

# Progettazione integrata vincente

MARCO PETRANGELI\*, MASSIMO PIETRANTONI\*\*, ANDREA TAGLIAFERRI\*\*\*

## Premessa

La Panamericana costituisce uno storico e importante sistema integrato di strade che unisce, con un tracciato di circa 25.000 km, il Sud e il Nord del Continente Americano, dalla Tierra del Fuego in Cile, attraverso il Centro-America, fino all'Alaska.

Una derivazione di questa strada è il Tronco Venezuelano che parte da Bogotá in Colombia e arriva a Caracas in Venezuela. Il tratto trans-frontaliero è quello con maggior traffico commerciale di tutto il Sud America e da alcuni anni è oggetto di un importante adeguamento infrastrutturale con la costruzione di un nuovo tracciato a quattro corsie.

Nel tratto esaminato il tracciato si sviluppa nello stato venezuelano del Tachira, nei pressi di San Cristobal al confine con la Colombia, attraversando i territori montuosi della Cordigliera della Merida. In particolare, in questo articolo vengono esaminati gli aspetti geologici e geotecnici affrontati per la progettazione e costruzione del viadotto "La Colorada", inserito in questo tronco stradale. Si tratta di un viadotto a doppia carreggiata, con una larghezza della piattaforma stradale di 22 m, realizzato con una "struttura mista" acciaio/calcestruzzo a trave continua, con tre campate da 107-142-103 m, per una lunghezza complessiva di 352 m. Con il viadotto La Colorada il tracciato stradale scavalca l'omonima incisione valliva profonda circa 95 m con pile di altezza massima pari a 58 m.

La particolare conformazione geologica e morfologica dell'incisione valliva ha richiesto uno specifico studio per la corretta localizzazione dei punti di appoggio delle spalle e delle due pile del viadotto ed inoltre per l'individuazione delle tipologie più adatte per le fondazioni di ognuno degli appoggi che, in relazione alla spiccata variabilità delle condizioni geomorfologiche e geotecniche dei siti, ha portato a soluzioni puntuali e differenziate.

Aspetti geologici e geotecnici delle fondazioni del viadotto "La Colorada" sul tronco venezuelano della strada panamericana

Foto 1 - La valle della Colorada prima della costruzione



## La geologia

L'area di studio è collocata nella Cordigliera di Merida, nota anche come Ande venezuelane. Il sito del viadotto è costituito prevalentemente dalla formazione geologica della Carbonera. Sull'intero versante destro, sul fondo dell'incisione e sulla porzione medio-inferiore del versante sinistro affiora infatti una regolare serie stratificata, costituita da siltiti, marne e arenarie, anche in grosse bancate, con intercalazioni di lignite e carbone, molto evidenti per la tipica colorazione nera. Dal punto di vista geologico-strutturale tutta la zona dell'incisione valliva costituisce il fianco sud di una sinclinale che immerge con regolarità verso N80°W con una inclinazione di 30-35°. Tutti gli affioramenti mostrano una discreta regolarità di giacitura, senza particolari ondulazioni o interruzioni tettoniche. Questa particolare struttura geologica comporta una differenza delle condizioni geomeccaniche dei siti di appoggio del viadotto sui due versanti: si evidenzia infatti una giacitura in situazione di sostanziale stabilità sul versante destro (giaciture a reggipoggio) e in condizioni sfavorevoli sulla sponda sinistra (franapoggio), e questo ha portato all'adozione di interventi di fondazione e di stabilizzazione differenziati.

**Foto 2 e 3** - Affioramenti della Formazione Carbonera sul versante destro e sul fondo alveo del Rio la Colorada



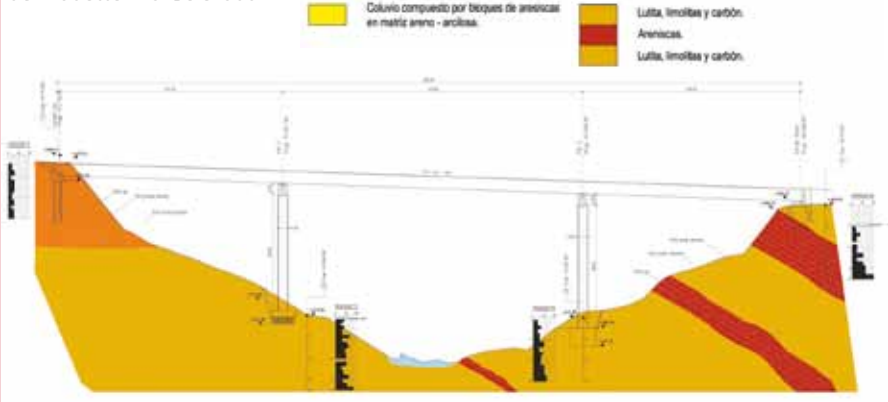
**Foto 4** - La profonda trincea scavata nei depositi della "Terraza de Colon" prima della spalla destra del viadotto

mata da conglomerati a grossi blocchi, anche di ordine metrico. Questa copertura alluvionale, di età quaternaria, ricopre con spessori di numerose decine di metri le formazioni terziarie secondo una superficie trasgressiva ad andamento sub-orizzontale. Sulla sponda sinistra questo contatto è posto a quote di circa 445 m s.l.m., che corrisponde alla parte medio-superiore del versante. I conglomerati sono invece assenti sulla sponda destra. Nella figura seguente è illustrata la sezione geologica longitudinale del viadotto, ricostruita sulla base dei rilevamenti e dei risultati delle indagini.

Le condizioni di particolare fratturazione dei banconi arenacei hanno in realtà provocato, come si vedrà oltre, situazioni delicate anche sul versante destro. Un'ulteriore particolarità geologica è fornita dalla presenza sulla sponda sinistra di un'estesa e potente copertura alluvionale terrazzata ("Terraza de Colon"), for-

sto a quote di circa 445 m s.l.m., che corrisponde alla parte medio-superiore del versante. I conglomerati sono invece assenti sulla sponda destra. Nella figura seguente è illustrata la sezione geologica longitudinale del viadotto, ricostruita sulla base dei rilevamenti e dei risultati delle indagini.

**Figura 1** - La sezione geologica longitudinale del viadotto "La Colorada"





**Foto 5** - Fenomeni di "toppling" dalle bancate di arenaria sul sito della spalla nord del viadotto

di arenarie, fortemente fratturate, sono soggette a crolli per ribaltamenti ("toppling").

## La geotecnica e le soluzioni progettuali adottate per le fondazioni del viadotto

Le situazioni geomorfologiche e geologico-strutturali complesse prima descritte, associate alle difficili condizioni di accessibilità dei luoghi e alle condizioni climatiche critiche di questa area (per la presenza di stagioni piovose violentissime), hanno suggerito di studiare con estremo dettaglio le condizioni di ognuno dei siti dei quattro appoggi del viadotto, anche in relazione alle successive operazioni di varo dell'impalcato, da effettuare "a spinta" vista la notevole altezza delle pile. Sono state affrontate le seguenti situazioni cui si è fatto fronte con specifiche soluzioni progettuali.

### *Spalla Sud (Estribo Sur)*

È la spalla ubicata sul fianco sinistro della valle. Al momento della progettazione era già stata realizzata la profonda trincea nei conglomerati illustrata nella foto 4. I rilievi e i sondaggi eseguiti hanno confermato che il volume di terreno signifi-

Come precedentemente detto, le condizioni geologiche del sito hanno influenza sulle condizioni di stabilità dei pendii e di conseguenza hanno portato ad una differenziazione degli interventi.

Sulla sponda sinistra è presente una estesa, anche se sottile, coltre di terreni sciolti che si sono originati dai conglomerati, naturalmente erosi o scavati. Questa fascia di terreni sciolti è soggetta a fenomeni di scivolamento, in parte per la natura incoerente del materiale e la forte pendenza del versante, in parte per fenomeni di slittamento "strato su strato" della sottostante formazione "Carbonera" che, come detto, si trova in giacitura a franapoggio con la presenza di strati carboniferi e limo-argillosi dotati di scarsa resistenza attritiva che facilitano l'inne-

sco dei fenomeni di scivolamento.

Queste forme di instabilità sono state consolidate con specifici interventi e si rimanda al paragrafo e alla documentazione fotografica successivi per i dettagli.

Sulla sponda destra le condizioni di stabilità sono generalmente migliori a causa delle condizioni di giacitura della formazione "Carbonera" e della sostanziale assenza della copertura detritica. Sono presenti affioramenti di bancate di arenarie che si evidenziano morfologicamente dando luogo ad una conformazione a gradinata del pendio. Sulla zona alta del versante (poco al di sotto del sito della futura spalla del viadotto), queste bancate

**Foto 6 e 7** - Esecuzione dei diaframmi e armatura del plinto della spalla sud



cativo interessato dalla fondazione della spalla è interamente costituito dai conglomerati. Pur trattandosi di terreni dotati di buone caratteristiche meccaniche e deformabilità relativamente contenuta, si è deciso di adottare fondazioni profonde vista la necessità di avvicinare molto la spalla al ciglio del versante per non aumentare eccessivamente la lunghezza del viadotto.

Viste le forti sollecitazioni di taglio dovute alle forze sismiche, si sono adottate fondazioni profonde su diaframmi ("barrettes"), costituiti da pannelli in calcestruzzo armato gettati in opera di dimensioni 0.80x2.20 m di lunghezza 20 m, disposti con la sezione di maggiore inerzia in direzione trasversale, dove le sollecitazioni sismiche risultano maggiori.

Lo scavo con benna mordente ha permesso peraltro di "gestire" con maggiore facilità i grossi trovanti presenti sporadicamente nei depositi conglomeratici.

Sono stati necessari interventi di protezione sia delle profonde scarpate della trincea di approccio al viadotto, sia della ripida scarpata naturale a valle della spalla che, durante i lavori della trincea stradale, era stata coperta da materiali di "risultata" e quindi in condizioni di equilibrio limite. Gli interventi di stabilizzazione eseguiti sono descritti nel capitolo successivo.

#### Pila 1

È la pila che ha provocato maggiori problematiche, soprattutto per la realizzazione degli scavi di imposta della fonda-

**Foto 8 e 9** - Esecuzione dei micropali e armatura del plinto della pila 1



**Foto 10** - Inizio della cassetteria del plinto e armatura dell'elevazione della pila 1 (si intravedono tra le armature i micropali di rinforzo)



zione. Le caratteristiche geomeccaniche della Formazione Carbonera sono idonee alla costruzione di fondazioni di tipo diretto e infatti la fondazione progettata è stata rinforzata con micropali "perimetrali" solo per fornire resistenze aggiuntive in particolari condizioni di carico con scarsa probabilità di accadimento (condizioni sismiche con maggiore tempo di ritorno). I micropali, che agiscono a trazione in particolari condizioni sismiche, sono stati introdotti anche per non aumentare eccessivamente gli scavi di fondazione su un pendio già in condizioni di equilibrio limite. Le problematiche geotecniche di maggiore interesse si riferiscono agli interventi di stabilizzazione necessari per garantire le adeguate condizioni di sicurezza degli scavi, che hanno interessato formazioni stratificate a franapoggio. Alcuni di questi interventi si intravedono nelle figure successive e saranno illustrati con maggiore dettaglio nel capitolo seguente.

#### Pila 2

La pila 2 è ubicata sulla parte mediana della sponda destra, in un'area dove risultavano sub-affioranti i terreni prevalentemente arenacei della Formazione Car-

bonera, in condizioni di giacitura a reggiopoggio. Anche in questo caso le condizioni geomeccaniche della formazione avrebbero potuto consentire la realizzazione di fondazioni dirette, ma sarebbero state comunque necessarie dimensioni in pianta tali che, per la locale conformazione del pendio avrebbero portato o a profondi sbancamenti e/o a esporsi troppo verso il lato di valle, con una pericolosa riduzione del contributo di reazione orizzontale dei terreni.

Questo ha portato alla decisione di realizzare un pozzo di fondazione di diametro 12.50 m e profondità 9.00 m. Il pozzo è stato realizzato con scavo e cerchiatura nei primi metri, più alterati e detensionati.

Nei tratti più in profondità la roccia è risultata sana e poco fratturata quindi si è proceduto con semplice rivestimento di spritz beton armato. Lo scavo circolare è stato quindi riempito con calcestruzzo armato e collegato al plinto superficiale tramite una speciale disposizione dell'ar-





**Foto 11** - Scavo del pozzo della Pila 2



**Foto 12** - Armatura radiale del pozzo della Pila 2

matura a raggiera, utilizzando le stesse gabbie di armatura dei diaframmi della spalla sud, che ha consentito di ottimizzare il comportamento strutturale.

Il comportamento del pozzo di fondazione, in relazione ai carichi trasmessi dalla sovrastruttura, è stato analizzato attraverso un codice di calcolo agli Elementi Finiti. È stata quindi analizzata l'interazione tra la struttura di fondazione e il terreno circostante secondo l'effettiva costituzione del sottosuolo ("capas de lutitas" e "areniscas" con diverso grado di alterazione). Le caratteristiche geomeccaniche delle rocce presenti sono state ottenute facendo riferimento al modello costitutivo di Mohr-Coulomb in condizioni elasto-plastiche.

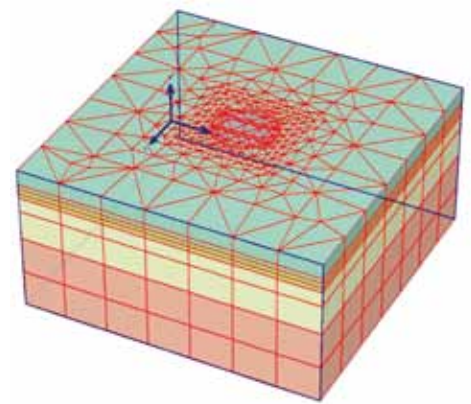
Le sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura sono state applicate alla testa del pozzo come carichi distribuiti lungo l'impronta di base della pila. Il dimensionamento è stato effettuato sia per la fase statica che per la fase sismica allo Stato Limite Ultimo in direzione longitudinale e trasversale.

La condizione sismica, caratterizzata da sollecitazioni maggiormente gravose, è risultata quella dimensionante; le tensioni trasmesse al terreno di fondazione sono state valutate nell'ordine dei  $0.7 \div 0.8$  MPa per l'analisi sismica trasversale e comprese nell'intervallo  $0.15 \div 0.2$  MPa per l'analisi sismica longitudinale; tali valori risultano, quindi, ampiamente inferiori alla massima resistenza a compressione che usualmente si ottiene per rocce dello stesso tipo.

In condizioni di esercizio gli spostamenti totali subiti dall'opera sono invece di poco superiori al centimetro e dovuti quasi esclusivamente alla componente verticale rispetto a quella orizzontale.



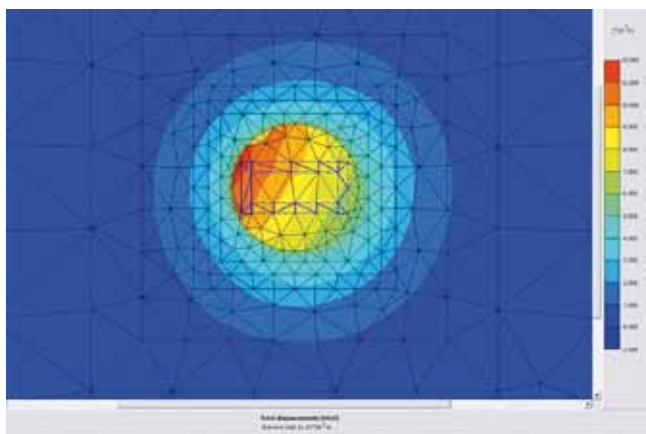
**Foto 13** - Armatura di collegamento tra il pozzo e il plinto della Pila 2



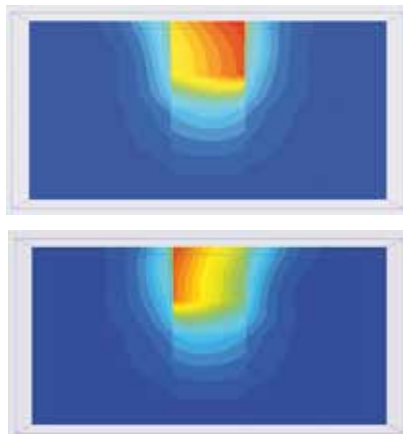
**Figura 2** - Modello di calcolo con mesh di elementi finiti del pozzo di fondazione

#### *Spalla Nord (Estribo Norte)*

La spalla nord è ubicata sul ciglio della ripida scarpata che costituisce il versante destro della valle. Sul versante affiorano banconi di arenaria disposti con giacitura a reggipoggio. La spalla è ubicata proprio al di sopra di alcuni di questi banconi arenacei che formano un gradino morfologico. Le caratteristiche geomeccaniche delle arenarie consentono la realizzazione di fondazioni dirette che tuttavia devono essere approfondite di alcuni metri per superare la parte marnoso/siltitica (peraltro alterata e degradata) per raggiungere i banconi arenacei. Invece di operare profondi sbancamenti a cielo aperto, si è optato per fondazioni a piccoli pozzi ("mini-pozos") di diametro 6.00 m e profondità 5.00 m. Si sono adottati due pozzi per limitare gli scavi, avendo la possibi-



**Figura 3** - Spostamenti totali in condizioni di esercizio del pozzo di fondazione



**Figura 4** - Spostamenti totali in condizioni di esercizio - sezione trasversale e longitudinale in asse pozzo

lità di iniziare i due pozzi a quote diverse, con una disposizione a gradinata. Anche in questo caso è stata disposta una armatura radiale analoga a quella del pozzo della pila 2.

La realizzazione dei due mini-pozzi disposti a gradinata ha consentito di ridurre fortemente gli scavi di fondazione, limitando il disturbo di una scarpata interessata da fenomeni di crollo per ribaltamento dei banconi di arenaria, non visibili nelle foto successive, perché ubicati a valle della scarpata. Maggiori dettagli sugli interventi di consolidamento di questi banconi sono descritti nel capitolo successivo.

**Foto 14** - I pozzi di fondazione della spalla nord durante lo scavo

**Foto 15** - L'armatura dei pozzi di fondazione della spalla nord



## La stabilizzazione delle scarpate

Un'attenzione particolare è stata prestata alla progettazione degli interventi di stabilizzazione e consolidamento dei versanti, sia per consentire di operare in sicurezza durante i lavori di fondazione e di varo dell'impalcato, sia per assicurare la stabilità a lungo termine dei versanti su cui insistono gli appoggi del viadotto. Tali aspetti hanno rivestito un ruolo importante nelle particolari situazioni geomorfologiche e geologico-strutturali dei luoghi, tenuto conto anche della difficoltà di accesso ai siti, per le condizioni morfologiche, ma anche per le condizioni meteorologiche di questa regione, interessata da stagioni piovose violentissime che provocano la ra-

vida degradazione dei versanti per fenomeni erosivi che, se non adeguatamente controllati, possono evolvere verso dissesti più profondi. È apparso doveroso avviare quindi, fin da subito, gli interventi di stabilizzazione cercando di limitare e prevenire, per quanto possibile, gli inevitabili fenomeni di dissesto che sarebbero stati provocati dai necessari lavori di sbancamento.

Anche in questo caso gli interventi sono stati differenziati in relazione alle diverse tipologie di dissesto. Sulla sponda sinistra sono stati realizzati interventi sulla scarpata costituita dai depositi conglomeratici e dai terreni detritici ad essi sovrapposti, interessati da fenomeni erosivi e di scollamento superficiale.

Tali fenomeni sono stati attivati e/o amplificati dagli scavi realizzati sia per la realizzazione della profonda trincea stradale di approccio al viadotto (realizzata precedentemente ai lavori del viadotto) sia per gli scavi di fondazione della spalla sud e della pila 1.

Gli interventi di stabilizzazione sono stati realizzati con una chiodatura associata ad una protezione con spritz beton armato, che funge anche da ripartizione della chiodatura, con un criterio del tutto analogo al "soil nailing".

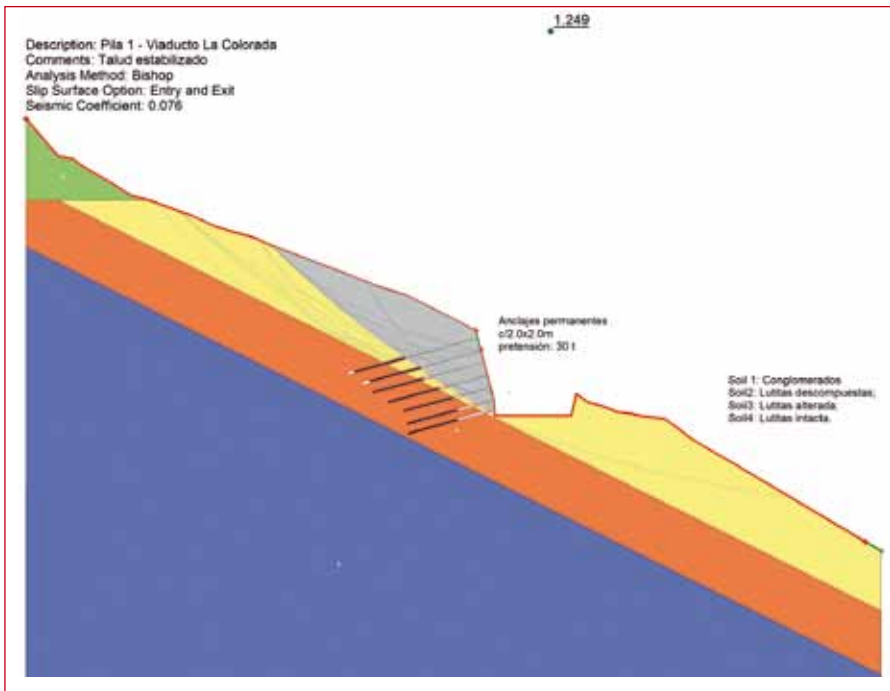


**Foto 16** - La chiodatura del versante a valle della spalla sud



**Foto 17** - L'intero intervento di chiodatura e spritz beton del versante a valle della spalla sud

**Figura 5** - Verifica di stabilità del versante a monte della pila 1



Le difficoltà di questi interventi sono state soprattutto di tipo realizzativo, trovandosi ad operare su scarpate molto ripide, che hanno necessitato la realizzazione di ponteggi.

Sempre sulla sponda sinistra, la pila 1 ha richiesto importanti lavori di consolidamento delle scarpate che sono interessate da fenomeni di scivolamento (strato su strato) della formazione marrosso-arenacea disposta con giacitura a frana-poggio.

In questo caso si è reso necessario un intervento di tirantatura della scarpata in grado di fornire il contributo di resi-

**Foto 18** - Gli scavi per la tirantatura degli scavi della pila 1. Si notano gli scivolamenti avvenuti lungo gli strati carboniosi neri

**Foto 19** - L'intervento di tirantatura degli scavi della pila 1. Si notano gli strati a frana-poggio





**Foto 20** - L'intervento di tirantatura completato sugli scavi della pila 1

**Foto 21** - Gli interventi di consolidamento sul versante sinistro; in alto le opere realizzate al di sotto della spalla sud e in basso il consolidamento degli scavi della pila 1



senza aggiuntivo necessario a garantire la stabilità di un versante che, per la giacitura particolare della formazione e per le resistenze molto basse dei giunti di strato, si presentava in condizioni molto critiche.

L'intervento è stato realizzato attraverso una protezione superficiale in spritz beton armato e una maglia regolare di tiranti permanenti, posti ad intersasse 2.0x2.0 m, costituiti da 3 trefoli 0.5" con



diametro di perforazione 100 mm, inclinati di 15° rispetto all'orizzontale e con tiro iniziale pari a 30 t. La lunghezza totale risulta variabile da 14 m a 20 m con bulbo di ancoraggio pari a 8.00 m, iniet-

**Foto 22 e 23** - Gli interventi di chiodatura del bancone di arenaria della spalla nord







tato ad una pressione minima di 5.0 kg/cm<sup>2</sup>.

La verifica di stabilità del versante, a seguito dell'intervento di consolidamento, ha fornito coefficienti di sicurezza del tutto soddisfacenti e tali da confermare la bontà dell'intervento previsto.

Problemi di stabilità sono stati affrontati anche durante le lavorazioni di tirantatura a causa degli scivolamenti che si sono verificati durante gli scavi temporanei e nel corso della tirantatura. Questi scivolamenti erano facilitati dalla presenza degli interstrati carboniosi, dotati di resistenze attrittive molto basse (v. foto seguenti).

L'insieme degli interventi realizzati sulla sponda sinistra è illustrato nella foto 21. Sulla sponda destra gli interventi

sono stati molto più limitati a causa della citata favorevole disposizione a reggipoggio degli strati.

Tuttavia, come già accennato, sulla ripida scarpata a valle e a estremo ridosso della spalla nord, i banconi di arenaria risultavano suddivisi da un sistema di giunti e fratture che provocavano crolli e ribaltamenti per "toppling"; questi fenomeni erano accentuati anche dallo scalzamento provocato dall'erosione

degli strati marnoso-argillitici al piede del bancone arenaceo.

Vista la posizione della spalla nord, ubicata al ciglio di questa scarpata, è apparso necessario provvedere al consolidamento di questa scarpata la cui naturale evoluzione avrebbe sicuramente portato, con il tempo, ad un arretramento della scarpata stessa con interessamento della spalla.

Si è provveduto quindi ad un classico intervento di chiodatura e protezione con spritz-beton armato.

## Conclusioni

La progettazione del viadotto La Colorado ha richiesto un attento studio delle condizioni geologiche e geotecniche dei siti. L'integrazione della componente geologica e geotecnica nella struttura di progettazione ha permesso di definire le migliori tipologie di intervento, non solo per il consolidamento dei versanti e le fondazioni del viadotto, ma anche per la struttura e la tecnologia di varo, attraverso soluzioni progettuali differenziate in funzione delle condizioni territoriali dei siti. ■

\*PROF. ING., PROGETTISTA, INTEGRA, ROMA

\*\*ING. GEOL., INTEGRA, ROMA

\*\*\*ING., INTEGRA, ROMA

**Foto 24 - 25 - 26 - 27** - I banconi di arenaria affetti da fenomeni di "toppling": prima (a sx) e dopo (a dx) dell'intervento di chiodatura

**Foto 28** - La sponda destra con in primo piano la pila 2 in elevazione e in alto la spalla nord con gli interventi di chiodatura in corso

