



REMACO - Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas



Applicazione del modello di valutazione degli effetti del moto ondoso sulle falesie

Febbraio 2024

REMACO - Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas

WP 4 - Deliverable 4.5.1

Applicazione del modello di valutazione degli effetti del moto ondoso sulle falesie

Partner responsabile:

Università degli Studi di Enna "Kore" - Coord. Prof. V. Lentini

Partner coinvolti:

University of Malta - Coord. Prof. S. D'Amico

1 PREMESSA

Il Progetto “**REMACO** - Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas” mira all’integrazione delle reti, specializzandole nel monitoraggio quantitativo dell’erosione costiera e delle inondazioni, introducendo il *know-how* già acquisito per lo sviluppo di sistemi di gestione delle immagini che consente di passare dall’analisi qualitativa a quella quantitativa.

Nel presente documento viene descritto il procedimento con cui i diversi elementi e le diverse metodologie con cui sono stati analizzati i fenomeni legati alla dinamica “terrestre” e quelli legati alla dinamica “marina” si integrano e completano.

La metodologia proposta si basa su una serie di indagini dirette e indirette che identificano i processi che generano i principali fenomeni erosivi nelle coste alte rocciose.

In particolare, il rilievo geostrutturale ha interessato un tratto di 1 km; il tratto di costa con applicazione del modello di valutazione degli effetti del moto ondoso sulle falesie ha uno sviluppo lineare di 1 km; la superficie di falesia interessata dal sistema di monitoraggio è di 1 km².

2 DEFINIZIONE DI UNA PROCEDURA PER L’ANALISI DEL PROCESSO DI ARRETRAMENTO COSTIERO

L’analisi ha lo scopo di orientare programmi tecnici e politici alla mitigazione del rischio, al fine di indirizzare le risorse pubbliche laddove ci siano maggiori priorità. Sulla base di queste considerazioni lo studio si propone di definire l’iter procedurale per la stima di un indicatore di rischio, stimata attraverso criteri analisi del rischio di tipo quantitativo. Viene dunque definito un modello di indagine valido in linea generale per diversi contesti di applicazione e per diverse scale di approfondimento.

L'iter procedurale adottato è sintetizzato in un diagramma di flusso che mette in ordine ed in sequenza una serie di step (Figura 1).

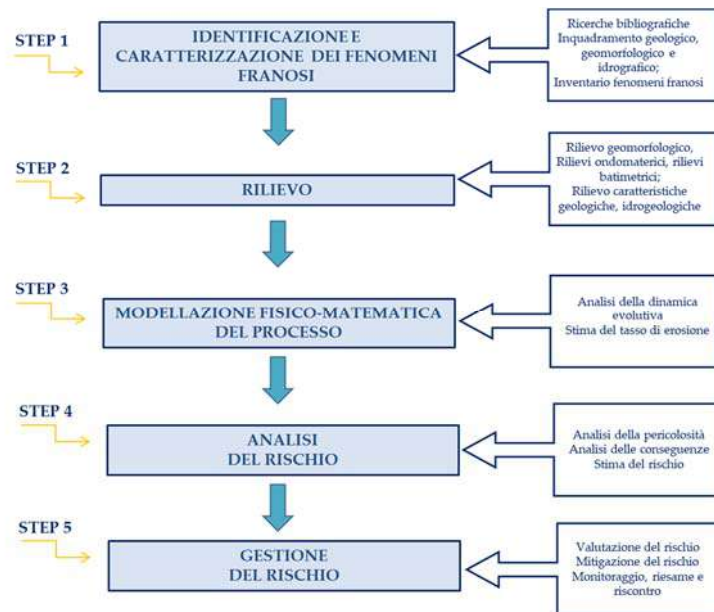


Figura 1 - Iter procedurale per analisi del processo di arretramento.

In relazione agli obiettivi da perseguire ed alla scala di dettaglio alla quale si svolge l'analisi è necessario definire le grandezze, parametri o indicatori che sono da considerarsi rilevanti.

Gli strumenti più efficaci per illustrare e comprendere la realtà fisica del territorio studiato sono rappresentati dalle carte geomorfologiche, documenti prodotti mediante rilevamenti diretti e sistematici effettuati sul terreno e su immagini telerilevate (fotografie aeree ed immagini satellitari).

Lo step successivo riguarda il rilievo dei dati necessari per la successiva analisi del rischio. Ciò può essere effettuato con diverse tecniche a diverse scale di approfondimento, così come di seguito riportato:

- Analisi Fotografica Multitemporale
- Rilievo caratteristiche morfologiche delle superfici
- Rilievo delle caratteristiche geologico-strutturali
- Rilievo delle caratteristiche geomorfologiche

- Rilievo dei processi di arretramento delle falesie in atto
- Rilievo caratteristiche geo-meccaniche
- Rilievo delle caratteristiche geotecniche
- Rilievo delle caratteristiche idrogeologiche
- Rilievo delle caratteristiche climatiche
- Rilievo della superficie sommersa
- Modello digitale del fondale: rilievi batimetrici
- Rilievi ondametrichi

Le fasi descritte servono per definire il contesto in cui si possono sviluppare condizioni di instabilità nelle coste alte rocciose, considerando i fattori geologici, idrodinamici e climatici. Integrando le conoscenze generali e tutti i dati raccolti in fase di rilievo del tratto di costa indagato e del moto ondoso è possibile definire un modello dell'instabilità, dove si evidenziano quali sono gli effetti prodotti dal moto ondoso sulle falesie.

3 SVILUPPO DI UN MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL MOTO ONDOSI SULLE FALESIE

Lo studio del comportamento di una costa rocciosa sotto l'azione delle onde di mare risulta molto complesso, poiché sono numerose le variabili in gioco che influenzano l'input ovvero l'energia posseduta dalle onde prima dell'impatto contro l'ammasso roccioso.

Lo studio delle coste alte è prevalentemente orientato a comprendere il fenomeno dell'erosione e dell'arretramento in modo da poterne predire l'evoluzione e quindi pianificare interventi che possano ridurre il possibile danno.

Sebbene in letteratura esistano differenti approcci, anche riguardo ai dati rilevati ed al modello di analisi scelto, come anticipato c'è un sostanziale accordo nel classificare le tipologie di meccanismi che innescano frane in contesti di falesie attive (applicabili anche a falesie costituite da rocce dure) in: "marino", prevalentemente conseguente

alla azione del moto ondoso, ed uno più legato a fenomeni “terrestri” di evoluzione del versante, tra cui il più rilevante è la azione delle acque sotterranee (Figura 2).

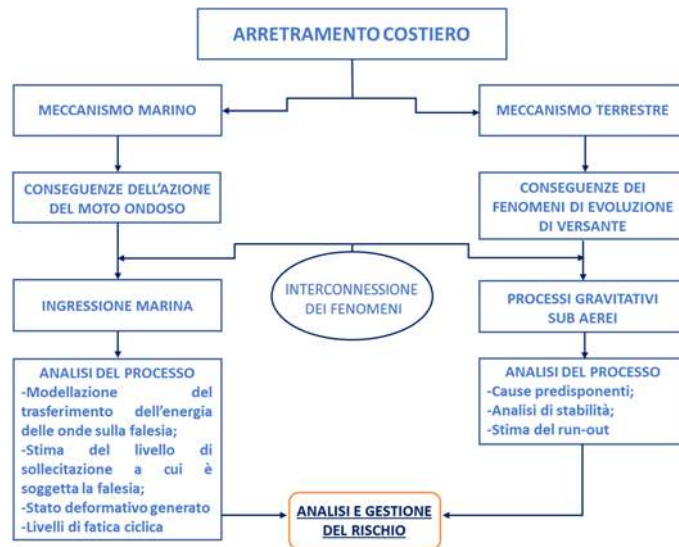


Figura 2 - Meccanismi di attivazione dei processi di instabilità di una falesia.

3.1 ANALISI DEL PROCESSO EROSIVO

Le principali azioni che controllano la prima fase dell’evoluzione del processo erosivo sono senza dubbio l’azione erosiva del mare che provoca l’instaurarsi del solco di battigia con conseguente fratturazione dell’ammasso roccioso, l’azione erosiva degli agenti atmosferici che determina la modellazione della falesia a causa di fenomeni gravitativi sub aerei, altri fattori fisico-chimici legati al degrado dovuto dall’interazione acqua-sali-roccia legata a fenomeni di tipo atmosferico (spruzzi del mare), alle maree, alle precipitazioni piovoso e ai fenomeni di fatica del materiale correlati alla ciclicità dell’azione delle onde. Infine, l’azione sismica sottopone le falesie a condizioni di carico eccezionali che possono portare al collasso strutturale.

3.1.1 Azione erosiva del mare

Il moto ondoso rappresenta una perturbazione della superficie del mare per opera del vento, delle maree o del sisma. La capacità erosiva del mare è determinata da:

- Alterazione chimica dell'ammasso roccioso determinata dall'interazione acqua-sali-roccia;
- Azione di compressione e decompressione determinata dalle onde sull'aria contenuta nelle fessure e lungo i piani di stratificazione della roccia;
- Azione disagregante di piccole porzioni di roccia, ciottoli o frammenti scagliati contro la parete rocciosa.

Gli effetti dell'azione erosiva del mare sono i seguenti:

- Formazione del solco di battente che dipende dall'intensità del moto ondoso e dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso;
- Formazione delle fessure nella parte sommitale della falesia;
- Crollo o ribaltamento a causa del carico e del peso proprio.

3.1.2 Azione resistente dell'ammasso roccioso

Al fine dello studio del processo erosivo è necessario definire la resistenza degli ammassi rocciosi nei meccanismi che provocano instabilità. Prima, tuttavia, di esaminare il comportamento tensio-deformativo degli ammassi rocciosi è necessario caratterizzare la roccia intatta, poiché spesso si ha a che fare con ammassi rocciosi interessati da discontinuità e presenza di vuoti. Le principali proprietà che caratterizzano il materiale roccioso sono classificabili in:

- Proprietà fisiche;
- Proprietà meccaniche.

Di seguito si elencano le principali proprietà fisiche che influenzano la resistenza all'azione disagregante del materiale roccioso:

- Peso del volume dei solidi;
- Peso del volume apparente;
- Porosità;
- Coefficiente di imbibizione;
- Grado di compattezza.

Le proprietà meccaniche delle rocce sono esprimibili in termini di:

- Resistenza alla compressione;

- Resistenza alla trazione;
- Resistenza alla flessione;
- Resistenza all'usura.

Le rocce hanno spesso caratteristiche meccaniche tipicamente disomogenee e anisotrope.

Dal punto di vista geo-meccanico, quindi, un ammasso roccioso è una struttura composta da volumi di roccia unitario (VRU) separati da discontinuità, pertanto, al fine di determinare la resistenza all'azione del moto ondoso è necessario caratterizzare l'ammasso roccioso in termini di proprietà della roccia intatta e delle discontinuità. Le discontinuità possono essere:

- di stratificazione;
- tettoniche;
- di altra natura (fratture da raffreddamento in rocce magmatiche ecc..).

Al fine di procedere alla classificazione di un ammasso roccioso è necessario definire tutti i parametri geo-meccanici che lo caratterizzano unitamente a una sua descrizione geologico-strutturale.

I parametri che definiscono le caratteristiche meccaniche delle discontinuità di un ammasso roccioso hanno un'importanza rilevante nello studio del comportamento tensionale e deformativo dello stesso, i più significativi sono:

- Apertura;
- Rugosità;
- Riempimento;
- Alterazione;
- Condizioni idrauliche;
- Resistenza a compressione;
- Rigidezza normale e tangenziale;
- Angolo di attrito di base, residuo e di picco.

Sono disponibili in letteratura diversi metodi e sistemi di classificazione degli ammassi rocciosi tra i quali:

- Classificazione RMR di Bieniawsky;
- Classificazione Q di Barton;
- Classificazione GSI di Hoek e Brown;
- Classificazione RMI di Palmstrom;
- Classificazione n^k di Jasarevic e Kovacevic.

Per lo sviluppo del modello di valutazione degli effetti del moto ondoso sulle falesie è stata presa in considerazione la classificazione Rm_i di Palmstrom (1995).

3.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

La classificazione della massa rocciosa è il processo di collocazione di una massa rocciosa in gruppi o classi (Bieniawski, 1989) che consente di assegnare una descrizione unica sulla base di proprietà o caratteristiche simili tali da definire il comportamento meccanico della massa rocciosa. Le classificazioni geo-meccaniche degli ammassi rocciosi, oltre a descrivere le principali caratteristiche tecniche degli stessi, forniscono un approccio empirico per affrontare un problema molto complesso. I parametri utilizzati per la descrizione e la classificazione della massa rocciosa generalmente (Bieniawski, 1993) sono:

1. la resistenza del materiale roccioso intatto (resistenza alla compressione, modulo di elasticità);
2. attribuzione del livello di qualità della roccia (RQD);
3. parametri dei giunti quali orientamento, spaziatura e condizioni (apertura, rugosità superficiale);
4. deflusso acque sotterranee;
5. condizioni di carico;
6. principali strutture geologiche.

3.2.1 Sistemi di classificazione

La difficoltà principale nella classificazione oggettiva delle caratteristiche di un ammasso roccioso è legata sostanzialmente alla non facile acquisizione dei parametri d'ingresso. È necessario, pertanto, ave-

re un quadro chiaro dei parametri d'ingresso delle diverse classificazioni geo-meccaniche tenendo presente che i metodi di classificazione oggi disponibili possono essere suddivisi sulla base della modalità di caratterizzazione in qualitativi e quantitativi.

I sistemi qualitativi, nei quali le condizioni dell'ammasso roccioso sono per lo più descritte senza una vera e propria quantizzazione delle stesse e cioè risultano essere descrittivi. Questi includono GSI (Geological Strength Index), Rock Load e SIA 199 (Schweizerischer Ingenieur-und Architekten-Verein) mentre i sistemi Q, RMR, RSR e RQD sono quantitativi.

Altro sistema di classificazione è il Rock Mass Index (RM_i) è stato proposto da Palmström (1995) per caratterizzare la massa rocciosa come materiale da costruzione, fondata sulla combinazione di diversi parametri. L'indice di classificazione RM_i presuppone l'assimilazione del comportamento di un ammasso roccioso a quello di un materiale da costruzione. Esso corrisponde alla resistenza a compressione semplice della matrice rocciosa intatta σ_c a meno di un parametro di riduzione J_p attraverso la relazione:

$$RM_i = \sigma_c J_p \quad \text{Equazione 1}$$

dove σ_c è la resistenza a compressione uniassiale del materiale roccioso intatto in Mpa; J_p è il parametro rappresentativo delle caratteristiche delle discontinuità, composto da 4 caratteristiche comuni, volume del blocco VRU, densità delle fratture, rugosità j_R , dimensione j_L e alterazione j_A . J_p è il fattore di riduzione che rappresenta gli effetti dei giunti sulla resistenza della massa rocciosa. J_p vale 1 per roccia intatta e 0 per roccia frantumata, e si può ottenere dalla seguente:

$$J_p = 0.2 (j_C)^{0.5} (VRU)^D \quad \text{Equazione 2}$$

dove VRU è il volume del blocco in m^3 e D è dato dalla seguente:

$$D = 0.37 j_C^{0.2} \quad \text{Equazione 3}$$

Il parametro j_C (Joint Condition factor) è correlato con j_R , j_A e j_L mediante la seguente:

$$j_C = j_L \left(\frac{j_R}{j_A} \right) \quad \text{Equazione 4}$$

Il fattore j_L esprime il contributo dovuto all'estensione e continuità delle discontinuità. I parametri j_R e j_A esprimono, rispettivamente, il contributo della rugosità delle pareti delle discontinuità e il contributo del grado di alterazione delle stesse e della eventuale presenza di un materiale di riempimento.

Tabella 1. Joint Length and Continuity Factor j_L (Palmstrom, 1995).

| Lunghezza Discontinuità[m] | Denominazione | Tipo | Discontinuità continue | Discontinuità discontinue |
|----------------------------|---------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| | | | j_L | |
| <0.5 | Molto piccola | Stratificazione | 3 | 6 |
| 0.1-1.0 | Piccola | Frattura | 2 | 4 |
| 1-10 | Media | Frattura | 1 | 2 |
| 10-30 | Lunga | Frattura | 0.75 | 1.5 |
| >30 | Molto lunga | Frattura riempita | 0.5 | 1 |

Poiché l'indice RM_i esprime la resistenza alla compressione semplice dell'ammasso, è necessaria una sua calibratura.

Tabella 2. The Joint Roughness J_R factor (Palmstrom, 1995).

| j_R | | Ondulazione delle discontinuità | | | | |
|------------------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------|-----------|---------|
| | | Planare | Leggermente ondulata | Fortemente ondulata | A scalini | Serrata |
| Rugosità delle discontinuità | Molto rugosa | 3 | 4 | 6 | 7.5 | 9 |
| | Rugosa | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Leggermente rugosa | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 4.5 |
| | Liscia | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 |
| | Lucida | 0.75 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 |
| | Piano di faglia* | 0.6-1.5 | 1-2 | 1.5-3 | 2-4 | 2.5-5 |

*Per i piani di faglia, il valore j_R dipende dalla presenza e dall'aspetto delle striature; il valore più elevato è usato nel caso di striature ben marcata; per discontinuità riempite si assegna un valore unitario e per le discontinuità irregolari è suggerito un valore pari a 5.

Tabella 3. The Joint Alteration Factor j_A (Palmstrom, 1995).

| Contatto fra le superfici della discontinuità | | | |
|---|-----------------------|---|-------|
| Condizioni | | Descrizione | j_A |
| Discontinuità pulita | Discontinuità saldata | Riempimenti impermeabili teneri (quarzo, epidoto, calcite, ecc) | 0.75 |
| | Pereti fresche | Nessun rivestimento o riempimento sulla superficie giuntata | 1 |

DELIVERABLE 4.5.1

| Alterazione delle pareti | Pareti alterate | Le superfici sono alterate rispetto alla roccia fresca | 2 |
|--|--|--|------------------|
| | Pareti molto alterate | Le superfici sono molto alterate rispetto alla roccia fresca | 4 |
| Patina o sottile riempimento | Sabbia, limo, calcite ecc. | Rivestimento di materiali attritivi senza argilla | 3 |
| | Argilla, clorite, talco, ecc. | Rivestimento di minerali coesivi e teneri | 4 |
| Discontinuità riempita con contatto parziale o assente fra le superfici | | | |
| Tipo di materiale di riempimento | Descrizione | j _A | |
| | | Contatto parziale (< 5mm*) | Contatto assente |
| Sabbia, limo, calcite, ecc. | Riempimento di materiale attritivo senza argilla | 4 | 8 |
| Argilla compatta | Riempimento di materiale coesivo sovraconsolidato | 6 | 10 |
| Argilla plastica | Riempimento di materiale coesivo da mediamente a poco sovraconsolidato | 8 | 12 |
| Argilla rigonfiante | Riempimento di materiale rigonfiante | 8-12 | 12-20 |
| <small>*Basato sull'apertura delle discontinuità del sistema RMR (Beniawski, 1973)</small> | | | |

La relazione perde significato a prescindere dal fattore di condizione delle discontinuità, per valori di J_p prossimi all'unità e cioè per ammassi rocciosi poco fratturati o massivi nei quali il diametro equivalente del VRU è all'incirca maggiore o uguale 2.2 m. In quest'ultimo caso l'indice RM_i potrà essere calcolato tenendo conto dell'effetto scala con la relazione seguente:

$$RM_i = \sigma_{ci50} f_s \quad \text{Equazione 5}$$

dove:

- σ_{ci50} = resistenza a compressione semplice della matrice rocciosa intatta calcolata provini cilindrici del diametro di 50 mm;
- $f_s = (0.05/D_b)^{0.2}$, con D_b diametro del blocco, fattore di scala;
- $D_b = \sqrt[3]{VRU}$ diametro equivalente in m.

Per quanto riguarda la determinazione del volume roccioso unitario può essere ricavato dai valori di spaziatura caratteristica delle fami-

glie di discontinuità che formano il VRU considerato. In alternativa si può calcolare il VRU in funzione del fattore di forma β e dell'indice volumetrico di fratturazione j_v mediante la seguente relazione:

$$VRU = \beta (j_v)^{-3} \quad \text{Equazione 6}$$

dove:

$$\beta = 20 + 7 \left(\frac{S_{car}^{max}}{S_{car}^{min}} \right) \frac{3}{n_{tot}} \quad \text{Equazione 7}$$

in cui:

- S_{car}^{max} = spaziatura caratteristica massima del VRU considerato;
- S_{car}^{min} = spaziatura caratteristica minima del VRU considerato;
- n_{tot} = numero totale delle famiglie di discontinuità di un ammasso roccioso.

Tabella 4. Valori di n_{tot} .

| Numero famiglie di discontinuità | n_{tot} |
|----------------------------------|-----------|
| 3+dis.random | 3.5 |
| 3 | 3 |
| 2+disc.random | 2.5 |
| 2 | 2 |
| 1+disc.random | 1.5 |
| 1 | 1 |

Tabella 5. Valori di β .

| Forma del volume roccioso unitario | β |
|------------------------------------|------------|
| Equi-dimensionale | ≤ 30 |
| Prismatico | 30 - 100 |
| Prismatico - tabulare | 100 - 750 |
| Tabulare | 750 - 3000 |

Il valore assunto del fattore n_{tot} , al variare del numero totale delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, è riportato nella tabella precedente. Secondo (Palmstrom, 1995), l'indice RM_i può essere facilmente utilizzato per stime approssimative nelle prime fasi di un progetto. Usando RM_i i valori dei parametri del criterio di resistenza di Hoek-Brown possono essere facilmente e più accuratamente determinati mediante le seguenti relazioni:

$$S_m = (J_P)^2 \quad \text{Equazione 8}$$

$$m_m = m_i (J_P)^{0.64 \div 0.857}$$

Equazione 9

dove:

- m_i = costante empirica adimensionale per la matrice rocciosa intatta (criterio di resistenza di Hoek - Brown).

La classificazione RM_i è calibrata su sette classi di qualità, comprese tra $0.001 > RM_i > 100\text{MPa}$, a ognuna delle quali corrisponde il relativo valore di resistenza a compressione semplice dell'ammasso σ_{cm} .

Tabella 6. Classificazione RM_i ammassi rocciosi (Palmstrom, 1995).

| Resistenza a compressione semplice dell'ammasso roccioso, σ_{cm} | RM_i (MPa) |
|---|--------------|
| Estremamente bassa | < 0.001 |
| Molto Bassa | 0.01 0.01 |
| Media | 0.01 0.1 |
| Elevata | 0.1 1.0 |
| Molto elevata | 1.0 10 |
| Estremamente elevata | 10 - 100 |

L'uso del parametro RM_i può migliorare l'input in altri sistemi di classificazione. Il sistema RM_i comprende una vasta gamma di tipologie di massa rocciosa, quindi, ha un campo di applicazioni più ampio rispetto ad altri sistemi di classificazione.

3.2.2 La deformabilità degli ammassi rocciosi

Negli ammassi rocciosi la relazione tensioni-deformazioni è molto complessa in quanto essi sono mezzi spiccatamente anisotropi costituiti da volumi di matrice rocciosa intatta VRU separati da discontinuità più o meno deformabili in relazione alle loro caratteristiche intrinseche di apertura, rugosità, riempimento e storia deformativa.

La deformabilità è condizionata oltre che dalla litologia da una serie di fattori che ne determinano un comportamento elasto-plastico a volte molto diverso da quello esplicito dalla sola matrice rocciosa intatta. I fattori che influenzano la deformabilità degli ammassi sono principalmente i seguenti:

- il VRU dell'ammasso interessato dalla deformazione;

- entità dello stato tensionale in situ;
- orientazione delle discontinuità;
- grado di separazione dell'ammasso roccioso.

3.3 MODELLAZIONE MATEMATICA DEL FENOMENO DI AR- RETRAMENTO COSTIERO BASATA SULLA STIMA DEL TASSO DI EROSIONE

Viene proposta una metodologia per fare stime approssimative della forza distruttiva delle onde sulle scogliere in cui non sono disponibili dati batimetrici precisi, mediante correlazione tra il tasso di erosione dell'ammasso roccioso e la resistenza meccanica della massa rocciosa. La correlazione utilizzata consente di ottenere una relazione lineare tra il tasso medio di erosione a lungo termine (dal punto di vista ingegneristico), dato dall'energia delle onde e dalla resistenza dell'ammasso roccioso all'azione disgregante e alla fratturazione.

Il modello sviluppato per lo studio del processo di erosione si basa sul modello teorico proposta da Sunamura nel 1977 e rivisto nel 2015.

Per lo studio del fenomeno di instabilità dovuta alla formazione del solco di battigia è necessario caratterizzare l'ammasso roccioso in termini di resistenza all'azione disgregante che provoca il solco quindi al deterioramento della cementazione tra i materiali che costituiscono l'ammasso e in termini di resistenza alla formazione e allo sviluppo di fratture.

Il fenomeno della propagazione delle fessure in materiali fragili può essere studiato in termini energetici globali mediante il criterio di Griffith. Si propone dunque la seguente formulazione semplificata per la stima del tasso di erosione delle falesie, basata sulla relazione proposta da Sunamura (2010) estrapolata dall'autore sulla base di esperimenti condotti su un modello fisico in scala ridotta.

$$\frac{dX}{dt} = C F$$

Equazione 10

dove:

dX/dt = tasso di erosione;

X = rappresenta la profondità di erosione;

t = tempo;

C = Costante di proporzionalità;

F = Forza erosiva.

Nella relazione precedente, se il valore F (tasso di erosione) risulta maggiore dell'unità, si verifica erosione.

$$F = \left(\frac{F_W}{F_R} \right) - 1$$

Equazione 11

con:

F_W = Azione erosiva del moto ondoso [F/L^2];

F_R = Resistenza ammasso roccioso.

Il parametro F_W rappresentativo del trasferimento di energia dell'onda alla falesia può essere studiato a diversi ordini di approfondimento e accuratezza mediante la teoria del moto ondoso lineare (onda di Airy) o non lineare (profilo di terzo ordine di Stokes).

In via semplificata è possibile prendere in considerazione l'ipotesi di Sunamura (2010) nella quale la forza erosiva del moto ondoso è data dalla seguente:

$$F_W = A \rho g H$$

Equazione 12

dove:

- A = parametro adimensionale che tiene conto dello scostamento dal modello alle condizioni reali;
- ρ = densità dell'acqua;
- g = accelerazione di gravità;
- H = altezza dell'onda.

Per la valutazione della resistenza dell'ammasso roccioso, si assume, che sia esprimibile dalla somma della resistenza a subire erosione (resistenza alla formazione del solco di battente) e la resistenza alla propagazione delle fratture secondo la seguente relazione:

$$F_R = B (F_{R1} + F_{R2})$$

Equazione 13

con B parametro adimensionale che tiene conto dell'alterazione nel tempo delle caratteristiche dell'ammasso roccioso.

La resistenza alla formazione del solco dipende dalle caratteristiche qualitative dell'ammasso roccioso e quindi dalle caratteristiche della roccia intatta (o dei VRU) e dei giunti; pertanto, si assume che sia esprimibile dalla seguente:

$$F_{R1} = RM_i = \sigma_c J_c \quad \text{Equazione 14}$$

dove:

- σ_c = resistenza a compressione uniassiale della roccia;
- J_c = Joint Conduction Factor.

Il processo di arretramento viene innescato dalla formazione del solco e successivamente evolve con il raggiungimento di una condizione critica oltre la quale si ha la formazione di fessure sulla cresta della falesia che al raggiungimento della condizione limite di stabilità evolve in distacco del masso e trasporto di massa verso valle.

Si assume che la propagazione delle fessure possa essere studiata mediante un approccio di tipo lineare; pertanto, si ha che l'azione resistente alla propagazione della fessura è pari allo sforzo critico al di sopra del quale la fessura si propagherà in maniera catastrofica e calcolato secondo la relazione:

$$F_{R2} = \sigma_f = \left(\frac{2 E' G_f}{\pi a} \right)^{1/2} \quad \text{Equazione 15}$$

dove:

- σ_f = sforzo critico;
- E = modulo di deformazione dell'ammasso roccioso;
- a = ampiezza della fessura critica.

Pertanto, si ha:

$$F = \left\{ \frac{A \rho g H}{B (\sigma_c J_c + \sigma_f)} \right\} - 1 \quad \text{Equazione 16}$$

$$\frac{dx}{dt} = C \left\{ \frac{A}{B} \left[\frac{(\rho g H)}{(\sigma_c J_c + \sigma_f)} \right] - 1 \right\} \quad \text{Equazione 17}$$

$$\frac{dx}{dt} = K \left[\frac{(\rho g H)}{(\sigma_c J_c + \sigma_f)} - \varepsilon \right] \quad \text{Equazione 18}$$

dove:

- K = costante di calibrazione [L/T⁻¹]
- ε = B/A coefficiente adimensionale.

Da osservazioni sperimentali condotte da Sunamura et al. (2010) è stato possibile appurare che la quantità $\frac{(\rho g H)}{B S_c} \cong \frac{(\rho g H)}{\sigma_c J_c}$ è molto maggiore di ε e pertanto trascurabile. Dunque, la (20) diventa:

$$\frac{dx}{dt} = K \left[\frac{(\rho g H)}{(\sigma_c J_c + \sigma_f)} \right] \quad \text{Equazione 19}$$

Il modello sopra descritto ha validità locale ed i risultati non possono essere estrapolati a diverse aree di studio. Pertanto, il modello va calibrato in ogni caso studio e nello specifico deve essere calibrata la costante K [L/T⁻¹] e le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso.

4 IL RILIEVO DELLE CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE DEL SITO

Per poter applicare il modello per la valutazione degli effetti del moto ondoso sulle falesie per un tratto di 1 km, un ruolo di notevole importanza è rivestito dal rilievo delle caratteristiche geomeccaniche del sito. A seguire si riportano i risultati del rilievo geomeccanico eseguito sul sito di Capo Calavà nell'ambito del presente progetto.

Il rilievo geostrutturale, avente sviluppo di 1 km, ha consentito di acquisire i dati indispensabili alla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso. Sono quindi state rilevate le caratteristiche dei giunti misurandone la giacitura e sono inoltre state eseguite numerose prove sclerometriche per la stima della resistenza a compressione monoassiale e numerose misurazioni di rugosità utilizzando il pettine di Barton.

Esistono numerosi criteri per la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, la scelta di un metodo o di un altro dipende principalmente dalle condizioni dell'ammasso roccioso. In particolare, alcuni criteri, quali ad esempio quello di Barton-Bandis, sono l'ideale quando nell'affioramento, statisticamente si individua una iso-orientazione dei giunti, che fa presupporre che la rottura possa avvenire prevalentemente lungo tali piani di discontinuità. Mentre altri metodi, quali ad esempio il criterio di Hoek-Brown, trovano una maggior efficacia quando nell'affioramento si individuano numerosi piani di discontinuità variamente orientati.

Nel caso specifico, come si evince dai dati acquisiti e dalle elaborazioni eseguite nell'ambito del rilievo geo-strutturale, nel sito studiato esistono numerosi piani di discontinuità variamente orientati e con diverse caratteristiche. Pertanto, si ritiene che il criterio più adeguato alla sua caratterizzazione geomeccanica sia il criterio di Hoek-Brown che, partendo dai dati di rilievo, giunge, tramite appositi abachi, a stimare il comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso.

Il vantaggio dell'utilizzo di tale metodo è che esso consente di utilizzare tutte le informazioni acquisite durante il rilievo geomeccanico eseguito senza limitare le informazioni a puntuali misurazioni o prove in situ o in laboratorio. Uno dei dati di partenza per l'applicazione del metodo è la stima della compressione uniassiale. Essa è stata determinata tramite le prove sclerometriche (ASTM D 5873-00 "Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method").

Le prove sclerometriche sono state eseguite durante il rilievo geomeccanico con uno sclerometro per roccia a bassa energia (martello di Schmidt) prodotto dalla Controls. Le prove sono state eseguite normalmente alla superficie delle discontinuità. Lo sclerometro è uno strumento che misura la quantità di energia restituita dalla roccia per effetto del rimbalzo di una massa nota che viene fatta impattare normalmente alla roccia tramite una molla tarata e calibrata.

L'energia di rimbalzo viene letta sulla scala dello sclerometro e convertita in resistenza alla compressione monoassiale tramite un abaco in funzione della densità media della roccia. Per le plutoniti in affioramento si è assunto un valore medio del peso specifico dell'ammasso roccioso pari a 23.43 kN/mc. Di seguito si riportano i risultati numerici dei valori rilevati dell'indice di rimbalzo (*Tabella 7*) e la loro interpretazione riportata in *Figura 3*, realizzata tramite l'Abaco riportato in *Figura 4*.

Tabella 7. Dati prove sclerometriche

| ID prova | Percentuale energia di rimbalzo | | | | | | | | | | Orientazione sclerometro | | | | Resistenza alla compressione monoassiale (MPa) | | |
|----------|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------------------------|-----|---|------|--|-------------|--|
| | | | | | | | | | | | V er so b as so | | V e r s o l' a l t o | | | Orizzontale | |
| | | | | | | | | | | | 90° | 45° | +90° | +45° | | | |
| 1 | 18 | 20 | 19 | 22 | 24 | 22 | 25 | 20 | 18 | 18 | X | | | | | 28 | |
| 2 | 42 | 44 | 46 | 44 | 46 | 46 | 44 | 41 | 42 | 46 | X | | | | | 70 | |
| 3 | 58 | 54 | 48 | 54 | 52 | 50 | 54 | 52 | 55 | 55 | | | | X | | 104 | |
| 4 | 58 | 58 | 58 | 54 | 55 | 56 | 58 | 55 | 58 | 58 | | | | X | | 128 | |
| 5 | 48 | 40 | 50 | 44 | 46 | 45 | 44 | 45 | 46 | 48 | X | | | | | 82 | |
| 6 | 32 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 30 | 31 | 30 | 26 | X | | | | | 40 | |
| 7 | 44 | 42 | 42 | 42 | 44 | 42 | 44 | 42 | 44 | 42 | X | | | | | 70 | |
| 8 | 52 | 52 | 54 | 58 | 44 | 52 | 52 | 53 | 55 | 54 | X | | | | | 110 | |
| 9 | 56 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 50 | | | X | | | 84 | |
| 10 | 54 | 54 | 56 | 52 | 56 | 57 | 56 | 55 | 56 | 50 | | X | | | | 128 | |
| 11 | 48 | 50 | 44 | 44 | 46 | 48 | 45 | 48 | 44 | 46 | | | | X | | 80 | |
| 12 | 54 | 56 | 58 | 56 | 56 | 54 | 55 | 56 | 58 | 56 | | | | X | | 126 | |
| 13 | 38 | 38 | 38 | 40 | 40 | 38 | 38 | 40 | 36 | 38 | | | | X | | 54 | |
| 14 | 42 | 38 | 42 | 38 | 42 | 42 | 44 | 38 | 40 | 40 | | | X | | | 52 | |

Come si evince dalla *Tabella 7* i valori numerici della resistenza alla compressione monoassiale sono variabili in un ampio range, che varia

da un minimo di 28 MPa ad un massimo di 128 Mpa. Tale variabilità è certamente da identificare con un vario grado di alterazione della roccia; pertanto, per stabilire il valore medio da utilizzare per i successivi calcoli si è ritenuto opportuno non considerare i valori estremi. Il grafico riportato in *Figura 5* mostra con una linea rossa il valore medio di 70.6MPa così determinato che si è ritenuto opportuno utilizzare come dato di input per la classificazione di Hoek-Brown.

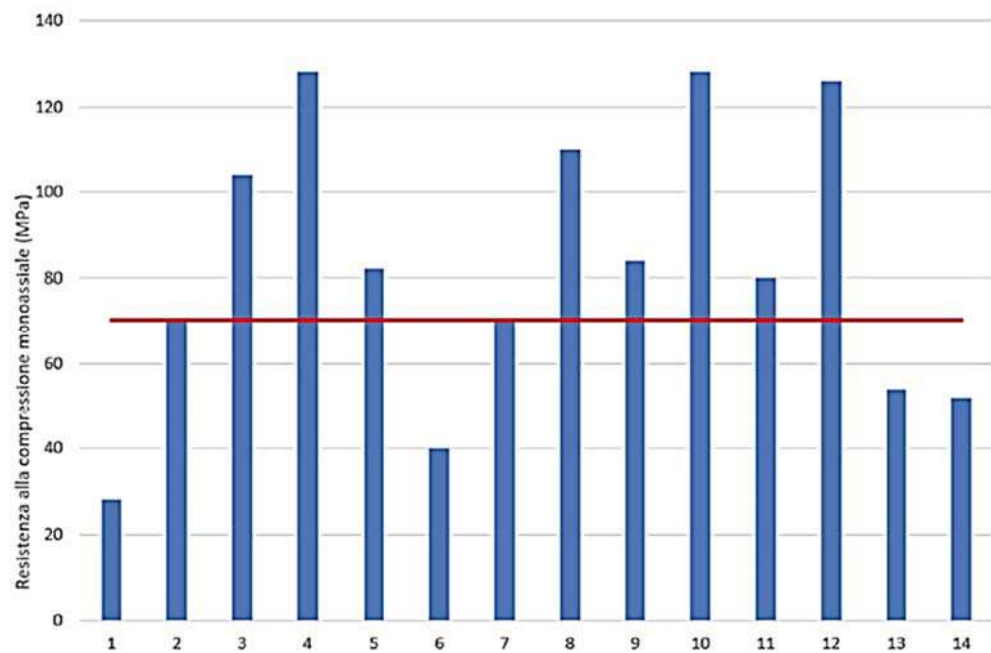


Figura 3 – Interpretazione dei risultati delle prove sclerometriche.

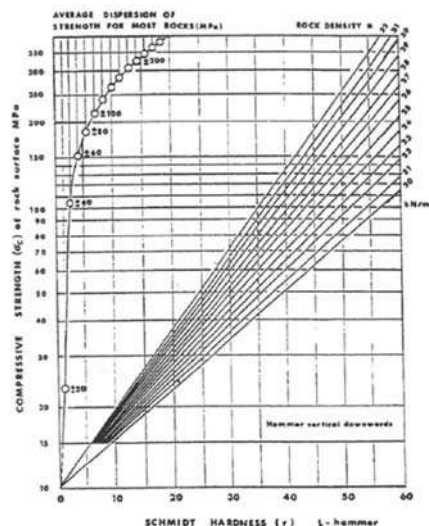


Figura 4 – Abaco di Schmidt

Gli altri dati necessari per l'applicazione del criterio di Hoek-Brown sono i seguenti:

- G.S.I. (Geological Strength Index)
- m_i (costante litologica)
- D (fattore di disturbo antropico).

Il parametro G.S.I. (Geological Strength Index) è un parametro adimensionale che descrive, con un parametro numerico, le caratteristiche giaciture e le condizioni delle discontinuità dell'ammasso roccioso in studio. Esso viene determinato tramite la metodologia descritta da Hoek & Marinos (2000) utilizzando l'abaco di *Figura 5*.

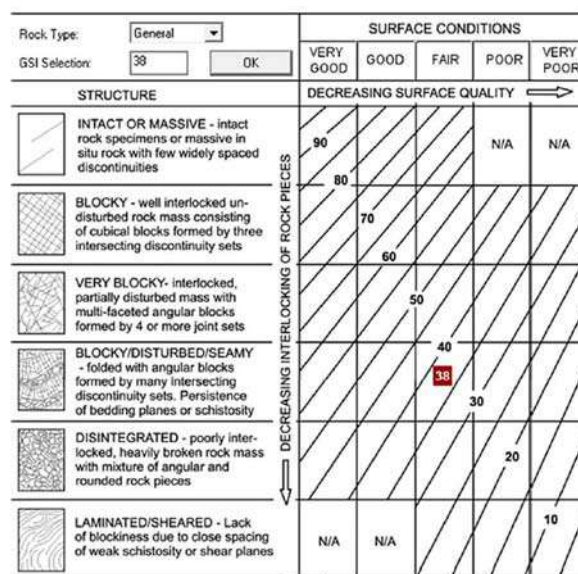


Figura 5 – Abaco per la determinazione di G.S.I. (Geological Strength Index)

Con riferimento all'abaco riportato nella *Figura 5* si ritiene di consigliare un valore di G.S.I. pari a 38 in quanto si tratta di un ammasso roccioso con piani di discontinuità variamente orientati con persistenti piani di scistosità. Infine, il valore m_i consigliato per le plutoniti in affioramento è generalmente è pari a 23 mentre il fattore di disturbo D può essere posto pari a 0 in quanto l'ammasso roccioso si trova in condizioni naturali. Applicando il criterio di Hoek-Brown ai dati sopra descritti si ottengono i seguenti risultati:

- Hoek Brown Classification:

$\sigma_{ci} = 70 \text{ MPa}$

$GSI = 38$

$m_i = 23$

$D = 0$

➤ Hoek Brown Criterion:

$m_b = 2.51232$

$s = 0.00101905$

$a = 0.51302$

➤ Failure Envelope Range:

Application = Slopes

$\sigma_{3max} = 1.59238 \text{ MPa}$

Unit Weight = 0.023 MN/m^3

Slope Height = 80 m

➤ Mohr-Coulomb Fit:

$c = 0.727935 \text{ MPa}$

$\phi = 53.3688 \text{ degrees}$

➤ Rock Mass Parameters:

Tensile strength: $\sigma_t = -0.0283933 \text{ MPa}$

Uniaxial compressive strength: $\sigma_c = 2.04287 \text{ MPa}$

Global Strength: $\sigma_{cm} = 14.2087 \text{ MPa}$

Modulus of deformation: $E_m = 4193.23 \text{ MPa}$

Nei seguenti grafici riportati in *Figura 6*, sono rappresentati i risultati del metodo di Hoek Brown (linea rossa) e vengono confrontati con quelli del metodo di Mohr-Coulomb (linea blu).

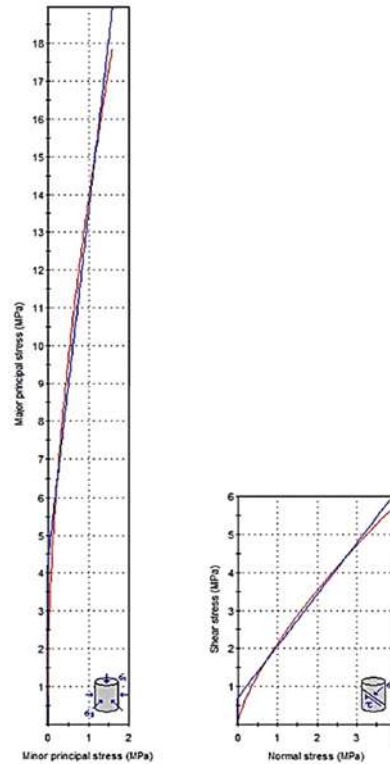


Figura 6 – Confronto dei risultati metodo di Hoek Brown con il metodo Mohr – Coulomb.

Infine, nelle seguenti *Figure 7, 8, 9, 10 e 11* si riportano le tavole riassuntive di tutte le criticità e fratture principali rilevate in fase di rilievo.



Figura 7 – Tavola 1 delle fratture e criticità principali rilevate in sito



Figura 8 – Tavola 2 delle fratture e criticità principali rilevate in sito

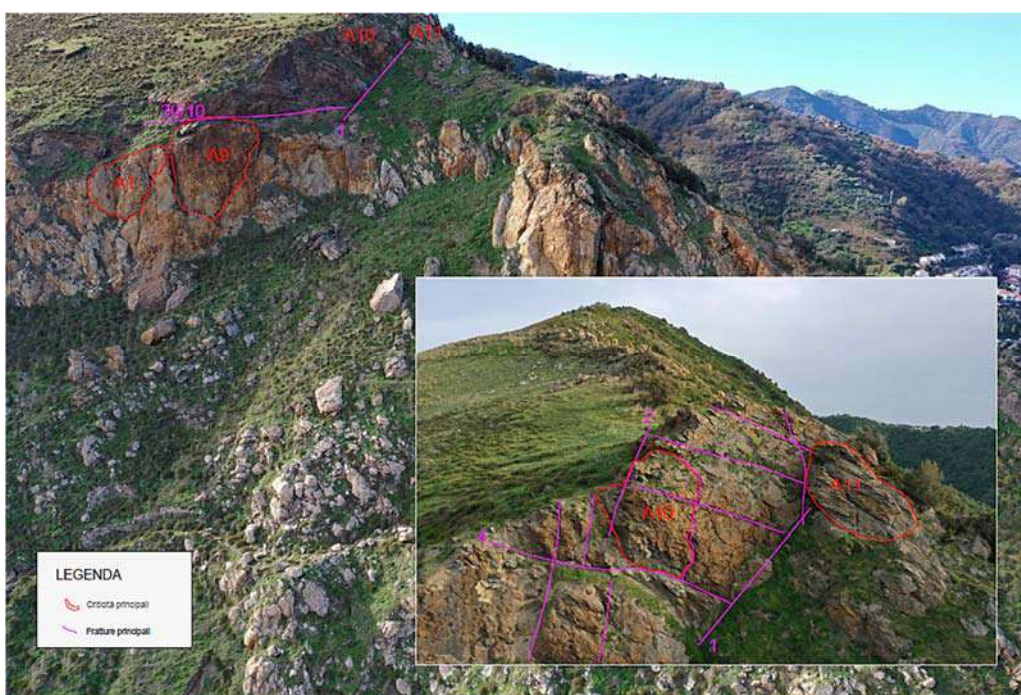


Figura 9 – Tavola 3 delle fratture e criticità principali rilevate in sito



Figura 10 – Tavola 4 delle fratture e criticità principali rilevate in sito



Figura 11 – Tavola 5 delle fratture e criticità principali rilevate in sito