

## **Proposta di valutazione della stabilità delle coste rocciose (SCMR – Sea Cliff Mass Rating): il caso studio delle falesie tra Genova e Camogli (Liguria orientale)**

**Ada Lucchetti<sup>1</sup>, Pierluigi Brandolini<sup>2</sup>, Francesco Faccini<sup>2</sup>, Marco Firpo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Geologo (Ph.D.), Libero professionista

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita, Università degli Studi di Genova

### **Riassunto**

Le coste rocciose sono forme soggette a un'evoluzione morfologica connessa principalmente a fenomeni di instabilità improvvisi e rapidi, quali crolli, ribaltamenti e scivolamenti. Lo studio delle loro condizioni è fondamentale per determinare la suscettività al dissesto costiera, che dovrà essere valutata tenendo in considerazione, oltre ai cinematismi di rottura attivi, le caratteristiche della roccia costituente le falesie e tutti gli agenti esterni che contribuiscono alla sua evoluzione, con particolare riguardo all'azione ciclica e costante del moto ondoso. In questo lavoro, tenendo conto dei vari aspetti e dei fattori che concorrono alla stabilità delle falesie, si presenta un metodo di studio per elaborare carte di pericolosità e di rischio geomorfologico delle coste rocciose. Si propone quindi in particolare una nuova classificazione, Sea Cliff Mass Rating (SCMR), che modifica l'indice Slope Mass Rating (SMR) di Romana, tenendo in considerazione l'azione del moto ondoso e la presenza di interventi antropici di consolidamento. L'applicazione di questa classificazione (SCMR) ha consentito la realizzazione di specifiche carte di suscettività al dissesto e di rischio geomorfologico nell'area costiera campione compresa tra Genova Nervi e Camogli.

**Parole Chiave:** coste rocciose, stabilità, pericolosità geomorfologica, Sea Cliff Mass Rating, moto ondoso.

### **Abstract**

*Rocky coasts are landforms mainly related to sudden and rapid processes, such as rock falls, topples and slidings. The study of their conditions is crucial to determine the susceptibility to coastal instability, which will be assessed through a deep analysis of the actual displacement mechanisms, the sea cliff rock mass features and of the exogenous agents that contribute to their evolution, with particular regard to the cyclic and permanent sea wave action. A new study method to elaborate geomorphological hazard and risk mapping of rocky coasts is therefore presented also considering the different factors contributing to the stability of sea cliff. The new classification system - Sea Cliff Mass Rating (SCMR) – proposed in this paper is a modification of the Slope Mass Rating index (SMR) by Romana, enforced through the integration of additional parameters such as wave action and rock mass improvement works. The SCMR index application has allowed the implementation of specific maps of susceptibility to coastal instability and of geomorphological risk in the Genova-Nervi and Camogli study area.*

**Keywords:** rocky coast, stability, geomorphological hazard, Sea Cliff Mass Rating, wave action.

### **Premessa**

Le falesie sono una forma costiera in continua evoluzione, la cui stabilità dipende da molteplici fattori: le caratteristiche e la resistenza della roccia che le costituisce, la presenza di discontinuità nell'ammasso roccioso

e le loro caratteristiche, i rapporti geometrici tra giunti e pendio, gli agenti subaerei che concorrono all'alterazione delle pareti rocciose, l'azione del moto ondoso e le modificazioni antropiche subite. Tutti questi elementi devono essere valutati nello studio di una falesia, che può essere considerata come un pendio alla cui base agisce l'azione del moto ondoso.

Le caratteristiche della roccia e dei giunti possono essere valutate attraverso classificazioni geomeccaniche di ampio utilizzo; dopo aver esaminato ed utilizzato la classificazione Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1989), l'indice Slope Mass Rating (SMR) (Romana, 1985, 1993), la classificazione Rock Mass Strength (RMS) (Selby, 1980) e l'indice Geological Strength Index (GSI) (Marinos e Hoek, 2000), si è ritenuto che l'indice SMR sia quello che meglio rappresenta la dinamica delle falesie dal punto di vista statico, in quanto prende in considerazione anche i rapporti geometrici tra discontinuità e pendio.

L'azione del moto ondoso agente alla base delle falesie dipende dall'energia che l'onda scarica sulla parete rocciosa, determinata dalla direzione di provenienza del moto ondoso, dalle caratteristiche delle onde e dalla profondità del fondale (Coastal Engineering Research Center, 2002); a questo occorre aggiungere l'esposizione e l'inclinazione rispetto all'orizzontale della parete rocciosa.

L'arretramento della falesia si verifica quando la forza agente del moto ondoso è superiore alla resistenza della roccia; al contrario, se l'energia del moto ondoso è inferiore alla resistenza della roccia si determina l'alterazione della falesia ad opera degli agenti subaerei, quali pioggia, vento, aerosol salato, aloclastismo e termoclastismo (Sunamura, 1992).

La presenza antropica lungo le falesie costiere è dovuta a edifici, costruzioni e infrastrutture alla sommità delle pareti rocciose e a stabilimenti balneari o altri manufatti alla base.

Tra i fattori che determinano l'evoluzione di una costa rocciosa, le caratteristiche della roccia ed il moto ondoso sono gli aspetti fondamentali da considerare per definire la qualità di una falesia; pertanto è stata studiata una nuova classificazione, Sea Cliff Mass Rating (SCMR), a partire dall'indice SMR di Romana, che permetta di valutare sia gli aspetti statici sia quelli dinamici delle pareti rocciose (Lucchetti et al., 2013): nella classificazione SMR leggermente modificata è stato introdotto un nuovo parametro che tiene conto dell'azione del moto ondoso.

In questo lavoro, tenendo conto dei vari aspetti e dei fattori che concorrono alla stabilità delle falesie, attraverso l'incrocio tra la zonizzazione delle falesie sulla base della classificazione SCMR ed i dati geomorfologici si propone un metodo di studio per elaborare carte di pericolosità e di rischio geomorfologico specifico per le coste rocciose.

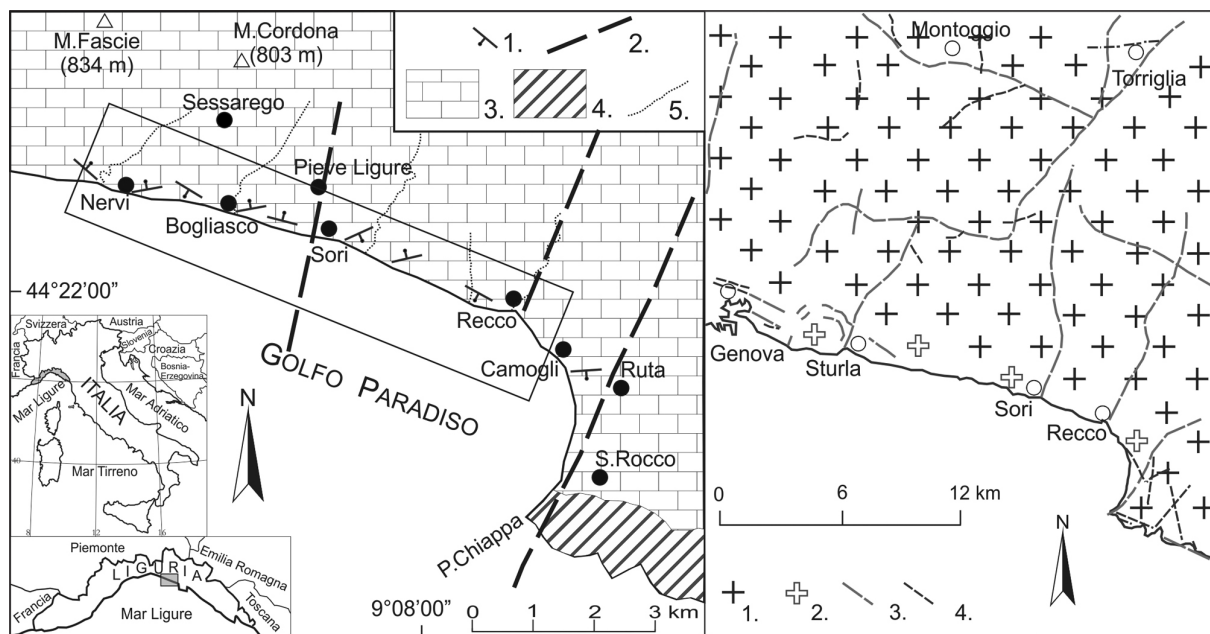
Lo studio è stato effettuato nel tratto costiero tra il torrente Nervi e il porticciolo di Camogli (Riviera Ligure di Levante), costituito da falesie intensamente urbanizzate, la cui evoluzione potrebbe mettere a rischio numerose infrastrutture pubbliche e private inserite in un contesto paesaggistico di notevole interesse, come recentemente avvenuto con l'evento geo-idrologico di gennaio 2014.

### **Inquadramento dell'area di studio**

Il settore costiero oggetto di studio interessa i Comuni di Genova, Bogliasco, Pieve Ligure, Sori, Recco e Camogli, nel Golfo Paradiso, ed è costituito quasi interamente da falesie, intervallate da piccole spiagge alla foce dei principali torrenti e da alcune pocket beach (Fig. 1).

Le falesie sono modellate nel Flysch di Monte Antola, costituito da calcari marnosi, marne, calcareniti, arenarie ed argilliti. Questa formazione ha subito numerose deformazioni duttili (Marini, 1981; Corsi et al., 2001) e fragili (Corsi, 2003) che determinano frequenti variazioni di giacitura degli strati lungo la costa: possono essere a reggipoggio, a franapoggio, verticali perpendicolari o paralleli alla linea di costa, orizzontali. Il Flysch di Monte Antola è caratterizzato da numerose discontinuità che, mantenendo gli stessi rapporti geometrici con la stratificazione, presentano un assetto molto vario ed un rapporto geometrico tra giunti e pendio caratteristico, che talvolta determina condizioni sfavorevoli per la stabilità. La tettonica ha influenzato notevolmente le forme costiere: le falesie sono controllate da lineazioni tettoniche spesso orientate come le famiglie di discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso.

Il tratto costiero in esame è riconosciuto in sollevamento assoluto ed è impostato su una linea di faglia orientata WNW-ESE, analogamente alle dislocazioni neotettoniche rilevate sulla piattaforma antistante la costa (Fig. 1); inoltre i corsi d'acqua principali sono impostati su lineazioni a scala regionale (torrenti Sori, Recco, Sturla, ecc.) orientate grossomodo NNE-SSW (Fanucci et al, 1980; Cortemiglia, 1982).



**Figura 1 – Localizzazione dell'area di studio e schema geologico: 1. Giacitura di strato; 2. Lineazioni tettoniche; 3. Flysch di Monte Antola; 4. Conglomerato di Portofino; 5. Corsi d'acqua principali; Schema neotettonico (modificato da Fanucci et al, 1980): 1. Zona interessata da sollevamento relativo; 2. Zone interessate da sollevamento assoluto; 3. Faglia; 4. Linea di faglia e di frattura.**

Le pareti rocciose hanno un'altezza solitamente compresa tra 10 e 30 m, in alcuni settori superiore a 50 m; sono quasi sempre attive ed hanno pendenze molto elevate, talvolta sono verticali. Il Flysch di Monte Antola è caratterizzato dall'alternanza di livelli più e meno competenti e da numerose discontinuità, che favoriscono un'erosione selettiva da parte del mare: lungo le falesie si osservano pertanto numerose forme caratteristiche, quali solchi di battente, grotte marine e varie forme di corrosione negli strati esposti agli spruzzi. L'orlo di falesia in molti casi coincide con l'orlo di terrazzi marini ed alla sommità delle pareti rocciose i depositi eluvio-colluviali localmente possono raggiungere spessori superiori a 2 m.

La morfologia del fondale antistante le falesie varia leggermente per l'alternarsi di ripe scoscese e baie a pendenza minore; andando verso il largo si riscontra un andamento più omogeneo.

Lungo le falesie si verificano frane rapide dovute principalmente a crolli di blocchi o scivolamenti di porzioni di roccia; in corrispondenza della frazione San Gaetano a Pieve Ligure si rileva una deformazione gravitativa profonda di versante che comprende una grande frana relitta: la porzione superiore del corpo franoso sembra attualmente inattiva, mentre la porzione al piede, che interessa anche la sommità della falesia, è attiva.

Alla base delle pareti rocciose si riscontrano numerosi manufatti posti in opera per difendere la costa dall'azione delle mareggiate: scogliere in massi, muraglioni a volte con archi, contrafforti, reti paramassi e chiodature. L'area costiera in esame è intensamente urbanizzata: oltre ai centri abitati maggiori in corrispondenza dei principali corsi d'acqua, alla sommità delle falesie si osservano numerosi edifici ed abitazioni, complessi condominiali, villette e numerose infrastrutture pubbliche e private, quali strade carrabili e pedonali, la via Aurelia, la linea ferroviaria Genova-La Spezia e parchi. In particolare, la linea ferroviaria si trova frequentemente a strapiombo sul mare sostenuta da muraglioni che superano i 30 m di altezza; in molti tratti, invece, scorre in gallerie, le quali hanno alterato la situazione naturale dei pendii, modificando le tensioni all'interno degli ammassi rocciosi. La Via Aurelia scorre lungo tutto il tratto costiero in esame ed in numerosi punti si trova anch'essa a strapiombo sul mare o poco distante da esso, protetta e sostenuta da muraglioni e pilastri.

Alla base delle pareti rocciose, nelle zone in cui la falesia è conformata in modo da permettere un accesso al mare, sono presenti stabilimenti balneari, mentre nei settori di costa elevati, dove non era possibile l'accesso diretto, alcune strutture di difesa sono state modificate per permettere ai privati di raggiungere la base della scogliera.

Nell'area in esame il settore di traversia è compreso tra 150° e 230°, quindi i venti che interessano la zona e

concorrono a formare il moto ondoso che interessa le falesie sono lo Scirocco da SE ( $150^{\circ}$ - $170^{\circ}$ ), il mezzogiorno da S ( $170^{\circ}$ - $190^{\circ}$ ) ed il Libeccio da SW ( $190^{\circ}$ - $230^{\circ}$ ). Il Libeccio presenta il fetch geografico più lungo e quindi determina le onde più alte e con maggiore energia; lo Scirocco soffia per periodi significativi nel corso dell'anno, per cui si possono avere eventi di mareggiata non trascurabili; il Mezzogiorno risulta il meno influente per la presenza della Corsica.

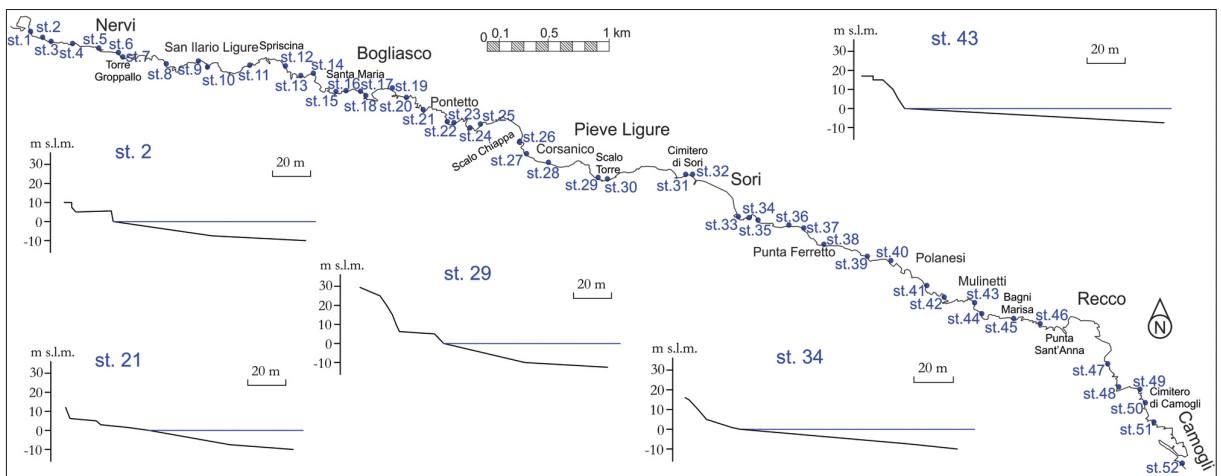
In generale, infatti, in Liguria, le grandi mareggiate si possono verificare in presenza di tre configurazioni legate ai venti più intensi: Libeccio Lungo, Libeccio Corto e Scirocco-Mezzogiorno (Gallino et al., 2012). La configurazione di Libeccio Lungo presenta la massima estensione del fetch dalle coste dell'Algeria fino al Mar di Corsica settentrionale e il moto ondoso che ne deriva determina uno stato del mare da agitato a grosso. Nel Libeccio Corto si origina il fetch tra il Mar di Corsica e il Mar Ligure, spesso con prevalenza di mare vivo, che può portare ad un moto ondoso di stato da agitato a molto agitato. La configurazione di Scirocco-Mezzogiorno ha il fetch a W dell'asse corso-sardo che si sviluppa dal canale di Sardegna al Mar Ligure, mentre a E di tale asse si estende dal medio-alto Tirreno al Mar Ligure con limitazioni geografiche determinate dall'Isola d'Elba, dal Canale di Piombino e dal restringimento tra Elba e Corsica; per tale ragione il moto ondoso raggiunge al massimo lo stato agitato.

### La classificazione SCMR per la valutazione della stabilità della costa rocciosa

Lo studio della costa rocciosa è stato effettuato in diverse fasi, che in seguito sono state raggruppate nella nuova classificazione Sea Cliff Mass Rating (SCMR), che fornisce una metodologia generale per valutare la stabilità della costa rocciosa con parametri semplici e facilmente misurabili.

Dopo aver esaminato e confrontato cartografie, foto aeree e rilievi di diversi periodi a partire dall'Ottocento ad oggi, al fine di determinare l'arretramento delle falesie costiere, in rapporto alla situazione attuale, sono state valutate le condizioni della costa rocciosa attraverso un rilevamento geologico-geomorfologico e geologico-tecnico lungo la costa e da mare, che ha permesso di ricavare i dati necessari per utilizzare le classificazioni geomeccaniche di più ampio utilizzo.

Tali classificazioni sono state applicate in oltre 50 stazioni geomeccaniche lungo il tratto costiero oggetto di studio; per ogni punto stazione è stato ricavato il profilo emerso e sommerso della falesia, al fine di individuare la pendenza della parete rocciosa e la morfologia del fondale (Fig. 2).



**Figura 2 – Ubicazione delle stazioni geomeccaniche e alcuni profili topografici tipo rappresentativi delle caratteristiche morfologiche della costa rocciosa emersa e sommersa.**

I dati del rilevamento sono stati integrati con i risultati di prove di laboratorio, eseguite in alcune località del territorio esaminato a supporto di interventi di ingegneria civile o ambientale: Point Load Test, resistenza a compressione monoassiale semplice e con controllo di deformazione, resistenza a trazione, prove triassiali e peso specifico.

Nelle falesie analizzate tramite rilevamento geomeccanico e nelle zone in cui è stato possibile effettuare il ri-

levamento della giacitura delle discontinuità è stata effettuata un'analisi dei potenziali cinematismi di rottura lungo le pareti rocciose attraverso l'utilizzo del programma di calcolo DIPS (Rocscience Inc., 2010). I parametri fondamentali del moto ondoso sono stati valutati esaminando i dati ondometrici della stazione posizionata al largo della Spezia e la situazione dei venti registrata dal sensore anemometrico, posto presso la stazione mareografica di Genova; inoltre è stato possibile ottenere i parametri dell'onda in un punto a sud dell'abitato di Bogliasco, in corrispondenza della batimetria dei -100 m. Trasponendo i dati della Spezia dal sito della boa al sito davanti a Bogliasco e riscalandi i valori delle altezze d'onda con i valori dei fetch efficaci dei due siti si osserva che le differenze relative all'esposizione marittima nei confronti dei mari di Libeccio e di Scirocco sono minime, pertanto sono stati utilizzati i dati provenienti da entrambe le stazioni di misura, ritenendo che quelli di Bogliasco possano essere estesi a tutto il litorale in oggetto (Tab. 1).

**Tabella 1 – Fetch geografici, Fetch efficaci di La Spezia e Bogliasco e parametri dell'onda per Libeccio e Scirocco**

Bogliasco	gradi	Fetch geografico (km)	Fetch efficace (km)
Scirocco (150°-170°)	150	458	291
	160	458	354
	170	458	415
Mezzogiorno (170°-190°)	180	398	479
	190	398	513
Libeccio (190°-230°)	200	915	532
	210	969	525
	220	617	487
	230	974	417

La Spezia	gradi	Fetch geografico (km)	Fetch efficace (km)
Scirocco (150°-170°)	150	390	213
	160	390	265
	170	390	325
Mezzogiorno (170°-190°)	180	330	388
	190	330	445
Libeccio (190°-240°)	200	330	502
	210	902	547
	220	1078	569
	230	745	554
	240	985	502

settore	Libeccio (190°-240°)		Scirocco (150°-170°)	
Altezza d'onda max (m)	6,20		5,37	
Altezza d'onda media (m)	2,88		2,93	
Periodo di ritorno (anni)	Altezza d'onda spettrale (m)	Periodo di picco (s)	Altezza d'onda spettrale (m)	Periodo di picco (s)
2	4,9	10	3,3	8
5	5,4	11	4,0	9
10	5,9	11	4,5	10
20	6,3	11	5,0	10
25	6,4	11	5,2	10
50	6,9	12	5,7	11
100	7,3	12	6,2	11

L'altezza d'onda significativa, la lunghezza d'onda e il periodo dell'onda al largo, unitamente alla pendenza del fondale hanno permesso di ricavare l'altezza d'onda alla frangenza e l'energia dell'onda per diversi periodi di ritorno, utilizzando le più comuni formulazioni (Sunamura, 1992); dall'altezza d'onda è stato possibile ricavare la profondità di frangenza (Coastal Engineering Research Center, 2002).

Per lo studio delle falesie è stato scelto un tempo di ritorno di 10 anni perché ritenuto il più adeguato in rapporto alla loro evoluzione geomorfologica.

La nuova classificazione Sea Cliff Mass Rating (SCMR) considera la falesia sia dal punto di vista statico sia da quello dinamico ed è rappresentata dalla seguente formulazione:

$$SCMR = R1+R2+R3+R4+R5 + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4_m - M$$

I parametri R1, R2, R3, R4, R5 sono ripresi dalla classificazione RMR di Bieniawski e si riferiscono rispettivamente alla resistenza a compressione monoassiale, all'RQD, alla spaziatura delle discontinuità, alle caratteristiche delle discontinuità (persistenza, apertura, rugosità, tipo di riempimento e alterazione) ed alle condizioni idrauliche.

F1, F2 e F3 sono i parametri ripresi dall'SMR di Romana: parallelismo fra l'immersione del fronte e quella delle discontinuità (F1), inclinazione dei giunti nell'ipotesi di scivolamento planare (F2), relazioni proposte da Bieniawski per l'inclinazione fra fronte e discontinuità (F3).

Il parametro F4 di Romana, riferito al metodo di scavo, è stato sostituito dal parametro  $F4_m$ , che prende in considerazione gli eventuali interventi eseguiti sulla falesia, secondo il seguente principio: all'aumentare degli interventi il punteggio diminuisce, in quanto senza tali opere la falesia non sarebbe stabile. Sono stati definiti cinque intervalli: pendio naturale, con punteggio massimo, interventi minimi, interventi di media entità, interventi di grande entità, parete tagliata artificialmente o cava, di punteggio nullo.

Il fattore M, da sottrarre al risultato così ottenuto, introduce l'azione dinamica alla base della falesia, dovuta all'azione del moto ondoso; è dato dalla somma di tre parametri  $M = M1+M2+M3$ .

M1 prende in considerazione la modalità con cui le onde raggiungono la parete rocciosa (onde frante o frangenti) e l'energia dell'onda (kPa), valutata in base all'altezza d'onda significativa al largo  $H_s$  con la relazione  $E = (1/8) \cdot \rho \cdot g \cdot H_s^2$ ; si ottengono cinque classi con punteggio crescente: onde frante con  $E < 30$ , onde frante con  $E > 30$ , onde frangenti con  $E < 15$ , onde frangenti con  $15 < E < 30$ , onde frangenti con  $E > 30$ . Le onde frangenti e con energia maggiore hanno il punteggio più elevato, in quanto sono quelle che scaricano la pressione maggiore sulla falesia.

M2 è funzione dell'inclinazione  $\alpha$  della parete rocciosa rispetto all'orizzontale: se la parete è verticale le onde trasmettono l'energia massima alla falesia, pertanto la pressione esercitata dalle onde è direttamente proporzionale all'angolo  $\alpha$ . Anche in questo caso si suddivide l'inclinazione della parete rocciosa in cinque classi a punteggio crescente: 0-30°, 30°-55°, 55°-70°, 70°-90°, 90°.

M3 è definito in base all'angolo  $\beta$  formato tra i raggi d'onda e la linea costa, considerando che quando i raggi giungono perpendicolari alla riva scaricano la pressione maggiore sulla parete rocciosa: l'energia riversata sulla falesia è direttamente proporzionale all'angolo  $\beta$ . Come per gli altri parametri sono state individuate 5 classi a punteggio crescente: 0-25°, 25°-50°, 50°-70°, 70°-90°, 90°.

I valori attribuiti ai vari parametri inseriti nella classificazione sono riportati in Tabella 2.

La classificazione SCMR deve essere applicata a tutte le famiglie di giunti e per tutti i tipi di moto ondoso agenti alla base della falesia; il punteggio minore ottenuto è quello rappresentativo della falesia.

Come risultato si ottiene un intervallo di valori che permette di identificare la classe di appartenenza della falesia; sono state mantenute le cinque classi di qualità della classificazione SMR di Romana (Tab. 3): classe I, molto buona; classe II, buona; classe III, discreta; classe IV, scadente; classe V, molto scadente.

## Risultati

Nell'area di studio l'arretramento delle falesie costiere è risultato non costante nel tempo e connesso ai cinematismi di rottura lungo le pareti rocciose; è compreso tra 0.5 m e 5 m in 100 anni, mediamente 2 cm/anno. Tale valutazione unita al confronto temporale di foto e cartografie ha permesso di ipotizzare in alcuni settori il profilo della falesia a inizio secolo, almeno per quanto riguarda l'orlo di falesia (Figg. 3 e 4).

Dal rilevamento geomeccanico di dettaglio è emerso che l'ammasso roccioso risulta generalmente di qualità discreta e caratterizzato da due famiglie di discontinuità principali; i giunti presentano una persistenza compresa tra 3 m e 20 m, sono caratterizzati da superfici lisce o leggermente rugose, da leggermente a molto alterate; la spaziatura è compresa tra 20 cm e 60 cm. I giunti possono essere chiusi o aperti, fino a beanti, con prevalenza di apertura tra 0.1 mm e 5 mm; il riempimento di tali superfici di discontinuità, quando presente, è solitamente inferiore a 5 mm e costituito da calcite o argilla.

Le prove di laboratorio sulla roccia intatta e sui giunti hanno fornito i risultati riassunti in Tabella 4.

La valutazione dei potenziali cinematismi di rottura in roccia ha evidenziato la possibilità di scivolamenti planari e a cuneo e, secondariamente, ribaltamenti. Da quanto osservato negli ultimi anni e da ricerche storiche (Provincia Genova, 2004; Gallino et al., 2012; Lucchetti, 2013) è emerso che i principali cinematismi di rottura si verificano a seguito di violente mareggiate. In particolare la mareggiata del 30 ottobre 2008 provocò lo scivolamento di un cuneo roccioso di grosse dimensioni e il crollo di vari frammenti di roccia nella falesia sottostante il cimitero di Camogli; a Sori lungo la parete rocciosa del fronte a mare del Condominio "La Scogliera" si verificò il distacco di una porzione della falesia, causando la distruzione dei sovrastanti percorsi pedonali e delle sistemazioni che garantivano l'accessibilità al mare e la fruibilità della scogliera. Durante la mareggiata del 26 febbraio 1989 una grande porzione di roccia sottostante Corso Mazzini, a Camogli, franò in mare per scivolamento compromettendo le fondamenta del ristorante soprastante; per tale ragione fu eseguito un intervento di chiodatura nella porzione di parete restante, ancora esistente.

**Tabella 2 – Classificazione Sea Cliff Mass Rating (SCMR)**

<b>PARAMETRI</b>	<b>INTERVALLI VALORI</b>				
resist. compress.	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa
R1: valori parametro	15	12	7	4	2
R.Q.D. (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
R2: valori parametro	20	17	13	8	3
spaziatura discontinuità	> 2 m	0,6-2,0 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m
R3: valori parametro	20	15	10	8	5
persistenza/continuità	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
R4: valori parametro	6	4	2	1	0
apertura delle discontinuità	nessuna	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm
R4: valori parametro	6	5	4	1	0
rugosità del giunto	molto rugoso	rugoso	leggerm.rugoso	liscio	levigato
R4: valori parametro	6	5	3	1	0
tipo di riempimento	nessuno	duro < 5 mm	duro > 5 mm	mollo < 5 mm	mollo > 5 mm
R4: valori parametro	6	4	2	2	0
alterazione del giunto	non alterato	legger. alterato	moderat.alterato	molto alterato	degradato
R4: valori parametro	6	5	3	1	0
condizioni idrauliche	asciutto	umido	bagnato	stillicidio	venute d'acqua
R5: valori parametro	15	10	7	4	0
<b>FATTORI PER GIUNTI</b>	<b>INTERVALLI VALORI</b>				
rottura planare/cuneo ( $\square j - \square f$ )	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
ribaltamento ( $\square j - \square f - 180$ )	0,15	0,4	0,7	0,85	1
F1					
rottura planare/cuneo ( $\square$ )	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
F2 piano/cuneo	0,15	0,4	0,7	0,85	1
F2 ribaltamento			1		
rottura planare/cuneo ( $\square j - \square f$ )	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< -10°
ribaltamento ( $\square j + \square f$ )	< 110°	110° - 120°	> 120°	#	#
F3	0	-6	-25	-50	-60
condizioni falesia	pendio naturale	interventi minimi	interventi di media entità	interventi di grande entità	tagliato artificialmente/cave
F4 <sub>m</sub>	15	10	8	5	0
energia dell'onda (M1)	onde fronte	onde fronte	onde frangenti	onde frangenti	onde frangenti
punteggio	E<30	E>30	E<15	15<E<30	E>30
$\square$ parete (M2)	1	2	4	6	8
punteggio	0-30	30-55	55-70	70-90	90
$\square$ moto ondoso (M3)	0	1	3	5	7
punteggio	0-25	25-50	50-70	70-90	90
	0	3	5	8	10
<b>Totale (M)</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>19</b>	<b>25</b>

Tabella 3 – Classi di qualità delle falesie in base alla classificazione SCMR

SCMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
classe	I	II	III	IV	V
descrizione	molto buona	buona	discreta	scadente	molto scadente
stabilità	sicuramente stabile	stabile	parzialmente stabile	instabile	sicuramente instabile
modo di rottura	assente	possibili blocchi	lungo piani o per cunei	lungo piani o su grandi cunei	su grandi piani o rototraslazionale
stabilizzazione	nessuna	occasionale	sistematica	estesa	riprofilare la scarpata

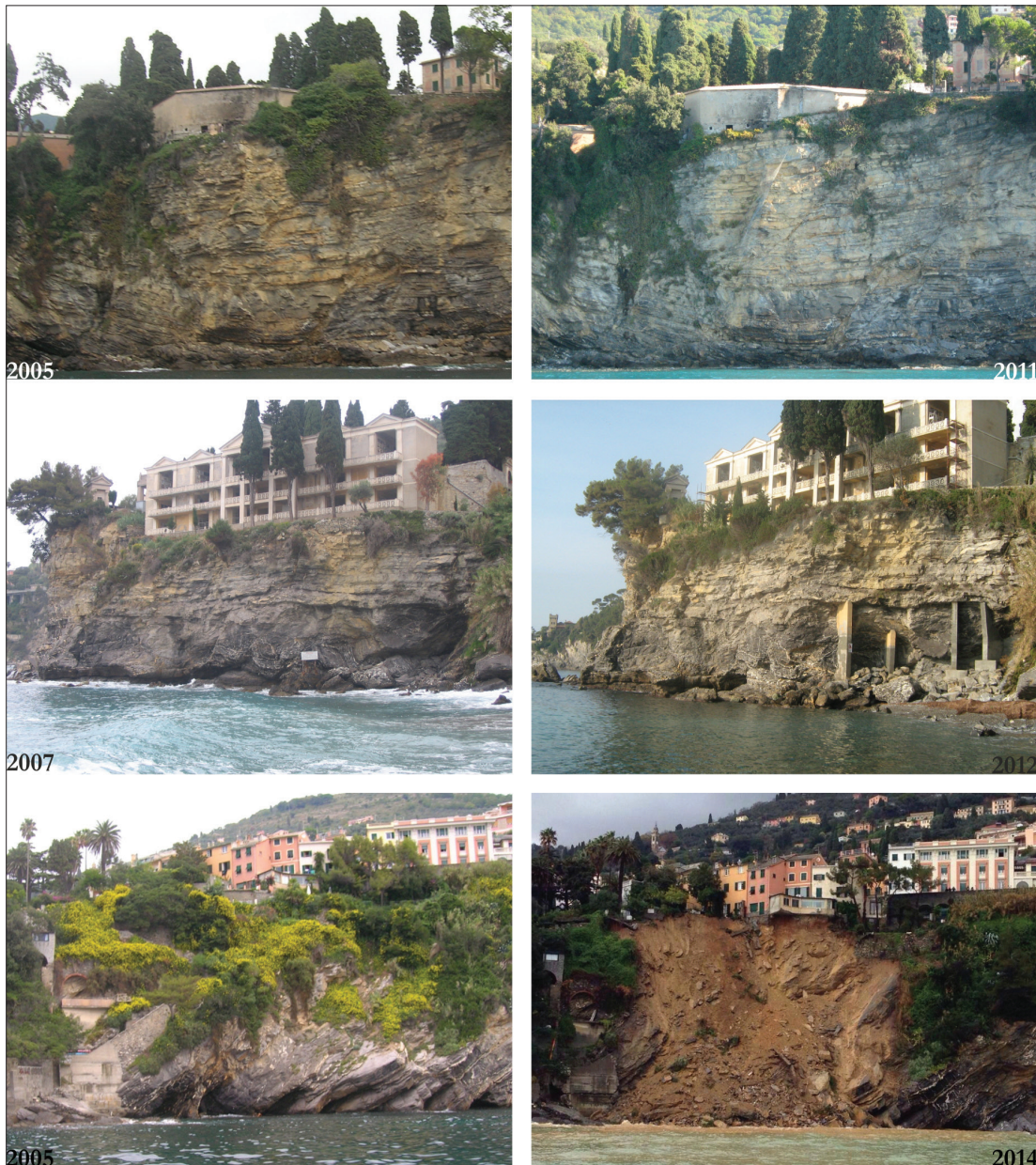


Figura 3 – Confronto temporale relativo all'evoluzione della costa tra Genova Nervi e Camogli: in alto falesia sottostante il cimitero di Camogli; al centro falesia sottostante il cimitero di Sori; in basso falesia in Località Spriscina a Genova Nervi.



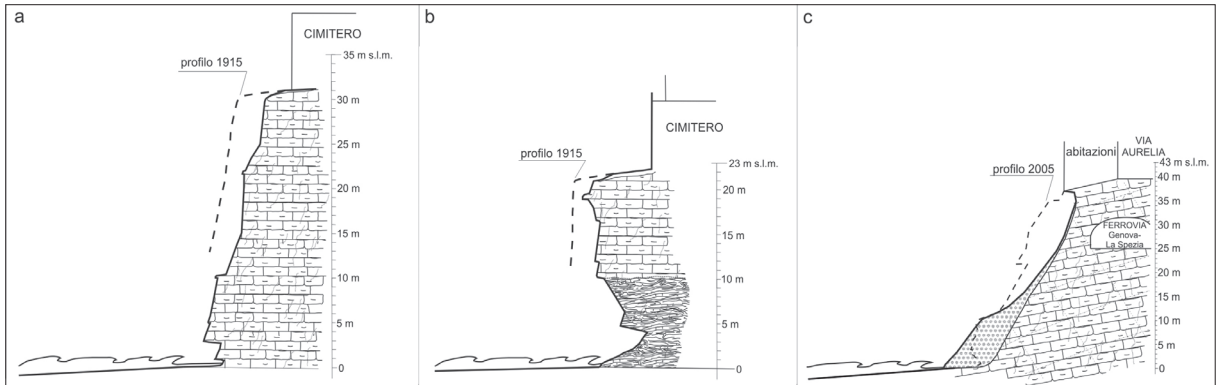


Figura 4 – Sezioni delle falesie nei pressi del cimitero di Camogli (a), del cimitero di Sori (b) e di Spriscina (c).

Tabella 4 – Principali parametri fisico-meccanici del Flysch di Monte Antola

Parametri	Ammasso Roccioso		
	condizioni più sfavorevoli	condizioni più favorevoli	prevalente
Spaziatura (m)	0.06 - 0.2	0.6 - 2	0.2 - 0.6
Persistenza (m)	20	3	maggiore 20
Apertura (mm)	maggiore 5	nessuna	0.1 - 5
Rugosità (superfici)	lisce	rugose	leggermente rugose
Riempimento	minore 5 mm	assente	assente
Alterazione	molto alterato	leggermente alterato	leggermente alterato
RQD (%)	25-50	75-90	25-50
Condizioni idrauliche	umido	asciutto	asciutto
	Roccia intatta		
	minimo	massimo	medio
Resistenza a compressione monoassiale (MPa)	25	70	40
Resistenza a trazione (MPa)	3	8	5
Peso specifico (kN/m <sup>3</sup> )	25	27	26
Angolo di attrito efficace (°)	28	46	30
Coesione efficace (kPa)	50	275	190
	Giunti		
	minimo	massimo	medio
Angolo di attrito di base (°)	27	35	30
Angolo di attrito di picco (°)	38	45	39
Angolo di attrito residuo (°)	22	30	27
Coesione (kPa)	100	300	175
Coesione di picco (kPa)	110	310	220
Coesione residua (kPa)	75	210	100

L'analisi di dettaglio del moto ondoso ha permesso di evidenziare che nella costa da Nervi alla spiaggia di Recco i tratti orientati circa E-W sono interessati sia da moto ondoso di Libeccio sia da onde di Scirocco, mentre i promontori sono raggiunti da onde di Libeccio sul lato W e da onde di Scirocco sulla parete E. Il tratto costiero compreso tra la spiaggia di Recco e il porticciolo di Camogli è interessato principalmente da moto ondoso di Libeccio, in quanto è orientato NW-SE. Considerando che la pendenza del fondale è risultata compresa tra 1°, solitamente nelle falesie in corrispondenza delle baie, e 13°, per tempo di ritorno di 10 anni le onde giungono quasi sempre frante alla parete rocciosa; solo nella frazione Corsanico a Pieve Ligure e nella zona di Punta Ferretto a Sori, le onde frangono contro la scarpata rocciosa.

Confrontando i risultati delle classificazioni geomeccaniche applicate, si evidenzia che l'indice RMS fornisce in tutti i punti stazione valori confrontabili: ammasso roccioso di resistenza moderata. Considerando la gia-

citura delle discontinuità in rapporto all'orientazione del pendio si ottengono delle differenziazioni lungo la costa rocciosa; secondo l'RMR, di tutte le stazioni esaminate 10 risultano con ammasso roccioso di qualità pessima e 17 di qualità scadente; in base all'indice SMR le falesie esaminate sono risultate per la maggior parte in condizioni discrete, 11 in condizioni buone, 4 in condizioni scadenti e 2 in condizioni molto scadenti. I risultati della classificazione RMR e dell'indice SMR non sono pienamente confrontabili, ma è opportuno sottolineare che i valori del parametro R6 della classificazione di Bieniawski sono molto penalizzanti, tanto che alcuni autori ritengono che nel caso dei versanti il parametro R6 non sia applicabile e rimandano direttamente alla classificazione di Romana.

La classificazione SMR di Romana è risultata, pertanto, la più adatta per rappresentare le caratteristiche delle falesie costiere in condizioni statiche, in quanto prende in considerazione la geometria tra giunti e pendio, utilizzando parametri adeguati; inoltre fornisce indicazioni sul possibile cinematicismo di rottura che potrebbe verificarsi lungo la parete rocciosa e le eventuali opere di sistemazione. Per questo è stata utilizzata come base per la nuova classificazione Sea Cliff Mass Rating.

Inserendo tutti i dati ottenuti dallo studio delle pareti rocciose nella formulazione dell'indice SCMR si ottengono 14 falesie di qualità discreta, 13 di qualità scadente, 10 di qualità da scadente a discreta, 6 di qualità da discreta a scadente, 4 di qualità molto scadente, 3 di qualità da discreta a buona e 2 di qualità da molto scadente a scadente (Fig. 5).

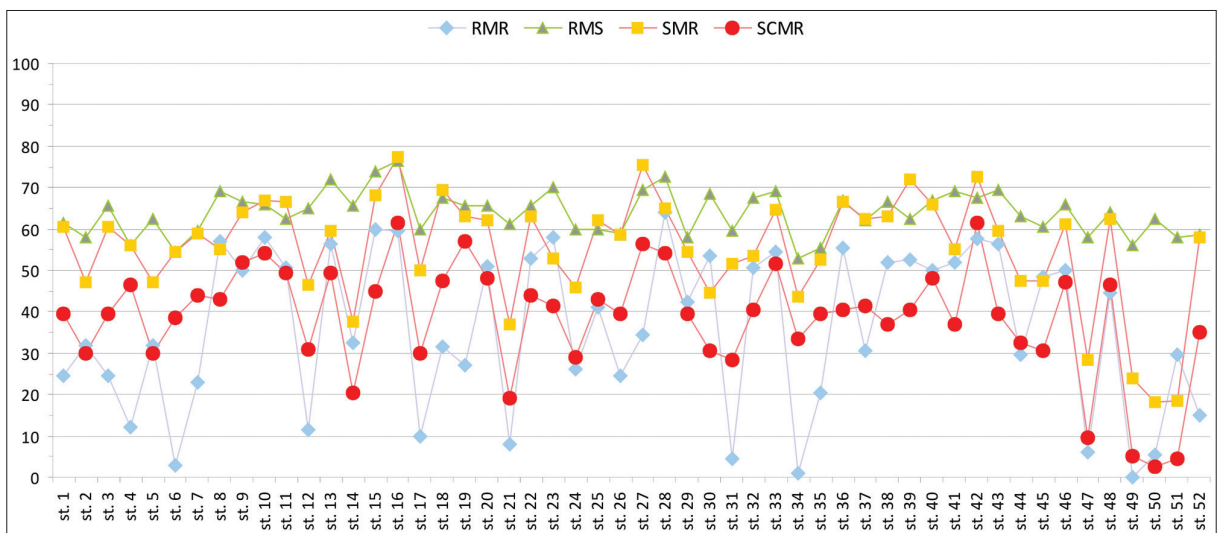


Figura 5 – Comparazione dei valori medi delle classificazioni RMR, RMS, SMR ed SCMR.

## Discussioni e conclusioni

I risultati ottenuti con la classificazione SCMR permettono una maggiore differenziazione delle falesie costiere anche rispetto all'indice SMR di Romana e sono coerenti con quanto osservato sul terreno; pertanto l'azione del moto ondoso è fondamentale per la dinamica delle falesie e va analizzata per effettuare uno studio completo delle coste rocciose.

Tali risultati, data la corrispondenza con la realtà, sono stati utilizzati per elaborare una carta di pericolosità geomorfologica costiera (Fig. 6), in cui le classi di suscettività al dissesto costiera ricalcano le classi della classificazione SCMR:

- Pg<sub>4</sub>: suscettività molto elevata, comprende le frane attive e le falesie con valore di SCMR = 0-20;
- Pg<sub>3</sub>: suscettività elevata, comprende le Deformazioni Gravitative Profonde di Versante e le falesie con valore di SCMR = 21-40;
- Pg<sub>2</sub>: suscettività media, comprende le falesie con valore di SCMR = 41-60;
- Pg<sub>1</sub>: suscettività bassa, comprendente le falesie con valore di SCMR = 61-80;
- Pg<sub>0</sub>: suscettività molto bassa, comprendente le spiagge e le falesie con valore di SCMR = 81-100.

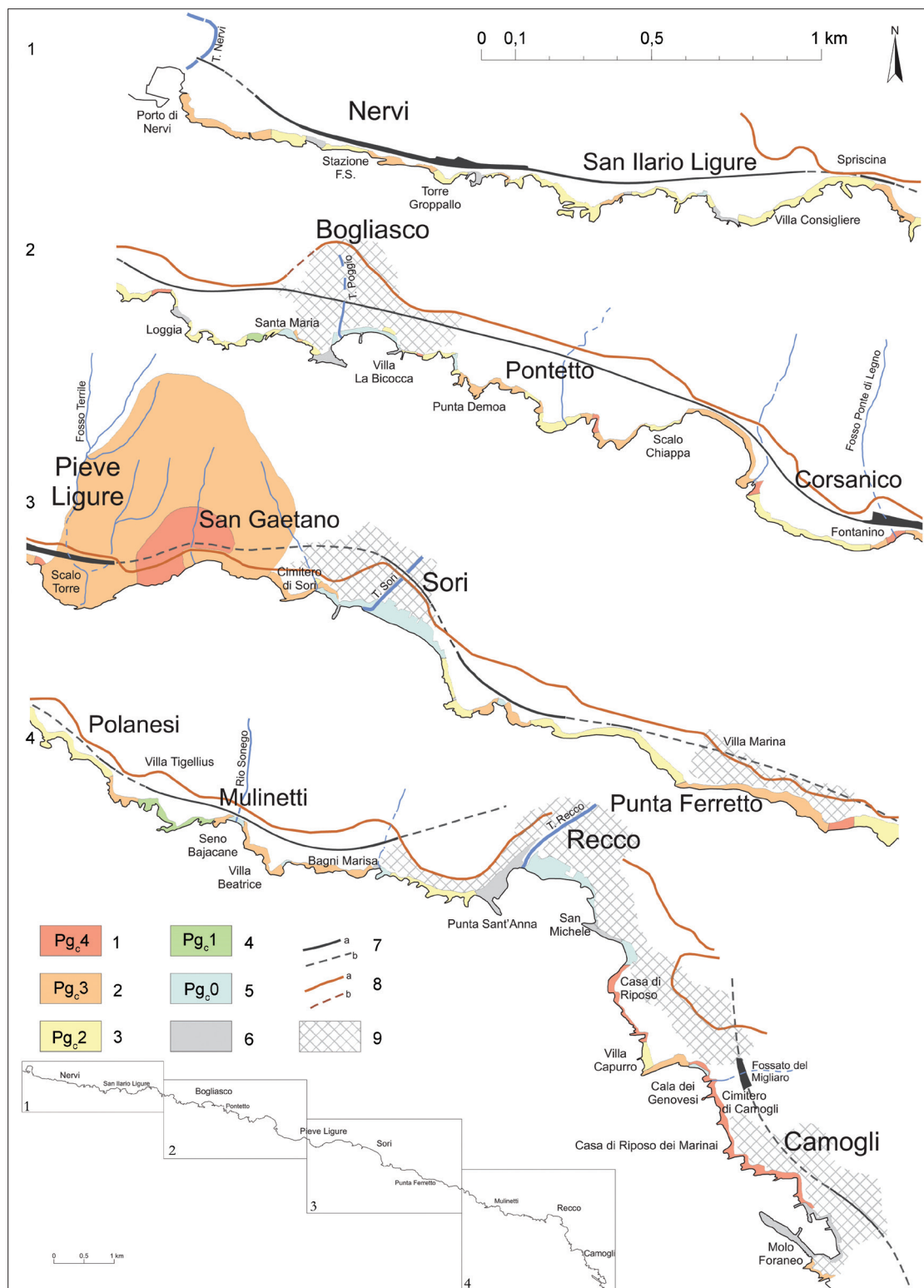


Figura 6 – Carta di pericolosità geomorfologica costiera (suscettività al dissesto costiera). Legenda: 1. Pg<sub>c</sub>4, suscettività al dissesto molto elevata; 2. Pg<sub>c</sub>3, suscettività al dissesto elevata; 3. Pg<sub>c</sub>2, suscettività al dissesto media; 4. Pg<sub>c</sub>1, suscettività al dissesto bassa; 5. Pg<sub>c</sub>0, suscettività al dissesto molto bassa; 6. costa armata o artificiale; 7. linea ferroviaria (a) con tratti in galleria (b); 8. via Aurelia (a) con tratti in galleria (b); 9. aree con elevata urbanizzazione.

E' stata inserita la sesta classe "costa armata o artificiale", per rappresentare le opere portuali e marittime e le opere di origine antropica che hanno completamente obliterato la falesia.

Quando l'intervallo di valori dell'indice SCMR rappresentante la falesia è compreso all'interno di due classi contigue di suscettività si è eseguita la media matematica tra i due estremi dell'intervallo e si è assegnata la classe corrispondente al valore medio.

In generale prevalgono le aree a suscettività media ed elevata; le aree a pericolosità molto elevata corrispondono principalmente con le zone in cui si sono riscontrate frane attive; risultano solo due falesie a suscettività bassa.

Dalla carta di pericolosità geomorfologica è stata derivata una carta di rischio costiero, considerando gli elementi a rischio presenti in una fascia di 30 m a partire dall'orlo della scarpata della falesia. Gli elementi a rischio sono stati definiti in base a 4 classi: E0, ossia aree disabitate o improduttive; E1, in cui sono compresi edifici isolati e zone agricole; E2, comprendente nuclei urbani, insediamenti industriali e commerciali minori; E3, costituita da centri urbani, grandi insediamenti industriali e commerciali, principali infrastrutture e servizi. Nella fascia costiera considerata sono presenti principalmente elementi a rischio di classe E2 ed E3. Incrociando in una matrice le classi di suscettività con quelle degli elementi a rischio, si sono individuate cinque classi di rischio costiero: Rc4 molto elevato, Rc3 elevato, Rc2 medio, Rc1 basso e Rc0 molto basso. Le zone a rischio molto elevato coincidono principalmente con le aree a suscettività molto elevata e con le falesie a pericolosità geomorfologica elevata alla cui sommità sono presenti la strada provinciale Aurelia e/o la linea ferroviaria Genova-La Spezia. Le aree a rischio molto basso corrispondono alle spiagge o ad aree antropizzate a livello del mare, prive di falesia.

Le fasi di studio adottate sono risultate efficaci per differenziare le problematiche delle falesie del tratto costiero esaminato e tenuto conto che la classificazione proposta prende in considerazione parametri del moto ondoso di facile reperibilità ed applicazione, potrebbero essere adottate come indirizzo generale per la pianificazione territoriale in ambito costiero, attualmente affrontata in modo parziale nei Piani di Bacino vigenti in Liguria.

Il metodo e la classificazione proposti sono comunque suscettibili di approfondimenti ed eventuali modifiche e sarà indispensabile testare tale approccio in altri territori costieri, liguri e nazionali, al fine di tarare la classificazione SCMR alle falesie modellate in altri ammassi rocciosi, interessate da moto ondoso in differenti condizioni meteomarine e caratterizzate da interventi antropici diversi.

## Bibliografia

- Bieniawski Z.T. (1989) - *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley Ed., New York. 257 pp.
- Coastal Engineering Research Center (2002) - *Coastal Engineering Manual*. EM 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Internet Publishing Group.
- Corsi B., Elter F.M., Giammarino S. (2001) - *Structural fabric of the Antola Unit (Riviera di Levante, Italy) and implications for its alpine versus apennine origin*. *Ofioliti*, 26 (1): 1-8.
- Corsi B. (2003) - *Eventi tettonico-sedimentari del settore tra Chiavari e Genova Nervi nel quadro dell'evoluzione geodinamica del sistema Ligure Balearico e Tirrenico*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra, Università degli Studi di Genova.
- Cortemiglia G.C. (1982) - *Indizi Geomorfologici significativi quale contributo alla stesura di una carta neotettonica della Liguria* - Contributi conclusivi per la realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia, pubblicazione n. 513 del Progetto Finalizzato Geodinamica. CNR Roma: 397-404.
- Fanucci F., Pintus S., Tedeschi D. & Vignolo A. (1980) - *Dati preliminari sulla neotettonica dei Fogli 83-94 Rapallo, Chiavari* - Contributi preliminari alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia, pubblicazione n. 356 del Progetto Finalizzato Geodinamica. CNR Roma, 1305-1327.
- Gallino S., Benedetti A., Onorato L. (2012) - *Wave Watching. Lo spettacolo delle mareggiate in Liguria*. Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, 224 pp.
- Lucchetti A. (2013) - *Evoluzione recente e rischio geomorfologico delle coste alte rocciose tra Genova Nervi e Camogli (Liguria orientale)*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra, Università degli Studi di Genova, 127 pp.
- Lucchetti A., Brandolini P., Robbiano A., Firpo M. e Faccini F. (2013) - *The Sea Cliff Mass Rating geomechanical classification for the rocky coastal management plan*. 12th European Geoparks Conference National

- Park of Cilento, Vallo di Diano and Alburni Geopark- Italy, 4th-6th September 2013, 158-161.
- Marini M. (1981) - *Analisi geologico-strutturale ed interpretazione paleogeografica e tettonogenetica dei Calcari del M. Antola (Appennino Ligure)*. *Ofioliti*, 6: 119-150
- Marinos P., Hoek E. (2000) - *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*, Proc. Geo-Eng2000 Int. Conf. on Geotech. and Geol. Engineering. Melbourne, Technomic publishers, Lancaster. pp. 1422-1446
- Provincia di Genova (2004) - *Studio dell'Ambito Costiero tratto tra Punta Vagno ed il Golfo Paradiso*. Area 06 Difesa del Suolo, Opere Ambientali e Piani di Bacino. 256 pp.
- Rocscience Inc., 2010. *DIPS 5.0 software*
- Romana M. (1985) - *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Proc. ISRM Int. Symp. on the Role of Rock Mech.. Zacatecas. pp. 49-53.
- Romana M. (1993) - *A geomechanics classification for slopes: Slope Mass Rating*. Hudson, J. Ed., *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon 3: 575-600.
- Selby M.J. (1980) - *A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand*. *Z. Geomorph. N.F.*, 24-1: 31-51.
- Sunamura T. (1992) - *Geomorphology of Rocky Coasts*. J. Wiley & Sons Ed., Chichester, U.K. 302 pp.

**Ricevuto il 21/02/2014, accettato il 07/07/2014.**