivestimento definitivo in calcestruzzo di spessore 100 centimetri.

Nel 1968, durante la costruzione della **galleria Serra dell'Ospedale**, sulla A3 Salerno - Reggio Calabria in provincia di Cosenza, si dovette affrontare lo scavo in terreni sabbiosi e sotto falda (Balossi Restelli, 1969). Lo scavo, che fino a quel momento era stato effettuato tramite avanzamento in calotta



**Figura 2.11:** Galleria Serra dell'Ospedale, schema del trattamento a regime di avanzamento (Balossi Restelli, 1969)

e posizionamento di centine metalliche con successivo rivestimento e ripresa dello scavo dei piedritti e dell'arco rovescio, dovette interrompersi a causa dell'incontenibilità delle sabbie. La collina che era attraversata dall'opera fu soggetta a sformellamento e rilasci di terreno e la galleria fu invasa da una grande massa di sabbia che fece retrocedere il fronte di circa 20 metri. Per cercare di risolvere il problema furono collocate importanti opere drenanti al fine di allontanare le acque dal fronte di scavo. Questa operazione però non bastò e si optò per un consolidamento mediante iniezioni che avrebbero trasformato le sabbie in una sorta di agglomerato rigido simile ad arenaria per prevenire future erosioni. Il trattamento venne eseguito sia sul fronte di scavo con uno schema a regime di avanzamento (Figura 2.11) che creava un arco a protezione del cavo, sia dall'esterno, a partire dalla collina.

Una soluzione simile alla precedente fu adottata, negli stessi anni, anche per la **galleria Scampitella**, sulla A16 in provincia di Avellino (Balossi Restelli e Ginetti, 1969). In questo caso il terreno attraversato aveva una forte componente limosa satura. Le acque vennero drenate e furono eseguite delle iniezioni nel terreno.

Sull'autostrada Genova – Sestri Levante, inaugurata nel 1969, alcune gallerie necessitarono di particolare attenzione durante la loro costruzione a causa della scarsa qualità degli ammassi rocciosi attraversati. La **galleria Monte Sperone** fu scavata con il sistema che prevedeva l'attacco in calotta, l'armatura in legno e il successivo sostegno definitivo con centine metalliche immerse

nel calcestruzzo. Durante lo scavo si verificò il crollo di una considerevole parte della calotta, il vuoto creato fu riempito con calcestruzzo ma fu necessario armare maggiormente i successivi tratti che man mano erano scavati. Nel giro di poco tempo il rivestimento definitivo iniziò a mostrare lesioni e si dovette ricorrere alla messa in opera di un ulteriore sostegno in calcestruzzo prefabbricato per ripristinare l'equilibrio tensionale. La stessa sorte toccò anche alla **galleria Sant'Agostino** e alla **galleria Madonna della neve**. Quest'ultima, per aumentarne la stabilità, fu oggetto di iniezioni di boiaccia di cemento che, andando a colmare i vuoti, consolidò la roccia.

# Capitolo 3

## Tipologie di difetti e manutenzione delle gallerie

### 3.1 Introduzione

Le gallerie sono costruite per consentire un passaggio lineare laddove la conformazione del territorio non lo consentirebbe. Queste opere, come tutte le strutture, sono soggette all'invecchiamento e a cambiamenti che possono minare la loro stabilità e funzionalità provocando situazioni di pericolo per l'utente. A seconda dell'età della costruzione i danneggiamenti a cui questa sarà soggetta saranno diversi, ma una evidenza comune a tutte le gallerie è il fatto che il loro comportamento è sempre influenzato dall'intensità dei cambiamenti del terreno nel quale sono costruite (Centre d'Études des Tunnels, 2015a).

Tutti gli elementi che compongono una galleria possono andare incontro a deterioramento e danneggiamento causati dalla progettazione, dalla costruzione e dalla messa in opera. Le cause che provocano l'insorgenza di difetti possono essere interne o esterne. Nel primo caso ciò che ha procurato il danneggiamento risiede nelle caratteristiche del materiale stesso quali, ad esempio, la propria composizione, la porosità, le fessurazioni. Con cause esterne si intende, invece, tutto ciò che è collegato all'ambiente che circonda la struttura: la spinta del terreno, la presenza di sostanze chimiche o di acqua nel suolo,

per citare degli esempi.

Il monitoraggio delle strutture include il controllo e le ispezioni atte a rivelare le condizioni in cui queste versano. Questo può essere continuo, periodico o all'occorrenza, a seconda degli eventi che caratterizzano la storia della galleria. Nel primo caso tutti i dati vengono registrati e confrontati con i precedenti per poter intervenire tempestivamente in caso di preoccupanti differenze. Il monitoraggio periodico include le ispezioni annuali, le visite di valutazioni e i controlli che possono coinvolgere l'intera struttura o alcune sue parti.

In Italia la legge che governa l'ispezione delle gallerie e la loro manutenzione è stata recentemente aggiornata: nel luglio 2020 è stata emanata la circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 07/07/2020 n. 269. L'atto permette l'utilizzo di metodi innovativi di indagine delle gallerie ed è integrativo delle circolari del Ministero dei Lavori Pubblici 19/07/1967 n 6736 e 25/02/1991 n 34233 che consentono di indagare lo stato delle infrastrutture del territorio italiano. L'Unione Europea ha affrontato la tematica della sicurezza e della manutenzione delle infrastrutture in alcune direttive quali la 2019/1936 che modifica la precedente 2008/96 riguardante la gestione e la sicurezza. Un'altra importante direttiva è la 2004/54/CE che sancisce i requisiti minimi di sicurezza della rete autostradale transeuropea. L'attuazione italiana di tale direttiva è il decreto legislativo del 5 ottobre 2006 n. 264 (Bollettino di legislazione tecnica, 2020).

## 3.2 Gli ammaloramenti

Il Centre d'Études des Tunnels nel 2015 ha pubblicato un elenco di tutti i difetti e i danneggiamenti riscontrati nelle gallerie, suddividendoli in macrocategorie a cui è associata una sigla che permette di identificare l'ammaloramamento in modo univoco. Nel seguito vengono descritti i difetti riportati nel 'Road Tunnel civil engineering inspection guide, book 2'.

**Interazione con l'acqua – sigla HY**

Questa categoria racchiude al suo interno quattro difetti:

*Infiltrazioni d'acqua* (HY-1) che si presentano come rigoli che sgorgano da fessure e buchi presenti nel rivestimento della galleria. Tale difetto può provocare l'indebolimento della struttura e la caduta di stalattiti di ghiaccio negli inverni più rigidi. Per poter osservare il fenomeno è sufficiente un'ispezione visiva. Possibili soluzioni al problema potrebbero essere la costruzione di un nuovo sistema di canalizzazione delle acque con dreni e canaline, una totale impermeabilizzazione o la riparazione del sistema di drenaggio.

*Concrezioni* (HY-2) riconoscibili attraverso ispezione visiva. Il fenomeno si presenta come uno strato di materiale solido cristallizzato che può assumere diversi colori. Il distacco di alcuni frammenti potrebbe costituire un pericolo per l'utenza. Dal punto di vista strutturale la presenza di concrezioni non costituisce un pericolo a meno che non si abbia evidenza di attacco da parte di solfati. Per poter ovviare a questo deterioramento si dovrebbe impedire l'ingresso di acqua nella struttura e rimuovere la patina.

*Effetti del gelo* (HY-3) tra cui la formazione di stalattiti, crepe e danneggiamento della carreggiata dovuti all'aumento di volume a cui è soggetta l'acqua nel passaggio dallo stato liquido a solido. Il metodo di ispezione per questo danneggiamento è visivo. La caduta del ghiaccio dalla calotta e la presenza di lastre sulla carreggiata possono provocare incidenti in galleria e per questo l'ingresso di acqua deve essere impedito attraverso l'impermeabilizzazione e il miglioramento del sistema di drenaggio.

*Efflorescenze su malta e calcestruzzo* (HY-4) che alterano l'aspetto del rivestimento. Questo ammaloramento non provoca danni strutturali e non costituisce un pericolo per la sicurezza degli utenti.



**Figura 3.1:** Esempio di concrezione (HY-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

### **Deterioramenti dovuti al terreno circostante – sigla ZI**

A questa tipologia di danneggiamento appartengono:

*Carsi e cavità (ZI-1)* che si sviluppano in seguito alla dissoluzione del terreno nel primo caso, e al distacco di blocchi di roccia caratterizzati da bassa coesione, nel secondo. La presenza di vuoti nell'intorno della galleria può essere evidenziata con l'ispezione visiva, con radar o topografica. La caduta di materiale sulla carreggiata può costituire un pericolo per l'utenza e la presenza di vuoti nell'intorno del rivestimento può causare una redistribuzione degli sforzi e il conseguente indebolimento della struttura. Per risolvere il problema è necessario intervenire con reti e chiodature per evitare la caduta dei blocchi e incrementare il drenaggio delle acque per evitare lo scioglimento dei terreni.

*Deterioramento dei portali (ZI-2)* che si caratterizza nella presenza di blocchi instabili che potrebbero cadere sulla carreggiata o nel deterioramento dei materiali. Il danneggiamento è visibile con ispezione visiva e può essere risolto ricorrendo a metodi che prevengano la caduta di massi quali reti e bulloni.

*Instabilità dei pendii (ZI-3)* nei quali la galleria è costruita. Lo scivolamento e lo spostamento dei terreni nell'intorno della struttura provocano deformazioni che possono compromettere la sicurezza degli utenti e condurre la costruzione al collasso. Per risolvere il problema si deve intervenire sui terreni soggetti all'instabilità e rinforzare la galleria stessa.



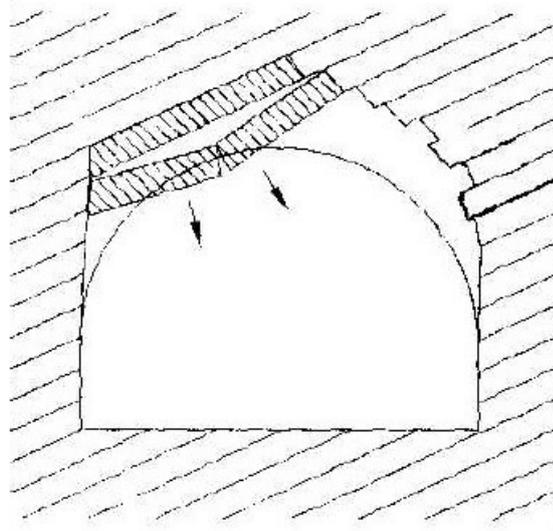
**Figura 3.2:** Esempio di portale deformato da instabilità del versante (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

**Deterioramenti nelle sezioni non rivestite – sigla NR**

I problemi che appartengono a questa categoria sono riscontrabili in gallerie prive di rivestimento:

*Distacco di blocchi da roccia alterata (NR-1)* dovuto alla presenza di giunti con una coesione molto bassa all'interno dell'ammasso roccioso entro cui la galleria è costruita. La presenza di blocchi instabili può essere evidenziata da un'ispezione visiva o uditiva effettuata con leggeri colpi di martello. Per risolvere il problema è necessario intervenire con reti e bulloni per prevenire la caduta di blocchi sulla carreggiata.

*Distacco di porzioni da roccia stratificata (NR-2)* che possono invadere la carreggiata. Questo problema è del tutto simile al precedente ad eccezione del fatto che i blocchi si presentano sotto forma di lastre.



**Figura 3.3:** Scherma del meccanismo di distacco da roccia stratificata (NR-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

**Deterioramento dei materiali di rivestimento: rivestimenti in muratura o pietra – sigla RM**

Cinque ammaloramenti appartengono a questa categoria:

*Deterioramento superficiale a nido d'ape* (RM-1) che si presenta come cavità all'interno del mattone o della pietra. Il difetto è ispezionabile per via visiva e tattile. La riparazione è consigliata solo nel caso in cui il difetto vada a minare la stabilità dell'arco.

*Desquamazione* (RM-2) tipica dei rivestimenti in pietra: i blocchi appaiono friabili in superficie. Una pulizia periodica può risolvere il problema.

*Esfoliazione* (RM-3) dei blocchi di rivestimento in pietra: strati di materiale si disgregano rendendo ben visibili dei solchi di diverso spessore. La caduta di frammenti può costituire un pericolo. Per risolvere il problema si dovrebbe rivestire la galleria con calcestruzzo proiettato.

*Distaccamenti dovuti a carichi di compressione* (RM-4) causati dal fatto che le pressioni tendono a frantumare i blocchi quando questi non sono abbastanza resistenti. I detriti possono cadere sulla carreggiata causando incidenti. Le soluzioni al difetto consistono nella rimozione periodica dei blocchi instabili, l'installazione di reti, la costruzione di un nuovo rivestimento in caso di gravi danni a quello esistente.

*Deterioramento dei letti di malta* (RM-5) che si sgretolano fino a scomparire. Questo può causare l'indebolimento della galleria e la caduta di detriti. Per ovviare al problema si può rinforzare la struttura o iniettare della nuova malta tra le giunture.



**Figura 3.4:** Esempio di deterioramento della malta (RM-5) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

**Deterioramento dei materiali di rivestimento: rivestimenti in calcestruzzo (gettato in opera o prefabbricato) – sigla RB**

Questa categoria comprende cinque difetti:

*Scheggiatura* (RB-1) ovvero il segno lasciato dalla perdita di frammenti di rivestimento su un parte sporgente o su uno spigolo. Tale danneggiamento influisce sull'aspetto della struttura ma non sulla sua funzionalità. I provvedimenti devono essere attuati nel caso in cui il danno comprometta la stabilità della galleria.

*Rigonfiamenti* (RB-2) che provocano la comparsa di crepe nel rivestimento. Per poter accertare la presenza di questo ammaloramento è necessario procedere con un'ispezione visiva e uditiva analizzando il suono prodotto da colpi di martello. L'espansione del rivestimento in seguito a reazioni chimiche o alla formazione di ghiaccio al suo interno può provocare il distacco di alcune sue parti e l'indebolimento della struttura. I rimedi per questo tipo di problema sono il miglioramento del sistema di drenaggio, le iniezioni di malta nel terreno circostante, fino ad arrivare alla ricostruzione dell'opera.

*Lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione (RB-3)* provocano il danneggiamento della struttura e la rottura del rivestimento e la caduta di frammenti di calcestruzzo sulla carreggiata. Questo problema può causare situazioni di grave pericolo e per questo motivo è necessario installare dei sistemi di monitoraggio che evidenzino eventuali deformazioni. Quando il rivestimento non è capace di resistere alla compressione è necessario rinforzarlo o ricostruirlo a seconda dell'entità delle forze in gioco.

*Lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature (RB-4)* che causano la caduta di frammenti e la perdita di resistenza da parte del calcestruzzo armato. Poiché le armature ossidate perdono le loro proprietà strutturali, è necessario ricostruire il rivestimento oppure aggiustare le parti più danneggiate.

*Deterioramento dello shotcrete (RB-5)*. Il calcestruzzo proiettato può deteriorarsi in modi diversi, ad esempio può fessurarsi, assottigliarsi, diventare poco aderente alle altre parti del rivestimento e sgretolarsi. L'ispezione dello shotcrete è sia visiva che uditiva. La perdita di frammenti dalle pareti del rivestimento può costituire un pericolo per l'utenza. A seconda dell'intensità del danno e della sua estensione potrebbero sorgere anche problemi strutturali. Per rimediare ai deterioramenti si deve provvedere alla riparazione del rivestimento e alla rimozione delle parti instabili.



**Figura 3.5:** Esempio di assottigliamento dello shotcrete (RB-5) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

**Deterioramento dei sistemi di impermeabilizzazione, drenaggi e raccolta acque superficiali – sigla ED**

A questa categoria appartengono nove danneggiamenti:

*Deterioramento del drenaggio d'intradosso (ED-1)* che può causare perdite stillicidio e gocciolamento di acqua che può bagnare la carreggiata. In inverno possono formarsi strati di ghiaccio che possono provocare incidenti in galleria. La presenza di acqua all'interno del rivestimento può causarne il deterioramento e il progressivo indebolimento. La riparazione dei dreni consente di poter rimediare a questo problema.

*Deterioramento delle canalette di raccolta in calotta (ED-2)* che possono otturarsi a causa di concrezioni o di corpi estranei con la conseguente perdita di acqua dall'alto sulla carreggiata. La sostituzione delle canalette o la loro disostruzione consente di porre fine al deterioramento degli elementi.

*Deterioramento delle canalette di raccolta in carreggiata (ED-3)*, analogamente a quelle descritte precedentemente, questi elementi possono ostruirsi. A causa della loro posizione possono rompersi in seguito a urti avvenuti durante incidenti stradali. La riparazione o sostituzione dei canali permette di poter risolvere in breve tempo il problema della presenza di acqua sulla carreggiata.

*Deterioramento delle membrane impermeabilizzanti (ED-4)* può provocare un precoce invecchiamento del rivestimento. Se il danno è visibile ed ispezionabile è consigliata la riparazione, altrimenti, se le condizioni del rivestimento sono buone, si può evitare di intervenire dal momento che le membrane sono poste in estradosso.

*Deterioramento delle onduline (ED-5)* causato da urti dovuti a incidenti stradali o dall'ossidazione del ferro che le compone. Questo difetto può causare l'indebolimento della struttura a causa della presenza di acqua e per questo motivo è consigliato sostituire le onduline danneggiate.

*Rigonfiamento delle membrane impermeabilizzanti (ED-6)* che può provocare la comparsa di vesciche di distacco capaci di scoppiare per la pressione o il congelamento. Questo problema può comportare la caduta di piccoli frammenti di rivestimento e la presenza di acqua all'interno della galleria. La rimozione delle parti più danneggiate e la ricostruzione permette di poter porre rimedio al danneggiamento.

*Deterioramento dei rivestimenti in malta (ED-7)* che possono presentarsi crepati, forati o poco aderenti agli altri elementi della struttura. La caduta di detriti può mettere in pericolo gli utenti della galleria e per questo motivo il problema può essere risolto con la riparazione degli strati di malta danneggiati.

*Deterioramento dei pannelli isolanti impermeabili (ED-8)* che provoca la comparsa di macchie umide sul rivestimento della struttura e sulla carreggiata. L'impermeabilizzazione localizzata, effettuata tramite iniezioni, costituisce un buon rimedio a tale problematica.

*Deterioramento dei cordoli idroespandibili (ED-9)* che provoca strati frantumanti che possono diventare spessi fino a 10 centimetri. Il problema può essere esaminato attraverso ispezioni visive e uditive analizzando il suono emesso dal rivestimento quando viene colpito con un martello. La caduta di frammenti sulla carreggiata e l'indebolimento della struttura sono le conseguenze di questo ammaloramento. Le possibili soluzioni sono la sostituzione degli elementi deteriorati e il rinforzo del sostegno nel caso in cui questo fosse ormai troppo danneggiato.



**Figura 3.6:** Esempio di deterioramento delle onduline (ED-5) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

### **Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria: fessure -sigla FI**

In questa categoria vengono raccolte cinque tipologie di fessurazioni diverse:

*Fessure orizzontali* (FI-1) che si formano in direzione parallela all'asse della galleria e possono indebolire la struttura. Le cause di questa formazione risiedono nel danneggiamento del rivestimento. Se la struttura non mostra segnali di cedimento o deformazione è possibile non intervenire

*Fessure diagonali* (FI-2) dovute a deformazioni date dal movimento del terreno circostante o da cedimenti differenziali della struttura. Anche in questo caso è possibile non intervenire se la stabilità della galleria non viene alterata.

*Fessure verticali* (FI-3) del tutto simili a quelle diagonali citate sopra.

*Fessure da ritiro* (FI-4) che sono sottili e la cui lunghezza aumenta nel tempo. Queste fessure non sono pericolose né dal punto di vista strutturale né da quello funzionale e per questo motivo non devono essere riparate.

*Fessure curvilinee* (FI-5) localizzate in prossimità di angoli o di intersezioni tra elementi con forma differente. Questo difetto è estetico e può essere ridotto iniettando malta nelle crepe.



**Figura 3.7:** Esempio di fessure diagonali (FI-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

### **Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria: deformazioni- sigla DF**

A questa categoria appartengono cinque tipi di deformazioni:

*Abbassamento in chiave - Innalzamento in chiave - Deformazione asimmetrica* (DF-1) riconducibili a cambiamenti nella forma della galleria con il suo conseguente indebolimento. Se la deformazione non è causata da un difetto costruttivo ma dall'azione delle spinte sulla struttura il problema può essere considerato di grave entità e deve essere risolto tempestivamente con un rinforzo per evitare il collasso.

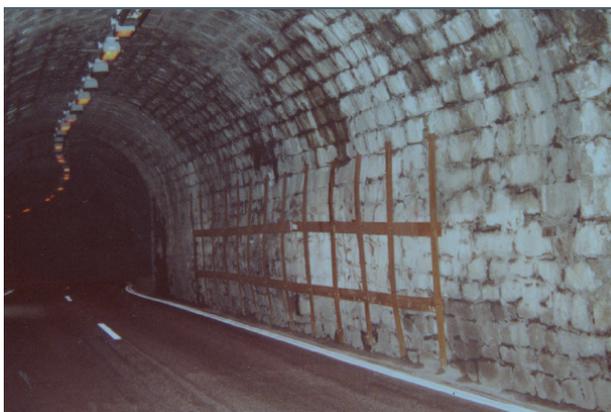
*Imbozzamento localizzato* (DF-2) che si presenta come un gonfiore su una parte di galleria. Questo difetto può essere causato da errori costruttivi o dal movimento del terreno nel quale la struttura è inserita. La pericolosità del problema dipende dall'entità del danno e dalle cause

scatenanti e per questo i rimedi proposti variano dal bullonaggio alla ricostruzione.

*Disassamento dei conci murari (DF-3)* che può essere causato dalla cattiva qualità della malta utilizzata durante la costruzione. Il disallineamento degli elementi può causare la loro caduta sulla carreggiata e l'indebolimento del rivestimento. Il rinforzo tramite bulloni o con calcestruzzo proiettato permette di rimediare al problema.

*Deterioramento dell'arco rovescio (DF-4)* che si riflette sulle condizioni della carreggiata che può sprofondare e deformarsi. L'infiltrazione di acqua in questa parte di struttura è tra le cause dell'ammaloramento. La ricostruzione dell'arco rovescio comporta la distruzione della strada e per questo motivo è necessario prevenire questo ammaloramento con sondaggi e ispezioni.

*Rottura dell'arco (DF-5)* che è preceduta da segnali allarmanti quali forti deformazioni e rotture localizzate. L'ispezione visiva e uditiva permette di identificare la presenza di sezioni instabili. Tra le cause vi sono le deformazioni dovute alle spinte del terreno, l'ingresso di grandi flussi di acqua, il deterioramento dei materiali di rivestimento. Questo danneggiamento provoca il collasso delle parti interessate e il crollo di materiale sulla carreggiata. Per rimediare è necessario costruire quanto più velocemente possibile un rinforzo idoneo.



**Figura 3.8:** Esempio di imbozzamento (DF-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

**Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria: difetti legati alla realizzazione dell'opera-sigla MO**

Cinque ammaloramenti appartengono a questa categoria:

*Fondi di fori di scoppio instabili (MO-1)* identificabili da crepe che si sviluppano a raggiera attorno a queste formazioni. I detriti possono cadere sulla carreggiata e danneggiare altri elementi della galleria. La rimozione dei frammenti instabili permette di prevenire situazioni di pericolo.

*Vuoti superficiali nel rivestimento (MO-2)* che sono determinati dal suono 'vuoto' che produce il martello battente. Questo danneggiamento può essere dovuto alla presenza di acqua o alla poca coesione del materiale. Per rimediare al problema si possono effettuare delle iniezioni di malta che vadano a colmare i vuoti.

*Vespai (MO-3)* aree caratterizzate dalla presenza di aggregati del calcestruzzo non più immersi nel cemento. Questo difetto può essere superficiale o profondo. La caduta di questi elementi può costituire un problema per l'incolumità dell'utenza e il deterioramento del calcestruzzo può indebolire la galleria. Come soluzione viene proposta la rimozione dei vespai e la riparazione con calcestruzzo proiettato.

*Deterioramento dei giunti in calcestruzzo (MO-4)* che separano due conci di calcestruzzo adiacenti. Gli spigoli possono rompersi o fessurarsi causando il deterioramento del materiale, per questo motivo si raccomanda la loro riparazione. La caduta di frammenti sulla strada può causare incidenti, dal punto di vista strutturale non si evidenziano problematiche.

*Difetti superficiali nel calcestruzzo (MO-5)* che si mostrano come alterazioni nel colore e nella sua uniformità. Il difetto è un inestetismo che non ha alcuna conseguenza e per questo motivo si può evitare l'intervento di riparazione.



**Figura 3.9:** Esempio di vespaio (MO-3) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

### **Altri deterioramenti- sigla EQ**

A questa categoria appartengono:

*Difetti della carreggiata stradale* (EQ-1) quali, per esempio, buche, avvallamenti e crepe. Le cause risiedono nella scorretta costruzione della strada e dalla conseguente infiltrazione d'acqua. Questo deterioramento può causare la perdita del controllo del veicolo. La riparazione della strada è consigliata quando la sicurezza stradale non è garantita.

*Deterioramento di lastre e tamponature* (EQ-2) con conseguente formazione di crepe e fratture che possono provocare la caduta di piccole parti di rivestimento sulla carreggiata. La riduzione della resistenza del rivestimento può trovare rimedio nell'installazione di un adeguato rinforzo e nella riparazione delle parti più rovinate.



**Figura 3.10:** Esempio di deterioramento di lastre (EQ-2) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

### **Deterioramenti associati al fuoco - sigla IN**

A questa categoria appartiene:

*Deterioramenti dovuti al fuoco (IN-1)* che si mostrano in vari modi a seconda del tipo di rivestimento, delle temperature raggiunte nell'incendio e del tempo di esposizione alla fonte di calore. Per questo motivo gli effetti possono variare dalla comparsa di macchie di fuliggine al crollo totale del segmento interessato dall'evento. Le soluzioni che possono porre rimedio al danneggiamento consistono nel rinforzo del rivestimento o nella sostituzione delle parti la cui funzione è compromessa definitivamente.



**Figura 3.11:** Esempio di deterioramento dovuto al fuoco (IN-1) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

**Deterioramenti causati da scarsa manutenzione – sigla EN**

Questi *deterioramenti dovuti alla scarsa manutenzione* (EN-1) possono costituire una fonte di rischio per gli utenti. Alcuni esempi di trascuratezza sono la mancata disostruzione dei drenaggi, la presenza di elementi stradali divenuti pericolanti dopo un urto o di attrezzature da cantiere abbandonate ai lati della strada. Eseguire dei regolari controlli nelle gallerie può evitare che si creino situazioni di pericolo.



**Figura 3.12:** Esempio di scarsa manutenzione del portale (EN-1) (Centre d'Études des Tunnels, 2015b)

### 3.3 Classificazione IQOA

Tutti gli ammaloramenti citati fino ad ora vengono rilevati durante l'ispezione che viene effettuata con l'obiettivo di definire il livello di danneggiamento, a cui è indirettamente associata anche la sicurezza, della galleria. La gravità di un difetto non è sempre proporzionale alla sua visibilità e grandezza: per questo motivo è necessario adoperare un sistema di classificazione che permetta di definire lo stato di salute della struttura. Il sistema che viene adoperato è quello IQOA, 'Image qualité des ouvrages d'art', suggerito dal Centre d'Etude des Tunnels nel 2015 e conforme alle prescrizioni contenute nelle circolari rilasciate dallo Stato italiano. Tale classificazione si suddivide in due parti, la prima permette di valutare i difetti civili, la seconda quelli legati alle venute d'acqua. La classificazione degli ammaloramenti non collegabili all'acqua (Tabella 3.1) permette di associare a fessure, lesioni e alterazioni un codice alfanumerico che ne identifica la gravità e il relativo tempo entro cui effettuare un intervento per porre fine alla problematica. La differenza tra questa classificazione e quella relativa alle venute d'acqua (Tabella 3.2) risiede nel fatto che i codici alfanumerici associati agli ammaloramenti hanno significati differenti. Di seguito si riportano i codici e i loro significati in termini di pericolosità e di urgenza.

1	In buono stato apparente
2	Difetti superficiali
2E	Difetti superficiali in evoluzione
3	Degrado profondo
3U	Degrado profondo che necessita di intervento urgente
S	Situazione di pericolo per gli utenti

**Tabella 3.1:** Classificazione IQOA: difetti civili

**Classificazione IQOA per difetti civili**

Classe 1 (associata al colore verde): area che appare in buono stato e che richiede solo manutenzione ordinaria

Classe 2 (associata al colore rosa): area con difetti superficiali che non causano situazioni di pericolo per la stabilità della struttura. Può essere richiesta una manutenzione correttiva non urgente.

Classe 2E (associata al colore giallo): area che include i danneggiamenti della classe 2 ma che potrebbero evolvere velocemente nel tempo provocando delle situazioni più pericolose di quelle attese. In questo caso è richiesta una manutenzione correttiva urgente.

Classe 3 (associata al colore arancione): area con degrado profondo i cui difetti indicano che la struttura è stata alterata e la stabilità della zona potrebbe essere compromessa. Queste aree richiedono lavori di protezione e riparazione non urgenti.

Classe 3U (associata al colore rosso): area che include gli ammaloramenti della classe 3 ma che richiede un intervento urgente poiché la zona in breve tempo potrebbe risultare instabile.

Indicazione S (associata al colore rosso): assegnata ad una delle classi precedenti quando i difetti possono mettere in pericolo l'utenza della galleria. Viene richiesta un'azione correttiva da svolgersi nell'immediato. Quando viene utilizzata questa indicazione l'opera non può essere più aperta al pubblico se non dopo la risoluzione della criticità rilevata.

**Classificazione IQOA per venute d'acqua**

Classe 1 (associata al colore verde): area senza afflusso d'acqua visibile oppure area in cui vi sono macchie di umidità su marciapiedi o rivestimenti. Viene richiesta solo manutenzione ordinaria.

Classe 2 (associata al colore rosa): area con presenza di acqua importante: gocciolamento, pozzanghere, macchie umide, film di acqua. La possibile

evoluzione a lungo termine rende queste aree soggette a sorveglianza regolare.

Classe 2E (associata al colore giallo): area con presenza di acqua importante: la portata è tale da mettere a rischio la sicurezza dell'opera. Vengono richieste un monitoraggio specifico e un'urgente manutenzione correttiva.

Indicazione S (associata al colore rosso): assegnata ad una delle classi precedenti quando la presenza di acqua è tale da mettere in pericolo l'utenza della galleria. Sono richiesti interventi immediati di manutenzione. In presenza di difetti classificati con la lettera 'S', l'opera non può essere più agibile se non dopo l'intervento di manutenzione.

1	Nessun problema, solo macchie di umidità
2	Presenza d'acqua importante con evoluzione a lungo termine
2E	Presenza di acqua importante, possibile rischio per la struttura
S	Situazione di pericolo per gli utenti

**Tabella 3.2:** Classificazione IQOA venute d'acqua



# Capitolo 4

## Analisi del rischio per gallerie esistenti

### 4.1 Premessa

Quando si devono ispezionare molte gallerie ed è necessario provvedere alla loro manutenzione, può essere utile riuscire a creare un sistema che permetta di intercettare le strutture maggiormente danneggiate che necessitano di un intervento più urgente rispetto alle altre.

Il 7 luglio 2020 è stata emanata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti la circolare 0000629 che anticipa una futura legge che assicurerà l'omogeneità nella classificazione e gestione del rischio e nella valutazione della sicurezza delle gallerie esistenti sul territorio italiano.

Il Ministero ha inoltre richiesto alle concessionarie autostradali di intraprendere attività di ricerca scientifica al fine di redarre procedure e manuali tecnici che trattino la gestione e la manutenzione di gallerie esistenti.

Per questo motivo Autostrade per l'Italia S.p.A ed il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino hanno stipulato un contratto con l'obiettivo di definire un'analisi di rischio delle gallerie esistenti. Autostrade per l'Italia S.p.A gestisce oltre 3000 km di rete autostradale italiana: le gallerie sul tracciato che ha intenzione di ispezionare sono più di 580 (Dambra, 2020). In un simile contesto nasce l'esigenza di stabi-

lire una gerarchia con cui eseguire gli interventi di manutenzione dando la precedenza alle strutture che presentano un rischio maggiore.

## 4.2 La metodologia SMART

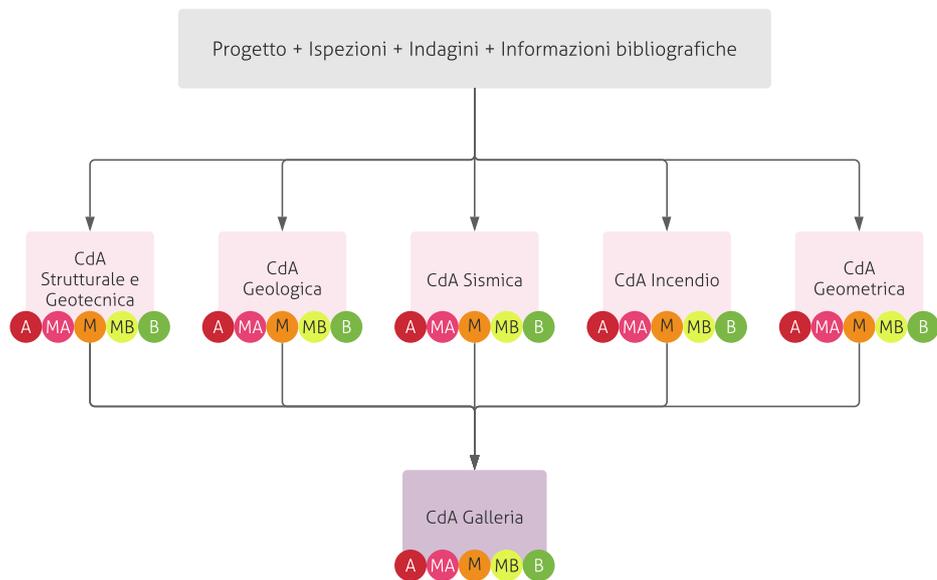
Il metodo SMART (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels) si pone come obiettivo quello di poter attribuire una valutazione del rischio di una galleria autostradale. Per fare ciò è stato deciso di assegnare a ciascuna struttura una voce capace di definire l'urgenza con cui prevedere la messa in sicurezza dell'opera: la *Classe di Attenzione della galleria*. Questa può essere, in ordine di gravità decrescente: alta, medio-alta, media, medio-bassa e bassa.

Nell'analisi del rischio effettuata su gallerie esistenti si riscontra che tutti i parametri che devono essere presi in considerazione possono essere ricondotti a cinque aspetti principali, sui quali si è deciso di basarsi al fine di definire ulteriori Classi di Attenzione. Queste possono essere pensate come un sottoinsieme della Classe di Attenzione della galleria e sono:

- Classe di Attenzione strutturale e geotecnica
- Classe di Attenzione geologica
- Classe di Attenzione sismica
- Classe di Attenzione incendio
- Classe di Attenzione geometrica

A queste cinque Classi di Attenzione deve essere attribuita una valutazione compresa tra alta e bassa: per farlo è necessario considerare i risultati delle ispezioni e delle indagini, la documentazione progettuale e alcune informazioni ottenibili attraverso ricerche bibliografiche.

La Figura 4.1 rappresenta il procedimento utile per la valutazione della Classe di Attenzione della galleria: studiando la documentazione, i risultati delle ispezioni e delle indagini ed effettuando delle ricerche è possibile ricavare la Classe di Attenzione dei cinque ambiti che caratterizzano l'analisi del rischio. L'unione dei risultati ottenuti consente di ricavare la Classe di



**Figura 4.1:** Valutazione della Classe di Attenzione della galleria

Attenzione della galleria utile alla definizione di un ordine di priorità per la programmazione degli interventi di manutenzione.

Per poter definire le cinque Classi di Attenzione devono essere valutati trentuno parametri di seguito riportati:

*Parametri che definiscono la Classe di Attenzione strutturale-geotecnica*

- Carico agente sul rivestimento
- Livello di incertezza del modello geologico/geotecnico
- Qualità e peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno
- Influenza dell'acqua
- Presenza di sotto-spessore nel rivestimento
- Livello di difettosità
- Rapidità di evoluzione del degrado
- Tipologia di galleria
- Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione

- Complessità costruttiva

*Parametri che definiscono la Classe di Attenzione geologica*

- 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'interferenza instabilità-struttura

*Parametri che definiscono la Classe di Attenzione sismica*

- Caratteristiche del sisma
- Inclusione in zone sismogenetiche
- Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali
- Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica
- Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno
- Profondità dell'asse della galleria
- Geometria della galleria
- Resistenza e stato conservazione del rivestimento
- Norme di progettazione/duttilità del rivestimento

*Parametri che definiscono la Classe di Attenzione incendio*

- Trasporto di merci pericolose
- Incidentalità caratteristica
- Lunghezza
- Difetti/Assenza di misure impiantistiche
- Difetti/Assenza di misure strutturali
- Piani di intervento

*Parametri che definiscono la Classe di Attenzione geometrica*

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

Per poter definire la Classe di Attenzione di ciascuna categoria è necessario attribuire ai parametri che la compongono un punteggio che deve essere tanto più alto quanto più elevato è il rischio associato all'aspetto in esame. Per riuscire a definire l'intervallo, diverso per ogni parametro, entro cui far variare i punteggi, si è dovuto stabilire quali aspetti influenzassero maggiormente l'analisi del rischio in esame. Assegnare un punteggio variabile tra 0 ed un numero elevato significa, infatti, che il rischio ad esso associato influisce molto sulla definizione della Classe di Attenzione a cui il parametro appartiene.

Nel paragrafo successivo viene descritta la metodologia che è stata applicata per riuscire a definire a quali parametri dovessero essere assegnati scale di punteggio più ampie.

## 4.3 Relazione tra parametri

Per poter comprendere quali relazioni intercorressero tra i parametri presi in considerazione nell'analisi del rischio e poter stabilire se alcuni fossero più rilevanti di altri si è deciso di applicare il *Rock Engineering System* ideato da J. A. Hudson nel 1992.

### 4.3.1 Il Rock Engineering System

Il Rock Engineering System o RES (Hudson, 1992) permette di definire in maniera chiara e schematica le relazioni che intercorrono tra diversi parametri che vengono presi in considerazione in un determinato ambito dell'ingegneria geotecnica.

Nel 1993, Ping e Hudson hanno applicato la teoria degli insiemi sfocati ed il RES alla stabilità degli scavi in sotterraneo: questo ambito è stato suddiviso in 5 classi di valutazione di cui si indagarono le interazioni (Ping et al., 1993). Cancelli e Crosta, nell'anno successivo, hanno utilizzato il metodo di Hudson per analizzare il rischio e la magnitudo della caduta massi per poter effettuare una catalogazione dei territori interessati dal fenomeno (Cancelli and

Crosta, 1994). Più recentemente Shin e altri studiosi coreani hanno sfruttato il Rock Engineering System per poter stabilire il rischio di collasso durante la costruzione di tunnel. In questo caso fu addestrata anche una rete neurale (Shin et al., 2009). Nel 2016, Aghababaei e altri colleghi dell'università di Kerman, in Iran, hanno applicato il RES con lo scopo di valutare il rischio che si possano creare meccanismi capaci di indebolire la base su cui poggiano le strutture di sostegno nella miniera di carbone di Parvadeh. Il metodo, in particolare, è stato utilizzato per poter stabilire il meccanismo più probabile, i fattori che lo influenzano maggiormente, le aree più colpite dal fenomeno e i rimedi possibili (Aghababaei et al., 2016).

Il metodo si basa sulla creazione di una matrice: sulla prima riga e sulla prima colonna si dispongono i parametri di cui si vogliono indagare le interazioni. Essi devono essere elencati rigorosamente con lo stesso ordine: partendo da sinistra per la riga e dall'alto per la colonna.

Il passaggio successivo consiste nell'analizzare l'effetto che ciascun parametro ha sugli altri. Per fare ciò è necessario compilare la matrice attribuendo ad ogni casella di intersezione riga/colonna un valore all'influenza del parametro letto sulla riga su quello che si trova sulla colonna. La diagonale della matrice non deve essere riempita perché la definizione dell'effetto del parametro su se stesso è priva di significato.

Per definire l'interazione tra parametri è necessario attribuire un punteggio all'effetto: si deve assegnare il valore 0 nel caso i due parametri siano indipendenti ed un valore compreso tra 1 ed  $n$  per poter definire l'intensità dell'interazione (Saeidi et al., 2014). La matrice costruita può non essere simmetrica: non esiste una reciprocità degli effetti (Peila, 2015).

Il passo successivo alla compilazione della matrice è la definizione delle cause e degli effetti: la somma delle componenti presenti su una riga viene definita *causa* e rappresenta l'influenza che il parametro ha sul problema geotecnico in esame. La somma delle componenti sulle colonne è detta *effetto* e rappresenta l'influenza del sistema sul parametro.

I dati ottenuti possono essere riportati su un grafico a dispersione x-y che riporta sull'asse delle ascisse il valore di causa e sulle ordinate l'effetto. I parametri che si collocano in basso a destra sono definiti 'dominanti' e sono ca-

ratterizzati da un elevato valore di causa. I parametri in alto e sinistra sono detti 'subordinati' e sono caratterizzati da un valore di effetto alto.

Per poter stabilire quali siano i parametri che influenzano maggiormente il problema si può ricorrere all'*interattività*, definita come somma di causa ed effetto. Un valore elevato di interattività definisce un parametro che è strettamente legato al problema in esame o perché una sua variazione provoca degli effetti su molti altri aspetti o perché molti fattori lo influenzano.

La rappresentazione dell'interattività su un grafico a barre permette di capire immediatamente quali siano i parametri la cui presenza influenza maggiormente il problema geotecnico in esame.

A titolo illustrativo si riporta nel seguito un semplice esempio di applicazione.

Si considerino quattro parametri: A, B, C e D. Stabilita una scala di valori compresa tra 1 e 3 si suppone che il parametro A influenzi poco il parametro C (punteggio 1/3) e molto il parametro D (punteggio 3/3). Il parametro A non ha alcun effetto sul parametro B che invece ha una discreta influenza solo su D (punteggio 2/3). Il parametro C influenza molto tutti i parametri (punteggio 3/3). Il parametro D ha un effetto preponderante su C e nullo su A e B. La matrice che deve essere costruita sarà quella proposta in Figura 4.2

	A	B	C	D
A		0	1	3
B	0		0	2
C	3	3		3
D	0	0	3	

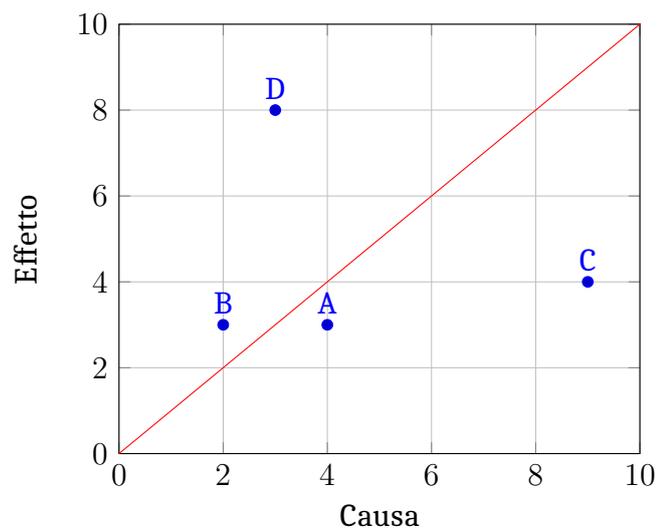
**Figura 4.2:** Esempio di compilazione della matrice

Sommando le componenti presenti sulle righe e sulle colonne, come mostrato in Figura 4.3, si ottengono causa ed effetto di ciascun parametro. L'aspetto che influenza maggiormente il problema è C (valore di causa pari a 9) Il parametro che è maggiormente influenzato è D (valore di effetto pari a 8).

	A	B	C	D	Causa
A		0	1	3	<b>4</b>
B	0		0	2	<b>2</b>
C	3	3		3	<b>9</b>
D	0	0	3		<b>3</b>
<b>Effetto</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	

**Figura 4.3:** Esempio di definizione di causa ed effetto

Riportando i valori di cause ed effetto dei quattro parametri nel grafico a dispersione si ottiene quanto riportato in Figura 4.4. L'interattività può essere riportata nel grafico a barre in Figura 4.5.



**Figura 4.4:** Esempio della creazione del grafico a dispersione

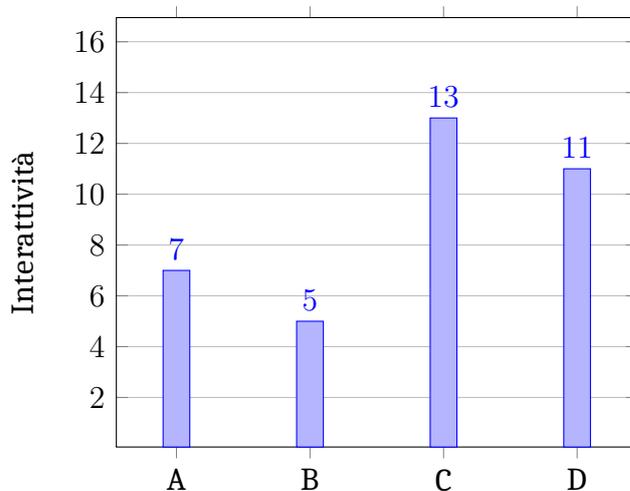


Figura 4.5: Esempio della creazione del grafico a barre dell'interattività

### 4.3.2 Applicazione del metodo

Il metodo di Hudson è stato applicato all'analisi del rischio. I parametri di cui si è voluta analizzare l'influenza sono quelli appartenenti alle cinque Classi di Attenzione definite in precedenza. Per poter compilare la matrice si è analizzato l'effetto che ciascun aspetto ha sugli altri. A questo è stato attribuito un punteggio compreso tra 0 (nessun effetto riscontrato) e 3 dove con 1 si intende una debole interazione, con 2 una media e con 3 elevata. Per ciascun parametro in esame, si riportano nel seguito i ragionamenti che hanno condotto all'assegnazione dei punteggi riscontrabili nella matrice in Figura 4.6.

*Carico agente sul rivestimento:* per poter investigare questo aspetto è necessario esaminare i risultati delle indagini in situ, in particolare delle prove di martinetto piatto. Questo parametro è l'evidenza dell'interazione terreno-struttura ed ha un grande effetto sul *livello di difettosità*. Anche la *resistenza e stato conservazione del rivestimento* è molto suscettibile agli effetti del carico.

*Livello di incertezza del modello geologico/geotecnico:* l'importanza di questo parametro risiede nel fatto che il non essere a conoscenza di contesti geologico-geotecnici di scarsa qualità può accrescere il rischio. L'incompleta caratterizzazione geomeccanica influenza in maniera forte il

*carico agente sul rivestimento* e in maniera modesta la *qualità e peculiarità dell'ammasso roccioso/terreno*. Il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado* dipendono da questo parametro: infatti alcuni fenomeni si riscontrano in presenza di particolari contesti geologici che sarebbe opportuno conoscere. *L'influenza dell'acqua* subisce gli effetti di questa voce perché le caratteristiche di permeabilità del suolo sono fondamentali per una buona caratterizzazione geotecnica. Il livello di incertezza ha inoltre influenza sulla *complessità costruttiva* della galleria: in fase costruttiva, infatti, la mancanza di informazioni geologiche-geotecniche può aver causato eventi imprevedibili a cui si sarà dovuto porre rimedio. In ultima analisi anche lo *stato di attività per frane riconosciute* è legato a questo parametro: se il modello fosse completo si saprebbero anche definire le caratteristiche legate alla stabilità del versante.

*Qualità e peculiarità dell'ammasso roccioso o del terreno*: questa voce può essere vista come un approfondimento di quella precedente, ma in questo caso vengono indagati gli aspetti legati ad alcuni comportamenti specifici (creep, rigonfiamento, presenza di gas nocivi, etc). Per questo motivo i parametri influenzabili sono i medesimi: *carico agente sul rivestimento, livello di difettosità, complessità costruttiva, stato di attività per frane riconosciute, influenza dell'acqua* e *rapidità di evoluzione del degrado*. A questi si aggiungono le *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso/terreno*, e due aspetti relativi alla stabilità del versante, dipendente dalla qualità del terreno: la *magnitudo dell'instabilità di versante* e la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*.

*Influenza dell'acqua*: questo aspetto si riferisce alla presenza di acqua negli intorni della galleria e influenza molto il *carico agente sul rivestimento*. Poiché alcuni tipi di terreno interagiscono in modo particolare con l'acqua la *qualità e peculiarità dell'ammasso roccioso o del terreno* è influenzato dal parametro in esame. Il *livello di difettosità*, la *rapidità di evoluzione del degrado* e la conseguente *resistenza e stato conservazione del rivestimento* subiscono importanti effetti dovuti alla presenza di

acqua. In fase costruttiva, intercettare la falda e riscontrare venute d'acqua consistenti provoca delle complicazioni: per questo motivo anche la complessità costruttiva viene influenzata dall'acqua. Uno degli aspetti fondamentali nello studio della stabilità dei versanti è la presenza di liquido interstiziale ed è per questo che anche la *magnitudo dell'instabilità di versante* e lo *stato di attività per frane riconosciute* dipendono da questa voce. La presenza dell'acqua in galleria influisce anche sull'*incidentalità caratteristica*.

*Presenza di sotto-spessore nel rivestimento*: questo aspetto riguarda il riscontro di anomalie nello spessore del rivestimento. Queste sono causate da errori costruttivi evidenziabili confrontando i dati progettuali con l'altezza effettiva delle coperture. Queste alterazioni influenzano in modo importante il *carico agente sul rivestimento*, il *livello di difettosità* e la conseguente *resistenza e stato conservazione del rivestimento*.

*Livello di difettosità*: questa voce riguarda i risultati delle ispezioni effettuate descritti secondo la classificazione IQOA. Tale parametro ha effetti sul *carico agente sul rivestimento* e sulla *resistenza e stato conservazione del rivestimento* dal momento che alcune difettologie causano l'assottigliamento della copertura aumentandone la sua fragilità. Certi difetti sono caratterizzati dalla loro rapida evoluzione: la *rapidità di evoluzione del degrado*, per questo motivo, è influenzata dal livello di difettosità. Alcuni ammaloramenti provocano la caduta di detriti sulla carreggiata causando situazioni di pericolo per l'utenza: per questo motivo anche l'*incidentalità caratteristica* è influenzata dal parametro in esame.

*Rapidità di evoluzione del degrado*: questo parametro mette in relazione gli ammaloramenti, a cui è soggetta la galleria, con il lasso di tempo occorso alla loro formazione. Anche in questo caso, come nel precedente, i parametri influenzati sono: il *carico agente sul rivestimento*, il *livello di difettosità* e la *resistenza e stato conservazione del rivestimento*.

*Tipologia di galleria*: questa voce descrive e mette in relazione tra loro alcuni aspetti dell'opera. Questi sono: il diametro e la geometria della

sezione ed i materiali impiegati nella sua costruzione. Il *carico agente sul rivestimento* e la *resistenza e stato conservazione del rivestimento* sono influenzati dalla tipologia costruttiva poiché la forma della sezione influisce sulla redistribuzione degli sforzi. L'*influenza dell'acqua*, il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado* dipendono dal tipo di materiale di cui è composto il rivestimento. La *geometria della galleria* è strettamente collegata alla tipologia con una relazione di reciprocità. L'*incidentalità caratteristica* è condizionata dal numero di corsie della galleria e per questo motivo è influenzata dalla sua tipologia. I difetti/assenza di misure impiantistiche e strutturali dipendono dalle dimensioni della sezione della galleria: maggiore è il numero di corsie presenti, maggiore è la probabilità che siano state previste queste misure (uscite di emergenza, banchine pedonabili, illuminazione di sicurezza, etc). La presenza di *piani di intervento* dipende dalla tipologia di galleria: tanto più l'opera è imponente, maggiore sarà l'attenzione alla sicurezza dell'utenza. I *difetti di altezza libera* sono correlati al materiale del rivestimento della galleria e alla forma della sua sezione.

*Presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione*: le buone condizioni di questo elemento consentono di proteggere il rivestimento della galleria dall'acqua. In assenza di impermeabilizzazione, la filtrazione di acqua influisce sul *carico agente sul rivestimento* e sulla *resistenza e stato conservazione del rivestimento*. Questo parametro ha un elevato impatto sull'*influenza dell'acqua*, sul *livello di difettosità* e sulla *rapidità di evoluzione del degrado*.

*Complessità costruttiva*: per indagare questo aspetto è necessario esaminare la documentazione progettuale della galleria in esame cercando evidenze del fatto che, sia durante la costruzione, sia durante la messa in esercizio, si siano verificati degli eventi imprevisti (fornelli, collassi, cedimenti negli edifici in prossimità dell'opera, etc). La *presenza di sotto-spessore nel rivestimento* potrebbe essere causata proprio da alcuni eventi inaspettati che hanno condotto a questo errore progettuale. La complessità costruttiva riscontrata in fase di progettazione può aver

condizionato la scelta della *geometria della galleria*; quella manifestata in esercizio può aver influito sul *livello di difettosità* e sulla *rapidità di evoluzione del degrado*.

*Magnitudo dell'instabilità di versante*: questa voce si riferisce alla velocità di spostamento a cui può essere soggetto il pendio nel quale è inserita la galleria. Lo scivolamento può causare delle variazioni nella distribuzione degli sforzi e per questo motivo influenzare il *carico agente sul rivestimento* e la *resistenza e stato conservazione del rivestimento*. Tra gli ammaloramenti riportati nel catalogo presente nel capitolo 3 si può trovare una categoria che dipende dall'instabilità del versante: per questo motivo il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado* sono influenzati dal parametro in esame. Lo *stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/grado di criticità per le frane potenziali* dipende fortemente dalla rapidità di scivolamento. Anche la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica* subisce l'effetto della voce in esame: se il versante fosse stabile, infatti, non si verificherebbero frane causate da sismi.

*Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/Grado di criticità per le frane potenziali*: questo parametro è strettamente collegato alla *magnitudo dell'instabilità di versante*. Per questo motivo i parametri da esso influenzati sono: il *carico agente sul rivestimento*, il *livello di difettosità*, la *rapidità di evoluzione del degrado* e la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*. Lo stato di attività influenza inoltre il parametro *sistemi di monitoraggio* dal momento che gli strumenti vengono posizionati solo dove vi è la necessità di investigare lo spostamento del versante.

*Sistemi di monitoraggio*: questo parametro non ha effetto sugli altri ma è influenzato dallo stato di attività sopra citato.

*Estensione dell'interferenza instabilità-struttura*: questa voce ha un importante effetto sul *carico agente sul rivestimento* e sulla *resistenza e stato*

*conservazione del rivestimento* perché le deformazioni del terreno possono provocare una nuova distribuzione degli sforzi ed un loro aumento. Il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado* sono influenzati dal parametro in esame.

*Caratteristiche del sisma*: questo aspetto si riferisce alla magnitudo e alle accelerazioni attese nei pressi della galleria qualora si verificasse un evento sismico. La forzante sismica influisce sul *carico agente sul rivestimento* e sulla *resistenza e stato conservazione del rivestimento*. La sollecitazione può inoltre provocare l'insorgenza di difetti e quindi anche il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado* sono influenzati dal parametro in esame. I terremoti influenzano anche la stabilità dei versanti provocando scivolamenti e dissesti. Le caratteristiche del sisma, perciò, hanno degli effetti sulla *magnitudo dell'instabilità di versante*, sullo *stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)* e sulla *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*.

*Inclusione in zone sismogenetiche*: questo parametro influenza notevolmente le *caratteristiche del sisma*. Poiché questi due aspetti sono strettamente collegati hanno effetto sulle medesime voci: *carico agente sul rivestimento*, *resistenza e stato conservazione del rivestimento*, *livello di difettosità*, *rapidità di evoluzione del degrado*, *magnitudo dell'instabilità di versante*, *stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)* e *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*.

*Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali*: la voce è strettamente connessa all'*inclusione in zone sismogenetiche* e per questa ragione i parametri che ne subiscono gli effetti sono quelli descritti in precedenza: *carico agente sul rivestimento*, *resistenza e stato conservazione del rivestimento*, *livello di difettosità*, *rapidità di evoluzione del degrado*, *magnitudo dell'instabilità di versante*, *stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)*, *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica* e *caratteristiche del sisma*.

*Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica:* anche in questo caso il parametro è collegato a quelli descritti in precedenza e di conseguenza influenza la maggior parte degli aspetti sopra citati: *carico agente sul rivestimento, resistenza e stato conservazione del rivestimento, livello di difettosità, rapidità di evoluzione del degrado, magnitudo dell'instabilità di versante, stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti) ed estensione dell'interferenza instabilità-struttura.*

*Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno:* questo parametro descrive la tipologia di terreno nel quale l'opera è inserita. Il peso specifico del materiale influenza il *carico agente sul rivestimento*. A seconda del tipo di suolo che circonda la galleria si possono sviluppare difettologie differenti. La voce in esame influenza, per questo motivo, il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado*. Esaminando la *complessità costruttiva* si nota che le condizioni geologiche hanno effetto su eventuali criticità che possono essere riscontrate sia in fase costruttiva, sia nella fase di messa in esercizio. La tipologia di terreno caratterizza anche diversi aspetti nell'ambito della stabilità dei versanti perciò la *magnitudo dell'instabilità di versante* e la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica* sono influenzati da questo parametro.

*Profondità dell'asse della galleria:* questo aspetto influenza gli sforzi che agiscono sulla struttura ed è per questo che il *livello di difettosità*, il *carico agente sul rivestimento* e la *complessità costruttiva* ne risentono. Le superfici di scivolamento dei versanti instabili possono essere profonde o superficiali: riuscire a definire la profondità dell'asse della galleria consente di indagare l'*estensione dell'interferenza instabilità-struttura*.

*Geometria della galleria:* con questo termine ci si riferisce alla forma della sezione dell'opera. Questa influenza molto la ridistribuzione degli sforzi e di conseguenza il *livello di difettosità*, il *carico agente sul rivestimento* e la *resistenza e stato conservazione del rivestimento*. Nella definizione di ti-

*pologia di galleria* è compresa la geometria della sezione. Alcune forme di sezione sono più soggette di altre a *difetti di altezza libera (gabarit)*.

*Resistenza e stato conservazione del rivestimento*: questo aspetto ha degli effetti importanti sul *carico agente sul rivestimento* perché quando una parte dell'elemento non è in grado di sopportare le sollecitazioni si assiste alla redistribuzione delle forze. Il fenomeno causa lo sviluppo di danneggiamenti e per questo il *livello di difettosità* e la *rapidità di evoluzione del degrado* ne sono influenzati.

*Norme di progettazione/duttilità del rivestimento*: questo parametro tiene in considerazione la possibilità che durante la fase progettuale siano state adottate le norme relative alla progettazione antisismica. Questo aspetto ha effetti moderati sul *livello di difettosità* sulla *rapidità di evoluzione del degrado* e sulla *resistenza e stato conservazione del rivestimento*. Queste norme suggeriscono anche l'adozione di alcune sezioni di scavo e ne sconsigliano altre: per questo la *geometria della galleria* subisce gli effetti di questa voce.

*Trasporto di merci pericolose*: questo parametro indaga la possibilità di accesso alla galleria da parte di mezzi che trasportano materiali che possono causare situazioni di pericolo all'interno dell'opera. Questo ha effetto sull'*incidentalità caratteristica*.

*Incidentalità caratteristica*: con questo termine ci si riferisce al numero di incidenti avvenuti in galleria in un anno. Il parametro *assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti* è influenzato dall'incidentalità: questa attrezzatura è infatti utilizzata quando il numero di incidenti è importante e lo si vuole decrementare ed è inoltre richiesta dal Decreto Ministeriale del 5 novembre 2001 n 6792.

*Lunghezza*: questo aspetto interferisce con la *complessità costruttiva* perché maggiore è tale entità e più alta è la probabilità che si verifichino eventi inattesi. Lo stesso ragionamento può essere fatto esaminando l'*estensione dell'interferenza instabilità-struttura* e l'*incidentalità carat-*

*teristica*: quanto più è estesa la galleria tanto maggiore sarà la probabilità di intersecare porzioni di pendio instabili e di assistere ad incidenti stradali. La lunghezza influenza anche la possibilità di evacuazione dell'opera e l'efficacia dei *piani di intervento*.

*Difetti/Assenza di misure impiantistiche*: con questo termine ci si riferisce all'impianto di illuminazione ordinario e di emergenza, alla ventilazione, alle stazioni e segnali di emergenza e ad altri strumenti che possono aiutare l'utenza in caso di pericolo e che diminuiscono l'*incidentalità caratteristica*. I *difetti di altezza libera (gabarit)* subiscono gli effetti di questo parametro perché l'installazione di alcuni impianti in galleria possono diminuirne l'altezza.

*Difetti/Assenza di misure strutturali*: con questo termine ci si riferisce alla presenza di uscite di emergenza, di banchine pedonabili, di sistemi di drenaggio ed altre strutture la cui presenza riduce l'*incidentalità caratteristica* in galleria. L'*assenza di profilo ridirettivo addossato ai piedritti* subisce l'effetto di questa voce dal momento che questo oggetto può essere considerato come una misura strutturale.

*Piani di intervento*: questa voce non ha alcun effetto sulle altre, ma subisce l'influenza della tipologia e della lunghezza della galleria.

*Difetti di altezza libera (gabarit)*: questa voce si riferisce alla possibilità che alcune gallerie presentino un'altezza inferiore a 7,70 m: tale valore è sancito dal Decreto Ministeriale del 5 novembre 2001 n 6792. L'alterazione della forma influenza il *carico agente sul rivestimento*, il *livello di difettosità* e la *resistenza e stato conservazione del rivestimento*. L'abbassamento dell'altezza della galleria influisce sull'*incidentalità caratteristica*: i mezzi più alti possono infatti urtare contro gli impianti posizionati in calotta o, nei casi peggiori, contro il rivestimento.

*Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti*: questa struttura evita che le autovetture possano urtare contro i piedritti della galleria in caso di sbandamento. Questo influisce sull'*incidentalità caratteristica* e sui *difetti/assenza di misure strutturali*.

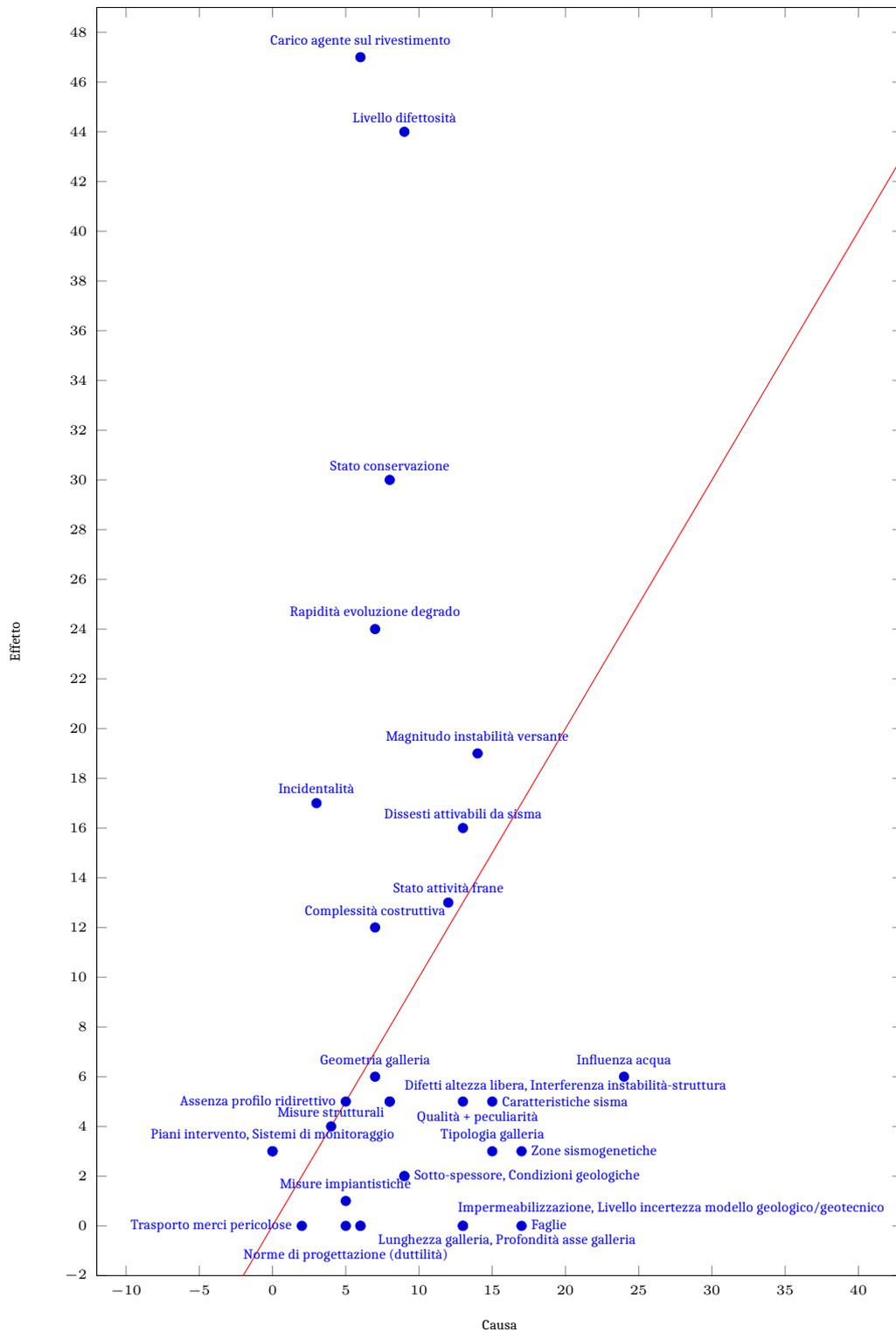


	CAUSA	EFFETTO	INTERATTIVITA'	C+E %
Carico agente sul rivestimento	6	47	53	9,9
Livello incertezza modello geologico/geotecnico	13	0	13	2,4
Qualità + peculiarità	13	5	18	3,4
Influenza acqua	24	6	30	5,6
Sotto-spessore	9	2	11	2,0
Livello difettosità	9	44	53	9,9
Rapidità evoluzione degrado	7	24	31	5,8
Tipologia galleria	15	3	18	3,4
Impermeabilizzazione	13	0	13	2,4
Complessità costruttiva	7	12	19	3,5
Magnitudo instabilità versante	14	19	33	6,1
Stato attività frane	12	13	25	4,7
Sistemi di monitoraggio	0	3	3	0,6
Interferenza instabilità-struttura	8	5	13	2,4
Caratteristiche sisma	15	5	20	3,7
Zone sismogenetiche	17	3	20	3,7
Faglie	17	0	17	3,2
Dissesti attivabili da sisma	13	16	29	5,4
Condizioni geologiche	9	2	11	2,0
Profondità asse galleria	6	0	6	1,1
Geometria galleria	7	6	13	2,4
Stato conservazione	8	30	38	7,1
Norme di progettazione (duttilità)	5	0	5	0,9
Trasporto merci pericolose	2	0	2	0,4
Incidentalità	3	17	20	3,7
Lunghezza galleria	6	0	6	1,1
Misure impiantistiche	5	1	6	1,1
Misure strutturali	4	4	8	1,5
Piani intervento	0	3	3	0,6
Difetti altezza libera	8	5	13	2,4
Assenza profilo ridirettivo	5	5	10	1,9

**Tabella 4.1:** Causa, effetto ed interattività dei parametri

Una volta ottenuta la matrice di interazione si è provveduto al calcolo delle cause, degli effetti e dell'interattività. I risultati ricavati vengono riportati nella Tabella 4.1.

Con i dati ottenuti è stato creato il grafico a dispersione causa-effetto riportato in Figura 4.7



**Figura 4.7:** Grafico a dispersione causa-effetto

Il grafico permette di osservare che i tre parametri dominanti, che presentano il valore di causa maggiore, sono l'*influenza dell'acqua*, l'*inclusione in zone sismogenetiche* e la *presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali*. Gli aspetti subordinati, caratterizzati da un elevato valore di effetto, comprendono il *carico agente sul rivestimento*, il *livello di difettosità*, la *resistenza e stato conservazione del rivestimento* e la *rapidità di evoluzione del degrado*.

Come già accennato in precedenza, per poter identificare quali siano gli aspetti che influenzano maggiormente l'analisi del rischio ci si deve basare sull'interattività, ovvero la somma di causa ed effetto. Riportando tale caratteristica, definita in termini percentuali, su un grafico a barre si è ottenuto quanto riportato in Figura 4.8

Dal grafico a barre è possibile stabilire quali siano i parametri dell'analisi del rischio che influenzano maggiormente quest'ambito e a cui dovranno essere assegnate delle scale di punteggio più ampie: di seguito si riportano i primi dieci in ordine di interattività decrescente.

- Carico agente sul rivestimento
- Livello di difettosità
- Resistenza e stato conservazione del rivestimento
- Magnitudo dell'instabilità di versante
- Rapidità di evoluzione del degrado
- Influenza dell'acqua
- Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica
- Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/ Grado di criticità per le frane potenziali
- Caratteristiche del sisma
- Incidentalità caratteristica

Sulla base di queste evidenze sono stati attribuiti gli intervalli entro cui far variare i punteggi assegnabili a ciascun parametro.

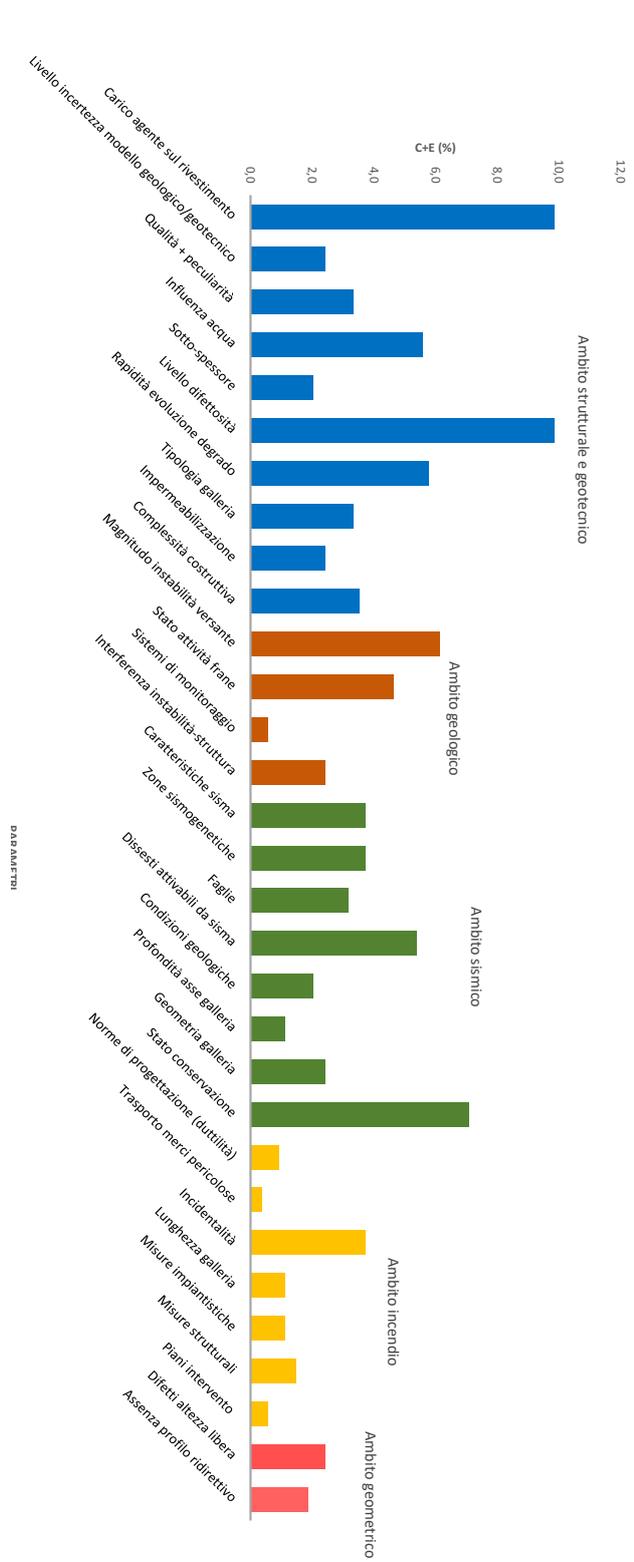


Figura 4.8: Grafico a barre dell'interattività

DARS ANALITICI

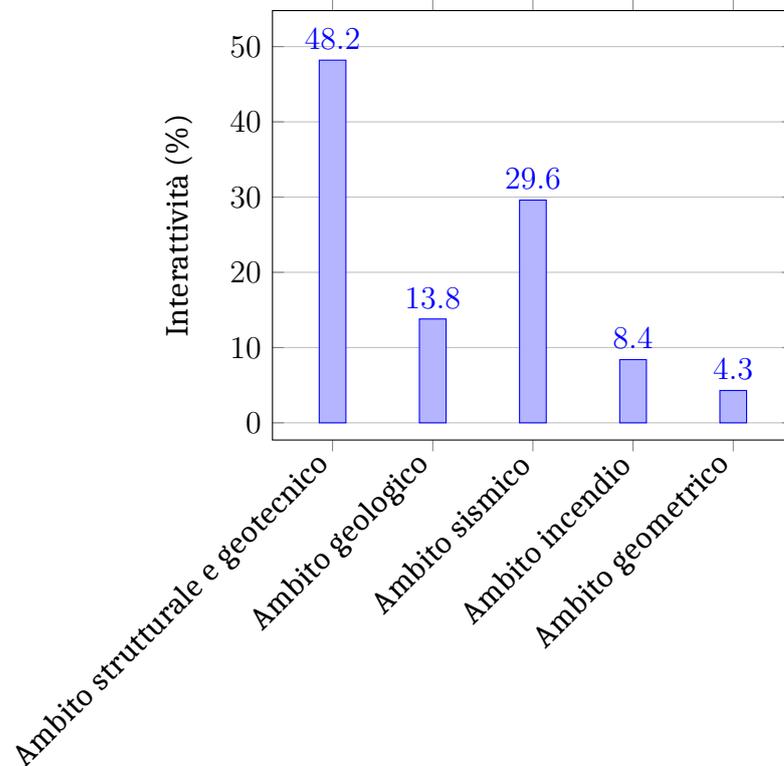
## 4.4 Attribuzione dei punteggi e valutazione della Classe di Attenzione della galleria

Per riuscire a stabilire la Classe di Attenzione da assegnare ad una galleria si è deciso di imputare a questa voce un punteggio compreso tra 0 e 100: per descriverla si è suddiviso l'intervallo in cinque sottoinsiemi secondo quanto riportato in Tabella 4.2.

Intervallo punteggio	Classe di Attenzione
0 ÷ 20	Bassa
20 ÷ 40	Medio-Bassa
40 ÷ 60	Media
60 ÷ 80	Medio-alta
80 ÷ 100	Alta

**Tabella 4.2:** Classi di Attenzione della galleria

Il valore da attribuire alla Classe di Attenzione della galleria ha origine dalla somma dei punteggi assegnati alle cinque Classi di Attenzione riferite ai diversi ambiti dell'analisi del rischio (strutturale e geotecnico, geologico, sismico, incendio e geometrico). Come si evince dai risultati dell'applicazione del Rock Engineering System (Figura 4.9), i cinque aspetti non influenzano l'analisi del rischio nel medesimo modo: i parametri appartenenti all'ambito strutturale e geotecnico hanno una maggiore incidenza sul sistema, quelli che ricadono nella categoria geometrica lo influenzano in modo minore.



**Figura 4.9:** Interattività dei cinque ambiti dell'analisi del rischio

Proprio per questa ragione l'intervallo di punteggi attribuibili a ciascuno dei cinque ambiti cambia come descritto nella Tabella 4.3. Anche in questo caso ciascuna Classe di Attenzione viene descritta come bassa, medio-bassa, media, medio-alta, alta effettuando, con il punteggio ottenuto, una proporzione che restituisca un valore compreso tra 0 e 100 consentendo un riferimento alla Tabella 4.2.

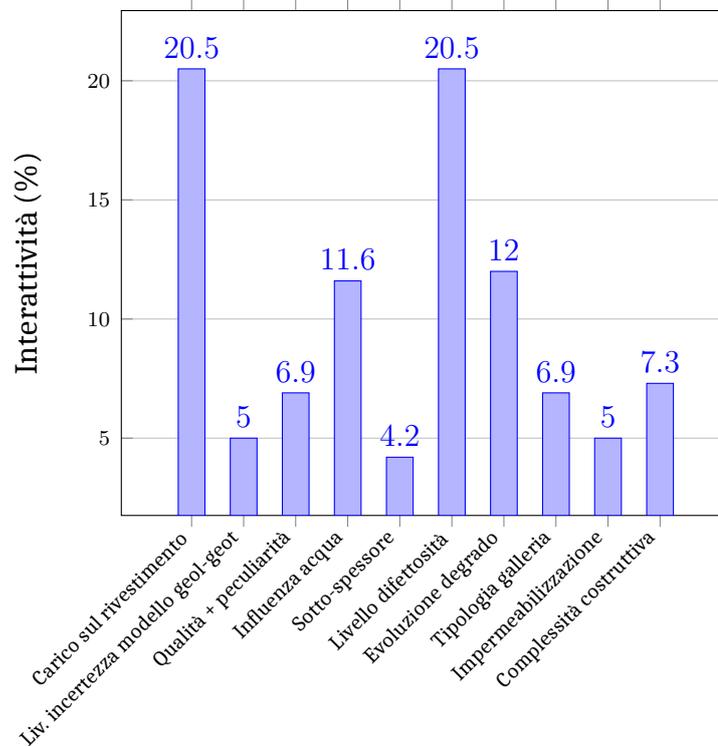
Classe di Attenzione	Punteggio
Strutturale e geotecnica	0 ÷ 45
Geologica	0 ÷ 15
Sismica	0 ÷ 15
Incendio	0 ÷ 15
Geometrica	0 ÷ 10

**Tabella 4.3:** Intervallo di punteggio per ciascuna Classe di Attenzione

Una volta stabilito come attribuire i punteggi alla Classe di Attenzione della galleria, è necessario chiarire come ottenere quelli relativi ai cinque ambiti. Ai parametri che compongono le Classi di Attenzione devono essere attribuiti dei punteggi compresi in intervalli che saranno tanto maggiori quanto più grande sarà il rischio ad essi associato. Questi valori dovranno poi essere sommati tra loro ottenendo il punteggio della Classe di Attenzione in esame: per questa ragione la somma dei massimi punteggi assegnabili non deve superare il limite superiore riportato in Tabella 4.3. Le voci contenute all'interno di una Classe di Attenzione sono state suddivise in aspetti riguardanti la pericolosità ed aspetti riguardanti la vulnerabilità (Politecnico di Torino, 2020). Il motivo di tale scelta risiede nel fatto che l'analisi del rischio è sempre caratterizzata dall'esposizione, dalla vulnerabilità e dalla pericolosità: la prima non è stata presa in considerazione nell'analisi delle singole gallerie in quanto deve essere valutata facendo riferimento all'intera tratta autostradale. Nel seguito si descrivono dettagliatamente i parametri appartenenti alle cinque Classi di Attenzione: particolare importanza viene data ai ragionamenti che hanno condotto alla scelta di specifici intervalli di punteggio.

#### **4.4.1 Classe di Attenzione strutturale e geotecnica**

A questa categoria appartengono i parametri dell'analisi del rischio che si riferiscono alla struttura della galleria e alle caratteristiche del terreno/ammasso roccioso nel quale questa è inserita. Dall'applicazione del Rock Engineering System e dalla Figura 4.10 che riporta la percentuale di interattività dei soli parametri appartenenti a questa Classe di Attenzione, risulta evidente che il *livello di difettosità* ed il *carico agente sul rivestimento* abbiano un ruolo dominante.



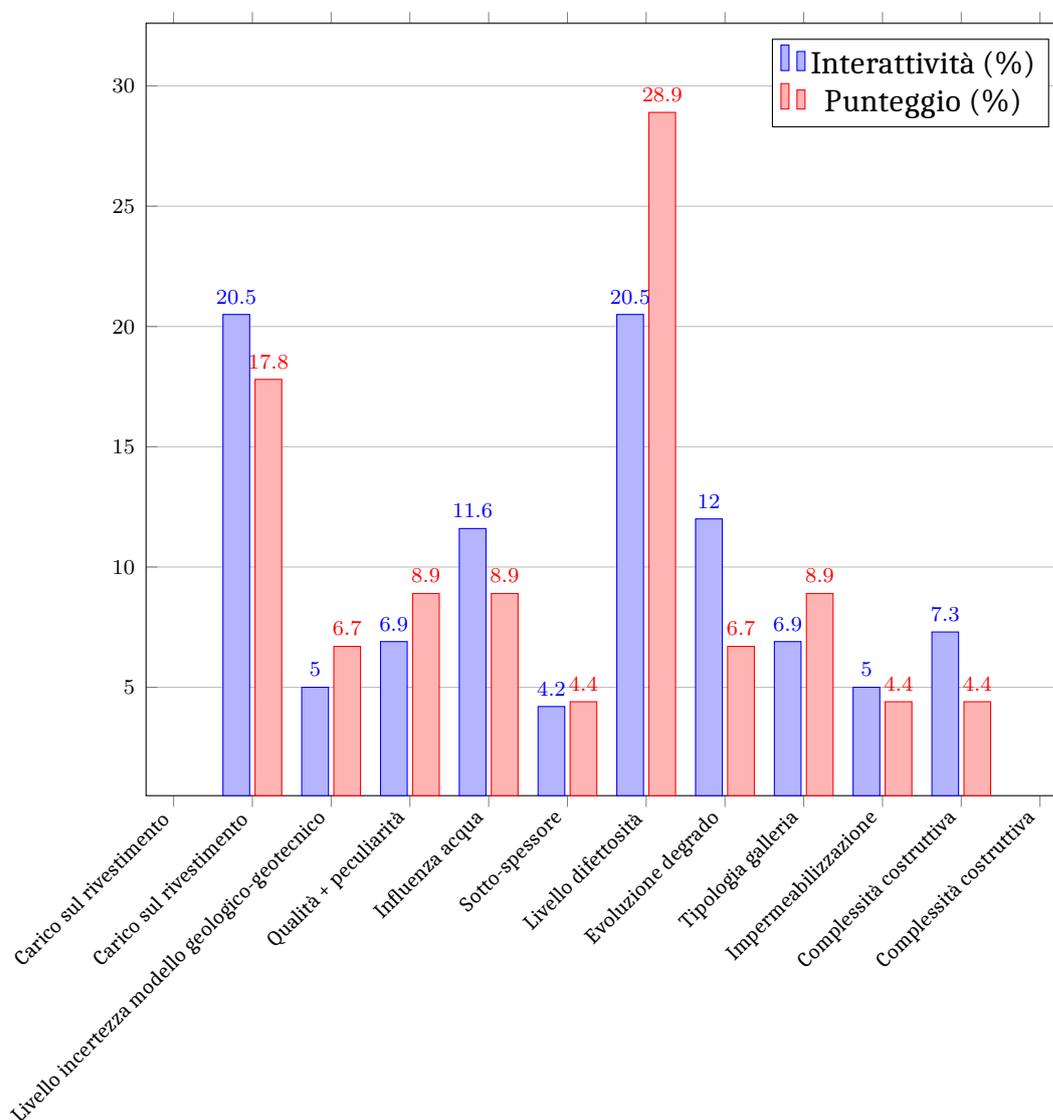
**Figura 4.10:** Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

Per riuscire ad assegnare gli intervalli entro cui far variare i punteggi di ogni parametro ci si è basati sul grafico a barre appena citato ma anche su alcune evidenze dettate dall'esperienza: la Tabella 4.4 riporta la scala dei punteggi di ciascuna voce e la suddivisione degli aspetti riconducibili alla pericolosità o alla vulnerabilità.

Il grafico a barre in Figura 4.11 permette di confrontare l'importanza che dovrebbe essere attribuita a ciascuna voce secondo l'applicazione del metodo di Hudson (in blu) e quella realmente assegnata, tramite la definizione delle scale di punteggio, alla luce di alcune evidenze dettate da ragionamenti che non si basano sulla relazione tra parametri (in rosso). Il valore del punteggio in percentuale si ottiene dividendo l'intervallo di ciascun parametro per la somma di tutti gli intervalli in esame.

Componenti del rischio	Parametri	Punteggio
Pericolosità	Carico agente sul rivestimento	0 ÷ 8
	Livello di incertezza del modello geologico/geotecnico	0 ÷ 3
	Qualità e peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno	0 ÷ 4
	Influenza dell'acqua	0 ÷ 4
	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	0 ÷ 2
Vulnerabilità	Livello di difettosità	0 ÷ 13
	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

**Tabella 4.4:** Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica



**Figura 4.11:** Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

Al *carico sul rivestimento* è stato attribuito un intervallo compreso tra 0 e 8: questo parametro incide molto sulla definizione della Classe di Attenzione perché è strettamente connesso alla resistenza del rivestimento. Riferendosi all'applicazione del Rock Engineering System riferito alla definizione della Classe di Attenzione della galleria si ricordi che questo parametro è quello che incide maggiormente (Figura 4.8). Questa voce viene valutata sulla base dei risultati delle prove in situ, in particolare quelle di martinetto piatto. Il giudizio è quantitativo dal momento che ci si deve riferire ad una percentuale della resistenza a compressione del calcestruzzo.

Il *livello di incertezza del modello geologico/geotecnico* non influisce molto sulla definizione della pericolosità, ma deve essere comunque tenuto in conto perché una adeguata conoscenza del terreno che circonda la galleria può diminuire le potenzialità di rischio. La valutazione è qualitativa e ricade in un intervallo compreso tra 0 e 3. Per lo stesso motivo sopra citato anche la *qualità e peculiarità dell'ammasso roccioso/del terreno* non può essere trascurata nell'analisi del rischio: a questa voce deve essere assegnato un punteggio qualitativo compreso tra 0 e 4.

All'*influenza dell'acqua* è stato assegnato un intervallo compreso tra 0 e 4. Considerando il fatto che questa voce risulta tra le 10 più influenti secondo l'applicazione del metodo di Hudson (Figura 4.8) si potrebbe pensare che la scala di valori non sia sufficiente per esprimere l'importanza di questo aspetto, ma la ragione di tale scelta risiede nel fatto che i carichi idrici vengono già tenuti in conto nella voce *carico agente sul rivestimento*. Per valutare questo parametro si deve effettuare una valutazione qualitativa potendo anche riferirsi ai risultati delle ispezioni effettuate in galleria.

Alla *presenza di sotto-spessore nel rivestimento* è attribuibile un punteggio compreso tra 0 e 2. Uno spessore inferiore a quello teorico non implica necessariamente un rischio per la stabilità dell'opera perché, ad esempio, il rivestimento di progetto potrebbe essere stato sovradimensionato. Questa voce viene valutata quantitativamente riferendosi alla percentuale di materiale in difetto rispetto a quanto riportato nel progetto. Questa informazione può essere reperita dai risultati delle videoendoscopie e dalle scansioni con georadar.

Gli aspetti finora descritti sono riconducibili alla pericolosità. Per quanto concerne la vulnerabilità, l'aspetto che più la caratterizza è il *livello di difettosità* a cui è attribuibile una valutazione compresa tra 0 e 13. Per valutare questo parametro occorre fare riferimento ai risultati delle ispezioni in galleria effettuate secondo quanto richiesto dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: in particolare si deve considerare la percentuale di ammaloramenti valutati secondo la classificazione IQOA.

Alla *rapidità di evoluzione del degrado* è assegnato un intervallo compreso tra 0 e 3 e la valutazione deve fondarsi sull'età della galleria e sul suo livello di difettosità. Ad una galleria costruita recentemente e che presenta molti ammaloramenti verrà attribuito il punteggio massimo.

La *tipologia di galleria* è valutabile sulla base della geometria della sezione, del materiale del rivestimento e del diametro. A questa voce è attribuito un punteggio compreso tra 0 e 4 e per definirlo si deve fare riferimento alla tabella riportata nella Figura 4.12

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	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
	cls	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
	c.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	misto*	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
Galleria a ferro di cavallo (con platea di contrasto sub-orizzontale)	muratura	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
	cls	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	c.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA
	misto*	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
Galleria (con arco rovescio)	Qualsiasi (muratura, cls, c.a.)	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
Galleria circolare (conci prefabbricati)	c.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
Galleria scatolare	c.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA

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

**Figura 4.12:** Tabella per la definizione della tipologia di galleria. Politecnico di Torino (2020)

La voce *presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione* deve essere valutata qualitativamente con un punteggio compreso tra 0 e 2. La scelta di questo intervallo viene confermata anche dall'applicazione del Rock Engineering System: questo parametro non ha una grande influenza sugli altri.

Alla *complessità costruttiva* è stata assegnata una scala di punteggio variabile tra 0 e 2. Per assegnare una valutazione è necessario effettuare delle ricerche al fine di determinare se durante la costruzione o nella fase di messa in esercizio si siano verificati degli eventi che abbiano richiesto un tempestivo intervento per il ripristino dell'opera. A questa voce è stato affidato un intervallo poco ampio perché, essendo riferita alla storia passata della galleria, si presuppone che si sia posto rimedio agli imprevisti e che quindi questi non influiscano più sull'analisi del rischio attuale. Viene però tenuta in conto la possibilità che tali eventi si ripresentino in futuro.

In Figura 4.13 si riportano le tabelle contenenti i criteri per l'attribuzione dei punteggi relativi alla Classe di Attenzione strutturale e geotecnica.

La valutazione viene effettuata con riferimento ai singoli conci di lunghezza  $20m$  in cui viene suddivisa la galleria durante l'ispezione. Per ogni elemento è necessario ricavare la somma dei punteggi assegnati, ottenendo un valore che viene chiamato  $I_{STR \& GEO, i}$ . A tale numero deve essere associata la funzione rango,  $R$ , che restituisce la sua posizione in ordine crescente, rispetto all'insieme contenente gli altri  $I_{STR \& GEO, i}$ . Per ottenere il punteggio della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica,  $I_{STR \& GEO}$ , si deve effettuare la sommatoria dei punteggi ottenuti per ciascun concio moltiplicati per il rispettivo rango e successivamente dividere per la sommatoria dei ranghi.

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

Il valore ottenuto risulterà compreso tra 0 e 45 e per poter assegnare una valutazione compresa tra bassa e alta sarà necessario ricondursi ad un punteggio in centesimi, attraverso un'adeguata proporzione, e riferirsi alla Tabella 4.2.

Carico sul rivestimento	Punteggio	0	2	4	6	8
	Qualitativo	Scarico	Debolmente carico (o scarico e asimmetrico*)	Mediamente carico (o debolmente carico e asimmetrico*)	Molto carico (o mediamente carico e asimmetrico*)	Molto carico e asimmetrico
	Quantitativo	0-10% Rck	10-20% Rck	20-50% Rck	> 50 % Rck	> 50 % Rck

\*Asimmetria >1.5 (intesa come  $\sigma_{misurata\ max}/\sigma_{misurata\ min}$ )

Incertezza modello geotecnico	Punteggio	0	1	2	3
	Qualitativo	Grado di incertezza assente	Grado di incertezza estremamente ridotto	Grado di incertezza modesto	Elevato grado di incertezza

Qualità-peculiarità a.r./terreno	Punteggio	0	0,5	1	1,5	2
	Qualitativo (2 pt)	Ottima qualità	Buona qualità	Modesta qualità	Scarsa qualità	Pessima qualità
	Giudizio ingegneristico esperto (2 pt)	Comportamento rigonfiante, fragile, creep, presenza di gas nocivi/esplosivi, rocce radioattive...				

Influenza dell'acqua	Punteggio	0	1	2	3	4
	Giudizio ingegneristico esperto	Presenza di falda, composizione chimica dell'acqua... Nella valutazione è opportuno tenere conto della presenza o meno sia dell'impermeabilizzazione del rivestimento sia di armatura.				

Presenza sottopassore nel rivestimento	Punteggio	0	1	2
	Giudizio ingegneristico esperto	<10%	10-30%	>30%

Diffetti IQOA	Punteggio	0	0-13		
	Quantitativo	Solo difetti di classe IQOA 1 e/o 2	$P_{2E} = 30 \cdot A_{2E}\%$ $P_3 = 40 \cdot A_{3\%}$ $P_{3U} = 65 \cdot A_{3U}\%$ $P_5 = 80 \cdot A_{5\%}$ $P_{IQOA} = \max_i P_i$		

Rapidità evoluzione degrado	Punteggio	0	1	2	3
	Qualitativo	Da valutare in base alla vetustà dell'opera rapportata al livello di difettosità (es. galleria con alto livello di difettosità e relativamente giovane --> +2)			

Tipologia di galleria	Punteggio	0	1	2	3	4
	Quantitativo	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA

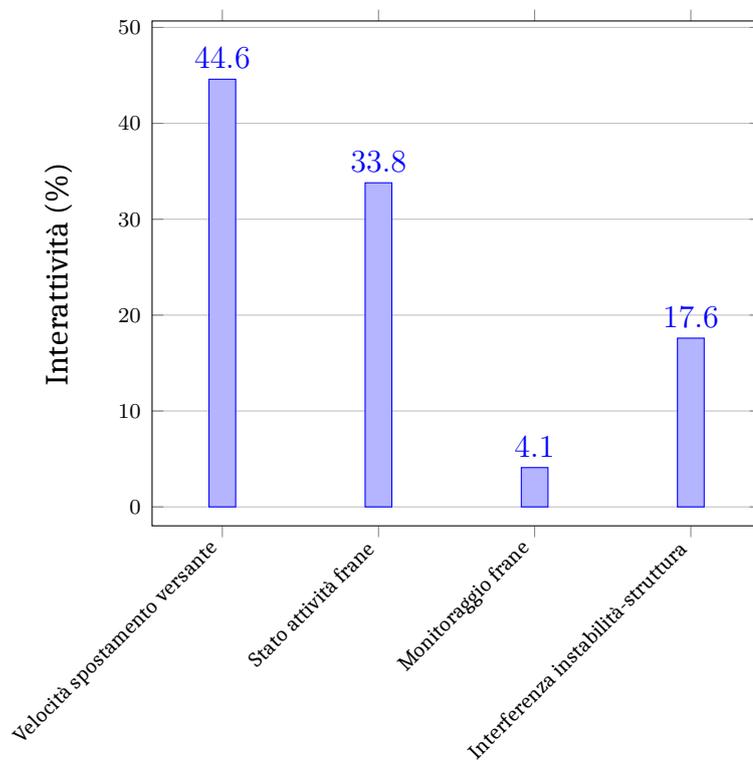
Sistema impermeabilizzazione	Punteggio	0	0,5	1	2
	Qualitativo	Presente e efficace	Presente con evidenze di macchie di umidità/locali venute d'acqua	Presente con umidità diffusa/stillicidi o venute d'acqua diffuse	Assente / completamente alterato

Complessità costruttiva	Punteggio	0	0,5	1	1,5	2
	Giudizio ingegneristico esperto	Eventi accaduti durante/dopo la costruzione sino ad oggi (es. fornelli, collassi, splaccaggi...), modalità costruttive e presenza di interventi di rinforzo/consolidamento (jet grouting, blindaggi del rivestimento, iniezioni, centinature, inflaggi...), evidenze di danni (es. lesioni nel rivestimento correlabili a stati tensionali anomali, fessure negli edifici...), TBM, piena sezione, mezza sezione... Nella valutazione di tale aspetto è opportuno tenere conto anche dell'attuale efficacia delle suddette misure.				

Figura 4.13: Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione strutturale e geotecnica (modificato da Politecnico di Torino (2020))

#### 4.4.2 Classe di Attenzione geologica

All'interno di questa Classe di Attenzione ricadono tutti i parametri che si riferiscono al contesto geomorfologico e che tengono in considerazione la possibilità che la galleria possa essere coinvolta in alcuni fenomeni legati all'instabilità dei versanti. La figura 4.14 riporta l'interattività, in termini di percentuale, dei soli parametri appartenenti a questa categoria, ottenuta applicando il metodo di Hudson.



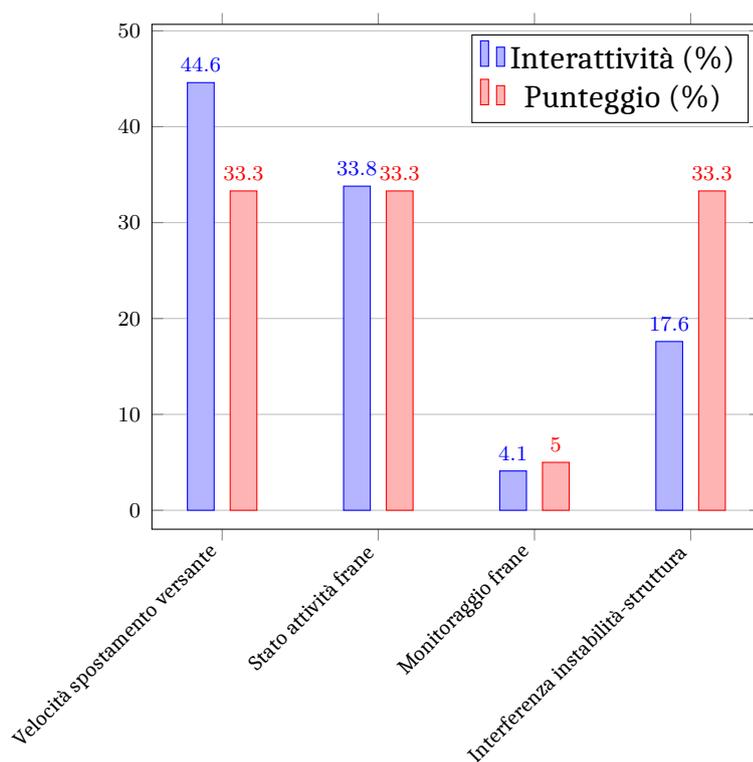
**Figura 4.14:** Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione geologica

Secondo tale metodo la voce *magnitudo dell'instabilità di versante* risulta essere quella che domina l'analisi del rischio nell'ambito geologico. I punteggi che sono stati attribuiti ai parametri vengono riportati nella Tabella 4.5. I primi tre aspetti sono connessi alla definizione di pericolosità, l'ultimo a quella di vulnerabilità.

Componenti del rischio	Parametri	Punteggio	
Pericolosità	Magnitudo dell'instabilità di versante	0 ÷ 5	0 ÷ 15
	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

**Tabella 4.5:** Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione geologica

Per confrontare l'influenza dei parametri sulla Classe di Attenzione in esame attribuita tramite l'assegnazione degli intervalli entro cui far variare i punteggi e quella che si otterrebbe applicando il Rock Engineering System, si può osservare la Figura 4.15.



**Figura 4.15:** Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione geologica

Alla *magnitudo dell'instabilità del versante* si deve assegnare un punteggio compreso tra 0 e 5. Con questo termine si intende valutare la velocità di scivolamento del versante in cui la galleria è inserita. Per poter ricavare questa informazione è consigliabile effettuare una ricerca presso gli enti regionali o nazionali che si occupano di censire i fenomeni franosi. La valutazione può essere eseguita sia qualitativamente sia, in presenza di dati che possono considerarsi veritieri, quantitativamente, analizzando la velocità di spostamento espressa in millimetri annui.

Anche allo *stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/grado di criticità per le frane potenziali* è stato assegnato un intervallo tra 0 e 5 e la valutazione di tale parametro può essere effettuata ricercando le informazioni sui portali degli enti che si occupano di questa tematica.

Per i *sistemi di monitoraggio* si è deciso di adottare un metodo di assegnazione del punteggio che si discosta da quello delle altre voci: poiché la presenza di dispositivi capaci di prevedere eventuali frane è una caratteristica positiva, l'intervallo entro cui si deve far variare il punteggio del parametro è compreso tra -5 e 0. Assegnare un voto pari a -5, in presenza di sistemi di monitoraggio, implica infatti una riduzione del punteggio della Classe di Attenzione geologica e una sua valutazione meno severa. Dal momento che l'assenza di sistemi di monitoraggio influenza l'analisi del rischio, ma tale situazione viene già tenuta in conto nella definizione degli altri parametri appartenenti all'ambito geologico, si è deciso di assegnare una valutazione massima pari a 0.

L'intervallo entro cui far variare la valutazione compreso tra 0 e 5 è stato anche assegnato all'*estensione dell'interferenza instabilità-struttura*. La valutazione di tale voce deve essere eseguita considerando se l'area interessata dai fenomeni franosi contiene interamente o solo in parte la galleria. Anche in questo caso l'informazione può essere reperita sui portali degli enti regionali o nazionali che si occupano della stabilità dei pendii.

Si noti che alle voci in esame, ad eccezione del parametro *sistemi di monitoraggio*, è stato assegnato lo stesso intervallo entro cui far variare i punteggi. In questo caso non si è tenuto conto di quanto evidenziato dall'applicazione del metodo di Hudson perché si è preferito pensare che i tre aspetti in esame

Magnitudo	Punteggio	0	0,5	1,5	3	5
	Qualitativo		Nessuna frana riconosciuta o potenziale	Molto lenta	Lenta	Rapida
Quantitativo		Nessuna frana riconosciuta o potenziale	$v < 5$ mm/anno (stimato per frane potenziali)	$5 < v < 10$ mm/anno (stimato per frane potenziali)	$10 < v < 20$ mm/anno (stimato per frane potenziali)	$v > 20$ mm/anno (stimato per frane potenziali)

Stato di attività	Punteggio	0	2	5
	Qualitativo		Nessuna frana riconosciuta o potenziale	Frana quiescente/ Frana potenziale con basso livello
Giudizio ingegneristico esperto		-5	-3	0

Estensione interferenza	Punteggio	0	3	5
	Qualitativo		Nessuna interferenza	Parziale

**Figura 4.16:** Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione geologica (modificato da Politecnico di Torino (2020))

influenzassero equamente l'analisi del rischio dell'ambito geologico.

In Figura 4.16 si riportano le tabelle contenenti i criteri per l'attribuzione dei punteggi relativi alla Classe di Attenzione geologica.

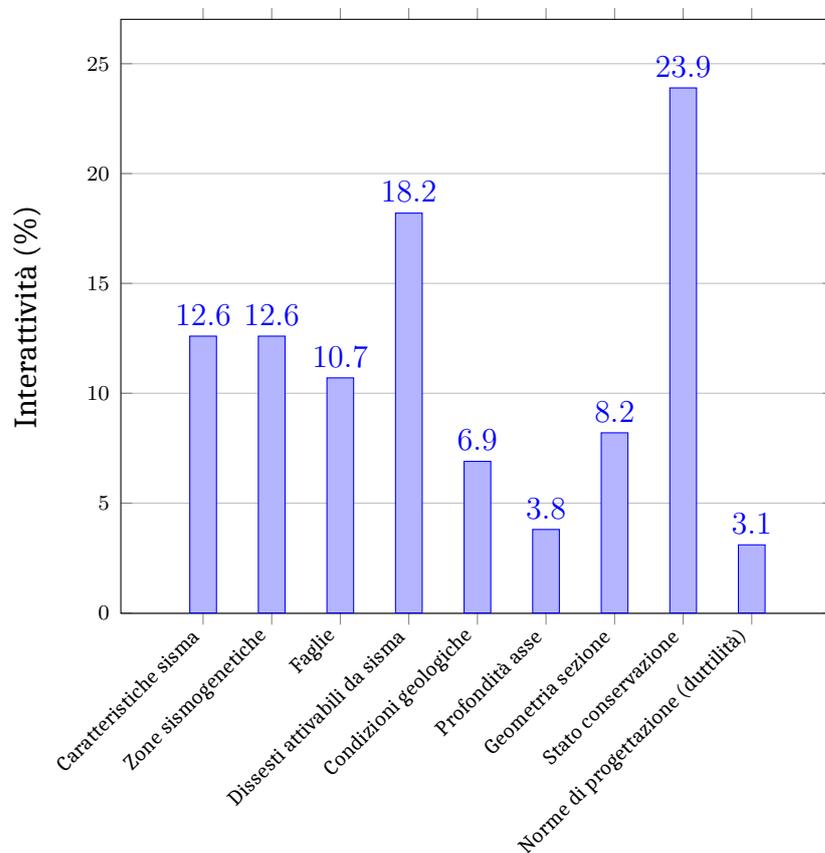
La valutazione di questa Classe di Attenzione,  $I_{GEO}$ , deve essere fatta esaminando la galleria nel suo insieme, senza riferirsi ai concetti di ispezione che la compongono: per effettuarla è sufficiente sommare i punteggi assegnati ai quattro parametri e ricondursi ad una valutazione percentuale per capire se questa sia alta, medio-alta, media, medio-bassa o bassa secondo quanto riportato in Tabella 4.2.

#### 4.4.3 Classe di Attenzione sismica

A questa Classe di Attenzione appartengono i parametri che prendono in considerazione la sismicità dell'area in cui è collocata la galleria.

La Figura 4.17 riporta l'interattività percentuale dei soli aspetti appartenenti a questa categoria, ottenuta applicando il Rock Engineering System. I parametri che influenzano maggiormente l'analisi del rischio sono la *resistenza e stato conservazione del rivestimento* e la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*. In Tabella 4.6 sono riportati gli intervalli dei punteggi degli aspetti in esame. Si noti che tutti i parametri, ad eccezione delle *caratteristiche del sisma*, sono riconducibili alla definizione di vulnerabilità.

Per osservare le differenze tra quanto ottenuto applicando il metodo di Hudson e gli intervalli scelti si può far riferimento alla Figura 4.18: si noti che

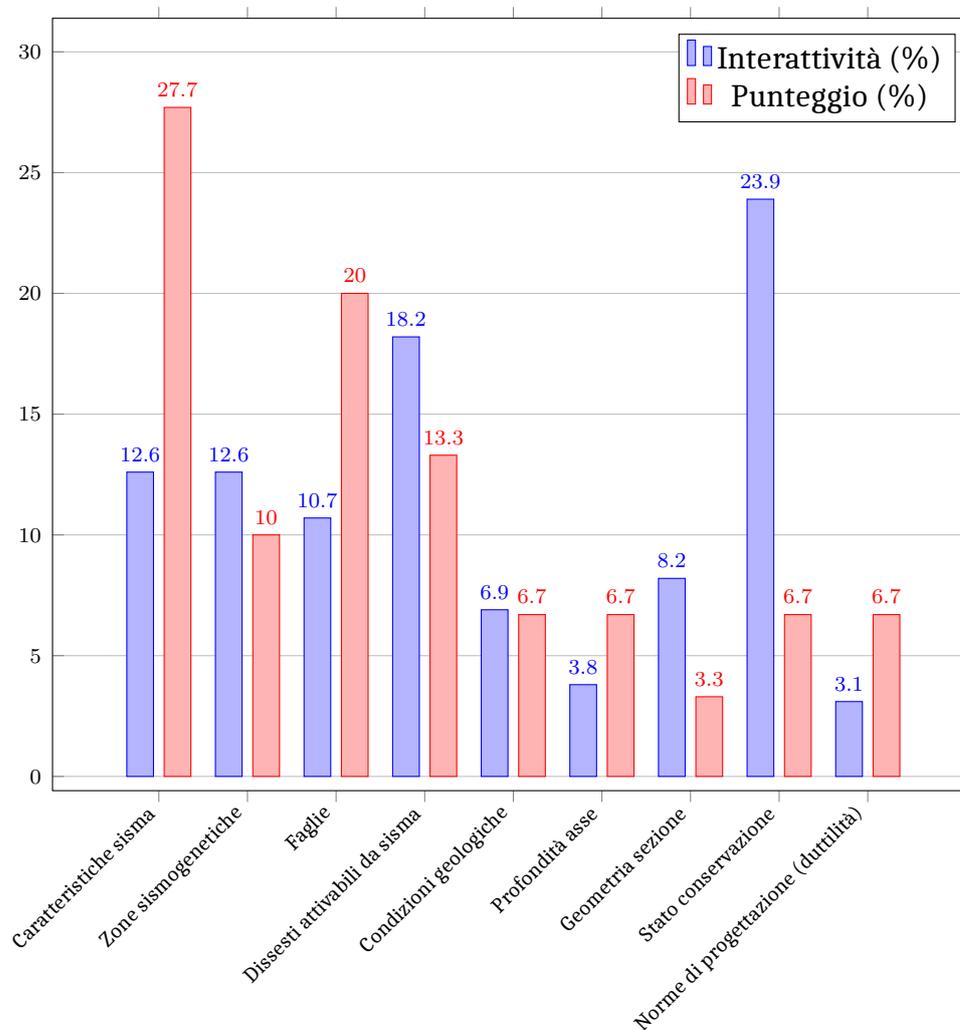


**Figura 4.17:** Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione sismica

Componenti del rischio	Parametri	Punteggio
Pericolosità	Caratteristiche del sisma	0 ÷ 4    0 ÷ 4
	Inclusione in zone sismogenetiche	0 ÷ 1.5
Vulnerabilità	Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali	0 ÷ 3
	Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica	0 ÷ 2    0 ÷ 11
	Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno	0 ÷ 1
	Profondità dell'asse della galleria	0 ÷ 1
	Geometria della galleria	0 ÷ 0.5
	Resistenza e stato conservazione del rivestimento	0 ÷ 1
	Norme di progettazione/duttilità del rivestimento	0 ÷ 1

**Tabella 4.6:** Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione sismica

in questo caso si è deciso di non attenersi ai risultati del Rock Engineering System ma di assegnare le scale di punteggio basandosi su altre evidenze dettate dall'esperienza.



**Figura 4.18:** Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione sismica

Al parametro *caratteristiche del sisma* è stato assegnato un intervallo compreso tra 0 e 4, che è il più ampio tra quelli attribuiti agli aspetti di questa Classe di Attenzione. Tale scelta è dettata dal fatto che l'accelerazione al suolo e la magnitudo di momento dettano l'intensità delle sollecitazioni a cui sarà soggetta la galleria in caso di sisma. La valutazione di questo parametro può

essere effettuata ricercando le informazioni presso i portali degli enti che si occupano di definire la pericolosità sismica dei territori, ad esempio l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

All'*inclusione in zone sismogenetiche* si deve attribuire un punteggio incluso tra 0 e 1,5. Per valutare tale aspetto si deve conoscere la distanza tra la galleria e le zone sismogenetiche che si trovano nei dintorni ricercando le informazioni presso gli enti che si occupano di questa tematica.

Alla voce *presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali* è stato attribuito un intervallo compreso tra 0 e 3: la scelta si è basata sul fatto che l'attraversamento di tali elementi può provocare importanti deformazioni alla galleria. L'informazione può essere ricavata dai documenti progettuali e dalle carte geologiche.

La *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica* viene valutata con un valore compreso tra 0 e 2. La presenza dei dissesti deve essere verificata riferendosi alle informazioni ricavabili dagli enti che si occupano della stabilità dei versanti. Unendo questo dato alla pericolosità sismica della zona è possibile assegnare un punteggio a questo parametro.

Alle *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno* deve essere attribuito un punteggio variabile tra 0 e 1. La valutazione deve essere effettuata risalendo alle categorie di terreno riportate nelle Norme Tecniche 2018.

La *profondità dell'asse della galleria* deve essere valutata ottenendo le informazioni dai documenti progettuali. Il punteggio da assegnare a tale parametro deve essere compreso tra 0 e 1.

Il punteggio attribuibile alla *geometria della galleria* varia tra 0 e 0,5 in relazione al fatto che alcune forme, come quelle circolari, resistono maggiormente agli incrementi degli sforzi dovuti alla sollecitazione sismica.

La *resistenza e stato conservazione del rivestimento* deve essere valutata con un punteggio compreso tra 0 e 1. La scelta di un intervallo ristretto ricade nel fatto che questa voce è collegata alla Classe di Attenzione strutturale e geotecnica e si vuole evitare la ridondanza degli aspetti di cui si è già tenuta in considerazione l'importanza. Questo parametro deve essere valutato facendo riferimento ai singoli conci di ispezione: questa scelta si rispecchia

Caratteristiche del sisma	Punteggio	0	1	2	3	4
	PGA	<0.01 g	<0.05 g	<0.15 g	<0.25 g	>0.25 g
	Mw	<3	<4	<5	<6	>6
Zone sismogenetiche	Punteggio	0	0,5	1	1,5	
	Distanza	>30	>20	>10	<10	
Faglie capaci Passaggi formazionali	Punteggio	0	1	2	3	
	Faglie capaci	Assente	-	-	Presente	
	Passaggi formazionali	Assente	Contatto tettonico con presenza di salbande di fratturazione	Contatto tettonico materiale metamorfico/basamento	Contatto tettonico con materiale miolitico	
Dissesti attuali	Punteggio	0	0,5	1,5	2	
	Giudizio ingegneristico	Assente	Rischio limitato	Rischio moderato	Rischio elevato	
Condizioni geologiche A.R. / Terreno	Punteggio	0	0,25	0,5	0,75	1
	Quantitativo	Cat A	Cat B	Cat C	-	Cat D/E
Profondità asse galleria	Punteggio	0	0,25	0,75	1	
	Copertura	>100	>50	>25	<25	
Geometria della galleria	Punteggio	0	0,25	0,5		
	Giudizio ingegneristico esperto	Dimensioni sezione Forma sezione (circolare, ferro di cavallo, arco rovescio,...)				
Resistenza rivestimento e stato conservazione	Punteggio	0	0,25	0,5	0,75	1
	CdA Str	1	2	3	4	5
Norme progettazione e duttilità	Punteggio	0	0,25	0,5	0,75	1
	Norme	Antisismiche	-	-	-	Standard
	Rivestimento a collasso	Collasso duttile	Collasso duttile con limitata sovrarresistenza plastica	Collasso fragile e alta sovrarresistenza statica	Collasso fragile e modesta sovrarresistenza statica	Collasso fragile e scarsa sovrarresistenza statica

**Figura 4.19:** Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione sismica (modificato da Politecnico di Torino (2020))

sulla valutazione di tutte le altre voci di questo ambito.

Le norme di progettazione/duttilità del rivestimento vengono valutate con un punteggio tra 0 e 1. In questo caso, analizzando la documentazione progettuale, occorre stabilire quali scelte si siano effettuate per evitare il collasso della struttura in caso di sisma.

In Figura 4.19 si riportano le tabelle contenenti i criteri per l'attribuzione dei punteggi relativi alla Classe di Attenzione geologica.

Poiché la Classe di Attenzione sismica deve essere valutata facendo riferimento ai singoli conci che compongono la galleria, per definirla è necessa-

Componenti del rischio	Parametri	Punteggio	
Pericolosità	Trasporto di merci pericolose	0 ÷ 2	0 ÷ 4
	Incidentalità caratteristica	0 ÷ 2	
Vulnerabilità	Lunghezza	0 ÷ 4	0 ÷ 11
	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	0 ÷ 3	
	Difetti/Assenza di misure strutturali	0 ÷ 3	
	Piani di intervento	0 ÷ 1	

**Tabella 4.7:** Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione incendio

rio ricorrere alla formula descritta per la Classe di Attenzione strutturale e geotecnica:

$$I_{SIS} = \frac{\sum_{i=1}^n [I_{SIS,i} \times R(I_{SIS,i})]}{\sum_{i=1}^n R(I_{SIS,i})} \quad (4.2)$$

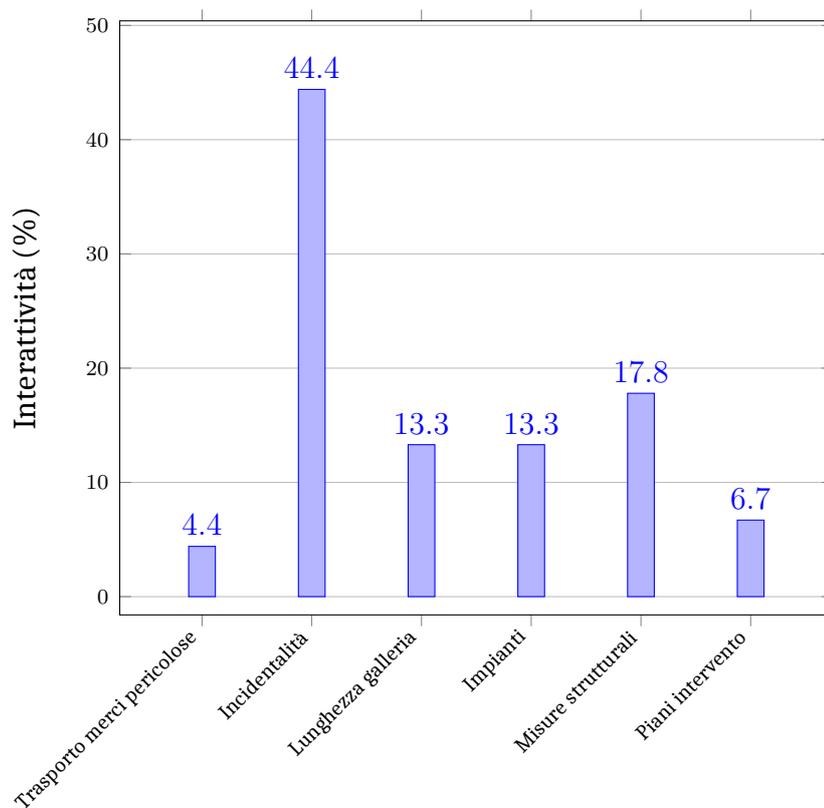
Come per le altre Classi di Attenzione, anche in questo caso ci si deve poi ricondurre ad una valutazione percentuale per poter stabilire se la Classe in esame sia alta, medio-alta, media, medio-bassa o bassa secondo quanto riportato in Tabella 4.2.

#### 4.4.4 Classe di Attenzione incendio

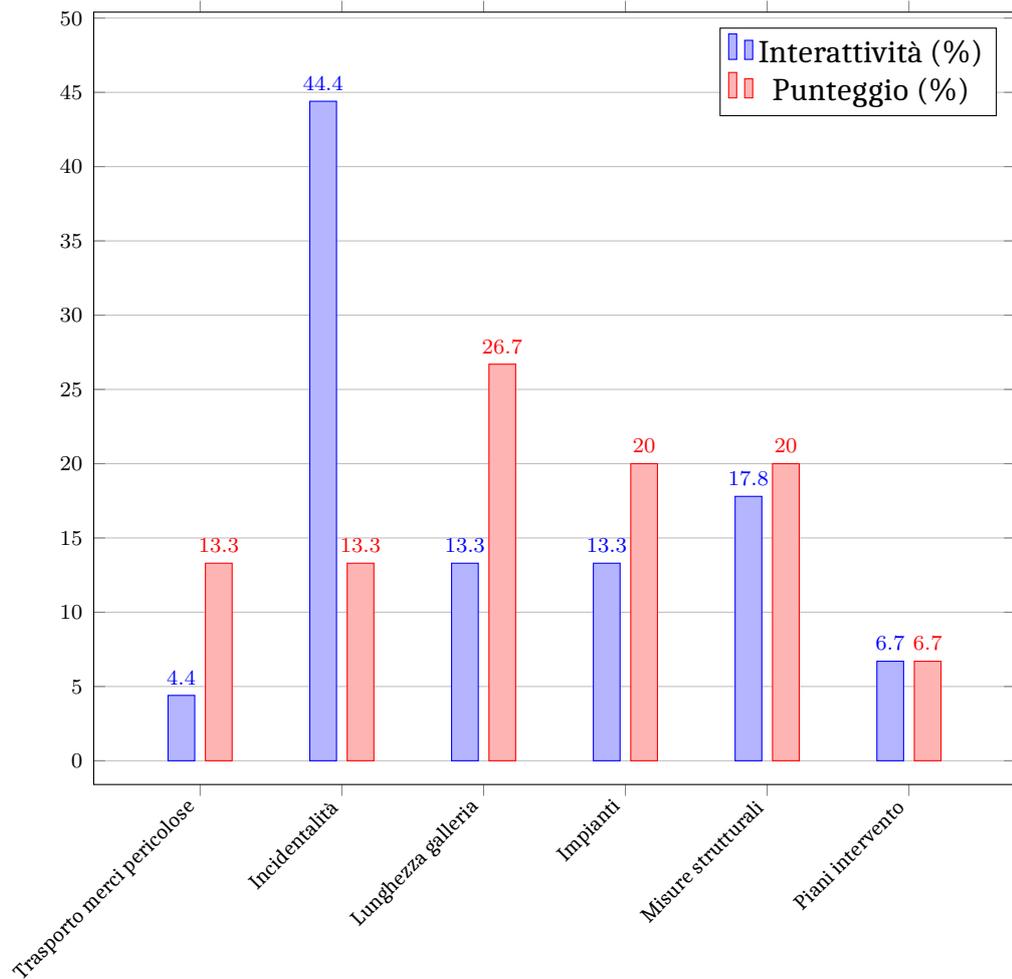
Fanno parte di questa Classe di Attenzione i parametri che sono connessi al rischio di occorrenza di eventi che possano provocare incendi in galleria.

In Figura 4.20 è riportata l'interattività delle voci appartenenti a questa categoria: si noti che l'*incidentalità caratteristica* è il parametro che presenta il valore più elevato. Questo aspetto, assieme al *trasporto di merci pericolose*, è riconducibile alla definizione di pericolosità. Gli altri elementi riguardano, invece, la vulnerabilità.

Nelle Tabella 4.7 sono riportati i punteggi assegnati ai parametri di questa Classe di Attenzione. Il confronto tra l'importanza attribuita con la definizione degli intervalli di valutazione e quella teorica, ricavata dall'applicazione del metodo di Hudson per mezzo dell'interattività, è riportata in Figura 4.21.



**Figura 4.20:** Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione incendio



**Figura 4.21:** Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione incendio

Al trasporto di merci pericolose e all'incidentalità caratteristica è stato attribuito un punteggio compreso tra 0 e 2. Per l'assegnazione di tale intervallo ai due parametri non è stato tenuto in considerazione il risultato dell'applicazione del Rock Engineering System dal momento che il primo risultava essere trascurabile e il secondo troppo preponderante nell'analisi del rischio. Le due voci in esame si riferiscono alla possibilità di accesso alla galleria da parte di mezzi che trasportano merci pericolose, infiammabili o velenose, e al numero di incidenti annui accaduti all'interno dell'opera. Le informazioni possono essere ricavate dalla documentazione fornita da Autostrade per l'Italia.

Alla lunghezza della galleria è attribuibile una valutazione compresa tra 0 e 4. In questo caso si è deciso di incrementare l'importanza di questo parametro perché è proprio in funzione dell'estensione dell'opera che le norme vigenti impongono la dotazioni di particolari sistemi che incrementano la sicurezza. Questa informazione è facilmente deducibile dalla documentazione progettuale.

Ai difetti/assenza di misure impiantistiche e strutturali è stato assegnato il medesimo intervallo entro cui far variare il punteggio: da 0 a 3. Per assegnare una valutazione alle due voci in esame è necessario valutare la presenza e l'efficienza degli impianti e delle strutture collocate all'interno della galleria. Un punteggio basso verrà attribuito alle opere ben fornite.

Alla voce *piani di intervento* è assegnato un punteggio compreso tra 0 e 1. Per valutare tale voce è necessario comprendere se i piani di intervento in caso di emergenza siano presenti o assenti.

La Figura 4.22 riporta i criteri per l'attribuzione dei punteggi relativi ai parametri della Classe di Attenzione incendio.

La valutazione di questa Classe di Attenzione,  $I_{INC}$ , si effettua considerando la galleria nel suo insieme, senza doverla suddividere in conci di ispezione: sommando i punteggi attribuiti a ciascun parametro e riconducendo il risultato ad un valore percentuale è possibile stabilire se questa sia alta, medio-alta, media, medio-bassa o bassa secondo quanto riportato in Tabella 4.2.

Trasporto merci pericolose	Punteggio	0	0,5	1	1,5	2
	Qualitativo	Restrizione al trasporto di tutte le merci pericolose.	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.	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante, un'esplosione importante o una perdita importante di materie tossiche.	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante.	Nessuna restrizione al trasporto di merci pericolose.
Incidentalità caratteristica	Punteggio	0	0,5	1	1,5	2
	Giudizio ingegneristico esperto	In assenza di dati specifici, è possibile correlarla a lunghezza della galleria, traffico medio giornaliero per corsia, percentuale dei mezzi pesanti e numero di corsie.				
	Quantitativo	da 0 a 1 per 10 <sup>8</sup> veicoli per km	da 1 a 5 per 10 <sup>8</sup> veicoli per km	da 5 a 10 per 10 <sup>8</sup> veicoli per km	da 10 a 30 per 10 <sup>8</sup> veicoli per km	>30 per 10 <sup>8</sup> veicoli per km
Lunghezza	Punteggio	0	1	2	3	4
	Qualitativo	Molto breve	Breve	Modesta	Lunga	Molto lunga
	Quantitativo	<200 m	200-500 m	500-1000 m	1000-1500 m	>1500 m
Misure impiantistiche	Punteggio	0	1	2	3	
	Giudizio ingegneristico esperto	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... Valutarne anche lo stato attuale di funzionamento/manutenzione.				
Misure strutturali	Punteggio	0	1	2	3	
	Giudizio ingegneristico esperto	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... Valutarne anche lo stato attuale di funzionamento/manutenzione.				
Piani di intervento in caso di emergenza	Punteggio	0	1			
	Qualitativo	Presenti	Assenti			

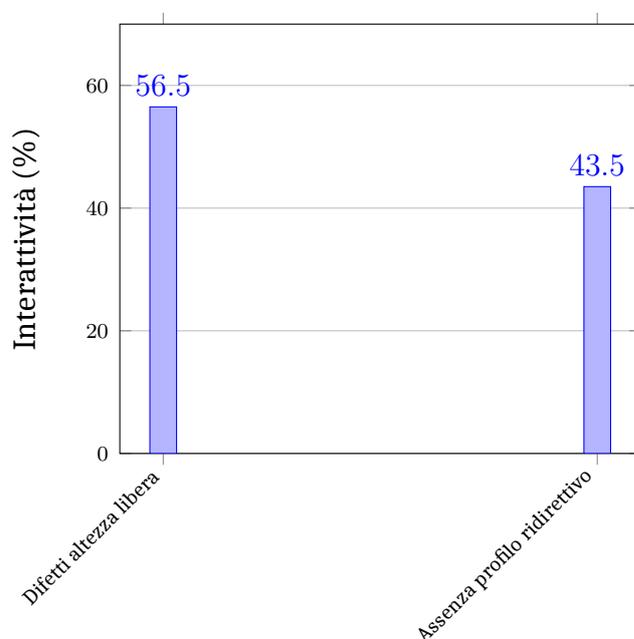
\*Elenco a titolo indicativo ma non esaustivo

**Figura 4.22:** Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione incendio (modificato da Politecnico di Torino (2020))

### 4.4.5 Classe di Attenzione geometrica

La classe di Attenzione in esame racchiude al suo interno i parametri che sono collegati ai difetti della sezione trasversale secondo quanto sancito dal Decreto Ministeriale 5 novembre 2001, n 6792. Tale norma richiede che l'altezza libera nella galleria non sia inferiore a 4,7 metri e che la corsia di emergenza e il margine sinistro dell'opera siano delimitati da un profilo ridirettivo.

La Figura 4.23 evidenzia l'interattività, derivata dall'applicazione del Rock Engineering System, dei due parametri appartenenti a questa Classe di Attenzione.



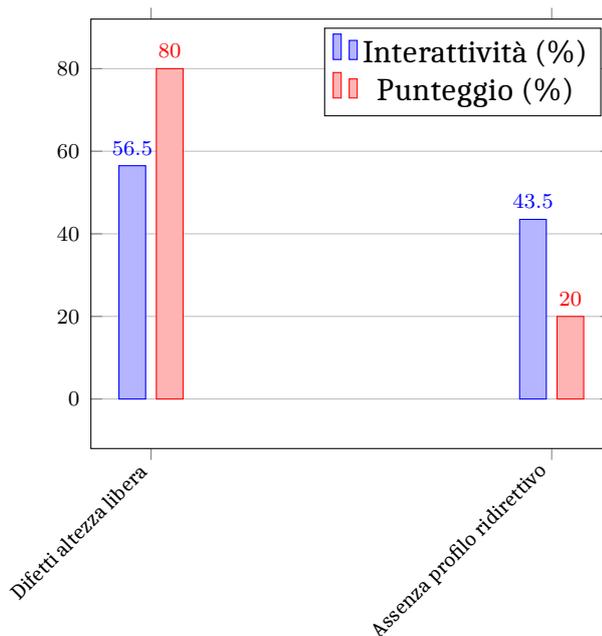
**Figura 4.23:** Interattività dei parametri appartenenti alla Classe di Attenzione geometrica

La Tabella 4.8 riporta gli intervalli entro cui far variare i punteggi dei due parametri: si noti che il primo è riconducibile alla pericolosità e il secondo alla vulnerabilità.

Per osservare la differenza tra quanto ottenuto applicando il metodo di Hudson e gli intervalli scelti si può far riferimento alla Figura 4.24.

Componenti del rischio	Parametri	Punteggio
Pericolosità	Difetti di altezza libera (gabarit)	$0 \div 8$ $0 \div 8$
Vulnerabilità	Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti	$0 \div 2$ $0 \div 2$

**Tabella 4.8:** Intervallo dei punteggi attribuibili ai parametri della Classe di Attenzione geometrica



**Figura 4.24:** Confronto tra interattività dei parametri e intervallo dei punteggi per la Classe di Attenzione geometrica

Ai *difetti di altezza libera* è stato assegnato un intervallo compreso tra 0 e 8. La scelta si è basata sul fatto che questo parametro influenza molto la sicurezza degli utenti. Le informazioni necessarie all'assegnazione della valutazione possono essere reperite dall'analisi dei documenti progettuali.

All'*assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti* è attribuito un intervallo più ristretto, compreso tra 0 e 2, perché la presenza di questo elemento non influisce sulla sicurezza tanto quanto la voce precedente.

La Figura 4.25 riporta i criteri secondo cui attribuire i punteggi ai due parametri di questa Classe di Attenzione.

La valutazione di questa Classe di Attenzione deve essere eseguita facendo riferimento ai singoli concetti di ispezione. La valutazione finale,  $I_{GEOM}$ , si

Difetti di altezza libera (gabarti)	Punteggio	0	2	4	6	8
	Quantitativo		>4.70 m	4.50-4.70 m	4.30-4.50 m	4.00-4.30 m

Assenza profilo indiretto addossato ai piedritti	Punteggio	0	2
	Qualitativo		Presente

**Figura 4.25:** Attribuzione dei punteggi per la Classe di Attenzione geometrica (modificato da Politecnico di Torino (2020))

ottiene attribuendo a tutta la galleria il punteggio del concio,  $I_{GEOM, i}$ , che presenta il valore massimo.

$$I_{GEOM} = \max \{ I_{GEOM, 1}; I_{GEOM, 2}; \dots; I_{GEOM, i}; \dots I_{GEOM, n} \} \quad (4.3)$$

#### 4.4.6 Classe di Attenzione della galleria

Una volta definite le cinque Classi di Attenzione, per descrivere quella della galleria è sufficiente effettuare la somma dei punteggi assegnati a ciascuno dei cinque ambiti.

$$CdA_{GALLERIA} = I_{STR\&GEO} + I_{GEOL} + I_{SIS} + I_{INC} + I_{GEOM} \quad (4.4)$$

Nel capitolo successivo si riporta un esempio di applicazione del metodo SMART a quattro gallerie autostradali italiane.



## **Capitolo 5**

# **Applicazione del metodo SMART**

Il metodo SMART è stato applicato a quattro gallerie autostradali italiane gestite da Autostrade per l'Italia S.p.A. Per poter attribuire i punteggi ai parametri utili alla definizione della Classe di Attenzione di ciascuna galleria, la concessionaria ha autorizzato il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino a prendere visione della documentazione utile. Di seguito vengono descritti i passaggi che hanno condotto alla definizione della Classe di Attenzione delle opere prese in esame.



**Figura 5.1:** Collocazione delle quattro gallerie in esame

## 5.1 Galleria Castello

### 5.1.1 Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

La galleria Castello si colloca sull'autostrada A26 Genova - Gravelona Toce. Il metodo SMART è stato applicato alla canna destra della galleria, in direzione Gravelona Toce e nel seguito si riportano i ragionamenti che hanno condotto alla definizione della Classe di Attenzione di questa opera. I documenti che sono stati forniti da Autostrade per l'Italia e che hanno permesso di ottenere le informazioni utili all'attribuzione dei punteggi dei parametri sono riportati in bibliografia.

La Figura 5.3 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito strutturale e geotecnico. Si noti che tale Classe di Attenzione viene definita analizzando i singoli conci ispettivi che compongono la galleria. In questo caso l'opera, essendo lunga 500 metri, è stata suddivisa in 25 tratti lunghi 20 metri.

Il *carico agente sul rivestimento* è stato valutato facendo riferimento ai risultati delle prove di martinetto piatto (MTSEngineering, 2020a). La maggior parte dei conci che sono stati oggetto di tali prove hanno manifestato carico asimmetrico. Il valore di resistenza media è risultato essere pari a 38,4 MPa (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e).

Per assegnare il punteggio al *livello di incertezza del modello geologico / geotecnico* si sono ricercate le informazioni all'interno della documentazione fornita da Autostrade per l'Italia S.p.a: la galleria si colloca all'interno dell'Unità Tettonica del gruppo di Voltri, un complesso geologico costituito prevalentemente da ammassi rocciosi caratterizzati da una marcata scistosità (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e). Non sono state effettuate delle prove per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso circostante e per questo motivo si è attribuita a tutti i conci della galleria la valutazione 2: grado di incertezza modesto.

La *qualità* dell'ammasso roccioso è stata valutata come modesta (valore 1) e alla *peculiarità* è stato assegnato un punteggio pari a 0,5 dovuto alla



Figura 5.2: Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e)

scistosità.

Per definire l'*influenza dell'acqua* sono stati analizzati i risultati delle ispezioni effettuate in galleria (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020a): alcuni conci, a cui è stato attribuito un punteggio pari a 2 o 3, sono risultati soggetti ad ammaloramenti causati dall'acqua. Ai tratti in buone condizioni non è stato attribuito un punteggio nullo in virtù del fatto che il rivestimento della galleria è sprovvisto di impermeabilizzazione.

La *presenza di sotto-spessore nel rivestimento* è stata diagnosticata facendo riferimento ai risultati ottenuti con l'indagine georadar (Akron, 2020) e dalle videoendoscopie (MTSEngineering, 2020b). Da queste ultime infatti è stata riscontrata la presenza di intercapedini tra l'ammasso roccioso ed il rivestimento definitivo. Lo spessore di progetto, sulla base del quale valutare la percentuale di sotto-spessore, è riportato nella documentazione As Built (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e) e varia tra i 90 e i 110 cm a seconda del tipo di rivestimento impiegato nei diversi tratti.

Il *livello di difettosità* dei conci è stato valutato facendo riferimento al documento contenente le percentuali di ammaloramento con relativa classificazione IQOA (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020i). Il concio che presenta il

maggior numero di difetti è il secondo.

La galleria Castello è stata costruita negli anni '70: essendo passati circa 50 anni dalla sua messa in esercizio e poiché l'opera non presenta gravi ammaloramenti si è deciso di assegnare alla voce *rapidità di evoluzione del degrado* il punteggio nullo.

Per definire la *tipologia di galleria* si è utilizzata la Tabella 4.12. Dalla documentazione As Built risulta che il diametro della galleria sia di circa 14 metri, l'arco rovescio sia presente ed il materiale del rivestimento sia il calcestruzzo (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e). La tipologia risulta essere media e la valutazione ad essa associata è 2.

Alla voce *presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione* è stato assegnato il punteggio massimo dal momento che la galleria Castello non ne è provvista.

La *complessità costruttiva* ha ottenuto un punteggio pari ad 1 poiché dalla documentazione As Built risulta che la galleria presenti delle centinature (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e).

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato secondo quanto descritto nel paragrafo 4.4.1. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione strutturale e geotecnica risulta essere medio-bassa con un punteggio percentuale pari a 39,6%, corrispondente al valore di 17,81 su un massimo di 45.

	STRATEGICO										P	V	P+V	Rango	I*R	P+V (%)	Cda concilio	I Strategico
	Periodicità					Vulnerabilità												
	Carico agente sul rivestimento	Livello di inerenza del modello geologico/geotecnico di progetto	Qualità ammesso roccioso/terreno + peculiarità	Influenza dell'acqua	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	Livello di difettosità	Rapidità di evoluzione del degrado (vetustà)	Tipologia di galleria	Presenza ed efficienza di sistema di impermeabilizzazione	Complessità costruttiva								
1	2	2	1,5	1	0	6	0	2	2	1	6,5	11,0	17,5	16	280,0	38,9%	MEDIO-BASSA	MEDIO-BASSA
2	2	2	1,5	1	0	9	0	2	2	1	6,5	14,0	20,5	24	492,0	46,5%	MEDIA	
3	2	2	1,5	1	1	3	0	2	2	1	7,5	8,0	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
4	2	2	1,5	2	2	2	0	2	2	1	9,5	7,0	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
5	2	2	1,5	2	2	4	0	2	2	1	9,5	9,0	18,5	21	388,5	41,1%	MEDIA	
6	2	2	1,5	2	2	3	0	2	2	1	9,5	8,0	17,5	16	280,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
7	2	2	1,5	1	1	4	0	2	2	1	7,5	7,0	14,5	2	29,0	32,2%	MEDIO-BASSA	
8	2	2	1,5	1	2	4	0	2	2	1	8,5	9,0	17,5	16	280,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
9	2	2	1,5	1	0	3	0	2	2	1	6,5	8,0	14,5	2	29,0	32,2%	MEDIO-BASSA	
10	2	2	1,5	2	0	7	0	2	2	1	7,5	12,0	19,5	23	448,5	43,3%	MEDIA	
11	2	2	1,5	2	0	4	0	2	2	1	7,5	8,0	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
12	2	2	1,5	1	0	3	0	2	2	1	6,5	9,0	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
13	2	2	1,5	1	0	3	0	2	2	1	6,5	8,0	14,5	2	29,0	32,2%	MEDIO-BASSA	
14	2	2	1,5	1	0	2	0	2	2	1	6,5	7,0	13,5	1	13,5	30,0%	MEDIO-BASSA	
15	2	2	1,5	3	1	3	0	2	2	1	9,5	8,0	17,5	16	280,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
16	2	2	1,5	3	1	6	0	2	2	1	9,5	11,0	20,5	24	492,0	45,6%	MEDIA	
17	2	2	1,5	2	0	3	0	2	2	1	7,5	8,0	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
18	2	2	1,5	1	0	3	0	2	2	1	7,5	8,0	14,5	2	29,0	32,2%	MEDIO-BASSA	
19	2	2	1,5	1	0	5	0	2	2	1	6,5	10,0	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
20	2	2	1,5	2	2	2	0	2	2	1	9,5	7,0	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
21	2	2	1,5	2	0	4	0	2	2	1	7,5	9,0	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
22	2	2	1,5	2	1	4	0	2	2	1	8,5	9,0	17,5	16	280,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
23	2	2	1,5	1	2	4	0	2	2	1	8,5	9,0	17,5	16	280,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
24	2	2	1,5	1	1	6	0	2	2	1	7,5	11,0	18,5	21	388,5	41,1%	MEDIA	
25	2	2	1,5	1	0	4	0	2	2	1	6,5	9,0	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	

Figura 5.3: Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica



		GEOL								
		Pericolosità			Vulnerabilità	P	V	P+V	I <sub>geol</sub>	
		Magnitudo dell'instabilità di versante intesa come massima velocità di spostamento	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/Grado di criticità per le frane potenziali	Presenza/Assenza/Presenza di Early Warning System, grandezze monitorate e tipologie di strumenti	Volumi/estensione dell'interferenza instabilità-struttura					
INTERA GALLERIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,0%
Punteggio massimo ottenibile						10	5	15	Classe di Attenzione	
						BASSA				

**Figura 5.5:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione geologica

### 5.1.3 Valutazione della Classe di Attenzione sismica

La Figura 5.8 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai parametri utili alla definizione della Classe di Attenzione sismica che viene valutata facendo riferimento ai singoli concetti ispettivi.

Alla voce *caratteristiche del sisma* è stato attribuito il punteggio pari a 2 perché l'accelerazione al suolo del sito in cui si colloca la galleria Castello è uguale a 0,067g (50° percentile e tempo di ritorno di 475 anni). La magnitudo di momento è pari a 4.5 (INGV, 2020b).

L'*inclusione in zone sismogenetiche* è stata valutata ricercando l'informazione presso il portale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: la galleria Castello si colloca a poco più di 20 km dalla zona sismogenetica più vicina e per questo motivo è stato assegnato a questa voce il punteggio 0,5 (INGV, 2020a).

Al parametro *presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali* è stato assegnata la valutazione 1 poiché la galleria Castello attraversa la formazione delle Metabasiti di Rossiglione e localmente incontra lenti di rocce appartenenti alla Formazione dei Serpentinocisti e dei Calcescisti del Turchino (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e).

Per quanto concerne la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*, dal momento che in prossimità della galleria non risultano porzioni di versante instabile, si è assegnato il punteggio 0.



**Figura 5.6:** Inclusione delle gallerie Castello e Manfreida nelle zone sismogenetiche. (INGV, 2020a)

La categoria di terreno nel quale è inserita la galleria Castello, secondo la NTC 2018, risulta essere B (Figura 5.7). Per questo motivo il punteggio attribuito alle *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso* è 0,25.

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 5.7:** Categorie di sottosuolo. (NTC2018, 2018)

La *profondità dell'asse della galleria* è stata valutata ricorrendo ad alcune cartografie che riportano le curve di livello del territorio in prossimità dell'opera in esame. Dopo un'attenta analisi la profondità media della galleria è risultata essere compresa tra 50 e 60 metri.

Il punteggio pari a 0 assegnato alla *geometria della galleria* è dovuto all'evidenza che la forma piuttosto circolare della sezione e la presenza di arco rovescio favoriscono la redistribuzione delle sollecitazioni.

La valutazione della *resistenza e stato conservazione del rivestimento* si è basata sulle Classi di Attenzione strutturale e geotecnica ottenute per i singoli conci. Si noti che questo è l'unico parametro a cui si attribuiscono valori diversi ai segmenti ispettivi ed è la ragione per cui la Classe di Attenzione sismica non viene valutata facendo riferimento all'intera galleria.

All'ultimo parametro in esame, *norme di progettazione/duttilità del rivestimento*, si è assegnato il punteggio massimo, pari ad 1, poiché la galleria Castello, come la maggior parte delle opere risalenti al 1970, non è stata progettata per poter resistere ad elevate sollecitazioni sismiche.

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato come descritto nel paragrafo 4.4.3. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione sismica risulta essere medio-bassa con un punteggio percentuale pari a 36,4%, corrispondente al valore di 5,46/15.

Periodicità (Caratteristiche del sistema)	Valutabilità					Resistenza del rivestimento e stato di conservazione	Norme di progettazione/quadri di riferimento	P	V	P-V	Rango	T-R	P-V (%)	Cda con P	I <sub>s</sub>
	Inclusione in zone sismogenetiche	Presenza di irregole fraglie capaci/passaggi formazionali	Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica	Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno	Profondità dell'asse della galleria										
1	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	I <sub>s</sub> 36,4%
2	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,5	5,5	21	115,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
3	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
4	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
5	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,5	5,5	21	115,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
6	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
7	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
8	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
9	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	21	115,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
10	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
11	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
12	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
13	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
14	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
15	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
16	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	21	115,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
17	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
18	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
19	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
20	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
21	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
22	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
23	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	
24	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,5	21	115,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
25	2	0,5	1	0	0,25	0,25	1	2	3,3	5,3	1	5,3	35,0%	MEDIO-BASSA	

Figura 5.8: Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione sismica

### 5.1.4 Valutazione della Classe di Attenzione incendio

La Figura 5.9 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito incendio, valutato facendo riferimento all'intera galleria.

Al *trasporto di merci pericolose* è stato attribuito il punteggio pari a 2 perché sulla tratta autostradale non vi è alcuna restrizione al riguardo (Autostrade per l'Italia, 2019).

L'*incidentalità caratteristica* è stata valutata tenendo in considerazione il fatto che l'autostrada A26 è molto trafficata in tutti i periodi dell'anno e per questo motivo ha ottenuto un punteggio pari a 1,5.

La galleria Castello si sviluppa per una *lunghezza* di 501 metri e per questa ragione è stata attribuita a questa voce la valutazione 2.

Alle voci *difetti/assenza di misure impiantistiche e strutturali* è stato attribuito il punteggio 2. Dalla documentazione fornita risulta infatti che nel 2019 la maggior parte delle gallerie siano state dotate di alcune di queste misure, ma non tutte (Autostrade per l'Italia, 2019).

I *piani di intervento* sono stati considerati assenti dal momento che nella documentazione fornita non sono segnalati. Quando l'informazione è assente, come in questo caso, è preferibile ragionare a favore di sicurezza, attribuendo il punteggio unitario. Un'ulteriore considerazione consiste nel fatto che la galleria non è provvista di tutti gli impianti e di conseguenza anche i piani di intervento non saranno completi.

Una volta assegnati e sommati i punteggi di ogni parametro, si è ottenuta una valutazione della Classe di Attenzione incendio pari 10,5/15, corrispondente a quella medio-alta.

	INC						P	V	P+V	$I_{inc}$	
	Pericolosità		Vulnerabilità								
	Trasporto merci pericolose	Incidentalità caratteristica	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Difetti/Assenza di misure strutturali	Piani di intervento					
INTERA GALLERIA	2	1,5	2	2	2	1	3,5	7,0	10,5	10,50	70,0%
	Punteggio massimo ottenibile						4	11	15	MEDIO-ALTA	

**Figura 5.9:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione incendio

### 5.1.5 Valutazione della Classe di Attenzione geometrica

La Figura 5.10 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai due parametri appartenenti all'ambito geometrico.

L'informazione riguardante i *difetti di altezza libera* della galleria Castello non è reperibile. Analizzando le sezioni riportate nella documentazione As Built e osservando che la galleria in esame è percorsa da tre corsie, si è deciso di assegnare al parametro il punteggio nullo.

Alla voce *assenza di profilo ridirettivo* addossato ai piedritti è stato attribuito il punteggio massimo, pari a 2. L'informazione è stata fornita da Autostrade per l'Italia durante uno scambio di e-mail tra il dipartimento DISEG e la concessionaria.

Una volta assegnate e sommate le valutazioni dei singoli conci, alla galleria è stato attribuito il punteggio massimo, come descritto nel paragrafo 4.4.5. La Classe di Attenzione geometrica della galleria Castello è medio-bassa, associata ad un punteggio di 2/10.

		GEOM					$I_{geom}$	
		Pericolosità	Vulnerabilità	P	V	P+V		
		Difetti di altezza libera	Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti					
CONCI	1	0	2	0	2,0	2,0	2,00	20,0%
	2	0	2	0	2,0	2,0		
	3	0	2	0	2,0	2,0	Classe di Attenzione	
	4	0	2	0	2,0	2,0		
	5	0	2	0	2,0	2,0	MEDIO-BASSA	
	6	0	2	0	2,0	2,0		
	7	0	2	0	2,0	2,0		
	8	0	2	0	2,0	2,0		
	9	0	2	0	2,0	2,0		
	10	0	2	0	2,0	2,0		
	11	0	2	0	2,0	2,0		
	12	0	2	0	2,0	2,0		
	13	0	2	0	2,0	2,0		
	14	0	2	0	2,0	2,0		
	15	0	2	0	2,0	2,0		
	16	0	2	0	2,0	2,0		
	17	0	2	0	2,0	2,0		
	18	0	2	0	2,0	2,0		
	19	0	2	0	2,0	2,0		
	20	0	2	0	2,0	2,0		
	21	0	2	0	2,0	2,0		
	22	0	2	0	2,0	2,0		
	23	0	2	0	2,0	2,0		
	24	0	2	0	2,0	2,0		
	25	0	2	0	2,0	2,0		
Punteggio massimo ottenibile				8	2	10		

**Figura 5.10:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Castello: definizione della Classe di Attenzione geometrica

### 5.1.6 Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Castello

Sommando i punteggi di ciascuna Classe di Attenzione è possibile ottenere quella relativa alla galleria Castello, come descritto nel capitolo 4. Per assegnare la valutazione ci si è riferiti alla tabella 4.2. Come evidenziato dalla Tabella 5.1 la Classe di Attenzione della galleria Castello è medio-bassa.

<b>Classe di Attenzione</b>	<b>Punteggio</b>	<b>Valutazione</b>
Strutturale e geotecnica	17,81/45	Medio-bassa
Geologica	0/15	Bassa
Sismica	5,46/15	Medio-bassa
Incendio	10,5/15	Medio-alta
Geometrica	2/10	Medio-bassa
<b>Galleria Castello</b>	<b>35,77/100</b>	<b>Medio-bassa</b>

**Tabella 5.1:** Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Castello

## 5.2 Galleria Manfreida

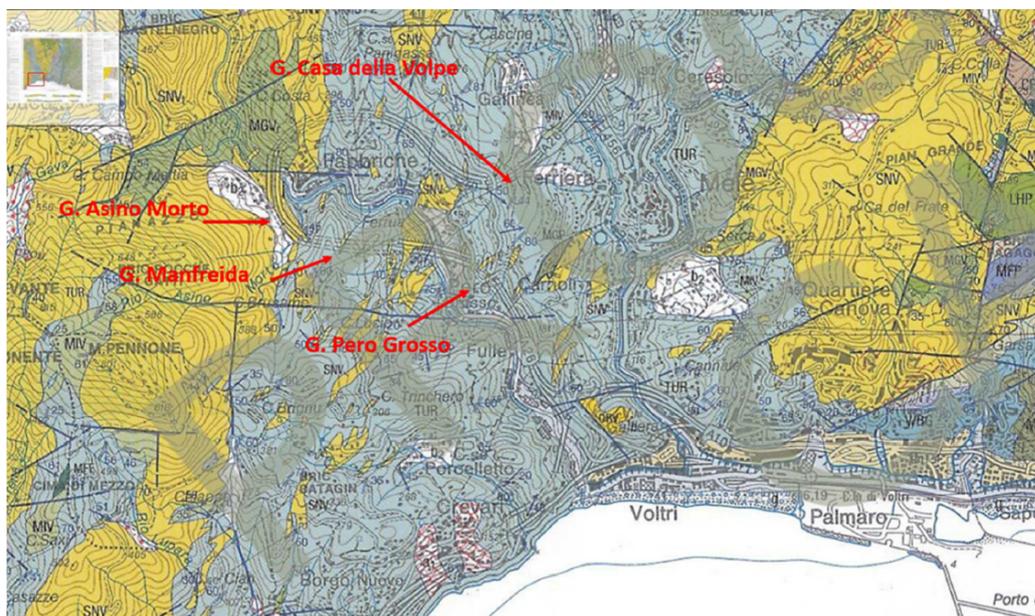
### 5.2.1 Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

La galleria Manfreida si colloca sull'autostrada A26 Genova - Gravellona Toce. Il metodo SMART è stato applicato alla canna destra della galleria, in direzione Gravellona Toce e nel seguito si riportano i ragionamenti che hanno condotto alla definizione della Classe di Attenzione di questa opera.

La Figura 5.12 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai conci ispettivi per la definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica.

Dai risultati delle prove di martinetto piatto è stato possibile ricavare l'entità del *carico agente sul rivestimento* (RINA, 2020). La resistenza media del rivestimento è risultata essere pari a 23,4 MPa (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f). Tutti i conci ispezionati, ad eccezione del terzo, hanno presentato carico asimmetrico.

Per assegnare il punteggio al *livello di incertezza del modello geologico / geotecnico* si sono ricercate le informazioni all'interno della documentazione fornita da Autostrade per l'Italia S.p.a: galleria Manfreida si colloca quasi interamente all'interno della formazione dei Calcescisti del Turchino costituiti da scisti quarzo micacei con calcite e localmente con intercalazioni di calcari



**Figura 5.11:** Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f)

cristallini (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f). Non sono state effettuate delle prove per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso circostante e per questo motivo si è attribuita a tutti i conci della galleria la valutazione 2: grado di incertezza modesto.

La *qualità* dell'ammasso roccioso è stata valutata come modesta (valore 1) e alla *peculiarità* è stato assegnato un punteggio pari a 0,5 dovuto alla scistosità che caratterizza la formazione dei Calcescisti del Turchino.

Per attribuire un punteggio al parametro *influenza dell'acqua* si sono analizzati i risultati delle ispezioni (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020b). Ai conci che non presentavano ammaloramenti causati dalla presenza dell'acqua è stata attribuita la valutazione 1 per tenere in considerazione il fatto che la galleria è priva di impermeabilizzazione.

La *presenza di sotto-spessore nel rivestimento* è stata diagnosticata facendo riferimento ai risultati ottenuti con l'indagine georadar (RINA, 2020) e dalle videoendoscopie (MTSEngineering, 2020c). Da queste ultime infatti è stata riscontrata la presenza di intercapedini tra l'ammasso roccioso ed il rivestimento definitivo. Lo spessore di progetto, sulla base del quale valutare la percentuale di sotto-spessore, è riportato nella documentazione As Built ed è pari

a 90 centimetri (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f).

Il *livello di difettosità* dei conci è stato valutato facendo riferimento al documento contenente le percentuali di ammaloramento con relativa classificazione IQOA (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020j). Si noti come, rispetto alla galleria Castello, quest'opera risulti maggiormente danneggiata.

Per la valutazione della *rapidità di evoluzione del degrado* si è tenuto in considerazione il fatto che la galleria Manfreida risale al 1970. Ai conci che presentano un punteggio di livello di difettosità maggiore di 10 è stata assegnata una valutazione pari ad 1 per evidenziare il fatto che presentano ammaloramenti più marcati.

Per definire la *tipologia di galleria* si è utilizzata la Tabella 4.12. Dalla documentazione As Built risulta che il diametro della galleria Manfreida sia di circa 13 metri, l'arco rovescio sia presente ed il materiale del rivestimento sia il calcestruzzo (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f). La tipologia risulta essere media e la valutazione ad essa associata è 2.

Al parametro *presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione* è stato assegnato il punteggio massimo dal momento che la galleria in esame ne è sprovvista.

La *complessità costruttiva* ha ottenuto un punteggio pari ad 1 poiché dalla documentazione As Built risulta che la galleria presenti delle centinature (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f).

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il relativo rango come spiegato nel paragrafo 4.4.1. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione strutturale e geotecnica risulta essere media con un punteggio percentuale pari a 48%, corrispondente al valore di 21,6 su un massimo di 45.



## 5.2.2 Valutazione della Classe di Attenzione geologica

La Figura 5.14 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito geologico. Questa Classe di Attenzione viene valutata nel suo insieme, senza dover far riferimento ai singoli concetti ispettivi.

La *magnitudo dell'instabilità di versante* è stata indagata ricorrendo all'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, IFFI. Come evidenziato dalla Figura 5.13 il versante nel quale è inserita la galleria Manfreida presenta alcune frane quiescenti, estese ma superficiali. L'area che nella Figura 5.13 è arancione è una deformazione gravitativa profonda di versante caratterizzata da una bassa velocità di spostamento. Il punteggio attribuito a questa voce è 0,5.



Figura 5.13: Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020)

Le frane evidenziate non sono attive e per questa ragione alla voce *stato di attività per le frane conosciute (attive o quiescenti)/grado di criticità per le frane potenziali* è stato assegnato il voto 2.

Nella zona interessata dall'instabilità non sono presenti *sistemi di monitoraggio* e perciò il punteggio relativo è nullo.

Come si può vedere dalla Figura 5.13, la galleria è interessata solo parzialmente dallo scivolamento: al parametro *estensione dell'interferenza instabilità-struttura* è stato dato un punteggio pari a 3.

Una volta sommati i punteggi dei quattro parametri si è ottenuta una valutazione di 5,5/15 corrispondente al 36,7%. La Classe di Attenzione geologica della galleria Manfreida è medio-bassa.

		GEOL								
		Pericolosità		Vulnerabilità		P	V	P+V	I <sub>geol</sub>	
		Magnitudo dell'instabilità di versante intesa come massima velocità di spostamento (nota 8)	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/Grado di criticità per le frane potenziali	Presenza/Assenza/Presenza di Early Warning System, grandezze monitorate e tipologie di strumenti	Volumi/estensione dell'interferenza instabilità-struttura					
INTERA GALLERIA	0,5	2	0	3	2,5	3,0	5,5	5,50	36,7%	
								Classe di Attenzione		
								MEDIO-BASSA		
		Punteggio massimo ottenibile				10	5	15		

**Figura 5.14:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione geologica

### 5.2.3 Valutazione della Classe di Attenzione sismica

La Figura 5.15 mostra i punteggi che sono stati attribuiti alle voci al fine di definire la Classe di Attenzione sismica, valutata facendo riferimento ai singoli concetti ispettivi.

Alla voce *caratteristiche del sisma* è stato assegnato il punteggio pari a 2 perché l'accelerazione al suolo del sito in cui si colloca la galleria Manfreida è uguale a 0,0587g (50° percentile e tempo di ritorno di 475 anni). La magnitudo di momento è pari a 4.5 (INGV, 2020b).

L'*inclusione in zone sismogenetiche* è stata indagata ricercando l'informazione presso il portale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Figura 5.6): la galleria Manfreida si colloca a poco meno di 30 km dalla zona sismogenetica più vicina e per questo motivo è stato assegnato a questa voce il punteggio 0,5 (INGV, 2020a).

Alla voce *presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali* è stata assegnata la valutazione 0 poiché la galleria Manfreida non attraversa faglie

e passaggi formazionali essendo completamente inclusa nella formazione dei Calcescisti del Turchino (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e).

Per quanto concerne la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*, dal momento che in prossimità della galleria risultano porzioni superficiali di versante instabile, si è assegnato il punteggio 0,5.

La categoria di terreno nel quale è inserita la galleria Manfreida, secondo la NTC 2018, risulta essere B (Figura 5.7). Per questo motivo il punteggio attribuito alle *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso* è 0,25.

La *profondità dell'asse della galleria* è stata valutata ricorrendo ad alcune cartografie che riportano le curve di livello del territorio in prossimità dell'opera in esame. Dopo un'attenta analisi la profondità media della galleria è risultata essere 90 metri.

Il punteggio pari a 0 assegnato alla *geometria della galleria* è dovuto all'evidenza che la forma piuttosto circolare della sezione e la presenza di arco rovescio favoriscono la redistribuzione delle sollecitazioni.

La valutazione della *resistenza e stato conservazione del rivestimento* si è basata sulle Classi di Attenzione strutturale e geotecnica attribuite ai singoli conci.

All'ultimo parametro in esame, *norme di progettazione/duttilità del rivestimento*, si è assegnato il punteggio massimo, pari ad 1, poiché la galleria in esame, come la maggior parte delle opere risalenti al 1970, non è stata progettata con tecnologie antisismiche.

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato secondo quanto riportato nel paragrafo 4.4.3. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione sismica della galleria Manfreida risulta essere medio-bassa con un punteggio percentuale pari a 33,5%, corrispondente al valore di 5/15.



### 5.2.4 Valutazione della Classe di Attenzione incendio

La Figura 5.16 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito incendio la cui Classe di Attenzione è valutata facendo riferimento all'intera galleria.

Al *trasporto di merci pericolose* è stato attribuito il punteggio pari a 2 perché sulla tratta autostradale non vi è alcuna restrizione al riguardo (Autostrade per l'Italia, 2019).

L'*incidentalità caratteristica* è stata valutata tenendo in considerazione il fatto che l'autostrada A26 è molto trafficata in tutti i periodi dell'anno e per questo motivo ha ottenuto un punteggio pari a 1,5.

La galleria Manfreida si sviluppa per una *lunghezza* di 676 metri e per questa ragione è stata attribuita a questa voce la valutazione 2.

Alle voci *difetti/assenza di misure impiantistiche e strutturali* è stato attribuito il punteggio 2. Dalla documentazione fornita risulta infatti che nel 2019 la maggior parte delle gallerie siano state dotate di alcune di queste misure, ma non tutte (Autostrade per l'Italia, 2019).

I *piani di intervento* sono stati considerati assenti dal momento che nella documentazione fornita non sono segnalati. Quando l'informazione è assente, come in questo caso, è preferibile ragionare a favore di sicurezza, attribuendo il punteggio unitario. Un'ulteriore considerazione consiste nel fatto che la galleria non è provvista di tutti gli impianti e di conseguenza anche i piani di intervento non saranno completi.

Una volta assegnati e sommati i punteggi di ogni parametro, si è ottenuta una valutazione della Classe di Attenzione incendio pari 10,5/15, corrispondente a quella medio-alta.

	INC						P	V	P+V (I)	I <sub>inc</sub>	
	Pericolosità		Vulnerabilità								
	Trasporto merci pericolose	Incidentalità caratteristica	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Difetti/Assenza di misure strutturali	Piani di intervento					
INTERA GALLERIA	2	1,5	2	2	2	1	3,5	7	11	10,50	70,0%
Punteggio massimo ottenibile							4	11	15	Classe di Attenzione	
							MEDIO-ALTA				

**Figura 5.16:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione incendio

### 5.2.5 Valutazione della Classe di Attenzione geometrica

La Figura 5.17 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai due parametri appartenenti all'ambito geometrico.

L'informazione riguardante i *difetti di altezza libera* della galleria Manfreida non è reperibile. Analizzando le sezioni riportate nella documentazione As Built e osservando che la galleria in esame è percorsa da tre corsie, si è deciso di assegnare al parametro il punteggio nullo.

Alla voce *assenza di profilo ridirettivo* addossato ai piedritti è stato attribuito il punteggio massimo, pari a 2, ai primi 3 conci. L'informazione è stata fornita da Autostrade per l'Italia durante uno scambio di e-mail tra il dipartimento DISEG e la concessionaria in cui veniva specificato che il profilo ridirettivo è presente a partire dal concio numero 4.

Una volta assegnate e sommate le valutazioni dei singoli conci, alla galleria è stato attribuito il punteggio massimo, come descritto nel paragrafo 4.4.5. La Classe di Attenzione geometrica della galleria Manfreida è medio-bassa, associata ad un punteggio di 2/10.

		GEOM					I <sub>geom</sub>			
		Pericolosità	Vulnerabilità	P	V	P+V				
		Difetti di altezza libera	Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti							
CONCI	1	0	2	0	2	2	2,00	20,0%		
	2	0	2	0	2	2				
	3	0	2	0	2	2				
	4	0	0	0	0	0	Classe di Attenzione	MEDIO-BASSA		
	5	0	0	0	0	0				
	6	0	0	0	0	0				
	7	0	0	0	0	0				
	8	0	0	0	0	0				
	9	0	0	0	0	0				
	10	0	0	0	0	0				
	11	0	0	0	0	0				
	12	0	0	0	0	0				
	13	0	0	0	0	0				
	14	0	0	0	0	0				
	15	0	0	0	0	0				
	16	0	0	0	0	0				
	17	0	0	0	0	0				
	18	0	0	0	0	0				
	19	0	0	0	0	0				
	20	0	0	0	0	0				
	21	0	0	0	0	0				
	22	0	0	0	0	0				
	23	0	0	0	0	0				
	24	0	0	0	0	0				
	25	0	0	0	0	0				
	26	0	0	0	0	0				
	27	0	0	0	0	0				
	28	0	0	0	0	0				
	29	0	0	0	0	0				
	30	0	0	0	0	0				
	31	0	0	0	0	0				
	32	0	0	0	0	0				
	33	0	0	0	0	0				
	34	0	0	0	0	0				
Punteggio massimo ottenibile				8	2	10				

**Figura 5.17:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Manfreida: definizione della Classe di Attenzione geometrica

## 5.2.6 Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Manfreida

Sommando i punteggi di ciascuna Classe di Attenzione è possibile ottenere quella relativa alla galleria in esame, come descritto nel capitolo 4. Per as-

segnare la valutazione ci si è riferiti alla tabella 4.2. Come evidenziato dalla Tabella 5.2 la Classe di Attenzione della galleria Manfreida è media.

<b>Classe di Attenzione</b>	<b>Punteggio</b>	<b>Valutazione</b>
Strutturale e geotecnica	21,61/45	Media
Geologica	5,5/15	Medio-bassa
Sismica	5/15	Medio-bassa
Incendio	10,5/15	Medio-alta
Geometrica	2/10	Medio-bassa
<b>Galleria Manfreida</b>	<b>44,61/100</b>	<b>Media</b>

**Tabella 5.2:** Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Manfreida

## 5.3 Galleria Scampitella

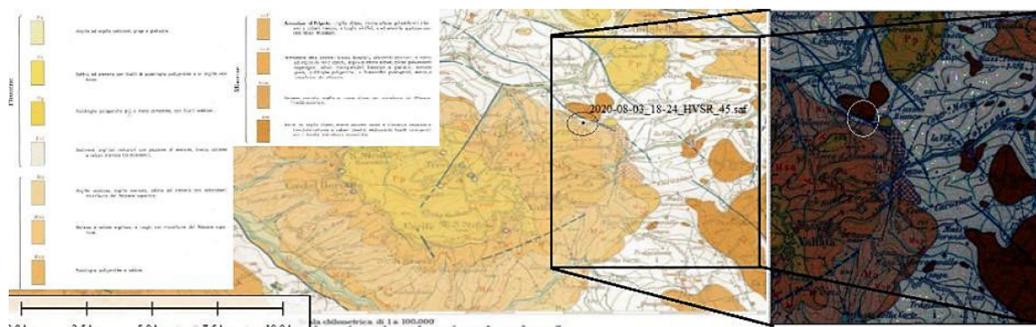
### 5.3.1 Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

La galleria Scampitella si colloca sull'autostrada A16 Napoli - Canosa, anche detta 'dei due mari'. Il metodo SMART è stato applicato alla canna destra della galleria, in direzione Canosa e nel seguito si riportano i ragionamenti che hanno condotto alla definizione della Classe di Attenzione di questa opera.

La Figura 5.19 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai conci ispettivi per la definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica.

Dai risultati delle prove di martinetto piatto è stato possibile ricavare l'entità del *carico agente sul rivestimento* (Socotec, 2020a). La resistenza media del rivestimento è risultata essere pari a 16,2 MPa (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g). Tutti i conci ispezionati hanno presentato carico asimmetrico.

Per assegnare il punteggio al *livello di incertezza del modello geologico / geotecnico* si sono ricercate le informazioni all'interno della documentazione fornita da Autostrade per l'Italia S.p.a: galleria Scampitella è inserita in un



**Figura 5.18:** Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g)

sistema geologico definito da un complesso “conglomeratico-sabbioso”, coincidente con la Formazione di Scampitella stratigraficamente sovrapposta ed intercalata ad alcuni membri della formazione della Baronina, costituito da depositi conglomeratico-sabbiosi con intercalazioni di depositi pelitico-sabbiosi e argillosi (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g). Non sono state effettuate delle prove per la caratterizzazione dell’ammasso roccioso circostante e per questo motivo si è attribuita a tutti i conci della galleria la valutazione 2: grado di incertezza modesto.

La *qualità e peculiarità* sono state valutate insieme attribuendo un punteggio complessivo di 2,5 su un massimo di 4. Il ragionamento che ha condotto a questa scelta consiste nel fatto che la galleria non attraversa l’ammasso roccioso ma un terreno conglomeratico-sabbioso.

Per attribuire un punteggio al parametro *influenza dell’acqua* si sono analizzati i risultati delle ispezioni (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020c). Ai conci che non presentavano ammaloramenti causati dalla presenza dell’acqua è stata attribuita la valutazione 1 per tenere in considerazione il fatto che la galleria è priva di impermeabilizzazione.

La *presenza di sotto-spessore nel rivestimento* è stata diagnosticata facendo riferimento ai risultati ottenuti con l’indagine georadar (Socotec, 2020a) e dalle videoendoscopie (Socotec, 2020d). Da queste ultime infatti è stata riscontrata la presenza di intercapedini tra l’ammasso roccioso e il rivestimento definitivo. Lo spessore di progetto, sulla base del quale valutare la percentuale di sotto-spessore, è riportato nella documentazione As Built e varia tra gli 80 e i 110 centimetri a seconda del tipo di rivestimento impiegato (Lombardi

Ingegneria S.r.l et al., 2020g).

Il *livello di difettosità* dei conci è stato valutato facendo riferimento al documento contenente le percentuali di ammaloramento con relativa classificazione IQOA (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020k). Si noti come, rispetto alle gallerie Castello e Manfreida, quest'opera risulti maggiormente danneggiata.

Per la valutazione della *rapidità di evoluzione del degrado* si è tenuto in considerazione il fatto che la galleria Scampitella risale alla metà degli anni '60. Ai conci che presentano un punteggio di livello di difettosità maggiore di 10 è stata assegnata una valutazione pari ad 1 per evidenziare il fatto che presentano ammaloramenti più marcati.

Per definire la *tipologia di galleria* si è utilizzata la Tabella 4.12. Dalla documentazione As Built risulta che il diametro della galleria Scampitella sia di circa 10 metri, l'arco rovescio sia presente ed il materiale del rivestimento sia il calcestruzzo (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g). La tipologia risulta essere medio-bassa e la valutazione ad essa associata è 1.

Al parametro *presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione* è stato assegnato il punteggio massimo dal momento che la galleria in esame ne è sprovvista.

La *complessità costruttiva* ha ottenuto un punteggio pari ad 1 poiché dalla documentazione As Built risulta che la galleria presenti delle centinature (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g). Negli anni successivi alla costruzione, sono state, inoltre, riscontrate delle lesioni nel rivestimento di calotta e dei piedritti che hanno richiesto interventi di ricostruzione con blocchetti di calcestruzzo.

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato come descritto nel paragrafo 4.4.1. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione strutturale e geotecnica risulta essere *media* con un punteggio percentuale pari a 47,5%, corrispondente al valore di 21,36 su un massimo di 45.

STRAGEO										P	V	P+V	Range	I*R	P+V(%)	Cda conico	Istrageo
Pericolosità					Vulnerabilità												
Carico agente sul rivestimento	Incremento del livello di pericolosità/geotecnico di progetto	Qualità ammessa roccia/terreno + peculiarità	Influenza dell'acqua	Presenzia di sottospessore nel rivestimento	Livello di difettosità	Rapidità di evoluzione del degrado (veustà)	Tipologia di galleria	Presenzia di efficienza di sistema di impermeabilizzazione	Complessità costruttiva								
1	2	2	2,5	1	0	13	1	2	1	7,5	180	25,5	34	867,0	56,7%	MEDIA	21,36 47,5%
2	2	2	2,5	1	13	0	1	2	1	9,5	180	27,5	36	990,0	61,1%	MEDIO-ALTA	
3	2	2	2,5	1	6	0	1	2	1	8,5	100	18,5	20	370,0	41,1%	MEDIA	
4	2	2	2,5	1	4	0	1	2	1	9,5	80	17,5	14	245,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
5	2	2	2,5	1	0	0	1	2	1	7,5	100	17,5	14	245,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
6	2	2	2,5	1	0	0	1	2	1	7,5	80	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
7	2	2	2,5	1	0	3	0	2	1	7,5	70	14,5	5	72,5	32,2%	MEDIO-BASSA	
8	2	2	2,5	2	0	13	1	2	1	8,5	180	26,5	35	927,5	58,9%	MEDIA	
9	2	2	2,5	2	0	10	1	2	1	8,5	150	23,5	33	775,5	52,2%	MEDIA	
10	2	2	2,5	1	0	6	0	2	1	7,5	100	17,5	14	245,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
11	2	2	2,5	1	0	9	0	2	1	7,5	130	20,5	29	594,5	45,6%	MEDIA	
12	2	2	2,5	1	0	7	0	2	1	8,5	110	19,5	25	487,5	43,5%	MEDIA	
13	2	2	2,5	1	0	7	0	2	1	7,5	110	18,5	20	370,0	41,1%	MEDIA	
14	2	2	2,5	2	0	6	0	2	1	9,5	100	19,5	25	487,5	43,5%	MEDIA	
15	2	2	2,5	2	0	9	0	2	1	8,5	130	21,5	31	665,5	47,8%	MEDIA	
16	2	2	2,5	1	2	5	0	2	1	9,5	90	18,5	20	370,0	41,1%	MEDIA	
17	2	2	2,5	1	1	6	0	2	1	8,5	100	18,5	20	370,0	41,1%	MEDIA	
18	2	2	2,5	1	1	8	0	2	1	8,5	90	17,5	14	245,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
19	2	2	2,5	1	0	8	0	2	1	7,5	120	19,5	25	487,5	43,5%	MEDIA	
20	2	2	2,5	1	0	7	0	2	1	7,5	110	18,5	20	370,0	41,1%	MEDIA	
21	2	2	2,5	1	1	4	0	2	1	8,5	80	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
22	2	2	2,5	1	0	4	0	2	1	7,5	90	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
23	2	2	2,5	1	0	6	0	2	1	7,5	100	17,5	14	245,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
24	2	2	2,5	1	0	10	0	2	1	7,5	140	21,5	31	665,5	47,8%	MEDIA	
25	2	2	2,5	1	0	1	0	2	1	7,5	50	12,5	1	12,5	27,8%	MEDIO-BASSA	
26	2	2	2,5	1	0	6	0	2	1	7,5	100	17,5	14	245,0	38,9%	MEDIO-BASSA	
27	2	2	2,5	1	0	2	0	2	1	7,5	60	13,5	3	40,5	30,0%	MEDIO-BASSA	
28	2	2	2,5	1	0	8	0	2	1	7,5	120	19,5	25	487,5	43,5%	MEDIA	
29	2	2	2,5	1	0	2	0	2	1	7,5	60	13,5	3	40,5	30,0%	MEDIO-BASSA	
30	2	2	2,5	1	0	4	0	2	1	7,5	80	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
31	2	2	2,5	1	0	4	0	2	1	7,5	80	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
32	2	2	2,5	1	0	4	0	2	1	7,5	80	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
33	2	2	2,5	1	0	4	0	2	1	7,5	50	12,5	1	12,5	27,8%	MEDIO-BASSA	
34	2	2	2,5	1	0	3	0	2	1	8,5	70	15,5	6	93,0	34,4%	MEDIO-BASSA	
35	2	2	2,5	2	1	7	0	2	1	9,5	110	20,5	29	594,5	45,6%	MEDIA	
36	2	2	2,5	2	1	13	1	2	1	9,5	180	27,5	36	990,0	61,1%	MEDIO-ALTA	
37	2	2	2,5	2	1	13	1	2	1	9,5	180	27,5	36	990,0	61,1%	MEDIO-ALTA	
38	2	2	2,5	2	1	13	1	2	1	9,5	180	27,5	36	990,0	61,1%	MEDIO-ALTA	
39	2	2	2,5	1	0	5	0	2	1	7,5	90	16,5	11	181,5	36,7%	MEDIO-BASSA	
Punteggio massimo ottenibile										21	24	45					

Figura 5.19: Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

### 5.3.2 Valutazione della Classe di Attenzione geologica

La Figura 5.21 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito geologico. Questa Classe di Attenzione viene valutata nel suo insieme, senza dover far riferimento ai singoli concetti ispettivi.

La *magnitudo dell'instabilità di versante* è stata indagata ricorrendo all'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, IFFI. Come evidenziato dalla Figura 5.20 il versante nel quale è inserita la galleria Scampitella presenta alcune evidenze di fenomeni franosi poco estesi e per questo motivo la valutazione è 0,5.



Figura 5.20: Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020)

Le frane evidenziate sono quiescenti e per questa ragione alla voce *stato di attività per le frane conosciute (attive o quiescenti)/grado di criticità per le frane potenziali* è stato assegnato il voto 2.

Nella zona interessata dall'instabilità non sono presenti *sistemi di monitoraggio* e perciò il punteggio relativo è nullo.

Come si può vedere dalla Figura 5.20, la galleria è interessata solo parzialmente dallo scivolamento: al parametro *estensione dell'interferenza instabilità-struttura* è stato dato un punteggio pari a 3.

Una volta sommati i punteggi dei quattro parametri si è ottenuta una valutazione di 5,5/15 corrispondente al 36,7%. La Classe di Attenzione geologica della galleria Scampitella è medio-bassa.

		GEOL								
		Pericolosità		Vulnerabilità		P	V	P+V	I <sub>geol</sub>	
		Magnitudo dell'instabilità di versante intesa come massima velocità di spostamento	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/Grado di criticità per le frane potenziali	Presenza/Assenza/Presenza di Early Warning System, grandezze monitorate e tipologie di strumenti	Volumi/estensione dell'interferenza instabilità-struttura				5,50	36,7%
INTERA GALLERIA	0,5	2	0	3	2,5	3,0	5,5	Classe di Attenzione		
Punteggio massimo ottenibile					10	5	15	MEDIO-BASSA		

**Figura 5.21:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione geologica

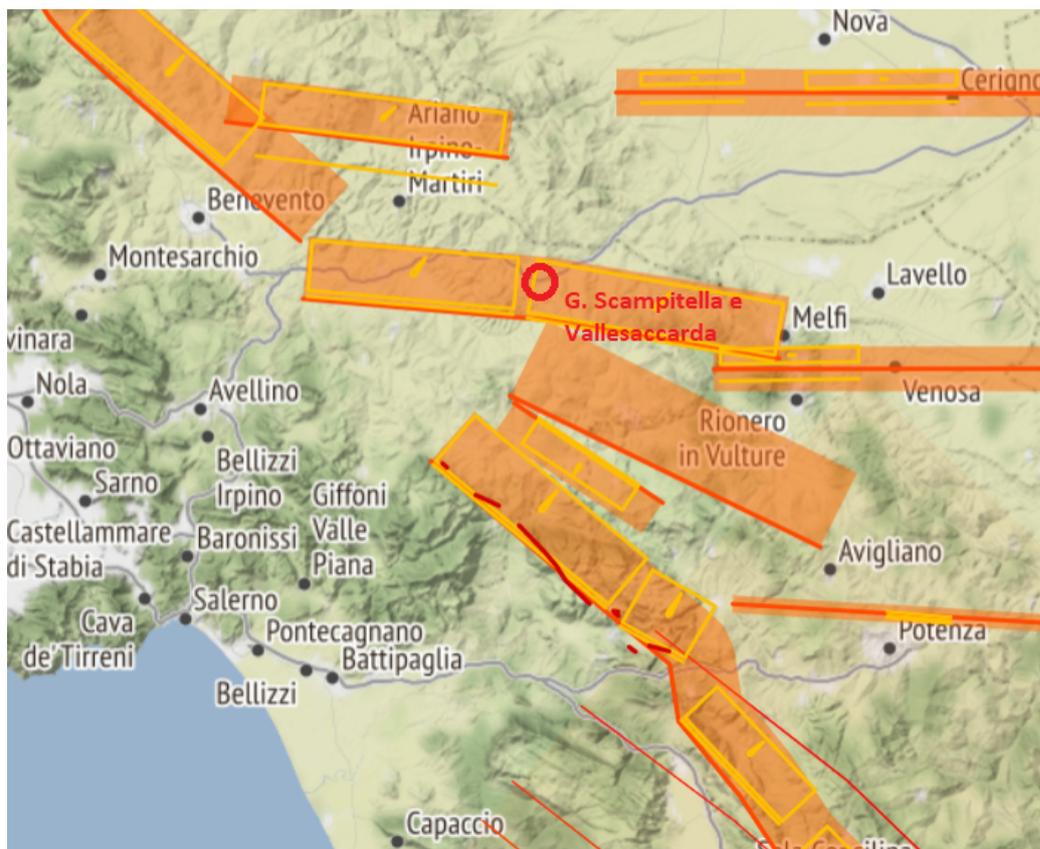
### 5.3.3 Valutazione della Classe di Attenzione sismica

La Figura 5.23 mostra i punteggi che sono stati attribuiti alle voci al fine di definire la Classe di Attenzione sismica, valutata facendo riferimento ai singoli concetti ispettivi.

Al parametro *caratteristiche del sisma* è stato attribuito il punteggio pari a 3 perché l'accelerazione al suolo del sito in cui si colloca la galleria Scampitella è uguale a 0,2359g (50° percentile e tempo di ritorno di 475 anni). La magnitudo di momento è pari a 6 (INGV, 2020b).

L'*inclusione in zone sismogenetiche* è stata indagata ricercando l'informazione presso il portale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: la galleria Scampitella si colloca a meno di 10 km dalla zona sismogenetica più vicina e per questo motivo è stato assegnato a questa voce il punteggio 1,5 (INGV, 2020a).

Alla voce *presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali* è stata assegnata la valutazione 3 poiché la galleria Scampitella attraversa una faglia.



**Figura 5.22:** Inclusione delle gallerie Scampitella e Vallesaccarda nelle zone sismogenetiche. (INGV, 2020a)

Per quanto concerne la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*, dal momento che in prossimità della galleria risultano porzioni superficiali di versante instabile e la zona è soggetta ad accelerazioni sismiche elevate, si è assegnato il punteggio 1,5 .

La categoria di terreno nel quale è inserita la galleria Scampitella, secondo la NTC 2018, risulta essere C (Figura 5.7). Per questo motivo il punteggio attribuito alle *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso* è 0,5.

La *profondità dell'asse della galleria* è stata valutata ricorrendo ad alcune cartografie che riportano le curve di livello del territorio in prossimità dell'opera in esame. Dopo un'attenta analisi la profondità media della galleria è risultata essere 80 metri.

Il punteggio pari a 0 assegnato alla *geometria della galleria* è dovuto all'evidenza che la forma piuttosto circolare della sezione e la presenza di arco rovescio favoriscono la redistribuzione delle sollecitazioni.

La valutazione della *resistenza e stato conservazione del rivestimento* si è basata sulle Classi di Attenzione strutturale e geotecnica attribuite ai singoli conci.

All'ultimo parametro in esame, *norme di progettazione/duttilità del rivestimento*, si è assegnato il punteggio massimo, pari ad 1, poiché la galleria in esame non è stata progettata con tecnologie antisismiche.

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato come riportato nel paragrafo 4.4.3. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione sismica della galleria Scampitella risulta essere medio-alta con un punteggio percentuale pari a 75,4%, corrispondente al valore di 11,3/15.

SIS																	
Periodo	Caratteristiche del sisma	Vulnerabilità										I <sub>sis</sub>					
		Inclusione in zone sismogenetiche	Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali	Presenza di difetti di versante attivabili da sollecitazione sismica	Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno	Profondità dell'asse della galleria	Geometria della sezione	Resistenza del rivestimento e stato conservazione	Norme di progettazione/ dirittura investimento	P	V		P+V	Rango	T·R	P+V (%)	Cda concio
1	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
2	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.75	1	3	8.5	11.5	36	414.0	76.7%	MEDIO-ALTA
3	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
4	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
5	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
6	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
7	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
8	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
9	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
10	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
11	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
12	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
13	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
14	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
15	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
16	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
17	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
18	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
19	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
20	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
21	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
22	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
23	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
24	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
25	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
26	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
27	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
28	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
29	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
30	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
31	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
32	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
33	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
34	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
35	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.5	1	3	8.3	11.3	20	225.0	75.0%	MEDIO-ALTA
36	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.75	1	3	8.5	11.5	36	414.0	76.7%	MEDIO-ALTA
37	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.75	1	3	8.5	11.5	36	414.0	76.7%	MEDIO-ALTA
38	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.75	1	3	8.5	11.5	36	414.0	76.7%	MEDIO-ALTA
39	1.5	3	1.5	3	1.5	0.5	0.25	0	0.25	1	3	8.0	11.0	1	11.0	73.3%	MEDIO-ALTA
											4	11	15				
											Punteggio massimo ottenibile						

Figura 5.23: Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione sismica

### 5.3.4 Valutazione della Classe di Attenzione incendio

La Figura 5.24 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito incendio la cui Classe di Attenzione è valutata facendo riferimento all'intera galleria.

Al *trasporto di merci pericolose* è stato attribuito il punteggio pari a 2 perché sulla tratta autostradale non vi è alcuna restrizione al riguardo (Autostrade per l'Italia, 2019).

L'*incidentalità caratteristica* è stata valutata come media con un punteggio associato pari a 1.

La galleria Scampitella si sviluppa per una *lunghezza* di 771 metri e per questa ragione è stato attribuita a questa voce la valutazione 2.

Alle voci *difetti/assenza di misure impiantistiche e strutturali* è stato attribuito il punteggio 2. Dalla documentazione fornita risulta infatti che nel 2019 la maggior parte delle gallerie siano state dotate di alcune di queste misure, ma non tutte (Autostrade per l'Italia, 2019).

I *piani di intervento* sono stati considerati assenti dal momento che nella documentazione fornita non sono segnalati. Quando l'informazione è assente, come in questo caso, è preferibile ragionare a favore di sicurezza, attribuendo il punteggio unitario. Un'ulteriore considerazione consiste nel fatto che la galleria non è provvista di tutti gli impianti e di conseguenza anche i piani di intervento non saranno completi.

Una volta assegnati e sommati i punteggi di ogni parametro, si è ottenuta una valutazione della Classe di Attenzione incendio pari 10/15, corrispondente a quella medio-alta

INC											
Pericolosità			Vulnerabilità				P	V	P+V	I <sub>inc</sub>	
Trasporto merci pericolose	Incidentalità caratteristica	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Difetti/Assenza di misure strutturali	Piani di intervento						
INTERA GALLERIA	2	1	2	2	2	1	3	7	10	10,00	66,7%
Punteggio massimo ottenibile							4	11	15	Classe di Attenzione	
										MEDIO-ALTA	

**Figura 5.24:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione incendio

### 5.3.5 Valutazione della Classe di Attenzione geometrica

La Figura 5.25 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai due parametri appartenenti all'ambito geometrico.

L'informazione riguardante i *difetti di altezza libera* è reperibile dal documento contenente lo studio del Gabarit (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020m). I conci che presentano un punteggio pari a 2 saranno presto ricostruiti proprio perché non rispettano la sagoma limite.

Alla voce *assenza di profilo ridirettivo* addossato ai piedritti è stato attribuito il punteggio massimo, pari a 2. L'informazione è stata fornita da Autostrade per l'Italia durante uno scambio di e-mail tra il dipartimento DISEG e la concessionaria.

Una volta assegnate e sommate le valutazioni dei singoli conci, alla galleria è stato attribuito il punteggio massimo, come descritto nel paragrafo 4.4.5. La Classe di Attenzione geometrica della galleria Scampitella è *media*, associata ad un punteggio di 4/10.

		GEOM					$I_{geom}$	
		Pericolosità	Vulnerabilità	P	V	P+V		
		Difetti di altezza libera	Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti					
CONCI	1	0	2	0	2	2	4,00	40,0%
	2	0	2	0	2	2		
	3	0	2	0	2	2	Classe di Attenzione	
	4	0	2	0	2	2	MEDIA	
	5	0	2	0	2	2		
	6	0	2	0	2	2		
	7	0	2	0	2	2		
	8	0	2	0	2	2		
	9	0	2	0	2	2		
	10	0	2	0	2	2		
	11	0	2	0	2	2		
	12	0	2	0	2	2		
	13	0	2	0	2	2		
	14	0	2	0	2	2		
	15	0	2	0	2	2		
	16	0	2	0	2	2		
	17	0	2	0	2	2		
	18	0	2	0	2	2		
	19	0	2	0	2	2		
	20	0	2	0	2	2		
	21	0	2	0	2	2		
	22	0	2	0	2	2		
	23	0	2	0	2	2		
	24	0	2	0	2	2		
	25	0	2	0	2	2		
	26	0	2	0	2	2		
	27	2	2	2	2	4		
	28	2	2	2	2	4		
	29	2	2	2	2	4		
	30	2	2	2	2	4		
	31	2	2	2	2	4		
	32	2	2	2	2	4		
	33	2	2	2	2	4		
	34	0	2	0	2	2		
	35	0	2	0	2	2		
	36	2	2	2	2	4		
	37	2	2	2	2	4		
	38	2	2	2	2	4		
	39	0	2	0	2	2		
Punteggio massimo ottenibile				8	2	10		

**Figura 5.25:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Scampitella: definizione della Classe di Attenzione geometrica

### 5.3.6 Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Scampitella

Sommando i punteggi di ciascuna Classe di Attenzione è possibile ottenere quella relativa alla galleria Scampitella, come descritto nel capitolo 4. Per assegnare la valutazione ci si è riferiti alla tabella 4.2. Come evidenziato dalla Tabella 5.3 la Classe di Attenzione della galleria in esame è media.

<b>Classe di Attenzione</b>	<b>Punteggio</b>	<b>Valutazione</b>
Strutturale e geotecnica	21,36/45	Media
Geologica	5,5/15	Medio-bassa
Sismica	11,31/15	Medio-alta
Incendio	10/15	Medio-alta
Geometrica	4/10	Media
<b>Galleria Scampitella</b>	<b>52,17/100</b>	<b>Media</b>

**Tabella 5.3:** Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Scampitella

## 5.4 Galleria Vallesaccarda

### 5.4.1 Valutazione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

La galleria Vallesaccarda si colloca sull'autostrada A16 Napoli - Canosa, anche detta 'dei due mari', a poche centinaia di metri dalla galleria Scampitella appena descritta. Il metodo SMART è stato applicato alla canna destra della galleria, in direzione Canosa e nel seguito si riportano i ragionamenti che hanno condotto alla definizione della Classe di Attenzione di questa opera.

La Figura 5.27 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai conci ispettivi per la definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica.

Dai risultati delle prove di martinetto piatto è stato possibile ricavare l'entità del *carico agente sul rivestimento* (Socotec, 2020b). La resistenza media

del rivestimento è risultata essere pari a 15,8 MPa (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h). Tutti i conci ispezionati hanno presentato carico asimmetrico. Il concio numero 14 presenta un carico sul rivestimento più elevato rispetto a quello degli altri.

Per assegnare il punteggio al *livello di incertezza del modello geologico / geotecnico* si sono ricercate le informazioni all'interno della documentazione fornita da Autostrade per l'Italia S.p.a: la galleria Vallesaccarda attraversa interamente la formazione della Baronìa (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g). Non sono state effettuate delle prove per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso circostante e per questo motivo si è attribuita a tutti i conci della galleria la valutazione 2: grado di incertezza modesto.

La *qualità e peculiarità* sono state valutate insieme attribuendo un punteggio complessivo di 2,5 su un massimo di 4. Il ragionamento che ha condotto a questa scelta consiste nel fatto che la galleria non attraversa l'ammasso roccioso ma un terreno conglomeratico-sabbioso.



**Figura 5.26:** Estratto della carta geologica. (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h)

Per attribuire un punteggio al parametro *influenza dell'acqua* si sono analizzati i risultati delle ispezioni georadar (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020d). Ai conci che non presentavano ammaloramenti causati dalla presenza dell'acqua è stata attribuita la valutazione 1 per tenere in considerazione il fatto che la galleria è priva di impermeabilizzazione.

La *presenza di sotto-spessore nel rivestimento* è stata diagnosticata facendo riferimento ai risultati ottenuti con l'indagine georadar (Socotec, 2020b)

e dalle videoendoscopie (Socotec, 2020c). Da queste ultime infatti è stata riscontrata la presenza di intercapedini tra l'ammasso roccioso ed il rivestimento definitivo. Lo spessore di progetto, sulla base del quale valutare la percentuale di sotto-spessore, è riportato nella documentazione As Built e varia tra gli 80 e i 110 centimetri a seconda del tipo di rivestimento impiegato (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h).

Il *livello di difettosità* dei conci è stato valutato facendo riferimento al documento contenente le percentuali di ammaloramento con relativa classificazione IQOA (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020l). La galleria Vallesaccarda risulta essere quella maggiormente ammalorata tra le quattro in esame.

Per la valutazione della *rapidità di evoluzione del degrado* si è tenuto in considerazione il fatto che la galleria Vallesaccarda risale agli anni '60. Ai conci che presentano un punteggio di livello di difettosità maggiore di 10 è stato assegnata una valutazione pari ad 1 per evidenziare il fatto che presentano ammaloramenti più marcati.

Per definire la *tipologia di galleria* si è utilizzata la Tabella 4.12. Dalla documentazione As Built risulta che il diametro della galleria Vallesaccarda sia di circa 10 metri, l'arco rovescio sia presente e il materiale del rivestimento sia il calcestruzzo (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h). La tipologia risulta essere medio-bassa e la valutazione ad essa associata è 1.

Al parametro *presenza ed efficienza del sistema di impermeabilizzazione* è stato assegnato il punteggio massimo dal momento che la galleria in esame ne è sprovvista.

La *complessità costruttiva* ha ottenuto un punteggio pari ad 1 poiché dalla documentazione As Built risulta che la galleria presenti delle centinature (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h).

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato come descritto nel paragrafo 4.4.1. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione strutturale e geotecnica risulta essere *media* con un punteggio percentuale pari a 59,5%, corrispondente al valore di 26,76 su

un massimo di 45.

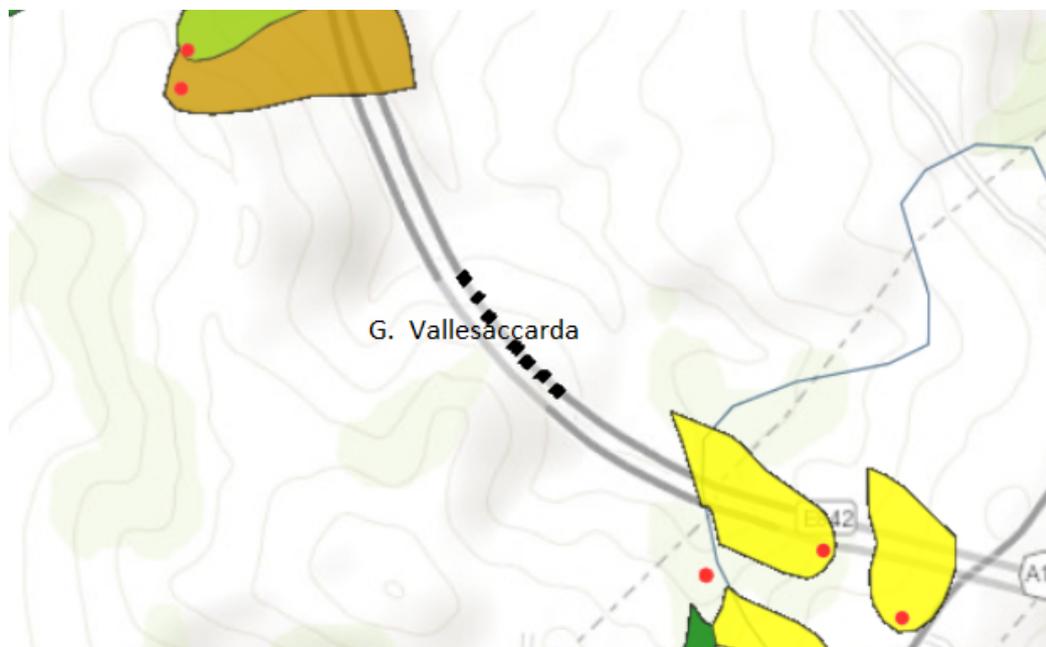
STR&GEO																	
Carico agente sul rivestimento	Pericolosità				Vulnerabilità				P	V	P+V	Rango	I*P	P+V (%)	Cda conco	Istr&geo	
	Livello di incertezza del modello geologico/geotecnico di progetto	Qualità ammasso roccioso/terreno + peculiarità	Influenza dell'acqua	Presenza di sotto-spessore nel rivestimento	Livello di diffeosità	Rapidità di evoluzione (vetustà)	Tipologia di galleria	Presenza ed efficienza di sistema di impermeabilizzazione								Complessità costruttiva	26,76
1	2	2,5	1	1	6	0	1	2	8,5	10,0	18,5	1	18,5	41,1%	MEDIA	Classe di Attenzione <b>MEDIA</b>	
2	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
3	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
4	2	2,5	1	0	12	1	1	2	7,5	16,6	24,1	2	48,3	53,6%	MEDIA		
5	2	2,5	1	1	13	1	1	2	8,5	18,0	26,5	10	265,0	58,9%	MEDIA		
6	2	2,5	1	2	13	1	1	2	9,5	18,0	27,5	13	357,5	61,1%	MEDIO-ALTA		
7	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
8	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
9	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
10	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
11	2	2,5	1	0	13	1	1	2	7,5	18,0	25,5	3	76,5	56,7%	MEDIA		
12	2	2,5	2	0	13	1	1	2	8,5	18,0	26,5	10	265,0	58,9%	MEDIA		
13	2	2,5	2	0	13	1	1	2	8,5	18,0	26,5	10	265,0	58,9%	MEDIA		
14	4	2,5	1	2	13	1	1	2	11,5	18,0	29,5	14	413,0	65,6%	MEDIO-ALTA		
									21	24	45	Punteggio massimo ottenibile					

Figura 5.27: Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione strutturale e geotecnica

### 5.4.2 Valutazione della Classe di Attenzione geologica

La Figura 5.29 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito geologico. Questa Classe di Attenzione viene valutata nel suo insieme, senza dover far riferimento ai singoli concetti ispettivi.

La *magnitudo dell'instabilità di versante* è stata indagata ricorrendo all'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, IFFI. Come evidenziato dalla Figura 5.28 il versante nel quale è inserita la galleria Vallesaccarda non è interessato da instabilità. Per questo motivo a tutti i parametri contenuti in questa categoria è stato assegnato un punteggio pari a 0.



**Figura 5.28:** Estratto della cartografia on line. (IFFI, 2020)

Una volta sommati i punteggi dei quattro parametri si è ottenuta una valutazione di 0/15: la Classe di Attenzione geologica della galleria Vallesaccarda è bassa.

		GEOLOGIA								
		Pericolosità		Vulnerabilità		P	V	P+V	I <sub>geol</sub>	
		Magnitudo dell'instabilità di versante intesa come massima velocità di spostamento	Stato di attività per le frane riconosciute (attive o quiescenti)/Grado di criticità per le frane potenziali	Presenza/Assenza/Presenza di Early Warning System, grandezze monitorate e tipologie di strumenti	Volumi/estensione dell'interferenza instabilità-struttura					
INTERA GALLERIA		0	0	0	0	0	0	0,0	0,00	0,0%
		Punteggio massimo ottenibile				10	5	15	Classe di Attenzione	
										BASSA

**Figura 5.29:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione geologica

### 5.4.3 Valutazione della Classe di Attenzione sismica

La Figura 5.30 mostra i punteggi che sono stati attribuiti alle voci al fine di definire la Classe di Attenzione sismica, valutata facendo riferimento ai singoli concetti ispettivi.

Al parametro *caratteristiche del sisma* è stato assegnato il punteggio pari a 3 perché l'accelerazione al suolo del sito in cui si colloca la galleria Vallesaccarda è uguale a 0,2359g (50° percentile e tempo di ritorno di 475 anni). La magnitudo di momento è pari a 6 (INGV, 2020b).

L'*inclusione in zone sismogenetiche* è stata indagata ricercando l'informazione presso il portale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Figura 5.22): la galleria Vallesaccarda si colloca a meno di 10 km dalla zona sismogenetica più vicina e per questo motivo è stato assegnato a questa voce il punteggio 1,5 (INGV, 2020a).

Alla voce *presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali* è stata assegnata la valutazione 3 poiché la galleria in esame attraversa una faglia.

Per quanto concerne la *presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica*, dal momento che in prossimità della galleria non sono stati riscontrati eventi franosi, si è assegnato al parametro il punteggio 0.

La categoria di terreno nel quale è inserita la galleria Vallesaccarda, secondo la NTC 2018, risulta essere C (Figura 5.7). Per questo motivo il punteggio attribuito alle *condizioni geologiche dell'ammasso roccioso* è 0,5.

La *profondità dell'asse della galleria* è stata valutata ricorrendo ad alcune cartografie che riportano le curve di livello del territorio in prossimità dell'opera in esame. Dopo un'attenta analisi la profondità media della galleria è risultata essere 20 metri.

Il punteggio pari a 0 assegnato alla *geometria della galleria* è dovuto all'evidenza che la forma piuttosto circolare della sezione e la presenza di arco rovescio favoriscono la redistribuzione delle sollecitazioni.

La valutazione della *resistenza e stato conservazione del rivestimento* si è basata sulle Classi di Attenzione strutturale e geotecnica attribuite ai singoli conci.

All'ultimo parametro in esame, *norme di progettazione/duttilità del rivestimento*, si è assegnato il punteggio massimo, pari ad 1, poiché la galleria in esame non è stata progettata con tecnologie antisismiche.

Una volta valutati i parametri si è provveduto a sommare i punteggi relativi ad ogni concio e a ricavarne il rango associato come descritto nel paragrafo 4.4.3. Facendo riferimento alla somma dei punteggi in percentuale è stato possibile attribuire una Classe di Attenzione ai singoli conci che compongono la galleria in esame.

La Classe di Attenzione sismica della galleria Vallesaccarda risulta essere medio-alta con un punteggio percentuale pari a 70,6%, corrispondente al valore di 10,58/15.

SIS																	
Caratteristiche del sistema )	Vulnerabilità																
	Inclusione in zone sismogenetiche	Presenza di singole faglie capaci/passaggi formazionali	Presenza di dissesti di versante attivabili da sollecitazione sismica	Condizioni geologiche dell'ammasso roccioso o del terreno	Profondità dell'asse della galleria	Geometria della sezione	Resistenza del rivestimento e stato conservazione	Nome di progettazione/ duttilità rivestimento	P	V	P+V	Rango	I°R	P+V (%)	Cda concto	I sis	
1	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.25	1	3	7.3	10.3	1	10.3	68.3%		MEDIO-ALTA
2	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
3	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
4	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
5	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
6	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
7	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
8	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
9	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
10	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
11	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
12	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
13	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.5	1	3	7.5	10.5	2	21.0	70.0%	MEDIO-ALTA	
14	3	1.5	3	0	0.5	1	0	0.75	1	3	7.8	10.8	14	150.5	71.7%	MEDIO-ALTA	
										<b>Punteggio massimo ottenibile</b>		<b>4</b>	<b>11</b>	<b>15</b>			

Figura 5.30: Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione sismica

#### 5.4.4 Valutazione della Classe di Attenzione incendio

La Figura 5.31 riporta i punteggi che sono stati assegnati ai parametri appartenenti all'ambito incendio la cui Classe di Attenzione è valutata facendo riferimento all'intera galleria.

Al *trasporto di merci pericolose* è stato attribuito il punteggio pari a 2 perché sulla tratta autostradale non vi è alcuna restrizione al riguardo (Autostrade per l'Italia, 2019).

L'*incidentalità caratteristica* è stata valutata come media con un punteggio associato pari a 1.

La galleria Vallesaccarda si sviluppa per una *lunghezza* di 261 metri e per questa ragione è stata attribuita a questa voce la valutazione 1.

Alle voci *difetti/assenza di misure impiantistiche e strutturali* è stato attribuito il punteggio 2. Dalla documentazione fornita risulta infatti che nel 2019 la maggior parte delle gallerie siano state dotate di alcune di queste misure, ma non tutte (Autostrade per l'Italia, 2019).

I *piani di intervento* sono stati considerati assenti dal momento che nella documentazione fornita non sono segnalati. Quando l'informazione è assente, come in questo caso, è preferibile ragionare a favore di sicurezza, attribuendo il punteggio unitario. Un'ulteriore considerazione consiste nel fatto che la galleria non è provvista di tutti gli impianti e di conseguenza anche i piani di intervento non saranno completi.

Una volta assegnati e sommati i punteggi di ogni parametro, si è ottenuta una valutazione della Classe di Attenzione incendio pari 9/15, corrispondente a quella medio-alta

INC											
Pericolosità			Vulnerabilità				P	V	P+V	I <sub>inc</sub>	
Trasporto merci pericolose	Incidentalità caratteristica	Lunghezza	Difetti/Assenza di misure impiantistiche	Difetti/Assenza di misure strutturali	Piani di intervento						
INTERA GALLERIA	2	1	1	2	2	1	3	6	9	9,00	60,0%
Punteggio massimo ottenibile							4	11	15	Classe di Attenzione	
										MEDIO-ALTA	

**Figura 5.31:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione incendio

### 5.4.5 Valutazione della Classe di Attenzione geometrica

La Figura 5.32 mostra i punteggi che sono stati assegnati ai due parametri appartenenti all'ambito geometrico.

L'informazione riguardante i *difetti di altezza libera* della galleria Vallesaccarda non è reperibile. Dalla documentazione fornita risulta che i conci 1 e 14 dovranno essere ricostruiti perché molto fessurati. Poiché le fessurazioni e le deformazioni possono causare difetti di gabarit, si è deciso di assegnare a questi due conci la valutazione 2.

Alla voce *assenza di profilo ridirettivo* addossato ai piedritti è stato attribuito il punteggio massimo, pari a 2. L'informazione è stata fornita da Autostrade per l'Italia durante uno scambio di e-mail tra il dipartimento DISEG e la concessionaria.

Una volta assegnate e sommate le valutazioni dei singoli conci, alla galleria è stato attribuito il punteggio massimo, come descritto nel paragrafo 4.4.5. La Classe di Attenzione geometrica della galleria Vallesaccarda è media, associata ad un punteggio di 4/10.

		GEOM					I <sub>geom</sub>	
		Pericolosità	Vulnerabilità	P	V	P+V		
		Difetti di altezza libera	Assenza profilo ridirettivo addossato ai piedritti					
CONCI	1	2	2	2	2	4	4,00	40,0%
	2	0	2	0	2	2		
	3	0	2	0	2	2		
	4	0	2	0	2	2		
	5	0	2	0	2	2	Classe di Attenzione	
	6	0	2	0	2	2	MEDIA	
	7	0	2	0	2	2		
	8	0	2	0	2	2		
	9	0	2	0	2	2		
	10	0	2	0	2	2		
	11	0	2	0	2	2		
	12	0	2	0	2	2		
	13	0	2	0	2	2		
	14	2	2	2	2	4		
Punteggio massimo ottenibile				8	2	10		

**Figura 5.32:** Applicazione del metodo SMART alla galleria Vallesaccarda: definizione della Classe di Attenzione geometrica

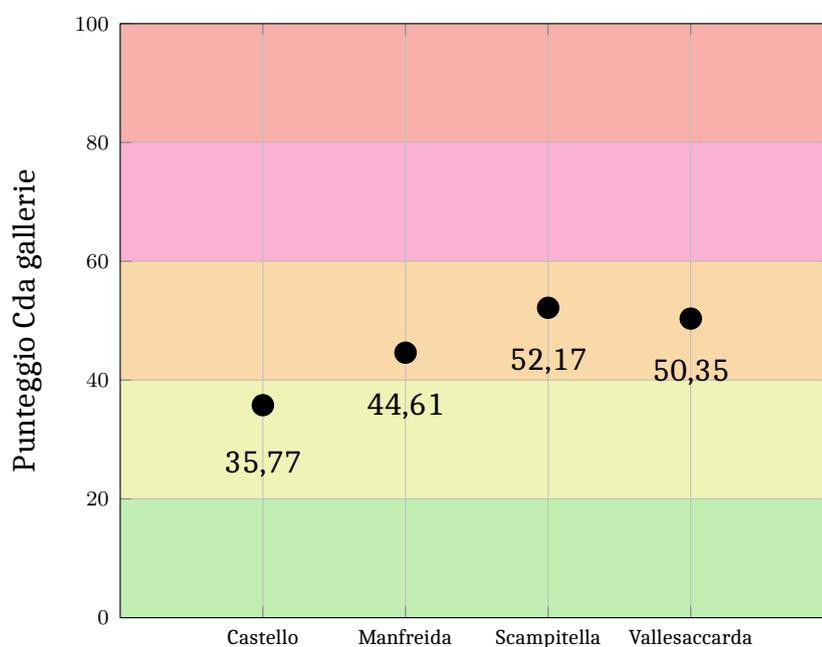
### 5.4.6 Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Vallesaccarda

Sommando i punteggi di ciascuna Classe di Attenzione è possibile ottenere quella relativa alla galleria Vallesaccarda, come descritto nel capitolo 4. Per assegnare la valutazione ci si è riferiti alla tabella 4.2. Come evidenziato dalla Tabella 5.4 la Classe di Attenzione della galleria è media.

Classe di Attenzione	Punteggio	Valutazione
Strutturale e geotecnica	26,76/45	Media
Geologica	0/15	Bassa
Sismica	10,58/15	Medio-alta
Incendio	9/15	Medio-alta
Geometrica	4/10	Media
<b>Galleria Vallesaccarda</b>	<b>50,35/100</b>	<b>Media</b>

**Tabella 5.4:** Valutazione della Classe di Attenzione della galleria Vallesaccarda

Confrontando i risultati ottenuti per le quattro gallerie in esame si nota che quella a cui si dovrebbe assegnare la priorità di intervento è la Scampitella a cui è stato assegnato un punteggio di 52,17/100. Al secondo posto troviamo la galleria Vallesaccarda con 50,35/100 punti. In terza posizione vi è la galleria Manfreida con 44,61/100 punti e in ultima, con 35,77/100 punti, si colloca la galleria Castello. Quanto detto viene evidenziato nella Figura 5.33



**Figura 5.33:** Confronto tra i punteggi assegnati alle quattro gallerie in esame



# Capitolo 6

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi è stato svolto con lo scopo di presentare la metodologia Smart (Searching for MAintenance and Repair priority in Tunnels). Questa è applicabile alle gallerie autostradali che devono essere soggette a manutenzione e messa in sicurezza. L'obiettivo del metodo è quello di riuscire a definire una gerarchia di intervento, mettendo in evidenza, attraverso l'assegnazione della Classe di Attenzione, le gallerie che presentano un rischio elevato. La valutazione si basa sull'analisi di cinque Classi di Attenzione: strutturale-geotecnica, geologica, sismica, incendio e geometrica, coincidenti con cinque ambiti dell'analisi del rischio e definiti da parametri che devono essere esaminati. Parte fondamentale nell'ideazione del metodo è stata l'attribuzione degli intervalli entro cui far variare i punteggi attribuibili a ciascun parametro. Per farlo ci si è avvalsi del Rock Engineering System, metodo che permette di evidenziare quali siano i parametri che dominano ogni Classe di Attenzione ai quali assegnare un intervallo di variazione del punteggio più ampio. Il RES è un metodo semiquantitativo da cui ne consegue che la definizione dell'influenza di un parametro sugli altri dipende da alcune evidenze dettate dall'esperienza: per questo motivo la matrice delle interazioni, se costruita da due persone diverse, potrebbe presentare delle piccole differenze, ma le considerazioni finali sarebbero simili. Una volta definito il modo in cui deve essere applicato il metodo Smart, sono state riportate le applicazioni a quattro gallerie autostradali italiane.

Una sorta di validazione del metodo può essere effettuata confrontando i risultati ottenuti con gli interventi di manutenzione programmati per le quattro gallerie in esame. La galleria Scampitella, secondo quanto riportato nel report conclusivo fornito da Autostrade per l'Italia S.p.a (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020g), sarà oggetto di una completa ricostruzione dell'arco di calotta e di un successivo totale rifacimento delle restanti porzioni del rivestimento. Tale informazione conferma quanto emerso dall'applicazione del metodo Smart: la galleria Scampitella, infatti, risulta essere quella con il punteggio più elevato e a cui deve essere assegnata la priorità di intervento. La stessa osservazione può essere fatta anche per le restanti opere: gli interventi previsti per la galleria Vallesaccarda consistono nel ripristino degli spessori con gunita fibrorinforzata armata con rete elettrosaldata e la realizzazione di un sottarco armato nei pressi dei conci 1 e 14 (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020h). Dall'applicazione del metodo Smart emerge che la galleria Vallesaccarda si colloca al secondo posto nella classifica delle priorità di intervento. In terza e quarta posizione si trovano, rispettivamente, la galleria Manfreida e Castello: entrambe saranno soggette all'applicazione di reti protettive, alla costruzione di un sistema di raccolta delle acque e di drenaggio, alla bullonatura delle parti instabili e alla sostituzione delle armature disgregate (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020e). Il concio 4 della galleria Manfreida, in aggiunta, necessiterà della costruzione di un sottarco armato in spritz-beton strutturale armato con centine e solidarizzato al rivestimento esistente mediante appositi ganci (Lombardi Ingegneria S.r.l et al., 2020f).

Durante l'applicazione del metodo Smart si sono riscontrate delle problematiche dovute al difficile reperimento di alcune informazioni necessarie all'attribuzione dei punteggi dei parametri. In particolare, la documentazione necessaria alla definizione della Classe di Attenzione incendio e geometrica risultava priva dei dati utili. Si è potuto tuttavia applicare il metodo grazie ad alcune evidenze dettate dall'esperienza e alle esaustive risposte fornite direttamente da Autostrade per l'Italia. Alla luce di quanto riportato in questa tesi, si può concludere constatando che il metodo Smart, applicabile alle gallerie autostradali italiane, risulta essere sufficientemente semplice e speditivo.

Il Rock Engineering System e l'applicazione del metodo Smart ad alcune

gallerie, di cui si conosce il livello di rischio, hanno permesso di ottimizzare la scelta degli intervalli entro cui far variare i punteggi di alcuni parametri e di poter effettuare delle modifiche per definire le cinque Classi di Attenzione. Infatti, confrontando i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo Smart con le informazioni associate alla definizione del rischio delle gallerie in esame, è possibile validare il metodo, cercando di ottenere un risultato che descriva sempre più precisamente la condizione delle opere.

Per rendere più robusto il metodo si suggerisce di applicarlo ad ulteriori gallerie autostradali in modo tale da verificarne l'efficacia ed eventualmente effettuare le modifiche che si rendono necessarie agli intervalli entro cui far variare i punteggi dei parametri.



# Bibliografia

Aghababaei, S., G. Saeedi, and H. Jalalifar

2016. Risk analysis and prediction of floor failure mechanisms at long-wall face in parvadeh-i coal mine using rock engineering system (res). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5):1889–1901.

Akron

2020. Georadar longitudinale con indagini di taratura. Opera 0020.0 carr 7.

Astrua, G.

1961. *Manuale pratico completo del costruttore di strade, ponti, gallerie ed opere idrauliche*. Hoepli.

Autostrade per l'Italia

2019. Status della sicurezza al 30 aprile 2019.

Balossi Restelli, A.

1969. Trattamento preventivo, mediante iniezioni, di terreni difficili sotto falda per consentire lo scavo di grandi gallerie. In *Atti del primo convegno internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie*, volume 2. Associazione mineraria subalpina.

Balossi Restelli, A. and L. Ginetti

1969. Un esempio di trattamento preventivo misto d'iniezioni e di drenaggio per rendere possibile lo scavo di una galleria dell'autostrada Napoli - Bari. In *Atti del primo convegno internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie*, volume 2. Associazione mineraria subalpina.

Barla, G.

2005. Sviluppi nell'analisi progettuale delle opere in sotterraneo. *Rivista Italiana di Geotecnica*, Pp. 11–22.

Barla, M.

2010. *Elementi di meccanica e ingegneria delle rocce*. Celid.

Bergamo, M.

2002. La variante di valico: l'attraversamento autostradale degli appennini. In *NOTIZIARIO ordine degli ingegneri di Verona*, volume 76.

Bollettino di legislazione tecnica

2020. Website. [www.legislazionetecnica.it](http://www.legislazionetecnica.it).

Cancelli, A. and G. Crosta

1994. Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. In *Risk and reliability in ground engineering*, Pp. 177–190. Thomas Telford Publishing.

Centre d'Études des Tunnels

2015a. *Road tunnel civil engineering inspection guide, book 1*. CETU.

Centre d'Études des Tunnels

2015b. *Road tunnel civil engineering inspection guide, book 2*. CETU.

Dambra, R.

2020. Autostrade per l'italia mette in sicurezza 587 gallerie. Website. <https://www.sicurauto.it/news/attualita-e-curiosita/autostrade-per-litalia-mette-in-sicurezza-587-gallerie/>.

Desimon, V.

1939. *Costruzione delle gallerie*. Hoepli.

Facchinelli, L.

2002. 130 anni dal traforo ferroviario del moncenisio: una storia di grandi imprese. In *NOTIZIARIO ordine degli ingegneri di Verona*, volume 76, Pp. 5–12.

Garassi, A.

2015. Fondazioni speciali (progetto, applicazioni e tecnologie). Seminario "Fondazioni speciali". Ordine degli ingegneri della provincia di Bari.

Gentili, G.

1969. Problemi geologici relativi alle gallerie dell'autostrada Genova – Sestri Levante. In *Atti del primo convegno internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie*, volume 2. Associazione mineraria subalpina.

Grasso, F.

1969. Osservazioni geologico-tecniche sulle gallerie dell'autostrada Quincinetto-Aosta. In *Atti del primo convegno internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie*, volume 1. Associazione mineraria subalpina.

Hudson, J.

1992. *Rock engineering systems. Theory and practice.*

IFFI

2020. Piattaforma idrogeo. Website. <https://idrogeo.isprambiente.it>.

INGV

2020a. Database of individual seismogenic sources. Website. <http://diss.rm.ingv.it/dissGM/>.

INGV

2020b. Mappa interattiva di pericolosità sismica. Website. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

Innaurato, N.

2001. *Costruzione di gallerie Vol. 2, metodi di scavo, sostegni immediati, rivestimenti definitivi, scavo di terreni.* Politeko.

Lamberti, A.

2004. Strade d'italia: dalle origini alle autostrade. Website. <http://www.storiologia.it/ferrovie/a1950c.htm>.

- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020a. Ispezione approfondita. Opera 0020.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020b. Ispezione approfondita. Opera 0005.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020c. Ispezione approfondita. Opera 0476.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020d. Ispezione approfondita. Opera 0473.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020e. Report conclusivo - relazione tecnico descrittiva e di calcolo  
interventi messa in sicurezza. Opera 0020.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020f. Report conclusivo - relazione tecnico descrittiva e di calcolo  
interventi messa in sicurezza. Opera 0005.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020g. Report conclusivo - relazione tecnico descrittiva e di calcolo  
interventi messa in sicurezza. Opera 0476.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020h. Report conclusivo - relazione tecnico descrittiva e di calcolo  
interventi messa in sicurezza. Opera 0473.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020i. Resoconto percentuale difetti per cod. iqa - difetti del rivestimento.  
Opera 0020.0 carr 7.
- Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020j. Resoconto percentuale difetti per cod. iqa - difetti del rivestimento.  
Opera 0005.0 carr 7.

Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020k. Resoconto percentuale difetti per cod. iqa - difetti del rivestimento.  
Opera 0476.0 carr 7.

Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020l. Resoconto percentuale difetti per cod. iqa - difetti del rivestimento.  
Opera 0473.0 carr 7.

Lombardi Ingegneria S.r.l, Rocksoil S.p.a, and SWS Engineering S.p.a  
2020m. Studio del gabarit interno sulla calotta da ricostruire. Opera 0476.0  
carr 7.

Lunardi, G., F. Carriero, A. Magliocchetti, and D. Vanni  
2013. Sistemi innovativi di consolidamento del terreno per gallerie in ar-  
gilla: il caso della galleria Cavallo, Autostrada A14 Adriatica tratta Anco-  
na Nord-Senigallia. Congresso società italiana gallerie "Gallerie e spazio  
sotterraneo nello sviluppo dell'Europa".

Martinelli, D. and P. Minghetti  
1965. Il calcestruzzo spruzzato armato quale mezzo esecutivo e rivesti-  
mento definitivo delle gallerie. applicazione ed esperienze in una galleria  
autostradale. *Rivista Italiana di Geotecnica*, Pp. 116-123.

MTSEngineering  
2020a. Report martinetti piatti - pk varie. Opera 0020.0 carr 7.

MTSEngineering  
2020b. Report videoendoscopie - pk varie. Opera 0020.0 carr 7.

MTSEngineering  
2020c. Report videoendoscopie - pk varie. Opera 0005.0 carr 7.

NTC2018  
2018. Norme tecniche per le costruzioni.

Peila, L.  
2015. Applicazione del rock engineering systems alla Galleria del Monte  
Ceneri in Svizzera. Tesi di Laurea Magistrale.

Ping, L., J. Hudson, et al.

1993. A fuzzy evaluation approach to the stability of underground excavations. In *ISRM International Symposium-EUROCK 93*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Politecnico di Torino

2020. Indicazioni per la definizione di una metodologia in base alla quale riconoscere l'appartenenza di ciascuna tratta della rete autostradale a una specifica classe di attenzione - asset gallerie autostradali. *Rapporto N.: 2002ASPI RL01.0 - 27 ottobre 2020*, Pp. 1–20.

RINA

2020. Georadar longitudinale con indagini di taratura. Opera 0005.0 carr 7.

RINA

2020. Report martinetti piatti. Opera 0005.0 carr 7.

Saeidi, O., A. Azadmehr, and S. R. Torabi

2014. Development of a rock groutability index based on the rock engineering systems(res): A case study. *Indian Geotechnical Journal*, Pp. 49–58.

Shin, H.-S., Y.-C. Kwon, Y.-S. Jung, G.-J. Bae, and Y.-G. Kim

2009. Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in korea. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6):1072–1087.

Socotec

2020a. Georadar longitudinale con indagini di taratura. Opera 0476.0 carr 7.

Socotec

2020b. Georadar longitudinale con indagini di taratura. Opera 0473.0 carr 7.

Socotec

2020a. Report martinetti piatti. Opera 0476.0 carr 7.

Socotec

2020b. Report martinetti piatti. Opera 0473.0 carr 7.

Socotec

2020c. Report videoendoscopie. Opera 0473.0 carr 7.

Socotec

2020d. Videoendoscopie. Opera 0476.0 carr 7.

Toto Costruzioni Generali

2019. Website. <https://totospa.it/2016/06/20/quel-mostro-di-nome-martina-che-sembra-inventato-da-giulio-verne>.

Viespoli, E.

1969. Applicazioni dei trattori cingolati, pale meccaniche e wagons articolati, nello scavo delle moderne gallerie autostradali. In *Atti del primo convegno internazionale sui problemi tecnici nella costruzione di gallerie*, volume 1. Associazione mineraria subalpina.



# Ringraziamenti

Con questa tesi si conclude un importante percorso che mi ha permesso di crescere e di migliorarmi. Mi pare doveroso ringraziare coloro che hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo.

Il primo grazie va ai miei relatori, il Professor Marco Barla, la Professoressa Monica Barbero e l'Ingegnere Alessandra Insana, che con la loro esperienza e attenzione mi hanno accompagnata nella stesura di questa tesi. Grazie anche ad Elisa e Lorenzo per gli utili consigli.

Ai miei genitori che mi hanno sempre sostenuta facendomi sentire amata ed apprezzata, in particolare a mia mamma per tutte le volte in cui ha dovuto placare la mia ansia. A mia sorella Celeste per i bellissimi momenti di studio e svago condivisi. A mia nonna Angiolina per il suo supporto e nonna Rita per l'esultanza con cui ha sempre accolto la notizia di un esame superato. Grazie.

Un ringraziamento speciale va a Manuel che mi ha sopportata anche quando io per prima stentavo a farlo, riuscendo sempre a farmi sorridere anche nei momenti più difficili. Il futuro insieme, immaginato per nove anni, ora è più vicino e non vedo l'ora di scoprirlo.

Ai miei amici, con cui ho condiviso rigeneranti momenti di spensieratezza. In particolare ringrazio *I ragazzi della via Gluck*, le mie amiche sanmauresi, Ele, Marti ed Ari, e le mie compagne di 'avventura politecnica' con cui ho condiviso gioie e dolori Cami, Franci, Grazia e Robi.