ING. FABRIZIO PELLI, Ph.D. - VIA RIMASSA 51, 16129 GENOVA, ITALIA - CELL 3487381595 P. IVA 03574630103

Spett.le
Comune di Sori
Area Tecnica
Via G. Stagno, 19
16031 SORI (GE)

12 ottobre 2023

c.a. Geom. Antonio Corrao

Nota Preliminare – Prime valutazioni relative alla soluzione tecnica per il consolidamento della falesia del Cimitero di Sori - Settore 3, attualmente in fase di studio ai fini della progettazione definitiva.

1.0 Introduzione

Lo scrivente è stato incaricato dal Comune di Sori della progettazione definitiva delle opere di consolidamento dell'ammasso roccioso, con particolare riferimento agli aspetti geomeccanici, nel tratto di falesia collocato nel "settore 3", in corrispondenza del limite meridionale dell'area cimiteriale.

In questa nota sono presentate alcune valutazioni di carattere preliminare relative ai potenziali meccanismi di rottura del fronte roccioso (capitolo 2.0), e viene inoltre descritta l'ipotesi progettuale attualmente in fase di studio per il consolidamento della falesia (capitolo 3.0). Sono quindi presentati alcuni calcoli preliminari per una prima stima delle azioni di contrasto necessarie a prevenire il collasso di porzioni più o meno significative della falesia, e per una prima valutazione dell'interazione tra le opere ipotizzate e l'ammasso roccioso (capitolo 4.0). Le conclusioni sono riportate nel capitolo 5.0.

La soluzione progettuale ipotizzata in questa nota sarà oggetto di approfondimento in sede di progettazione definitiva, a valle delle necessarie indagini ad oggi non disponibili.

2.0 Alcune osservazioni relative all'ammasso roccioso

a. Introduzione

In generale i principali meccanismi individuati in base ad una ispezione visiva preliminare del fronte riguardano il progressivo distacco di blocchi delimitati da giunti preesistenti e di porzioni di roccia fratturata e talvolta aggettante.

Il fronte nel settore sud viene suddiviso in 4 fasce caratterizzate da condizioni diverse dell'ammasso roccioso, ordinate per quote (riferite al livello marino e alla sez. 10) decrescenti (Figura 2.1):

- Fascia A: tra le quote 25m e 29m circa.
- Fascia B: tra le quote 19m e 25m circa.
- Fascia C: tra le quote 5-6m e 19m circa.
- Fascia D: sotto i 5-6m di quota.

Il sedime dell'area cimiteriale raggiunge, in corrispondenza della cappella sovrastante la falesia e collocata ad alcuni metri dal ciglio di scarpata, una quota di circa 31.5m dal livello marino.

Per quanto riguarda la Fascia A, lo strato più superficiale è costituito da materiali con caratteristiche scadenti, presumibilmente di natura eluviale con possibile presenza di riporti. Al momento si ha una conoscenza ridotta di questo strato che è ricoperto di vegetazione e non è ancora stato oggetto di specifiche indagini geognostiche. Non è inoltre ad oggi nota nel dettaglio la morfologia superficiale dell'area incombente sul ciglio di scarpata, e se vi siano segni di movimento, cavità o altre indicazioni di dissesto.

Nella porzione del fronte di scarpata visibile al di sotto della zona vegetata, appare la roccia lapidea che in questa zona è caratterizzata da un notevole livello di alterazione superficiale. Sono visibili alcune nicchie di distacco risultanti dal crollo di blocchi con dimensione presunta di alcuni metri cubi. È evidente l'allentamento dell'ammasso roccioso dovuto alla decompressione della falesia associata al meccanismo di arretramento del fronte e al ridotto livello tensionale indotto dalla gravità a questa quota. Si osserva inoltre un considerevole grado di alterazione in corrispondenza dei giunti aperti. Come si vedrà in seguito, al di sopra dei blocchi lapidei incombe direttamente, almeno nella zona più orientale, il materiale alterato a cui si è fatto cenno in precedenza, mentre alla base dei blocchi è evidente l'arretramento del fronte dovuto alla presenza di litologie più sensibili ai fenomeni erosivi.

La Fascia B è delimitata alla base da un giunto di strato che per un tratto di circa 22m di lunghezza appare collocato in una porzione dell'ammasso interessata da un significativo livello di alterazione. Alle due estremità di questo tratto il giunto tende a ricollegarsi a discontinuità sub-verticali, forse almeno in parte di nuova formazione, evidenti soprattutto al di sopra del giunto stesso. Il giunto di strato e le descritte fessure subverticali compongono un potenziale meccanismo di rottura relativamente esteso che potrebbe interessare le Fasce A e B tra le quote di 19 e 29m circa dal livello marino. Nella porzione occidentale della Fascia B sono inoltre presenti porzioni di roccia in aggetto che, congiuntamente al quadro fessurativo presente nell'ammasso decompresso, potranno generare il distacco di placche con dimensioni di un certo rilievo.

La Fascia C appare meno interessata dai citati fenomeni di alterazione, pur essendo più esposta agli eventi meteomarini rispetto alle fasce sovrastanti. Si osservano tuttavia, sia pure in misura minore, gli effetti della decompressione del fronte e, soprattutto in prossimità del piede della falesia, blocchi soggetti a potenziale instabilità che in caso di espulsione potrebbero avere ripercussioni sulla stabilità dell'ammasso circostante.

La Fascia D, collocata alla base della falesia e in parte sommersa, è interessata principalmente dall'erosione dovuta all'azione del moto ondoso, con sviluppo di un solco di battente e di cavità in grado di generare, nel tempo, crolli anche massivi con arretramento del fronte.

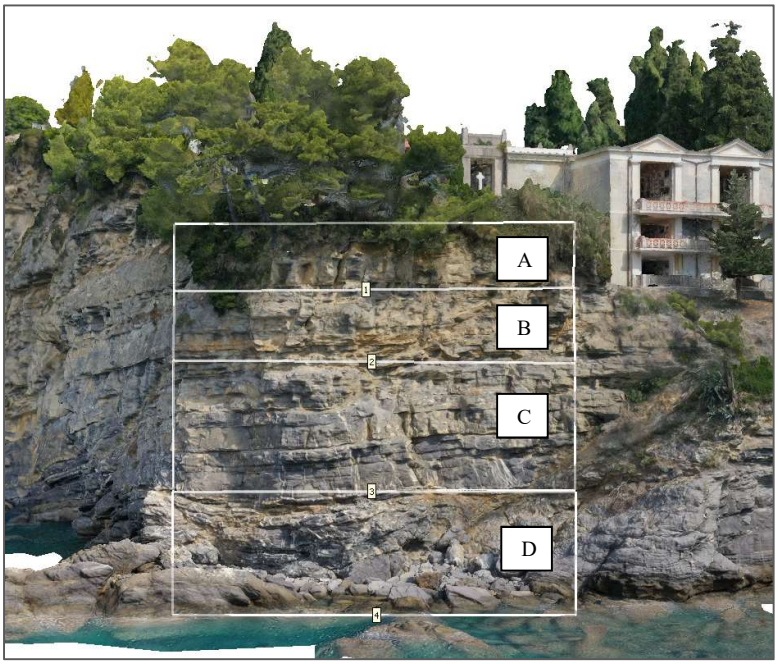


Figura 2.1 – Fasce del fronte (A-D) – Vista frontale

b. Potenziale caduta di blocchi dalla fascia superiore alterata (fascia A)

Nella fascia A vi è evidenza di blocchi potenzialmente soggetti a instabilità, prevalentemente delimitati dai giunti K1, K4 e ST5 (giunto di strato), e in alcuni casi il distacco è già avvenuto lasciando esposte le relative nicchie (vedere ad esempio la Figura 2.2). È plausibile che il meccanismo di rottura prevalente sia il ribaltamento innescato dall'erosione del materiale posto al di sotto del giunto di strato (ST5) che delimita la base dei blocchi (Figura 2.3). Anche lo scorrimento dei blocchi sul giunto di base potrebbe avere avuto un ruolo, seppure l'inclinazione degli strati su base locale appare modesta; questo almeno in condizioni di pressioni idrauliche rilevanti e di uno spiccato stato di alterazione superficiale nelle discontinuità. Ambedue questi fattori (pressioni idrauliche e grado di alterazione), da approfondire in sede di progetto definitivo, sono comunque di grande importanza per la valutazione della stabilità del fronte roccioso.

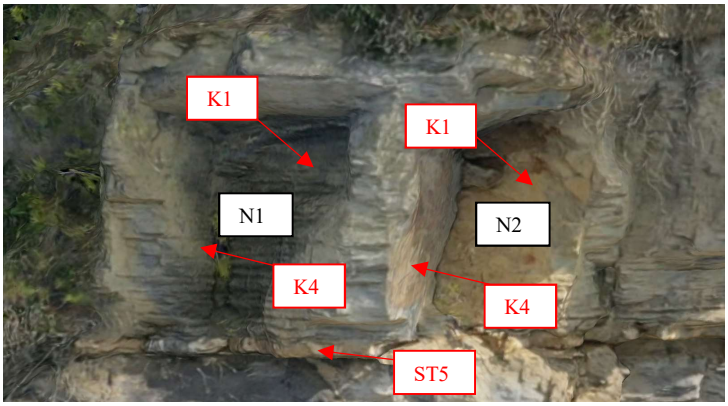


Figura 2.2 – Fascia A - Nicchie di distacco N1 e N2 – Vista frontale

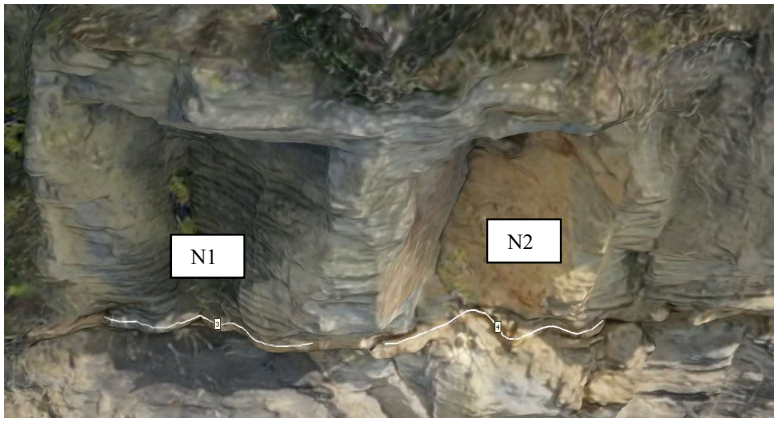


Figura 2.3 – Fascia A -Nicchie di distacco N1 e N2 – Erosione alla base

A fianco delle nicchie rappresentate nelle Figure 2.2 e 2.3 sono presenti blocchi ancora in posto, delimitati dalle stesse famiglie di giunti e potenzialmente soggetti al medesimo meccanismo di distacco (Figure 2.4 e 2.5). In questo caso si evidenzia, in aggiunta alle famiglie K1 e K4, una terza famiglia di giunti (forse K3). Con riferimento alla Figura 2.4 si osserva, immediatamente al di sopra del blocco B4, un profondo stato di alterazione ed erosione dell'ammasso in prossimità della superficie.

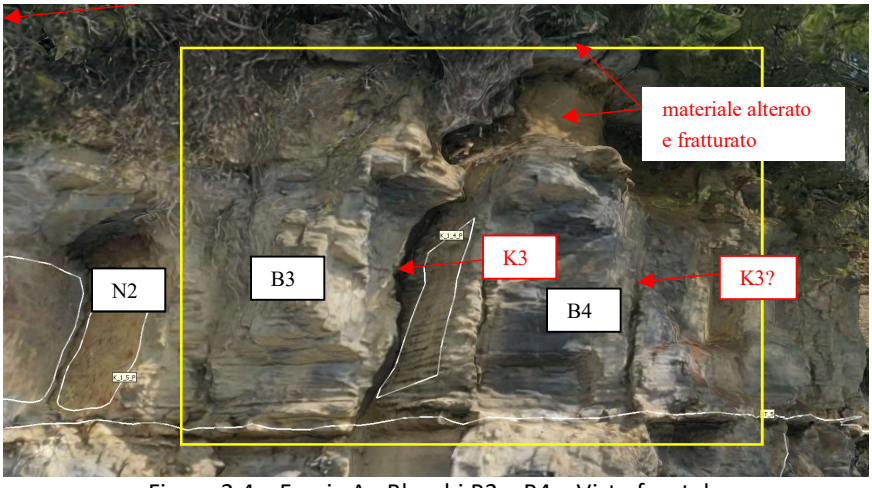


Figura 2.4 – Fascia A - Blocchi B3 e B4 – Vista frontale

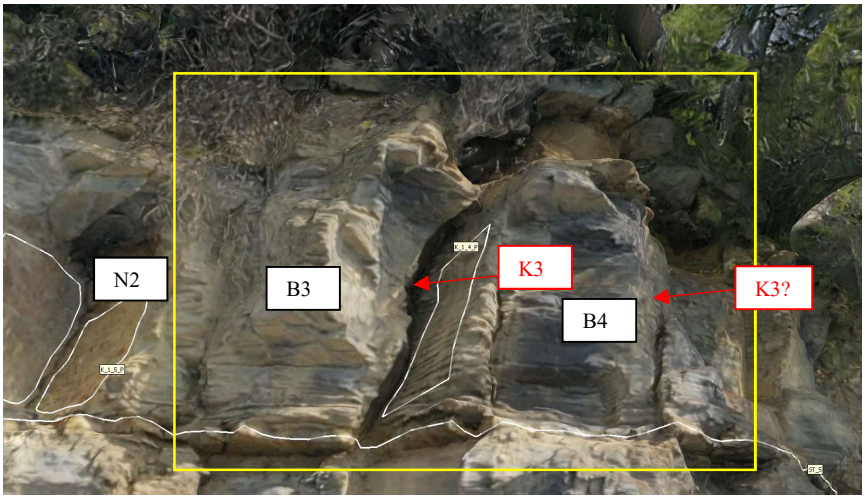


Figura 2.5 – Fascia A - Blocchi B3 e B4 – Erosione alla base

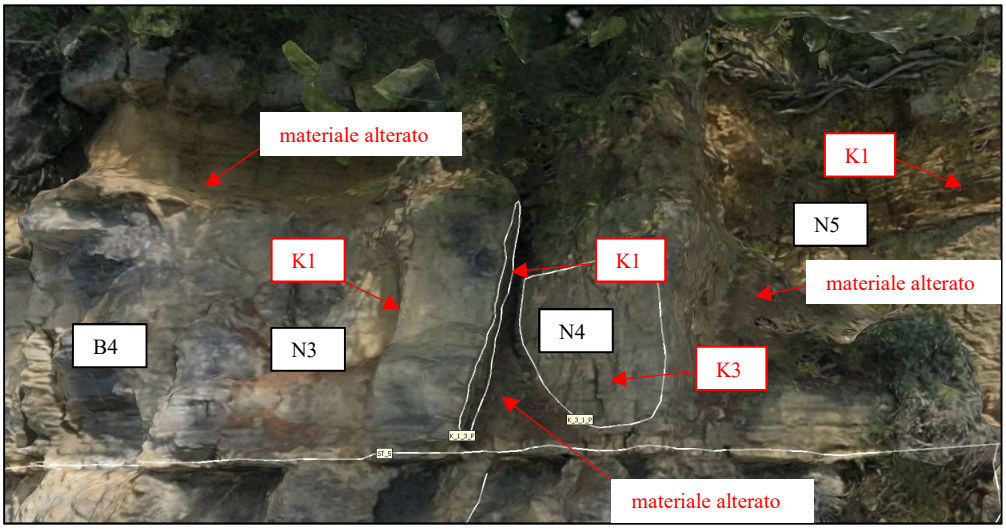


Figura 2.6 – Fascia A - Nicchie di distacco N3, N4 e N5 – Vista frontale

Se ci si sposta ulteriormente verso oriente (Figura 2.6) fino a lambire il fortino in CLS rinvenuto in prossimità della cappelletta, si osservano tre ulteriori nicchie (N3, N4 e N5).

c. Potenziali meccanismi in corrispondenza della fascia B

La Fascia B è delimitata alla base dal giunto di strato ST4 che per un tratto di circa 22m di lunghezza appare collocato in una porzione dell'ammasso interessata da un significativo livello di alterazione (Figura 2.7). Alle due estremità di questo tratto il giunto tende a ricollegarsi a discontinuità sub-verticali, forse almeno in parte di nuova formazione, evidenti soprattutto al di sopra del giunto stesso (Figure 2.8 e 2.9). Il giunto di strato e le descritte fessure subverticali compongono un potenziale meccanismo di rottura relativamente esteso che potrebbe interessare le Fasce A e B tra le quote di 20 e 33m circa dal livello marino. Nella porzione occidentale della Fascia B (Figure 2.7 e 2.10) sono inoltre presenti porzioni di roccia in aggetto che, congiuntamente al quadro fessurativo presente nell'ammasso decompresso, potranno generare il distacco di placche con dimensioni di un certo rilievo.

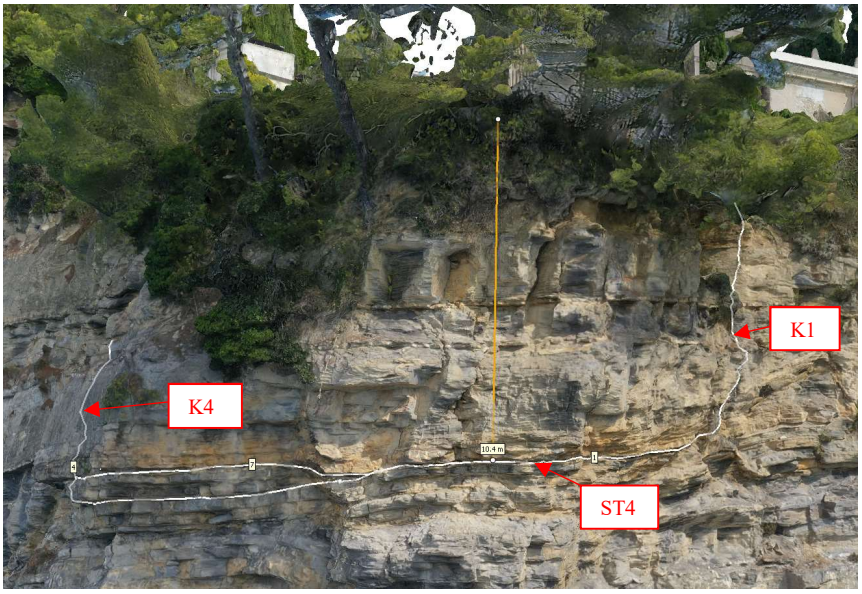


Figura 2.7 – Fasce A e B

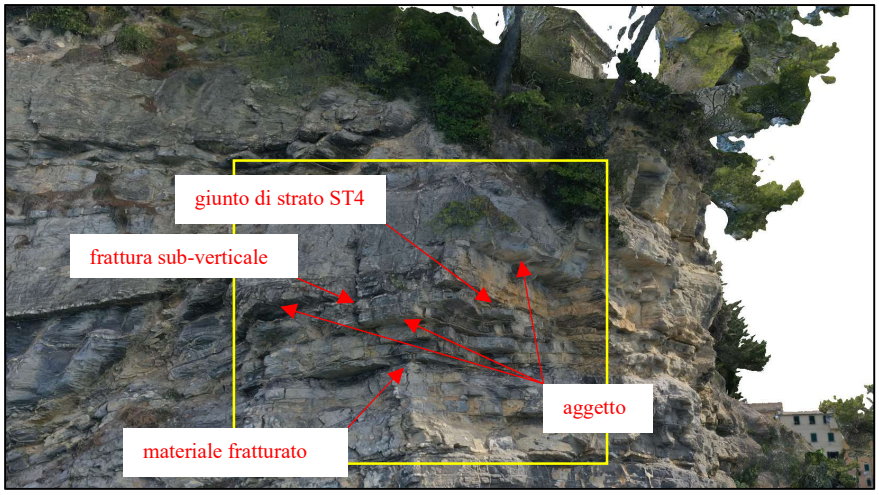


Figura 2.8 – Fascia B - Lato ovest – Volumi soggetti a potenziale distacco

La frattura sub-verticale sul lato ovest potrebbe seguire la giacitura K4* (vedi Figure 2.7 e 2.8), la cui attendibilità è tuttavia incerta e dovrà essere verificata. Entrambe le fratture sub-verticali sembrano estendersi anche al di sotto del giunto di strato ST4, ma con minore continuità rispetto al tratto superiore.

È possibile la caduta di blocchi di minori dimensioni, soprattutto nelle porzioni dell'ammasso più intensamente fratturato (vedi ad es. Figura 2.8).

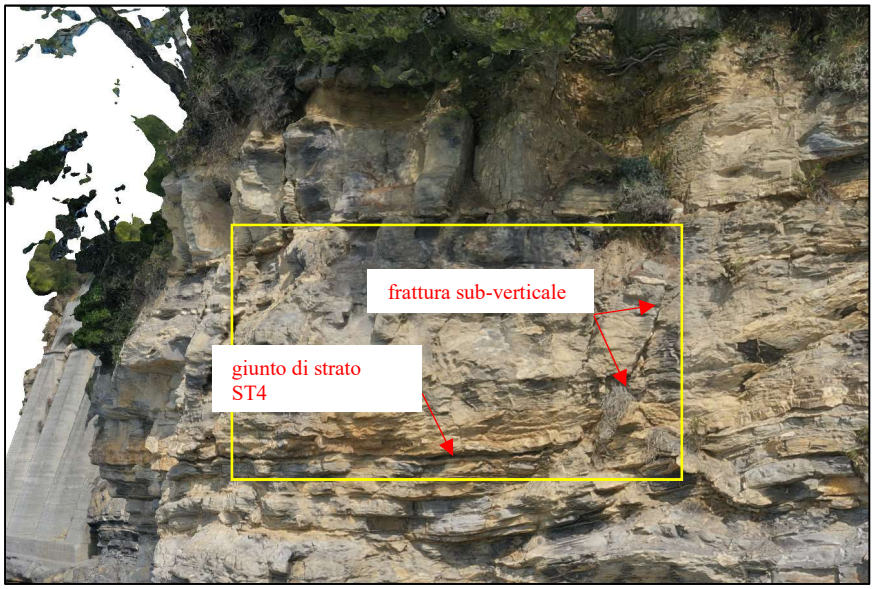


Figura 2.9 – Fascia B - Lato est – Volume soggetto a potenziale distacco

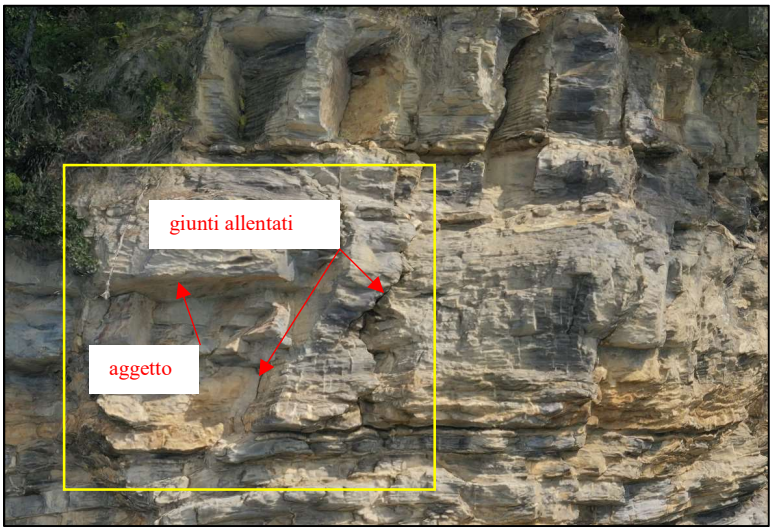


Figura 2.10 – Fascia B

d. Potenziali meccanismi in corrispondenza della fascia C

Rispetto alla Fascia B, la Fascia C appare meno interessata dai citati fenomeni di alterazione, pur essendo più esposta delle fasce sovrastanti agli eventi meteomarini. Nella porzione occidentale si osserva un potenziale meccanismo relativamente ampio che coinvolge le fasce C e B (Figura 2.11), determinato dalle discontinuità K4* e K1 (oppure K3). Si osservano inoltre blocchi allentati in prossimità del piede della falesia, che in caso di espulsione potrebbero indurre ripercussioni sulla stabilità dell'ammasso circostante (Figura 2.12). Un altro meccanismo riguarda la caduta di blocchi di minori dimensioni, soprattutto nelle porzioni dell'ammasso più intensamente fratturato e negli strati scalzati dai fenomeni erosivi (Figura 2.13).

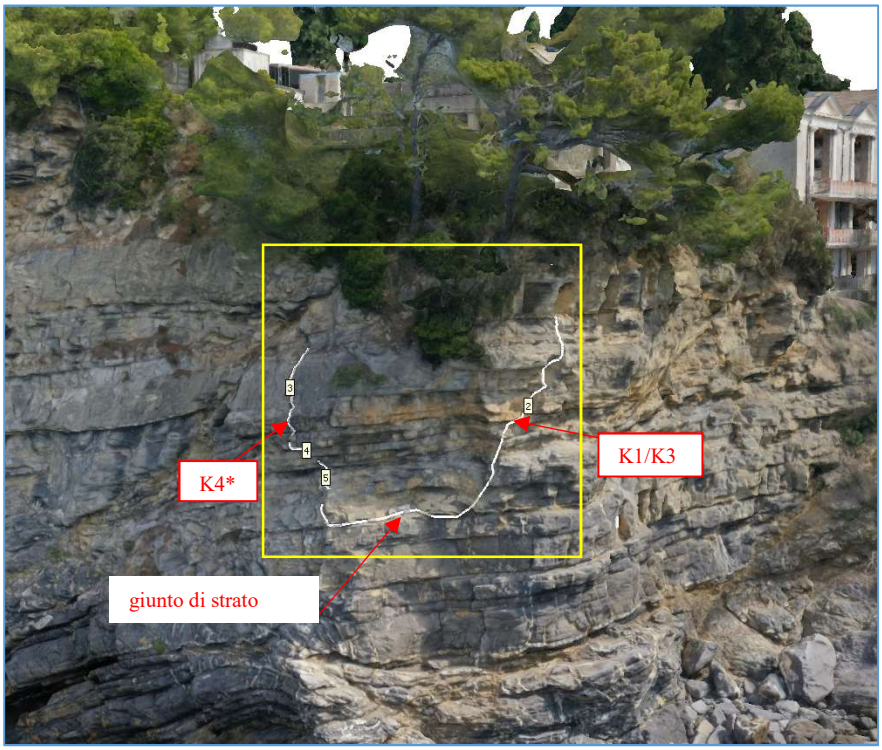


Figura 2.11 – Fasce C e B

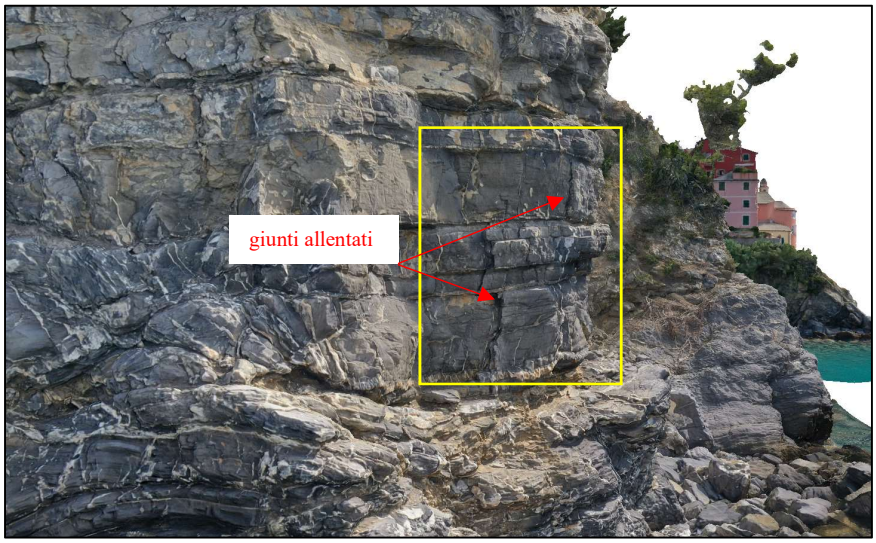


Figura 2.12 – Fascia C



Figura 2.13 – Fascia C

e. Potenziali meccanismi in corrispondenza della fascia D

La Fascia D, collocata alla base della falesia e in parte sommersa (Figura 2.14), è interessata principalmente dall'azione del moto ondoso, con potenziale sviluppo di fenomeni erosivi in grado di generare, nel tempo, crolli anche massivi con arretramento del fronte. Tuttavia ad oggi la presenza di un solco di battente e di cavità attribuibili alle azioni meteomarine è stata rilevata prevalentemente nei settori adiacenti (settori 2 e 4, Figure 2.15 e 2.16), mentre nel settore 3 questi elementi andranno investigati in maggiore dettaglio nel corso delle successive fasi progettuali e nel corso dei lavori per la messa in sicurezza del versante. Nel secondo caso l'indagine sarà preceduta dai lavori preliminari finalizzati a prevenire la caduta massi dal fronte della falesia, che ad oggi limitano la possibilità di osservazioni ravvicinate per ragioni di sicurezza. Inoltre potrà essere considerata la temporanea rimozione di parte dei massi collocati alla base della falesia ove necessario per consentire l'ispezione visiva e l'eventuale rilievo strumentale alla base dell'ammasso roccioso.

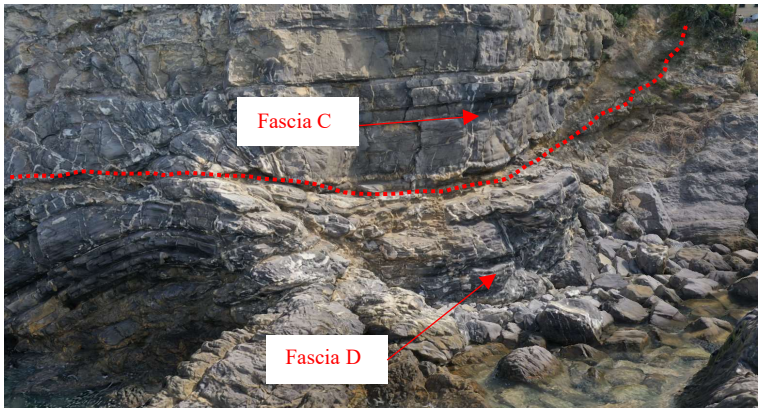


Figura 2.14 – Lato ovest – Contatto tra le fasce C e D

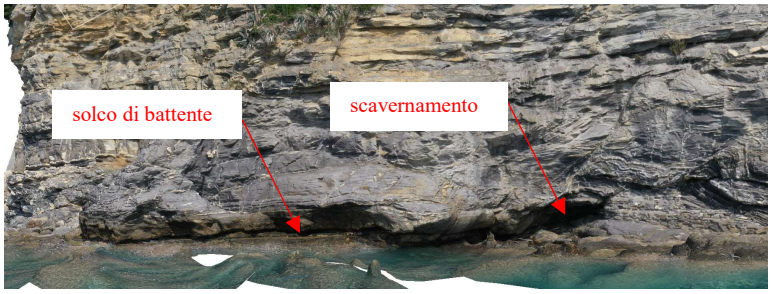


Figura 2.15 – Lato est

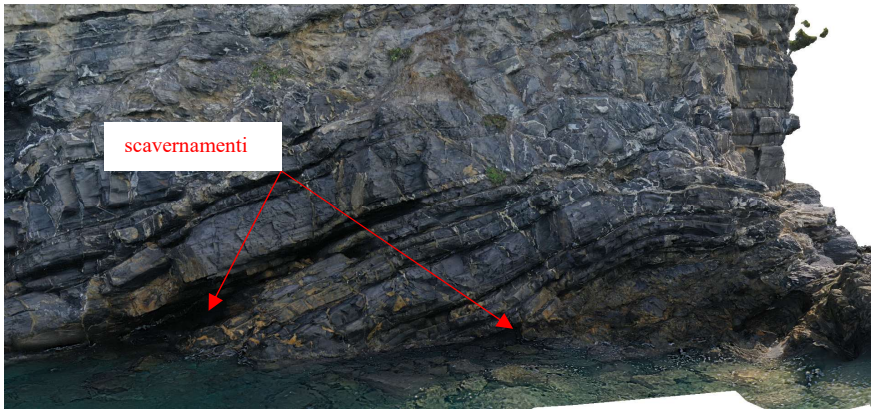


Figura 2.16 – Lato ovest

f. Dimensione dei massi soggetti a distacco

L'osservazione del rilievo del fronte in corrispondenza della Fascia A conduce a dimensioni massime dei blocchi stimate attorno ai $3m^3$ (Figure 2.2 e 2.4, nicchie N1, N2 e blocchi B3 e B4) fino a volumi massimi attorno ai $15m^3$ (Figura 2.6, nicchia N5). Queste dimensioni, puramente indicative, possono essere confrontate con le dimensioni dei blocchi attualmente collocati al piede della falesia (Figura 2.17). Mentre la maggior parte dei blocchi crollati hanno un volume inferiore al metro cubo, anche se presumibilmente una parte di essi si è frammentata dopo il distacco, i blocchi di maggiori proporzioni raggiungono volumi talvolta considerevoli. In particolare il blocco SX, che potrebbe provenire da una nicchia attualmente celata dalla vegetazione o dalla porzione di falesia sottostante, raggiunge un volume di circa $7m^3$, mentre i blocchi CEN e DX, che potrebbero provenire dalle nicchie N1 e N5, raggiungono volumi di circa $3m^3$ e di circa $15m^3$, rispettivamente.

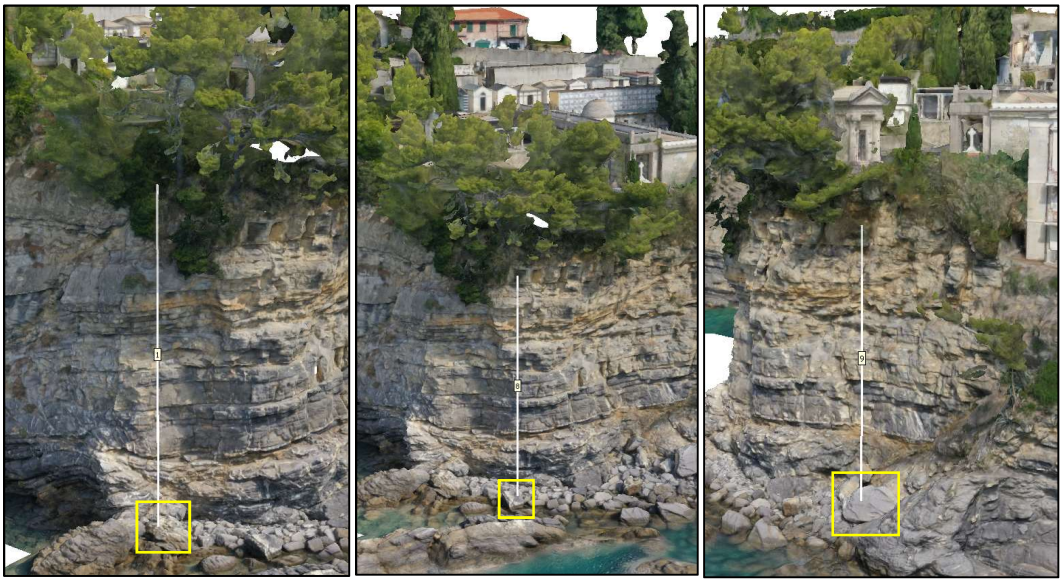


Figura 2.17 – Tre blocchi distaccati dal fronte (fascia A)
Blocco SX: circa 7m^3 - Blocco CEN: circa 3m^3 – Blocco DX: circa 15m^3

3.0 Descrizione dell'ipotesi progettuale

Nel settore 3 il fronte appare alterato e fratturato, soprattutto nella porzione superiore della falesia, e sono identificabili alcuni meccanismi di rottura che potrebbero comportare distacchi e crolli, anche di notevole entità (vedi il capitolo 2.0). Le informazioni ad oggi disponibili portano alla conclusione che per migliorare il livello di sicurezza della falesia sia necessario un significativo intervento di consolidamento e sostegno, e che l'entità delle pressioni idrauliche nell'ammasso roccioso fratturato giochi un ruolo importante nel determinare il livello di stabilità del fronte.

La parte inferiore della falesia appare meno critica, ma tuttavia in alcune aree è stata interessata da distacchi significativi, anche in tempi recenti, e sono evidenti gli effetti del rilascio tensionale nell'ammasso roccioso con presenza di giunti allentati e di blocchi parzialmente dislocati, potenzialmente soggetti a instabilità, almeno su base locale (vedi il capitolo 2.0).

Ad oggi non sono disponibili sufficienti informazioni sulle caratteristiche strutturali e meccaniche dell'ammasso roccioso e sul regime idrogeologico nell'area in esame. Pertanto, ulteriori elementi dovranno essere raccolti mediante specifiche attività di indagine nel corso della progettazione definitiva.

Viste le caratteristiche del fronte roccioso e fatta salva la necessità di ulteriori approfondimenti in sede progettuale, si ritiene che gli interventi da mettere in atto debbano conseguire i seguenti obiettivi:

- contenere la massa di roccia alterata, fratturata e soggetta al distacco di blocchi superficiali nella porzione sommitale della falesia,
- prevenire la caduta di blocchi di piccole e medie dimensioni dal fronte, per mitigare il rischio a valle della falesia e per evitare l'innesco di possibili ulteriori instabilità nel fronte roccioso,
- prevenire l'innesco di potenziali meccanismi di rottura di maggiori dimensioni, con possibile interessamento di ampie zone del fronte.

Per quanto riguarda il secondo punto va evidenziato che l'ipotesi di demolizione e ricollocamento della "cappelletta" posta in prossimità del coronamento della falesia, proposta al Comune di Sori dai progettisti, non è risultata fattibile. Pertanto non appare praticabile una eventuale riconformazione della porzione sommitale del versante, e sarà anzi necessario preservare il manufatto mediante opportune tecniche di consolidamento. Non si esclude la possibilità di riconformare parzialmente il ciglio di scarpata, per quanto possibile, ma questo aspetto potrà essere affrontato in maggiore dettaglio solo nel corso delle prossime fasi progettuali, e comunque una volta rimossa la vegetazione che oggi occulta buona parte dell'area per consentire i necessari approfondimenti su base locale.

In linea generale gli interventi ipotizzati comprenderanno un accurato disgaggio delle masse instabili superficiali, un sistema di ancoraggi (chiodature, bullonature e/o tiranti), reti in aderenza e sistemi di drenaggio superficiali (ad es. canalette) e profondi (fori o canne drenanti). Tuttavia, viste le caratteristiche dell'ammasso oggetto di studio, si rendono necessarie alcune accortezze aggiuntive, tra le quali un efficace sistema di redistribuzione dei carichi applicati, sia per trasferire l'azione di contenimento esercitata puntualmente sul maggior numero di blocchi possibile, sia per garantire un efficace sostegno alla porzione sommitale del fronte roccioso.

Si è quindi considerato un sistema di contrafforti verticali in calcestruzzo armato, gettati sul fronte roccioso e fondati al piede della falesia (Figure 3.1 e 3.2). Sui contrafforti saranno impostati una serie di tiranti (attivi e/o passivi), integrati da chiodature e canne drenanti da collocare in posizione intermedia (tra i contrafforti), direttamente sul fronte roccioso. Nella porzione superiore della falesia, caratterizzata da una notevole irregolarità morfologica, i contrafforti potranno essere integrati con una corona che oltre a costituire un collegamento tra i pilastri avrà la funzione di contenere i materiali più alterati e frammentati. Tuttavia si avrà cura di mantenere la naturale capacità di drenaggio dell'ammasso roccioso, ad esempio limitando il contatto diretto tra la struttura e il fronte a setti opportunamente conformati, e si prevedrà l'installazione di nuove opere drenanti ove risultino necessarie a prevenire l'insorgere di sovrappressioni idrauliche a tergo del manufatto.

Immediatamente a monte della cappella è presente un vano interrato che consente l'accesso a una serie di loculi. A quanto ad oggi noto la profondità complessiva del locale, incluso il livello più profondo, non accessibile dal pubblico, è di circa 8m dalla quota dell'area cimiteriale, e pertanto non sarà possibile istallare tiranti al di sopra di questa quota. Tuttavia la porzione sommitale del fronte, oltre all'azione dei tiranti istallati ad una quota superiore alla base del blocco, potrà contare anche sul contrasto offerto dai contrafforti, che sono ancorati anche nella porzione inferiore della falesia, non interessata dal movimento in atto e dove la qualità della roccia è migliore.

Una prima ipotesi di disposizione dei contrafforti (interasse di 6m, contrafforti larghi 3m), inevitabilmente condizionata dalla spaziatura dei tiranti e dalla irregolare morfologia del versante, è indicata in planimetria nella Figura 3.2. Tuttavia solo nel corso della progettazione in corso e a valle di ulteriori indagini sarà possibile valutare in modo soddisfacente l'efficacia della soluzione proposta e definirne in maggiore dettaglio la configurazione.

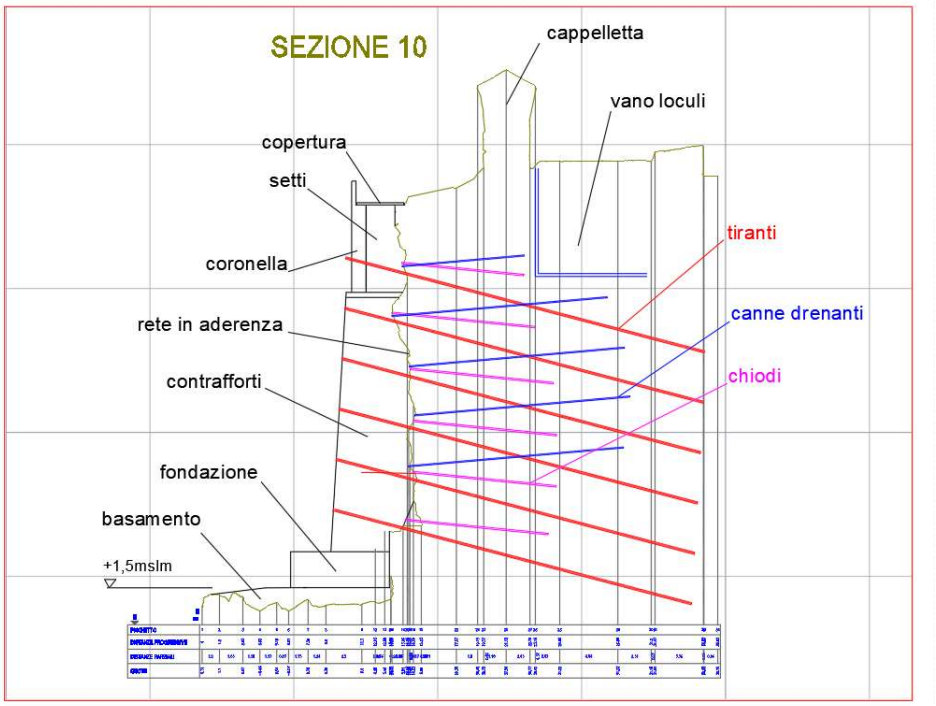


Figura 3.1 – Interventi ipotizzati - Sezione verticale

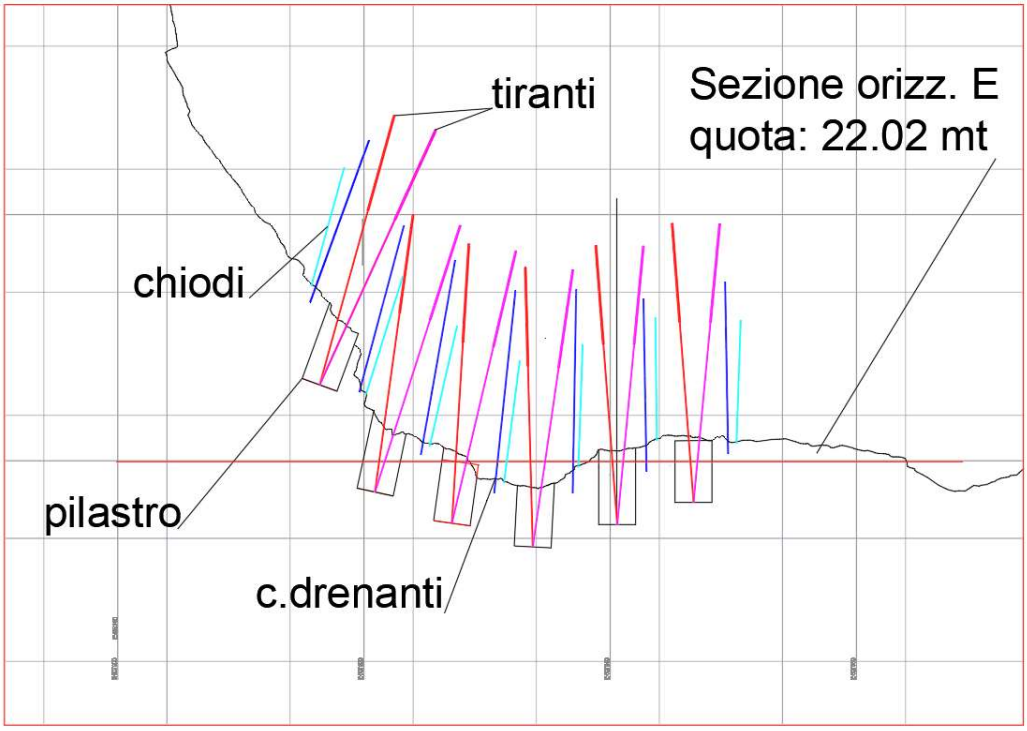


Figura 3.2 – Interventi ipotizzati - Sezione orizzontale

4.0 Analisi preliminari

a. Introduzione

In questo capitolo vengono presentate alcune verifiche preliminari del fronte roccioso nel settore 3, condotte con il programma di calcolo all'equilibrio limite Swedge (RocScience Inc.). Lo scopo è quello di valutare l'entità delle forze necessarie a conseguire livelli di stabilità soddisfacenti. In aggiunta sarà anche presentata un'analisi preliminare condotta con il programma alle differenze finite FLAC 8.1 (Itasca Consulting Group Inc.) per evidenziare gli effetti dell'interazione tra il fronte roccioso e la struttura di contenimento.

Per quanto riguarda i parametri che controllano la resistenza al taglio dei giunti, ad oggi non sono ancora disponibili le informazioni necessarie per una loro adeguata valutazione. Pertanto, ai fini dei calcoli presentati nel seguito che hanno il solo scopo di evidenziare alcuni aspetti dell'ipotesi progettuale descritta, sono stati stimati alcuni valori ritenuti plausibili. Nelle analisi all'equilibrio limite la resistenza al taglio è stata espressa nella forma proposta da Barton e Choubey (B&C, 1977[1]), mentre nell'analisi alle differenza finite è stato adottato il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (MC). La formulazione di Barton e Choubey esprime la resistenza al taglio di picco del giunto come segue:

$$\tau = \sigma_n \tan\left[JRC \cdot \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \emptyset_r\right]$$

Dove il valore di JRC dipende dalla rugosità del giunto, JCS dalla sua resistenza superficiale, $\emptyset_r$ è l'angolo d'attrito residuo e σ_n è la tensione normale agente sulla discontinuità, al netto della pressione dell'acqua presente nel giunto. Si noti che il termine in parentesi quadra altro non è che l'angolo di attrito di picco istantaneo $\emptyset_i$.

I parametri di B&C ipotizzati nelle analisi all'equilibrio limite presentate in questa nota, e che dovranno essere rivalutati a fronte delle necessarie indagini da eseguirsi nel corso della progettazione, sono i seguenti:

giunti di strato	(ch)	$JRC = 4$	$JCS = 30MPa$	$\emptyset_r = 27°$
fratture	(K)	$JRC = 10$	$JCS = 50MPa$	$\emptyset_r = 30°$

In mancanza di informazioni attendibili sulla caratteristiche dei giunti, ad esempio in termini di rugosità, riempimento e grado di alterazione, questi valori appaiono ragionevolmente prudenziali.

Per quanto riguarda invece le pressioni idrauliche agenti nelle fratture e nei giunti di strato, le ipotesi adottate in termini di livello di riempimento e distribuzione delle pressioni sono indicate caso per caso.

[1] Barton, N.R. and Choubey, V. 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech. 10(1-2), 1-54.

b. Fasce B e A (Swedge) - H=11m

Nel caso della Fascia B, nel capitolo 2.0 è stato descritto un possibile meccanismo in cui il blocco singolo è delimitato dai giunti K4* e K1, oltre che da un giunto di strato ST4 posto alla base del blocco stesso (Figura 4.1).

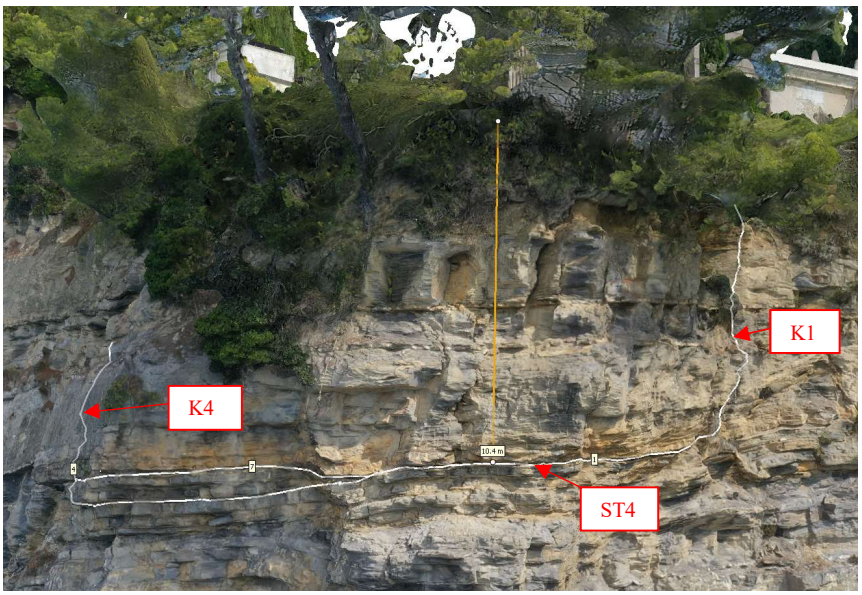


Figura 4.1 – Fasce A e B

L'analisi è stata condotta assegnando al blocco una larghezza in corrispondenza del fronte variabile tra 13-14m alla base e 22m al coronamento e un'altezza di 11m. Al giunto di strato è stata assegnata una inclinazione pari a 15° (valore presumibilmente prudenziale) e un'immersione coincidente con quella della falesia, mentre al fronte roccioso è stata assegnata una inclinazione di 90°.

Per definire l'orientazione dei giunti K1 e K4*, questi ultimi con immersione pressoché opposta rispetto a quella dei giunti K4, sono state adottati i seguenti valori medi, stimati in base alle osservazioni preliminari ad oggi disponibili:

K1	inclinazione: 77.2°	immersione: 233.1°
K4*	inclinazione: 83.5°	immersione: 156.5°

L'immersione del fronte e del giunto di strato (Figura 4.2) è stata posta pari a 212° e il livello di riempimento nelle discontinuità è stato posto pari al 100%, ipotizzando nel giunto di strato una distribuzione triangolare delle pressioni idrauliche con pressione nulla al fronte.

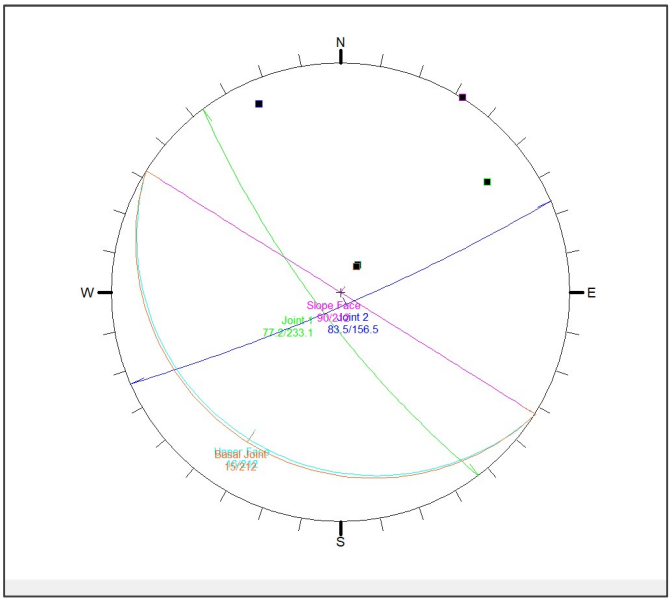


Figura 4.2 – Fasce B e A – Orientazione dei giunti e del fronte di scavo.

I risultati dell'analisi (Figura 4.3) indicano che in questo caso si potrebbe formare un blocco di circa 580m^3 di volume e 15063kN in peso che scorre sul giunto di strato posto alla sua base. Per ottenere il fattore di sicurezza globale rappresentato nella figura (circa 1.4) è necessario esercitare sul blocco un carico di 6250kN inclinato di 15°, equivalente a un carico per unità di superficie p=6250kN/195.5m^2=31.9kPa.

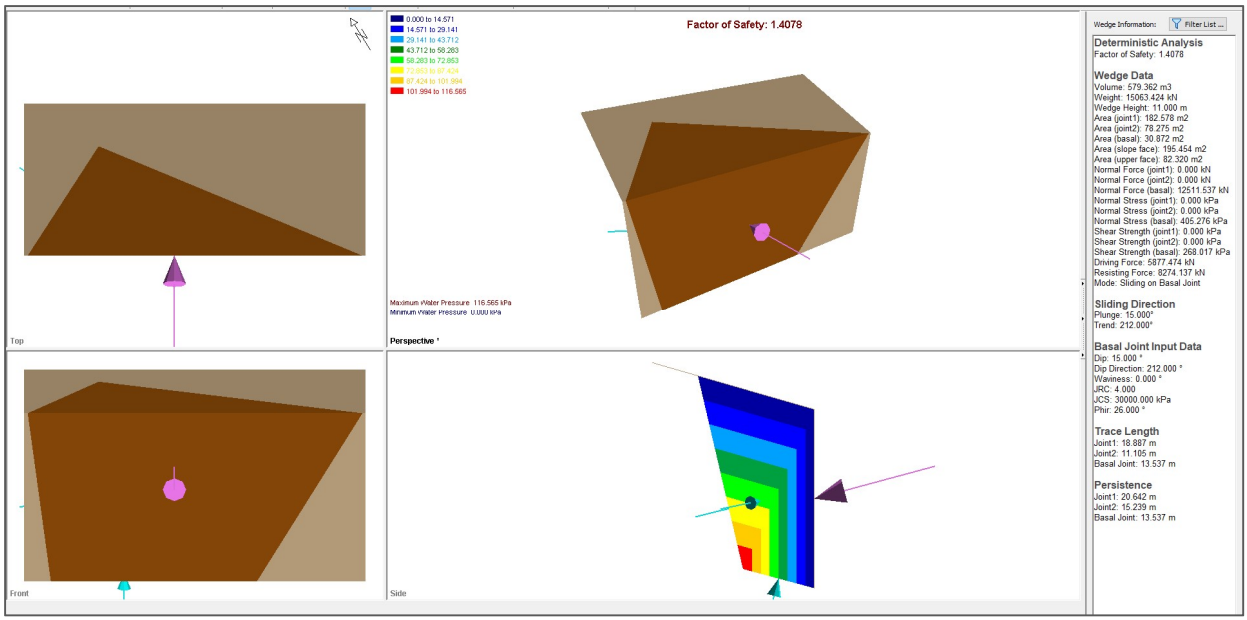


Figura 4.3 – Fasce B e A – Risultati analisi.

Questo blocco potrà essere interessato anche da meccanismi parziali, ad esempio nella porzione occidentale dove sono evidenti i contorni di volumi di roccia potenzialmente soggetti a distacco (Figura 2.10).

c. Fasce C, B e A (Swedge) - H=15m e 23m

Nel capitolo 2.0 è stato inoltre descritto un meccanismo che oltre alle Fasce A e B potrebbe coinvolgere parzialmente anche la sottostante Fascia C (Figura 4.4). Questo meccanismo interessa la porzione occidentale del settore 3 essendo delimitato lateralmente dal giunto subverticale K1 (o forse K3), e si sovrappone ad un evidente distacco, avvenuto almeno in parte tra il 1986 e il 2006 (geoSARC, 2006[2]), che ha interessato l'intera altezza della falesia.

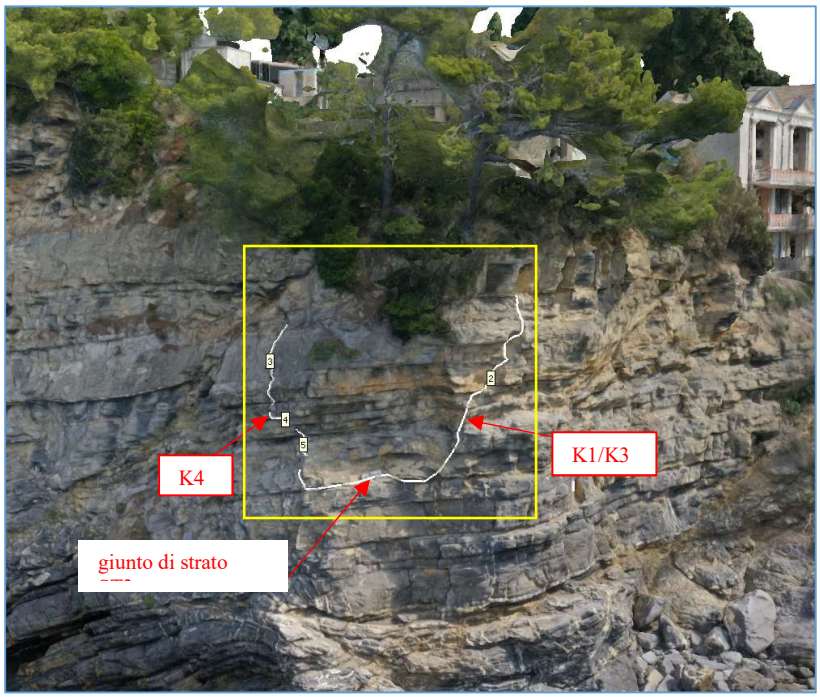


Figura 4.4 – Fasce C, B e A

Anche in questo caso la massa instabile è delimitata dai giunti K4* e K1, oltre che da un giunto di strato (ST3), posto alla base del blocco stesso. Sono state condotte due analisi assegnando al blocco una larghezza in corrispondenza del fronte variabile tra 7.5m alla base e 16.5m al coronamento, e un'altezza complessiva di 15m. L'immersione del fronte e del giunto di strato (Figura 4.5) è stata posta pari a 212° e il livello di riempimento dei giunti è stato posto pari al 100% nella prima analisi (Analisi 1) e pari al 94% nella seconda analisi (Analisi 2), ipotizzando nel giunto di strato una distribuzione triangolare delle pressioni idrauliche, come nel caso precedente.

[2] geoSARC, 2006 – Relazione - *Riassetto e consolidamento dell'area impegnata dal Cimitero di Sori capoluogo – Studi e indagini geologiche – Seconda fase – Aggiornamento del quadro generale e relazione geologica al progetto esecutivo di un lotto funzionale di interventi*. Preparato per il Comune di Sori.

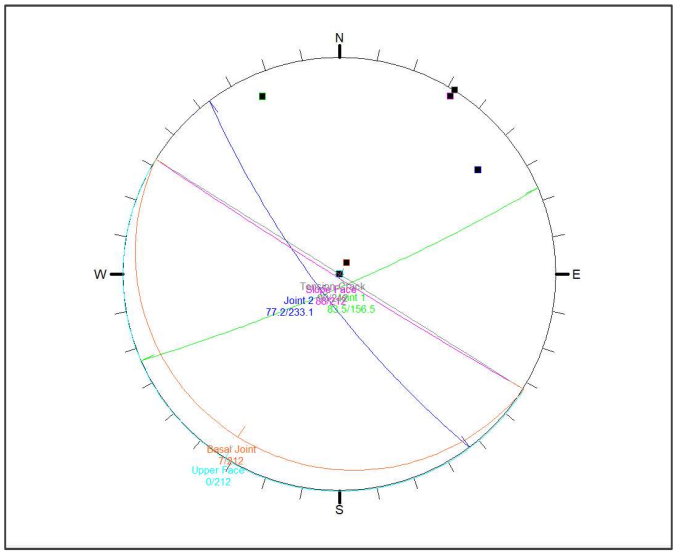


Figura 4.5 – Fasce C, B e A – Orientazione dei giunti e del fronte di scavo.

I risultati delle due analisi (Figure 4.6 e 4.7) indicano che in questo caso si forma un blocco di circa 457m^3 di volume e 11870kN in peso, che scorre sul giunto di strato posto alla sua base. Si noti che questi valori sono probabilmente sovrastimati in quanto non è stata considerata l'assenza della massa rocciosa collassata in precedenza.

Nel caso dell'Analisi 1 (Figura 4.6), per ottenere il fattore di sicurezza globale rappresentato nella figura (circa 1.0) è stato necessario applicare sul blocco un carico di 8500kN inclinato di 15°, equivalente ad un carico per unità di superficie p=8500kN/198.4m^2=42.8kPa.

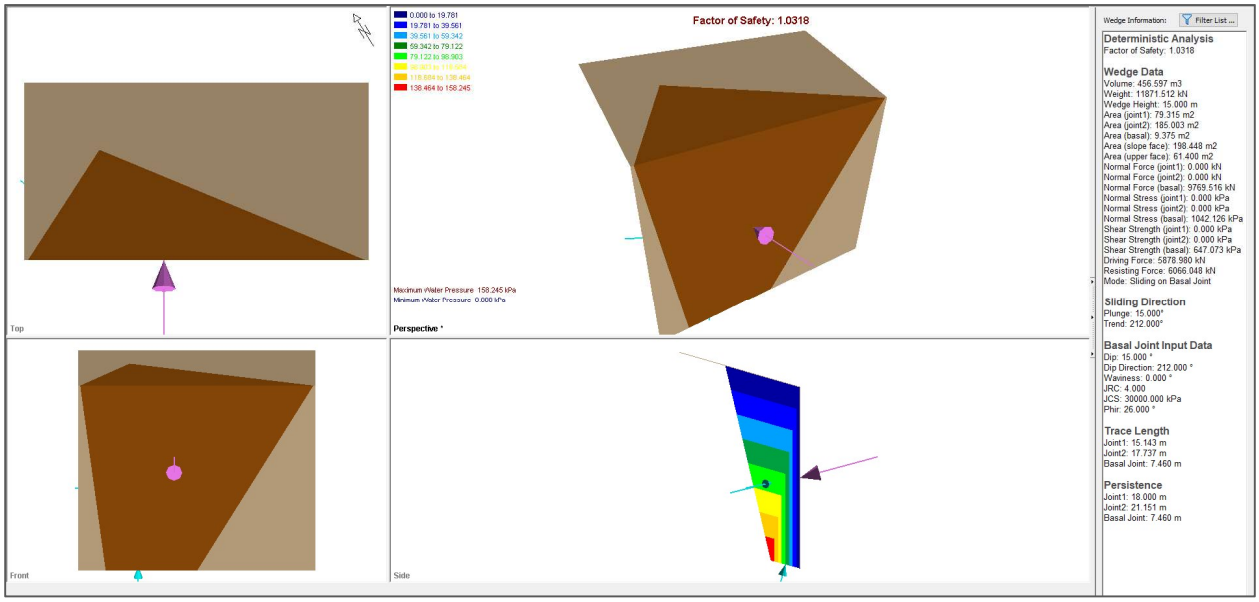


Figura 4.6 – Fasce C, B e A – Analisi 1 (pw=100%) – Risultati analisi.

D'altro canto nell'Analisi 2 (Figura 4.7), dove è stato ridotto di circa 1m (riempimento: 94%) il livello dell'acqua nei giunti, fermo il resto, il fattore di sicurezza passa da 1 a 1.46.

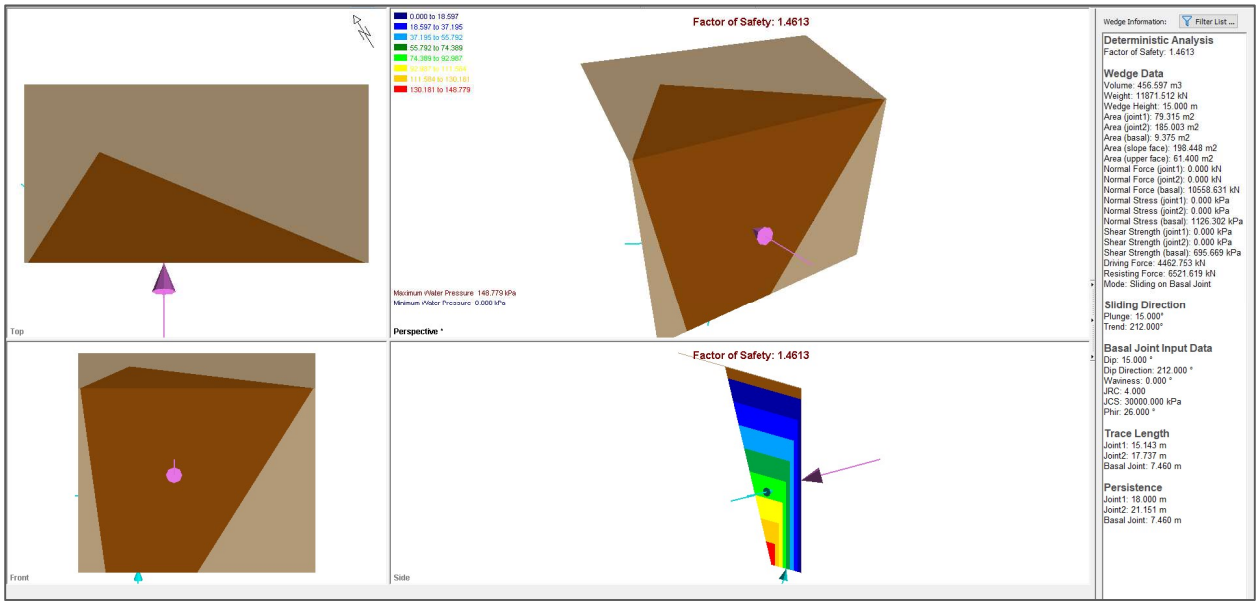


Figura 4.7 – Fasce C, B e A – Analisi 2 (pw=94%) – Risultati analisi.

Alcune analisi aggiuntive sono state condotte, sempre con Swedge, nell'ipotesi di meccanismo bidimensionale con estensione verticale di 23m (Fasce C, B e A), spessore del blocco di 8m e ipotetico giunto di trazione a tergo del blocco, sub-verticale e con immersione coincidente con quella della falesia, completamente pieno d'acqua oppure, in alternativa, parzialmente pieno con livello della superficie libera ridotto.

Con il giunto pieno l'analisi conduce ad un fattore di sicurezza pari a 1 (Figura 4.8) per un carico resistente unitario applicato al fronte di circa 67.5kPa, mentre riducendo il livello dell'acqua di circa 3.2m (riempimento: 86%) il fattore di sicurezza sale a circa 1.5 (Figura 4.9).

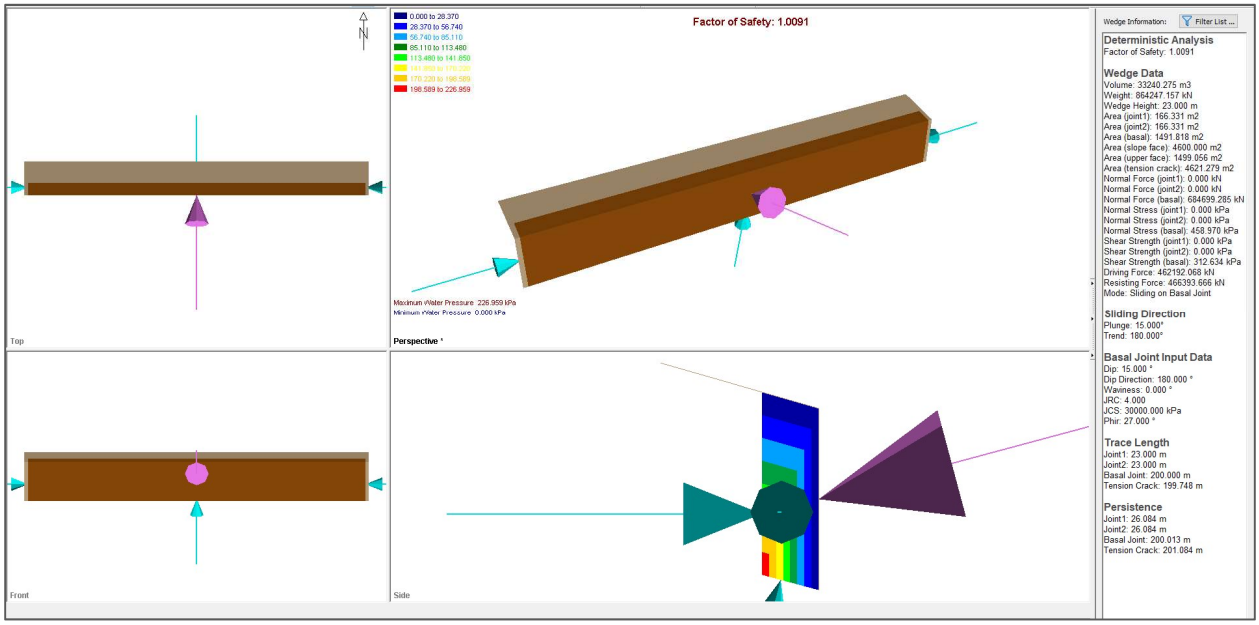


Figura 4.8 – Fasce C, B e A – Analisi 3 (pw=100%) – Risultati analisi.

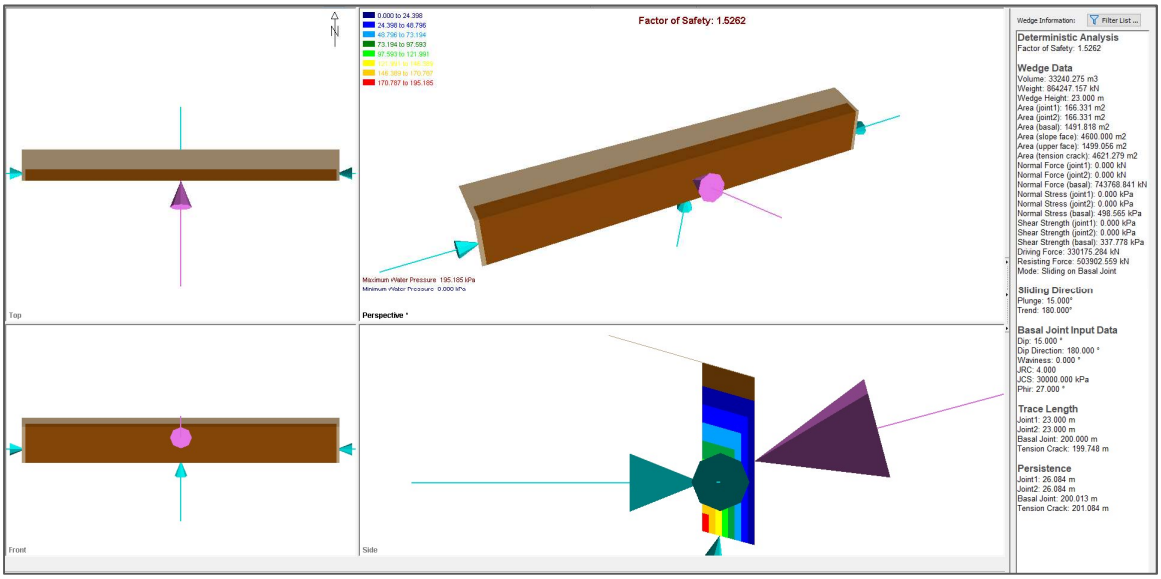


Figura 4.9 – Fasce C, B e A – Analisi 4 (pw=86%) – Risultati analisi.

d. Fascia C, B e A (FLAC 8.1) – Interazione con contrafforti e tiranti (H=15m)

È stata condotta un'analisi preliminare con FLAC 8.1 (Itasca Inc. - analisi del continuo con il metodo delle differenze finite) per una prima valutazione dell'interazione della falesia con le opere strutturali ipotizzate, e in particolare con i contrafforti in CA, i tiranti e le chiodature. L'analisi è stata condotta in modo semplificato allo scopo di stimare gli effetti di un blocco potenzialmente instabile sulle opere di contenimento in termini di deformazioni e sollecitazioni.

Il blocco ha un'altezza di 15m, uno spessore di circa 5m ed è delimitato da un giunto debole schematizzato da un gruppo di zone con parametri di resistenza sostanzialmente inferiori a quelli ipotizzati per l'ammasso roccioso (Figura 4.10). Analisi di maggiore dettaglio saranno evidentemente necessarie a valle di ulteriori approfondimenti e indagini. Attorno al blocco sono stati assegnati ai nodi valori di pressione dell'acqua compatibili con la distribuzione attesa nei giunti nell'ipotesi che il livello di riempimento sia pari all'85% (circa -2.5m dal piano campagna). È stata quindi eseguita un'analisi meccanica con calcolo delle deformazioni e delle sollecitazioni nell'ammasso roccioso e nei componenti strutturali.

I contrafforti (sezione variabile da 3x3m a 3x5m) e la relativa fondazione sono stati rappresentati con elementi strutturali denominati "liner", dotati di interfaccia discontinua al contatto struttura-roccia, mentre i tiranti (armati ad es. con barre tipo Dywidag $\emptyset = 40mm$), impostati sui contrafforti e lunghi circa 18-20m (escluso l'attraversamento dei contrafforti), sono stati rappresentati con elementi strutturali tipo "cable", anch'essi dotati di interfaccia elasto-plastica al contatto con la griglia di calcolo. I tiranti potranno essere di tipo attivo come quelli adottati in questa analisi, presollecitati e composti da un tratto libero e da un tratto connesso, oppure di tipo passivo, completamente connessi e privi di presollecitazione. L'interasse fuori dal piano dei tiranti considerato nell'analisi è pari a 6m, e la loro inclinazione è pari a 15°. Oltre ai tiranti sono stati inseriti anche chiodi lunghi 10m e inclinati di 10°, da intendersi collocati tra i contrafforti, con la testata impostata sulla rete corticale e sul fronte roccioso.

Per la resistenza dell'ammasso roccioso è stato adottato il modello di Mohr Coulomb con legge di flusso non associata. Il peso unitario e i parametri di resistenza e deformabilità adottati nel calcolo preliminare sono i seguenti:

ammasso roccioso: $\gamma_t = 26kN/m^3$

$c' = 180kPa \quad \varphi' = 45° \quad \psi = 0 \quad t = 10kPa$

$E = 1000MPa \quad \nu = 0.25$

strato debole: $\gamma_t = 26kN/m^3$

$c' = 15kPa \quad \varphi' = 33° \quad \psi = 0 \quad t = 0$

$E = 1000MPa \quad \nu = 0.25$

Nella fase iniziale l'analisi e stata condotta sul modello composto da un unico materiale, definendo lo stato tensionale iniziale. Successivamente sono state installati gli elementi strutturali e l'analisi meccanica è stata eseguita fino a convergenza. Sono quindi stati inseriti lo strato debole che delimita il blocco instabile e la pressione dell'acqua agente a tergo e alla base del blocco stesso (Figura 4.10).

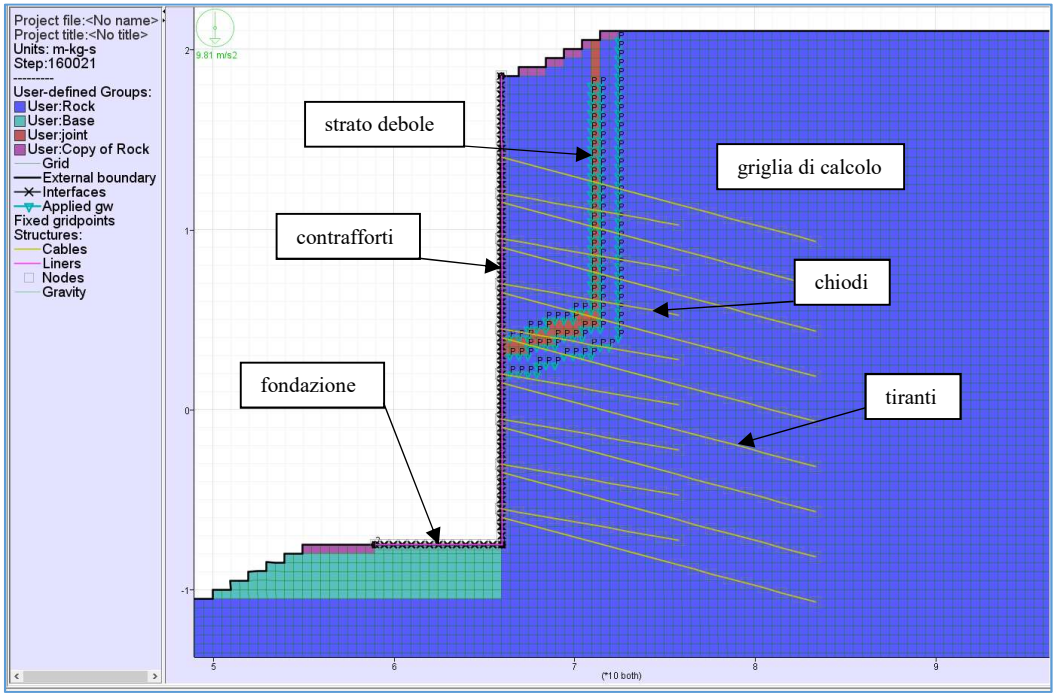


Figura 4.10 – Particolare del modello alle differenza finite.

Alcuni risultati dell'analisi presentati nel seguito (Figure 4.11-4.16) mettono in evidenza gli effetti dell'interazione tra l'ammasso roccioso e i componenti strutturali che compongono il sistema di consolidamento e sostegno ipotizzato in questa nota. In particolare nella Figura 4.11 è indicata la pressione dell'acqua agente a tergo e alla base del blocco, mentre nella Figura 4.12 sono presentati gli spostamenti orizzontali. I carichi agenti sui tiranti attivi, inizialmente pretesati a circa 520kN, e sulle chiodature (elementi passivi) sono visibili nella Figura 4.13, mentre nelle Figure 4.14, 4.15 e 4.16 sono presentati la forza assiale, il momento flettente e la forza di taglio nei contrafforti.

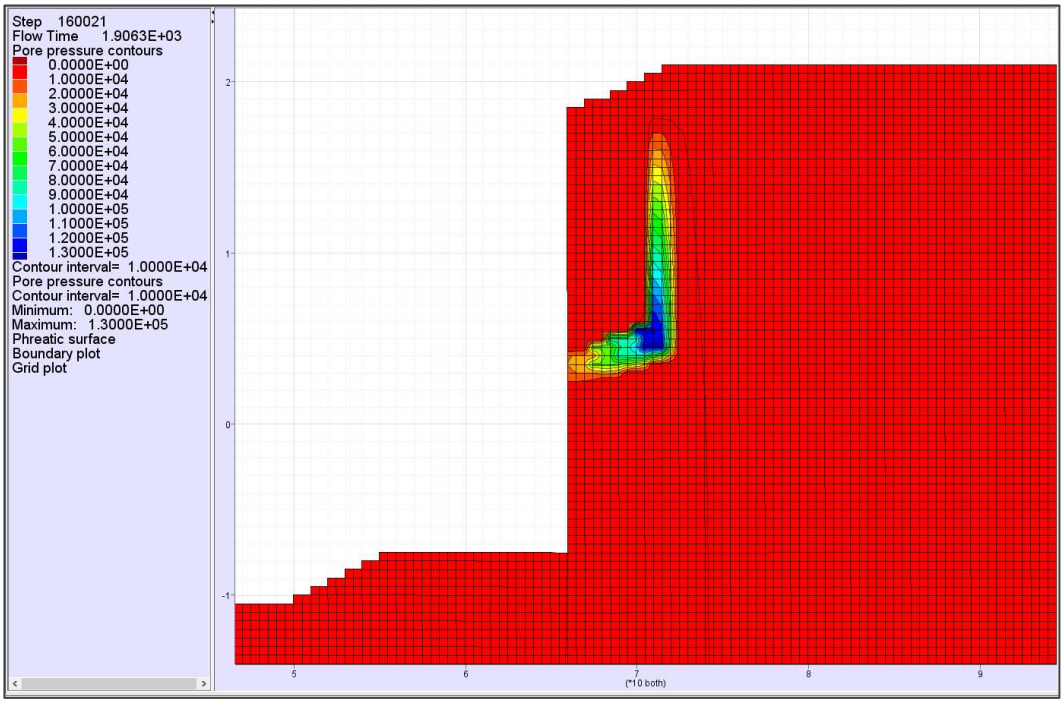


Figura 4.11 – Pressioni idrauliche agenti

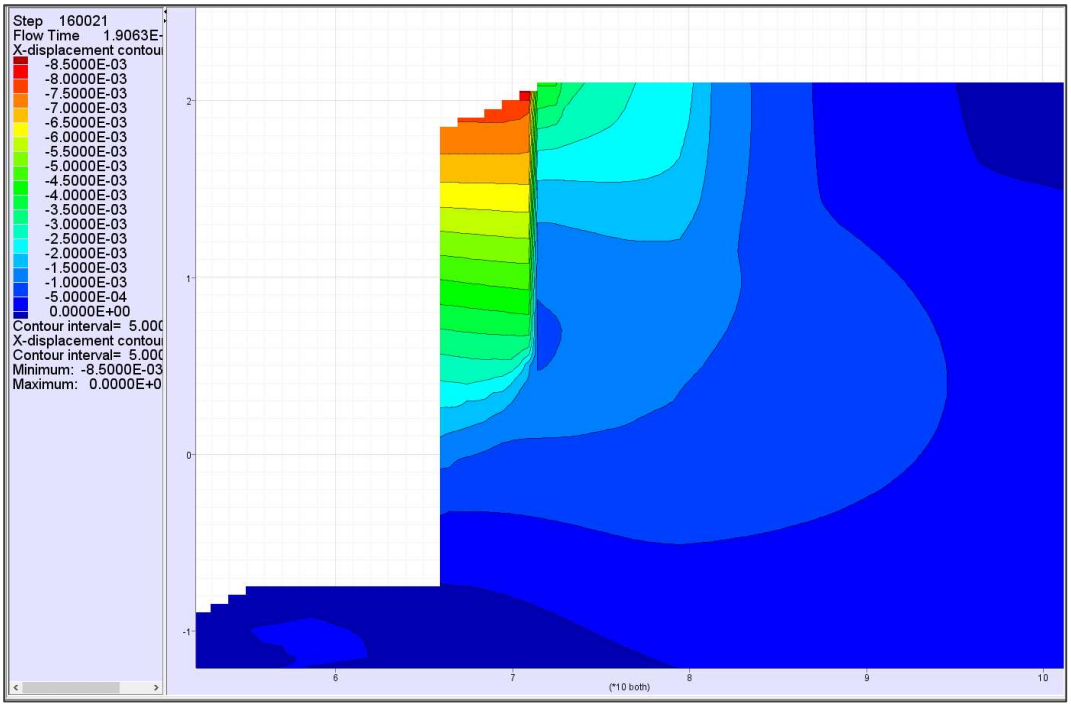


Figura 4.12 – Spostamenti in direzione orizzontale.

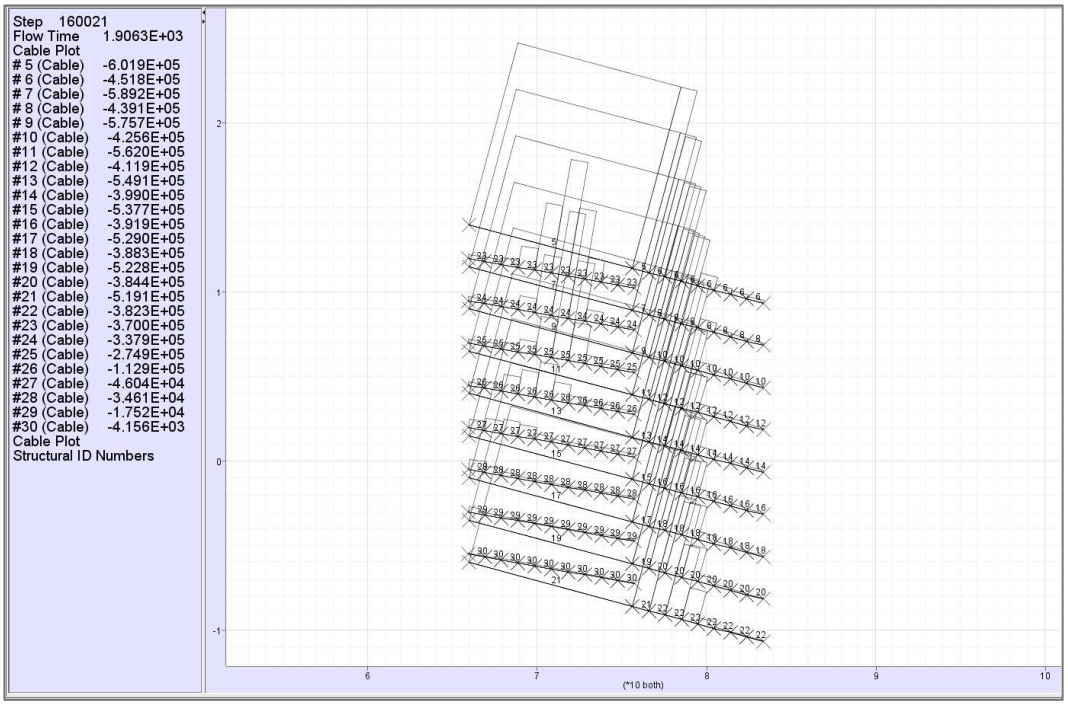


Figura 4.13 – Carico assiale nei tiranti e nelle chiodature.

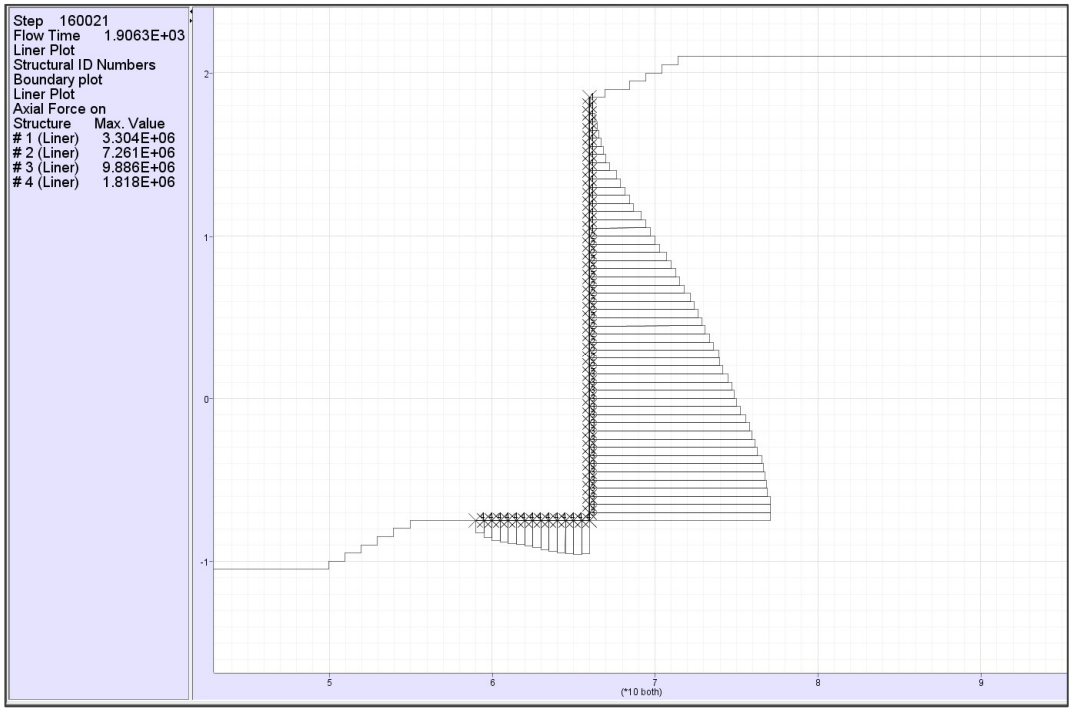


Figura 4.14 – Carico assiale nei contrafforti

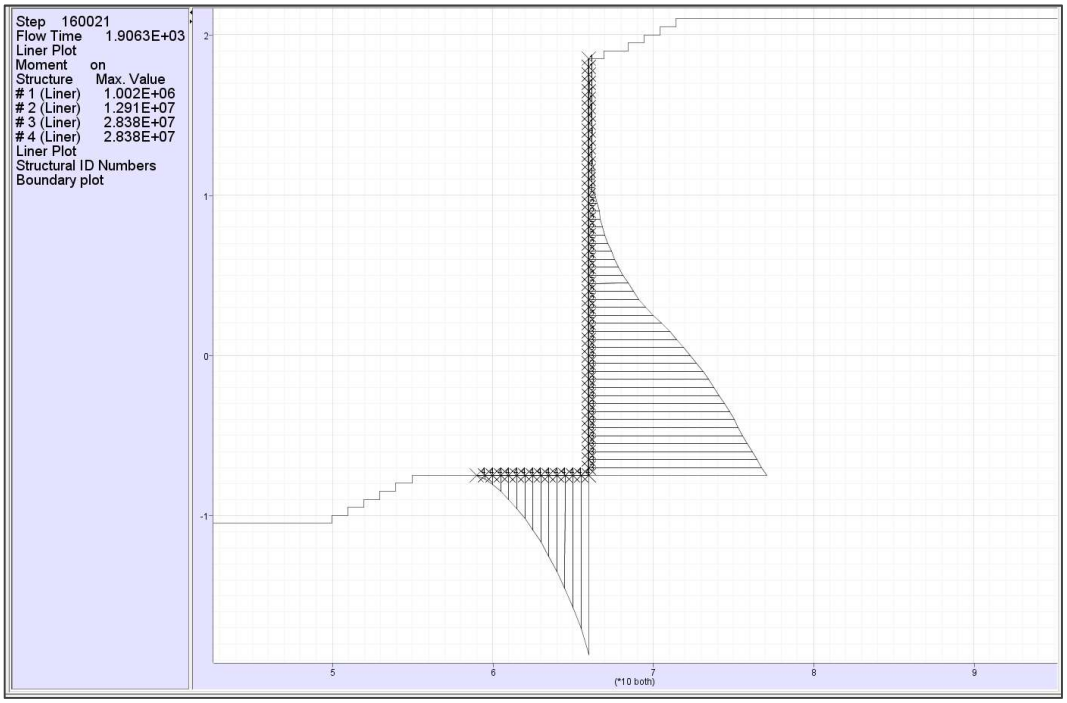


Figura 4.15 – Momento flettente nei contrafforti

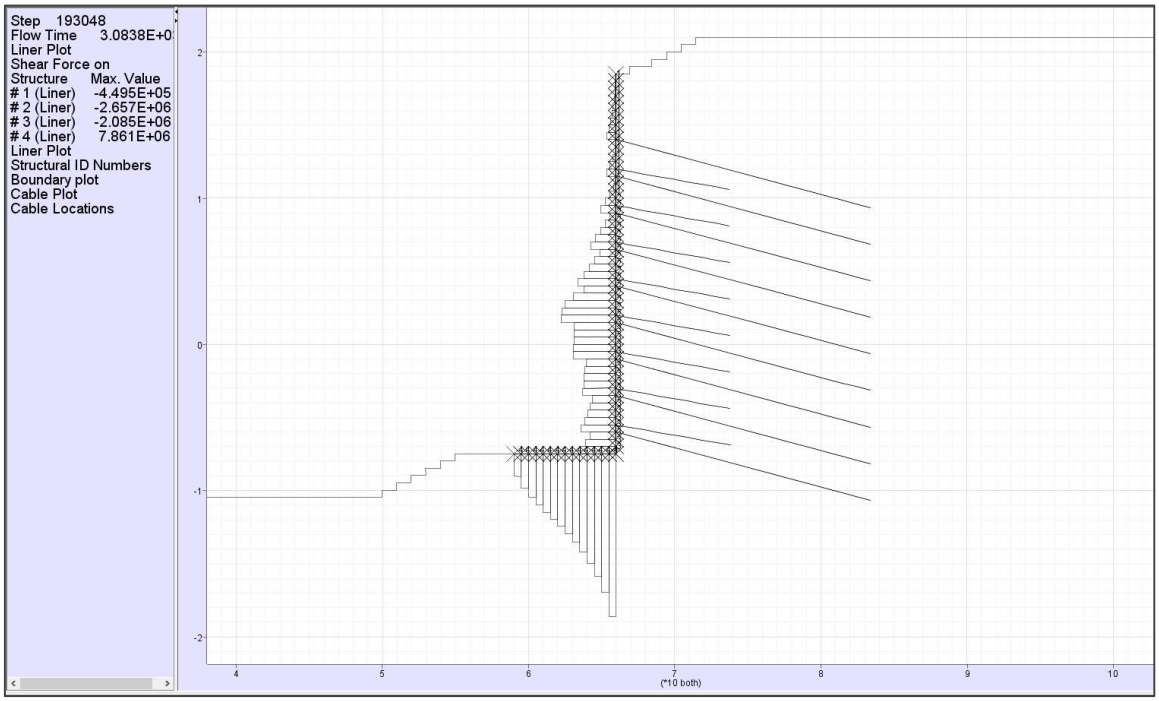


Figura 4.16 – Forza di taglio nei contrafforti

Si osservi che nelle analisi preliminari presentate in questa nota a titolo orientativo non sono stati considerati gli effetti delle azioni dovute allo scuotimento sismico.

5.0 Conclusioni

In questa nota sono presentate valutazioni preliminari da cui emergono alcune indicazioni per l'impostazione della progettazione definitiva.

Si rileva la necessità, ai fini della progettazione, di un approfondimento di indagine teso tra l'altro a ricostruire con sufficiente dettaglio le caratteristiche geometriche e meccaniche delle discontinuità in ciascuna porzione dell'ammasso roccioso, e a caratterizzare i materiali alterati o di natura antropica presenti nella porzione sommitale della falesia. Dovrà inoltre essere investigato il regime idrogeologico nell'area, anche mediante specifiche attività di monitoraggio. Le attività di approfondimento e di indagine necessarie ai fini della progettazione definitiva saranno descritte in maggiore dettaglio in un documento dedicato.

In base alle informazioni ad oggi disponibili si ritiene che nel settore 3 un'opera di contenimento del tipo schematizzato in un capitolo precedente, composta da contrafforti in CA, tiranti e chiodature, possa risultare adeguata per prevenire il collasso della porzione di falesia potenzialmente soggetta a instabilità. Tuttavia, solo nel corso della progettazione definitiva e a valle delle necessarie indagini sarà possibile valutare in modo affidabile l'efficacia della soluzione proposta, stabilirne la configurazione e definire la soluzione architettonica più adeguata.

Per quanto riguarda i distacchi più superficiali, andrà previsto il disgaggio dei massi instabili e un efficace sistema di rinforzo corticale, anche per tutelare le maestranze impegnate nei lavori.

In fede,

Ing. Fabrizio Pelli

Fabrizio Pelli
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova
Ingegnere
16.12.2023 11:33:53 GMT+01:00