

# LA PROGETTAZIONE DELLE GALLERIE ALL'INTERNO DI CORPI DI FRANA

L'ESPERIENZA DI ROCKSOIL SPA NELL'ATTRAVERSAMENTO DELL'APPENNINO ITALIANO SULLA VARIANTE DI VALICO



1. Veduta aerea della TBM all'imbocco delle gallerie Sparvo

**N**ella pianificazione e nella progettazione delle opere in sotterraneo è fondamentale un'approfondita analisi del rischio, che coinvolga gli aspetti geologici, geomorfologici e idrogeologici nonché tutte le possibili interferenze tra la realizzazione della nuova opera e le preesistenze.

Tutto ciò diventa fondamentale soprattutto in presenza di frane. In questo articolo, viene presentato un approccio metodologico, considerando alcune recenti esperienze relative all'Appennino Italiano raccolte in diversi cantieri della variante di Valico (A1 var). Le indagini geologiche preliminari e lo studio delle preesistenze vengono descritte al fine di definire un dettagliato modello geologico (GDM) che permetta di sviluppare un'analisi multicriterio, funzionale alla definizione del corretto tracciato delle gallerie. Inoltre, viene illustrato l'approccio costruttivo adottato, che coerentemente con l'approccio ADECO-RS, minimizza la risposta deformativa della galleria e, di conseguenza, i cedimenti in superficie.

Da ultimo, vengono poi analizzati i dati di monitoraggio dei case history proposti, funzionali alla definizione del comportamento tipico di un ammasso in frana.

Nella progettazione delle infrastrutture sotterranee, le condizioni geologiche, geomorfologiche, e idrogeologiche dell'area interessata dai lavori di scavo devono essere attentamente considerate al fine di valutare, in termini di risposta deformativa dell'ammasso, l'interazione tra lo scavo e le strutture esistenti in superficie.

Gli aspetti geomorfologici devono essere analizzati in dettaglio per definire il tracciato delle gallerie, in quanto le frane, siano esse attive o quiescenti, risultano particolarmente sensibili alle variazioni dello stato tenso-deformativo indotte dallo scavo, sia nel caso di avanzamento con metodo tradizionale che con me-

todo meccanizzato. Lo scavo di una galleria può generare una rapida evoluzione nei corpi di frana, con conseguenti impatti rilevanti sia sull'ambiente che su qualsiasi struttura o insediamento preesistente e, talvolta, sulla galleria stessa.

Per questo motivo, la progettazione definitiva di una galleria deve includere approfondite indagini geotecniche e specifici monitoraggi, nonché lo sviluppo di modelli numerici che considerino l'evoluzione delle frane durante lo scavo della galleria sia nel breve che nel lungo termine. Particolarmente utili, al fine di identificare le aree di versante caratterizzate da movimenti attivi e valutarne l'evoluzione negli ultimi decenni, risultano essere i dati di interferometria satellitare.

In questo articolo, come detto, viene presentato un approccio metodologico per affrontare la progettazione e la pianificazione delle infrastrutture. Tale approccio si basa sulle esperienze degli Autori acquisite durante la progettazione di opere localizzate lungo l'Appennino italiano, che hanno permesso la definizione di regole generali per la pianificazione e la progettazione di strutture sotterranee in condizioni difficili.

## L'APPROCCIO METODOLOGICO

### Indagini geologiche e ricerche bibliografiche

Uno studio geologico approfondito dell'area entro cui si dovrebbe inserire la nuova opera è il punto di partenza per il progetto di un'infrastruttura sotterranea efficiente ed efficace.

Il punto di partenza fondamentale è rappresentato dalla raccolta e dall'analisi delle informazioni disponibili sugli smottamenti esistenti e sui fenomeni di instabilità che si sono verificati nell'area. È prassi comune avviare l'attività di progettazione in sotterraneo con un'ampia ricerca bibliografica, relativa a studi geologici antecedenti realizzati nell'area interessata dal progetto, e con l'esame delle carte geologiche e dei documenti redatti dalle Autorità locali e regionali. Tutti questi dati devono poi essere aggiornati con le nuove indagini geologiche, la mappatura dei fenomeni di instabilità e le evidenze morfologiche.

Nell'ultimo decennio gli studi interferometrici satellitari si sono dimostrati uno strumento prezioso per la valutazione delle frane. Il confronto di immagini satellitari scattate a intervalli temporali diversi può facilmente dare evidenza dei movimenti del suolo avvenuti nell'area.

Tali informazioni risultano essere particolarmente significative e vanno tenute in debito conto soprattutto prima di iniziare lo scavo di gallerie all'interno di pendii lungo i quali si trovano insediamenti urbani preesistenti. In generale, le banche dati disponibili, forniscono informazioni dagli anni Novanta ad oggi, le quali permettono di raccogliere informazioni sul comportamento dei diversi pendii negli anni antecedenti alle fasi di progettazione della nuova opera. L'interferometria satellitare può essere utilizzata anche durante la costruzione della galleria per verificare la variazione dei movimenti superficiali, ad esempio in termini di velocità, che risulta essere un indicatore significativo per la valutazione di potenziali danni sugli edifici esistenti.

Ove possibile, prima della costruzione della galleria dovrebbe essere sempre messo in opera un piano di monitoraggio geotecnico, utilizzando sonde inclinometriche, estensimetriche e piezometriche [1]. I tempi a disposizione per la fase di proget-

tazione non sono solitamente sufficienti per avere dati affidabili da questo tipo di strumentazione da implementare nei modelli di progetto (sono necessari uno o due anni di osservazione per avere dati significativi); tuttavia l'installazione degli strumenti nel più breve tempo possibile permette di avere un monitoraggio di background da utilizzare come confronto durante la costruzione della galleria. Risulta poi particolarmente utile correlare il comportamento del pendio alle stagioni ed in particolare alle precipitazioni atmosferiche.

### Il Modello Geologico (GDM)

È necessario ricostruire un modello geologico, geotecnico e idrogeologico del pendio molto accurato. Oltre agli studi dell'area e alla ricerca bibliografica, è necessario pianificare una campagna di indagini con perforazioni che si spingano ad almeno 10 m al di sotto della futura quota dell'arco rovescio della galleria. Tutti i dati stratigrafici e morfologici raccolti devono essere inseriti nel GDM e utilizzati per riconoscere i diversi elementi geologici e definirne i rispettivi limiti.

La delimitazione dei corpi di frana all'interno dei pendii permette di identificare un modello cinematico concettuale da utilizzare per valutare la stabilità dei versanti prima, durante e dopo la costruzione della galleria.

### L'analisi delle preesistenze

Tutte le interferenze esistenti devono essere identificate e registrate. Si tratta ad esempio della rete di sottoservizi, tralicci di linee elettriche, strade ed edifici.

Gli edifici, inoltre, devono essere classificati in base alle loro caratteristiche principali:

- uso (pubblico o privato);
- epoca;
- struttura (calcestruzzo, muratura, legno);
- numero di piani (sopra e sotto terra);
- fondazioni (plinti isolati, trave continua, piastra);
- evidenze di danni esistenti (fessure, cedimenti, ecc.).

Tutti questi elementi devono essere attentamente considerati per valutare la "vulnerabilità" - conseguente allo scavo di una galleria - di strutture superficiali esistenti che, nel caso di versanti, con o senza frane attive/inattive, produce sempre movimenti orizzontali e verticali a piano campagna.

Quando vengono riconosciuti corpi di frana, siano essi superficiali o profondi, questi movimenti possono essere maggiori del previsto. Lo scavo, se condotto all'interno di una frana o in prossimità di una grande superficie di scivolamento, può aumentare infatti il movimento naturale della frana o addirittura riattivare corpi quiescenti. Per stimare la sostenibilità pubblica della costruzione è quindi necessario effettuare una valutazione del rischio dei danni attesi che possono verificarsi negli elementi interferiti.

### L'analisi multicriterio per la definizione del tracciato delle gallerie

Una volta definito il modello geologico e raccolti i dati citati nei paragrafi precedenti, deve essere effettuata un'analisi costi/benefici multicriterio dei diversi tracciati (allineamenti) delle gallerie, variati rispetto al loro impatto sulle frane esistenti, al fine

di definire il miglior tracciato possibile in riferimento alla soglia minima dei danni attesi.

La presenza di una frana, anche quiescente, lungo un pendio all'interno del quale deve essere realizzata una galleria, deve essere attentamente considerata, non solo per i potenziali danni alle preesistenze ma anche per gli eventuali danni che possono essere causati dai movimenti indotti del terreno alla galleria stessa.

A piano campagna questi movimenti iniziano solitamente quando il fronte di scavo si trova ad una distanza compresa tra una e due volte la copertura della galleria e si fermano quando il fronte ha oltrepassato la stessa distanza. Devono essere analizzati i diversi tracciati delle gallerie, sia in pianta che in sezione, per trovare la soluzione geometrica compatibile sia con il pendio che con la stabilità del corpo di frana. In questa fase generalmente si utilizzano l'approccio empirico e le analisi numeriche formulate in forma chiusa, al fine di ottenere risposte qualitative, da confrontare in termini di tempi, costi e sostenibilità ambientale.

### Le analisi numeriche

Una volta definito il tracciato della galleria, un'analisi numerica finalizzata alla valutazione del rischio può essere utile ai fini progettuali.

Le analisi agli elementi finiti (FEM) o alle differenze finite (FDM) della stabilità del pendio in fase di scavo della galleria vengono utilizzate per verificare le deformazioni causate lungo la superficie di scivolamento della frana, e le loro ripercussioni sia a livello del piano campagna che del rivestimento della galleria.

Gli spostamenti calcolati a quota campagna possono poi essere utilizzati, mediante l'applicazione di opportuni modelli strutturali, per calcolare lo stato di sollecitazione-deformazione indotta negli edifici, in modo da valutare, in maniera accurata, il rischio di danneggiamento e definire i valori di soglia del piano di monitoraggio.

### La progettazione delle gallerie e del sistema di monitoraggio

È evidente che, in presenza di una frana, l'obiettivo principale del progetto dovrebbe essere la riduzione del disturbo causato nell'ammasso dallo scavo. L'approccio ADECO-RS per la progettazione e la costruzione di gallerie è in grado di gestire questo tipo di situazioni difficili e delicate, come dimostrato dai case history presentati nel seguito [1]. I modelli numerici del pendio saranno utilizzati anche per definire i valori di soglia dei movimenti attesi sia in profondità che in superficie, i quali dovranno essere verificati lungo tutto il tracciato della galleria durante la fase costruttiva, mediante un monitoraggio topografico e geotecnico degli edifici esistenti, del pendio e della galleria stessa. Il progetto di un sistema di monitoraggio dovrebbe essere accurato e dettagliato, dovrebbe inoltre dare evidenza della frequenza di lettura e dei criteri adottati per gestire la raccolta dati (mediante anche schemi di flusso). Grazie all'analisi di questi ultimi si potrà procedere, se necessario, all'applicazione di azioni correttive in presenza di comportamenti anomali o di superamento dei valori di soglia definiti.

### ALCUNE CASE HISTORIES

Di seguito vengono presentate alcune recenti esperienze, raccolte in diversi cantieri della variante di Valico dell'Autostrada A1 Bologna-Firenze, per evidenziarne le principali criticità.

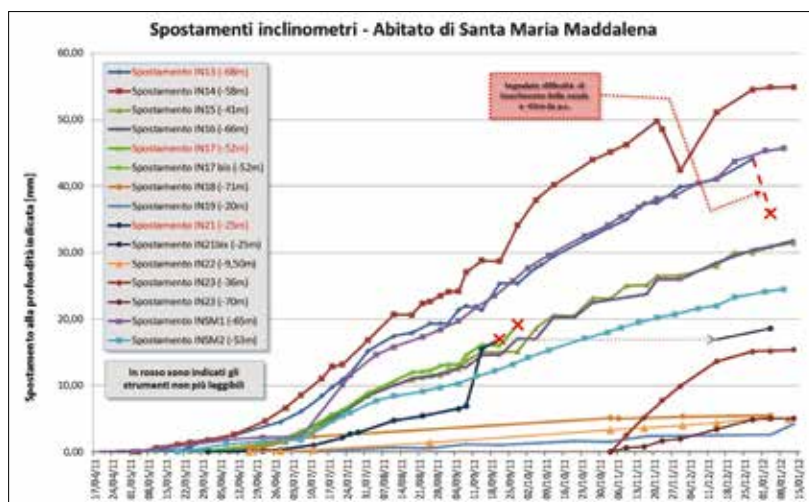
Dopo una breve descrizione dei contesti geologico-geotecnici, principalmente interessati da flysch costituiti da argilliti, siltiti e marne argillose, verrà analizzata, attraverso l'esame dei dati di spostamento derivati da un ampio sistema di monitoraggio, l'interazione tra gli scavi sotterranei e i versanti sovrastanti, interessati da complessi sistemi di frane. Saranno analizzate sia gallerie realizzate con metodo tradizionale che meccanizzato al fine di confrontarne i risultati e valutare somiglianze e differenze.

#### Le gallerie Val di Sambro

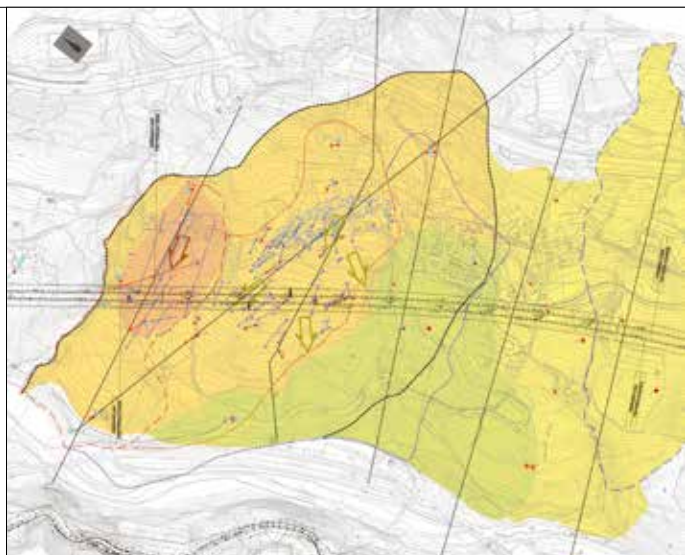
Le gallerie Val di Sambro sono situate alla base di un pendio degradante verso il fiume Setta, costituito principalmente da depositi (argille limose e limi sabbiosi) stratificati su un ammasso roccioso (flysch della Formazione di Monghidoro); lo spessore dei depositi varia da pochi metri fino a 35-40 m, e rappresenta una grande frana, di natura quiescente, con una porzione superiore attiva (massimo 10-15 m).

In fase di progettazione, il tracciato delle gallerie è stato localizzato in profondità nel pendio, in modo da garantire una certa distanza sia dalla superficie topografica che dal piede di frana, con una copertura variabile di 60-90 m. Considerando che le gallerie sarebbero state scavate in profondità nell'ammasso roccioso, sono stati previsti spostamenti minimi in superficie, e per questo motivo sono state trascurate le interferenze con gli edifici preesistenti. È stato comunque previsto un sistema di monitoraggio, mediante rilievi topografici e inclinometri, al fine di monitorare il comportamento dell'ammasso durante l'avanzamento dei lavori. Durante lo scavo dei primi 500 m dal portale Nord non sono stati osservati fenomeni di rilievo; dopo il sottoattraversamento del Rio Vallardino, si sono registrati i primi spostamenti a piano campagna, congiuntamente alla formazione di fessure in alcuni edifici rurali.

Questo fatto ha subito determinato un incremento nelle attività di monitoraggio per comprendere i fenomeni occorsi, a prima vista apparentemente inspiegabili. L'avanzamento della galleria è stato interrotto e sono stati effettuati ulteriori rilievi geognostici e



2. Le letture degli inclinometri durante la prima fase di scavo



3. Lo schema planimetrico del modello geologico

analisi di dettaglio dei dati di monitoraggio. È stato così registrato un movimento di 40-60 mm ad una profondità di circa 45-60 m dal piano campagna, probabilmente lungo una superficie di scivolamento profondo appartenente ad una paleofrana.

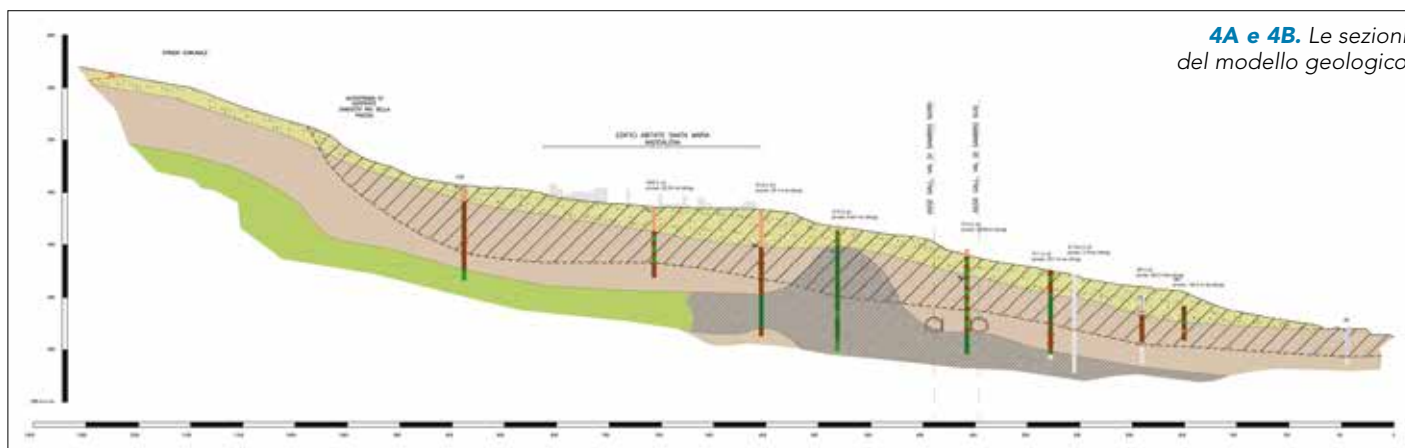
A seguito di queste indagini, sono state raccolte ulteriori informazioni di tipo geologico: all'interno della sequenza di flysch è stato individuato uno strato di materiali argillosi di notevole spessore. Non è raro trovare strati di argille e argille limose in formazioni di flysch, alternati a strati di arenaria e calcare. Nel caso specifico, il problema è che tale fascia argillosa era compatibile con una "superficie di scorrimento profondo", rappresentante una paleofrana, quiescente all'inizio dei lavori di scavo. Il disturbo legato allo scavo delle gallerie ha riattivato la frana, il cui movimento è stato

determinato direttamente dalla variazione tenso-deformativa nel terreno generata dallo scavo al suo contorno.

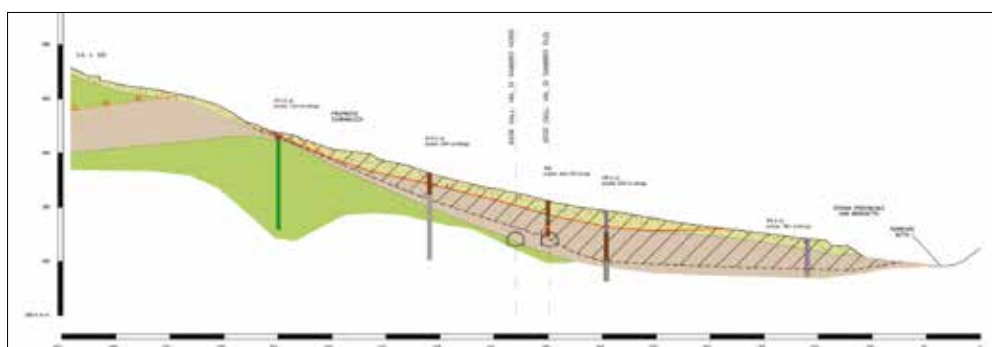
Per gestire la situazione è stato elaborato un nuovo e dettagliato modello geologico e geomorfologico. I dati raccolti dagli inclinometri, durante la prima fase di scavo (Figura 2), hanno permesso di ricostruire il modello cinematico della frana profonda e di riconoscere chiaramente come singoli strati di argilla, usuali nella formazione dei flysch, facessero parte della stessa frana. La Figura 3 rappresenta il nuovo modello geologico: la frana attiva è riportata in rosso, in arancione la paleofrana profonda. È importante notare che l'area interessata dal movimento è molto estesa, anche se all'interno della stessa è possibile evidenziare diverse componenti, ma quella principale è collegata alla frana profonda. Si trova a circa 10 m sopra il tracciato delle gallerie e con un angolo planimetrico di 45°. Un movimento secondario è stato collegato a una frana attiva, più superficiale, compresa nel corpo di frana principale, che va a determinare un meccanismo complesso.

Nelle Figure 4A e 4B sono riportate alcune sezioni geologiche significative. L'ammasso roccioso di base, costituito principalmente da arenarie e calcari, è rappresentato in verde, mentre in marrone è rappresentata la sequenza flysch all'interno della quale, mediante una linea punteggiata nera, viene identificata la frana profonda. La frana attiva, situata al contatto tra il flysch e i depositi superficiali, è riportata in rosso.

Un altro aspetto importante è che l'area in frana comprendeva l'abitato di Santa Maria Maddalena a Ripoli, caratterizzato dalla presenza di edifici residenziali, la maggior parte dei quali costruiti in muratura all'inizio del XX secolo, che presentavano numerose crepe e danni locali, probabilmente legati agli antichi movimenti del pendio.



4A e 4B. Le sezioni del modello geologico



Prima di iniziare lo scavo della galleria, è stato effettuato un rilievo dettagliato degli edifici, secondo i criteri precedentemente descritti. Una vista degli edifici più rappresentativi è riportata in Figura 5 (la vista è dall'alto del pendio).

Ogni edificio è stato classificato mediante un numero, ed è stato preparato un report specifico,

contenente tutte le informazioni; ove possibile, sono stati recuperati gli as built degli edifici, in modo da avere un quadro di riferimento corretto della struttura. Inoltre, è stata compilata la scheda AeDES, per valutare il livello di danneggiamento di ogni edificio. Queste schede sono generalmente compilate a seguito di eventi sismici, per stimare la resistenza residua dell'edificio tenendo conto del suo stato di danneggiamento e del quadro fessurativo presente; tali schede si sono rivelate particolarmente utili per valutare il livello di danneggiamento progressivo, durante lo scavo delle gallerie. Un esempio di scheda AeDES è riportato in Figura 6.

Le nuove informazioni sul modello geologico e i dati raccolti sulle interferenze hanno dato la possibilità di ridefinire i dati di progetto e rivalutare il processo di costruzione della galleria. Una volta definita la geometria reale della frana, non è stato possibile evitare interferenze con la costruzione delle gallerie, per cui è diventato molto importante adottare un sistema costruttivo in grado di minimizzare l'impatto con le preesistenze (siano essi edifici ma anche il pendio stesso), minimizzando le deformazioni all'interno dell'ammasso durante lo scavo. Prima che lo scavo delle gallerie fosse interrotto, il metodo di avanzamento tradizionale non prevedeva interventi di consolidamento del fronte: semplicemente si operava un confinamento della cavità mediante centine metalliche e calcestruzzo proiettato. Le sezioni di scavo sono state riviste secondo l'approccio ADECO-RS [1]. Sulla base delle nuove evidenze, sono state definite nuove azioni di pre-confinamento e confinamento, al fine di ridurre al minimo l'estrusione del fronte, la convergenza e gli assestamenti in galleria, che nella prima fase di scavo avevano raggiunto i 10-15 cm. Sono state predisposte diverse sezioni di scavo in funzione della distanza dalla superficie di frana, della natura della frana (attiva o profonda) e della posizione del fronte rispetto all'ubicazione degli edifici; sono state inoltre predisposte specifiche linee guida per disciplinare l'applicazione delle diverse sezioni e definire il numero di interventi.

**SCHEDA DI 1° LIVELLO DI RILEVAMENTO DEL DANNO, PRONTO INTERVENTO E AGIBILITÀ PER EDIFICI ORDINARI (AeDES 06/0008 - mod.)**

**SEZIONE 1 Identificazione edificio**

Provincia: Bologna  
 Comune: Santeramo L. P.  
 Indirizzo: VIA S. MARIA MADDALENA  
 Cap: 40010 Prov: BO Comune: Santeramo L. P. Via: S. Maria Maddalena n° edificio: 10  
 C.A.P. 40010 Prov. BO Comune Santeramo L. P. Via S. Maria Maddalena n° edificio 10  
 C.A.P. 40010 Prov. BO Comune Santeramo L. P. Via S. Maria Maddalena n° edificio 10

**SEZIONE 2 Descrizione edificio**

N° piani	Altezza media di piano (m)	Superficie media di piano (m²)	Continenza e struttura	Uso	Altezza piano	Utilizzazione	Occupati
01	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
02	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
03	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
04	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
05	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
06	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
07	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
08	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
09	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
10	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
11	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
12	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
13	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
14	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
15	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
16	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
17	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
18	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
19	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1
20	0,25	0,85	1119	Prodotto	1,0	100%	1

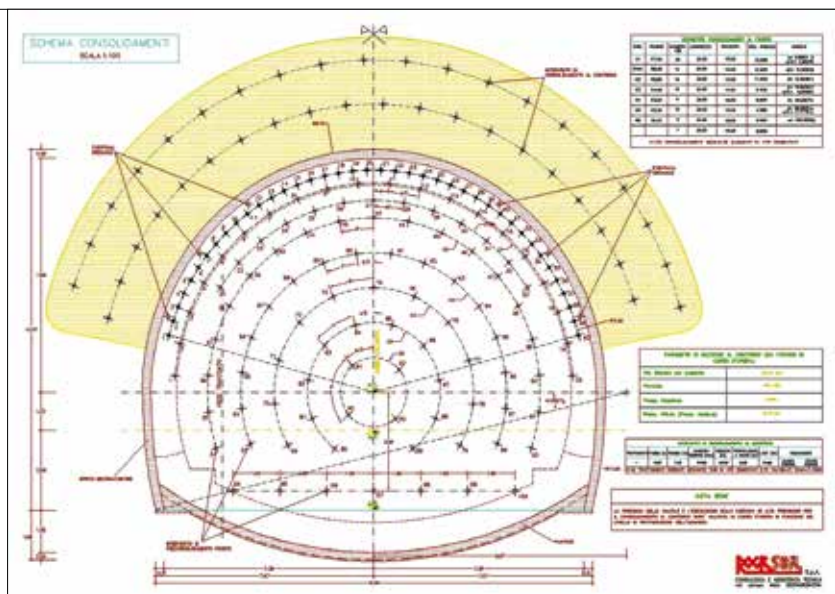
6. La scheda AeDES dell'edificio n° 10

I concetti principali adottati per la definizione delle nuove sezioni di scavo riguardano:

- utilizzo di interventi di preconfinamento del fronte di scavo, mediante installazione di elementi in vetroresina (n. variabile da 60 a 120) e a contorno del futuro profilo di scavo (esternamente al profilo di scavo gli elementi in vetroresina, n. variabile da 30 a 60, sono stati dotati di valvole per iniettare miscela cementizia (30-60 l/vlv) o schiuma espansiva, al fine di precomprimere il terreno e creare un arco artificiale, con funzione protettiva); il risultato è stato una significativa riduzione dell'estrusione e della pre-convergenza al fronte, ottenuta in aggiunta alla stabilità del nucleo-fronte;
- scavo a piena sezione (circa 180 m<sup>2</sup>), capace di chiudere rapidamente l'anello che delimita la cavità dopo ogni fase di scavo, mediante un pre-rivestimento costituito da centine metalliche e puntone in arco rovescio (2IPE240 ogni 1,0 m), sui quali viene proiettato il calcestruzzo fino al raggiungimento di uno spessore pari a 25-30 cm. Il puntone in acciaio, rigidamente collegato alla centina, permette di contrastare efficacemente la convergenza della cavità e di minimizzare i cedimenti, fungendo anche da fondazione preliminare;
- getto dell'arco rovescio (spessore 1,0 m) in prossimità del fronte di scavo, ad una distanza variabile da 4 a 12 m, per bloccare le convergenze del cavo;
- rivestimento definitivo (calcestruzzo armato, spessore 0,90 m) gettato a una distanza di 50-60 m dal fronte; è importante notare che le due canne delle gallerie presentano un interrasso ridotto, circa 35-40 m, quindi il getto del rivestimento definitivo della prima canna in scavo, realizzato molto vicino al fronte, permette di evitare qualsiasi interferenza reciproca durante lo scavo della seconda canna;
- utilizzo di drenaggi in presenza di venute d'acqua; all'interno della frana, attraversando la superficie di scorrimento, sono state collocate file di drenaggi per ridurre la pressione dell'acqua e aumentare la resistenza al taglio lungo la superficie di scorrimento.



5. Vista di Santa Maria Maddalena



7. La sezione di scavo tipo (approccio ADECO-RS)

La Figura 7 mostra una tipica sezione di scavo ADECO, precedentemente descritta. Nelle Figure 8A, 8B e 8C sono riportate alcune immagini del processo di costruzione, relative alla fase di esecuzione principale:

- fase di scavo a piena sezione;
- installazione rivestimento prima fase (con puntone in acciaio in arco rovescio);
- getto del rivestimento definitivo.

Con riferimento al sistema di scavo delle gallerie, sono state sviluppate analisi FDM dettagliate per verificare la stabilità del nucleo-fronte durante lo scavo e la statica del rivestimento, nonché per verificare la stabilità del pendio in funzione dell'evoluzione tenso-deformativa del terreno prodotta dalla realizzazione delle gallerie.

In primo luogo sono state effettuate delle back-analyses con riferimento alla superficie di scorrimento rilevata dagli inclinometri mediante un modello di equilibrio limite, per definire i parametri di resistenza dell'argilla che regolano la superficie di scorrimento della frana profonda. Le Figure 9A e 9B riportano il modello geo-slope predisposto per l'inserimento dei dati inclinometrici (viene riportata anche una sezione interpretativa schematica); è stata sviluppata un'analisi parametrica, considerando un peso unitario di 19,5 kN per la fascia argillosa e coesione nulla, ipotizzando quindi i parametri residui del materiale.

Tenendo conto di un fattore di sicurezza globale variabile nell'intervallo 1,05-1,08, è stato determinato un angolo di attrito di 18-20°: per le analisi FDM è stato assunto un valore pari a 19°. Lo scopo del modello FDM era principalmente quello di comprendere l'evoluzione della frana durante la costruzione della galleria; soprattutto per escludere che un rapido aumento degli spostamenti potesse causare il collasso del pendio e del centro abitato con esso.

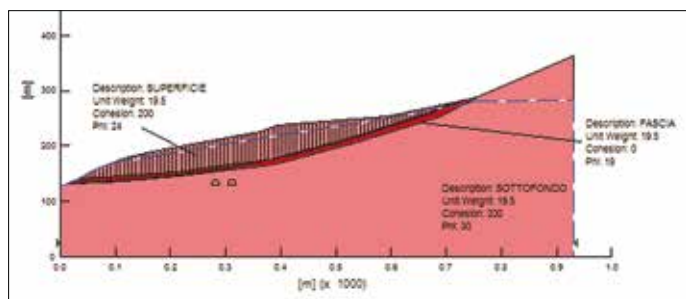
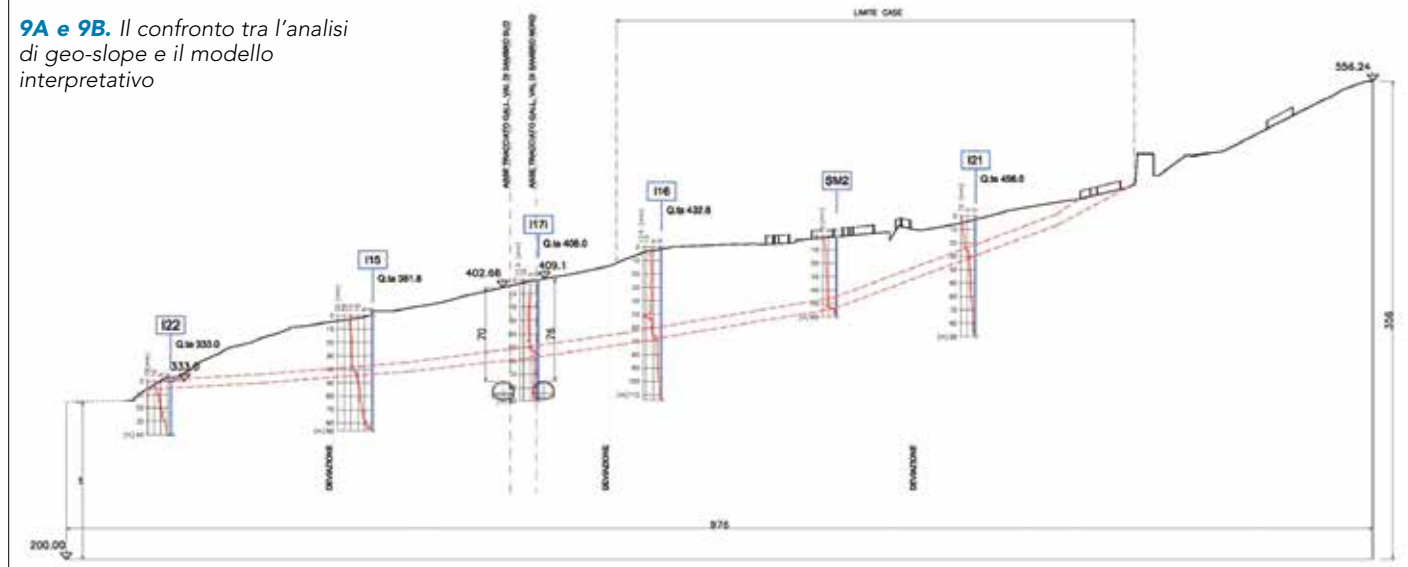
Così, le analisi numeriche sono state eseguite per passi: prima è stata riprodotta la back-analyses relativa al movimento del pendio, dopo la prima fase di scavo delle gallerie. Le deformazioni delle gallerie (convergenze nell'intervallo di 80-100 mm e cedimenti fino a 120 mm), i movimenti della frana e i cedimenti superficiali (pari a 40-60 mm) sono stati utilizzati per testare l'affidabilità del modello.



8A, 8B e 8C. Le principali fasi costruttive (ADECO)

In una seconda fase, adottando il nuovo sistema di scavo, è stata simulata la costruzione delle gallerie per verificare il comportamento del pendio. I risultati hanno evidenziato condizioni di sostanziale stabilità del pendio durante lo scavo, prevedendo degli spostamenti lenti nell'ordine di 60-100 mm lungo la superficie di frana e nell'intervallo di 30-90 mm a piano campagna, in corrispondenza del Villaggio Santa Maria Maddalena. Nelle Figure 10A e 10B sono riportate alcune immagini del modello. I risultati delle analisi FDM hanno confermato che gli spostamenti in questione fossero lenti, comportamento tipico dei materiali duttili, come l'argilla, secondo un comportamento di strain-softening in fase residua, senza un rapido incremento deformativo, tipico invece dei materiali elasto-fragili. Il valore

9A e 9B. Il confronto tra l'analisi di geo-slope e il modello interpretativo



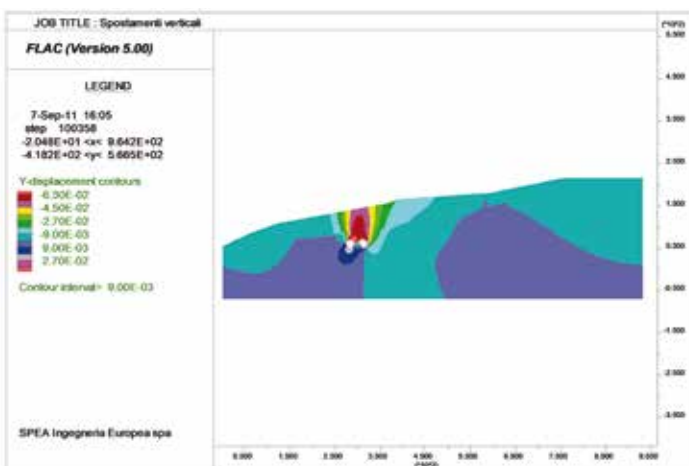
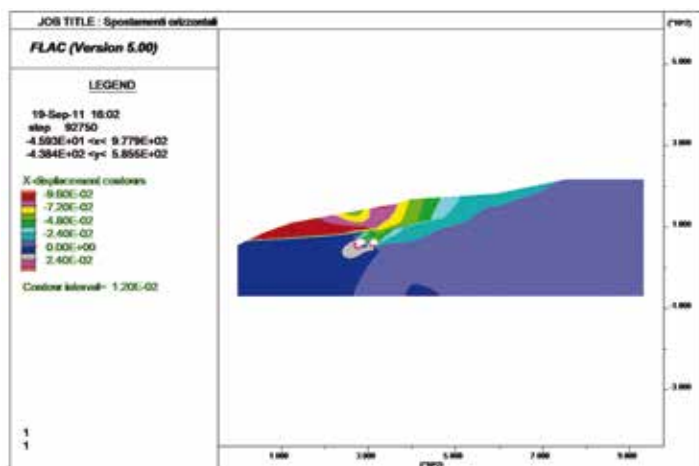
dei movimenti previsti è stato considerato come "indicativo" di quelli attesi, utili per progettare il sistema di monitoraggio e per definire le soglie di attenzione e di allarme per ogni componente (sia in profondità che a piano campagna).

Parallelamente alle analisi geotecniche appena descritte, sono state effettuate anche analisi dettagliate del comportamento statico degli edifici, talvolta applicando modelli 3D FEM, per verificare lo stato di fatto e prevedere il comportamento degli edifici a seguito dei movimenti attesi del pendio. La sicurezza e l'incolumità delle persone che vivono nell'area è stato l'elemento cardine del gruppo di lavoro, così come la sostenibilità ambientale delle misure da adottare.

Le Figure 11A e 11B mostrano un esempio di analisi di un edificio; se la deformazione imposta alle strutture dell'edificio, connessa al movimento del pendio generato dallo scavo delle gallerie, supera la resistenza dei materiali, sono previsti interventi di rinforzo, quali barre di acciaio o elementi di sostegno per il raggiungimento di un adeguato fattore di sicurezza.

Anche per gli edifici è stato implementato un sistema di monitoraggio, che comprendeva il rilievo topografico, in grado di valutare i movimenti e le deformazioni degli edifici, e il rilevamento delle fessure (controllo dell'ampiezza di apertura e ispezione visiva). I valori di attenzione e di allarme sono stati definiti secondo l'abaco di Boscardin e Walker [2] (Figura 12), in cui sono riportate le distorsioni verticali e orizzontali. Il dominio very slow damage è stato utilizzato come valore di attenzione e il moderate damage come valore di allarme.

Tutti questi dati, derivanti dal sistema di monitoraggio, sia geotecnico relativo al pendio che strutturale relativo agli edifici, sono stati gestiti in tempo reale secondo rigide procedure, nell'ambito di un "Piano di Protezione Civile" con strategia di emergenza. L'unicità del progetto e la posta in gioco hanno richiesto una particolare attenzione da parte di tutti gli operatori



10A e 10B. Le analisi FDM risultati dal modello adottato: gli spostamenti orizzontali (10A) e quelli verticali (10B)

(coordinati in un unico Comitato tecnico) con la supervisione delle Autorità competenti, quali Vigili del Fuoco e Prefetture.

I lavori sono stati completati con successo e le gallerie sono ora in servizio. I dati di monitoraggio raccolti hanno permesso di formulare alcune osservazioni interessanti.

Il metodo costruttivo adottato ha permesso di mantenere un basso livello deformativo delle gallerie, al di sotto del limite di trigger; il confinamento del nucleo-fronte ha minimizzato i fenomeni di estrusione (in generale limitandoli a meno di 10 mm); l'installazione del puntone in acciaio, combinato con il rivestimento di prima fase e il getto dell'arco rovescio vicino al fronte, hanno permesso di mantenere le convergenze ed i cedimenti al di sotto dei 50 mm (Figura 13).

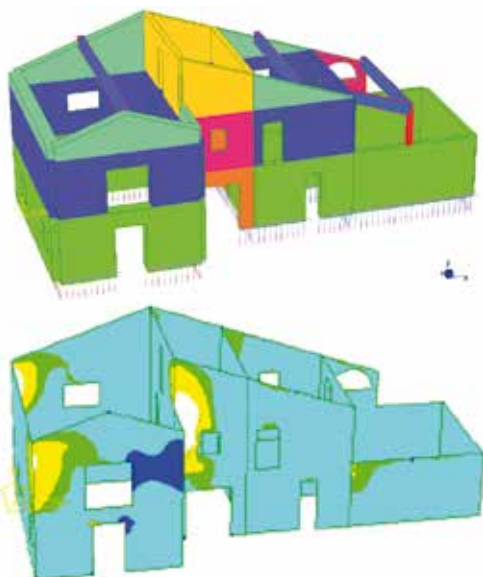
Il comportamento del pendio, collegato alla frana principale, a 40-60 m dal piano campagna, ha mostrato movimenti lenti, dovuti all'avanzamento delle gallerie. Come mostrato in Figura 14, i movimenti lungo la superficie di scorrimento profondo hanno raggiunto il valore massimo di 140 mm. Ma si tratta di un solo caso relativo a un inclinometro; il valore medio è stato di 40-60 mm. Si nota una pendenza costante fino a quando il fronte della galleria supera la posizione dello strumento di monitoraggio; dopo alcune settimane (per tener conto di un periodo di assestamento inerziale) la pendenza si riduce fino a diventare molto

piccola. Si può concludere che lo scavo della galleria funziona come un "elemento forzante", che crea un disturbo temporaneo che si assesta gradualmente al termine dei lavori.

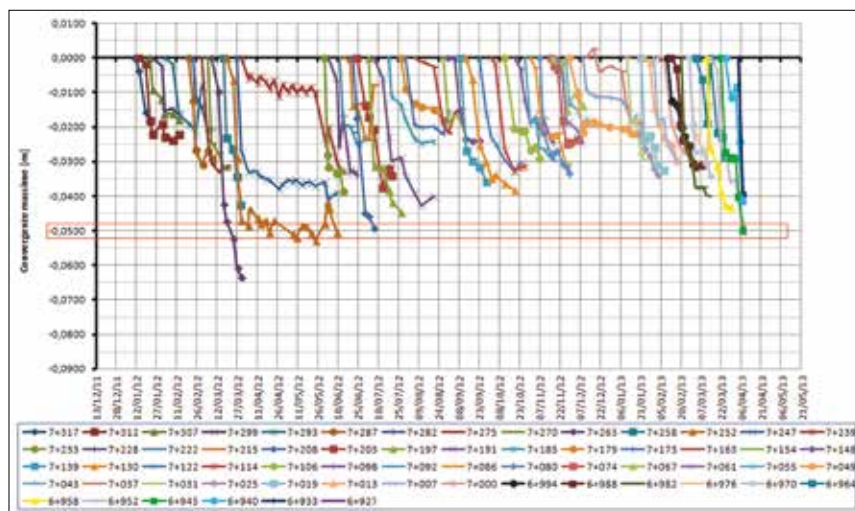
Ad un anno di distanza dal termine della realizzazione delle gallerie, si registra uno spostamento pari a 1 mm/mese (rispetto agli 8-10 mm/mese del periodo di scavo), imputabile principalmente alle condizioni meteorologiche.

Gli spostamenti a piano campagna hanno raggiunto i 180-220 mm (con un valore massimo pari a 340 mm), ma sono stati sostanzialmente uniformi su una superficie molto ampia, per cui i gradienti sono molto bassi, senza distorsioni significative per le fondazioni degli edifici. L'intero villaggio si è spostato lungo il pendio senza danni rilevanti per le preesistenze.

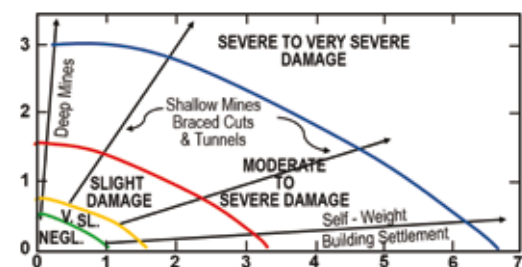
Un comportamento diverso è stato osservato localmente per l'area interessata dalla frana attiva, la cui superficie di scivolamento è posizionata a 14 m sotto il piano campagna, e coincide con il limite inferiore dei depositi. I movimenti lungo la superficie di scorrimento sono maggiori, raggiungendo un valore massimo di 150-200 mm (il valore medio è di circa 110 m); parte di questi spostamenti sono stati causati dall'interferenza con lo scavo della



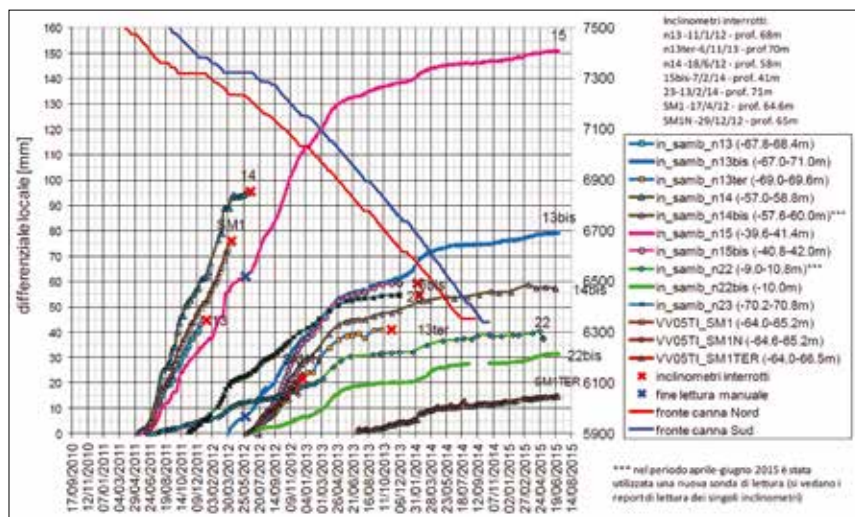
11A e 11B. I modelli FEM per gli edifici: mesh (10A) e stato di sforzo (10B)



13. Le convergenze dei dati di monitoraggio della galleria



12. I valori di attenzione (verde) e di allarme (rosso) per la valutazione del rischio



14. Gli spostamenti della superficie di scorrimento in frana profonda



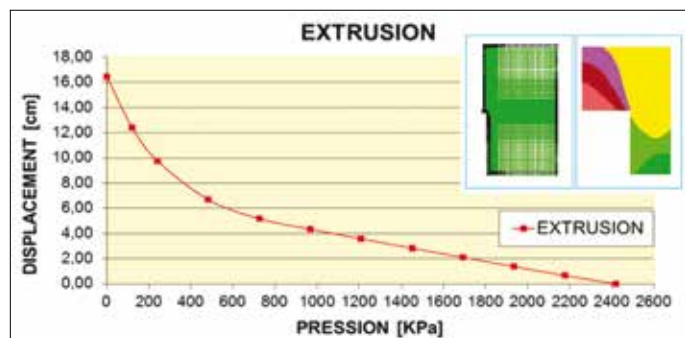
le gallerie, ma presentano un comportamento ciclico dovuto alla stagionalità. Le precipitazioni piovane sono il parametro più importante che governa il comportamento della frana, per cui un aumento graduale del movimento è legato al peggioramento delle condizioni meteorologiche, da Gennaio a Marzo (piogge e disgelo). La Figura 15 mostra l'andamento delle misurazioni, con un incremento medio annuo di 25-35 mm. La stessa considerazione può essere fatta per i movimenti superficiali; si nota un forte aumento dei movimenti planimetrici, dopo ogni periodo invernale, mentre i cedimenti, legati allo scavo della galleria, sono ora interrotti. Tenendo conto che la circolazione idrica è la vera causa dei fenomeni, si è prevista la realizzazione di pozzi di drenaggio, per controllare la circolazione dell'acqua e, di conseguenza, la stabilità del pendio.

### Le gallerie Sparvo

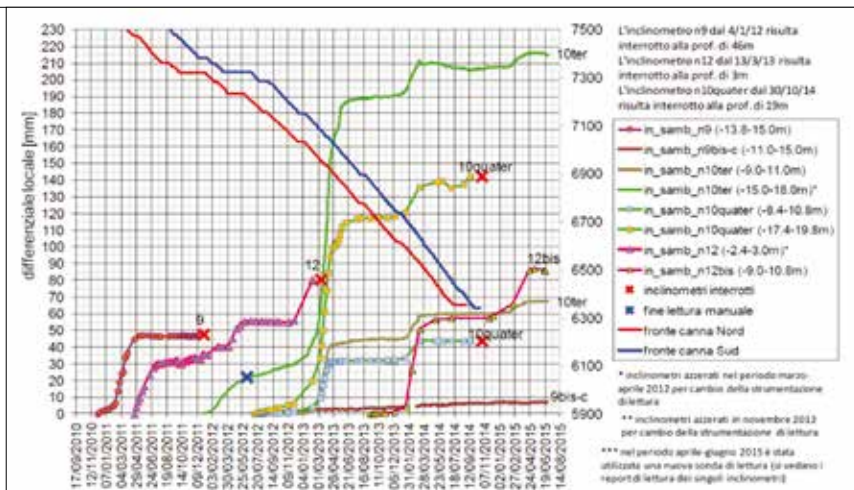
Le gallerie Sparvo sono situate sulla sponda opposta del fiume Setta rispetto alle gallerie Val di Sambro; un ponte attraversa il fiume e collega le due gallerie. Il pendio di questa sponda risulta interessato da numerose frane a causa delle scadenti caratteristiche geotecniche del terreno, rappresentato principalmente dalle argille della formazione Argillite a Palombini, caratterizzate inoltre da una quota di falda prossima al piano campagna.

Per realizzare lo scavo delle gallerie è stata adottata una TBM-EPB, il cui progetto è risultato molto impegnativo, considerando il diametro di scavo (15,56 m) e i parametri macchina, quali spinta (fino a 390 MN) e pressione in camera di scavo (3,5-4,0 bar in corona e fino a 7-8 bar alla base della macchina). Il dimensionamento geotecnico della TBM e il processo di costruzione sono stati oggetto di altri articoli [3 e 4].

Per quanto riguarda l'interferenza con le frane poste lungo il tracciato delle gallerie, sono stati utilizzati criteri simili a quelli delle gallerie di Val di Sambro: lo scopo del metodo costruttivo è stato quello di minimizzare la risposta deformativa dopo lo scavo, mantenendo principalmente i parametri di resistenza delle argille nell'intorno dei valori di picco (dominio elastico), riducendo, per quanto possibile, la plasticizzazione del terreno. Anche questo obiettivo è stato raggiunto applicando l'approccio ADECO e sono state effettuate diverse analisi dettagliate



16. L'analisi assialsimmetrica per definire la pressione in camera di scavo della TBM presso la galleria Sparvo



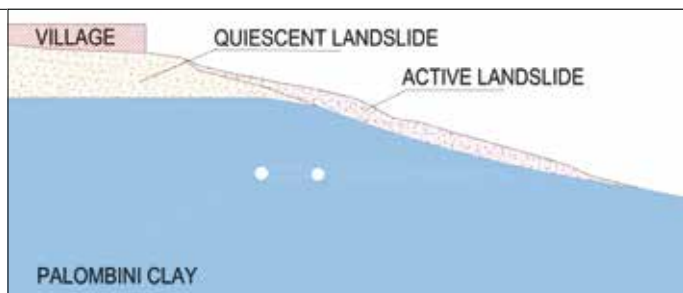
15. I movimenti della superficie di scivolamento delle frane attive

per definire la pressione in camera di scavo necessaria per confinare correttamente il nucleo-fronte, come illustrato in Figura 16. Per il tratto di galleria in esame, con coperture variabili pari a 110-120 m, è stata definita una pressione in camera pari a 3,5 bar (alla sommità della camera di scavo), per limitare la pressione del terreno al contorno dello scavo e contenere la redistribuzione degli sforzi-deformazioni. In questo modo, come valutato in una precedente pubblicazione [3], è stato possibile ridurre l'anello di plasticizzazione intorno al profilo di scavo, e di conseguenza anche le forze di attrito sullo scudo della TBM ("jamming risk control") e la propagazione dei movimenti verso il piano campagna.

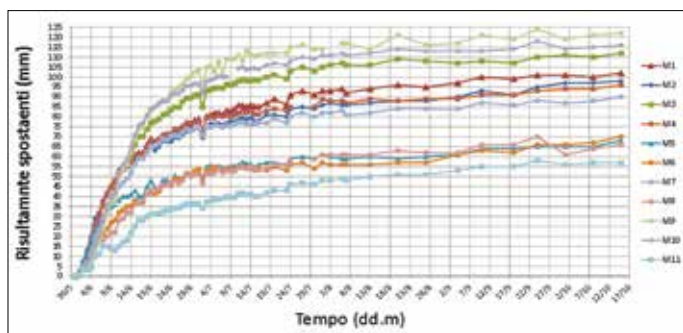
In ogni caso, è importante sottolineare che il problema della chiusura del terreno sulla macchina è stato il primo elemento affrontato durante il progetto della TBM; per questo motivo è stata definita un'elevata conicità dello scudo (da 35 a 70 mm in corrispondenza della sua coda), producendo, durante lo scavo, un "volume perso di terreno" paragonabile a quello dello scavo con metodo tradizionale.

Allo stesso tempo, sono state effettuate analisi FDM del pendio per considerare le caratteristiche geometriche e geotecniche del pendio stesso, tenendo conto sia dei dati raccolti dagli inclinometri che del rilievo a piano campagna. Come mostrato in Figura 17, l'ubicazione dell'abitato, denominato Castagno, non è al di sopra del tracciato della galleria, come nel caso delle gallerie di Val di Sambro, e quindi i cedimenti sono risultati inferiori a quelli dell'insediamento di Santa Maria Maddalena, con un conseguente minor rischio sia per gli edifici che per le persone coinvolte.

Anche in questo caso, i movimenti del pendio sono iniziati quando il fronte si trovava a una distanza dalla frana di circa il doppio del valore di copertura; i movimenti planimetrici e gli assestamenti sono stati molto rapidi, considerando la velocità di avanzamento della TBM, che è stata di circa 13-15 m/giorno (con record a 22 m/giorno) rispetto alla velocità di avanzamento dello scavo con metodo tradizionale, generalmente nell'intervallo di 1,2-1,6 m/giorno. Rispetto all'esperienza delle gallerie Val di Sambro, ulteriori considerazioni riguardano proprio la velocità giornaliera dei movimenti, che è stata molto elevata. Come riportato in Figura 18, i movimenti del pendio hanno raggiunto circa 70-80 mm (il valore massimo era di 110 mm), ma quasi tutti gli spostamenti si sono accumulati in un mese.



17. Il modello FDM per lo studio delle interferenze con la frana dell'abitato di Castagno



18. I movimenti del pendio durante lo scavo con TBM

## CONCLUSIONI

Le recenti esperienze, acquisite durante lo scavo di gallerie attraverso l'Appennino Italiano, hanno permesso di analizzare la problematica relativa alla progettazione di gallerie in zona di frana, sviluppando un approccio metodologico che è stato dettagliato nell'articolo.

Gli elementi cardine da analizzare in fase di progettazione e costruzione sono i seguenti:

- durante la definizione del tracciato della galleria è molto importante evitare, per quanto possibile, interferenze con frane. Ciò si attua grazie a una dettagliata analisi della geologia dell'area di progetto, che consiste in un accurato programma di indagini e in un'approfondita ricerca bibliografica in grado di individuare eventuali problematiche di ordine geomorfologico;
- a tale scopo risulta particolarmente utile l'interferometria satellitare, che fornisce dati relativi a tempi passati, in grado di mettere in evidenza movimenti precedenti;
- nel caso in cui le interferenze non siano evitabili, è necessario un'analisi delle preesistenze in modo da avere una valutazione dei rischi prima dell'inizio dello scavo delle gallerie e un sistema di monitoraggio, che si interfaccia con tutti i soggetti coinvolti durante il processo di costruzione;
- tale sistema di monitoraggio dovrebbe far parte di un Piano di Protezione Civile, al fine di gestire le situazioni di emergenza e garantire la sicurezza delle persone che vivono nell'area interessata;
- per ridurre al minimo il disturbo durante lo scavo delle gallerie, è necessario utilizzare un sistema costruttivo che controlli il più possibile i fenomeni di deformazione intorno al profilo di scavo: l'approccio ADECO-RS è la soluzione ideale per raggiungere questo obiettivo;
- durante la costruzione della variante di Valico A1 var, sono stati definiti diversi comportamenti dei versanti: le frane profonde presentano generalmente movimenti lenti, principalmente influenzati dallo scavo di gallerie. I movimenti iniziano

quando il fronte della galleria si trova ad una distanza dalla frana pari al doppio dello strato di copertura e si arrestano progressivamente alla fine della costruzione della galleria. Ciò è legato principalmente a frane quiescenti, che si riattivano durante la costruzione della galleria e ritornano quiescenti a lungo termine. Gli smottamenti attivi sono invece più problematici: mostrano movimenti rapidi durante lo scavo della galleria e continuano in seguito anche per altri fattori esterni, quali le precipitazioni piovose;

- la velocità degli spostamenti è legata all'avanzamento della galleria. Essi si sviluppano rapidamente durante scavo con TBM, mentre l'uso del metodo di scavo tradizionale, a cui sono correlati movimenti più lenti, fornisce più tempo per gestire le azioni di emergenza. ■

<sup>(1)</sup> Professore, Ingegnere, Presidente di Rocksoil Engineering SpA

<sup>(2)</sup> Ingegnere, Direttore Tecnico di Rocksoil SpA

<sup>(3)</sup> Ingegnere, Responsabile del Settore Tecnico Autostrade di Rocksoil SpA

## DATI TECNICI

**Stazione Appaltante:** Autostrade per l'Italia SpA

**Gallerie Val di Sambro**

**Contraente Generale:** CMB

**Progetto definitivo:** SPEA Engineering SpA

**Progetto esecutivo ed esecutivo di dettaglio:** Rocksoil SpA

**Direzione lavori:** SPEA Engineering SpA

**Importo dei lavori:** 110.000.000,00 Euro

**Gallerie Sparvo**

**Contraente Generale:** Toto Costruzioni SpA

**Progetto definitivo:** SPEA Engineering SpA

**Progetto esecutivo:** Rocksoil SpA

**Progetto esecutivo di dettaglio:** Rocksoil SpA

**Direzione lavori:** SPEA Engineering SpA

**Importo delle opere civili:** 132.371.626,07 Euro

## Bibliografia

- [1]. P. Lunardi - "Progetto e costruzione di gallerie: analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS)", Milano Hoepli, 2006.
- [2]. M. Boscardin, M. Walker - "Ground movement, building response and protective measures. Proceedings of the Conference. Effects on construction on structures", ASCE American Society of Civil Engineer, 1998.
- [3]. M. Gatti, P. Lunardi, G. Cassani - "The largest TBM-EPB machine in the world, designed to the Appennines. The experience of the Sparvo Tunnel", 1<sup>st</sup> Int. SEE Con. "Using underground space", Dubrovnik, 2011.
- [4]. P. Lunardi, G. Cassani, M. Gatti - "First results of the use of "Martina", the world's largest EPB-TBM (15, 62 m in diameter), to bore the Sparvo Tunnel (A1 Motorway)", in Proceedings of ITA-AITES - World Tunnel Congress WTG2013, Geneva, Switzerland, 2013.
- [5]. P. Lunardi, G. Cassani, M. Gatti - "Planning of Tunnels in landslides situation: the experience in the Italian Apennines", in Proceedings of ITA-AITES - World Tunnel Congress WTC 2017, Bergen, Norway, 2017.