

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica**



Tesi di Laurea Magistrale

Condizioni di stabilità delle falesie italiane con particolare riferimento al tratto di costa Genova-Rapallo

Relatore

Prof. Claudio Scavia

Candidata

Sara Sgangarella Valvano

Dicembre 2021

*Ai miei genitori e a mio zio,
anima sorridente.*

Indice

Riassunto	12
Abstract.....	12
1. Introduzione	13
1.1. Distribuzione spaziale delle falesie lungo la costa italiana.....	16
2. Descrizione dei cinematismi possibili.....	17
2.1. Meccanismi cinematici tipici delle rocce.....	23
2.1.1. Scivolamento planare.....	24
2.1.2. Scivolamento a cuneo	25
2.1.3. Ribaltamento	26
3. Cause dell'instabilità costiera.....	27
4. Progettazione delle opere costiere.....	29
4.1. Tipologie di intervento.....	30
4.1.1. Ancoraggio.....	31
4.1.2. Rete paramassi	32
4.1.3. Calcestruzzo proiettato	32
4.1.4. Opera di drenaggio.....	33
4.1.5. Disgaggio	34
4.1.6. Barriera paramassi	35
4.1.7. Muro di sponda	37
4.1.8. Barriera aderente.....	37
4.1.9. Pennello	38
4.1.10. Barriera frangiflutti	39
4.1.11. Ripascimento	41
4.1.12. Opera portuale.....	42
4.2. Misure legali	43
5. Analisi dell'instabilità costiera italiana.....	44
5.1. Liguria.....	44
5.2. Toscana	49

5.3.	Lazio	51
5.4.	Campania	55
5.5.	Basilicata.....	61
5.6.	Calabria.....	62
5.7.	Puglia	64
5.8.	Marche	68
5.9.	Friuli-Venezia Giulia	70
5.10.	Sicilia	72
5.11.	Sardegna.....	76
6.	Analisi di stabilità del tratto costiero Genova – Rapallo.....	85
6.1.	Previsione della frana.....	86
6.1.1.	Inclinazione e traccia sul fronte delle discontinuità.....	87
6.1.2.	Metodi all’equilibrio limite per valutare la stabilità della falesia	90
6.2.	Back-analysis della frana	100
6.2.1.	Codice di calcolo “Slide2”	101
6.2.2.	Codice di calcolo “Slide3”	104
7.	Conclusioni.....	106
8.	Sviluppi futuri	107
	Bibliografia.....	108
	Sitografia	112

Indice delle Figure

Figura 1. Tipologie costiere italiane per la Direttiva 2000/60/EC (Brondi et al., 2003).	13
Figura 2. Interazione dei fattori controllanti l'erosione al piede delle falesie (Sunamura, 2015; parzialmente modificata).	14
Figura 3. Tre differenti morfologie delle falesie (Sunamura, 2015).	15
Figura 4. Distribuzione spaziale delle falesie instabili lungo la costa italiana (Google Earth).	16
Figura 5. Modelli di crollo in ammassi rocciosi, a sinistra, e in depositi detritici, a destra (Silvestri et al., 2006).	18
Figura 6. Modello di ribaltamento in ammassi rocciosi estremamente fratturati (Silvestri et al., 2006).	18
Figura 7. Modello schematico di uno scorrimento rotazionale (Silvestri et al., 2006).	19
Figura 8. Evoluzione schematica di uno scorrimento traslazionale (Silvestri et al., 2006).	19
Figura 9. Modello schematico di un colamento lento (Silvestri et al., 2006).	20
Figura 10. Modello schematico di una colata rapida (Silvestri et al., 2006).	20
Figura 11. Evoluzione schematica di un'espansione laterale (Silvestri et al., 2006).	21
Figura 12. Esplicazione grafica dei diversi tipi di attività (Silvestri et al., 2006): dissesto attivo (a), dissesto sospeso (b), dissesto riattivato (c), dissesto quiescente (d), dissesto naturalmente stabilizzato (e), dissesto artificialmente stabilizzato (f), dissesto relitto (g).	22
Figura 13. Schema della giacitura di un pendio (Elmi et al., 1996).	24
Figura 14. Schema di un cedimento per scivolamento planare e relativa proiezione stereografica (Conti et al.).	25
Figura 15. Schema di un cedimento per scivolamento a cuneo e relativa proiezione stereografica (Conti et al.).	25
Figura 16. Schema di un cedimento per ribaltamento flessionale e relativa proiezione stereografica (Conti et al.).	26
Figura 17. Schema di un cedimento per ribaltamento a blocchi (Conti et al.).	26
Figura 18. Schema apporti-asporti dei sedimenti in ambito costiero (Ligato et al., 2007).	29
Figura 19. Esempio di ancoraggio attivo con cementazione del bulbo (Ligato et al., 2002).	31
Figura 20. Schema costruttivo di una rete paramassi (Ligato et al., 2002).	32
Figura 21. Esempio di calcestruzzo proiettato su parete rocciosa. Immagine tratta da: https://www.saiebologna.it	33

Figura 22. Sistema di drenaggio profondo realizzato mediante dreni suborizzontali (Ligato et al., 2002).	34
Figura 23. Esempio di disgaggio manuale con picco. Immagine tratta da: https://worktrade.ch	34
Figura 24. Esempio di disgaggio tramite esplosivo. Immagine tratta da: https://www.esplosivi.it	35
Figura 25. Componenti di una barriera paramassi a rete (Corso di Meccanica delle Rocce, 2019).	36
Figura 26. Schema di un muro di sponda (Ligato et al., 2007).	37
Figura 27. Esempio di barriera aderente (Ligato et al., 2007).	37
Figura 28. Esempio di pennello (Ligato et al., 2007).	38
Figura 29. Opera di difesa presso Arenzano (GE), costituita dalla successione di tre pennelli (Ligato et al., 2007).	38
Figura 30. Confronto tra l'installazione di un pennello impermeabile e di un altro permeabile (Ligato et al., 2007).	38
Figura 31. Schema dei tomboli che si possono formare a tergo delle barriere frangiflutti (Ligato et al., 2007).	39
Figura 32. Schema di una barriera frangiflutti (Ligato et al., 2007).	39
Figura 33. Sistema di barriere sommerse opportunamente segnalate (in secondo piano) ed emergenti (Ligato et al., 2007).	40
Figura 34. Barriera frangiflutti al piede della falesia del Monte Conero (Marche), che permette una maggiore fruizione turistica dell'area e smorza l'effetto erosivo delle onde incidenti (Ligato et al., 2007).	40
Figura 35. Esempio di proliferazione della flora algale a tergo di un sistema di barriere emergenti (Ligato et al., 2007).	40
Figura 36. Attività di ripascimento della spiaggia dei Maronti, isola di Ischia (Ligato et al., 2007).	41
Figura 37. Ventotene (LT): combinazione di un porto naturale, scavato nel tufo, e di un porto artificiale, visibile sullo sfondo (Ligato et al., 2007).	42
Figura 38. Arenzano (GE): esempio di porto a bacino (Ligato et al., 2007).	42
Figura 39. Esempio di porto con moli convergenti (Ligato et al., 2007).	42
Figura 40. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Liguria (Google Earth). .	44
Figura 41. Falesia "Balzi Rossi", comune di Ventimiglia (Imperia). Immagine tratta da: https://www.balzirossi.it	45
Figura 42. Falesia in località Valloria, Savona. Immagine tratta da: https://www.savonanews.it	45
Figura 43. Sperone roccioso, in località Valloria (Savona), con rete paramassi non in aderenza. Immagine tratta da: http://www.sggconsult.it	45

Figura 44. Frana nel comune di Arenzano (GE). Immagine tratta da: https://www.comune.arenzano.ge.it	46
Figura 45. Falesia nel comune di Bogliasco (GE). Foto di Emanuela Leveratto.	46
Figura 46. Falesia nella frazione San Gaetano, comune di Pieve Ligure (GE). Immagine tratta da: https://www.genova24.it	47
Figura 47. Confronto temporale relativo all'evoluzione della falesia sottostante il cimitero di Sori (Lucchetti et al., 2014).	47
Figura 48. Confronto temporale relativo all'evoluzione della falesia sottostante il cimitero di Camogli (Lucchetti et al., 2014).	47
Figura 49. Dissesto presente nella frazione San Rocco del comune di Camogli (GE). Immagine tratta da: https://idrogeo.isprambiente.it	48
Figura 50. Promontorio che sorregge l'abitato di Corniglia, comune di Vernazza (La Spezia). Immagine tratta da: https://www.cinquetterehike.com	49
Figura 51. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Toscana (Google Earth).	49
Figura 52. Falesia presente nella baia di Buca delle Fate, comune di Piombino (Livorno). Foto di Francesco Rotta.	50
Figura 53. Spiaggia di Sansone, isola d'Elba. Immagine tratta da: https://www.infoelba.it	50
Figura 54. Due tratti costieri del Monte Argentario (Grosseto). A sinistra: falesia di Capo d'Uomo (immagine tratta da: https://www.montinvisibili.it); a destra: falesia di Punta Ciana (immagine tratta da: https://www.monteargentario.info).....	50
Figura 55. Distribuzione spaziale delle falesie instabili del Lazio (Google Earth).	51
Figura 56. Sito archeologico costiero di Anzio (Roma): a sinistra, vista dall'alto del complesso (immagine tratta da: https://www.citta-insieme.it); a destra, particolare delle Grotte di Nerone (foto di Gianluca Mulone).	52
Figura 57. Dettaglio di una frana da crollo che ha coinvolto la falesia costiera di Tor Caldara, comune di Anzio (Roma). Immagine tratta da: https://canaledieci.it	52
Figura 58. Condizioni antecedenti al crollo del 2018 della falesia dei Marinaretti, comune di Nettuno (Roma). Immagine tratta da: https://www.studio93.it	52
Figura 59. Falesia di Torre Fico, comune di San Felice Circeo (Latina). Immagine tratta da: http://www.sanfelicecirceo.eu	53
Figura 60. Falesia di Punta Cetarola, comune di Sperlonga (Latina). Immagine tratta da: https://www.paesionline.it	53
Figura 61. Montagna Spaccata (a sinistra) e cappella di San Filippo Neri (a destra), comune di Gaeta (Latina). Immagini tratte da: https://www.gazzettinodelgolfo.it	54
Figura 62. Frana da crollo a Chiaia di Luna, comune di Ponza (Latina). Immagine tratta da: https://roma.fanpage.it	54
Figura 63. Falesie della baia di Cala Feola a Ponza (Latina). Immagine tratta da: https://www.ponzaleforna.com	54

Figura 64. Frana di Ventotene (Latina). Immagine tratta da: https://www.fanpage.it ...	55
Figura 65. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Campania (Google Earth).	56
Figura 66. Baia dei Maronti, isola d'Ischia. Foto di Giorgio di Iorio.	56
Figura 67. Falesia nel comune di Procida (NA), avente in sommità un ex convento. Immagine tratta da: https://napoli.repubblica.it	56
Figura 68. Edificio prima (a sinistra) e dopo (a destra) il crollo, spiaggia della Chiaiolella (isola di Procida). Immagine tratta da: https://corrieredelmezzogiorno.corriere.it	57
Figura 69. Marina di Puolo, Meta (NA): esempio di falesia con piattaforma costiera orizzontale, tipo B. Fonte: Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 126, No. 2 (2007), pp. 187.	57
Figura 70. Vico Equense (NA): esempio di falesia calcarea con pocket beach al piede. Fonte: Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 126, No. 2 (2007), pp. 186.....	57
Figura 71. Esempio di "plunging cliff" a Punta Campanella, comune di Massa Lubrense (NA). Fonte: Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 126, No. 2 (2007), pp. 188.	58
Figura 72. Particolare di un crollo avvenuto a Marina di Caterola, isola di Capri. Immagine tratta da: https://www.researchgate.net/publication/269390519	58
Figura 73. Promontorio di Agropoli (SA). Immagine tratta da: https://www.infocilento.it	58
Figura 74. Particolare del promontorio Ripe Rosse, comune di Montecorice (SA). Immagine tratta da: https://www.researchgate.net/publication/269390519	59
Figura 75. Distacco di lastre di roccia dall'Arco Naturale di Palinuro (SA) nel 2007. Fonte: Rend. Online Soc. Geol. It., Vol. 35 (2015), pp. 44.....	59
Figura 76. Baia del Buon Dormire, Centola (SA): particolare di una rete metallica in aderenza. Immagine tratta da: https://www.tripadvisor.it	59
Figura 77. Punta Garagliano, San Giovanni a Piro (SA). Immagine tratta da: https://www.trovaspiagge.it	60
Figura 78. Falesia con pocket beach in località Marcellino, San Giovanni a Piro (SA). Foto di Fabio Sansone.	60
Figura 79. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Basilicata (Google Earth).	61
Figura 80. Punta dei Crivi, comune di Maratea (PZ). Fonte: iStockphoto.....	61
Figura 81. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Calabria (Google Earth). 62	
Figura 82. Isola di Dino, comune di Praia a Mare (CS). Immagine tratta da: https://www.pellaro.net	62
Figura 83. Falesia dell'Arcomagno, comune di San Nicola Arcella (CS). Immagine tratta da: http://www.turiscalabria.it	63
Figura 84. Santuario di Santa Maria dell'Isola, comune di Tropea (VV). Immagine tratta da: https://www.paesionline.it	63

Figura 85. Particolare di una frana da crollo di un costone di Santa Maria dell'Isola, Tropea (VV). Immagine tratta da: https://www.quotidianodelsud.it	63
Figura 86. Falesia nel comune di Scilla (RC). Immagine tratta da: https://www.cosmopolitan.com	63
Figura 87. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Puglia (Google Earth)...	64
Figura 88. Falesia su cui sorge il comune di Vieste (FG). Immagine tratta da: https://siviaggia.it	64
Figura 89. Trabucco di Monte Pucci, comune di Peschici (FG). Fonte: AlterVista.	65
Figura 90. Crollo ai piedi della falesia di Monte Pucci, comune di Peschici (FG). Immagine tratta da: https://www.isprambiente.gov.it	65
Figura 91. Successione stratigrafica della costa di Polignano a Mare (Miccoli et al., 2015).	65
Figura 92. Cinematismi tipici della falesia di Polignano a Mare (Andriani et al., 2013).	66
Figura 93. Falesia in crollo nel comune di San Pietro Vernotico (BR). Immagine tratta da: https://www.brindisireport.it	66
Figura 94. Grotta della Poesia, comune di Melendugno (LE). Immagine tratta da: https://www.turismo.it	67
Figura 95. Falesia di Torre Sant'Andrea, comune di Melendugno (LE). Immagine tratta da: https://www.turismo.it	67
Figura 96. Crollo ai piedi della falesia di Torre dell'Orso, comune di Melendugno (LE). Immagine tratta da: https://www.lagazzettadelmezzogiorno.it	67
Figura 97. Esempio di ribaltamento in località Mulino d'Acqua, comune di Otranto (LE). Immagine tratta da: https://www.isprambiente.gov.it	68
Figura 98. Distribuzione spaziale delle falesie instabili delle Marche (Google Earth)..	68
Figura 99. Danni a via delle Rondini, strada comunale della provincia di Pesaro e Urbino. Immagine tratta da: https://ambiente.regione.emilia-romagna.it	69
Figura 100. Falesia modellata nel versante sovrastante la spiaggia di Mazzavalle, provincia di Ancona (Aringoli et al., 2014).....	69
Figura 101. Scorrimento planare in prossimità della spiaggia "Due Sorelle", nel comune di Sirolo (Segato et al., 2011).	69
Figura 102. Centro abitato di Sirolo (AN), in sommità della falesia Sassi Neri. Immagine tratta da: https://www.bbmontegallo.com	69
Figura 103. Esempio di uno stabilimento balneare al piede di una falesia rocciosa, nel comune di Numana. Immagine tratta da: https://www.balnearivieradelconero.it	70
Figura 104. Distribuzione spaziale delle falesie instabili del Friuli-Venezia Giulia (Google Earth).	70

Figura 105. Situazione giaciturale delle famiglie di discontinuità presenti nelle Falesie di Duino, provincia di Trieste. Immagine tratta da: http://www.comune.duino-aurisina.ts.it	71
Figura 106. Sperone "El Capel" delle Falesie di Duino, prima (a sinistra) e dopo (a destra) il crollo. Immagine tratta da: https://ilpiccolo.gelocal.it	71
Figura 107. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Sicilia (Google Earth)..	72
Figura 108. Cala Rossa, isola di Favignana (TP). Immagine tratta da: https://www.balarm.it	72
Figura 109. Cartelli affissi nel 2017 in prossimità della Riserva di Monte Cofano, a seguito di una frana da crollo. Immagine tratta da: https://www.tpostit.it	73
Figura 110. Promontorio di Coda della Volpe (AG). Immagine tratta da: http://www.fotografieitalia.it	73
Figura 111. Faraglioni di Terrasini (PA) prima del crollo di marzo 2016. Immagine tratta da: https://www.palermotoday.it	74
Figura 112. Scala dei Turchi (AG). Immagine tratta da: https://www.lavalledeitempli.it	74
Figura 113. Evidente erosione costiera in contrada Caos (AG). Fonte: Mareamico.....	75
Figura 114. Rocca di Cefalù (PA). Immagine tratta da: https://www.palermotoday.it ..	75
Figura 115. Riserva Naturale del Plemmirio (SR). Foto di Gabriele Campisi.....	75
Figura 116. Frana da crollo presso le Ripe Bianche (Giuffrida, 2015).	76
Figura 117. Tubo metallico, precipitato in spiaggia, che un tempo costituiva il cordone d'interdizione alla falesia Fontane Bianche (SR). Immagine tratta da: https://www.siracusaoggi.it	76
Figura 118. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Sardegna (Google Earth).	77
Figura 119. Borgo di Castelsardo (SS). Immagine tratta da: https://www.borghistorici.it	77
Figura 120. Valledoria (SS): esempio di sottoescavazione in corrispondenza del contatto tra il substrato litoide e la sovrastante formazione sabbioso-arenacea (Bosincu et al., 2017).	78
Figura 121. Particolare di una frana da crollo avvenuta a Marritza, comune di Sorso (SS). Immagine tratta da: https://www.lanuovasardegna.it	78
Figura 122. Costa di Porto Torres (SS) partendo da Abbaurrente. Immagine tratta da: https://www.lanuovasardegna.it	78
Figura 123. Sistema di falesie dell'Area Marina Protetta di Capo Caccia-Isola Piana (SS). Immagine tratta da: https://www.sardegnaturismo.it	79
Figura 124. Falesie di Capo Nieddu (OR). Foto di Roberto Bodano.	80
Figura 125. Falesie di Santa Caterina di Pittinuri con relativo arco (OR). Foto di Valentino Selis.	80

Figura 126. Perda Longa di Baunei (NU). Immagine tratta da: http://www.sardegnaambiente.it	81
Figura 127. Punta Goloritzé, comune di Baunei (NU). Immagine tratta da: http://www.sardegnaambiente.it	81
Figura 128. S'Arena Scoada (OR): esempio di frana da crollo (Vigo et al., 2012)......	81
Figura 129. Torre di Scau 'e Sai, prima (in alto) e dopo il crollo del 2012 (in basso), avvenuto a seguito dell'arretramento della falesia di Capo Mannu (Vigo et al., 2012).	82
Figura 130. Falesia di Su Tingiosu (OR). Immagine tratta da: https://www.sardegnaturismo.it	82
Figura 131. Tombe della necropoli meridionale di San Giovanni di Sinis (OR). Immagine tratta da: https://www.tharros.sardegna.it	83
Figura 132. Falesia di Capo San Marco (OR). Foto di Franco Cerniglia.....	83
Figura 133. Resti dell'ex laveria Lamarmora di Nebida (CI); è visibile sullo sfondo la costa di Masua, tra cui spicca lo Scoglio di Pan di Zucchero. Immagine tratta da: https://www.sardegnaturismo.it	84
Figura 134. Falesia di Sella del Diavolo (CA). Immagine tratta da: https://www.sardegna.com ; parzialmente modificata.	84
Figura 135. Localizzazione della porzione di falesia esaminata (Google Maps; parzialmente modificata).	85
Figura 136. Immagine risalente al 2005 della porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli (Lucchetti et al., 2014; parzialmente modificata).	86
Figura 137. Impianto generale del rilievo fotogrammetrico da drone, risalente al mese di luglio 2020.....	87
Figura 138. Misure, relative alla falesia di Camogli, ottenute mediante il software 3DF Zephyr.....	88
Figura 139. Previsione del volume di roccia mobilitabile (in rosso) relativo alla falesia di Camogli. A sinistra: vista SO assonometrica; a destra: vista SE assonometrica.....	89
Figura 140. A sinistra: suddivisione del blocco potenzialmente instabile in conci; a destra: forze agenti sull'i-esimo concio (Facciorusso et al., 2011).	90
Figura 141. A sinistra: visualizzazione della linea di spinta; a destra: forze agenti sul concio i-esimo per il metodo di Janbu generalizzato (Colombo et al., 1996).	92
Figura 142. Forze agenti sull'i-esima colonna della massa potenzialmente instabile. Immagine tratta da: https://www.roscience.com	93
Figura 143. Funzione dei limiti del pendio in Slide2. Immagine tratta da: https://www.roscience.com	94
Figura 144. Distribuzione delle pressioni interstiziali scelta per le discontinuità.	96
Figura 145. Modello sul quale è stata effettuata l'analisi di stabilità in Slide2.	96
Figura 146. Risultato dell'analisi di stabilità condotta in Slide2.	97

Figura 147. Modello sul quale è stata effettuata l'analisi di stabilità in Slide3; il piano in rosso rappresenta la falda posizionata a 8 m dal piano campagna.	98
Figura 148. Risultato dell'analisi di stabilità condotta in Slide3; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.	98
Figura 149. Schema dell'intervento di tirantatura scelto in Slide3.	99
Figura 150. Risultato dell'analisi di stabilità, condotta in Slide 3, considerando l'intervento di tirantatura; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.	99
Figura 151. Immagine della frana che ha interessato la porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli (CIMA Research Foundation, 2021).	100
Figura 152. Dimensioni del fronte della frana e del sottostante accumulo detritico (CIMA Research Foundation, 2021).	100
Figura 153. Ricostruzione geometrica tridimensionale della falesia di Camogli al momento del crollo.	101
Figura 154. Sezione di falesia sulla quale è stata effettuata una back-analysis della frana in Slide2; falda a 8 m del piano campagna; la frattura asciutta non preesistente tronca la distribuzione delle pressioni interstiziali, precedentemente ipotizzata triangolare, relativa alla linea di intersezione K1-K2.	101
Figura 155. Fattore di sicurezza della falesia adottando una resistenza a trazione del basamento roccioso e della frattura subverticale non preesistente di 10 kPa; falda posizionata a 8 m dal piano campagna.	102
Figura 156. Fattore di sicurezza della falesia adottando una resistenza a trazione del basamento roccioso e della frattura subverticale non preesistente di 5 kPa; falda posizionata a 8 m dal piano campagna.	103
Figura 157. Fattore di sicurezza della falesia adottando una resistenza a trazione del basamento roccioso e della frattura subverticale non preesistente di 10 kPa; falda posizionata a 4 m dal piano campagna.	103
Figura 158. Distribuzione delle pressioni interstiziali sulle discontinuità per una falda posizionata a 4 m del piano campagna.	104
Figura 159. Fattore di sicurezza della falesia senza intervento di tirantatura; falda a 4 m dal piano campagna; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.	104
Figura 160. Fattore di sicurezza della falesia dotata di intervento di tirantatura; falda a 4 m dal piano campagna; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.	105

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Stati di attività dei dissesti (Silvestri et al., 2006).	22
Tabella 2. Schema riepilogativo dei principali fattori che concorrono a predisporre e innescare i fenomeni gravitativi sul territorio italiano (Silvestri et al., 2006).....	28
Tabella 3. Sintesi delle caratteristiche del basamento roccioso (Sivori, 2008).	86
Tabella 4. Significativi aspetti geometrici relativi alla porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli.	89
Tabella 5. Bilancio del numero delle incognite e delle equazioni di equilibrio per il metodo dei conci (Facciorusso et al., 2011).	91
Tabella 6. Caratteristiche dell'intervento di tirantatura.	99

Riassunto

Da dati ISTAT emerge che circa il 30% della popolazione italiana si addensa nei comuni della costa, su un'area pari solo al 13% del territorio nazionale. Questo tipo di urbanizzazione, negli anni sempre più feroce, genera un impatto negativo sull'ambiente naturale circostante. In tal senso, il fenomeno dell'erosione costiera diventa un problema da gestire, soprattutto in quei contesti in cui l'evoluzione inaspettata, dunque incontrollata, dei litorali mette a rischio centri abitati e infrastrutture varie. Come coniugare, allora, sicurezza ed insediamento?

La presente tesi si concentra sull'analisi delle falesie italiane, coste rocciose con pareti alte e continue a picco sul mare, spesso fortemente urbanizzate. In particolare, sono illustrate la loro distribuzione spaziale, le tipologie di instabilità predominante e le relative cause, e le problematiche derivanti dai possibili cinematismi. Sono, inoltre, portati alla luce gli interventi atti a proteggere la costa dall'azione degli eventi meteo-marini e la loro efficacia. Questa parte descrittiva è funzionale all'analisi di un tratto costiero piuttosto a rischio, quello compreso tra le città liguri di Genova e Rapallo, caratterizzato da numerose falesie, alcune delle quali protagoniste di tragici eventi.

Abstract

ISTAT data show that about 30% of the Italian population gathers in coastal municipalities, on an area equal to only 13% of the national territory. This type of urbanization, increasingly ferocious over the years, generates a negative impact on the surrounding natural environment. In this sense, the phenomenon of coastal erosion becomes a problem to be managed, especially in those contexts in which the unexpected, therefore uncontrolled, evolution of the coasts jeopardizes residential zones and various infrastructures. How, then, can security and human settlements be combined?

The present thesis focuses on the analysis of Italian cliffs, rocky coasts with high and continuous walls overlooking the sea, often strongly urbanized. In particular, their spatial distribution, the types of predominant instability and their causes, and the problems deriving from possible kinematic mechanisms are illustrated. Intervention measures to protect the coast from the action of sea-weather events and their effectiveness are also brought to light. This descriptive part is functional to the analysis of a coastal stretch greatly at risk, the one between the Ligurian cities of Genoa and Rapallo, characterized by numerous cliffs, some of which are protagonists of tragic events.

1. Introduzione

La suddivisione delle coste italiane avviene secondo sei tipologie principali (Figura 1), come riportato in uno studio sulla geomorfologia costiera (Brondi *et al.*, 2003). Le suddette sono:

- rilievi montuosi (A),
- terrazzi (B),
- pianura litoranea (C),
- pianura di fiumara (D),
- pianura alluvionale (E),
- pianura di dune (F).

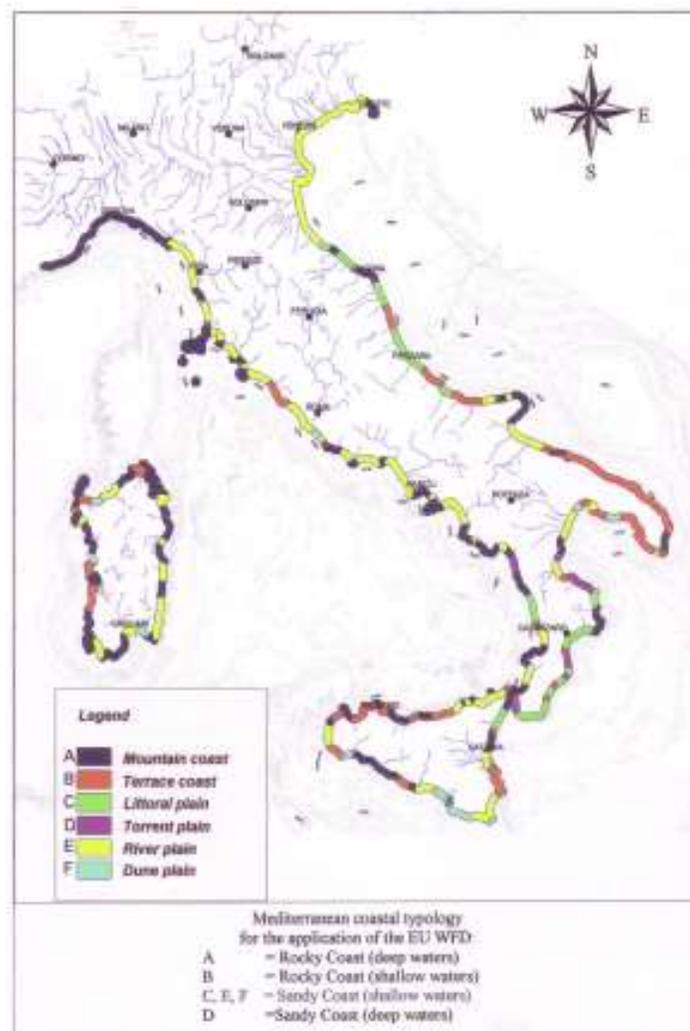


Figura 1. Tipologie costiere italiane per la Direttiva 2000/60/EC (Brondi *et al.*, 2003).

Della tipologia “rilievi montuosi” fanno parte anche le falesie, coste rocciose con pareti alte e continue, generalmente a picco sul mare. Si distinguono le falesie “vive” da quelle “morte”: le prime, dette anche “attive”, sono direttamente battute dal mare, mentre le seconde, chiamate “inattive”, sono separate dal mare da spiagge di dimensione variabile e, di conseguenza, risultano meno sottoposte all’azione aggressiva delle onde.

I materiali che costituiscono tali ammassi rocciosi possono essere di differente tipologia (granito, calcare, arenaria, etc.): individuarli è di fondamentale importanza, in quanto il comportamento geomeccanico della falesia dipende anche dalla sua composizione fisico-chimica.

Il loro processo di origine è lungo e complesso: le falesie si formano a seguito di processi di ingressione marina, principalmente dovuti all’innalzamento del livello del mare, fenomeni tettonici (formazione di scarpate di faglia) e gravitativi (formazione di scarpate in conseguenza del verificarsi di frane).

L’azione abrasiva sia chimica che meccanica del mare genera delle cavità al piede simili a grotte, chiamate *solchi di battente*, che nel tempo provocano il crollo di tutta la parete rocciosa sovrastante o, nel migliore dei casi, solo di una sua parte. La falesia si può così trasformare da “viva” a “morta”, come è avvenuto lungo il litorale ligure da Capo Noli a Punta di Caprazoppa.

I detriti forniti dal movimento di massa si accumulano alla base della scogliera, proteggendo la stessa dall'erosione, fino a quando essi non sono trasportati lungo terra e/o a largo da onde e correnti. A quel punto, infatti, il processo di disgregazione ricomincia, culminando in una nuova instabilità.

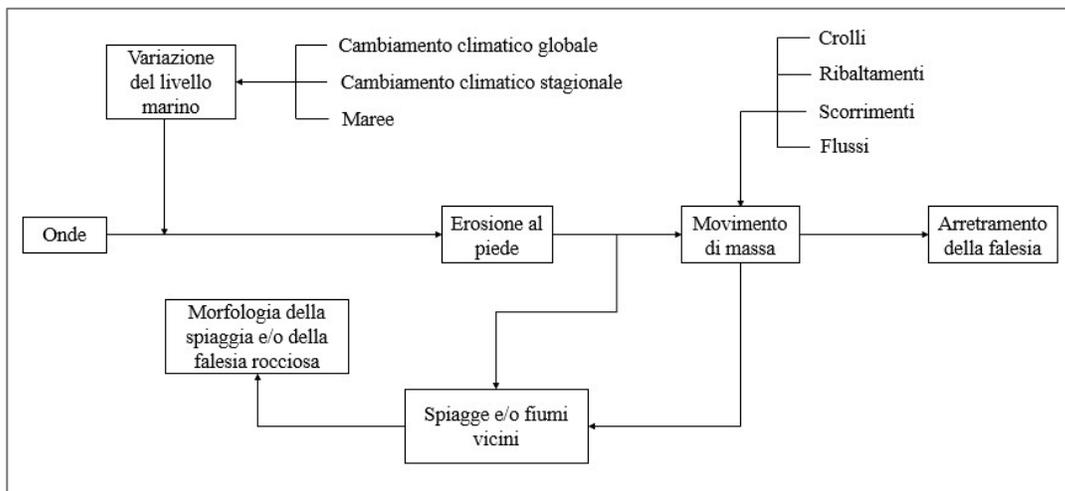


Figura 2. Interazione dei fattori controllanti l'erosione al piede delle falesie (Sunamura, 2015; parzialmente modificata).

Sunamura (2015) classifica ulteriormente le falesie in:

- piattaforme costiere o “shore platforms”, di tipo A (pendenti) o B (orizzontali);
- scogliere aggettanti o “plunging cliffs”, la cui faccia subverticale si tuffa molto al di sotto del livello del mare.

Le piattaforme di tipo A hanno una superficie di erosione con pendenza dolcemente decrescente verso il mare, mentre quelle di tipo B si contraddistinguono per la presenza di una superficie di erosione suborizzontale, frontale alla falesia e terminante a mare secondo una scarpata importante. Le dimensioni e la forma di quest’ultima influenzano in maniera considerevole l’impatto del moto ondoso sull’ammasso.

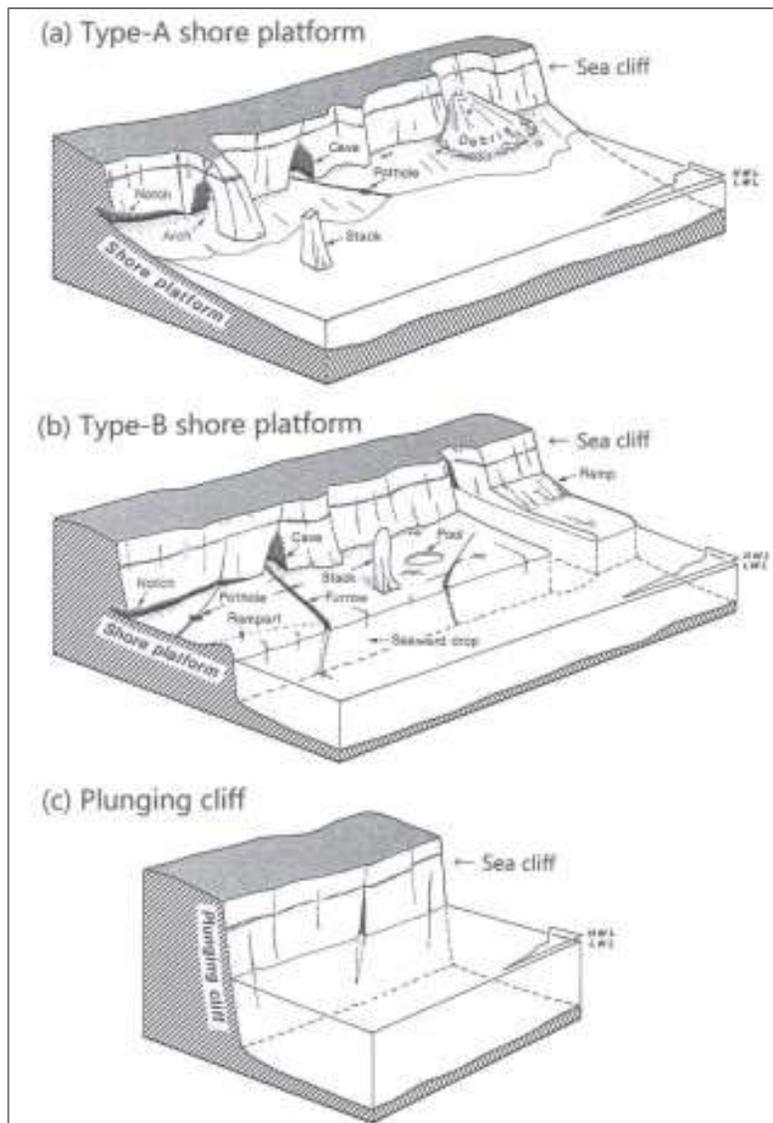


Figura 3. Tre differenti morfologie delle falesie (*Sunamura, 2015*).

Nel corso degli anni, lo studio della dinamica costiera si è concentrato sui tratti caratterizzati da coste basse, relegando al margine le coste alte rocciose, valutate semplicisticamente tutte più o meno stabili e immuni nel tempo (Andriani *et al.*, 2013). Queste ultime zone erano considerate, a causa del loro aspetto massiccio, territori di sicura espansione sia per i centri urbani che per quelli produttivi. Se ne trascurava l'elevato livello di disarticolazione, dovuto all'evoluzione morfologica, frutto sia dei processi naturali che di quelli antropici. L'erosione sempre più rapida delle spiagge non fa altro che accelerare il processo di disgregazione delle falesie, che arrivano a subire l'impatto diretto delle onde. Essa è favorita non solo dalla presenza sempre più massiccia dell'uomo e delle sue opere sulle coste, ma anche dall'impoverimento dell'apporto di materiale solido dei fiumi (Figura 2), determinato dalla massiccia estrazione di materiale dagli alvei. A volte, inoltre, sono le stesse opere di difesa dall'erosione, collocate in punti sbagliati, a velocizzare il processo di distruzione dei litorali.

1.1. Distribuzione spaziale delle falesie lungo la costa italiana

Per avere un'idea chiara della ripartizione per regioni italiane delle falesie instabili, sono stati consultati giornali locali, articoli accademici e varie relazioni geotecniche. Il risultato di tale lavoro di ricerca, aggiornato al 27 luglio 2021, è riassunto in Figura 4. Nel Capitolo 5 compare una descrizione più dettagliata dei fenomeni cinematici avvenuti, con la relativa documentazione fotografica.

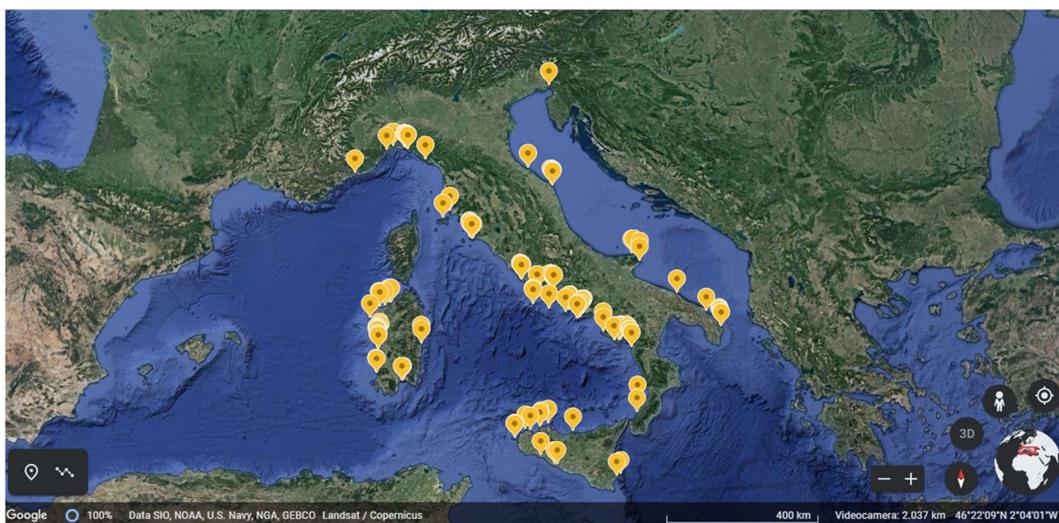


Figura 4. Distribuzione spaziale delle falesie instabili lungo la costa italiana (Google Earth).

2. Descrizione dei cinematismi possibili

Prima di procedere all'individuazione delle cause di instabilità delle falesie italiane, è necessario ricordare i principi della Meccanica delle Rocce. Nel fare ciò, si è preso spunto dalle lezioni del prof. Scavia e dal materiale didattico fornito agli studenti durante il corso da Lui tenuto (A.A. 2019/2020). Sono state utili anche le Linee Guida rilasciate dall'APAT ("Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici") nel 2006, in merito alla nomenclatura dei diversi fenomeni che possono interessare l'evoluzione di un dato versante. Una falesia può essere considerata come un pendio alla cui base agisce eventualmente la forza marina.

Innanzitutto, per capire al meglio il tipo di dissesto, è fondamentale conoscere il materiale coinvolto. *Amanti et al. (1996)* distinguono le rocce dai detriti e dalle terre: gli ultimi due, a differenza delle prime, sono costituiti da granuli non legati tra loro. In particolare, le particelle dei detriti sono caratterizzate da una dimensione maggiore di 2 mm, mentre quelle delle terre sono inferiori ai 2 mm.

Oltre alla precedente classificazione litotecnica, è utile differenziare i dissesti dovuti alla gravità (frane, deformazioni gravitative profonde di versante, movimenti lenti superficiali e altri fenomeni di dissesto, quali gli sprofondamenti) da quelli causati dal dilavamento (erosione per ruscellamento) e dalle valanghe.

La gravità provoca determinati spostamenti quando le forze agenti sul versante superano la resistenza dei materiali. Sostanzialmente, si può avere:

- un aumento delle tensioni tangenziali, causato da sismi, vibrazioni superficiali, modifiche geometriche del pendio date da scavi e/o dall'erosione al piede, etc.;
- una diminuzione della resistenza tagliente, come conseguenza dell'aumento delle pressioni interstiziali e/o dell'acclività del versante, della diminuzione dell'angolo di attrito e/o della coesione dei materiali coinvolti, etc.

Le frane, propriamente dette, si suddividono in (*Varnes, 1978*):

- crolli,
- ribaltamenti,
- scorrimenti rotazionali,
- scorrimenti traslativi,
- colamenti lenti,
- colate rapide di detrito (*debris flows*) e fango (*mud flows*),
- espansioni laterali,
- movimenti complessi.

Sono descritti i suddetti cinematismi nelle seguenti righe.

La rapida caduta libera, da pendii piuttosto acclivi, di materiale di qualsiasi dimensione e tipologia è comunemente chiamata *crollò*. Il distacco avviene solitamente in corrispondenza di superfici di discontinuità molto inclinate e la sua pericolosità è data dall'elevata energia cinetica raggiunta dai massi che si mobilitano.

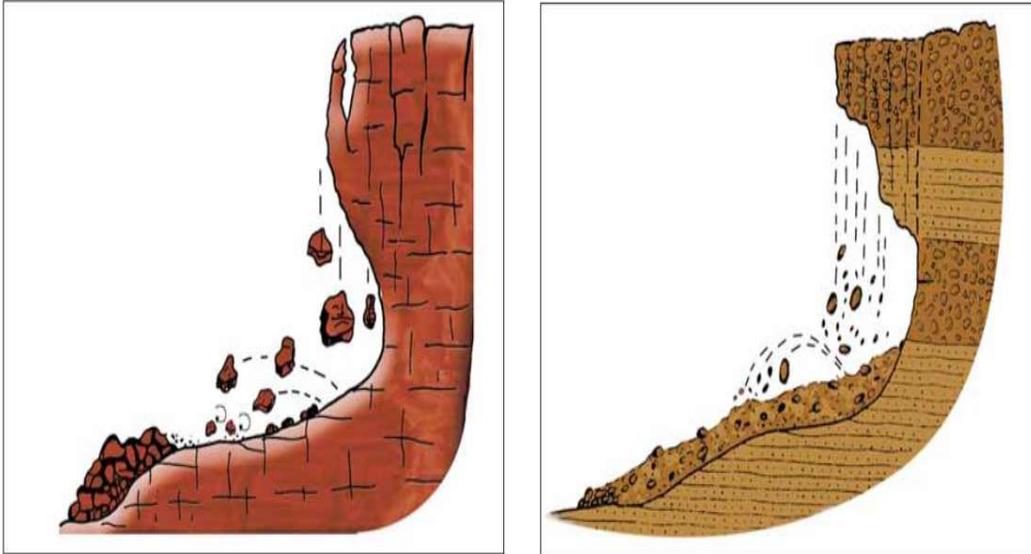


Figura 5. Modelli di crollo in ammassi rocciosi, a sinistra, e in depositi detritici, a destra (Silvestri et al., 2006).

Se il distacco, parziale o totale, avviene secondo una rotazione rigida, si parla di *ribaltamento*. Come nel caso precedente, questo fenomeno può interessare sia le rocce, sia i detriti, sia le terre. Tuttavia, la velocità con la quale esso evolve è estremamente variabile, da lenta a molto rapida (qualora il materiale coinvolto dovesse collassare secondo crolli).

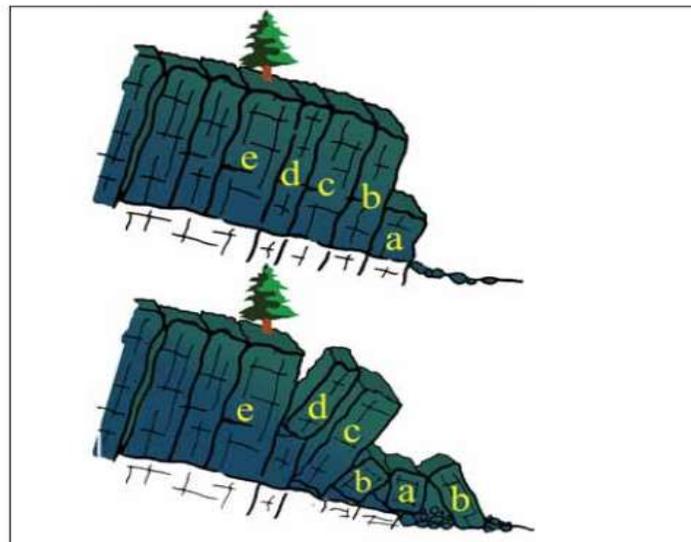


Figura 6. Modello di ribaltamento in ammassi rocciosi estremamente fratturati (Silvestri et al., 2006).

Durante gli *scorrimenti rotazionali*, la massa di roccia, detrito o terra si muove lungo una superficie di scivolamento avente concavità rivolta verso l'alto: tale massa si sovrappone al terreno presente a valle del versante, formando il cosiddetto "piede" della frana. In corrispondenza di quest'ultimo si possono poi verificare rigonfiamenti o avvallamenti.

Non è raro che questo tipo di cinematismo si verifichi in ammassi costituiti da una o più successioni di litotipi aventi diversa resistenza.

La velocità di scorrimento è molto variabile: solitamente è elevata nel caso di suoli caratterizzati da grani di piccole dimensioni.

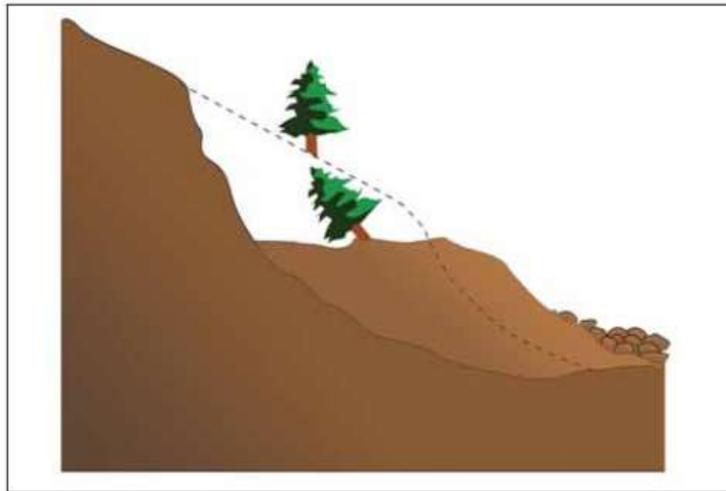


Figura 7. Modello schematico di uno scorrimento rotazionale (Silvestri et al., 2006).

Gli *scorrimenti traslazionali* si differenziano da quelli rotazionali principalmente per la forma della superficie di discontinuità, in questo caso non curva.

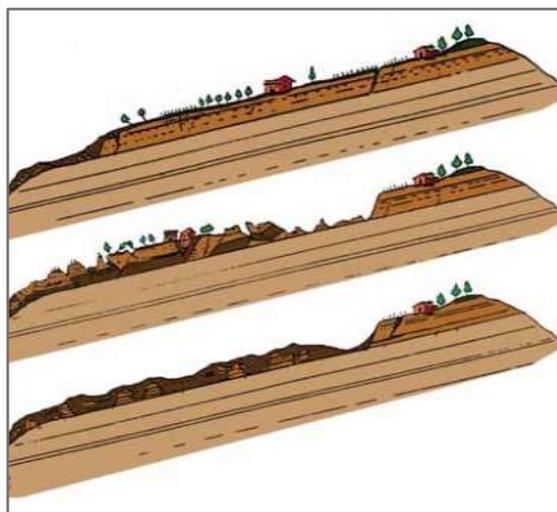


Figura 8. Evoluzione schematica di uno scorrimento traslazionale (Silvestri et al., 2006).

I *colamenti lenti* si contraddistinguono per importanti deformazioni plastiche, che avvengono in un ampio lasso temporale. Essi interessano maggiormente detriti e terre.

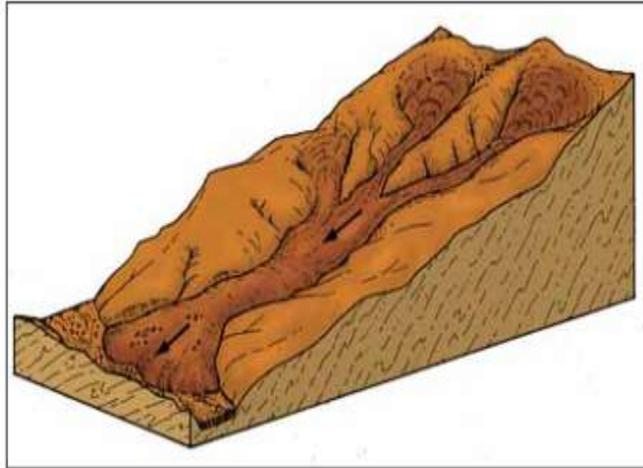


Figura 9. Modello schematico di un colamento lento (Silvestri et al., 2006).

L'apporto di grandi quantità di acqua fa sì che questi movimenti si trasformino da lenti a veloci: si parla allora di *debris flows* o *mud flows*, a seconda che siano mobilitati, rispettivamente, detriti o fango.

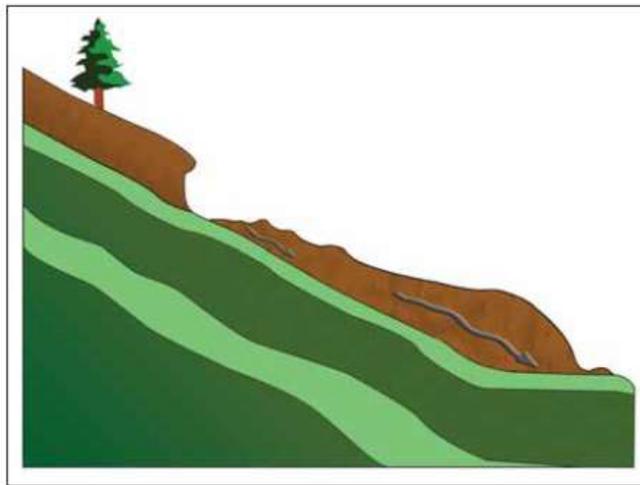


Figura 10. Modello schematico di una colata rapida (Silvestri et al., 2006).

Nel caso di ammassi rocciosi fratturati poggianti su terreni a comportamento plastico, come le argille, si verificano *espansioni laterali*: le pressioni generate dal litotipo superiore, infatti, generano importanti deformazioni nel terreno sottostante. Di conseguenza, il primo si suddivide in blocchi di dimensione variabile, i quali scorrono verso valle secondo un movimento prevalentemente orizzontale (Figura 11).

La velocità è lenta se questa tipologia di fenomeno non culmina in crolli e/o ribaltamenti.

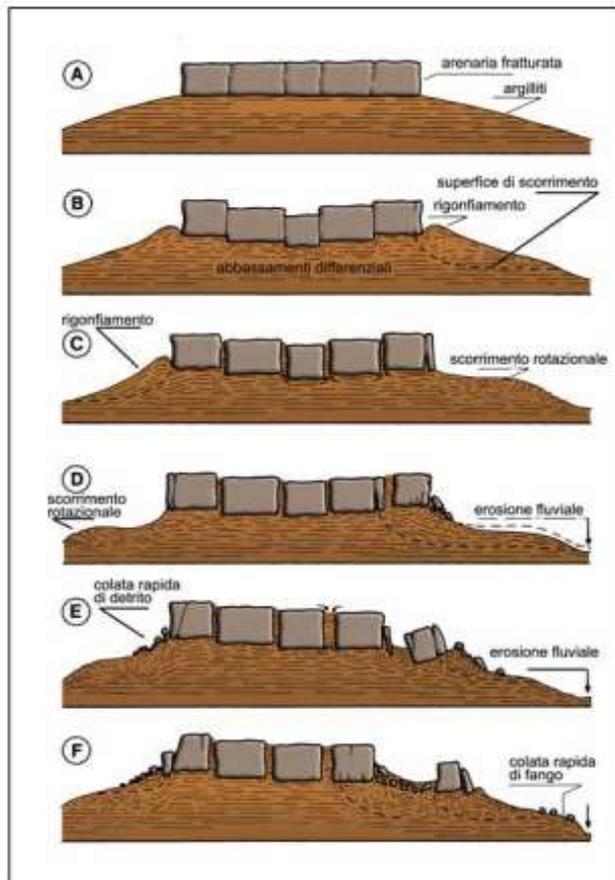


Figura 11. Evoluzione schematica di un'espansione laterale (Silvestri et al., 2006).

Quando i crolli interessano grandi volumi di roccia caratterizzati da forze coesive ridotte, si giunge a fenomeni di tipo “valanga”, facenti parte dei cosiddetti *movimenti complessi*. Essi derivano dalla combinazione di due o più tipologie cinematiche precedentemente affrontate, le quali si verificano in successione temporale.

Silvestri et al. (2006), componenti dell'APAT, hanno anche parzialmente modificato i differenti stati di attività dei dissesti, individuati da Amanti et al. nel 1996.

Quelli ancora in movimento sono definiti “attivi”; “sospesi” se momentaneamente non attivi; “riattivati” se da inattivi tornano ad essere attivi. Gli “inattivi” sono anche detti “stabilizzati” (naturalmente o, se protetti da interventi stabilizzanti, artificialmente). Tra i dissesti inattivi ci sono i cosiddetti “relitti”, ossia fenomeni sviluppatasi in condizioni diverse da quelle attuali. Se permangono le cause del movimento, essi sono chiamati “quiescenti” o “dormienti”.

Nella Tabella 1 è riassunta la suddetta classificazione, rappresentata in modo esplicito in Figura 12.

ATTIVO (<i>active</i>): fenomeno attualmente in movimento o comunque che si è mosso l'ultima volta entro l'ultimo ciclo stagionale.	ATTIVO s.s.: fenomeno attualmente in movimento. SOSPESO (<i>suspended</i>): fenomeno che si è mosso entro l'ultimo ciclo stagionale ma che non si muove attualmente. RIATTIVATO (<i>reactivated</i>): fenomeno di nuovo attivo dopo essere stato inattivo.
QUIESCENTE (<i>dormant</i>): fenomeno che può essere riattivato dalle sue cause originali (ossia per il quale permangono le cause del movimento).	
INATTIVO O STABILIZZATO (<i>stabilized</i>): fenomeno che non può essere riattivato dalle sue cause originali.	NATURALMENTE STABILIZZATO (<i>abandoned</i>): fenomeno che non è più influenzato dalle sue cause originali (per il quale le cause del movimento sono state naturalmente rimosse). ARTIFICIALMENTE STABILIZZATO (<i>artificially stabilized</i>): fenomeno che è stato protetto dalle sue cause originali da misure di stabilizzazione. RELITTO (<i>relict</i>): fenomeno che si è sviluppato in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse dalle attuali.

Tabella 1. Stati di attività dei dissesti (Silvestri et al., 2006).

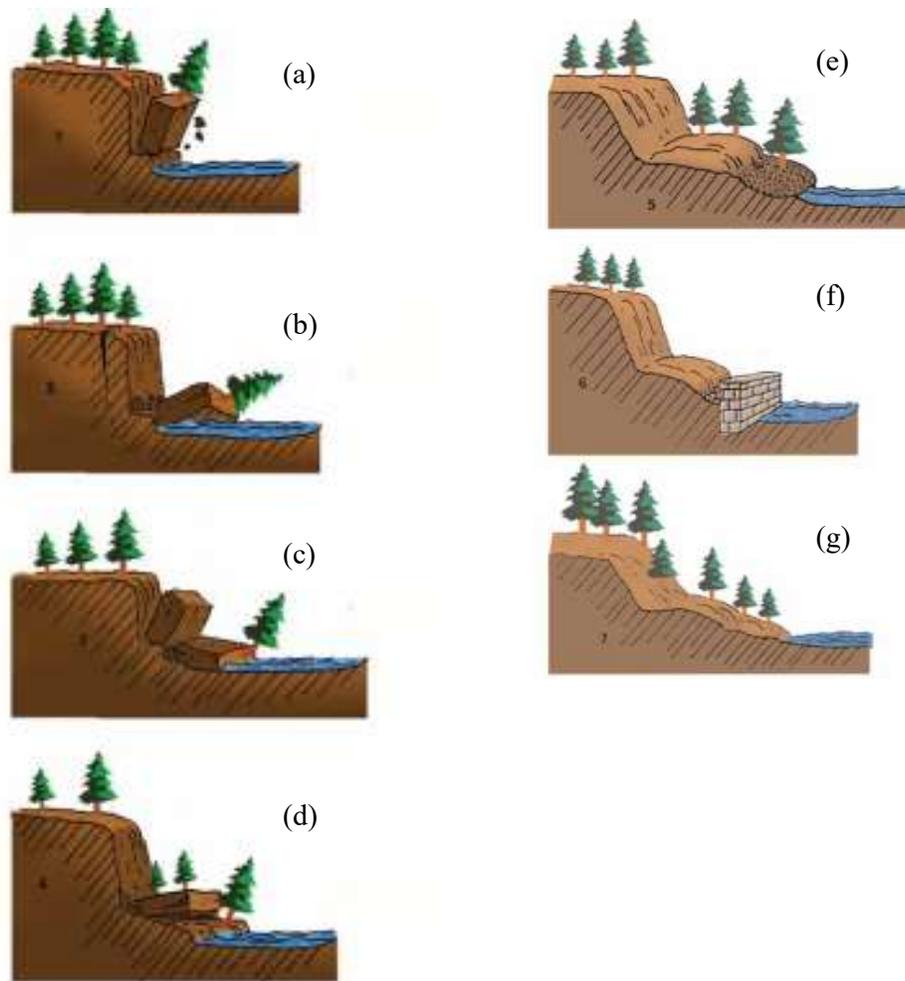


Figura 12. Esplicazione grafica dei diversi tipi di attività (Silvestri et al., 2006): dissesto attivo (a), dissesto sospeso (b), dissesto riattivato (c), dissesto quiescente (d), dissesto naturalmente stabilizzato (e), dissesto artificialmente stabilizzato (f), dissesto relitto (g).

2.1. Meccanismi cinematici tipici delle rocce

Il comportamento delle rocce, a differenza di quello delle terre, è prevalentemente controllato dalle superfici di discontinuità presenti. I cedimenti avvengono principalmente lungo tali piani, cioè sono fortemente direzionali (*Conti et al.*), e si verificano secondo una o più delle seguenti modalità:

1. scivolamento planare (o “scorrimento traslativo”);
2. scivolamento a cuneo (o “scivolamento 3D”);
3. ribaltamento.

Il primo e il terzo meccanismo sono stati precedentemente descritti. Per quanto riguarda il secondo, nel momento in cui due superfici di debolezza giungono ad intersecarsi, si ha la formazione di un cuneo roccioso che può scivolare.

Nei successivi sottoparagrafi, verrà mostrata l’analisi cinematica in proiezione stereografica dei pendii in roccia, ossia lo studio del movimento dei corpi considerando soltanto l’orientazione delle famiglie di discontinuità rispetto all’inclinazione del pendio.

Gli elementi presi in considerazione sono:

- la giacitura del pendio;
- la giacitura delle diverse superfici di discontinuità che compaiono nell’ammasso;
- la giacitura della linea di intersezione, rappresentante l’intersezione di due piani di discontinuità, qualora presenti;
- l’angolo di attrito superficiale (φ).

La *giacitura* (Figura 13) rappresenta l’orientazione nello spazio di una data superficie o di una retta. Essa è esaustivamente caratterizzata da:

- direzione (*strike*), definita dall’angolo, variabile tra 0° e 360° , che una linea orizzontale posta sul piano forma con la direzione del Nord;
- inclinazione (*dip*, ψ), ossia l’angolo, compreso tra 0° e 90° , che il piano inclinato forma con quello orizzontale;
- immersione (*dip direction*, α), cioè la direzione verso cui la superficie immerge, misurata lungo la linea di massima pendenza del piano. Tale angolo è variabile tra 0° e 360° .

Gli ultimi due angoli sono sufficienti a definire una certa giacitura, rilevabile mediante una semplice bussola.

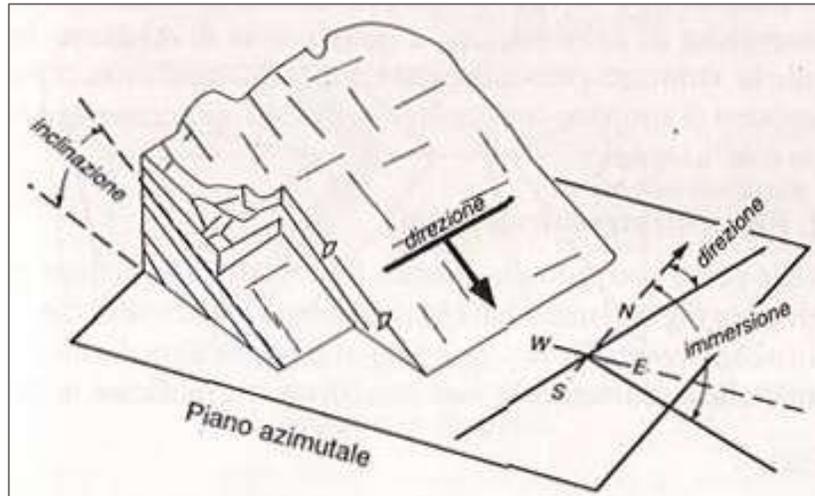


Figura 13. Schema della giacitura di un pendio (Elmi et al., 1996).

In particolare, sarà utilizzata la seguente nomenclatura:

- ψ_D e α_D per indicare, rispettivamente, l'inclinazione del sistema di discontinuità e la sua immersione;
- ψ_F e α_F per indicare, rispettivamente, l'inclinazione del fronte del pendio e la sua immersione;
- ψ_i e α_i per indicare, rispettivamente, l'inclinazione della linea di intersezione e la sua immersione.

2.1.1. Scivolamento planare

Per avere scivolamento planare (Figura 14), è necessario che almeno un sistema di discontinuità dell'ammasso roccioso abbia un'immersione simile ($\pm 20^\circ$) a quella del pendio e un'inclinazione minore. Quest'ultima deve, inoltre, essere maggiore dell'angolo di attrito superficiale tra il blocco che scivola e la superficie di scorrimento.

Riassumendo, deve valere:

$$\begin{cases} \alpha_D = \alpha_F \pm 20^\circ \\ \psi_D < \psi_F \\ \psi_D > \varphi \end{cases}$$

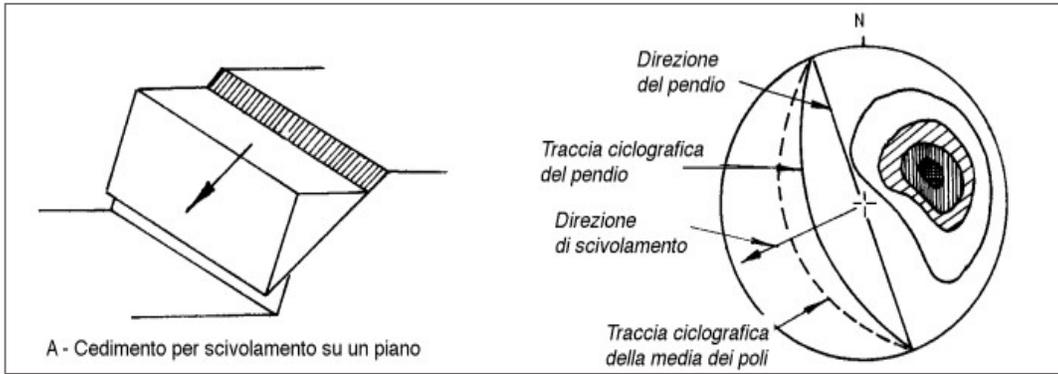


Figura 14. Schema di un cedimento per scivolamento planare e relativa proiezione stereografica (Conti et al.).

2.1.2. Scivolamento a cuneo

Affinché si abbia scivolamento tridimensionale (Figura 15), è necessario che la linea di intersezione di due famiglie di discontinuità abbia un'immersione simile ($\pm 20^\circ$) a quella del pendio e un'inclinazione minore. Quest'ultima deve anche essere maggiore dell'angolo di attrito tra il cuneo che scivola e le due superfici che lo delimitano. Se le due superfici hanno coefficienti di attrito molto diversi tra loro, deve essere presa in considerazione la media dei due coefficienti (Conti et al.).

Riassumendo, si deve avere:

$$\begin{cases} \alpha_i = \alpha_F \pm 20^\circ \\ \psi_i < \psi_F \\ \psi_i > \varphi \end{cases}$$

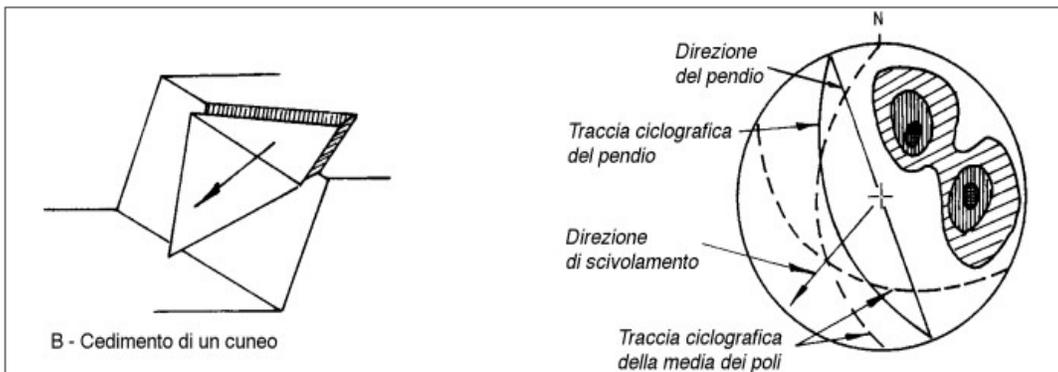


Figura 15. Schema di un cedimento per scivolamento a cuneo e relativa proiezione stereografica (Conti et al.).

2.1.3. Ribaltamento

Per avere ribaltamento di lastre di rocce (Figura 16), è necessario che le discontinuità presenti siano planari, parallele tra loro, subparallele al fronte e caratterizzate da un'immersione opposta a quella del versante (*a reggipoggio*).

Riassumendo, deve valere:

$$\begin{cases} \alpha_D = (\alpha_F \pm 180^\circ) \pm 20 \\ (90^\circ - \psi_D) + \varphi < \psi_F \end{cases}$$

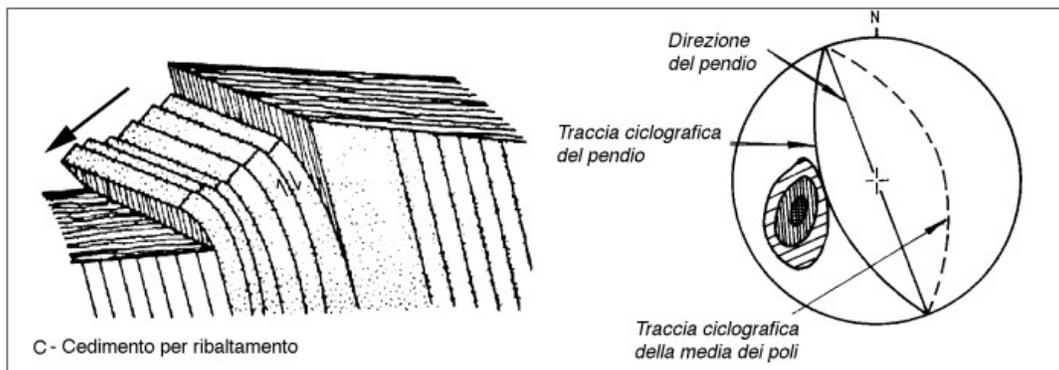


Figura 16. Schema di un cedimento per ribaltamento flessionale e relativa proiezione stereografica (Conti et al.).

Se è presente, inoltre, una famiglia di discontinuità ortogonale alla prima (*a franapoggio*), essa andrà a formare la superficie basale del ribaltamento. Anziché di elementi colonnari, si avrà la rotazione e l'eventuale distacco di blocchi (Figura 17).

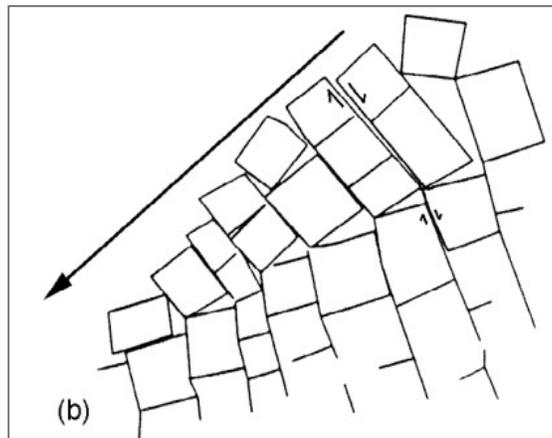


Figura 17. Schema di un cedimento per ribaltamento a blocchi (Conti et al.).

3. Cause dell'instabilità costiera

Secondo *Silvestri et al. (2006)*, i fattori che determinano le varie tipologie di dissesto possono essere distinti in “predisponenti” e “innescanti”. Nella prima categoria rientrano tutte quelle cause circa costanti nel tempo, come:

- la geomorfologia del versante, in particolare la presenza di discontinuità preesistenti litologiche e/o strutturali, la sovrapposizione di rocce a comportamento rigido e di altre a comportamento prevalentemente plastico;
- l'uso del suolo;
- le attività antropiche.

Nella seconda compaiono, invece, gli impulsi esterni che alterano l'equilibrio naturale del pendio, ad esempio:

- gli eventi meteorici intensi;
- le infiltrazioni d'acqua, che possono portare ad un incremento delle pressioni interstiziali e alla diminuzione della coesione interna del materiale;
- lo scalzamento al piede dei versanti, provocato dall'azione erosiva del moto ondoso o della corrente di un corso d'acqua;
- l'ampliamento delle fessure, dovuto ai cicli di gelo-disgelo, alle variazioni di temperatura dell'ambiente esterno e all'inoltrarsi delle radici della vegetazione, qualora presente, in profondità;
- i terremoti;
- le vibrazioni artificiali, causate dal traffico veicolare, dai lavori stradali, etc.;
- le modifiche apportate alla geometria del versante e/o il relativo appesantimento;
- gli innalzamenti della superficie piezometrica;
- le rotture delle reti idriche.

In generale, le cause di innesco sono tutte quelle, naturali o artificiali, che determinano un improvviso incremento degli sforzi di taglio oppure un decremento della resistenza lungo i piani di discontinuità.

Come già accennato nel Capitolo 1, l'instabilità delle falesie è strettamente legata all'intensità dell'erosione a cui esse sono sottoposte.

Due forze sono profondamente coinvolte in questo processo: quella d'urto delle onde, di compressione durante l'impatto e di trazione durante il loro allontanamento, e la resistenza delle rocce. L'erosione si verifica quando la prima forza supera la seconda.

Il carico ciclico delle onde, inoltre, genera l'iniziazione e la propagazione delle fessure nell'ammasso roccioso, portando alla riduzione della sua resistenza. Il processo, chiamato

"affaticamento", agevola il distacco di blocchi più o meno imponenti. È anche da considerare l'eventuale presenza di sedimenti clastici antistanti le falesie: essi fanno sì che l'erosione sia più feroce, poiché le onde acquisiscono il loro potere abrasivo. Oltre all'abrasione meccanica appena descritta, non è da trascurare quella chimica, causata dai sali marini che deteriorano il materiale cementante presente tra i minerali della scogliera.

Per quanto riguarda la forza resistente, è noto che essa dipende strettamente dalla litologia (tipo di roccia) e dalla struttura (discontinuità come giunti di stratificazione, piani di faglia, piani di scistosità, superfici di contatto tra differenti materiali) dell'ammasso.

FATTORI DELLA FRANOSITÀ		
LITOLOGICI	<ul style="list-style-type: none"> • composizione • struttura • tessitura 	<ul style="list-style-type: none"> • stato di alterazione • caratteristiche geomeccaniche delle rocce e dei terreni
MORFOLOGICI	<ul style="list-style-type: none"> • orografia • morfometria dei versanti 	<ul style="list-style-type: none"> • assetto del reticolo idrico
STRUTTURALI E TETTONICI	<ul style="list-style-type: none"> • stratificazione • scistosità • fratturazione • fessurazione 	<ul style="list-style-type: none"> • evoluzione geodinamica • regime tettonico attuale • sismicità
METEOCLIMATICI	<ul style="list-style-type: none"> • regime termo-pluviometrico • tipologia e distribuzione delle precipitazioni 	<ul style="list-style-type: none"> • frequenza e intensità degli eventi estremi
IDROGEOLOGICI	<ul style="list-style-type: none"> • idrografia • sorgenti • bilancio idrogeologico 	<ul style="list-style-type: none"> • caratteristiche della circolazione idrica superficiale • caratteristiche della circolazione idrica sotterranea
USO DEL SUOLO	<ul style="list-style-type: none"> • classi di uso del suolo (superfici artificiali, superfici agricole utilizzate, territori boscati e ambienti seminaturali, zone umide, corpi idrici) 	
ANTROPICI	<ul style="list-style-type: none"> • realizzazione di nuovi insediamenti • presenza o realizzazione di vie di comunicazione • uso agricolo improprio • errata gestione dei boschi, disboscamenti • ostruzioni di impluvi naturali • eccessivo riempimento di bacini di ritenuta idrica • impermeabilizzazioni • modifiche all'assetto morfologico, quali sbancamenti, scavi, trincee, terrazzamenti, ecc. 	<ul style="list-style-type: none"> • indiscriminati appesantimenti dei versanti • eccessivo pascolamento • attività estrattive • inadeguata o errata destinazione d'uso del suolo • mancate o inadeguate attività di sistemazione e manutenzione dei corsi d'acqua e dei versanti • rottura di reti idriche • vibrazioni artificiali • infrastrutture di servizio

Tabella 2. Schema riepilogativo dei principali fattori che concorrono a predisporre e innescare i fenomeni gravitativi sul territorio italiano (Silvestri et al., 2006).

4. Progettazione delle opere costiere

Il contesto costiero è altamente dinamico, a causa dei processi di interazione tra l'ambiente terrestre e quello marino.

Una determinata spiaggia è in equilibrio se la posizione della battigia si mantiene circa costante nel tempo, ossia se gli apporti di materiali sono simili agli allontanamenti; si dice, invece, instabile se prevale la tendenza erosiva o di accrescimento dei sedimenti.

L'arretramento, inoltre, può essere reversibile o irreversibile: nel primo caso è associato alle mareggiate stagionali, nel secondo agli squilibri nel bilancio sedimentario.

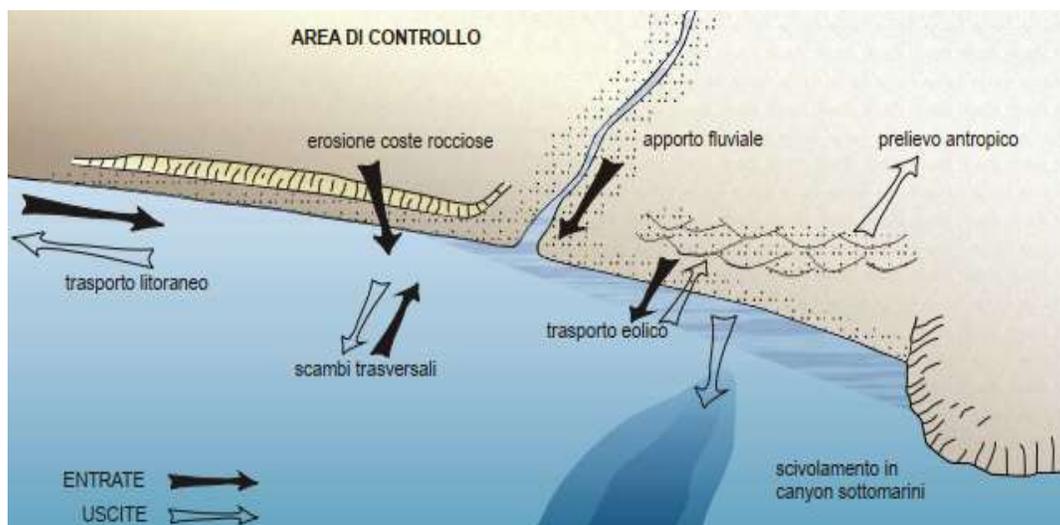


Figura 18. Schema apporti-asporti dei sedimenti in ambito costiero (Ligato et al., 2007).

È opportuno sottolineare quanto sia importante, prima di intervenire, caratterizzare i materiali a livello geotecnico e le costruzioni dal punto di vista strutturale. In mancanza di rilievi e prove di laboratorio, si presenta il rischio di maggiorazione del costo finale dell'opera, oltre a quello di peggiorare le condizioni esistenti prima dell'intervento antropico.

La progettazione delle opere si articola, dunque, nelle seguenti fasi:

- studi propedeutici;
- indagini preliminari;
- modellazione matematica (descrizione dei fenomeni tramite equazioni) e fisica (riproduzione di laboratorio dei processi in scala ridotta);
- scelta della tipologia di intervento (in base alla finalità, all'urgenza e all'importanza della marea) e stima dei costi di realizzazione, monitoraggio e manutenzione.

Si deve, innanzitutto, prevedere l'evoluzione futura della spiaggia: a tale scopo è indispensabile raccogliere dati, relativi ad un abbondante numero di anni, riguardanti:

- il regime dei venti, che agiscono come *propulsori delle onde*, oltre ad erodere le parti emerse;
- il regime del moto ondoso, ricavabile dalla RON (“Rete Ondametrica Nazionale”) e dalla RMN (“Rete Mareografica Nazionale”);
- il livello marino;
- gli apporti fluviali di sedimenti;
- la variazione storica della linea di riva, deducibile dal confronto di fotografie aeree e rilievi cartografici eseguiti in tempi diversi.

I suddetti parametri riguardano gli studi propedeutici. Se si parla invece di indagini preliminari, ci si riferisce ai *rilievi in affioramenti*, per il censimento delle discontinuità dell'ammasso, e ai *rilievi batimetrici*, durante i quali si provvede a prelevare una serie di campioni dalla spiaggia, in modo da determinare in laboratorio la distribuzione granulometrica dei sedimenti.

4.1. Tipologie di intervento

Gli interventi da effettuare si possono suddividere in due categorie:

- interventi immediati, finalizzati a preservare *nell'immediato* la vita umana, come per esempio l'evacuazione degli edifici a rischio crollo, l'emissione di ordinanze in merito a divieti di balneazione, etc.;
- interventi di recupero dell'area, vale a dire l'installazione di ancoraggi, la posa in opera di reti in aderenza, barriere paramassi e dreni suborizzontali, l'applicazione superficiale di boiaccia di cemento e sabbia di roccia locale (per evitare l'infiltrazione di acqua e rallentare l'azione disgregante delle radici delle specie vegetali presenti), etc.

Un'ulteriore distinzione riguarda la natura delle strutture di difesa di una costa: esistono quelle naturali e le artificiali. Tra le prime compaiono le dune e le spiagge sabbiose/ciottolose al piede o antistanti la falesia, mentre tra le opere artificiali si annoverano i muri di sponda, le barriere aderenti, le barriere trasversali (o “pennelli”), le barriere parallele alla linea di riva (o “frangiflutti”), i ripascimenti e le opere portuali.

Nei seguenti sottoparagrafi, ognuno degli interventi sopracitati verrà descritto singolarmente.

4.1.1. Ancoraggio

Gli ancoraggi con chiodi, bulloni e tiranti sono ampiamente usati per stabilizzare e/o rinforzare pendii, scarpate rocciose, etc.: è necessario che essi attraversino il volume di materiale instabile, fino ad intercettare la roccia sana.

I chiodi sono ancoraggi passivi: l'elemento strutturale non viene pretensionato e si rende efficace solo dopo che si sono verificati degli spostamenti, seppur lievi, della roccia. Sono iniettati per l'intera loro lunghezza: il fissaggio del chiodo all'interno del foro è garantita dalla sola forza attrattiva. In fase d'esercizio sono sollecitati prevalentemente a taglio.

I bulloni e i tiranti sono, invece, ancoraggi attivi: alla barra è fornita una certa tensione al momento della sua installazione, che la rende capace di operare in trazione e di trasmettere forze resistenti all'ammasso.

Il bullone è ancorato al foro per un certo tratto della sua lunghezza, mentre l'estremità opposta è fissata alla superficie esterna della scarpata mediante una piastra di ripartizione e un dispositivo di bloccaggio ("dado"), che ne consente il pretensionamento.

Il fissaggio del bullone alla massa stabile può avvenire tramite conchiglia di espansione (ancoraggio meccanico) o cementazione della porzione terminale della barra, a formare il cosiddetto "bulbo". Il bulbo di ancoraggio deve essere esteso abbastanza da evitare lo

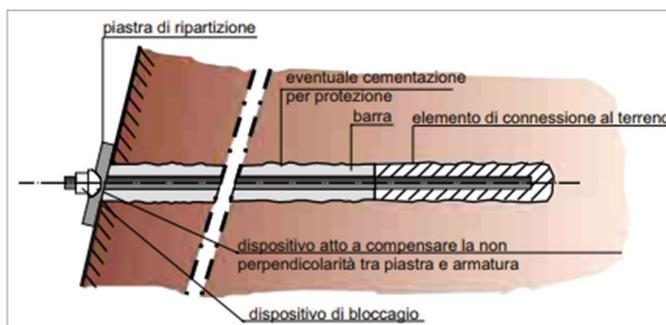


Figura 19. Esempio di ancoraggio attivo con cementazione del bulbo (Ligato et al., 2002).

sfilamento dell'armatura dalla malta cementizia e della fondazione dal terreno. Il pretensionamento della barra dovrà essere effettuato dopo l'avvenuta presa del cemento.

Un ancoraggio può essere, inoltre, di tipo puntuale (ancoraggio meccanico) o ripartito (chimico o tramite cementazione): il secondo è preferibile in ammassi molto fratturati.

Come i bulloni, anche i tiranti sono formati da una "testa", costituita da una piastra di ripartizione ed un sistema di bloccaggio, da una "parte libera" pretensionabile e da una "fondazione" ancorata al substrato rigido. La differenza fondamentale tra i due tipi di ancoraggio attivo è la lunghezza: i bulloni non superano i 10 m di lunghezza, mentre i tiranti sì. I secondi sono quindi in grado di sopportare e trasmettere tensioni superiori e, di conseguenza, sono più adatti a rendere stabili massi di grosse dimensioni.

4.1.2. Rete paramassi

Le reti paramassi, come tutte le opere di difesa attiva, impediscono o quantomeno riducono la caduta e il rotolamento dei massi rocciosi.

Si tratta di strutture a comportamento elastico, utilizzate per rivestire le pareti rocciose soggette a fenomeni di crollo con dimensioni massime degli elementi di 60-100 cm circa. Le reti più comuni sono composte da fili in acciaio zincato, distribuiti in modo tale da formare maglie esagonali. Qualora necessario, è possibile armarle tramite funi in acciaio verticali ed oblique.

Trovandosi a diretto contatto con la parete rocciosa da stabilizzare, prima del posizionamento della rete si deve pulire la zona ed eventualmente rimodellarla. Si provvede, poi, a fissare l'opera di difesa all'ammasso mediante un sistema di ancoraggi, che può essere costituito da chiodi, bulloni o tiranti, a seconda delle esigenze.

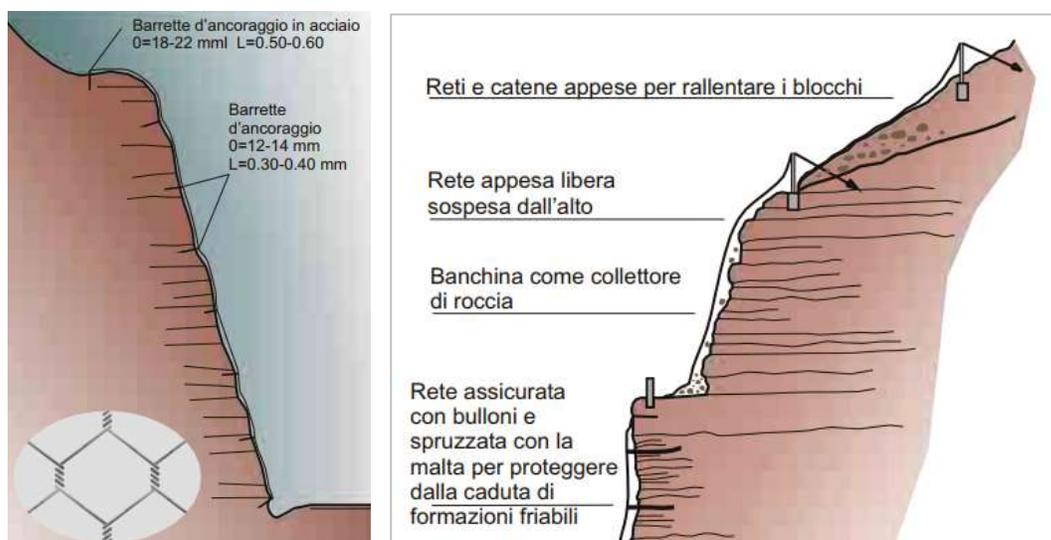


Figura 20. Schema costruttivo di una rete paramassi (Ligato et al., 2002).

4.1.3. Calcestruzzo proiettato

Il calcestruzzo proiettato, conosciuto anche *spritz beton* o *shotcrete*, è utilizzato per rivestire le pareti rocciose instabili, con lo scopo di consolidarle. Spesso è accoppiato ad altri interventi, quali chiodi, bulloni, tiranti e reti paramassi.

Una miscela di acqua, cemento e inerti è spruzzata ad alta pressione sulla superficie del pendio da mettere in sicurezza, penetrando nelle fratture e sigillandole. Talvolta vi si aggiungono micro-silice e fibre di acciaio: la prima migliora la qualità del rivestimento perché riduce il rimbalzo del calcestruzzo proiettato, mentre le seconde incrementano la resistenza.



Figura 21. Esempio di calcestruzzo proiettato su parete rocciosa. Immagine tratta da: <https://www.saiebologna.it>

Si sottolinea che questo tipo di intervento, seppur efficace, è piuttosto impattante visivamente: il primo aspetto che si può notare è il cambio di colore della porzione di ammasso su cui esso è applicato. Soprattutto nel contesto delle falesie è quindi da applicare solo se strettamente necessario, in quanto la loro bellezza naturale è assolutamente da preservare.

4.1.4. Opera di drenaggio

I fenomeni erosivi riguardanti le falesie sono aggravati da un'incorretta regimazione delle acque provenienti dai centri urbani a monte, che spesso vengono smaltite mediante tubi i cui scoli finiscono sulle falesie stesse. Un possibile intervento attivo è quello che modifica la circolazione idrica superficiale (tramite l'intercettazione delle acque correnti non incanalate e/o stagnanti) e sotterranea (per esempio mediante dreni suborizzontali), con lo scopo di diminuire le pressioni interstiziali e conseguentemente le spinte che esse causano. Si valutano gli effetti del sistema installato tramite piezometri: le letture periodiche di questi strumenti consentono di ottimizzare il funzionamento della struttura drenante.

Le canalette superficiali sono una delle opere di drenaggio più utilizzate per allontanare le acque meteoriche. A seconda del materiale utilizzato per costruirle, si possono avere canalette prefabbricate in calcestruzzo, in lamiera d'acciaio, etc.

Tra le opere drenanti profonde, invece, quelle più usate per stabilizzare le falesie sono i dreni suborizzontali, tubi generalmente in PVC, microfessurati e rivestiti con geotessili per evitare l'intasamento operato dal materiale fine. Sono inseriti in fori leggermente inclinati verso l'alto e possono raggiungere profondità massime di 50-60 m. Essendo installati al di sotto del piano campagna, hanno un impatto paesaggistico ridotto.

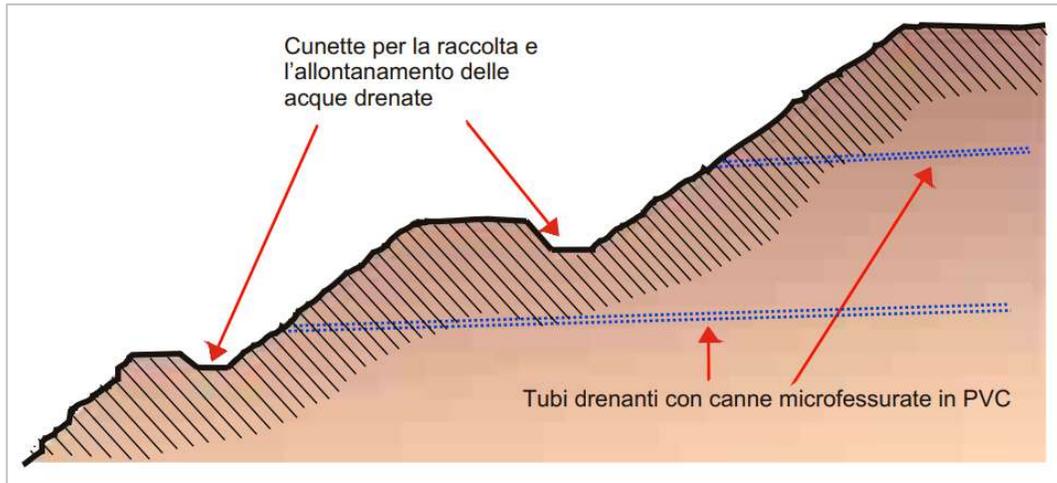


Figura 22. Sistema di drenaggio profondo realizzato mediante dreni suborizzontali (Ligato et al., 2002).

4.1.5. Disgaggio

Il disgaggio consiste nella rimozione controllata di blocchi di roccia a rischio crollo: si tratta di un'operazione piuttosto delicata, per tale motivo effettuata da personale altamente specializzato di rocciatori e alpinisti, e soltanto dopo vari calcoli analitici e simulazioni numeriche della traiettoria di caduta del masso. Queste ultime evitano di mettere a rischio persone, infrastrutture viarie e costruzioni circostanti di altro genere.

Esistono diversi tipi di disgaggio:

- manuale, per eliminare dalla superficie della parete rocciosa blocchi di piccole dimensioni in condizioni di stabilità precaria, mediante l'uso di palanchini e picchi (Figura 23);



Figura 23. Esempio di disgaggio manuale con picco. Immagine tratta da: <https://worktrade.ch>

- tramite malte espansive che, iniettate nelle fratture delimitanti il blocco pericolante, creano dopo circa un'ora dalla loro applicazione delle lesioni profonde abbastanza da permettere l'allontanamento della parte instabile;
- azionando, tramite una pompa manuale, martinetti idraulici ad alta pressione, installati nelle aperture presenti per ottenere il progressivo distacco della massa da abbattere;
- mediante l'uso di esplosivo, usato quando le porzioni rocciose instabili sono di grandi dimensioni.



Figura 24. Esempio di disgaggio tramite esplosivo. Immagine tratta da: <https://www.esplosivi.it>

4.1.6. Barriera paramassi

A differenza delle precedenti soluzioni elencate, le barriere paramassi rientrano nella categoria degli interventi passivi: non impediscono il distacco dei blocchi rocciosi, bensì agiscono arrestandone o rallentandone il movimento.

Si distinguono le barriere rigide da quelle elastiche (dette “a rete”): le prime sono realizzate in calcestruzzo armato, mentre per le seconde si usano strutture altamente deformabili. La leggerezza e la rapidità sia di installazione che di manutenzione di queste ultime barriere, fanno sì che sia possibile installarle anche in zone non facilmente accessibili, come le impervie falesie della costa italiana. Per tale ragione, il presente sottoparagrafo è dedicato principalmente alla descrizione delle barriere paramassi a rete.

Le sue componenti principali sono:

- la struttura di intercettazione, costituita da una rete metallica ad anelli;
- la struttura di sostegno, formata da travi o tubi metallici (“montanti”) con la funzione di sorreggere la rete, direttamente o tramite la struttura di connessione;
- la struttura di connessione, composta da funi longitudinali e controventi metallici, che trasmettono le forze agenti alla struttura di fondazione, ed eventualmente da dissipatori di energia;

- la struttura di fondazione, data per esempio da chiodature o plinti in calcestruzzo ancorati al suolo mediante bulloni o micropali, con lo scopo di trasferire al terreno le azioni che i blocchi impattanti esercitano sulla rete.



Figura 25. Componenti di una barriera paramassi a rete (Corso di Meccanica delle Rocce, 2019).

I produttori di barriere forniscono i seguenti parametri per la scelta ottimale dell'opera di difesa in questione:

- l'energia che la barriera può assorbire;
- la massima elongazione della rete metallica e la sua altezza residua dopo l'impatto del blocco;
- i massimi carichi sopportabili dagli elementi strutturali, ossia dalle strutture di sostegno, connessione e fondazione.

La progettazione è effettuata sulla base di indagini geotecniche dell'area e della simulazione computerizzata del processo di caduta, rimbalzo e rotolamento massi. È possibile ricavare, per esempio, l'energia cinetica posseduta dal masso di progetto e trasformarla in lavoro di deformazione della barriera, parametro importante per il dimensionamento della stessa.

Tuttavia, ci sono casi in cui non è possibile posizionare barriere paramassi, per esempio quando le pareti rocciose sono piuttosto ripide o addirittura subverticali. A quel punto, personale altamente qualificato, composto da rocciatori ed alpinisti, riveste l'ammasso mediante reti metalliche, in modo da impedire il distacco dei blocchi o quantomeno guidarne la caduta, evitando pericolosi rimbalzi.

4.1.7. Muro di sponda

I muri di sponda sono formati da una parete a mare, che può essere curva, verticale o a gradoni: essi rallentano l'azione erosiva del moto ondoso e, contemporaneamente, sostengono il terreno a monte.

A seconda del tipo di materiale utilizzato per la loro costruzione, si distinguono:

- muri in calcestruzzo;
- muri in terra rinforzata;
- muri in gabbioni.

Il loro posizionamento può provocare, localmente e lentamente, l'approfondimento del fondale marino: le onde tendono infatti a rimuovere il materiale presente al piede della parete artificiale, con anche il rischio che il muro diventi instabile, dunque non più resistente. Si previene tale situazione ponendo alla base del muro rivolta verso mare del pietrame, di dimensione tale da non poter essere eroso. Opere di

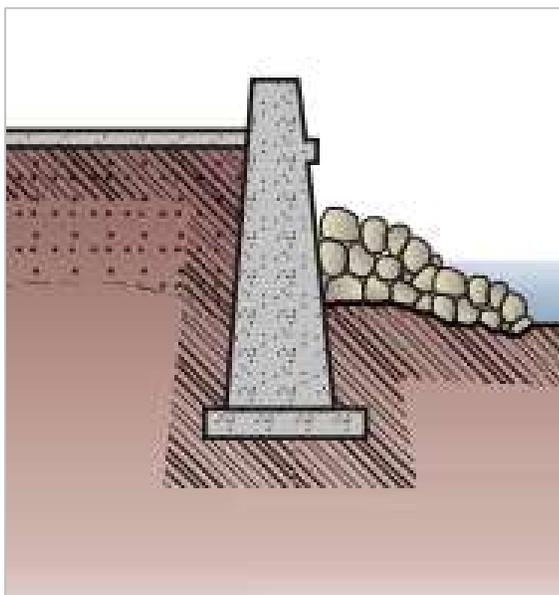


Figura 26. Schema di un muro di sponda (Ligato et al., 2007).

questo tipo sono particolarmente consigliate qualora si debba proteggere arterie stradali e ferroviarie, messe a rischio dall'arretramento costiero.

4.1.8. Barriera aderente

Le barriere aderenti (o “radenti”), a differenza dei muri di sponda che hanno anche una funzione di sostegno, vengono installate con l'unico scopo di proteggere la linea di riva. Si tratta di opere di tipo flessibile, al contrario dei muri sostanzialmente rigidi, nel senso che i movimenti dei massi che le compongono sono consentiti.



Figura 27. Esempio di barriera aderente (Ligato et al., 2007).

4.1.9. Pennello

I pennelli sono strutture trasversali, rigide o deformabili, realizzate con massi naturali o artificiali, utilizzando legno, ferro o calcestruzzo. Sono installati con lo scopo di intercettare le correnti marine e, di conseguenza, contrastare i processi erosivi in atto. Il materiale trasportato dalle onde tende poi a depositarsi a tergo di queste opere, inducendo un avanzamento della battigia. Tale accumulo (o “tombolo”), realizzando un ampliamento della spiaggia, consente alla stessa di rafforzare la propria capacità dissipativa nei confronti dell’energia ondosa. Esso è accompagnato da un’erosione sottoflutto, che può essere ridotta effettuando un progressivo accorciamento dei pannelli che formano l’opera di difesa (Figura 29).



Figura 28. Esempio di pennello (Ligato et al., 2007).



Figura 29. Opera di difesa presso Arenzano (GE), costituita dalla successione di tre pennelli (Ligato et al., 2007).

I pennelli possono essere impermeabili o permeabili, a seconda dei materiali costituenti. I primi si comportano analogamente alle barriere, non permettendo il passaggio né dell’acqua né della sabbia, mentre i secondi ammettono il passaggio dei sedimenti e dunque un accrescimento della spiaggia più regolare, con andamento meno “dentellato”.

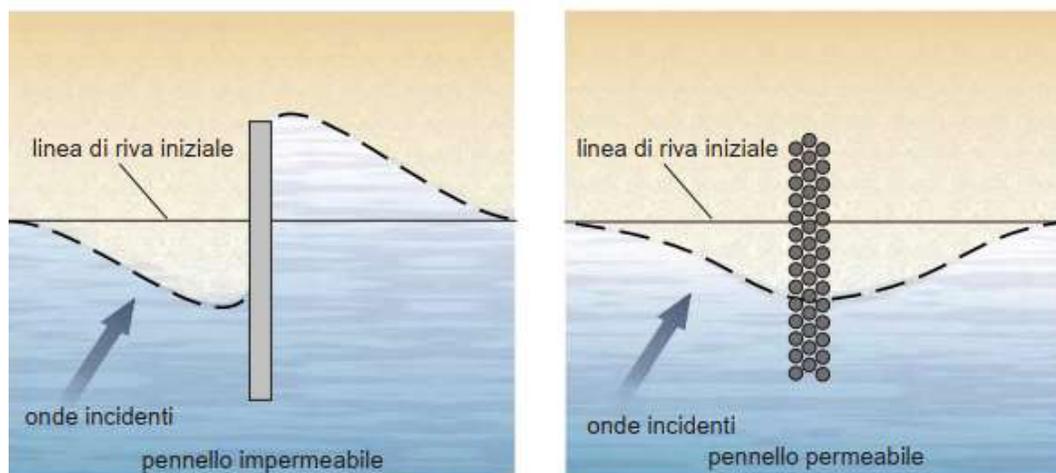


Figura 30. Confronto tra l’installazione di un pennello impermeabile e di un altro permeabile (Ligato et al., 2007).

Soprattutto due fattori sono da considerare nel caso di pennelli permeabili:

- una permeabilità eccessiva rende l'opera di protezione inefficace;
- il grado di permeabilità può essere alterato da alghe e materiali vari trasportati dalle correnti, che possono intasare i vuoti presenti nei pennelli.

4.1.10. Barriera frangiflutti

Le barriere frangiflutti, emergenti o sommerse, sono strutture poste ad una certa distanza dalla spiaggia, con lo scopo di proteggere quest'ultima dall'azione diretta del moto ondoso. Gruppi di lunghezza modesta di blocchi sono separati da varchi che consentono il ricambio delle acque e l'ingresso dei sedimenti, oltre l'accesso alla riva a natanti di piccole dimensioni. Anche in questo caso è possibile che si formino cuspidi di materiale o "tomboli" a tergo delle strutture: il profilo della battigia assume, quindi, un aspetto meno naturale ma più stabile nei confronti del moto ondoso.

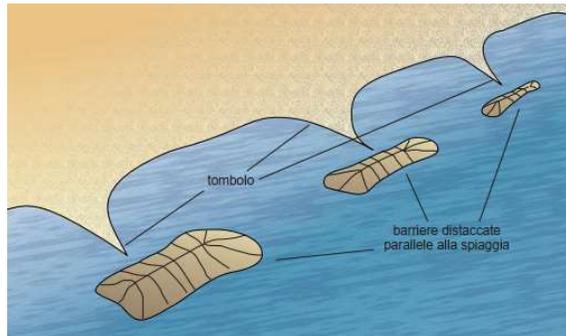


Figura 31. Schema dei tomboli che si possono formare a tergo delle barriere frangiflutti (Ligato et al., 2007).

Il materiale più utilizzato per costruirle è il pietrame: un nucleo in tout-venant (misto di cava), poggiante su una fondazione stabile, è protetto da uno strato esterno di massi naturali o blocchi in calcestruzzo, a seconda delle esigenze e della disponibilità.

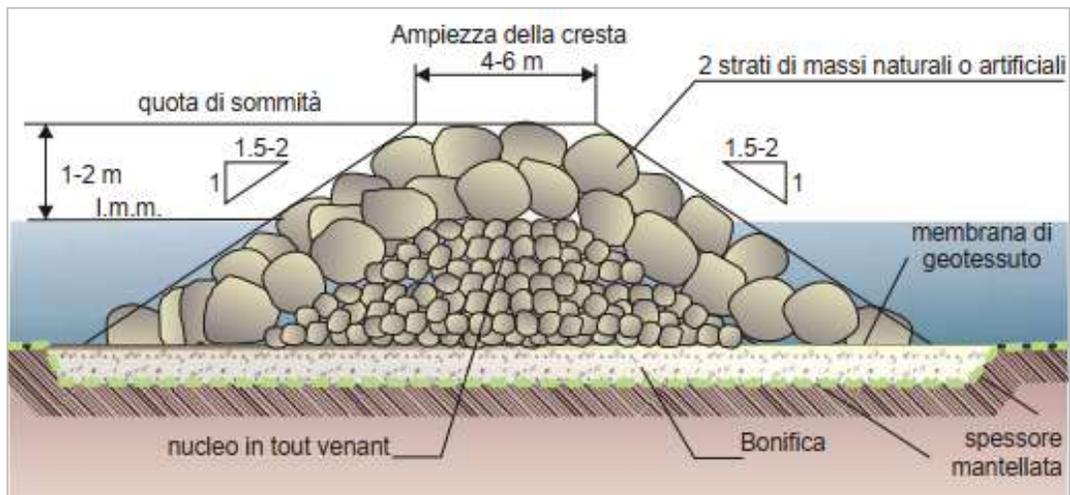


Figura 32. Schema di una barriera frangiflutti (Ligato et al., 2007).

È conveniente orientare le barriere nello stesso verso dei fronti d'onda dominanti, in modo da abbattere il più possibile l'energia distruttiva degli stessi.

Da esperienze pregresse si nota che le barriere sommerse o “soffolte” (con quota al di sotto del livello medio marino) hanno una minore capacità dissipativa rispetto a quelle emergenti, oltre alla minore capacità di trattenere i sedimenti e dunque formare tomboli. D'altro canto, consentono un maggior ricambio delle acque, pur non necessitando di varchi.



Figura 33. Sistema di barriere sommerse opportunamente segnalate (in secondo piano) ed emergenti (Ligato et al., 2007).

I frangiflutti presentano alcuni svantaggi, come la necessità di manutenzione periodica e un significativo impatto sul paesaggio e sull'ambiente, soprattutto per quanto riguarda le barriere emergenti. Queste ultime, infatti, possono creare problemi di intorbidimento e proliferazione algale nella zona compresa tra la barriera e la riva, qualora il ricambio delle acque sia insufficiente (Figura 35). Di conseguenza, il bagnasciuga diventa inutilizzabile dal punto di vista balneare, generando un'inevitabile perdita economica in quel settore.



Figura 34. Barriera frangiflutti al piede della falesia del Monte Conero (Marche), che permette una maggiore fruizione turistica dell'area e smorza l'effetto erosivo delle onde incidenti (Ligato et al., 2007).

Un intervento ecosostenibile è quello realizzato nelle Marche (località di Numana e Portonovo): blocchi alveolari in calcestruzzo ospitano la fauna e la flora autoctone, riducendo il disturbo che le opere di difesa causano alla natura marina.

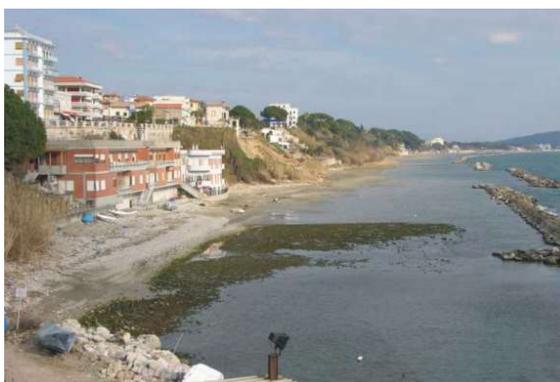


Figura 35. Esempio di proliferazione della flora algale a tergo di un sistema di barriere emergenti (Ligato et al., 2007).

4.1.11. Ripascimento

Poiché la spiaggia costituisce una delle strutture di difesa della costa, è opportuno:

- stabilizzarla, se si trova in fase di erosione;
- ampliarla, se c'è bisogno che eserciti una maggiore dissipazione dell'energia ondata;
- realizzarne una nuova.

Ciò è attuabile tramite i ripascimenti, ossia versamenti sulla battigia di idoneo materiale estratto da cava: le caratteristiche dei sedimenti di prestito devono essere simili a quelle dei sedimenti originari, ottenute dall'analisi granulometrica effettuata su un numero adatto di campioni prelevati dalla spiaggia.

L'operazione è effettuata in un'unica volta oppure periodicamente, con quantità definite in base al deficit sedimentario del tratto costiero su cui si interviene.

L'aumento della torbidità delle acque, soprattutto quando è presente nel materiale di riporto un'elevata percentuale di fango, è inevitabile ma accettabile, in quanto temporaneo.

Se lungo una data fascia di litorale il trasporto di sedimenti è consistente, il ripascimento è efficace solo se abbinato ad altre opere, quali pennelli, barriere frangiflutti, etc.



Figura 36. Attività di ripascimento della spiaggia dei Maronti, isola di Ischia (Ligato et al., 2007).

4.1.12. Opera portuale

I porti sono strutture che nascono con l'idea di fornire un riparo sicuro alle imbarcazioni: tuttavia, possono avere funzione di protezione anche nei confronti dei litorali, come spiegato nel seguito.

Si distinguono i porti naturali da quelli artificiali. Per quanto concerne i primi, viene sfruttata la propensione morfologica di determinate aree a fungere da ormeggi, senza che esse vengano modificate in maniera rilevante: è il caso di insenature, piccoli golfi, cale e baie. Si procede alla sola costruzione di opere di completamento, quali moli e dighe foranee approssimativamente parallele alla costa. I porti artificiali si differenziano da quelli naturali per la totale artificialità della loro struttura: tra questi, la tipologia *a bacino* è molto diffusa in Italia. Ne è un esempio il porto di Arenzano (Figura 38): si tratta di un bacino difeso da due moli collegati alla linea di riva, uno sopraflutto e l'altro sottoflutto. Il primo protegge il litorale dalle onde dominanti, mentre il secondo contrasta quelle secondarie. Un altro tipo di porto artificiale è quello con moli convergenti (Figura 39): questi ultimi ne delimitano l'imboccatura e, soprattutto, attenuano efficacemente le correnti marine. Sono particolarmente consigliabili qualora si dovessero individuare, durante le indagini preliminari, due direzioni prevalenti del moto ondoso.



Figura 37. Ventotene (LT): combinazione di un porto naturale, scavato nel tufo, e di un porto artificiale, visibile sullo sfondo (Ligato et al., 2007).



Figura 38. Arenzano (GE): esempio di porto a bacino (Ligato et al., 2007).



Figura 39. Esempio di porto con moli convergenti (Ligato et al., 2007).

4.2. Misure legali

In Italia, la gestione della costa è affidata alle Regioni, che promulgano leggi ed elaborano piani e programmi in tale ambito; la pianificazione dell'uso del territorio è demandata alle autorità locali, che spesso sono dotate di limitate risorse finanziarie per il monitoraggio e gli interventi di ripristino. Talvolta, esse hanno a disposizione poco o nessun personale con una profonda conoscenza delle complesse interazioni aventi luogo in prossimità dei litorali. Sarebbe opportuno promuovere, in tal senso, una maggiore partecipazione pubblica nei processi di politica costiera, il cui primo step dovrebbe essere la creazione della consapevolezza della vulnerabilità e dei rischi legati ad una cattiva gestione della costa.

Tra i compiti dello Stato, esercitati direttamente dal Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare o affidati ad organismi tecnici ad essi facenti capo, rimane quello di divulgare criteri generali per la difesa dei litorali. L'ISPRA ("Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale"), l'ICRAM ("Istituto Centrale per la Ricerca Scientifica e Tecnologica applicata al Mare") e l'ENEA ("Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile") sono solo alcuni degli istituti incaricati dal governo.

A livello europeo, esiste la cosiddetta "Gestione integrata della fascia costiera" (ICZM – *Integrated Coastal Zone Management*), programma degli inizi degli anni duemila a cui l'Italia ha aderito. Tale approccio tiene conto, tramite delle linee guida, di tutti gli aspetti più importanti correlati alla gestione della fascia costiera, tra cui quelli ambientale, urbanistico, culturale, storico, economico e politico. In molti casi, gli interventi in prossimità della costa non sono inseriti in una strategia a lungo termine: essi vengono effettuati solo dopo che si è verificato un evento calamitoso. La visione integrata dei processi nasce proprio con lo scopo di prevenire i disastri o, quantomeno, di attenuarne l'impatto.

5. Analisi dell'instabilità costiera italiana

Per ogni regione italiana caratterizzata da coste alte rocciose sono esposti, di seguito, i principali meccanismi di instabilità delle falesie. Come già accennato, è stata condotta un'ampia ricerca per poter risalire ai cinematismi che hanno interessato tali ammassi rocciosi nel corso degli anni. È stata anche consultata la banca dati del progetto IFFI (“Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia”), redatto dall'ISPRA e dalle Regioni e Province autonome italiane.

5.1. Liguria

Procedendo da Ovest verso Est, è stato possibile individuare le seguenti falesie instabili:

- 1) Ventimiglia (Imperia): Balzi Rossi;
- 2) Località Valloria (Savona);
- 3) Arenzano (Genova): località Pizzo;
- 4) Golfo Paradiso (Genova): Bogliasco (Chiesa della Natività), Pieve Ligure (frazione di San Gaetano), Sori (cimitero, condominio “La Scogliera”), Camogli (cimitero, Corso Mazzini, frazione di San Rocco);
- 5) Corniglia (La Spezia).

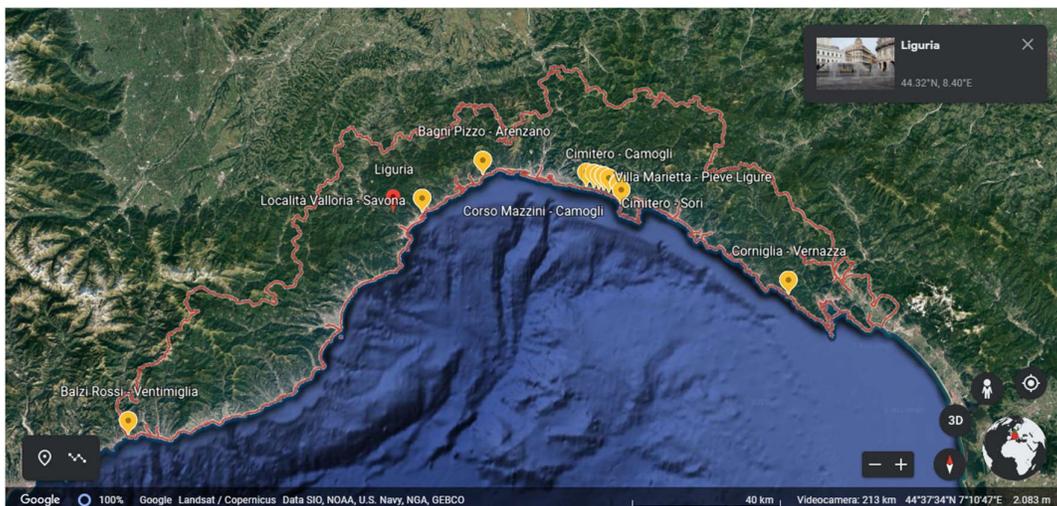


Figura 40. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Liguria (Google Earth).

1) In Riviera di Ponente, in particolare nel comune di Ventimiglia, è situato uno dei complessi preistorici più importanti d'Europa. Si tratta dei Balzi Rossi, il cui nome deriva dal colore rossastro dell'omonima falesia, alta circa 100 m e formata da calcari ricchi di minerali ferrosi. Alla base delle imponenti pareti rocciose si trovano diverse caverne, costeggiate da una linea ferroviaria e da muri di contenimento a protezione della stessa. Ai piedi di tale falesia morta, in attività quiescente secondo il progetto IFFI, si segnala la presenza di un'ampia falda detritica, alimentata nel corso dei millenni da crolli e ribaltamenti diffusi.



Figura 41. Falesia "Balzi Rossi", comune di Ventimiglia (Imperia). Immagine tratta da: <https://www.balzirossi.it>

2) La falesia morta latitante l'Ospedale San Paolo di Savona e separata dal mare dai cantieri navali ex Mondomarine di Lungomare Matteotti, nel 2012 è stata protagonista di lavori di messa in sicurezza, data la precaria stabilità che tuttora la contraddistingue. In questa zona sono presenti muri di contenimento di altezza compresa tra i 4 m e i 6 m.



Figura 42. Falesia in località Valloria, Savona. Immagine tratta da: <https://www.savonanews.it>

Il cinematismo prevalente è il crollo di cunei rocciosi, che ha reso necessario il rivestimento di quasi tutta la falesia tramite una rete paramassi esagonale a doppia torsione, armata mediante funi perimetrali. Recentemente, alcuni distacchi hanno causato importanti stress al sistema di protezione (Figura 43), permettendo a frammenti di roccia di raggiungere la sottostante sede stradale. Fenomeni di dilavamento e infiltrazione non sono rari, a causa di una cattiva regimazione delle acque a monte del versante. Sono stati installati, per questo motivo, dreni suborizzontali.



Figura 43. Sperone roccioso, in località Valloria (Savona), con rete paramassi non in aderenza. Immagine tratta da: <http://www.sggconsult.it>

3) Nel 2016, una falesia del comune di Arenzano fu protagonista di una frana di grosse dimensioni. Una massa rocciosa, staccatasi da circa 40 m di altezza in località Pizzo, ferì due persone che si trovavano sul lungomare e distrusse diverse auto transanti sulla sottostante Via Aurelia (SS 1). Secondo l'IFFI, tutta quella zona è, ancora oggi, suscettibile a crolli e ribaltamenti.



Figura 44. Frana nel comune di Arenzano (GE). Immagine tratta da: <https://www.comune.arenzano.ge.it>

4) L'intero Golfo Paradiso, comprendente i comuni di Genova, Bogliasco, Pieve Ligure, Sori, Recco e Camogli, è composto da calcari marnosi, marne, calcareniti, arenarie e argilliti. Questa formazione ha subito deformazioni sia duttili che fragili, che hanno determinato frequenti variazioni di giacitura degli strati: è possibile trovarli a reggipoggio, a franapoggio, verticali, perpendicolari o paralleli alla linea di costa, orizzontali (Lucchetti *et al.*, 2014). Le falesie, prevalentemente attive, raggiungono in alcuni tratti i 50 m di altezza e sono piuttosto pendenti, anche subverticali. Le numerose discontinuità presenti fanno sì che l'erosione da parte del moto ondoso sia selettiva. Il rischio è elevato a causa della forte urbanizzazione: si notano molteplici edifici e infrastrutture viarie di notevole importanza, come la SS1 e la linea ferroviaria Genova-La Spezia, sostenute da muri di oltre 30 m di altezza a strapiombo sul mare.

Le falesie di questa zona sono soggette a frane rapide dovute a crolli di blocchi e/o scivolamenti. Di seguito, sono riportati alcuni esempi.

A Bogliasco, il tratto di litorale di Via Bettolo è da tempo soggetto a fenomeni di erosione della spiaggia e dissesto delle pareti rocciose. Ad essere in pericolo è sicuramente la Chiesa della Natività sovrastante la falesia.



Figura 45. Falesia nel comune di Bogliasco (GE). Foto di Emanuela Leveratto.

Nella frazione San Gaetano del comune di Pieve Ligure si rileva una grande frana: la sua parte superiore è inattiva, mentre la porzione al piede, che raggiunge la sommità della falesia presente, è attiva. Numerosi interventi difendono la costa, tra i quali scogliere in massi, contrafforti, reti paramassi e chiodature.



Figura 46. Falesia nella frazione San Gaetano, comune di Pieve Ligure (GE). Immagine tratta da: <https://www.genova24.it>

A Sori, la parete rocciosa avente in sommità il condominio “La Scogliera” ha subito il distacco di una porzione della falesia, che ha causato la distruzione dei sovrastanti percorsi che garantivano l’accessibilità al mare. Anche il cimitero di Sori presenta un rischio frana elevato, come si nota dalla Figura 47.



Figura 47. Confronto temporale relativo all'evoluzione della falesia sottostante il cimitero di Sori (Lucchetti et al., 2014).

Il comune di Camogli merita una particolare descrizione, visto il recente tragico evento che l’ha coinvolto.



Figura 48. Confronto temporale relativo all'evoluzione della falesia sottostante il cimitero di Camogli (Lucchetti et al., 2014).

Già nel 1989 si verificò lo scivolamento di una grande porzione di roccia al di sotto di Corso Mazzini, che finì in mare. Gli edifici sovrastanti subirono un danno alle fondamenta e, per questo motivo, si intervenne tramite la chiodatura della parete restante. Successivamente, durante una delle forti mareggiate del 2008, scivolò un grosso cuneo roccioso posto al di sotto del cimitero di Camogli. L'ultimo fenomeno franoso risale al 2021: un costone dell'ammasso roccioso sottostante il cimitero ha improvvisamente ceduto, trascinando in mare centinaia di salme. Si cercherà di chiarire la combinazione delle cause dell'evento nel Capitolo 6 della presente tesi. Al momento, si fa solo notare che nei mesi precedenti al disastro avvenuto, essendo stati avvertiti diversi movimenti del terreno, erano iniziati alcuni lavori di consolidamento. Questi ultimi avevano interessato le porzioni di ammasso a destra e a sinistra della frana: si sarebbero dovuti concludere con la messa in sicurezza del cuneo centrale, poi franato.

Un'altra area costiera a rischio è quella compresa tra l'abitato di San Rocco, frazione del comune di Camogli, e la località San Nicolò. Secondo il progetto IFFI (Figura 49), si tratta di un settore caratterizzato da fenomeni di dissesto diffusi, come crolli e scivolamenti rotazionali, legati all'arretramento della falesia presente. In più, colamenti lenti interesserebbero coltri detritiche quiescenti in testa al versante, soprattutto in seguito ad eventi meteorologici particolarmente intensi. L'arretramento della costa mette a rischio diversi edifici, nonché la strada pedonale che da San Rocco porta a Camogli. È presente un intervento stabilizzante a monte della pedonale, costituito da una tripla fila di gabbioni e da muri di contenimento.

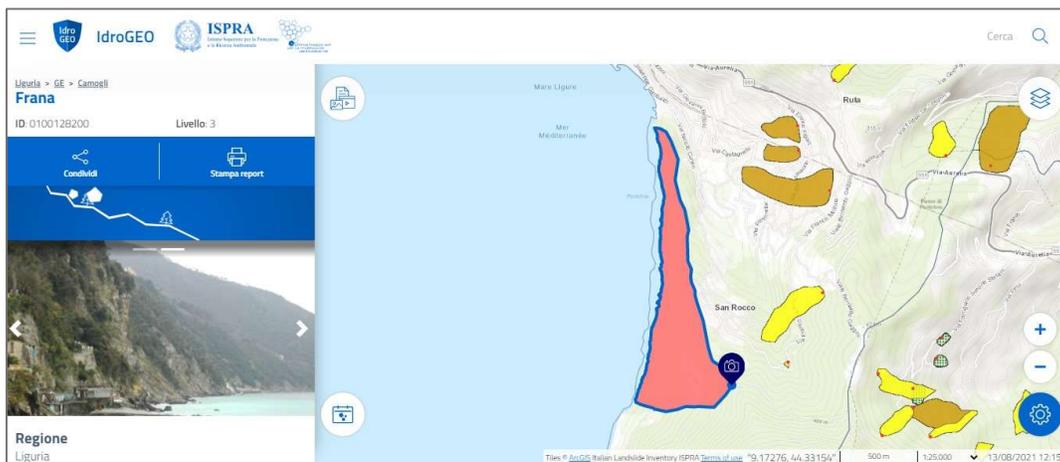


Figura 49. Dissesto presente nella frazione San Rocco del comune di Camogli (GE). Immagine tratta da: <https://idrogeo.isprambiente.it>

5) La falesia viva che sorregge l'insediamento di Corniglia, facente parte del comune di Vernazza, nel 2020 è stata oggetto di diversi sopralluoghi, i quali hanno portato allo stanziamento di circa 5 milioni di euro, che serviranno a prevenire eventuali crolli interessanti uno dei punti più critici del territorio. Si tratta dell'unica strada che collega

l'abitato alla stazione ferroviaria. Il posizionamento di micropali, molti dei quali installati già in passato lungo il tratto costiero che corre sotto le abitazioni, e di una diga soffolta è l'obiettivo principale dell'intervento. In particolare, una barriera soffolta, posizionata parallelamente al litorale, servirà a contrastare l'erosione a cui la falesia è soggetta, dissipando l'energia del moto ondoso.



Figura 50. Promontorio che sorregge l'abitato di Corniglia, comune di Vernazza (La Spezia). Immagine tratta da: <https://www.cinqueterrehike.com>

5.2. Toscana

Avanzando da Nord verso Sud, sono state evidenziate le seguenti falesie instabili:

- 1) Golfo di Baratti (Livorno): Buca delle Fate;
- 2) Isola d'Elba (Livorno): spiaggia di Sansone;
- 3) Promontorio dell'Argentario (Grosseto): Cala Grande, Capo d'Uomo, Punta Ciana e Punta Avoltore.

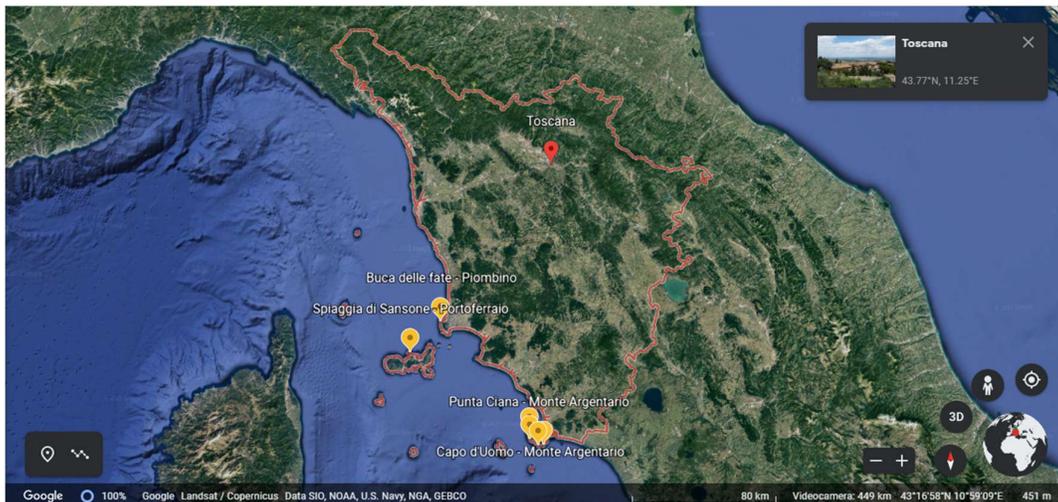


Figura 51. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Toscana (Google Earth).

1) All'estremità sud-orientale del Mar Ligure e a nord del comune di Piombino, si apre il Golfo di Baratti. Dal punto di vista geologico, questa zona è dominata da arenarie calcaree o calcareo-argillose, e dalla panchina, una roccia sedimentaria tipica degli ambienti marini. Sul litorale piombinese, sono 16 i tratti di mare nei quali è vietata la balneazione a cause dell'alta pericolosità idrogeologica. Uno di questi luoghi è il lato nord di Buca delle Fate, protagonista durante l'estate scorsa di un crollo di una parte di falesia avvenuto ai danni di alcuni bagnanti che sostavano nella baia.



Figura 52. Falesia presente nella baia di Buca delle Fate, comune di Piombino (Livorno). Foto di Francesco Rotta.

2) Stesso destino era toccato, nel 2015, ad un turista transitante lungo la spiaggia di Sansone, all'isola d'Elba.

Un masso cadde dall'altezza di 7-8 m, da una delle alte falesie granitiche a strapiombo sul mare.



Figura 53. Spiaggia di Sansone, isola d'Elba. Immagine tratta da: <https://www.infoelba.it>

3) Nel sud della Toscana, verso la costa, dominano le formazioni calcaree ritrovabili in buona parte del promontorio del Monte Argentario. Anche in questo caso le falesie sono a picco sul mare: meritano attenzione quelle di Cala Grande, Punta Avoltore, Punta Ciana e Campo d'Uomo, considerati i frequenti fenomeni di crollo ed arretramento, favoriti dall'elevata fratturazione tettonica.

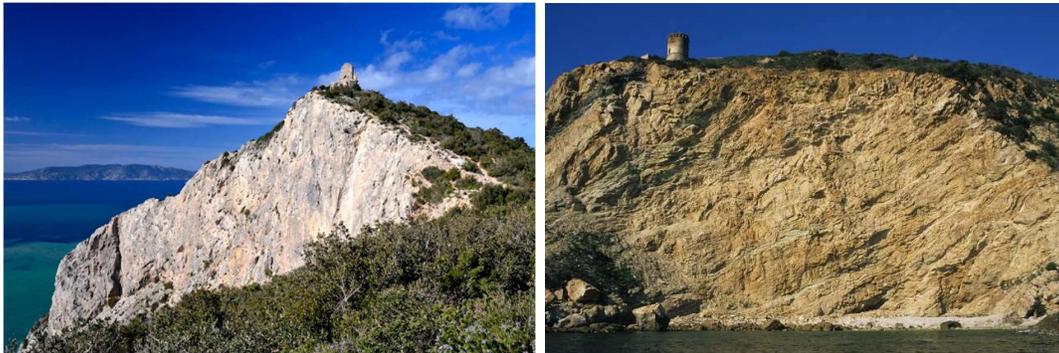


Figura 54. Due tratti costieri del Monte Argentario (Grosseto). A sinistra: falesia di Capo d'Uomo (immagine tratta da: <https://www.montinvisibili.it>); a destra: falesia di Punta Ciana (immagine tratta da: <https://www.monteargentario.info>).

5.3. Lazio

Procedendo da Nord verso Sud, è stato possibile individuare le seguenti falesie instabili:

- 1) Anzio (Roma): Tor Caldara, zona Ardeatina (in corrispondenza del “Grand Hotel Dei Cesari”), Villa Neroniana, Grotte di Nerone;
- 2) Nettuno (Roma): spiaggia dei Marinaretti;
- 3) San Felice Circeo (Latina): Torre Fico;
- 4) Sperlonga (Latina): promontorio di Punta Cetarola;
- 5) Gaeta (Latina): spiaggia dell’Arenauta, Montagna Spaccata (Parco Regionale di Monte Orlando);
- 6) Isola di Ponza (Latina): Cala Feola, Piscine Naturali, Chiaia di Luna;
- 7) Isola di Ventotene (Latina): località Moggio di Terra.



Figura 55. Distribuzione spaziale delle falesie instabili del Lazio (Google Earth).

1) Lungo tutta la costa di Anzio è in corso un processo di acuta erosione delle spiagge, che comporta un'intensificazione dell'erosione marina alla base delle falesie. La conseguenza principale è lo sviluppo di crolli e scivolamenti. Le dimensioni di queste frane non sono eccessive, viste le limitate altezze raggiunte dalle scogliere (da pochi metri a circa 20 m). Il problema è l'alta frequentazione turistica delle spiagge, così come la presenza sul ciglio delle falesie di resti archeologici (Figura 56) da preservare. Nel 2011, una parte delle fondamenta della Villa Imperiale di Anzio è stata trascinata in mare a seguito di un arretramento costiero.



Figura 56. Sito archeologico costiero di Anzio (Roma): a sinistra, vista dall'alto del complesso (immagine tratta da: <https://www.citta-insieme.it>); a destra, particolare delle Grotte di Nerone (foto di Gianluca Mulone).

Alla fine del 2020, l'ammasso costiero di Tor Caldara, sempre nei pressi della Villa Neroniana, ha subito il distacco di un intero costone di roccia.

In zona Ardeatina, nello stesso periodo, più di un crollo ha coinvolto uno stabilimento balneare e un fabbricato latitante, fortunatamente senza arrecare danni a persone. Le cause non sono state ancora accertate.



Figura 57. Dettaglio di una frana da crollo che ha coinvolto la falesia costiera di Tor Caldara, comune di Anzio (Roma). Immagine tratta da: <https://canaledieci.it>

2) Nel comune di Nettuno, la falesia in arenaria retrostante la spiaggia dei Marinaretti è soggetta da anni a diversi crolli; l'ultimo di cui si ha testimonianza è del 2018. Oltre a transennare l'area, non ci sono stati interventi atti ad arginare il problema. Anche in questo caso, i fenomeni erosivi sono accentuati da un'incorretta regimazione delle acque provenienti dai centri urbani a monte, che spesso vengono smaltite da tubi i cui scoli finiscono sulla falesia stessa.

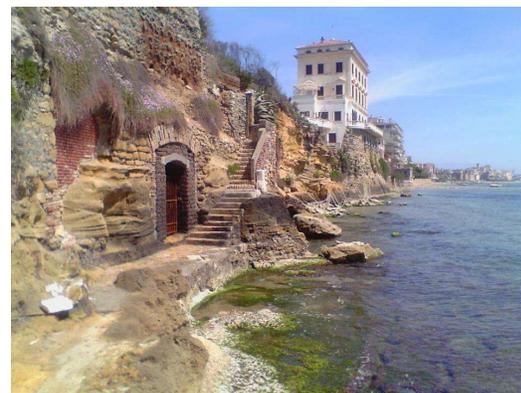


Figura 58. Condizioni antecedenti al crollo del 2018 della falesia dei Marinaretti, comune di Nettuno (Roma). Immagine tratta da: <https://www.studio93.it>

3) Il promontorio del Circeo è costituito da successioni di strati calcarei, che favoriscono la formazione e/o la modellazione di numerose grotte a pochi metri sul livello del mare.

Torre Fico è una delle antiche torri costiere del promontorio, situata su uno sperone roccioso a picco sul mare.

L'area è stata recentemente interdetta; anche la spiaggia libera a ponente del porto turistico non è più fruibile a causa dei frequenti crolli.



Figura 59. Falesia di Torre Fico, comune di San Felice Circeo (Latina). Immagine tratta da: <http://www.sanfelicecirceo.eu>

4) Punta Cetarola, appartenente al Parco Regionale della Riviera di Ulisse, è caratterizzata da falesie carbonatiche, perlopiù attive. Secondo i dati del progetto IFFI dell'ISPRA, in questa zona si verificano continui crolli e ribaltamenti diffusi. La fratturazione, l'orientazione sfavorevole delle discontinuità e l'azione marina determinano la scomposizione in blocchi dell'ammasso roccioso, causando frane con stato variabile da attivo a riattivato/sospeso.



Figura 60. Falesia di Punta Cetarola, comune di Sperlonga (Latina). Immagine tratta da: <https://www.paesionline.it>

5) Destano preoccupazione i massi che hanno raggiunto la strada regionale Flacca (SR 213) e la sottostante spiaggia gaetana dell'Arenauta, nonché le condizioni della Montagna Spaccata, modellata negli anni dalle acque meteoriche e dall'erosione marina. In tale contesto, un grosso masso di roccia in bilico sulla cappella di San Filippo Neri (Figura 61) venne lentamente portato a terra da una squadra di vigili del fuoco nel 2014.



Figura 61. Montagna Spaccata (a sinistra) e cappella di San Filippo Neri (a destra), comune di Gaeta (Latina). Immagini tratte da: <https://www.gazzettinodelgolfo.it>

6) Nel 2018, nonostante la presenza di alcune reti paramassi, diversi blocchi staccatisi dal costone in tufo di Chiaia di Luna (Ponza) hanno raggiunto il mare. Preventivamente, l'accesso a questo specchio d'acqua era stato interdetto, anche considerando gli incidenti avvenuti nel 2010.



Figura 62. Frana da crollo a Chiaia di Luna, comune di Ponza (Latina). Immagine tratta da: <https://roma.fanpage.it>

Altre falesie della stessa isola sono state sottoposte ad interventi di consolidamento. Si tratta di quelle in località Cala Feola e Piscine. Per migliorarne le condizioni di stabilità, si era pensato di procedere con il disaggio dei massi pericolanti, per poi realizzare un rafforzamento delle pareti mediante reti e funi in acciaio. In tal modo, tuttavia, non si sarebbe rallentata l'erosione eolica. Mancini et al. hanno così proposto nel 2018 l'adozione di una tecnologia



Figura 63. Falesie della baia di Cala Feola a Ponza (Latina). Immagine tratta da: <https://www.ponzaleforna.com>

basata sull'impregnazione dello strato roccioso superficiale tramite un prodotto biodegradabile costituito da una soluzione acquosa di nano-silicati, avente lo scopo di ostacolare il suddetto fenomeno erosivo. A reazione ultimata, infatti, si ottiene della silice amorfa, che rende la superficie delle falesie trattate più resistente e poco rigida, in modo tale che si possa adeguare ai movimenti causati dai cicli termici di dilatazione e contrazione della roccia. Sono stati esaminati anche altri sistemi di protezione superficiali, provenienti dall'ingegneria naturalistica: sono stati esclusi perché avrebbero comportato un'inevitabile variazione di colore del panorama.

Infine, per stabilizzare il piede del versante e trattenere eventuali crolli, è stata consigliata la posa in opera di gabbioni a monte delle spiagge, realizzati con il materiale rimosso dalla riprofilatura delle parti più pendenti della falesia al fine di ottimizzare i costi.

7) In località Moggio di terra, a Ventotene, un'impressionante frana è finita in mare nel 2020.

Dopo alcuni rilievi effettuati con l'ausilio di droni, si è constatato il reale pericolo di crolli nella zona: tempestivamente, sono state allontanate le barche ormeggiate sotto costa, affinché non subissero danni.

È da notare che tutta l'isola è un territorio fragile, a causa dei feroci prelievi di roccia avvenuti in passato.



Figura 64. Frana di Ventotene (Latina). Immagine tratta da: <https://www.fanpage.it>

5.4. Campania

Avanzando da Nord verso Sud, sono state evidenziate le seguenti falesie instabili:

- 1) Isole di Procida (Santa Margherita Nuova, spiaggia della Chiaiolella) e Ischia (Baia dei Maronti);
- 2) Penisola Sorrentina: Punta Gradelle e promontorio di Montechiaro (Vico Equense), Meta, Marina di Puolo (Sorrento), Punta Campanella (Massa Lubrense);
- 3) Isola di Capri (Marina di Caterola, Marina Piccola);
- 4) Alto Cilento (Salerno): promontorio di Agropoli, Montecorice (spiaggia delle Ripe Rosse);
- 5) Fascia costiera del Monte Bulgheria (Salerno): da Capo Palinuro (Arco Naturale o “Falesia della Molpa”, spiaggia del Buon Dormire) a San Giovanni a Piro (Punta Garagliano, Punta Spinosa, Grotta dell’Inferno, Vallone del Marcellino).

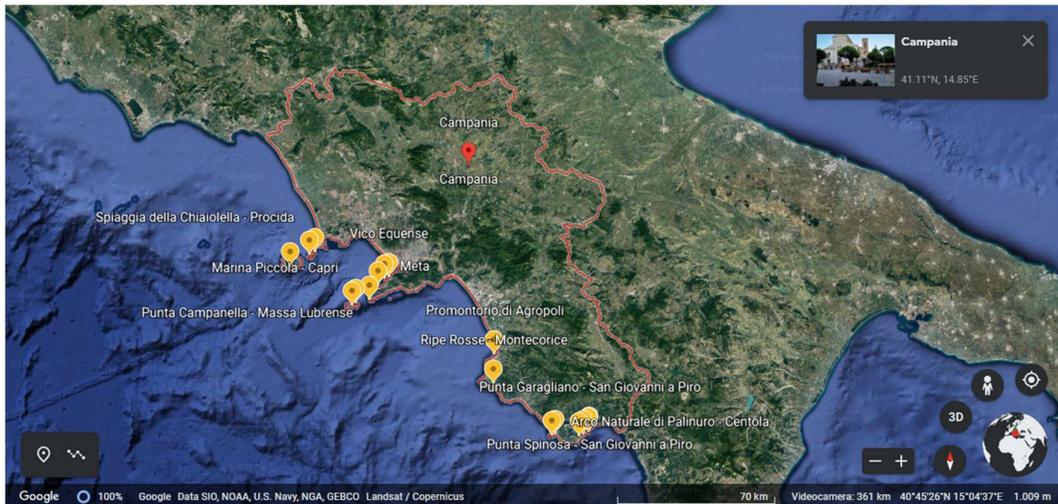


Figura 65. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Campania (Google Earth).

1) Nelle isole di Ischia e Procida si trovano falesie costituite prevalentemente da rocce vulcaniche autoctone o provenienti dalla zona dei Campi Flegrei. Nella prima isola si registra una pericolosità estrema per rischio idrogeologico soprattutto a sud, in corrispondenza della Baia dei Maronti, per la forte esposizione alle onde. Negli anni sono stati eseguiti diversi ripascimenti artificiali, consistenti nell'immissione sulle spiagge di specifiche quantità di sedimenti allo scopo di ricostruirne la parte erosa.



Figura 66. Baia dei Maronti, isola d'Ischia. Foto di Giorgio di Iorio.

A Procida la pericolosità è alta dappertutto, a causa degli scalzamenti al piede delle falesie tufacee. Nel 2017, per tale motivo, è stato presentato un progetto per il consolidamento sia del fronte est che sud dell'ex convento di Santa Margherita Nuova, in sommità di una delle coste alte procidane (Figura 67). In passato era stato costruito sull'estremità della cresta un contrafforte, oramai del tutto isolato a causa dell'erosione operata dal moto ondoso e, quindi, non più efficace da un punto di vista strutturale.



Figura 67. Falesia nel comune di Procida (NA), avente in sommità un ex convento. Immagine tratta da: <https://napoli.repubblica.it>

Nel 2008, nella stessa isola, una villa precipitò sulla spiaggia della Chiaiolella insieme a 500 m³ di costone roccioso (Figura 68): si trattava di una costruzione antecedente ai divieti di costruzione sui lungomari ad elevato rischio idrogeologico. Il crollo avvenne dopo un arretramento della falesia di circa 8 m, che sostanzialmente lasciò l'edificio "sospeso nel vuoto".



Figura 68. Edificio prima (a sinistra) e dopo (a destra) il crollo, spiaggia della Chiaiolella (isola di Procida). Immagine tratta da: <https://corriere.delmezzogiorno.corriere.it>

2) Falesie dolomitiche, calcareo-dolomitiche e calcaree affiorano in Penisola Sorrentina. Tra i comuni napoletani di Meta e Sorrento, esse raggiungono altezze intorno ai 50 m; a Meta, in particolare, si ritrova un esempio di falesia di tipo B (con piattaforma costiera orizzontale, Figura 69). Anche lungo questo tratto di litorale è forte la presenza del tufo grigio campano, caratterizzato da una struttura colonnare: oltre alle fratture verticali, sono spesso presenti discontinuità suborizzontali, che contribuiscono alla diminuzione del grado di cementazione dell'ammasso. La suscettibilità ai ribaltamenti di lastre e/o blocchi è, quindi, elevata. Su tutte le falesie della zona agiscono processi di degradazione meteorica che rendono soprattutto gli orli delle stesse instabili. A Vico Equense, per esempio, si verificano spesso frane da scollo e scivolamenti 3D.



Figura 69. Marina di Puolo, Meta (NA): esempio di falesia con piattaforma costiera orizzontale, tipo B. Fonte: Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 126, No. 2 (2007), pp. 187.

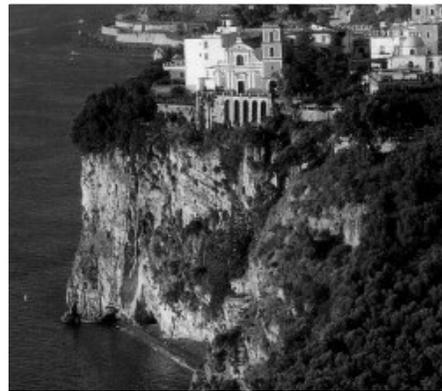


Figura 70. Vico Equense (NA): esempio di falesia calcarea con pocket beach al piede. Fonte: Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 126, No. 2 (2007), pp. 186.

Nell'area più meridionale delle Penisola, in corrispondenza di Massa Lubrense, i versanti sono modellati in successioni arenaceo-torbiditiche: eventi di precipitazione intensa portano all'attivazione di scorrimenti rotazionali.

Un caso particolare di questo comune della provincia napoletana è Punta Campanella, costituita da falesie carbonatiche subverticali (*plunging cliff*): in tale porzione litoranea sono molto più frequenti le frane da crollo che gli scorrimenti.

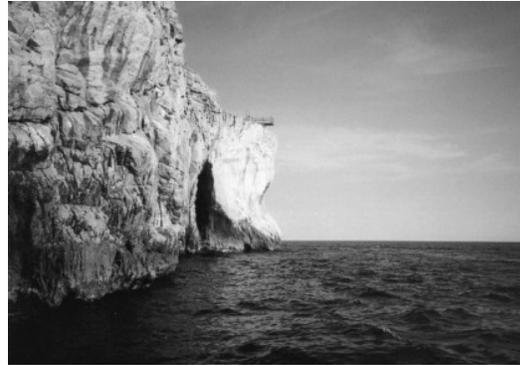


Figura 71. Esempio di "plunging cliff" a Punta Campanella, comune di Massa Lubrense (NA). Fonte: Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 126, No. 2 (2007), pp. 188.

3) Capri rappresenta il naturale prolungamento della Penisola Sorrentina. Le falesie dell'area, modellate in breccie calcaree e perlopiù fessurate/alterate, raggiungono altezze impressionanti, comprese tra i 120 e i 320 m (*plunging cliff*). Un assetto di questo tipo favorisce lo scalzamento al piede (*De Pippo et al., 2007*). Nell'isola, frane da crollo si sono verificate sia a nord (Marina di Caterola) che a sud (Marina Piccola). Un'ampia fascia di litorale è stata così interdetta alla navigazione e transennata da un campo boe, a segnalare il divieto di accesso a natanti e diportisti.



Figura 72. Particolare di un crollo avvenuto a Marina di Caterola, isola di Capri. Immagine tratta da: <https://www.researchgate.net/publication/269390519>

4) Falesie costituite da alternanze di arenarie e conglomerati di argilliti/calcareni si trovano soprattutto in Cilento.

Ad Agropoli, gli scivolamenti 3D sono i fenomeni più frequenti, favoriti dalla disposizione geo-strutturale e geomeccanica dell'ammasso roccioso che costituisce l'omonimo promontorio. A rischio sono gli edifici a monte e le spiagge sabbiose al piede, piuttosto frequentate durante la stagione estiva.



Figura 73. Promontorio di Agropoli (SA). Immagine tratta da: <https://www.infocilento.it>

Anche il territorio comunale di Montecorice presenta una modesta vulnerabilità, dovuta alla combinazione di fattori litologici, morfologici e idrologici, che si manifesta in maniera evidente lungo la falesia arenacea delle Ripe Rosse. Essa si estende per circa 2 km con altezze fino a 100 m, mentre nella restante parte si aggira intorno ai 10 m. La zona in questione è soggetta a cinematismi a rapida evoluzione, come crolli e ribaltamenti: i corpi di frana sono spesso attivi.



Figura 74. Particolare del promontorio Ripe Rosse, comune di Montecorice (SA). Immagine tratta da: <https://www.researchgate.net/publication/269390519>

5) La fascia costiera del Monte Bulgheria è formata da rocce carbonatiche. Falesie alte e ripide si alternano alle cosiddette *pocket beaches*, piccole spiagge isolate tra due o più promontori.

L'Arco Naturale di Palinuro, parte del promontorio La Molpa, è stato colpito negli ultimi 50 anni da diverse cadute di massi.

Nel 2007, per esempio, ha subito il distacco di lastre di roccia. Si è quindi provveduto a

rafforzarlo tramite una rete metallica all'intradosso e a proteggerlo attraverso la posa in opera di frangiflutti sommersi offshore. Questi lavori hanno, tuttavia, prodotto risultati insufficienti e nuovi distacchi di lastre sono avvenuti. Un possibile intervento, secondo *Budetta et al.*, sarebbe il rinforzo dell'arco con l'ausilio di iniezioni di cemento e l'installazione di bulloni, al fine di raggiungere un giusto equilibrio tra impatto visivo e messa in sicurezza della zona.



Figura 75. Distacco di lastre di roccia dall'Arco Naturale di Palinuro (SA) nel 2007. Fonte: *Rend. Online Soc. Geol. It.*, Vol. 35 (2015), pp. 44.

Nella vicina baia del Buon Dormire, la balneazione sarebbe invece interdetta a causa di un costone roccioso pericolante, dotato unicamente di rete metallica in aderenza (Figura 76). Nonostante i cartelli riportanti il divieto, l'arenile è quotidianamente preso d'assalto dai turisti durante la stagione estiva. A nulla sembrano



Figura 76. Baia del Buon Dormire, Centola (SA): particolare di una rete metallica in aderenza. Immagine tratta da: <https://www.tripadvisor.it>

servire le ordinanze di interdizione del comune di Centola e della Capitaneria di Porto di Palinuro. Attualmente, sono due i provvedimenti che interessano la baia: l'ordinanza del Circondario Marittimo di Palinuro che dal 2011 vieta ogni attività nel limite di sicurezza di 30 metri dal costone roccioso e l'ordinanza comunale del 28 luglio 2020 che "al fine di tutelare la pubblica e privata incolumità" ne vieta "l'accesso, l'utilizzo e la balneazione".

La fascia costiera di San Giovanni a Piro si colloca nell'ambito sud-orientale del Cilento. Essa si estende tra le pendici orientali e meridionali del Monte Bulgheria; mentre il suo settore orientale presenta perlopiù tratti litoranei bassi e sabbiosi, quello occidentale è caratterizzato da falesie. Si individuano i seguenti morfotipi, in maggioranza carbonatici:

- costa alta più di 10 m e senza depositi alla base, in località Inferno;
- costa alta più di 10 m e con depositi ciottolosi alla base, in località Garagliano;
- costa alta meno di 10 m e senza depositi alla base, in località Punta Spinosa;
- falesia con *pocket beach* ciottolosa-ghiaiosa, in località Marcellino.



Figura 77. Punta Garagliano, San Giovanni a Piro (SA). Immagine tratta da: <https://www.trovspiagge.it>



Figura 78. Falesia con *pocket beach* in località Marcellino, San Giovanni a Piro (SA). Foto di Fabio Sansone.

I fenomeni gravitativi, da attivi a quiescenti/relitti, sono costituiti da frane da crollo e ribaltamento.

5.5. Basilicata

Procedendo da Nord verso Sud, è stato possibile individuare le seguenti falesie instabili:

- Maratea (Potenza): spiaggia dei Crivi, spiaggia di Fiumicello, Torre Caina, Castrocucco di Maratea.

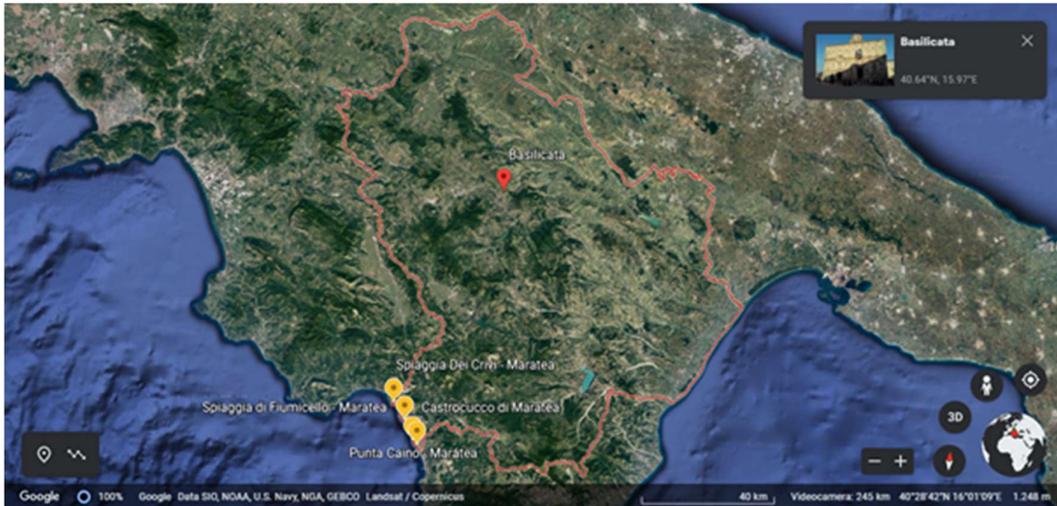


Figura 79. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Basilicata (Google Earth).

La costa tirrenica lucana è prettamente rocciosa e presenta un'alternanza di falesie e spiagge sabbiose/ciottolose. Il territorio di Maratea è caratterizzato da una dorsale montana di natura calcarea parallela alla costa, che a tratti si spinge fino al litorale, determinando la presenza di falesie molto alte, spesso di difficile accesso. In corrispondenza di Punta dei Crivi, si ritrovano ripidi ammassi rocciosi carbonatici che proseguono verticalmente a raggiungere il fondale marino, anche fino a 10 m di profondità. Ugualmente nella baia di Fiumicello, delimitata a nord da un'importante falesia carbonatica.



Figura 80. Punta dei Crivi, comune di Maratea (PZ).
Fonte: iStockphoto.

Comuni processi di arretramento dei versanti hanno contribuito all'evoluzione del litorale lucano: tra questi prevalgono, sicuramente, le frane da crollo.

Numerose sono le grotte di origine carsica, alcune invase dal mare e da esso rimodellate.

5.6. Calabria

Avanzando da Nord verso Sud, sono state evidenziate le seguenti falesie instabili:

- 1) Isola di Dino (Cosenza);
- 2) San Nicola Arcella (Cosenza): spiaggia dell'Arcomagno;
- 3) Tropea (Vibo Valentia): santuario di Santa Maria dell'Isola;
- 4) Costa Viola (Reggio Calabria): comune di Scilla.



Figura 81. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Calabria (Google Earth).

1) L'isola di Dino ricade nel comune di Praia a Mare, parte del Parco Marino Riviera dei Cedri, area di notevole interesse paesaggistico calabrese.

L'erosione è molto intensa presso le falesie calcaree, piuttosto fratturate: frane da crollo non sono rare, data anche la presenza di un elevato numero di grotte.



Figura 82. Isola di Dino, comune di Praia a Mare (CS). Immagine tratta da: <https://www.pellaro.net>

2) San Nicola Arcella è un piccolo borgo marinaro, situato sull'orlo di una rupe scoscesa. L'Arcomagno è sicuramente una delle destinazioni più apprezzate dell'alto tirreno calabrese: si tratta di una falesia alta circa 100 m, a strapiombo sul mare.

L'unico accesso alla spiaggia è costituito da una scalinata, qualche anno fa interdetta al transito pedonale, in quanto poco sicura per via di possibili crolli di blocchi rocciosi. Per mettere in sicurezza buona parte del sentiero naturalistico in questione, il comune ha avuto accesso ad un cospicuo finanziamento, che ha portato alla riconsegna dell'area alla comunità. Resta ancora da realizzare la messa in sicurezza della spiaggetta sottostante la falesia.



Figura 83. Falesia dell'Arcomagno, comune di San Nicola Arcella (CS). Immagine tratta da: <http://www.turiscalabria.it>

3) Il santuario di Santa Maria dell'Isola sorge su una falesia in arenaria. Forse a causa delle piogge, forse per l'inarrestabile erosione alla base, nel 2020 si è verificato un crollo in corrispondenza della sua parte sinistra. Sono così precipitati sulla spiaggia sottostante alcuni massi (Figura 85). Fortunatamente né cose né persone hanno subito danni, ma rimane il problema della messa in sicurezza dell'isolotto, ad alta valenza turistica.



Figura 84. Santuario di Santa Maria dell'Isola, comune di Tropea (VV). Immagine tratta da: <https://www.paesionline.it>



Figura 85. Particolare di una frana da crollo di un costone di Santa Maria dell'Isola, Tropea (VV). Immagine tratta da: <https://www.quotidianodelsud.it>

4) Sul versante tirrenico della provincia di Reggio Calabria è ubicato il sito Costa Viola. Tutta la zona è caratterizzata da un intenso processo erosivo: in particolare, le pendici dei versanti sono interessate da dissesti di tipo *crolli*. La morfologia è variabile: falesie subverticali sono interrotte da spiagge di dimensione variabile; alcuni tratti del litorale, come i centri abitati e le aree portuali, sono ad elevata urbanizzazione e, dunque, a rischio. Ne è un esempio il comune di Scilla.



Figura 86. Falesia nel comune di Scilla (RC). Immagine tratta da: <https://www.cosmopolitan.com>

5.7. Puglia

Procedendo da Nord verso Sud, è stato possibile individuare le seguenti falesie instabili:

- 1) Promontorio del Gargano (Foggia): Peschici (Monte Pucci), frazione di San Menaio, Vieste (Arco di San Felice), spiaggia di Piana Mattinata (Baia di Vignanotica);
- 2) Polignano a Mare (Bari);
- 3) San Pietro Vernotico (Brindisi): località Cimalo (frazione Campo di Mare);
- 4) Melendugno (Lecce): Grotta della Poesia, Torre dell'Orso, Torre Sant'Andrea;
- 5) Otranto (Lecce): Conca Specchiulla, baia dei Turchi, baia di Santo Stefano, baia Mulino d'Acqua.

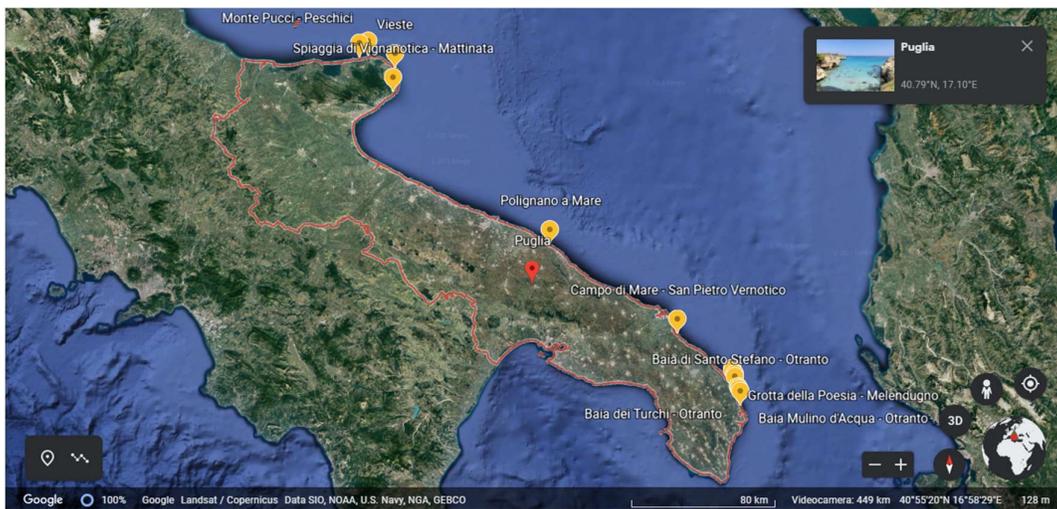


Figura 87. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Puglia (Google Earth).

1) Nel Gargano affiorano maggiormente rocce carbonatiche, quali calcari e dolomie. Le coste alte sono particolarmente sviluppate tra San Menaio, frazione di Vico del Gargano, e Mattinata: anche in questo caso, esse sono intervallate da piccole baie, con spiagge sabbiose-ghiaiose, in corrispondenza delle quali si accumulano i prodotti dei fenomeni di instabilità.



Figura 88. Falesia su cui sorge il comune di Vieste (FG). Immagine tratta da: <https://siviaggia.it>

La falesia su cui sorge Vieste, per esempio, è costituita da strati sottili di calcare, con l'aggiunta di liste e noduli di selce (roccia sedimentaria composta prevalentemente da silice) rossastra. Tale assetto è visibile in Figura 88.

Un altro modello di falesia attiva è Monte Pucci, in sommità del quale si trova un trabucco storico (Figura 89) ancora funzionante.

Ai piedi delle torri, erette in passato in sommità dei promontori a protezione della popolazione dalle continue invasioni dei Saraceni e dei Turchi, si verificano frequenti crolli (Figura 90): a rischio sono soprattutto le infrastrutture viarie sovrastanti.



Figura 89. Trabucco di Monte Pucci, comune di Peschici (FG). Fonte: AlterVista.



Figura 90. Crollo ai piedi della falesia di Monte Pucci, comune di Peschici (FG). Immagine tratta da: <https://www.isprambiente.gov.it>

2) Anche a Polignano a Mare il problema della stabilità delle falesie, che raggiungono altezze fino a 20 m, è sicuramente aggravato dalla presenza della città antica in sommità, nonché dalle numerose grotte ritrovabili al piede.

È rinvenibile la seguente successione stratigrafica, visibile in Figura 91: depositi discontinui di calcarenite, in Puglia genericamente ed erroneamente chiamata “tufo”, poggiano sul più antico substrato di calcare. Diverse famiglie di discontinuità subverticali conferiscono all'ammasso roccioso una bassa resistenza. Le pareti frastagliate sono aggettanti e proseguono al di sotto del livello marino per 2-5 m: in mare spesso si ritrovano blocchi calcarenitici da crollo, con un volume variabile nell'intervallo $1 \text{ m}^3 - 30 \text{ m}^3$. Anche altri cinematismi sono possibili, quali (Andriani et al., 2013):



Figura 91. Successione stratigrafica della costa di Polignano a Mare (Miccoli et al., 2015).

- scivolamenti delle pareti aggettanti lungo piani di discontinuità ad alto angolo (Figura 92a);
- ribaltamenti di blocchi (Figura 92b);

- scivolamenti lungo superfici a franapoggio per distacco di blocchi in corrispondenza di fratture da rilascio tensionale (Figura 92c);
- crolli delle volte delle grotte marine, a seguito dell'eccessivo approfondimento del solco di battente (Figura 92d).

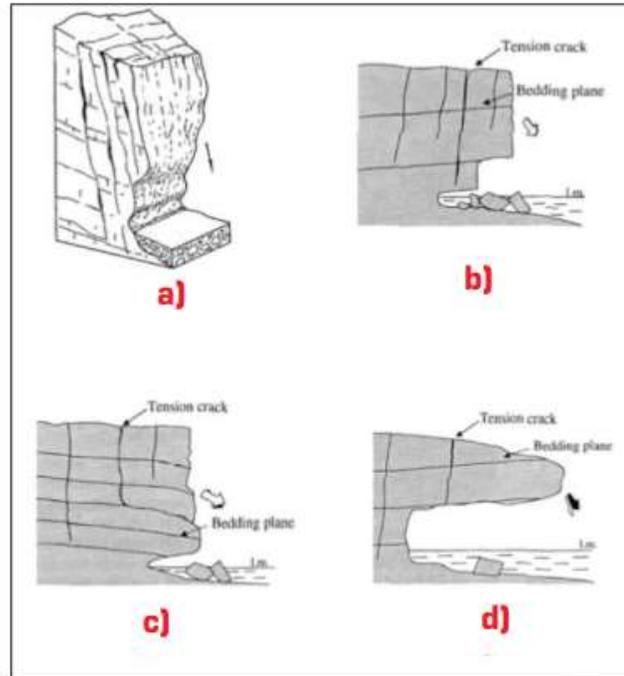


Figura 92. Cinematismi tipici della falesia di Polignano a Mare (Andriani et al., 2013).

Le costruzioni presenti costituiscono per la falesia un sovraccarico, che contribuisce all'aumento dell'instabilità basale: perciò segni di dissesto, legati ai cedimenti differenziali del terreno, non sono rari negli edifici del centro storico.

3) Lo scorso febbraio 2021, la giunta comunale di San Pietro Vernotico si è riunita per approvare il progetto definitivo riguardante i lavori di messa in sicurezza della falesia in crollo in località Cimalo. Diversi interventi saranno realizzati, tra i quali la riprofilatura del versante e il posizionamento di scogliere sommerse. Fino a questo momento, dopo l'ultimo crollo risalente a nove anni fa, sono state solo emesse ordinanze di interdizione, anche con scarsi risultati in termini di efficacia.



Figura 93. Falesia in crollo nel comune di San Pietro Vernotico (BR). Immagine tratta da: <https://www.brindisireport.it>

4) Melendugno è una località costiera salentina, situata tra San Foca e Torre dell'Orso. Qui si trova una delle piscine naturali più affascinanti al mondo, la Grotta della Poesia, facente parte di un esteso complesso carsico.



Figura 94. Grotta della Poesia, comune di Melendugno (LE). Immagine tratta da: <https://www.turismo.it>

Un tempo queste cavità erano delle grotte, dotate quindi di una copertura rocciosa. Negli anni, i fenomeni carsici, quelli atmosferici e il moto ondoso ne hanno provocato il crollo del “soffitto”.

Non lontano dalle piscine si possono ammirare mura di cinta, resti di torri di avvistamento cinquecentesche, nonché un santuario. Si tratta di un vero e proprio sito archeologico e come tale andrebbe trattato e salvaguardato. Ciò nonostante, troppi bagnanti continuano ad affollare il territorio, incuranti dei divieti di balneazione presenti. Non sono rare, per tale motivo, le rotture di parti di falesia: a rischio è soprattutto l'arcata, dallo spessore limitato, che collega la piscina principale al mare aperto.

Rimanendo nella zona di Melendugno, si trovano altri due luoghi da tenere sotto controllo: Torre dell'Orso, per i crolli, e Torre Sant'Andrea (Figura 95), a causa dei ribaltamenti.



Figura 95. Falesia di Torre Sant'Andrea, comune di Melendugno (LE). Immagine tratta da: <https://www.turismo.it>

In particolare, la parete aggettante in tufo di Torre dell'Orso è stata protagonista nel 2019 di un ingente sgretolamento (Figura 96).

L'ingombrante mole di materiale è finita sulla spiaggia sottostante e in mare.

Tutto il perimetro è stato interdetto sia alla sosta che al transito dei bagnanti e una nuova segnaletica, tradotta in più lingue, è stata posizionata.



Figura 96. Crollo ai piedi della falesia di Torre dell'Orso, comune di Melendugno (LE). Immagine tratta da: <https://www.lagazzettadelmezzogiorno.it>

5) Conca Specchiulla, baia dei Turchi, baia di Santo Stefano: questa lingua di litorale lunga non più di 12-13 km è visibilmente aggredita dal moto ondoso, che provoca crolli diffusi in corrispondenza delle falesie costituite da calcareniti tenere; in località Mulino d'Acqua, invece, sono più diffusi i ribaltamenti (Figura 97).



Figura 97. Esempio di ribaltamento in località Mulino d'Acqua, comune di Otranto (LE). Immagine tratta da: <https://www.isprambiente.gov.it>

5.8. Marche

Avanzando da Nord verso Sud, sono state evidenziate le seguenti falesie instabili:

- 1) Parco Naturale Monte San Bartolo: comuni di Gabicce Mare e Pesaro (Pesaro e Urbino);
- 2) Parco Regionale Naturale del Conero, Ancona): spiaggia di Mezzavalle, Sirolo (spiagge “Due Sorelle” e “Sassi Neri”), bagno “I Gigli” (Numana).

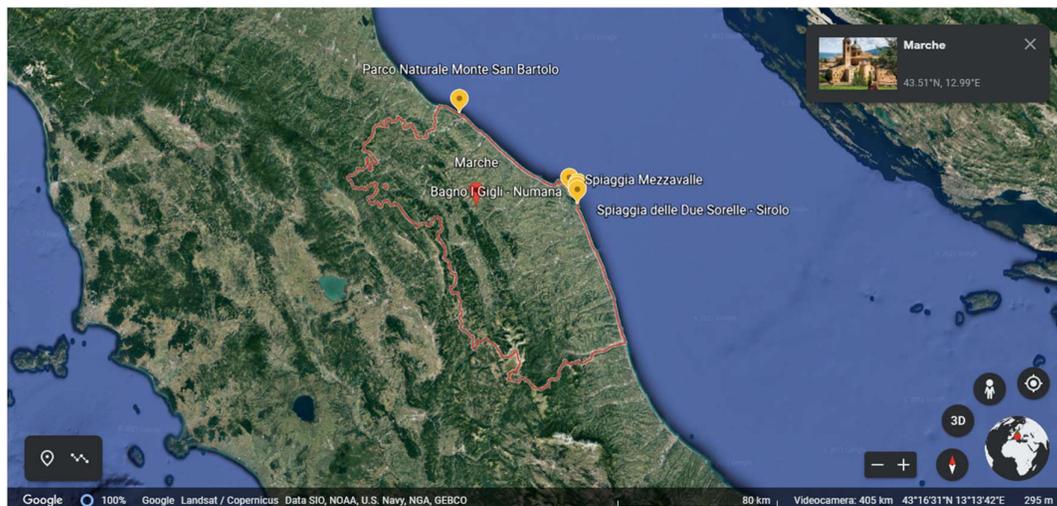


Figura 98. Distribuzione spaziale delle falesie instabili delle Marche (Google Earth).

1) L'area che si estende tra i comuni marchigiani di Gabicce Mare e Pesaro è caratterizzata da falesie aventi una forte pendenza, talvolta a picco sul mare. In questa zona, movimenti franosi in roccia possono essere ascritti a crolli, ribaltamenti e scorrimenti rotazionali.

Alcune infrastrutture sono particolarmente a rischio: è questo il caso di via delle Rondini, una strada comunale che nel 2016 è stata sottoposta a chiusura, a causa delle precarie condizioni di stabilità nelle quali versava il muro di sostegno, parzialmente scalzato al piede perché non adeguatamente protetto, del rilevato stradale.



Figura 99. Danni a via delle Rondini, strada comunale della provincia di Pesaro e Urbino. Immagine tratta da: <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it>

2) La falesia del Monte Conero si affaccia sul Mar Adriatico, a sud di Ancona. Essa è formata da calcari bianchi e duri, con immersione degli strati a franapoggio. La spiaggia è del tutto assente in alcuni punti (tratto Ancona-Monte dei Corvi) o piuttosto limitata (Mezzavalle). In quest'ultimo caso, infatti, il moto ondoso non riesce a smistare completamente i materiali frutto della dinamica di versante.



Figura 100. Falesia modellata nel versante sovrastante la spiaggia di Mazzavalle, provincia di Ancona (Aringoli et al., 2014).

Una frana antica è quella in prossimità della spiaggia "Due Sorelle", nel comune di Sirolo, interessata da uno scorrimento planare dei calcari sulle marne. Questo corpo di frana è attualmente soggetto a crolli, causati dall'azione erosiva del mare sul fronte di accumulo. Diversi fattori favoriscono l'instabilità, come i ristagni d'acqua a monte dei detriti, dovuti anche al profondo cambiamento dell'uso del suolo: la zona era in passato occupata da agricoltori che, operando una corretta regimazione delle acque superficiali, favorivano le condizioni di rapido deflusso delle stesse, riducendo le infiltrazioni e l'alterazione degli ammassi rocciosi (Segato et al., 2011). Lo stesso discorso vale per la falesia in corrispondenza della spiaggia "Sassi Neri", troncata da una



Figura 101. Scorrimento planare in prossimità della spiaggia "Due Sorelle", nel comune di Sirolo (Segato et al., 2011).



Figura 102. Centro abitato di Sirolo (AN), in sommità della falesia Sassi Neri. Immagine tratta da: <https://www.bbmontegallo.com>

superficie suborizzontale posta a 120 m s.l.m. (Figura 102), sulla quale sorge il centro abitato di Sirolo, di origini medievali (Aringoli et al., 2014). Sono prevalenti fenomeni di ribaltamento e crolli di diedri di dimensioni metriche.

In prossimità dello stabilimento balneare “I Gigli” (Figura 103), nel comune di Numana, si è invece verificato uno scorrimento rototraslazionale della formazione calcareo-marnosa alterata su quella intatta.



Figura 103. Esempio di uno stabilimento balneare al piede di una falesia rocciosa, nel comune di Numana. Immagine tratta da: <https://www.balnearirivieradelconero.it>

5.9. Friuli-Venezia Giulia

In questa regione è instabile il seguente tratto di costa alta:

- Riserva Naturale Regionale delle Falesie di Duino (Trieste).

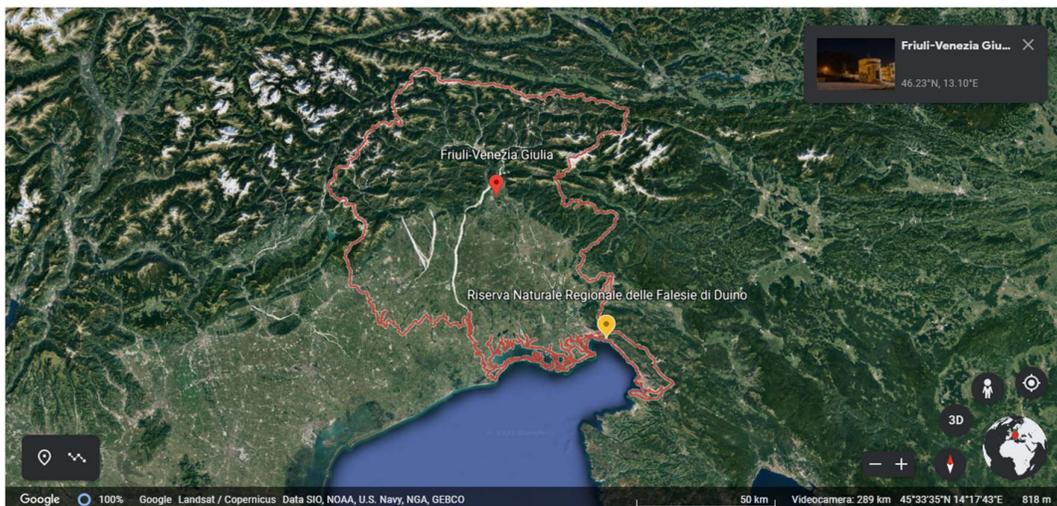


Figura 104. Distribuzione spaziale delle falesie instabili del Friuli-Venezia Giulia (Google Earth).

La suddetta riserva comprende una ripida falesia calcarea, sul cui ciglio si trova il sentiero Rilke, e la fascia di mare antistante. Il percorso, dal quale si può ammirare il golfo di Trieste, è stato inaugurato nel 1987 ed ha una lunghetta di quasi 2 km.

Le Falesie di Duino sono state inserite tra i sistemi naturali italiani da proteggere, soprattutto perché sono l'unico esempio di costa alta della zona adriatica settentrionale. Obiettivo primario è la tutela delle sue forme carsiche: importanti grotte sono state individuate proprio al di sotto del sentiero panoramico.

Le giaciture dei sistemi di discontinuità dell'ammasso roccioso in questione sono illustrate in modo sintetico in Figura 105: calcari compatti si presentano con stratificazione a franapoggio ed evidenti striature, segni di una tettonica di compressione.

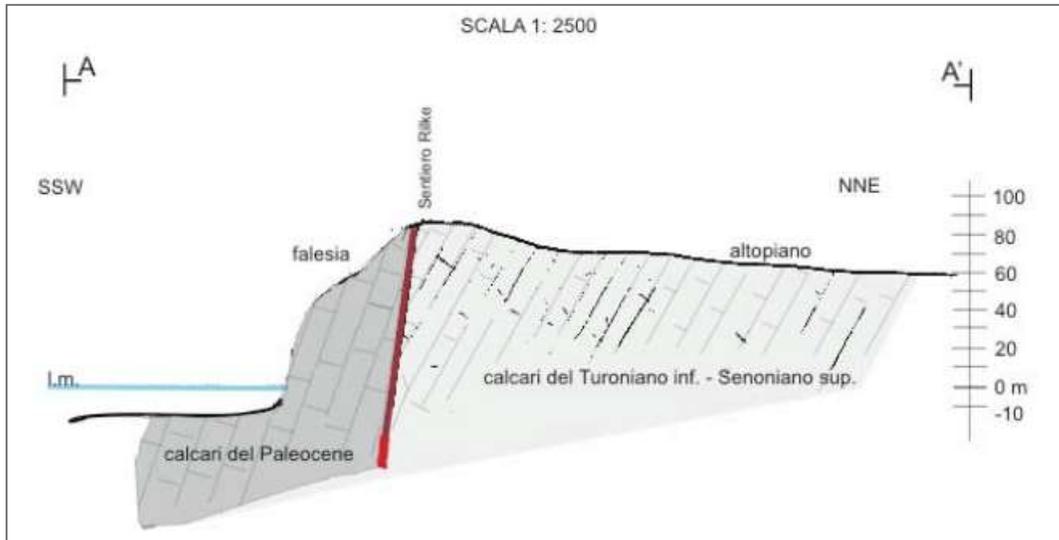


Figura 105. Situazione giaciturale delle famiglie di discontinuità presenti nelle Falesie di Duino, provincia di Trieste. Immagine tratta da: <http://www.comune.duino-aurisina.ts.it>

Crolli di detriti e/o blocchi possono verificarsi in occasione di forti mareggiate o piogge: lo scorso novembre 2020 è finito in mare il costone "El Capel", chiamato così dagli autoctoni per la sua forma, che ricordava vagamente un berretto. È noto che nelle cavità carsiche, durante la



Figura 106. Sperone "El Capel" delle Falesie di Duino, prima (a sinistra) e dopo (a destra) il crollo. Immagine tratta da: <https://ilpiccolo.gelocal.it>

stagione fredda, l'acqua che si deposita può ghiacciare e, dilatandosi, allargare le fessure preesistenti. In questo modo, si originano fenomeni di degradazione, che il più delle volte culminano in cinematismi. A dare il colpo decisivo allo sperone, potrebbe essere stato il terremoto di magnitudo 7.0 avvenuto il 30 ottobre 2020, il cui epicentro è stato individuato nel mare Egeo, a circa 14 km a nord-est dell'isola greca di Samo.

5.10. Sicilia

Procedendo da Ovest verso Est, sono state evidenziate le seguenti falesie instabili:

- 1) Isola di Favignana (Trapani): Cala Azzurra, Cala Rossa, Cala del Bue Marino;
- 2) Trapani: Riserva di Monte Cofano, Riserva Naturale Orientata dello Zingaro;
- 3) Sciacca (Agrigento): promontorio di Coda della Volpe;
- 4) Palermo: Terrasini, Punta Raisi, Riserva Naturale di Capo Gallo;
- 5) Agrigento: Scala dei Turchi (Realmonte), contrada Caos;
- 6) Rocca di Cefalù (Palermo);
- 7) Siracusa: Fontane Bianche, Riserva Naturale del Plemmirio.

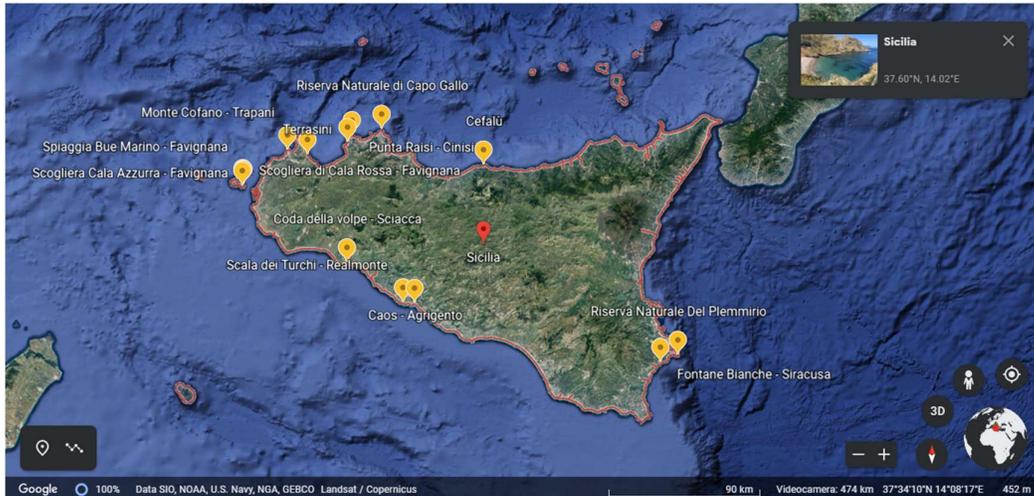


Figura 107. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Sicilia (Google Earth).

1) La morfologia e i litotipi che si incontrano a Favignana fanno sì che si sviluppino frane da crollo, frequenti soprattutto lungo le falesie orientali dell'isola. A Cala Rossa (Figura 108), per esempio, affiorano rocce calcarenitiche in forme abbastanza compatte, che in passato si prestavano ad essere estratte ed usate nell'ambito edilizio. Nel dopoguerra la calcarenite è andata fuori mercato e le aree di estrazione sono state abbandonate: tra le



Figura 108. Cala Rossa, isola di Favignana (TP). Immagine tratta da: <https://www.balarm.it>

le

aree cavate compaiono le alte falesie a picco sul mare, oggi sottoposte ad un processo di degrado che incrementa il rischio di crolli.

Una situazione di reale rischio si riscontra solo nelle cale affollate dai turisti durante la stagione estiva, essendo il livello di antropizzazione del territorio piuttosto ridotto.

Degno di nota è il *Progetto Egadi* dell'ENEA (“Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile”), che da anni opera nel settore del turismo ecosostenibile. Il monitoraggio di alcune falesie in condizioni critiche, come Cala Azzurra, Cala Rossa e Cala del Bue Marino, è inserito in tale ambito, così come l'analisi della pericolosità idrogeologica e la messa in pratica di interventi di sicurezza a basso impatto ambientale.

2) La Riserva di Monte Cofano e alcune calette della Riserva dello Zingaro sono soggette a dissesti. Il promontorio, alto 659 m, è di fatto un ammasso dolomitico separato dal mare da alcune spiagge, alcune delle quali chiuse temporaneamente nel 2017 a seguito di un temporale che provocò la caduta di diversi massi. La Riserva di Monte Cofano è stata parzialmente riaperta a luglio 2020: rimangono interdetti alla fruizione i sentieri nei



Figura 109. Cartelli affissi nel 2017 in prossimità della Riserva di Monte Cofano, a seguito di una frana da crollo. Immagine tratta da: <https://www.tpostit.it>

quali permane il rischio di imminente crollo. Rocce carbonatiche e dolomitiche si trovano anche nella Riserva dello Zingaro, di cui solo una caletta è interamente fruibile: nelle altre si trovano cartelli che invitano a non sostare in prossimità dei costoni pericolanti.

3) Diversa è la situazione del litorale del comune di Sciacca. I crolli che hanno interessato il promontorio di Coda della Volpe, conosciuto anche come promontorio delle Terme, per il Genio Civile sono dovuti all'azione degli agenti atmosferici (soprattutto il vento) e al deflusso in parete delle acque che fuoriescono dai pozzetti



Figura 110. Promontorio di Coda della Volpe (AG). Immagine tratta da: <http://www.fotografieitalia.it>

fognari a monte, al di sotto della strada comunale. A tali perdite si aggiungono gli scarichi

delle acque piovane, che si riversano copiosamente sulla sommità del promontorio, costituendo una concausa dei dissesti idrogeologici tuttora in corso.

4) La fascia costiera palermitana risulta piuttosto articolata, con tratti sabbiosi o ciottolosi posti a differente quota sul livello del mare, intervallati da falesie (perlopiù carbonatiche) sia inattive che attive, alcune a strapiombo sul mare: è questo il caso di Capo Gallo, Monte Catalfano, Terrasini e Cefalù. Da Punta Raisi a Capo Gallo si nota un assottigliamento delle falesie, con frequenti distacchi di blocchi secondo crolli e ribaltamenti, che possono coinvolgere direttamente il tessuto urbano e la rete viaria che si sviluppano sui versanti. In particolare, le condizioni di instabilità di Capo Gallo sono aggravate dalla presenza di grotte carsiche alla base. Discorso simile vale per la fascia costiera di Terrasini, che ospitava tra l'altro due faraglioni, prima del crollo avvenuto nel 2016 a seguito di una forte mareggiata.



Figura 111. Faraglioni di Terrasini (PA) prima del crollo di marzo 2016. Immagine tratta da: <https://www.palermotoday.it>

5) A due passi dal sito archeologico della Valle dei Templi, si trova la Scala dei Turchi: costituita da marne (rocce sedimentarie di natura argillosa e calcarea), una delle sue caratteristiche più affascinanti è il colore, un bianco puro. Tutto il tratto in questione è a rischio idrogeologico (l'ultimo crollo risale allo scorso aprile) e necessita di azioni sia per la salvaguardia dell'ambiente che dell'incolumità delle persone. La situazione è aggravata dalla forte presenza turistica, nonché dai diversi casi di abusivismo edilizio. Negli anni '80, per esempio, la falesia fu deturpata da un cantiere per la costruzione di un complesso alberghiero, bloccato poi dalle denunce di Legambiente, che portarono nel 2013 all'abbattimento dell'ecomostro.



Figura 112. Scala dei Turchi (AG). Immagine tratta da: <https://www.lavalledeitempli.it>

Sempre nel comune di Agrigento, in particolare in contrada Caos, è presente un importante rischio per frane da crollo: ad agosto 2017, una porzione di falesia è finita in mare, fortunatamente non causando danni ai diversi bagnanti presenti. Ciò che maggiormente preoccupa è la rapida erosione costiera a valle della strada (Figura 113) che collega la contrada agrigentina al resto del territorio.



Figura 113. Evidente erosione costiera in contrada Caos (AG). Fonte: Mareamico.

6) Come già accennato, Cefalù sorge in prossimità di una falesia. Nel 2019 sono ripartiti i lavori per la messa in sicurezza della Rocca, delle abitazioni sottostanti e della cattedrale, con la realizzazione di barriere paramassi e il disgaggio delle porzioni di roccia calcarea instabili. In passato, diversi crolli di blocchi, più o meno consistenti, hanno messo a rischio l'incolumità pubblica.



Figura 114. Rocca di Cefalù (PA). Immagine tratta da: <https://www.palermotoday.it>

7) Nella provincia di Siracusa, due tratti costieri costituiti da falesie meritano particolare attenzione: quello di Fontane Bianche e l'Area Marina Protetta del Plemmirio. Quest'ultima si estende dalla Penisola della Maddalena, caratterizzata da coste alte fino a 54 m s.l.m., a Punta Milocca: si ritrovano prevalentemente stratificazioni di calcari e calcareniti,



Figura 115. Riserva Naturale del Plemmirio (SR). Foto di Gabriele Campisi.

interessate da un fitto reticolo di faglie. L'aspetto morfologico è, a grande scala, simile ad una gradonata. Lungo le falesie sono state individuate grotte di dimensioni variabili, dovute sia all'erosione marina che al fenomeno carsico, che ha agito sul substrato calcareo già fratturato. La CO₂ presente nelle acque meteoriche, infatti, penetra all'interno del *bedrock* e ne aumenta il volume a seguito della dissoluzione del calcare, creando tensioni interne all'ammasso. A tale azione distruttiva va aggiunta quella ondosa, nonché l'alternanza dei processi di imbibizione ed essiccamento e l'erosione biologica sia animale che vegetale (Giuffrida, 2015).

Vari ingrottamenti e i resti di una frana da crollo, visibili in Figura 116, sono riscontrabili presso le Ripe Bianche: qui marne sabbiose poggiano su marne calcaree, leggermente stratificate e intensamente fratturate.



Figura 116. Frana da crollo presso le Ripe Bianche (Giuffrida, 2015).

L'erosione costiera colpisce da diverso tempo anche Fontane Bianche. Il tratto di falesia che divide le due spiagge che compongono la famosa località balneare è interdetto da oltre un decennio per rischio crolli. Ad oggi, nessuna misura concreta è stata presa per bloccare, o quantomeno limitare, il fenomeno. Al contrario, molti tubi metallici, che costituivano l'innocuo cordone di interdizione all'area, sono precipitati sulla spiaggia sottostante, rappresentando un ulteriore pericolo per i bagnanti.



Figura 117. Tubo metallico, precipitato in spiaggia, che un tempo costituiva il cordone d'interdizione alla falesia Fontane Bianche (SR). Immagine tratta da: <https://www.siracusaoggi.it>

5.11. Sardegna

Avanzando da Nord verso Sud, sono state evidenziate le seguenti falesie instabili:

- 1) Golfo dell'Asinara (Sassari): Castelsardo, Valledoria (spiaggia di La Ciaccia), Sorso (litorale Marritza), Porto Torres (spiagge di Balai e Abbacurrente);
- 2) Alghero (Sassari): promontorio di Capo Caccia;
- 3) Cuglieri (Oristano): Capo Nieddu, Santa Caterina di Pittinuri;
- 4) Costa di Baunei (Nuoro): Perda Longa, Cala Goloritzé;
- 5) Oristano: San Vero Milis (Torre di Scau 'e Sai, Promontorio di Capo Mannu, Torre di Sa Mora, spiaggia di S'Arena Scoada), Riola Sardo (Roia de Su Càntaru), Cabras (Su Tingiosu, Torre di Seu, San Giovanni di Sinis, Capo San Marco);
- 6) Riserva Naturale "Canal Grande di Nebida" e Scoglio Pan di Zucchero (Carbonia-Iglesias);

7) Cagliari: Promontorio Sella del Diavolo, Cala Mosca, Cala Bernat, Capo Sant'Elia, Cala Fighera.

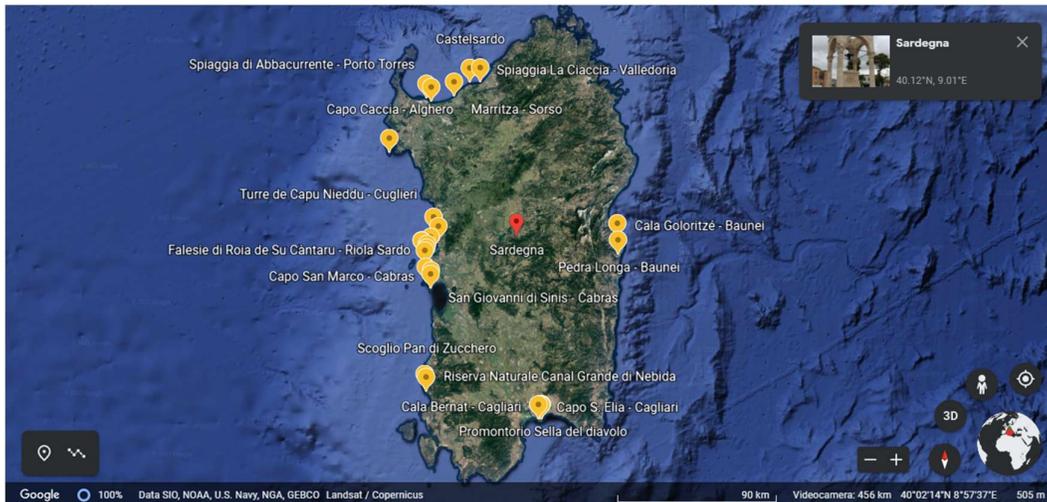


Figura 118. Distribuzione spaziale delle falesie instabili della Sardegna (Google Earth).

1) Mentre il settore orientale del Golfo dell'Asinara presenta perlopiù coste basse, quello occidentale si caratterizza per la presenza di centri urbani su ripide falesie, ricche di anfratti e spaccature, la cui piattaforma raggiunge in alcuni punti profondità di 50 m.

Nel comune di Castelsardo affiorano prevalentemente rocce vulcaniche e sedimentarie; non è da sottovalutare la degradazione operata dagli agenti atmosferici sui livelli più erodibili, quali tufiti, etc. L'instabilità dei versanti, inoltre, è legata alla formazione lacustre alla base, che costituisce il litotipo più debole tra quelli presenti. Gli strati sovrastanti, più tenaci, vengono quindi scalzati al piede: ciò



Figura 119. Borgo di Castelsardo (SS). Immagine tratta da: <https://www.borghistorici.it>

provoca frane da crollo e ribaltamenti. La diga foranea, a protezione del porto turistico, è stata costruita usando materiale prelevato dal mare: ciò ha determinato un pericoloso movimento di distacco, per il quale è stato necessario consolidare la falesia agli inizi degli anni Novanta. Il porto ha praticamente privato alcune zone della costa di Castelsardo di una parte delle difese naturali che possedeva, accelerando l'azione degradante del moto ondoso. Oltre ai lavori di consolidamento, si è intervenuti sulla regimazione dei canali di drenaggio, che in alcuni casi si trovano sepolti sotto il piano stradale.

Una notevole falesia si trova anche nell'area costiera di Valledoria, precisamente nel borgo di La Ciaccia: essa raggiunge un'altezza massima di 22 m e, al di sopra del substrato vulcanico-sedimentario che costituisce la piattaforma sommersa per una fascia di 25-40 m (funge da frangiflutti naturale), è presente una formazione sabbioso-arenacea. Le onde che la raggiungono fanno sì che si formino sottoescavazioni (Figura 120) in corrispondenza del contatto stratigrafico substrato-livelli arenacei, i quali, non avendo più un appoggio alla base, crollano e innescano la prosecuzione del fenomeno franoso più a monte. A rischio sono soprattutto le costruzioni poste nelle vicinanze della cresta del pendio, terminante a mare.



Figura 120. Valledoria (SS): esempio di sottoescavazione in corrispondenza del contatto tra il substrato litoide e la sovrastante formazione sabbioso-arenacea (Bosincu et al., 2017).

Nel comune di Sorso, si passa da una costa bassa (Marina di Sorso) ad una costa alta in prossimità del litorale Marritza, soggetta a crolli diffusi. Le spiagge della prima sono a composizione sabbiosa, mentre in quelle della seconda si trovano ciottoli derivanti dalla disgregazione del basamento vulcanico delle falesie. Nel 2017, la Regione Sardegna ha stanziato dei fondi per



Figura 121. Particolare di una frana da crollo avvenuta a Marritza, comune di Sorso (SS). Immagine tratta da: <https://www.lanuovasardegna.it>

il consolidamento e la messa in sicurezza di tutto il versante: si tratta di opere di consolidamento e risagomatura della falesia, demolizione di alcuni manufatti pericolanti (scalette artigianali per la discesa al mare), etc. L'amministrazione comunale ha tempo fino al 2022 per ultimare gli interventi.

Altri interessanti elementi ambientali del sistema paesaggistico del Golfo dell'Asinara sono le falesie arenacee di Porto Torres, soggette ad un'intensa dinamica di instabilità. Nel Piano Urbanistico Comunale, infatti, esse sono inserite tra le aree a pericolosità da frana molto elevata: sono riconosciuti vari fenomeni attivi, comprendenti crolli e



Figura 122. Costa di Porto Torres (SS) partendo da Abbacurrente. Immagine tratta da: <https://www.lanuovasardegna.it>

scivolamenti superficiali, anche in forma diffusa. Nel 2019, diversi interventi di messa in

sicurezza delle falesie retrostanti le spiagge di Balai e Abbacurrente sono stati proposti, con particolare attenzione ai terreni di fondazione della torre di quest'ultima.

La stabilizzazione e il consolidamento dei versanti avvengono, in questo caso, mediante l'utilizzo di terre armate. È regolata, inoltre, la fruizione della rete di percorsi che si è sviluppata spontaneamente in prossimità del ciglio delle falesie, al fine di impedire le discese lungo percorsi ad elevato rischio crolli.

2) Nel territorio di Alghero, le fenomenologie di crollo, apparentemente stabilizzate lungo le falesie rientranti nell'Area Marina Protetta di Capo Caccia-Isola Piana, si sono riattivate negli ultimi inverni.



Figura 123. Sistema di falesie dell'Area Marina Protetta di Capo Caccia-Isola Piana (SS). Immagine tratta da: <https://www.sardegnaturismo.it>

Nel 2015, si è cercato di mettere in sicurezza il complesso carsico: una porzione di roccia instabile di circa 400 m³ è stata fatta precipitare da quasi 180 m di altezza, usando dei martinetti

idraulici. Preliminarmente, era stato effettuato un laser scanning della zona per ricostruirne il modello tridimensionale e, successivamente, erano state condotte delle simulazioni numeriche delle traiettorie di caduta del grosso masso.

Il complesso in questione continua a presentare problemi instabilità, che culminano perlopiù in frane da crollo, tanto da obbligare la Capitaneria di Porto del luogo ad emettere ordinanze di divieto di transito sotto le pareti a rischio.

3) L'assetto della costa del comune di Cuglieri è molto vario, in conseguenza alla presenza nelle vicinanze del maggiore complesso vulcanico della Sardegna, il Montiferru.

Nell'area più settentrionale del territorio, per esempio a Capo Nieddu, si ha la prevalenza di rocce vulcaniche scure: una formazione di basalto colonnare è visibile in Figura 124. L'erosione marina ha formato una lunga e frastagliata falesia, che raggiunge picchi di altezza di 70 m sul livello del mare.



Figura 124. Falesie di Capo Nieddu (OR). Foto di Roberto Bodano.

A differenza dell'inaccessibile falesia vulcanica, la falesia sedimentaria di Santa Caterina di Pittinuri è chiara e con forme arrotondate. Particolarmente suggestivo è l'arco di S'Archittu, visibile in Figura 125, derivante da un'antica grotta, il cui tetto avrebbe ceduto ad opera del violento moto ondoso. Nonostante il monumento sembri essere conservato correttamente, la sua durata nel tempo è limitata. Lo scorso 8 febbraio 2021 la Capitaneria di Porto di Oristano ha emesso un'ordinanza che vieta l'accesso, il transito e la sosta nel tratto di mare a meno di 50 m dalla falesia, dopo il cedimento di una sua parte.



Figura 125. Falesie di Santa Caterina di Pittinuri con relativo arco (OR). Foto di Valentino Selis.

4) La costa di Baunei è un susseguirsi di alte falesie subverticali, interrotte da sottili strisce di spiagge sabbiose e ciottolose. Nelle pareti calcaree si aprono piccole grotte marine di origine carsica. Uno sperone a picco sul mare è Perda Longa (Figura 126), testimonianza del processo di arretramento della costa centro-orientale sarda: con i suoi 128 m, è stato dichiarato nel 1993 monumento naturale. La qualità della roccia è considerata scadente, ugualmente nella vicina Punta Goloritzé (Figura 127). Anche qui è presente un pilastro piramidale calcareo, localmente dolomitizzato, denominato “Guglia settentrionale” per distinguerlo da Perda Longa, posta più a sud. I pericoli di compromissione del sito riguardano soprattutto la sua qualità naturale, sempre più messa a rischio da escursionisti che arrivano sia via terra che via mare.



Figura 126. Perda Longa di Baunei (NU). Immagine tratta da: <http://www.sardegnaambiente.it>



Figura 127. Punta Goloritzé, comune di Baunei (NU). Immagine tratta da: <http://www.sardegnaambiente.it>

5) Vista la totale assenza di corsi d'acqua, a San Vero Milis i sedimenti derivanti dall'erosione delle falesie sono l'unico apporto alla formazione delle spiagge. Le coste alte di questo territorio sono costituite da formazioni eoliche composte da arenarie, marne più o meno argillose (di colore rosso bruno) e calcari. Nel contesto di S'Arena Scoada è stato osservato che i dissesti sono prevalentemente causati da crolli, direttamente dalle pareti rocciose (Figura 128) o in grotte di piccole dimensioni. Questi fenomeni sono pericolosi per la loro frequenza e per l'elevato carico antropico stagionale a cui è sottoposta la zona. La stabilità della falesia appare critica a causa delle condizioni strutturali dell'ammasso, interessato da fratture di notevole entità, che favoriscono gli scollamenti in corrispondenza dei giunti di stratificazione. La presenza di argille plastiche, inoltre, induce traslazioni laterali dei blocchi di roccia, che culminano il più delle volte in crolli.



Figura 128. S'Arena Scoada (OR): esempio di frana da crollo (Vigo et al., 2012).

A Capo Mannu si ritrovano arenarie poco cementate e con un alto grado di permeabilità, che sono, per questo motivo, soggette ad un'intensa impregnazione ad opera delle acque meteoriche, nonché dei sali marini, con conseguente deterioramento delle loro già scadenti caratteristiche geomeccaniche. Nei tratti in cui dominano i litotipi maggiormente competenti (settore orientale del promontorio) si osservano crolli seguiti da ribaltamenti, mentre le porzioni compromesse strutturalmente e/o a maggior contenuto detritico e argilloso sono interessate da fenomeni di collasso generalizzato. In quest'ultimo caso, le intense piogge sono un importante fattore di innesco. Sul lato della falesia esposta a nord, in prossimità della Torre di Scau 'e Sai (parzialmente crollata nel 2012), si ripresenta il comportamento plastico dei livelli di argilla intercalati ai calcari.



Figura 129. Torre di Scau 'e Sai, prima (in alto) e dopo il crollo del 2012 (in basso), avvenuto a seguito dell'arretramento della falesia di Capo Mannu (Vigo et al., 2012).

L'altro monumento del promontorio a rischio è la Torre di Sa Mora: quelli che vengono trattati come due ruderi privi di significato, meriterebbero ben altre attenzioni. Come si è visto, il problema delle torri costiere è ampio, considerando che investe l'intero territorio provinciale di Oristano e non solo.

Poco più a sud della borgata marina di S'Arena Scoada, si ergono le falesie dell'Area Protetta della Penisola del Sinis (da Su Càntaru a Capo San Marco), che raggiungono altezze fino ai 40 m. Da Su Càntaru a Su Tingiosu, in particolare, compaiono alternanze di calcari bianchi e marne calcaree. La falesia di Torre del Sevo (o "Seu") è costituita, invece, da calcari grigio chiari.



Figura 130. Falesia di Su Tingiosu (OR). Immagine tratta da: <https://www.sardegnaturismo.it>

Sul ciglio della falesia di San Giovanni di Sinis si estende l'area cimiteriale di una necropoli fenicia, caratterizzata da numerose tombe scavate in arenaria compatta. Alcune di queste sono interessate da fenomeni di crollo di blocchi. Al di sotto dell'arenaria si trova un'alternanza di breccie e conglomerati mediamente cementati, terminante verso il basso con un livello calcarenitico: la presenza di uno



Figura 131. Tombe della necropoli meridionale di San Giovanni di Sinis (OR). Immagine tratta da: <https://www.tharros.sardegna.it>

strato a minore resistenza (breccie e conglomerati) comporta un'erosione localizzata, a cui corrisponde la formazione di blocchi isolati, propensi a distaccarsi.

A Capo San Marco (settore orientale della necropoli), invece, le arenarie si trovano a diretto contatto con le sottostanti argille e marne. Il comportamento dell'ammasso roccioso è completamente diverso: un litotipo rigido viene a trovarsi su uno strato duttile e, di conseguenza, si frattura. A tale situazione strutturale va aggiunta l'esistenza di un movimento franoso



Figura 132. Falesia di Capo San Marco (OR). Foto di Franco Cerniglia.

all'interno dei depositi marnoso-argillosi, il cui limite superiore raggiunge le soprastanti arenarie eoliche. Oltre alla giacitura a franapoggio, l'erosione al piede della falesia innesca i cinematismi. Anche il settore orientale della necropoli appare soggetto a numerosi crolli, resi possibili sia dalla complessa geometria delle fratture, che isola vari blocchi, che dalla dinamica del movimento franoso.

6) Il sud-ovest sardo si contraddistingue per la spettacolarità delle falesie calcaree di Pan di Zucchero e della Riserva Naturale "Canal Grande di Nebida". In quest'ultima compaiono stratificazioni di arenarie, dolomie e argilloscisti. Nel territorio di Nebida è a rischio frana la strada provinciale, realizzata su costa rocciosa a falesia, che conduce a Gonnese: nel tempo si sono verificati diversi crolli, che hanno reso necessari ripetuti interventi di mitigazione, come l'installazione di reti paramassi, gabbionate, etc.

Non solo: nel 2010 la parete ovest della dell'ex laveria Lamarmora (edificio in mattoni e pietra di Figura 133), a strapiombo sul mare, ha parzialmente ceduto. L'imponente complesso minerario, riconosciuto dall'Unesco come Patrimonio dell'Umanità, si sta sgretolando a causa della potente azione marina che insiste sulla falesia sottostante.



Figura 133. Resti dell'ex laveria Lamarmora di Nebida (CI); è visibile sullo sfondo la costa di Masua, tra cui spicca lo Scoglio di Pan di Zucchero. Immagine tratta da: <https://www.sardegnaturismo.it>

7) Dal promontorio della Sella del Diavolo a Cala Fighera, la pericolosità franosa da crollo è alta lungo tutta la costa alta e rocciosa.

In particolare, l'estremità calcarea (detta "pomo") della Sella del Diavolo, cerchiata in Figura 134, si sta assottigliando sempre di più, rischiando di crollare da un momento all'altro. Lo spuntone è, secondo i geologi che lo hanno analizzato, intensamente fratturato e, per giunta, alla sua base

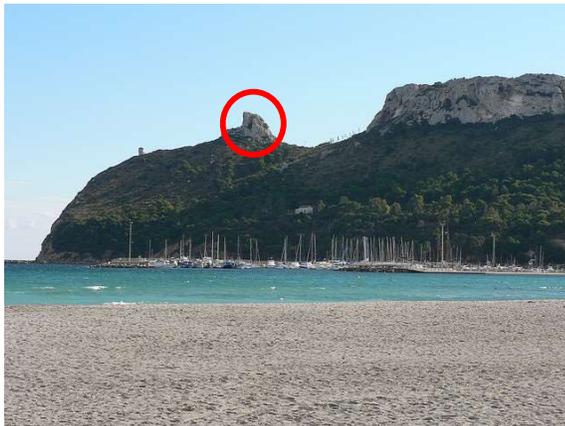


Figura 134. Falesia di Sella del Diavolo (CA). Immagine tratta da: <https://www.sardegna.com>; parzialmente modificata.

sono presenti strati di roccia piuttosto friabili, che con il trascorrere del tempo causeranno alla parte sovrastante la mancanza di uno stabile appoggio. Analizzando la situazione attuale, il destino dell'ammasso in questione è quello di cedere blocco dopo blocco, come documentato da alcune porzioni di parete già rinvenute in mare e nella sella del promontorio. Al momento, è solo in atto un divieto della Protezione Civile di accesso al costone; interventi strutturali non sono stati ancora messi in atto.

6. Analisi di stabilità del tratto costiero

Genova – Rapallo

Come si può notare dalla Figura 40, la maggior parte delle falesie liguri instabili si concentra lungo il tratto Genova – Rapallo: il presente capitolo verte, in particolare, sull'analisi di stabilità di una porzione di falesia attiva ricadente nel comune di Camogli (GE).

L'area indagata, posta nel settore occidentale del suddetto comune, è fortemente urbanizzata e si contraddistingue per la presenza di falesie ad elevata pendenza. Queste ultime sono costituite da affioramenti del Flysch del Monte Antola, un'alternanza di calcari marnosi, marne, calcareniti, arenarie e argilliti.

Intorno alle ore 15 del giorno 22 febbraio 2021 avviene il crollo di una porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli: finiscono in mare centinaia di bare.

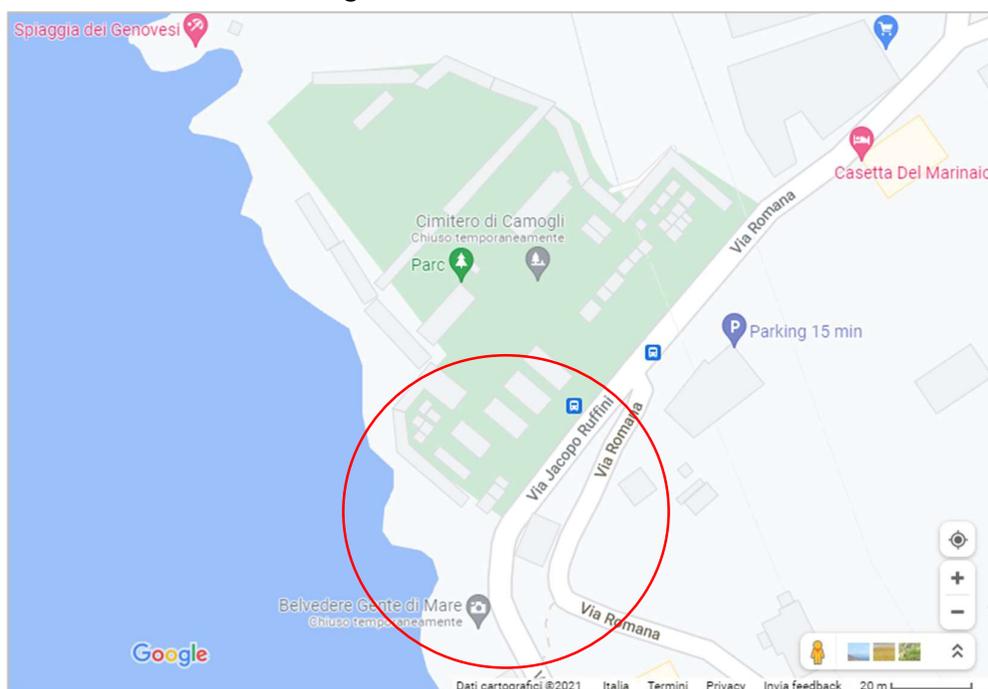


Figura 135. Localizzazione della porzione di falesia esaminata (Google Maps; parzialmente modificata).

Si può parlare di disastro evitabile? La questione è affrontata suddividendola in due parti:

- nella prima, a partire dai soli dati disponibili prima dell'avvenimento franoso, si fa una previsione del volume di roccia mobilitabile;
- nella seconda, si effettua una back-analysis per stimare la situazione dell'ammasso roccioso al momento del crollo, al fine di ipotizzare le cause della rottura basandosi sull'osservazione di quanto accaduto e sulle dichiarazioni post-evento di alcuni esperti.

6.1. Previsione della frana

Nel 2008 l'Università di Genova analizza il tratto di falesia sottostante il cimitero di Camogli, già in evidente propensione al dissesto, rilevando criticità in termini di cedimenti ed inclinazione degli elementi più prossimi all'orlo della scarpata, a quei tempi ad una distanza dallo stesso inferiore a 2 m (Faccini et al., 2008). Dallo stesso studio emerge la sottoescavazione del cordolo in calcestruzzo armato del muro perimetrale esterno del cimitero, direttamente esposto sulla falesia: si attribuisce tale fenomeno alla scarsa regimazione delle acque superficiali. Si assegna, inoltre, un rischio elevato a quel settore di falesia e si preannuncia il parziale crollo dei manufatti della parte sud-occidentale del cimitero, attribuendolo all'arretramento costiero. Tuttavia, non si predice la formazione di un cuneo potenzialmente instabile, evidente già in una foto scattata nel 2005 (Figura 136). In particolare, si sarebbero potute notare due discontinuità subverticali e un piano basale suborizzontale, delimitanti un blocco di grosse dimensioni. Su quest'ultimo è effettuata un'analisi di stabilità solo durante il presente lavoro di tesi.



Figura 136. Immagine risalente al 2005 della porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli (Lucchetti et al., 2014; parzialmente modificata).

Il profilo stratigrafico della zona è desunto da due prove penetrometriche dinamiche e da un rilievo in superficie, entrambi condotti nel 2008: uno strato di terreno sciolto, di spessore compreso tra 2 e 2.5 m, si sovrappone al basamento lapideo, rappresentato da calcari marnosi mediamente fratturati (Sivori, 2008). Dato lo spessore della copertura sciolta sovrastante, il modello geomeccanico di riferimento può essere ricondotto ad un continuo equivalente, ad eccezione delle tre discontinuità principali, inserite nei software usati per l'analisi di stabilità come strati di materiale a minore resistenza. I parametri di resistenza del basamento roccioso, secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, e il suo peso di volume sono riportati in Tabella 3.

	<i>Basamento roccioso</i>
<i>Angolo di attrito (°)</i>	46
<i>Coesione (kPa)</i>	51
<i>Resistenza a trazione (kPa)</i>	-10
<i>Peso di volume (kN/m³)</i>	26

Tabella 3. Sintesi delle caratteristiche del basamento roccioso (Sivori, 2008).

6.1.1. Inclinazione e traccia sul fronte delle discontinuità

Avendo a disposizione un rilievo fotogrammetrico da drone effettuato prima dell'evento franoso del 2021, precisamente nel mese di luglio 2020, è ricavata tramite il software 3DF Zephyr la nuvola di punti della falesia di cui sopra, in modo da ottenere quelle misure di angoli e distanze indispensabili ai fini dell'analisi di stabilità e non presenti nelle relazioni geologiche analizzate.

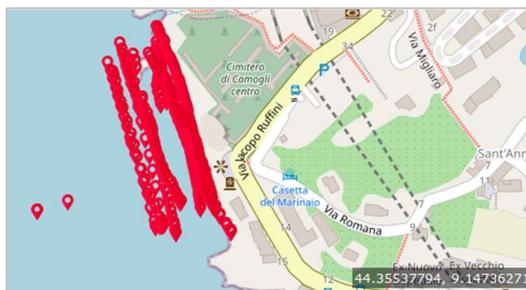


Figura 137. Impianto generale del rilievo fotogrammetrico da drone, risalente al mese di luglio 2020.

In 3DF Zephyr è possibile ricostruire modelli 3D a partire da fotografie: si tratta di un processo completamente automatico, elaborato dalla *software house* italiana 3DFlow. Il lavoro di ricostruzione si suddivide in tre fasi principali:

- creazione di un nuovo progetto con orientamento delle fotocamere;
- generazione del modello 3D;
- estrazione di una mesh con texture.

Durante la prima fase, il software estrae le posizioni e gli orientamenti delle fotocamere, compresi i relativi parametri interni come la lunghezza focale (distanza, espressa in mm, tra la lente dell'obiettivo e il sensore sul quale si registra l'immagine).

Successivamente, è generato il modello 3D attraverso due fasi:

- estrazione di una nuvola di punti densa, a partire dalla densificazione della nuvola di punti sparsa (insieme di un certo numero di punti dell'oggetto, definiti dalle tre coordinate spaziali X, Y e Z);
- estrazione di una mesh, ossia di una superficie costituita da poligoni, i cui vertici sono i punti della nuvola densa.

Dopo aver creato la mesh, il software la texturizza, ossia bilancia i colori dei suoi poligoni sfruttando i colori delle immagini del rilievo fotografico.

Prima di effettuare le dovute misurazioni, sono scelti sulla scena 3D dei punti di controllo rappresentativi del blocco da analizzare: in particolare, i suoi estremi superiori e inferiori e due punti per individuare sia l'altezza della falesia in prossimità del cimitero che l'inclinazione del fronte. Il programma restituisce la lunghezza di controllo, ossia la

distanza tra due punti di controllo selezionati, corredata dell'inclinazione del segmento che li collega. Quest'ultimo altro non è che la traccia di ogni sistema di discontinuità presente.

I risultati ottenuti in 3DF Zephyr sono visibili in Figura 138 e presenti in Tabella 4. Per comodità, la discontinuità subverticale più ad ovest è denominata K1, mentre quella più ad est K2.

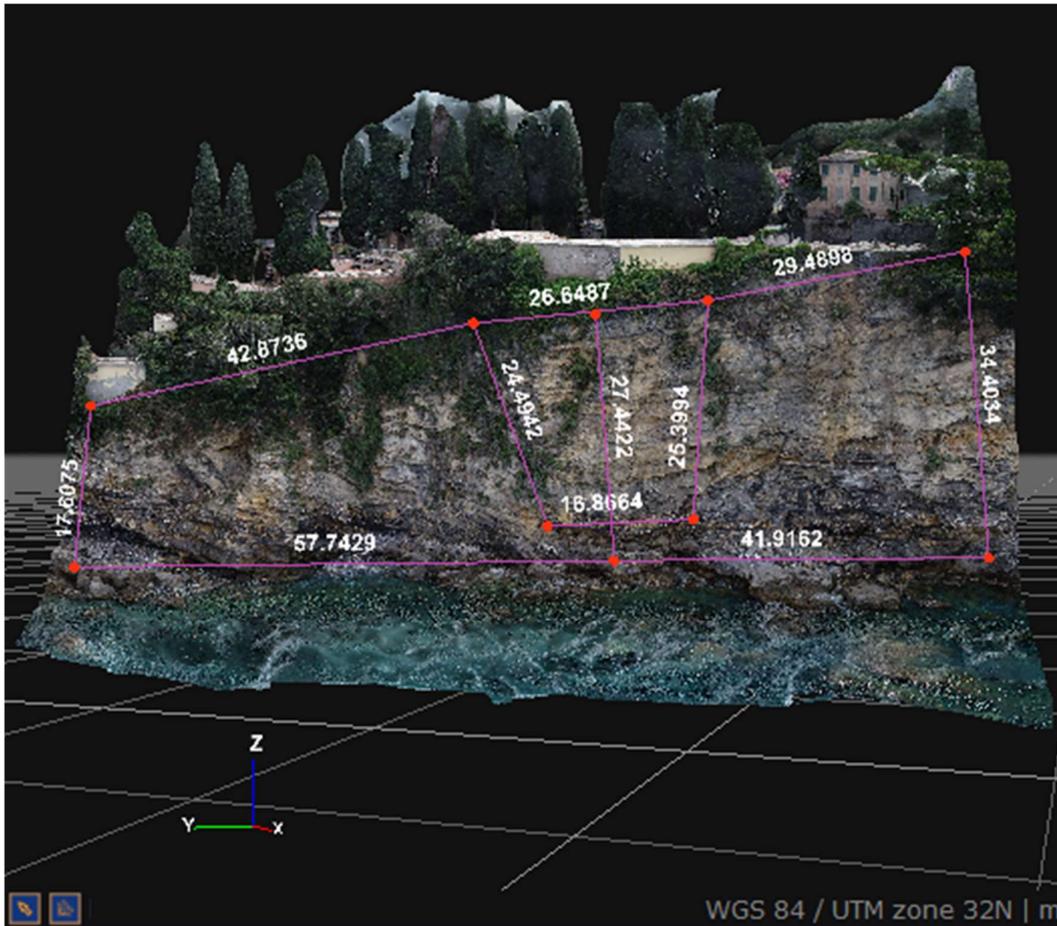


Figura 138. Misure, relative alla falesia di Camogli, ottenute mediante il software 3DF Zephyr.

Per quanto riguarda le direzioni di immersione, sono approssimativamente note quelle delle due discontinuità subverticali (Faccini et al., 2008): K1 immerge a NW-SE, mentre K2 a NNE-SSW. Non essendo conosciuta la direzione di immersione né del piano basale, né del fronte della falesia, né del piano sommitale del blocco (orizzontale in prima approssimazione), si ipotizza che essa sia uguale a 170° per tutti e tre i piani.

	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>Piano basale</i>	<i>Fronte</i>	<i>Piano sommitale</i>
<i>Traccia sul fronte (m)</i>	24.5	25.4	16.9	-	-
<i>Inclinazione (°)</i>	69	78	2	82	0
<i>Direzione di immersione (°)</i>	135	203	170	170	170
<i>Altezza della falesia (m)</i>	28				

Tabella 4. Significativi aspetti geometrici relativi alla porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli.

A partire dalle informazioni pre-frana contenute in Tabella 4, è stato costruito in AutoCAD un modello 3D semplificato della falesia (Figura 139), al fine di:

- capire se si potesse formare un blocco grossolanamente cuneiforme dotato di piano basale, date le giaciture dei tre piani di discontinuità principali caratterizzanti l'ammasso;
- avere a disposizione una sezione rappresentativa della falesia, sulla quale condurre l'analisi di stabilità bidimensionale (in "Slide2");
- condurre un'analisi di stabilità tridimensionale (in "Slide3").

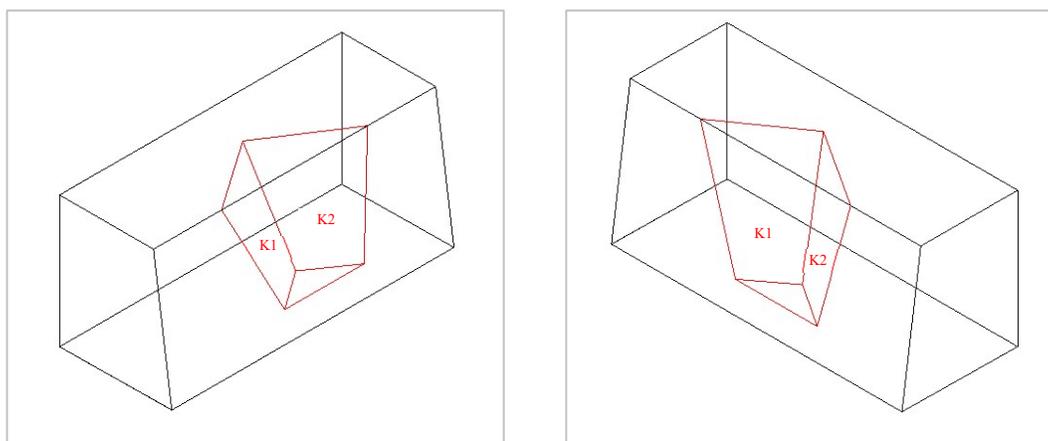


Figura 139. Previsione del volume di roccia mobilitabile (in rosso) relativo alla falesia di Camogli. A sinistra: vista SO assonometrica; a destra: vista SE assonometrica.

Ne risulta che si sarebbe dovuta prevedere la formazione di un blocco, di altezza pari a 22 m e volume di circa 2200 m³, la cui stabilità è valutata come spiegato nelle seguenti righe.

6.1.2. Metodi all'equilibrio limite per valutare la stabilità della falesia

I metodi più diffusi per l'analisi di stabilità dei pendii sono quelli all'equilibrio limite, i quali prevedono la validità delle seguenti ipotesi per l'ammasso roccioso:

- comportamento rigido-perfettamente plastico;
- rottura lungo una superficie di geometria nota;

La prima delle suddette ipotesi implica l'indipendenza dell'analisi da qualsiasi tipo di processo deformativo che precede la fase di rottura, non essendo a disposizione un legame costitutivo, più realistico di quello rigido-perfettamente plastico, che tenga conto del comportamento effettivo del materiale. Per lo stesso motivo, non è possibile indagare le condizioni post-rottura dell'ammasso roccioso. La massa in frana è, sostanzialmente, un blocco indeformato in moto di roto-traslazione rigida su una certa superficie di rottura.

Nell'ambito dei metodi all'equilibrio limite bidimensionale, spesso si ricorre ai cosiddetti "metodi dei conci" o "metodi delle strisce": dopo aver scelto una o più sezioni longitudinali del pendio in base alla linea di massima pendenza e/o alla presenza di piani di discontinuità, la massa potenzialmente instabile viene suddivisa in n conci ed è analizzato l'equilibrio di ciascuno di essi.

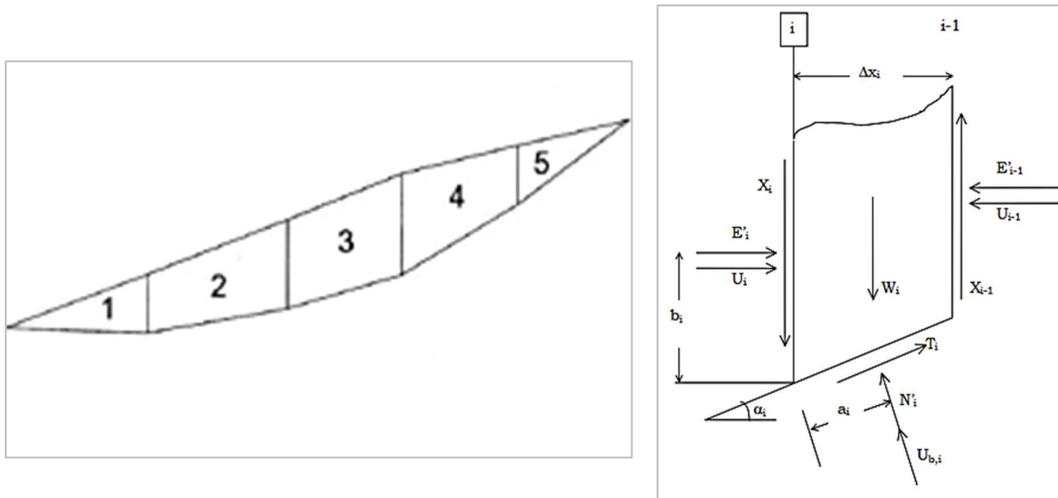


Figura 140. A sinistra: suddivisione del blocco potenzialmente instabile in conci; a destra: forze agenti sull' i -esimo concio (Facciorusso et al., 2011).

Sul concio i -esimo, di larghezza Δx_i , peso W_i ed inclinazione α_i sull'orizzontale, agiscono le seguenti forze:

- E'_i (applicata ad una quota b_i rispetto alla superficie di scorrimento) e X_i , ossia le componenti normale e tangenziale della forza mutua tra i conci;
- U_i , risultante delle pressioni interstiziali sulla superficie di separazione dei conci i e $(i+1)$;
- N'_i (distante a_i dallo spigolo anteriore del concio) e T_i , ovvero le componenti normale e tangenziale della reazione di appoggio del concio sulla superficie di scorrimento;
- $U_{b,i}$, risultante delle pressioni interstiziali alla base del concio.

Si ammette che il fattore di sicurezza FS sia uguale per tutti i conci e pari a:

$$FS = \frac{c_i \cdot \Delta l_i + N'_i \cdot \tan \varphi_i}{T_i}$$

essendo:

- c_i e φ_i , rispettivamente, la coesione e l'angolo di attrito dell' i -esimo concio;
- $\Delta l_i = \frac{\Delta x_i}{\cos \alpha_i}$.

Note le caratteristiche geometriche e geotecniche sia del pendio che dell' i -esimo concio, le forze U_i , $U_{b,i}$ e W_i sono facilmente determinabili. La forza di taglio T_i non è un'incognita indipendente del problema: essa dipende dalle due incognite indipendenti FS e N'_i , come si può notare dalla precedente equazione. Il bilancio del numero delle incognite e delle equazioni di equilibrio (rispettivamente alla traslazione verticale, alla traslazione orizzontale ed alla rotazione) è sintetizzato in Tabella 5.

<i>Incognite</i>		<i>Equazioni di equilibrio</i>	
1	FS	n	$\Sigma V = 0$
n	N'_i	n	$\Sigma H = 0$
n-1	E'_i	n	$\Sigma M = 0$
n-1	X'_i		
n	a_i		
n-1	b_i		
n. tot.	5n-2	3n	

Tabella 5. Bilancio del numero delle incognite e delle equazioni di equilibrio per il metodo dei conci (Facciorusso et al., 2011).

Il numero delle incognite, $(5n-2)$, risulta superiore al numero delle equazioni di equilibrio, uguale a $3n$: il problema è dunque indeterminato. Per risolverlo, è necessario introdurre ulteriori ipotesi semplificative, diverse a seconda del metodo di analisi adottato. Ne consegue che, a parità di geometria del problema e di caratteristiche dell'ammasso roccioso, il risultato in termini di fattore di sicurezza dipende dal metodo scelto.

Nel seguito ci si limita ad illustrare due metodi, presenti nei software utilizzati per l'analisi di stabilità sia bidimensionale che tridimensionale, che adottano superfici di scivolamento di forma qualsiasi: si tratta dei metodi di Janbu semplificato e generalizzato.

Il primo si basa sull'assunzione che sui lati comuni dei conci non agiscano le forze di taglio interstriscia X_i e X_{i+1} , perché trascurabili. Dall'equazione di equilibrio alla traslazione verticale ed in funzione del fattore di sicurezza, sono ricavate le forze agenti alla base del concio i -esimo, ossia la forza normale N'_i e la forza tangenziale T_i . Dall'equilibrio in direzione orizzontale è infine dedotta la formula di FS:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i \cdot \Delta x_i + (W_i - U_{bi} \cdot \cos \alpha_i) \cdot \tan \varphi_i] \cdot \frac{1}{n_{\alpha i}}}{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \tan \alpha_i)}$$

essendo:

$$n_{\alpha i} = \left(\cos \alpha_i + \frac{1}{FS} \cdot \sin \alpha_i \cdot \tan \varphi_i \right) \cdot \cos \alpha_i$$

Il calcolo del fattore di sicurezza segue una procedura iterativa, partendo da un valore di primo tentativo pari a 1.

Il metodo di Janbu generalizzato, invece, tiene conto di tutte le forze di interazione dei conci, ma fissa la posizione della linea di spinta (Figura 141), ossia la distanza tra la superficie di scivolamento ed il punto di applicazione della risultante delle forze interstriscia.

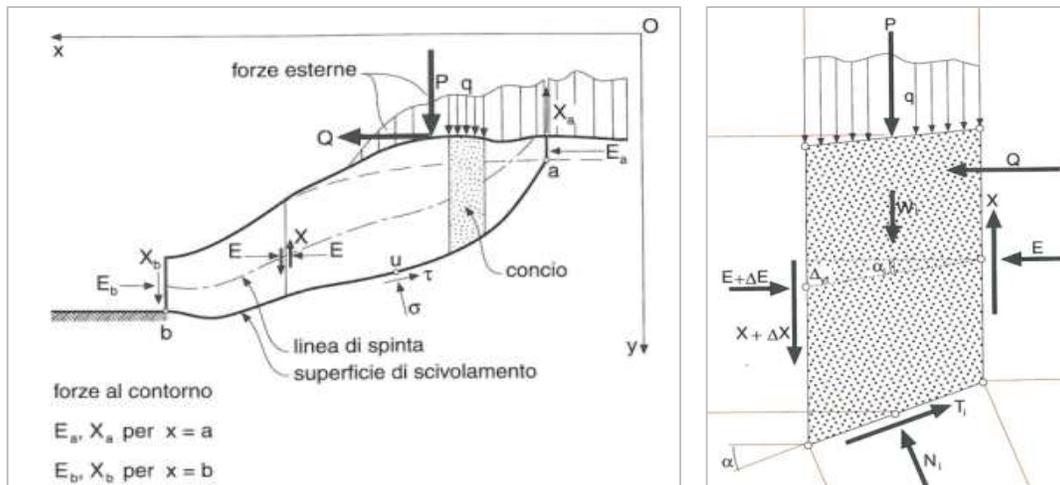


Figura 141. A sinistra: visualizzazione della linea di spinta; a destra: forze agenti sul concio i -esimo per il metodo di Janbu generalizzato (Colombo et al., 1996).

6.1.2.1. Codice di calcolo “Slide2”

L'analisi di stabilità effettuata in 2D è riferita alla sezione di falesia rappresentata in Figura 144, ricavata dal modello AutoCAD di Figura 139 e corrispondente alla sezione longitudinale in asse al blocco potenzialmente instabile. Essa è esportata da AutoCAD come DXF e importata in Slide2 nello stesso formato: un insieme di polilinee è poi trasformato, all'interno del software, nel modello vero e proprio da analizzare, come spiegato nel seguito.

Il primo contorno da definire è quello esterno (“External Boundary”): generalmente, il segmento superiore che lo costituisce rappresenta la superficie del pendio che si sta analizzando ed è compreso di default tra due limiti. Questi ultimi hanno il compito di scartare tutte quelle superfici di scivolamento che non intercettano il segmento da loro delimitato, come mostrato in Figura 143.

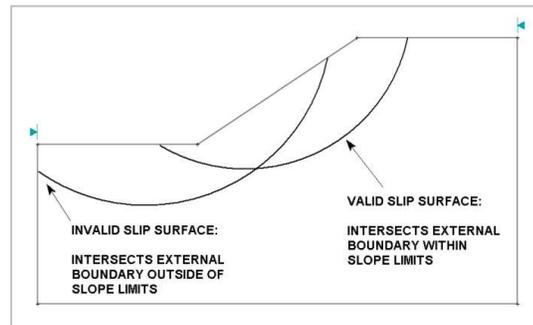


Figura 143. Funzione dei limiti del pendio in Slide2. Immagine tratta da: <https://www.roscience.com>

Slide2 non possiede un'opzione specifica per l'inserimento delle discontinuità. Tuttavia, è possibile modellarle come “Weak Layer”, ovvero strati sottili di materiale avente le stesse caratteristiche di resistenza delle discontinuità. In corrispondenza dei due strati deboli introdotti, uno relativo al piano basale e l'altro alla linea di intersezione tra K1 e K2, è stata inserita la superficie di scivolamento non circolare. Slide2 l'ha riconosciuta tramite il metodo “Block Search”, che prevede l'immissione, da parte dell'utente nel modello, di un blocco di ricerca all'interno del quale il software individuerà le possibili superfici di rottura.

Oltre alle informazioni geometriche, i dati di input indispensabili per il calcolo del fattore di sicurezza sono:

- la resistenza a trazione dell'ammasso roccioso e il relativo peso di volume (Tabella 3);
- i parametri di resistenza dei piani di discontinuità (coesione ed angolo di attrito, se, come in questo caso, si sceglie il criterio di rottura di Mohr-Coulomb);
- la pressione dell'acqua;
- le forze e/o pressioni esterne.

Dalle relazioni geologiche redatte nel corso degli anni ed antecedenti alla frana avvenuta nel 2021, sono state ricavate le informazioni necessarie a condurre un'analisi di stabilità che fosse il più verosimile possibile. Sono state fatte delle assunzioni per tutte quelle situazioni, trattate nelle seguenti righe, mancanti di dati fondamentali.

In merito all'ultimo dei parametri di input sopra elencati, è stata considerata una pressione di 1 ton/m^2 esercitata dal cimitero sul piano sommitale del blocco potenzialmente instabile. Non avendo informazioni precise a riguardo, si tratta di un dato approssimativo e cautelativo al tempo stesso.

Non sono stati considerati, invece, gli interventi di difesa e stabilizzazione, in quanto inefficaci per i seguenti motivi:

- rete in aderenza notevolmente scostata dal fronte roccioso e contenente sacche di detrito derivante dai crolli continui nel tempo (*Sivori, 2020*);
- ancoraggi, in alcuni casi sfilati dal foro, non in grado di garantire una corretta adesione della rete al fronte (*Sivori, 2020*).

Per quanto riguarda i parametri di resistenza, alle discontinuità è attribuito un valore di angolo di attrito oscillante tra 38° e 40° : si tratta di valori cautelativi, che riflettono l'incertezza e la variabilità delle reali condizioni dei giunti (*Robbiano, 2015*). È stato scelto, come nel caso del *bedrock*, il criterio di rottura di Mohr-Coulomb: un angolo di attrito di 38° e una coesione nulla sono stati assegnati a tutte le discontinuità presenti.

Il substrato roccioso risulta permeabile in corrispondenza delle fratture; la falda si attesta ad una profondità di circa 8-10 m dal p.c., variabile a seconda sia del regime pluviometrico della zona che delle oscillazioni del livello marino (*Faccini et al., 2008*). Per il calcolo delle pressioni interstiziali in corrispondenza delle discontinuità, si è scelto, a favore di sicurezza, di posizionare la falda a 8 m dal piano campagna.

In tal senso, è stata inserita una griglia delle pressioni ("Water Pressure Grid") tenendo conto della distribuzione triangolare mostrata in Figura 144, dunque assegnando:

- un valore nullo di pressione al punto della linea di intersezione direttamente a contatto con la falda e a quello del piano basale giacente sul fronte;
- un valore massimo di pressione pari a 135 kPa al punto più distante dalla falda (ad una quota di 13.8 m dalla stessa), appartenente contemporaneamente alla linea di intersezione e al piano basale. Tale valore deriva dal prodotto del peso di volume dell'acqua (9.81 kN/m^3) per l'altezza della colonna d'acqua sovrastante il punto (13.8 m).

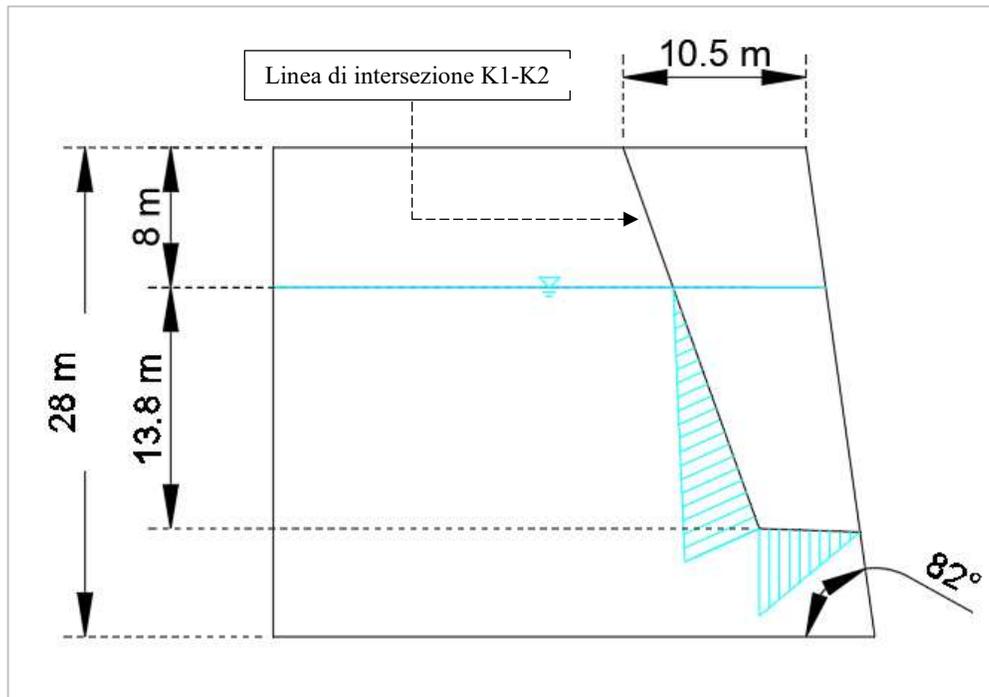


Figura 144. Distribuzione delle pressioni interstiziali scelta per le discontinuità.

Il modello che ne deriva in Slide2 è raffigurato nella seguente figura.

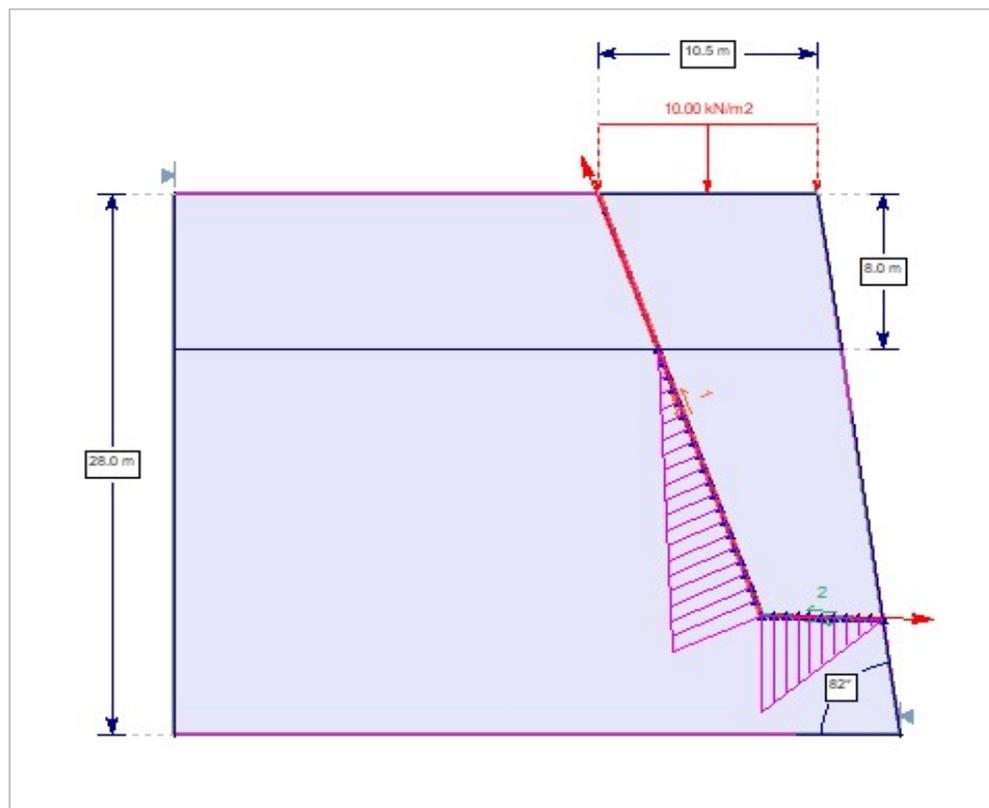


Figura 145. Modello sul quale è stata effettuata l'analisi di stabilità in Slide2.

Tra i risultati di Slide2 è disponibile la superficie di scivolamento avente il più basso fattore di sicurezza tra tutte le superfici esaminate. È da sottolineare che FS sarà differente per ogni metodo di analisi scelto (Janbu semplificato e Janbu generalizzato).

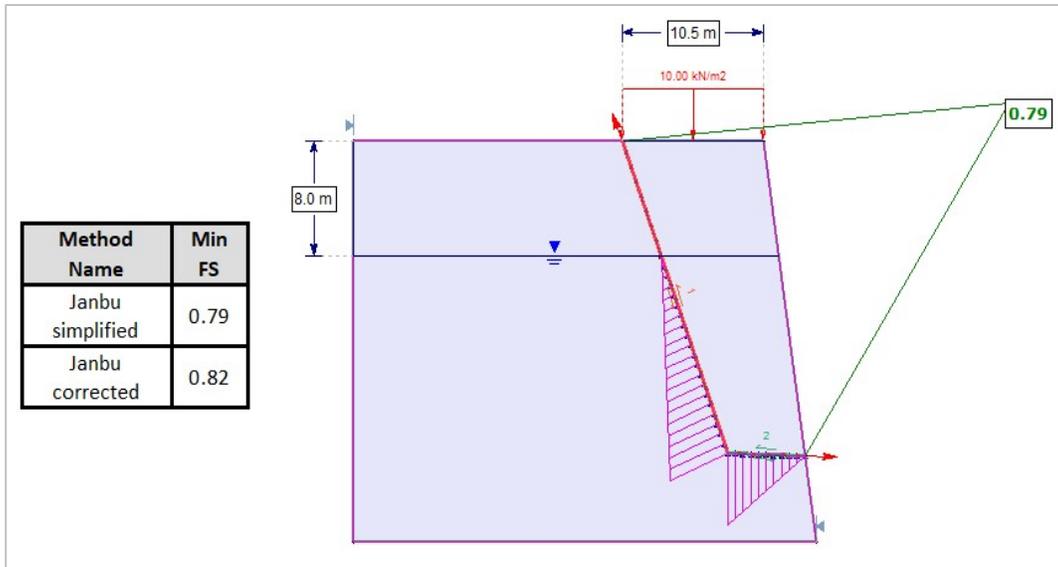


Figura 146. Risultato dell'analisi di stabilità condotta in Slide2.

In ogni caso, ne deriva un fattore di sicurezza minore di 1 (Figura 146), che testimonia la presenza di un blocco instabile di grosse dimensioni, formatosi molto prima del 2021, che avrebbe sicuramente coinvolto il sovrastante cimitero. Dall'analisi appare, infatti, una distanza della superficie di rottura dall'orlo della falesia di circa 10.5 m, maggiore della distanza dallo stesso dei loculi più esterni. Quest'ultima risultava inferiore a 2 m già nel 2008, secondo lo studio dell'Università di Genova sopracitato.

Cosa si sarebbe potuto fare, dunque, per evitare il distacco del blocco? Nel seguito è proposto un intervento stabilizzante, che, se fosse stato installato prima di febbraio 2021, avrebbe incrementato sostanzialmente il fattore di sicurezza della falesia.

6.1.2.2. Codice di calcolo “Slide3”

Al fine di confrontare i risultati dell'analisi di stabilità bidimensionale, appena condotta, con quelli derivanti da un'analisi di stabilità 3D, è utilizzato un ulteriore software della casa di sviluppo Rocscience: Slide3.

Il calcolo del nuovo fattore di sicurezza è effettuato sul modello tridimensionale della falesia di Figura 139, esportato come DXF 3D da AutoCAD e importato in Slide3 nello stesso formato: un insieme di polilinee è poi trasformato, all'interno del software, nel modello vero e proprio da analizzare (Figura 147), come spiegato nel seguito.

La procedura seguita è la stessa usata in Slide2, con le seguenti differenze:

- il contorno esterno da impostare è tridimensionale, motivo per il quale lo si è definito mediante l'estrusione di una sezione della falesia;
- i "Weak Layers", da introdurre in corrispondenza delle tre discontinuità principali, sono piani e non linee;
- la superficie di scivolamento, definita dall'utente ("User-Defined Surface"), è multi-planare e non più una polilinea, cioè è data dall'unione di K1, K2 ed il piano basale.

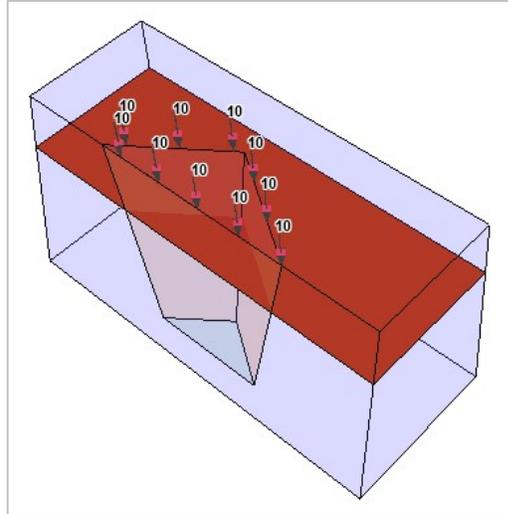


Figura 147. Modello sul quale è stata effettuata l'analisi di stabilità in Slide3; il piano in rosso rappresenta la falda posizionata a 8 m dal piano campagna.

I dati di input relativi ai materiali (in termini di resistenza a trazione, coesione ed angolo di attrito), alle pressioni esterne e a quelle esercitate dall'acqua sono gli stessi inseriti in Slide2.

Il risultato dell'analisi è riportato in Figura 148. Risulta, coerentemente con il caso bidimensionale, un fattore di sicurezza minore di 1, che avrebbe dovuto spingere gli esperti, coinvolti nello studio della falesia di Camogli durante gli anni precedenti al verificarsi della frana, a progettare ed installare un'opera stabilizzante. Si propone, nel presente capitolo, un intervento di tirantatura, la cui geometria è esplicitata in Figura 149 e le cui proprietà scelte, al fine di ottenere un incremento soddisfacente del fattore di sicurezza, sono riassunte in Tabella 6.

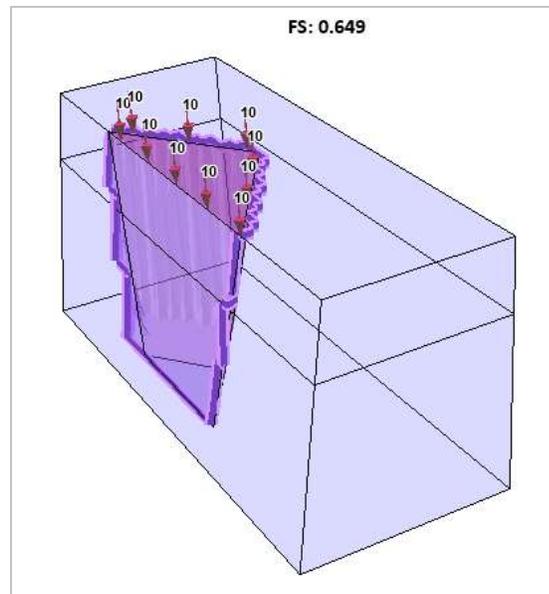


Figura 148. Risultato dell'analisi di stabilità condotta in Slide3; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.

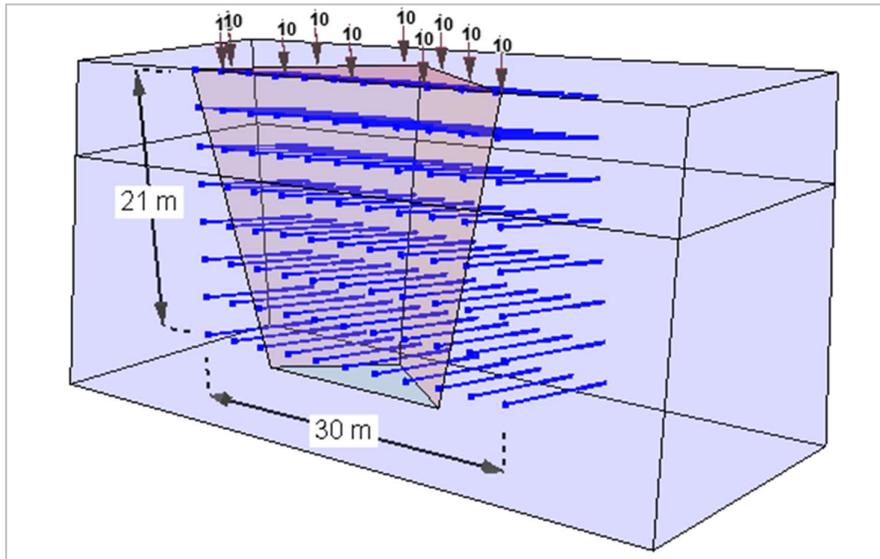


Figura 149. Schema dell'intervento di tirantatura scelto in Slide3.

	<i>Tipo</i>	<i>Lunghezza (m)</i>	<i>Percentuale della lunghezza iniettata (%)</i>	<i>Tiro (kN)</i>
<i>Ancoraggio</i>	Tirante iniettato	12	30	250

Tabella 6. Caratteristiche dell'intervento di tirantatura.

Un sistema dei suddetti tiranti a maglia 3m x 3m fa sì che il fattore di sicurezza della falesia passi da 0.65 (Figura 148) a 1.32 (Figura 150): n.11 tiranti in direzione orizzontale e n.8 tiranti in direzione verticale avrebbero evitato lo scivolamento del blocco.

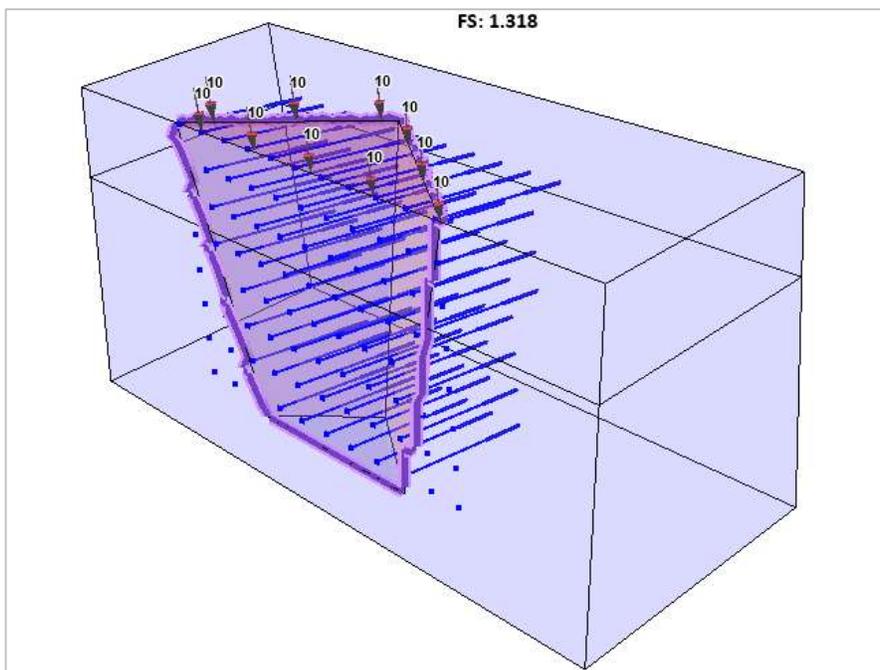


Figura 150. Risultato dell'analisi di stabilità, condotta in Slide 3, considerando l'intervento di tirantatura; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.

6.2. Back-analysis della frana

Data una nota o assunta superficie di scivolamento, una back-analysis può essere condotta per determinare o stimare le condizioni di un ammasso roccioso al momento della rottura.

Da una foto post-evento (Figura 151) si nota come il settore di falesia crollato sia delimitato dalle discontinuità principali individuate nella foto pre-evento (Figura 136). L'unica differenza sarebbe lo svincolo posteriore del blocco distaccatosi, che taglia perpendicolarmente i giunti orizzontali di stratificazione: ciò suggerisce come l'evoluzione del fenomeno abbia implicato processi di neo-fratturazione



Figura 151. Immagine della frana che ha interessato la porzione di falesia sottostante il cimitero di Camogli (CIMA Research Foundation, 2021).

della roccia intatta. In altri termini, le due discontinuità subverticali preesistenti non si intersecavano all'interno dell'ammasso roccioso fino a dare luogo ad una linea di intersezione, bensì si interrompevano ad una distanza dal fronte di 5.6 m (come si può notare dal sopralluogo post-frana di Figura 152). In tal caso, è dimostrato che la propagazione della frattura è verticale ed avviene per trazione agli apici delle discontinuità preesistenti (Scavia, 1995).



Figura 152. Dimensioni del fronte della frana e del sottostante accumulo detritico (CIMA Research Foundation, 2021).

In Figura 153 è riportata la ricostruzione geometrica tridimensionale di quanto descritto. Si sottolinea come la frattura verticale sia stata introdotta nel modello 3D della falesia con la stessa direzione di immersione del fronte, riportata in Tabella 4 insieme alle giaciture degli altri piani caratterizzanti l'ammasso roccioso.

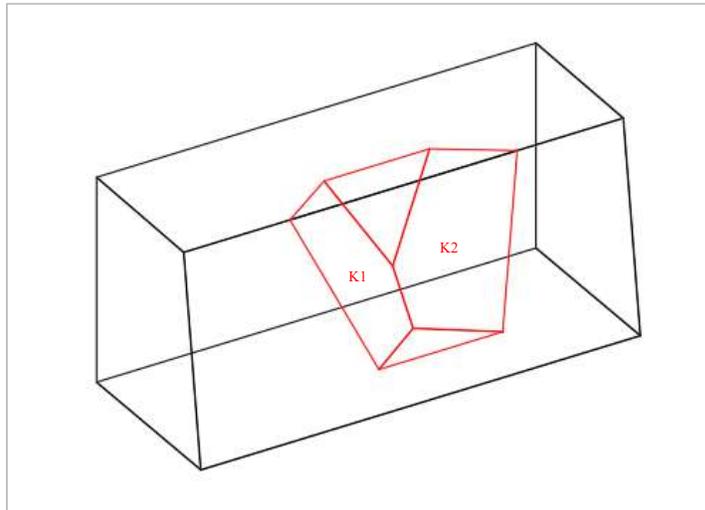


Figura 153. Ricostruzione geometrica tridimensionale della falesia di Camogli al momento del crollo.

6.2.1. Codice di calcolo “Slide2”

Slide2 è stato riutilizzato per condurre una back-analysis della frana sulla sezione di falesia di Figura 154, che include la presenza della frattura subverticale non preesistente di cui sopra. Quest'ultima, come già accennato, si sarebbe creata durante lo scivolamento del blocco; pertanto, è verosimile che fosse asciutta e caratterizzata dagli stessi parametri di resistenza del basamento roccioso (Tabella 3).

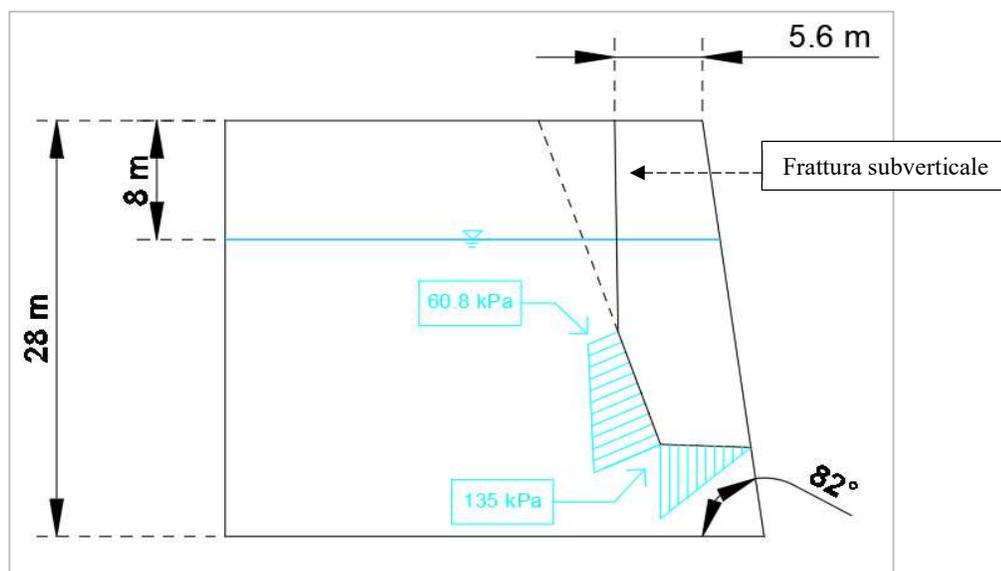


Figura 154. Sezione di falesia sulla quale è stata effettuata una back-analysis della frana in Slide2; falda a 8 m del piano campagna; la frattura asciutta non preesistente tronca la distribuzione delle pressioni interstiziali, precedentemente ipotizzata triangolare, relativa alla linea di intersezione K1-K2.

I dati di input per Slide2 sono gli stessi della precedente analisi di stabilità, con le sole due seguenti differenze:

- è stata aggiunto al modello un ulteriore “Weak Layer”, avente inclinazione sull’orizzontale di 89° (misurata in senso antiorario a partire dalla strato debole) e rappresentante la nuova frattura;
- è stata modificata la superficie di scivolamento, in modo che comprendesse non solo il piano basale e la linea di intersezione K1-K2, bensì anche la discontinuità non preesistente.

In merito alla prima differenza, è stata scelta un’inclinazione leggermente diversa da 90° perché il software presenta problemi di instabilità numerica qualora la superficie di scivolamento, definita dall’utente, sia inserita in un *weak layer* perfettamente verticale. Come mostrato in Figura 155, è risultato un fattore di sicurezza di 1.10, che non giustificerebbe la rottura avvenuta, in quanto maggiore di 1.

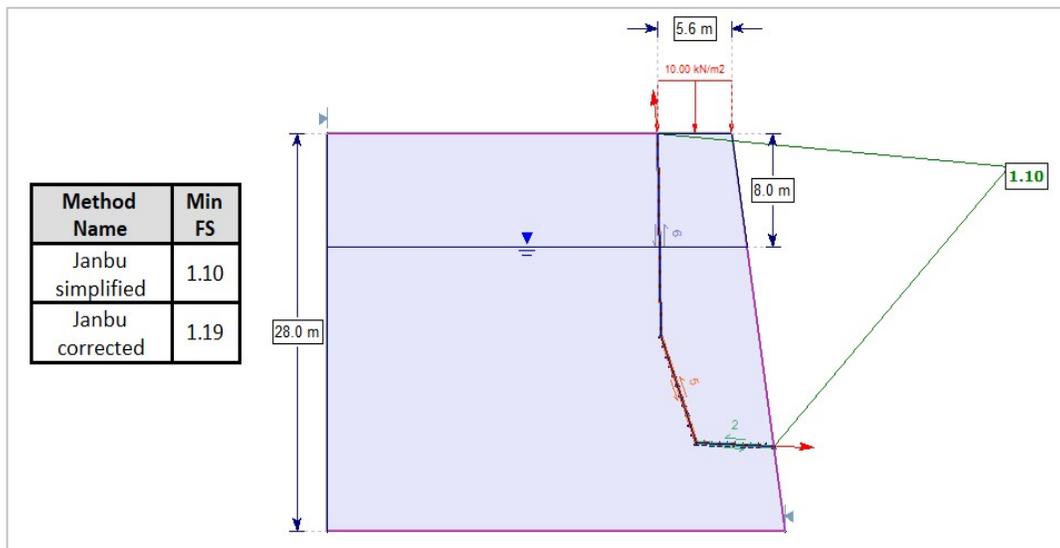


Figura 155. Fattore di sicurezza della falda adottando una resistenza a trazione del basamento roccioso e della frattura subverticale non preesistente di 10 kPa; falda posizionata a 8 m dal piano campagna.

Si è pensato, allora, di dimezzare la resistenza a trazione del basamento roccioso e, di conseguenza, quella della frattura subverticale non preesistente, al fine di comprendere l’influenza di tale parametro sul fattore di sicurezza della falda.

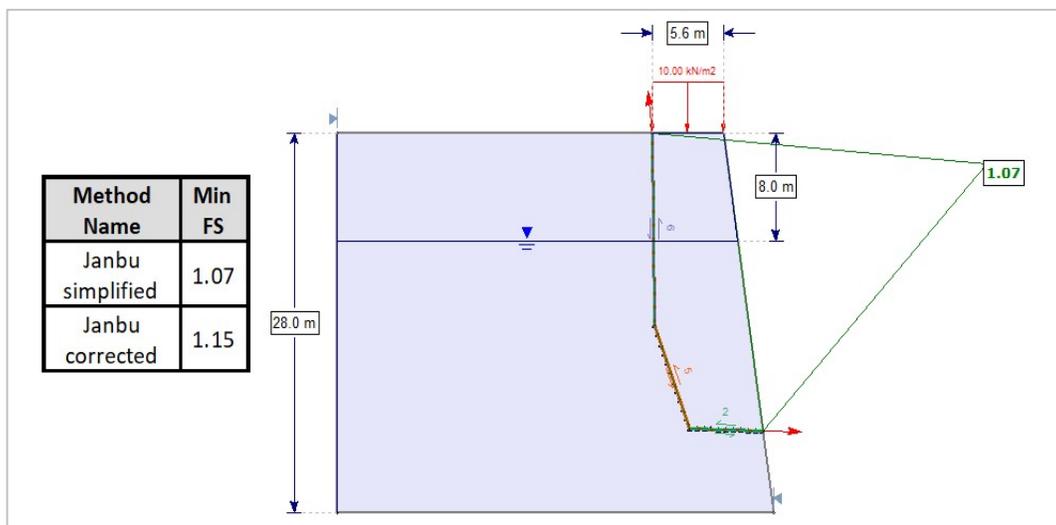


Figura 156. Fattore di sicurezza della falesia adottando una resistenza a trazione del basamento roccioso e della frattura subverticale non preesistente di 5 kPa; falda posizionata a 8 m dal piano campagna.

Il risultato dell'analisi (FS ancora maggiore di 1, come riportato in Figura 156) ha spinto a riflettere sulla possibilità che, più che i parametri di resistenza della frattura subverticale, ad influenzare negativamente la stabilità del blocco sia stato il livello della falda. Tale conclusione sarebbe giustificata anche da una dichiarazione del geologo Faccini successiva alla frana, secondo la quale le mareggiate e le forti piogge tra dicembre 2020 e gennaio 2021 avrebbero potuto causare il crollo (Faccini, 2021).

Considerando una falda posizionata a 4 m dal piano campagna, anziché ad 8 m come inizialmente ipotizzato, il fattore di sicurezza diventa molto prossimo ad 1 (Figura 157): ciò spiegherebbe il cinematiso verificatosi. In altri termini, un innalzamento della falda di 4 m potrebbe essere stata la causa della rottura avvenuta nel febbraio 2021.

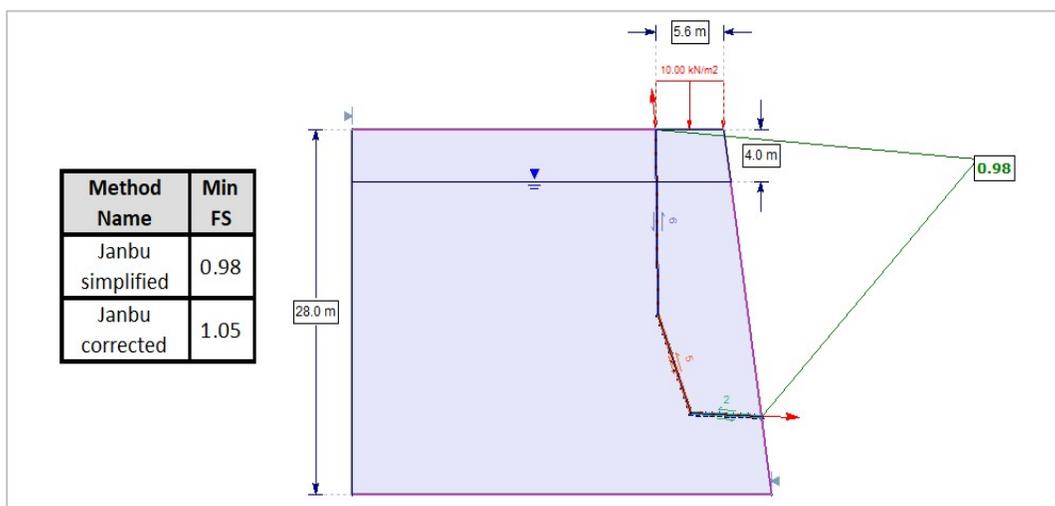


Figura 157. Fattore di sicurezza della falesia adottando una resistenza a trazione del basamento roccioso e della frattura subverticale non preesistente di 10 kPa; falda posizionata a 4 m dal piano campagna.

La distribuzione delle pressioni interstiziali adottata per la back-analysis di Figura 157 è rappresentata in Figura 158: essa è calcolata come già specificato nel capitolo relativo alla fase di previsione della frana e tiene conto, ancora una volta, dell'ipotesi che la frattura subverticale fosse asciutta.

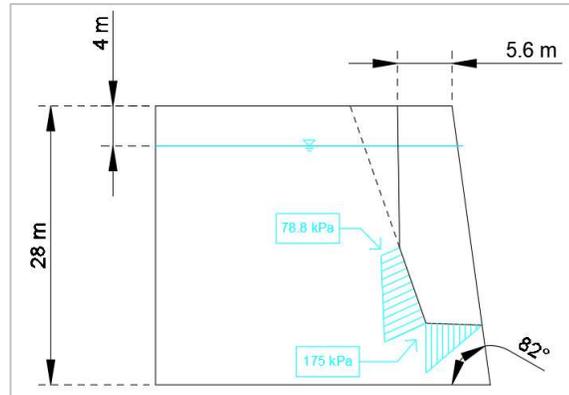


Figura 158. Distribuzione delle pressioni interstiziali sulle discontinuità per una falda posizionata a 4 m del piano campagna.

6.2.2. Codice di calcolo “Slide3”

È lecito, a questo punto, chiedersi se l'intervento di tirantatura proposto in 6.1.2.2 avrebbe stabilizzato anche il blocco dotato di frattura subverticale non preesistente, soggetto ad una falda posizionata a 4 m dal piano campagna. La risposta è affermativa: come mostrato nelle seguenti figure, si ha un incremento del fattore di sicurezza della falesia da 0.81 a 1.41.

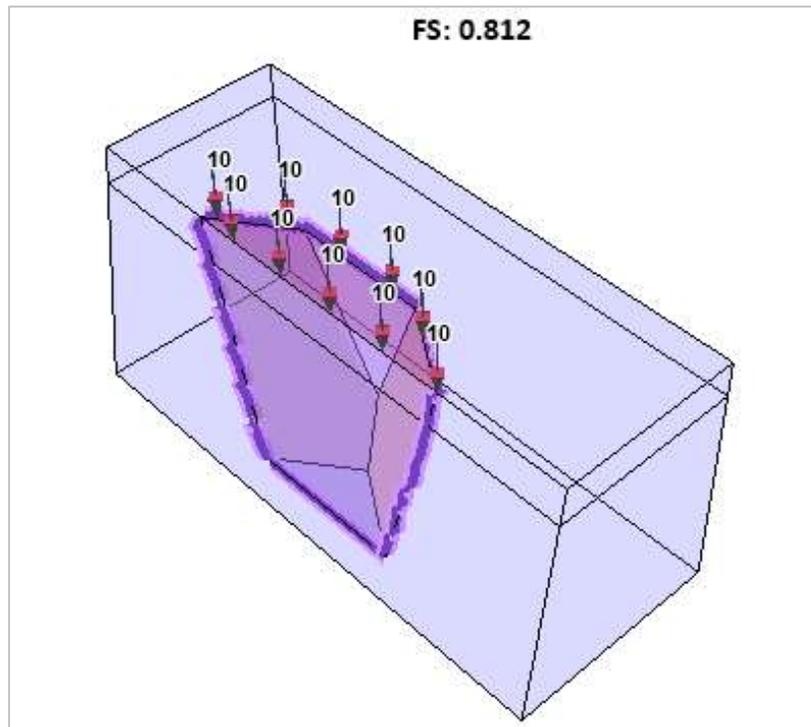


Figura 159. Fattore di sicurezza della falesia senza intervento di tirantatura; falda a 4 m dal piano campagna; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.

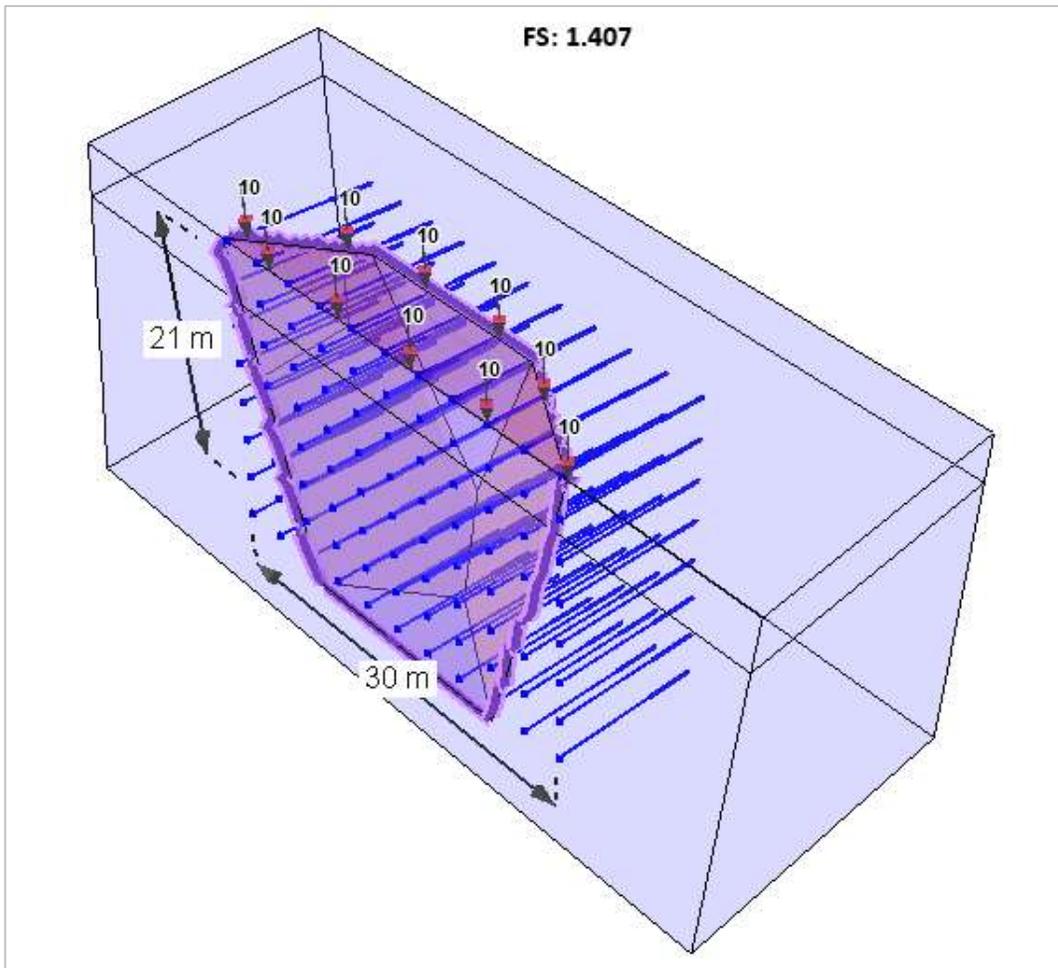


Figura 160. Fattore di sicurezza della falesia dotata di intervento di tirantatura; falda a 4 m dal piano campagna; FS calcolato secondo il metodo di Janbu semplificato.

7. Conclusioni

Viste le condizioni di instabilità delle falesie liguri, sarebbe opportuno bloccare, o quantomeno limitare, l'antropizzazione feroce a cui esse sono soggette. Le falesie già fortemente antropizzate dovrebbero essere analizzate con cura, al fine di evitare disastri come quello che ha interessato il comune di Camogli. Nel caso si riscontrassero possibili cinematismi, si dovrebbe provvedere alla realizzazione di interventi di difesa e/o stabilizzazione efficaci. Se ciò non fosse possibile, sarebbe appropriato agire con la delocalizzazione delle opere civili dall'orlo della falesia verso l'interno o, quantomeno, con la messa in sicurezza del loro contenuto, affinché non finisca in mare.

Il caso Camogli insegna che in mancanza di ragionevoli prove geotecniche (sia in situ che di laboratorio):

- diventa piuttosto complicato procedere nell'indagine delle condizioni di stabilità delle falesie e, in generale, di qualsiasi altra tipologia di pendio;
- durante l'analisi, si tende a fare delle scelte cautelative che potrebbero condurre ad un sovradimensionamento delle opere di difesa e/o stabilizzazione.

Si consiglia, dunque, di effettuare i dovuti rilievi per poter prevedere correttamente future instabilità e per scongiurare perdite umane, oltre che economiche.

Per quanto riguarda la frana avvenuta nel mese di febbraio 2021, nel corso del presente lavoro di tesi si è giunti alle seguenti conclusioni:

- dalle sole informazioni antecedenti al crollo (in parte contenute nelle relazioni geologiche pre-frana e in parte ricavate dal rilievo fotogrammetrico da drone di luglio 2020) e assumendo, a favore di sicurezza, un'estensione delle discontinuità preesistenti all'interno del pendio pari alla loro traccia sul fronte, si sarebbe dovuta prevedere la formazione di un blocco instabile di grosse dimensioni, approssimativamente di altezza pari a 22 m e volume di 2200 m³;
- n.11 tiranti in direzione orizzontale e n.8 tiranti in direzione verticale, iniettati per il 30% della loro lunghezza (12 m) ed aventi un tiro di 250 kN, avrebbero stabilizzato il blocco in questione;
- a causare la frana sarebbe stato un innalzamento della falda di circa 4 m, provocato dalle forti piogge e mareggiate avvenute tra dicembre 2020 e gennaio 2021;
- nonostante la back-analysis sia stata effettuata su un blocco avente dimensioni e forma diverse da quelle relative alla fase di previsione, è interessante notare come l'intervento di tirantatura proposto per quest'ultima avrebbe stabilizzato anche il volume della back-analysis, impedendone il crollo.

8. Sviluppi futuri

La realizzazione di un portale online, che contenga esclusivamente la descrizione degli episodi di instabilità delle falesie costiere dall'inizio della loro formazione e che sia continuamente aggiornato, sarebbe di aiuto nella previsione dell'evoluzione degli arretramenti costieri. La variabile che rimane incerta è lo sviluppo nel tempo del moto ondoso e del livello di antropizzazione della costa italiana: ricerche approfondite in tale campo porterebbero inevitabilmente alla stesura di mappe di rischio più affidabili.

Il progetto MAREGOT, finalizzato alla prevenzione e gestione congiunta dei rischi derivanti dall'erosione costiera in Liguria, Toscana e Sardegna, dovrebbe essere esteso a tutto il territorio italiano, cercando il coinvolgimento sia degli enti politici locali che degli ambienti accademici.

Lo sviluppo di un sistema informativo per gestire al meglio la costa condurrebbe anche ad una corretta pianificazione delle attività di monitoraggio e, di conseguenza, alla giusta scelta ed ubicazione degli interventi di stabilizzazione e/o difesa.

Un punto di partenza potrebbe essere il continuo monitoraggio del grado di approfondimento e della morfologia dei solchi di battente, nonché dell'evoluzione nel tempo degli accumuli di sedimento al piede delle falesie.

I frequenti dissesti rendono necessaria, infine, la presenza di sempre più geologi e ingegneri civili e ambientali negli uffici tecnici comunali, affinché le loro conoscenze possano essere coinvolte nella protezione dei litorali.

Bibliografia

Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, 2006. *Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti*. Manuali e Linee Guida 39/2006.

Andriani G.F., Diprizio G., Fioretti G., Pellegrini V., 2015. *Aspetti naturalistici e scientifici delle grotte e delle falesie di Polignano a Mare*. 5° Congresso Nazionale “Geologia e Turismo”, Bologna, 6-7 giugno 2013.

Aringoli D., Gentili B., Materazzi M., Pambianchi G., Farabollini P., 2014. *Il ruolo della gravità nell'evoluzione geomorfologica di un'area di falesia: il caso del Monte Conero (Mare Adriatico, Italia centrale)*. Studi costieri 2014 - 22: pp. 19 – 32. Università di Camerino, Macerata.

Assandri F., 2014. *Il Promontorio di Portofino: la geologia dall'alto di una montagna affacciata sul mare*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia: pp. 17 – 30.

Bosincu et al., 2017. *Relazione generale – Piano di Protezione Civile Comunale di Valledoria*. Regione Sardegna.

Brondi et al., 2003. *Criteri e metodi per la tipizzazione costiera*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

Budetta P., De Luca C., Santo A., 2015. *Recurrent rockfall phenomena affecting the sea-cliffs of the Campania shoreline*. Rendiconti Online della Società Geologica Italiana, Vol. 35, pp. 42 – 45.

CIMA Research Foundation, Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze, 2021. *Crollo della porzione di falesia adiacente al cimitero di Camogli (GE) – Relazione di sopralluogo*.

Colombo et al., 1996. *Elementi di Geotecnica*. Zanichelli, Bologna. Seconda edizione.

Conti P., Carmignani L., Disperati L., Massa G., 2008. *Analisi di Stabilità di Pendii in Roccia*. Centro di GeoTecnologie, Università degli Studi di Siena, inedito.

Cortemiglia G.C., 2013. *Coste rocciose: falesie vive e morte*. Morfologia Costiera: pp. 186 – 188. Istituto Geografico Militare, Firenze.

Cortemiglia G.C., 2014. *Lo stato morfodinamico del litorale di Finale Ligure (Liguria occidentale – Italia)*. Studi costieri 2014 - 22: pp. 57 – 104. DISTAV, Università degli Studi di Genova.

De Pippo T., Pennetta M., Terlizzi F., Valente A., 2007. *Principali tipi di falesia nella Penisola Sorrentina e nell'Isola di Capri: caratteri e lineamenti morfoevolutivi*. Bollettino della Società Geologica Italiana, Vol. 126, No. 2, pp. 181 – 189.

Donadio C., Pennetta M., Valente R., 2014. *Geoindicatori della morfodinamica costiera della Campania e criteri di progettazione ambientale*. Studi costieri 2014 - 22: pp. 179 – 198.

Doody et al., 2007. *Vivere con l'erosione costiera in Europa. Sedimenti e spazio per la sostenibilità – Risultati dello studio EUROSION*. Ufficio per le Pubblicazioni Ufficiali delle Comunità Europee, Lussemburgo.

Faccini et al., 2008. *Studi e ricerche di carattere geologico, idrogeologico e geomorfologico-applicativo finalizzate alla valutazione della pericolosità geomorfologica del settore su cui insiste il cimitero storico di Camogli (provincia di Genova)*. DISAM, Università degli Studi di Genova.

Faccini F., 2021. Intervista di F. Li Noce. *La Voce di Genova*. <https://www.lavocedigenova.it/2021/02/23/leggi-notizia/argomenti/cronaca-5/articolo/crollo-del-cimitero-di-camogli-il-geologo-delluniversita-di-genova-zona-instabile-da-200-anni.html>.

Facciorusso J. et al., 2011. *Dispense di Geotecnica*. DICEA, Università degli Studi di Firenze.

Farci et al., 2020. *Studio di assetto idrogeologico – Piano Urbanistico Comunale di Cagliari*. Regione Sardegna.

Farigu et al., 2012. *Studio di compatibilità geologica, geotecnica e idraulica – Piano Urbanistico Comunale di Gonnese*. Regione Sardegna.

Farris M., 2007. *Analisi del dissesto in Sardegna e regionalizzazione dei fenomeni franosi*. Workshop “Progetto IFFI”, Roma, 13-14 novembre 2007.

Ferrero A.M., Forlani G.F., Migliazza M.R., Roncella R., 2007-2013. *Rischi derivanti dall'evoluzione dell'ambiente di alta montagna (attività B.1-C.1)*. Convenzione per l'attività di consulenza nell'ambito del progetto strategico Alcotra “RiskNat” E “GlaRiskAlp”. DICATeA, Università degli Studi di Parma.

Fruzzetti V. M. E., Segato D., Ruggeri P., Vita A., Sakellariadi E., Scarpelli G., 2013. *Fenomeni di instabilità della falesia del Monte Conero: ruolo dell'assetto strutturale*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2011 - IARG 2011, Torino, 4-6 luglio 2011.

Ginesu S., Valente A., 2014. *Caratteri geomorfologici delle falesie di Castelsardo (Golfo dell'Asinara, Sardegna settentrionale)*. Studi costieri 2014 - 22: pp. 131 – 143.

Giuffrida S., 2015. *Studio conoscitivo dell'assetto geomorfologico della fascia costiera dell'Area Marina Protetta del Plemmirio*. <http://plemmirio.eu/wp-content/uploads/2015/05/Relazione-Geomorfologica-A.M.P..pdf>.

Hoek E., Bray J. W., 1981. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy (IMM), Londra. Terza edizione.

L.R. 21 aprile 2008, n. 8. *Istituzione del Parco Marino Regionale “Riviera dei Cedri”.*

Legambiente, 2015. *Storie di erosione lungo la costa italiana.* Dossier “Spiagge Indifese”, 22 maggio 2015.

Lettieri et al., 2013. *Relazione geologica preliminare – Piano Urbanistico Comunale di Montecorice.* Regione Campania.

Ligato et al., 2002. *Atlante delle opere di sistemazione dei versanti.* APAT, Manuali e Linee guida 10/2002.

Ligato et al., 2007. *Atlante delle opere di sistemazione costiera.* APAT, Manuali e Linee guida 44/2007.

Lopinto M., Pennetta L., 2007. *Analisi del dissesto in Puglia: le frane costiere.* Workshop “Progetto IFFI”, Roma, 13-14 novembre 2007.

Loriga et al., 2017. *Relazione di Compatibilità Geologica Generale – Piano Urbanistico Comunale di Sorso.* Regione Sardegna.

Lucchetti A., Brandolini P., Faccini F., Firpo M., 2014. *Proposta di valutazione della stabilità delle coste rocciose (SCMR – Sea Cliff Mass Rating): il caso studio delle falesie tra Genova e Camogli (Liguria orientale).* Studi costieri 2014 - 22: pp. 145 – 157. DISTAV, Università degli Studi di Genova.

Mancini et al., 2018. *Consolidamento delle scarpate in località Cala Feola, Cala delle Felci – Stralcio Cala Feola – Progetto esecutivo.* Comune di Ponza.

Mastronuzzi G., Sansò P., 2014. *Torre Fiumicelli (Otranto) e l'evoluzione storica del litorale adriatico salentino.* Studi costieri 2014 - 22: pp. 159 – 170.

Micoli D., Spilotro G., Pellicani R., Ditommaso R., Ponso F.C., 2015. *Interazione dinamica tra moto ondoso e falesia lungo la costa di Polignano a Mare (Puglia).* Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2015 - IARG 2015, Cagliari, 24-26 giugno 2015.

Miglione et al., 2015. *Relazione geologica – Piano Urbanistico Comunale di San Giovanni a Piro.* Regione Campania.

Morsilli M., 2016. *Sintesi delle conoscenze geologiche e stratigrafiche del Promontorio del Gargano.* Rivista “Geologi e Territorio”: pp. 15 – 30.

Pellegrini V, Andriani G.F., Mastronuzzi G., 2014. *Proposta di metodologia per la valutazione della propensione al dissesto delle falesie (CISA - Cliff Instability Susceptibility Assessment): il caso del centro storico di Polignano a Mare (Bari, Italia).* Studi costieri 2014 - 22: pp. 225 – 236.

Pini G.A., Bonini L., 2020. *Corso di Geologia II e Principi di Rilevamento.* Università degli Studi di Trieste.

Pranzini E., 2013. *Difese costiere*. Morfologia Costiera: pp. 210 – 212. Istituto Geografico Militare, Firenze.

Robbiano A., 2015. *Progettazione dell'intervento di somma urgenza per il consolidamento della parete rocciosa sottostante la terrazza Belvedere Gente di Mare in via Ruffini nel comune di Camogli (Genova) – Relazione geologica*. Chiavari, 26 gennaio 2015.

Russo et al., 2016. *Analisi tecnica degli habitat marino-costieri della costa di Maratea*. Redazione dei Piani di Gestione dei siti comunitari ricompresi nelle aree territoriali omogenee ATO 7-8: all. B. Regione Basilicata.

Savonitti et al., 2006. *Relazione generale di analisi e di progetto – Piano di conservazione e sviluppo della Riserva Naturale Regionale delle Falesie di Duino*. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia.

Scavia C., 1995. *A method for the study of crack propagation in rock structures*. Géotechnique 45, No. 3, 447-663.

Scavia C., Barbero M., 2019. *Corso di Meccanica delle Rocce*. Politecnico di Torino.

S.G.G. Savona, 2011-2012. *Intervento di messa in sicurezza della parete rocciosa tra Valloria e i cantieri navali Mondo Marine S.p.A.* Comune di Savona.

Sivori L., 2008. *Ristrutturazione edilizia e consolidamento fondazionale di una tomba di famiglia al Cimitero Centrale nel Comune di Camogli (Provincia di Genova) – Relazione geologica*. Genova, 29 maggio 2008.

Sivori L., 2020. *Interventi di consolidamento e manutenzione straordinaria della falesia rocciosa nel territorio comunale – Relazione geologica*. Genova, 28 luglio 2020.

Sunamura T., 2015. *Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs*. The Japan Academy, Tokyo.

Tilocca G., 2006. *Considerazioni geo-ingegneristiche sull'assetto dei litorali in Sardegna*. Convegno “La Progettazione Geotecnica”, Cagliari, 8 giugno 2006.

Tronci et al., 2017. *Tra natura e storia. Monumenti naturali di Iglesias. “Pan di Zuccheri e Faraglioni di Masua” e “Canal Grande di Nebida”*. Progetto “Conservazione e valorizzazione dei Monumenti Naturali di Pan di Zuccheri e Faraglioni di Masua e Canal Grande”. Comune di Iglesias.

Vigo et al., 2012. *Relazione di compatibilità geologica e geotecnica – Piano Urbanistico comunale di San Vero Milis*. Regione Sardegna.

Sitografia

<http://interreg-maritime.eu/web/maregot/>

<http://www.culturaitalia.it/>

<http://www.distar.unina.it/>

<http://www.tensoinox.com/>

<https://associazionegeotecnica.it/publicazioni/norme-ismr/>

<https://cartogis.cittametropolitana.genova.it/cartogis/>

<https://idrogeo.isprambiente.it/app/>

<https://ilpiccolo.gelocal.it/>

<https://iltirreno.gelocal.it/>

<https://www.3dflow.net/>

<https://www.academia.edu/>

<https://www.corriere.it/>

<https://www.dolomitirocche.it/>

<https://www.enea.it/>

<https://www.genovatoday.it/>

<https://www.igmi.org/>

<https://www.ilgiornale.it/>

<https://www.ilmattino.it/>

<https://www.ilsecoloxix.it/>

<https://www.istat.it/>

<https://www.lagazzettadelmezzogiorno.it/>

<https://www.quotidianodelsud.it/>

<https://www.repubblica.it/>

<https://www.researchgate.net/>

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

Ringraziamenti

Raggiungere i propri obiettivi richiede impegno, dedizione e costanza. Spesso mi sono chiesta se questi unici tre fattori potessero bastare. Riesco a darmi una risposta consapevole a studi universitari conclusi: senza l'appoggio delle persone care, la strada verso la meta si riempie di ostacoli e a volte si fa così tortuosa da diventare impercorribile. Non posso, dunque, non ringraziare chi mi è stato vicino durante questi cinque anni.

Il primo ringraziamento va ai miei genitori e ai loro sacrifici. Grazie, mamma, perché insegnandomi che a tutto c'è una soluzione mi aiuti a non abbattemi davanti alle difficoltà e, soprattutto, a reagire con coraggio. Grazie, papà, perché sei sempre pronto ad ascoltarmi, a donarmi consigli nonostante la mia testardaggine e ad emozionarti con me e per me.

Ringrazio i miei fratelli e la gioia che contraddistingue i momenti trascorsi insieme. Grazie, Gerry: da te ho imparato che uscire dalla *comfort zone* è necessario se si vuole migliorare o quantomeno riscoprire se stessi. Grazie, Benny, per essere la persona più generosa che io conosca. Grazie, Sofi, perché sei di supporto nonostante tu sia la piccola di casa.

Un grazie va a tutta la mia famiglia, in particolare a nonna Concetta e Giusy, per essere costantemente al mio fianco, e a zio Vale, sempre dalla mia parte.

Un ringraziamento speciale va al mio relatore, il prof. Scavia, che stimo in primis a livello umano. I suoi discorsi, che ho seguito con profonda ammirazione, mi hanno sapientemente guidata nella stesura di questa tesi.

Xavi, Omar, Julio, Daniela, Xavier, Diego, Javi, Momo: porterò ancora per molto nel mio cuore le sere in Barceloneta e tutte le notti passate a cantare, ballare, vivere. In soli cinque mesi mi avete trasmesso più di quanto voi possiate immaginare!

Grazie, Ale e Reb, per avermi regalato tanti momenti di spensieratezza. Sono fortunata a poter contare su di voi in qualsiasi momento.

Grazie, Peppe, perché posso mostrarti impavidamente le mie fragilità. Con poche persone si riesce ad essere completamente se stessi.

Ringrazio Marco, persona speciale che mi sembra di conoscere da una vita.

Concludo con un ringraziamento a due miei compagni di corso, nonché Amici, Tommaso e Claudia: le risate con voi, così come gli sfoghi, hanno reso meno stressante la vita universitaria e non. *Torino è bella, ma voi un po' di più!*