

Modalità di coltivazione e sistemazione di una cava di versante per l'estrazione di arenarie quarzoso-feldspatiche

Andrea Dolcini* **Claudio Cerchiari****

* Geologo, Libero Professionista

** Geologo, Direttore Responsabile della Cava "Cà di Serra"

INTRODUZIONE

Il presente articolo tratta delle modalità di coltivazione e sistemazione di una cava di versante per l'estrazione di arenarie quarzoso-feldspatiche, di proprietà di IRIS Ceramica S.P.A. ubicata in località Cà di Serra in comune di Monzuno (BO).

La potenzialità di sfruttamento del giacimento stesso è molto elevata in quanto esso offre una materia prima qualitativamente "pregiata" per la produzione ceramica, non facilmente reperibile nell'Appenninico emiliano, e quantitativamente sfruttabile in una percentuale molto alta rispetto alla totalità di materiale scavato. Un ulteriore elemento che contribuisce all'aumento della produttività del giacimento è dato dalla facile abbattibilità dei fronti di escavazione dovuta, essenzialmente, al basso grado di cementazione che caratterizza l'ammasso roccioso.

Il Piano di Coltivazione e Sistemazione è stato ideato e redatto oltretutto per la necessità di soddisfare il fabbisogno di sabbie, anche per una serie di priorità ambientali prima tra tutte quella di migliorare le condizioni di stabilità e di sicurezza dell'area di cava, riducendo le pendenze e traslando il fronte di cava verso sud sino a raggiungere una direzione est-ovest, portandolo così in generale ad una condizione di traversopoggio tale da diminuire i fenomeni di dissesto dovuti alla giacitura degli strati.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

La situazione geologico-strutturale presente nella zona di Vado e quindi anche in prossimità dell'area estrattiva, è paragonabile a quella di gran parte dell'Appennino emiliano. L'Appennino bolognese è caratterizzato dall'affioramento di terreni appartenenti alla successione Epiligure: l'età è compresa nell'intervallo Eocene medio-Tortoniano. Nella media Val Setta le unità litologiche affioranti appartenenti alla successione Epiligure sono

quelle rispondenti alle Formazioni di Antognola, Ranzano e Monte Piano.

La Formazione di Monte Piano è costituita nel caso specifico dalle Arenarie di Loiano e dai depositi marinoso-argillosi noti come "Marne di Monte Piano", e poggia in discordanza stratigrafica sull'unità delle "brecce argillose" note come "argille scagliose". Dal punto di vista giaciturale, la Formazione di Loiano appare in assetto tettonicamente molto disturbato, con faglie che ne alterano i contatti con le formazioni adiacenti e ne interrompono la continuità areale: gli affioramenti appaiono discontinui ed irregolarmente distribuiti.

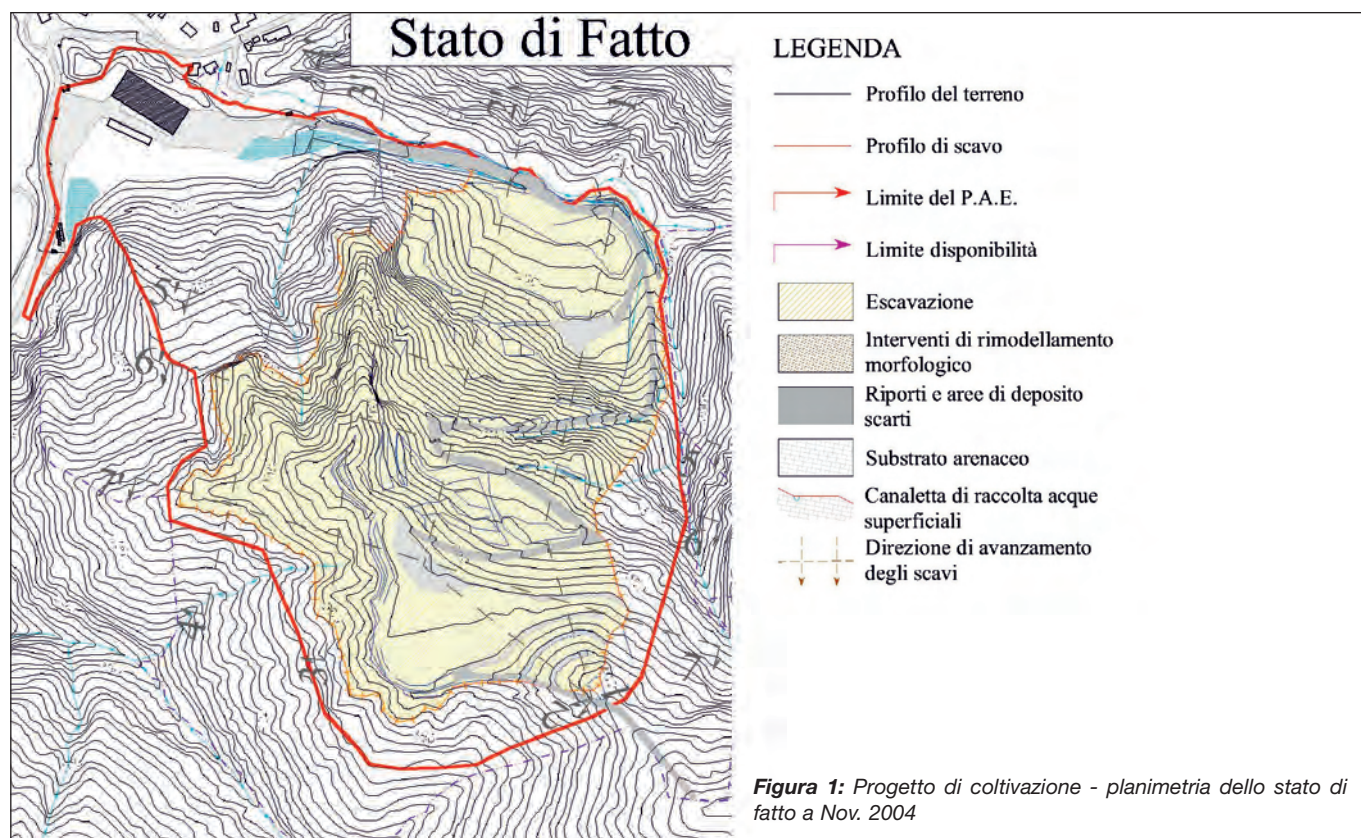
In dettaglio, le rocce risultano interessate da un fitto reticolo di fratture, beanti ma più spesso sigillate da materiali diagenetici secondari, ciò è dovuto al prolungato trasporto tettonico che ha portato la formazione a notevole distanza dalla zona di sedimentazione.

CARATTERISTICHE DEL GIACIMENTO E MATERIALE ESTRATTO

Il materiale oggetto di escavazione è costituito da corpi risedimentati, caratterizzati da arenarie quarzoso-feldspatiche appartenenti alle Arenarie di Loiano, grossolane, gradate, a debole cementazione (molasse) in grossi banchi a stratificazione indistinta con presenza di grossi sferoidi di cementazione (cogoli).

La stratificazione delle bancate arenacee ha una direzione NW-SE e una direzione di immersione variabile da NE a ENE e, a seconda della direzione dei fronti di scavo, si trovava generalmente a traversopoggio o a franapoggio meno inclinato del pendio (10°-15°).

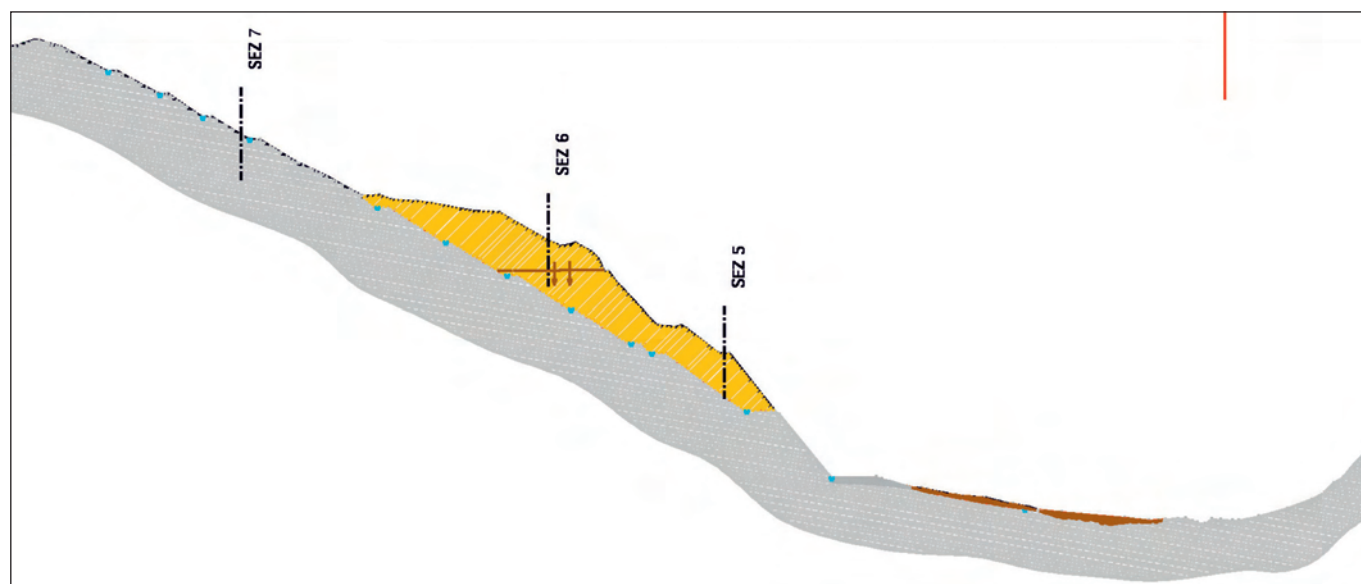
Sono presenti, anche se non frequenti, intercalazioni di letti pelitici di spessore variabile da centimetrico a decimetrico: queste intercalazioni, anche se discontinue e di entità ridotta, sono assai importanti dal punto di vista della qualificazione e classificazione geomeccanica dell'ammasso.



STABILITÀ DELLE SCARPATE

Le verifiche di stabilità sono state condotte lungo i fronti di scavo, costituiti dalle arenarie quarzoso-feldspatiche della Formazione di Loiano, con morfologia risultante al termine della coltivazione in oggetto. In particolare sono state prese in considerazione le sezioni 1-2, in quanto rappresentative delle condizioni morfologiche del fronte in coltivazione (Fig.1,

Fig. 2, Fig. 3) (Foto 1 - 2). Per la definizione di alcuni parametri si è fatto riferimento ad un rilevamento geomeccanico condotto nell'ambito della Convenzione di ricerca tra la Provincia di Bologna e il Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientale dell'Università degli Studi di Bologna dal titolo "Caratterizzazione geomeccanica delle Arenarie di Loiano ai fini della stabilità dei fronti di scavo" (Gennaio 2001).



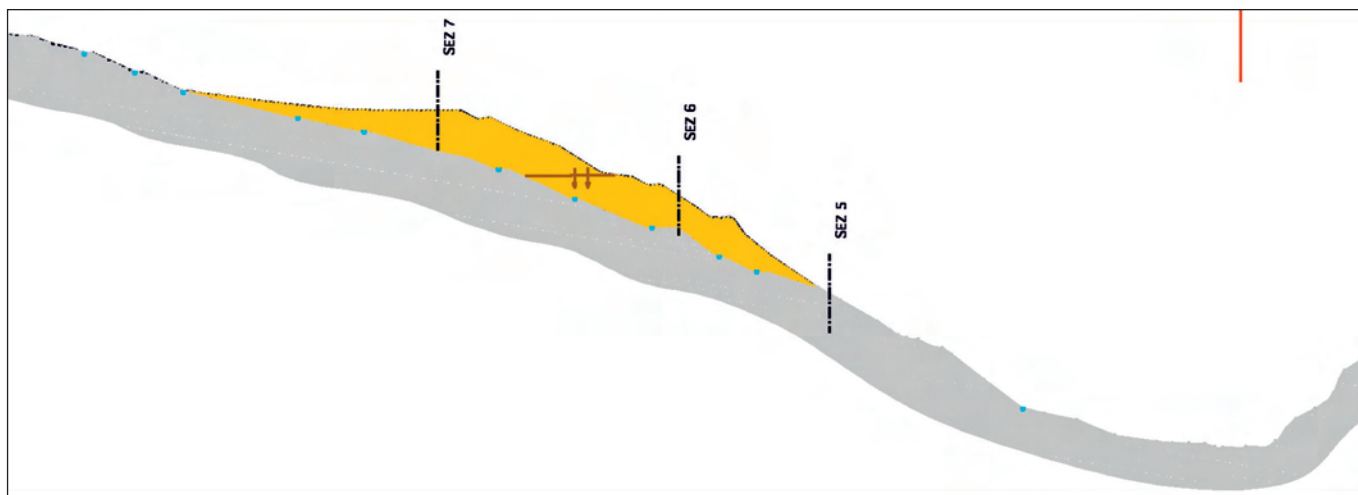


Figura 3: Progetto di coltivazione - sezione 2.



Foto 1: Panoramica del settore orientale del fronte di scavo (nov 2004), lungo il quale passa la sezione 1.



Foto 2: Panoramica del settore centro-occidentale del fronte di scavo (nov 2004), lungo il quale passa la sezione 2.

Caratterizzazione geomeccanica

Le arenarie in oggetto, per avendo valori molto bassi di resistenza a compressione uniassiale ($<1\text{Mpa}$), hanno un comportamento meccanico più assimilabile a quello di una roccia “tenera” che a una terra. In nessun caso i piani di scorrimento sembrano interessare l’arenaria

intatta, ma la rottura avviene lungo piani di discontinuità preesistenti come giunti e piani di strato.

In questi casi i potenziali cinematismi sono fortemente influenzati dalle caratteristiche meccaniche delle discontinuità. In particolare, le caratteristiche di resistenza al taglio alla scala dell’ammasso roccioso dipendono in gran parte da quelle disponibili lungo i piani di discontinuità e dall’orientazione di queste nello spazio. Pertanto un’analisi di stabilità non può prescindere dal rilevamento delle superfici di discontinuità.

L’orientazione statisticamente significativa di tali piani nello spazio, descrive da un punto di vista geometrico l’ammasso roccioso e fornisce, al contempo, il primo dato di tipo quantitativo, necessario alle analisi di stabilità. Nel mese di novembre 2004 è stato condotto un rilevamento diretto che ha sostanzialmente confermato la caratterizzazione geomeccanica verificata nel 2001 nell’ambito della caratterizzazione di cui sopra.

In sintesi l’ammasso roccioso affiorante nell’area di cava è caratterizzato dalla presenza di tre famiglie di discontinuità, costituite dalla stratificazione (S) sub-orizzontale ($10^\circ-15^\circ$) e da due sistemi di giunti (J1 e J2) subverticali ($81^\circ-88^\circ$). (Foto 3 – 4 – 5)



Foto 3: Sistema di giunti strutturali ad andamento subverticale - il fronte di scavo ha una geometria condizionata (detensionamento).



Foto 4: Cunei instabili - particolare.



Foto 5: Fronte subverticale - lo scavo ha assecondato l'assetto di un giunto strutturale.

Caratterizzazione geotecnica

Il giacimento è rappresentato da molasse medio-grosolane e medio-fini costituenti potenti bancate arenacee, debolmente cementate, di colore grigio-biancastro; sono presenti, anche se non frequenti, intercalazioni di letti pelitici grigio-nerastri di spessore da centimetrico a decimetrico con laminazione parallela alla superficie di strato. (Foto 6)

Le Arenarie di Loiano si presentano fortemente addensate ($D_r \approx 0.9$), evidenziando forti caratteristiche di dilatanza ed angoli di picco che possono arrivare a superare i 45° . L'angolo d'attrito allo stato critico ($\phi_{ic} \approx 33^\circ$) risulta congruente con quello di una sabbia silicatica.

La moderata cementazione che caratterizza i banchi arenacei delle Arenarie di Loiano impartisce al materiale una componente di resistenza per coesione che va a sommarsi alla componente attritiva; coesione che comunque è molto ridotta se riferita ai valori tipici delle rocce.

La determinazione dei parametri allo stato critico deriva da prove di taglio su campioni rimaneggiati. L'esecuzione di tali prove su materiale ricostituito consente la determinazione delle resistenze di picco del terreno rima-



Foto 6: Intercalazione pelitica di color grigio-nerastro.

neggiato. Tale resistenze sono rappresentative delle "resistenze allo stato critico"; quest'ultime risultano molto prossime alle resistenze di picco mobilizzate lungo una discontinuità piana in materiali argillosi. Per tale ragione i parametri di stato critico costituiscono un parametro progettuale di grande utilità soprattutto per fenomeni franosi di primo innesco in materiali argillosi sovraconsolidati.

In tali condizioni, infatti, gli effetti di softening, rottura progressiva e la presenza stessa di piani di discontinuità interconnessi, determina un abbassamento tempo-dipendente dell'involuppo di rottura dallo stato di picco a quello di stato critico e l'uso nelle analisi di stabilità dei parametri di resistenza del materiale intatto può portare a pericolose sovrastime del fattore di sicurezza.

Purtroppo la meccanica dei terreni naturali è complessa e, specie nelle rotture di primo innesco, è difficile ipotizzare che le resistenze disponibili in sito siano esattamente pari a quelle di stato critico. Di solito, infatti, è presente un'aliquota seppur minima di coesione la cui quantificazione è estremamente difficile con le usuali tecniche di indagini in sito ed in laboratorio e che può fare la differenza tra stabilità ed instabilità del versante ad un dato istante temporale.

Nel nostro caso le resistenze disponibili lungo i letti pelitici sono più prossime a quelle di stato critico che a quelle di picco, sia per la laminazione interna delle peliti sia per la presenza delle discontinuità sub-planari date dai piani di strato. (Foto 7 - 8)

Fenomeni e cinematismi di instabilità

Nelle Arenarie di Loiano, il riconoscimento del tipo di movimento franoso (cinematismo) e dei rapporti tra questo ed i vari fattori morfologici e strutturali assume un'importanza particolare.

I materiali coinvolti, infatti, sono costituiti in massima parte da arenarie debolmente cementate, o meglio da sabbie fortemente addensate, caratterizzate da valori



Foto 7: Arenaria interessata da un fitto reticolo di fratture secondarie, spesso riempite da materiali diagenetici



Foto 8: Letto pelitico di spessore decimetrico dislocato da una microfaglia.

di resistenza a compressione uniassiale tipici di “rocce deboli” o, più in generale, di materiali con comportamento intermedio tra le rocce tenere e le terre resistenti.

La meccanica dell’ammasso è complicata ulteriormente dalla presenza dei letti millimetrici e centimetrici di materiale pelitico, tipicamente laminati, il cui comportamento è certamente più simile a quello delle terre che non a quello delle rocce e che determinano una forte anisotropia nelle caratteristiche di resistenza al taglio. Per queste ragioni è lecito chiedersi se, alla scala del fronte di scavo, le Arenarie di Loiano si comportano come dei mezzi rocciosi, cioè come mezzi le cui caratteristiche di resistenza sono controllate dall’assetto strutturale e dalle caratteristiche delle discontinuità preesistenti, o come dei mezzi terrosi, cioè materiali in grado di rompersi lungo superfici di neoformazione che interessano, almeno in parte, la “roccia intatta”.

Per rispondere a tale quesito si sono reperite, grazie sia al rilevamento diretto sul campo sia al contatto con i tecnici addetti alla cava, informazioni fondamentali sulla dinamica dei movimenti e sulle interferenze tra scavi ed innesco dei fenomeni stessi. La

stratificazione rilevata nell’area di cava ha una direzione di immersione variabile da NE a ENE e, a seconda della direzione dei fronti di scavo, si trova a traversopoggio o a franapoggio meno inclinato del pendio. I fenomeni di instabilità visibili in cava prima dell’intervento erano fortemente condizionati dal rapporto tra la giacitura delle discontinuità e quella dei fronti di scavo, come avviene tipicamente negli ammassi rocciosi. Si trattava di movimenti resi possibili da piani di discontinuità preesistenti e che, almeno da quanto osservato in campagna, non sembravano interessare l’arenaria intatta. Tra i vari sistemi di discontinuità il più importante è dato senza dubbio dalla stratificazione, caratterizzata da una persistenza infinita alla scala del versante e dalla presenza di sottili livelli pelitici con scadenti proprietà meccaniche. I fenomeni di instabilità principali, sia per dimensioni che pericolosità, erano legati infatti ad una giacitura sfavorevole dei piani di strato rispetto al fronte di scavo (frana-poggio meno inclinato del pendio).

Il cinematisma più importante e preso in considerazione nelle verifiche eseguite, è rappresentato da scorrimenti traslazionali su piani di strato nei quali la rottura si imposta lungo un interstrato pelitico di spessore anche molto limitato (centimetrico). In particolare lo scorrimento avviene lungo una superficie spezzata, costituita da un piano di strato nella porzione inferiore (discontinuità basale) e da uno o più discontinuità subverticali in quella superiore (discontinuità di nicchia). La superficie basale di scorrimento si sviluppa lungo un livello pelitico con giacitura a franapoggio meno inclinata del pendio mentre le discontinuità di nicchia coincidono in gran parte col sistema di giunti subverticali. Questo cinematisma è denominato scorrimento traslazionale di un cuneo.

I parametri di resistenza di maggior interesse sono mobilizzati nelle peliti o al contatto pelite-arenaria, e da essi dipende in gran parte la stabilità complessiva del fronte di scavo in condizioni di franapoggio.

Per quanto riguarda la distribuzione delle pressioni dell’acqua, le Arenarie di Loiano sono caratterizzate da una permeabilità primaria per porosità ed il flusso dell’acqua avviene, almeno in parte, coi modi tipici delle terre: la superficie di falda che ne deriva avrebbe pertanto un andamento curvilineo e la distribuzione lineare delle pressioni dell’acqua che si assume per le discontinuità in roccia non sembrerebbe idonea.

D’altro canto è necessario sottolineare che la differenza tra i due profili di falda (lineare e parabolico) diminuisce al diminuire della lunghezza del versante e dell’altezza di falda sopra la superficie di scorrimento, ed entrambi questi fattori hanno valori modesti nei fronti di cava. Pertanto in fase di calcolo si è tenuto conto di entrambi gli aspetti: andamento curvilineo nell’ammasso roccioso tra le discontinuità o fratture e lineare in quest’ultime.

Ipotesi di calcolo

Le verifiche di stabilità sono basate sulle seguenti ipotesi di calcolo:

- data la loro natura, le arenarie sono state considerate come rocce tenere;
- per la forma dell'ipotetica superficie di rottura si è fatto riferimento al cinematismo noto come scorrimento traslazionale di un cuneo, escludendo la possibilità di formazione di superfici di scorrimento circolari o subcircolari.
- si sono inevitabilmente fatte delle assunzioni sul rapporto tra assetto strutturale dell'ammasso e geometria dei fronti di scavo schematizzando la posizione dei letti pelitici;
- la geometria del versante verificata rappresenta lo stato di fatto finale al termine della coltivazione;
- per quanto riguarda la circolazione idrica all'interno dell'ammasso, si suppone che a seguito di forti precipitazioni, vengano a formarsi falde sospese all'interno dei banchi arenacei, sostenute dagli interstrati pelitici;
- le resistenze mobilizzate lungo gli interstrati pelitici sono prossime a quelle di stato critico delle peliti;
- le resistenze disponibili lungo i giunti in arenaria, considerati lisci ed infinitamente persistenti alla scala del problema in esame, possono essere cautelativamente considerate pari a quelle di stato critico dell'arenaria (i parametri di picco dell'arenaria sono di scarso interesse per il problema in esame, visto che la rottura dell'arenaria intatta appare poco probabile).

Le analisi di stabilità sono state condotte lungo due sezioni (sezioni 1-2) rappresentative dell'area di cava coinvolta nelle fasi di escavazione. Per ciascuna delle due sezioni verificate sono state ricercate superfici di scorrimento caratterizzate da spezzate formate da due piani di discontinuità di cui uno basale meno inclinato del pendio ed uno di nicchia più inclinato del pendio.

Nel tracciare queste superfici si è cercato di rispettare la situazione reale, ovvero tenendo conto della presenza degli interstrati argillosi come assetti preferenziali di scivolamento e delle condizioni geomorfologiche generali.

Risultati ottenuti e considerazioni conclusive

In generale, è stato migliorato il profilo morfologico di cava aumentandone il grado di stabilità.

Le condizioni geometriche al contorno delle verifiche vengono sintetizzate nelle *Sezioni 1-2*, rappresentanti il fronte di scavo della cava nella situazione finale al termine dell'escavazione.

Sono state impostate diverse superfici di scorrimento, delimitanti cunei di terreno, disposte in modo tale

Tabella 1: Range del fattore di sicurezza nelle condizioni di stabilità verificate lungo le sezioni 1-2

Fattore di sicurezza F_{min}			
SEZIONE 1 tratto inferiore	SEZIONE 1 tratto medio-superiore	SEZIONE 2 tratto inferiore	SEZIONE 2 tratto medio-superiore
1.33	1.54+1.64	1.48+1.63	1.98+2.11

da verificare la stabilità del pendio di cava nelle varie porzioni locali e generali.

Nella tabella 1 si riporta in modo schematico il range del fattore di sicurezza nelle condizioni di stabilità verificate lungo le sezioni 1-2, distinguendo i settori inferiori dai tratti medio-superiori del fronte.

Dai risultati ottenuti si desume che il fronte di scavo al termine della coltivazione nel suo complesso si presenta sufficientemente stabile nella parte inferiore e stabile in quella medio-superiore.

La parte inferiore della sezione 1, pur con elevate pendenze e sollecitazione sismica, presenta valori del coefficiente di sicurezza che fanno intendere da un lato la stabilità del fronte nelle condizioni verificate, e dall'altro non permettono di valutare in chiave dinamica e previsionale l'evoluzione a medio-lungo termine di potenziali fenomeni d'instabilità (Fig. 4).

Si sottolinea che la regimazione delle acque superficiali, precludendo la possibilità di eccessivi fenomeni di infiltrazione e di imbibizione, ha permesso di migliorare le proprietà resistive e geotecniche dei terreni coinvolti e di conseguenza dei fronti di scavo. A conferma di ciò è stata condotta una verifica sul cuneo inferiore della sezione 1 considerando la realizzazione alla base del gradone di carico, di una trincea drenante profonda 1.5/2 metri rispetto al piano di lavoro; il valore del coefficiente ottenuto da questa verifica è risultato pari a $F_s=1.42$ per effetto del sovraccarico e dell'abbassamento della falda.

CONCLUSIONI

La coltivazione progettata ha avuto come priorità quella del miglioramento delle condizioni di stabilità e di sicurezza dell'area di cava, precedentemente caratterizzata in alcune porzioni del fronte da fenomeni di dissesto determinati dalle particolari condizioni geologico-strutturali e dalle pendenze del versante (Foto 9).

Nel progetto di scavo si è cercato di distribuire le volumetrie in modo tale da diminuire l'attuale pendenza dell'intero versante agendo da monte verso valle con lavorazioni prevalentemente concentrate nelle porzioni sud e ovest del fronte (rispettivamente zona alta e fianco sinistro del fronte). Allo stesso tempo il fronte della cava è stato spostato verso ovest e nord ovest al fine di renderlo più stabile rispetto alle attuali condizioni geologico-strutturali, portandolo in generale ad una condizione di traversopoggio. Per ottenere quanto descritto sopra, la parte più bassa dell'at-

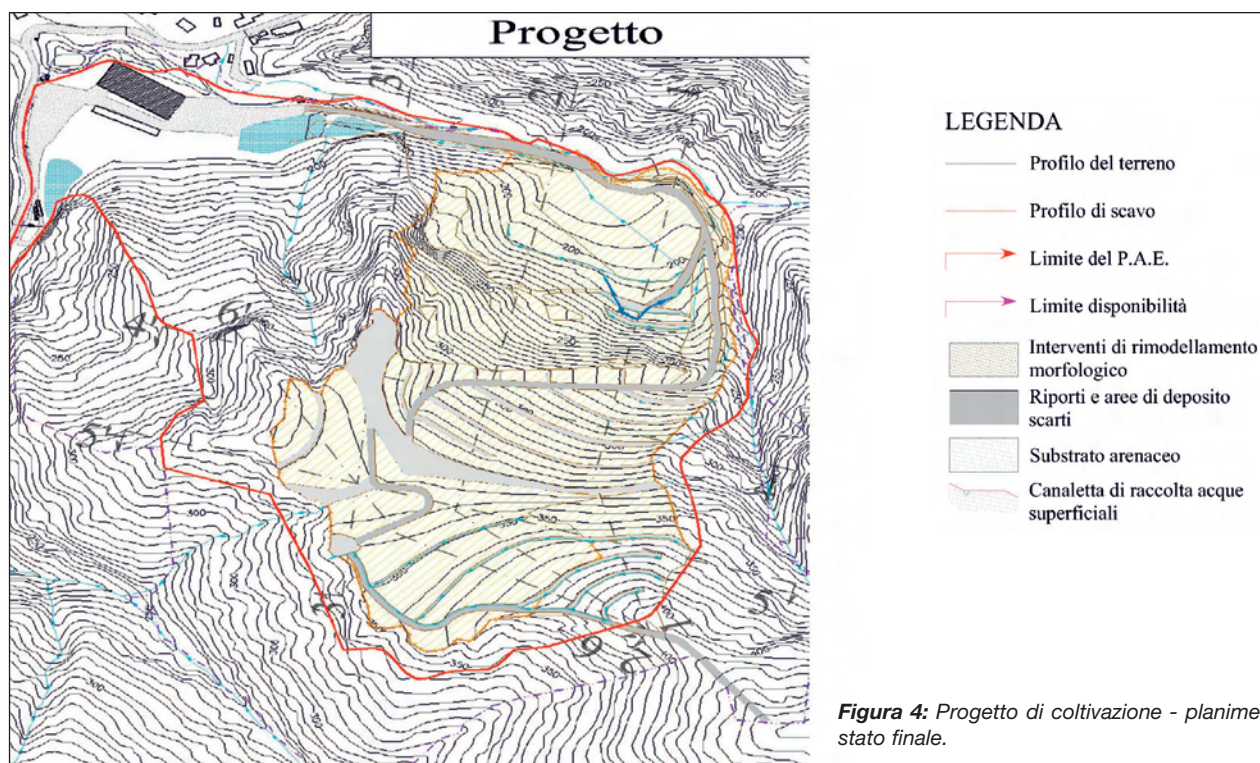


Figura 4: Progetto di coltivazione - planimetria dello stato finale.



Foto 9: Panoramica del fronte di scavo e dell'aia di carico (mar 2009).



Foto 10: Panoramica della parte superiore del fronte di scavo

tuale fronte è rimasta pressoché invariata dal punto di vista morfologico (Foto 10).

Infine la realizzazione del terrapieno e della trincea drenante alla base del fronte in corrispondenza della sezione n° 1, aumenta il fattore di sicurezza.

Pertanto si osserva positivamente come la risagomatura generale dell'intero fronte di cava al termine della coltivazione e gli interventi descritti hanno notevolmente migliorato le condizioni generali di stabilità del versante rispetto alla situazione precedente.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- BONAZZI U., PANINI F. (1981) - *Lineamenti geologici della zona a nord di Grizzana tra il F. Reno e il T. Setta (Appennino Bolognese)*. Atti Soc. Nat. Mat. Modena, volume 112, 1-19.
- CIBIN U. (1993) - *Evoluzione composizionale delle areniti nella successione epiligure eo-oligocenica (Appennino Settentrionale)*. Giornale di Geologia, ser. 3, vol. 55/1, 69-92.
- ELMI C., Berti M., Ghirotti M., Simoni A. (2001) - *Caratterizzazione geomeccanica delle Arenarie di Loiano ai fini della stabilità dei fronti di scavo*. Convenzione di Ricerca tra la Provincia di Bologna e il Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali dell'Università degli Studi di Bologna.
- GEO-LOG (1992) - *Relazione geologico-tecnica: progetto di ripristino paesaggistico e vegetazionale della cava "Ca' di Serra" - I fase*. Relazione professionale inedita. Committente IRIS Ceramica S.p.A.
- GIANI G.P. (1988) - *Analisi di stabilità dei pendii. Parte I: Classificazione dei fenomeni di instabilità, pendii naturali e fronti di scavo in roccia*. Associazione mineraria subalpina, Supplemento al Bollettino, anno XXV, n. 4, 264 pp.
- S.G.I. (1992) - *Appennino Tosco-Emiliano*. Serie Guide Geologiche Regionali vol. 4, BE-MA Ed.