



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

**VALUTAZIONE DELLE RISERVE RESIDUE DEL
PROGETTO DI COLTIVAZIONE DEL DEPOSITO DI GESSO DI
MONTE TONDO
DELLA SOCIETÀ SAINT-GOBAIN**

Bologna 14 Novembre 2023

Roberto Bruno, Francesco Tinti, Sara Kasmaee

Research & Study Centre on Mining Engineering
Department of Civil, Environmental and Materials Engineering
University of Bologna
Via Terracini, 28 - 40131 Bologna

VALUTAZIONE DELLE RISERVE RESIDUE DEL
PROGETTO DI COLTIVAZIONE DEL DEPOSITO DI GESSO DI MONTE TONDO
DELLA SOCIETÁ SAINT-GOBAIN

Bologna 14 Novembre 2023

INDICE

1. PREMESSA	3
2. INTRODUZIONE	4
METODOLOGIA	
3. LA STIMA DELLE RISORSE DISPONIBILI	5
4. LA SELEZIONE DELLE RISERVE RECUPERABILI	11
ANALISI DEI DATI	
5. I DATI DISPONIBILI E LE STATISTICHE PRELIMINARI	15
6. LA GEOREFERENZIAZIONE DEI DATI	18
7. LO STUDIO DELLA VARIABILITA' SPAZIALE	20
LA STIMA GLOBALE	
8. LA STIMA MEDIANTE ESTENSIONE	25
LA PIANIFICAZIONE DELLA COLTIVAZIONE	
9. LE UNITA' DI SELEZIONE	30
10. UN MODELLO 3D	30
11. LA PIANIFICAZIONE DELLA COLTIVAZIONE E LA STABILIZZAZIONE DEL TENORE DI ALIMENTAZIONE	33
12. BIBLIOGRAFIA	36



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

1. PREMESSA

La società Saint-Gobain, nell'ambito della collaborazione didattica scientifica con il gruppo di ricerca in Ingegneria Mineraria del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e di Materiali, ha richiesto informalmente una valutazione speditiva delle riserve tecnicamente ed economicamente estraibili con riferimento alla prosecuzione del progetto di coltivazione del deposito di gesso di Monte Tondo.

Ai fini di questo lavoro è stata acquisita la documentazione pregressa con particolare riferimento al progetto precedentemente presentato (Fanti, A., 2021), ed in particolare alla relazione geologica allegata (Ricci, R., 2004). Si tratta di informazioni che non sono state oggetto di riesame e sulla cui base è stato impostato il presente studio.

Sono stati acquisite ed elaborate le informazioni di campionatura rese disponibili dalla società ed oggetto della collaborazione didattica scientifica con il DICAM.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

2. INTRODUZIONE

Il deposito di gesso denominato “Cava Monte Tondo” è oggetto di coltivazione da parte di varie imprese da oltre 30 anni. I progetti pregressi presentati per le autorizzazioni di legge hanno riportato una sommaria valutazione delle riserve oggetto delle coltivazioni sulla base delle informazioni geogiacimentologiche disponibili. Oggi, dopo vari anni di attività, il deposito è riconosciuto con grande dettaglio, per cui la richiesta di prosecuzione delle attività può basarsi su una valutazione molto più accurata delle riserve residue definite dal progetto.

Dal punto di vista giacimentologico il deposito, che si inserisce nella vena gessoso solfifera italiana, è costituito da 11 diversi strati de gesso sedimentario di potenza variabile, separati da livelli di argilla marnosa (fug.1). In alcune zone non si distinguono i banchi per l'intensa fratturazione né la loro continuità. Clasti minori sono immersi in una matrice argillosa e l'argilla è presente anche come copertura.

Da un punto di vista della variabilità spaziale l'anisotropia e continuità bidimensionale tipica dei depositi sedimentari è alterata a medio-grande scala.



Fig. 1 vista del fronte di scavo orientale della cava Monte Tondo. In rosso sono stati evidenziati i banchi, numerati dal terzo al sesto, di maggiore qualità dal punto di vista minerario. Sono, inoltre, visibili le gallerie della vecchia coltivazione in sotterraneo poste sul piazzale di base a quota 220 m. (Casertano, D., 2023)



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

METODOLOGIA

3. LA STIMA DELLE RISORSE DISPONIBILI

Il PABE prevede una superficie di coltivazione ben inferiore a quella potenzialmente utile, i cui limiti in pratica sono quelli geologici.

Da questo punto di vista possiamo considerare **risorsa disponibile** il volume (V) di roccia gessosa delimitato dal PAE, ovvero il valore della superficie identificata dal piano (S), al netto di ogni altra limitazione, per lo spessore residuo della formazione gessosa residua (H), pari alla differenza di quota fra superficie morfologica attuale ed il letto del deposito. Questo spessore residuo varia da punto a punto della superficie, per cui il volume deriva semplicemente dalla integrazione dello spessore residuo sulla superficie, risolto semplicemente moltiplicando la superficie per lo spessore medio del gesso (\bar{H}).

$$V = \int_S H(x)dx = S \frac{\int_S H(x)dx}{S} = S \times \bar{H}$$

Operativamente si dispone della superficie limite nota, S , e di una serie di misure di spessore ben distribuite $H(x_i)$. Di questi dati si può fare una media aritmetica, ottenendo una stima dello spessore medio, da cui dedurre la stima del cubaggio; l'asterisco che accompagna le variabili delle relazioni indica che la grandezza è stimata. Considerando nd dati:

$$\bar{H}^* = \frac{\sum_{i=1}^{nd} H(x_i)}{nd} \quad V^* = S \times \bar{H}^*$$

Gli spessori residui della formazione geologica sono dedotti normalmente da misure dirette (sondaggi). Le tonnellate (T) di minerale disponibili si ricavano immediatamente considerando il peso specifico del minerale (δ) approssimato costante, ovvero indipendente dal tenore.

$$T^* = \delta \times V^*$$

La caratterizzazione della risorsa disponibile richiede anche la conoscenza del tenore medio in gesso del volume della risorsa, t_v . Da un punto di vista formale occorre conoscere il tenore in ogni punto del volume, $t(x)$:

$$t_v = \frac{\int_V t(x)dx}{V}$$

Operativamente, la stima del tenore medio del deposito, t_v , è meno immediata perché per potere utilizzare la semplice media aritmetica i dati di tenore devono fare riferimento a campioni con lo stesso supporto (di eguale dimensione $v_i = v$), distribuiti all'interno del deposito. Infatti, per definizione il tenore è un rapporto fra il volume della sostanza utile v ed il volume totale V , per cui



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

dati due tenori riferiti a due volumi diversi, $V_1 \neq V_2$, il loro tenore medio non è la loro media aritmetica.

$$\bar{t}_{V_1+V_2} = \frac{v_1 + v_2}{V_1 + V_2} = \frac{t_1 V_1 + t_2 V_2}{V_1 + V_2} \neq \frac{t_1 + t_2}{2}$$

In termini geostatistici, il tenore è una grandezza non sommabile, a meno che non sia misurata su campioni di eguali dimensioni (con supporto costante). In caso di strutture geologiche bidimensionali, ed è il nostro caso, si conosce non tanto il tenore $t(x)$ in ogni punto x del volume V , quanto il tenore medio dell'intero spessore misurato $t_H(y)$ nei punti y della superficie S . Formalmente il calcolo del tenore medio del deposito può essere eseguito trasformando l'integrazione tridimensionale in bidimensionale, passando per l'integrazione monodimensionali dei tenori lungo gli spessori. Spostando il problema da tri- a bi-dimensionale, il tenore medio del deposito coincide col tenore medio degli spessori:

$$t_H(y) = \frac{\int_{H(y)} t(z) dz}{H(y)} \quad t_V = \frac{\int_V t(x) dx}{V} = \frac{\int_S t_H(y) H(y) dy}{\int_S H(y) dy} = \bar{t}_H$$

La variabile “tenore medio degli spessori” non è una variabile sommabile, ovvero la media dei tenori degli spessori non è la loro media aritmetica

$$\bar{t}_H = \frac{\int_S t_H(y) H(y) dy}{\int_S H(y) dy} \neq \frac{\int_S t_H(x) dx}{S}$$

Quindi, operativamente sarebbe sbagliato stimare il tenore medio degli spessori del deposito mediante la media aritmetica dei tenori campionati dei vari spessori, $H_i = H(y_i)$; $t_i = t_{H_i}$:

$$\bar{t}_H^* = \frac{\sum_{i=1}^{nd} t_i H_i}{\sum_{i=1}^{nd} H_i} \neq \frac{\sum_{i=1}^{nd} t_i}{nd}$$

Questo perché le variabili fanno riferimento a supporti, gli spessori, che sono diversi punto per punto.

Concludendo le risorse di gesso disponibili possono essere stimate in termini di volume, tonnellate e tenore lavorando sugli spessori:

$$V^* = S \times \bar{H}^* \quad T^* = \delta \times V^* \quad t_V^* = \bar{t}_H^*$$

Non tutte le risorse disponibili sono sfruttabili, ma solo quelle tecnicamente ed economicamente recuperabili. Infatti, occorre tenere conto sia dei tanti vincoli esistenti di diversa natura. Come quelli tecnici (es. resistenza delle rocce) o quelli normativi (es. impatto ambientale). Un aspetto fondamentale è quello della convenienza economica, che tradotto in termini semplicistici significa che ogni tonnellata prodotta deve valere più di quanto costa produrla. In pratica le riserve sfruttabili



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

di un giacimento sono una quota parte delle risorse disponibili, che deve essere selezionata. Lo strumento che sintetizza tutti questi elementi è il progetto di coltivazione.

Nel caso della richiesta di prosecuzione delle attività estrattive a Monte Tondo il progetto già esiste per cui il volume totale da abbattere è già definito. Infatti le risorse disponibili ex progetto approvato sono pari al volume identificato dalla intersezione della morfologia attuale (Tetto) perfettamente nota con la superficie finale prevista dal progetto (Letto), anch'essa perfettamente nota. Occorre solo sottrarre il volume delle gallerie V_G esistenti.

$$V^* = V = \int_S H(x)dx - V_G \quad H(x) = Tetto(x) - Letto(x)$$

Le risorse disponibili risultanti dalla analisi topografica risultano pari $389.000 - 16.900 = 372.100 m^3$

Il tenore medio vero di questo volume non è noto e, in prima approssimazione, può essere stimato globalmente come tenore medio dei campioni disponibili. Questi sono costituiti da oltre 600 misure delle concentrazioni medie in gesso dei fori da mina, t_i . Dal momento che le lunghezze l_i dei fori da mina non sono costanti, i loro tenori medi non sono variabili sommabili. Il calcolo di questa media va eseguito, come illustrato precedentemente, con una media pesata

$$\bar{t}_l = \frac{\sum_{i=1}^{nd} t_i l_i}{\sum_{i=1}^{nd} l_i}$$

Questo valore è pari a 90,7 %, superiore al tenore limite richiesto dall'impianto.

In realtà occorre approfondire il significato di questo calcolo semplificato per valutarne l'affidabilità. Questa operazione di stima del tenore medio di un volume con il valore medio dei dati dei campioni si chiama "stima globale" o "estensione" di un valore medio di un volume v ad un altro volume V :

$$\bar{t}_V^* = \bar{t}_v$$

La precisione di questa stima è teoricamente ottenibile calcolando la varianza dell'errore di stima (ε).

$$\sigma_\varepsilon^2 = E\{\varepsilon^2\} = E\{(\bar{t}_V^* - \bar{t}_V)^2\} = 2\bar{\gamma}(v, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(v, v)$$

In questo caso la precisione è più che sufficiente per una stima delle riserve, indipendentemente dalla tecnica di stima adottata.

E le distanze fra due punti appartenenti uno al volume v , l'altro al volume V , sono mediamente superiori alla distanza massima di correlazione dei tenori, come è nel caso della stima globale, allora la varianza di stima tende a 0, ovvero la precisione è eccellente:

$$v, V \rightarrow \infty \quad \sigma_\varepsilon^2 = 2\bar{\gamma}(v, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(v, v) \rightarrow 2C - C - C = 0$$



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Il punto è capire quali sono le ipotesi implicitamente adottate da questa procedura. Nel nostro caso stimare il volume con la media di una campionatura significa affermare che quella campionatura è rappresentativa di quel volume. In termini teorici, tale affermazione equivale ad adottare l'ipotesi di stazionarietà delle variabili utili, ovvero che la loro media teorica è la stessa ovunque. Almeno con una approssimazione accettabile. Nel caso della distribuzione spaziale del tenore in gesso nel deposito, variabile che la Geostatistica considera la realizzazione di una Funzione Aleatoria (FA), il modello impone che la media teorica sia la stessa ovunque, quindi indipendente dalla localizzazione della variabile stessa:

$$\text{tenore in gesso: } t(x) = FA \qquad E\{t(x)\} = t_m$$

Nel nostro caso notiamo che non sono disponibili dei campioni all'interno del volume da caratterizzare, perché i dati derivano dai fori da mina delle volate già abbattute, ovvero si riferiscono a volumi esterni al cubaggio da caratterizzare

Ciò implica che qualunque metodologia di stima deve comunque prevedere una "estrapolazione", una procedura molto delicata per varie ragioni. E' immediato verificare che le distanze interessate da una estrapolazione sono tendenzialmente maggiori di quelle nel caso di una interpolazione, quindi la precisione tende a diminuire. Inoltre, occorre tenere conto delle possibili variazioni spaziali sistematiche (trend) dei parametri medi significativi per il calcolo delle riserve. Nella fattispecie del deposito di Monte Tondo è il caso della quota della superficie di contatto fra strati diversi che, pur fluttuando, tende a crescere o diminuire sistematicamente in funzione della direzione considerata. Semplificando siamo in presenza di strati inclinati. E si tratta di strati di roccia gessosa geologicamente differenziati, sia come spessore che come tenore, che seguono delle superfici non orizzontali. Se per stimare una zona del deposito si utilizzano acriticamente dei dati provenienti da un'altra zona, occorre domandarsi quanto essi siano rappresentativi della zona da stimare.

Nei successivi capitoli si evidenzia che la variabilità verticale del tenore presenta dei trend significativi già a piccole distanze, quali sono le altezze dei gradoni (10-15 m) a causa della stratificazione.

Lungo le varie direzioni orizzontali questo effetto non si sente a piccola scala, ovvero alla scala delle volate (50-100 m), mentre compaiono nuove e diverse strutture per distanze maggiori. Nel caso di Monte Tondo, la maggiore estensione verticale dei volumi da coltivare ha evidenziato una significativa differenza fra nord e sud suggerendo una suddivisione del volume in due zone, al di sopra ed al di sotto della coordinata $Y = 3460$.

Nella fig.2 è riportato il grafico che illustra per le due zone nord e sud l'evoluzione in verticale dei tenori medi dei fori da mina.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

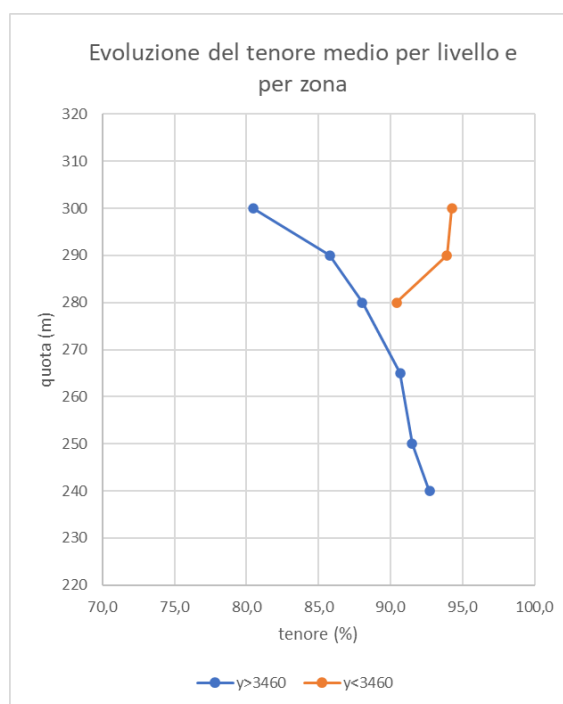


Fig. 2 Evoluzione del valore medio del tenore in gesso dei fori da mina per livello e per zona

Tradotto in termini di proprietà della FA tenore, si può adottare l'ipotesi di stazionarietà locale lungo le direzioni orizzontali e di non-stazionarietà lungo la verticale e lungo l'asse orizzontale nord sud. Ne risultano identificate due zone per livello. Adottando tale suddivisione, il volume indagato dai fori da mina per livello e per zona può essere considerato rappresentativo con buona approssimazione del volume interessato dalla futura coltivazione. In fig.3 si evidenziano questi due volumi fra i livelli 250-265.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

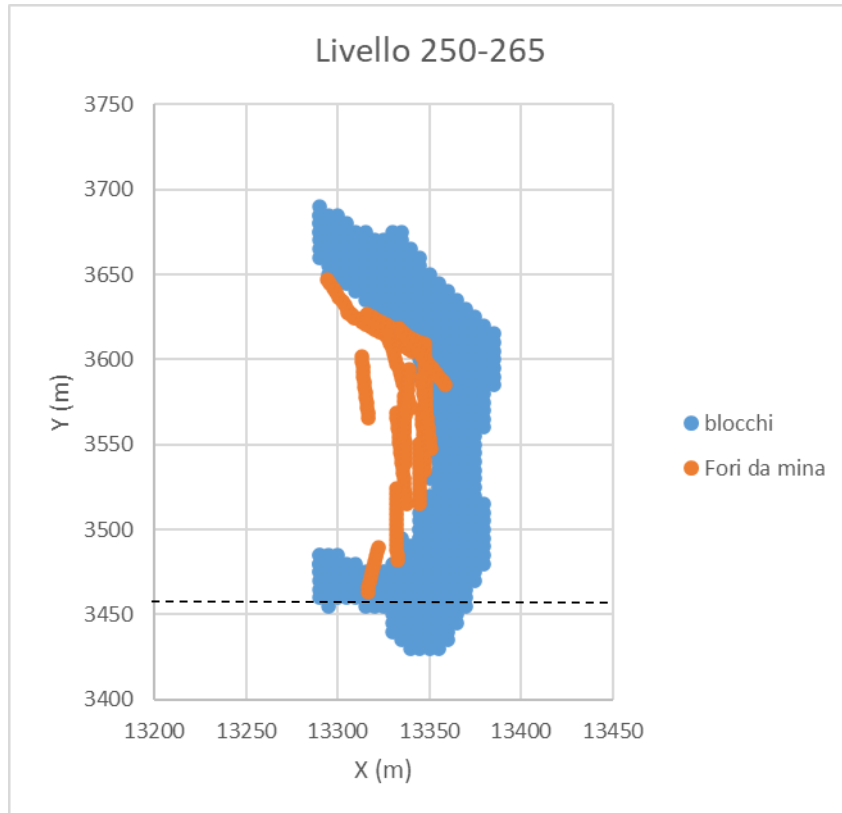


Fig. 3 Livello 250-265: pianta con ubicazione dei fori da mina delle volate già effettuate e dei blocchi da abbattere

Ciò induce ad un perfezionamento della procedura di stima globale estendendo i dati dei fori da mina, ma livello per livello e zona per zona.

Operativamente, si è suddiviso il volume da coltivare in

- 7 volumi elementari di ogni livello ($k=1,7$) 222-240; 240-250; 250-265; 265-280; 280-290; 290-300; 300-310, come previsto dal progetto
- 2 zone, a nord e sud della coordinata discriminante ($j=1,2$):

$$V = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^7 V_{kj}$$

Per ogni elemento V_{kj} si considerano i relativi tenori medi $t_{V_{kj}}$, per cui il tenore del deposito si ottiene attraverso una media pesata dei tenori medi degli elementi:

$$t_V = \frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^7 t_{V_{kj}} V_{kj}}{V}$$



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Questi tenori medi non sono noti, ma possono essere stimati coi tenori medi dei fori da mina appartenenti allo stesso livello ed alla stessa zona, $\bar{t}_{l_{kj}}$, ma esterni agli elementi, tenendo conto che hanno lunghezze diverse

$$t_V^* = \frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^7 t_{V_{kj}}^* V_{kj}}{V}$$

$$t_{kj_i} = t_i \in \{k, j\} \quad t_{V_{kj}}^* = \bar{t}_{l_{kj}} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} t_{kj_i} l_{kj_i}}{\sum_{i=1}^{nd} l_{kj_i}}$$

4. LA SELEZIONE DELLE RISERVE RECUPERABILI

La valutazione delle riserve in una attività estrattiva rappresenta la fase fondamentale per decidere se conviene economicamente coltivare un deposito. Infatti, la risorsa mineraria disponibile in un dato volume, definito naturalmente dalla geologia (es. formazione geologica) e artificialmente dall'uomo (es. limiti catastali, PABE), ha caratteristiche che non sono costanti nello spazio. Anche il tenore in gesso varia da punto a punto nel deposito di Monte Tondo. Questa è una delle cause principali per cui normalmente solo una parte della risorsa disponibile è utile: questa parte rappresenta le riserve tecnicamente ed economicamente coltivabili. Occorre dunque operare una selezione per definire le riserve recuperabili.

La tecnica di selezione più semplice è la selezione libera, basata unicamente sul tenore del minerale utile. Si suddivide la risorsa in unità volumetriche elementari, in pratica in blocchi, ognuna col proprio tenore in gesso (fig. 4).

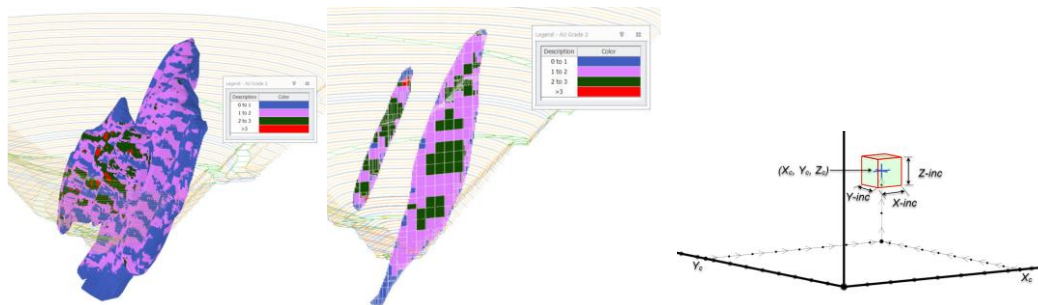


Fig. 4 Creazione di un modello a blocchi del deposito, ed attribuzione di un tenore ad ogni blocco

Sono le cosiddette unità di selezione (US), per cui un blocco può essere scartato o selezionato in funzione della convenienza; nel nostro caso il blocco coincide praticamente con la volata. Il criterio della convenienza economica si concentra sul tenore che determina i ricavi, ma non influisce sui costi: sopra una certa concentrazione, la coltivazione “conviene”, al di sotto no, perché i costi superano i ricavi. Questa concentrazione limite è chiamata il tenore di taglio (cut-off) e la funzione che sintetizza



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

questa operazione di selezione libera, è la curva tenore-cubatura (Fig. 5). Per ogni cut-off si identifica la porzione di giacimento utile composta da tutti i blocchi con tenore superiore al cut-off e se ne calcola il tenore medio.

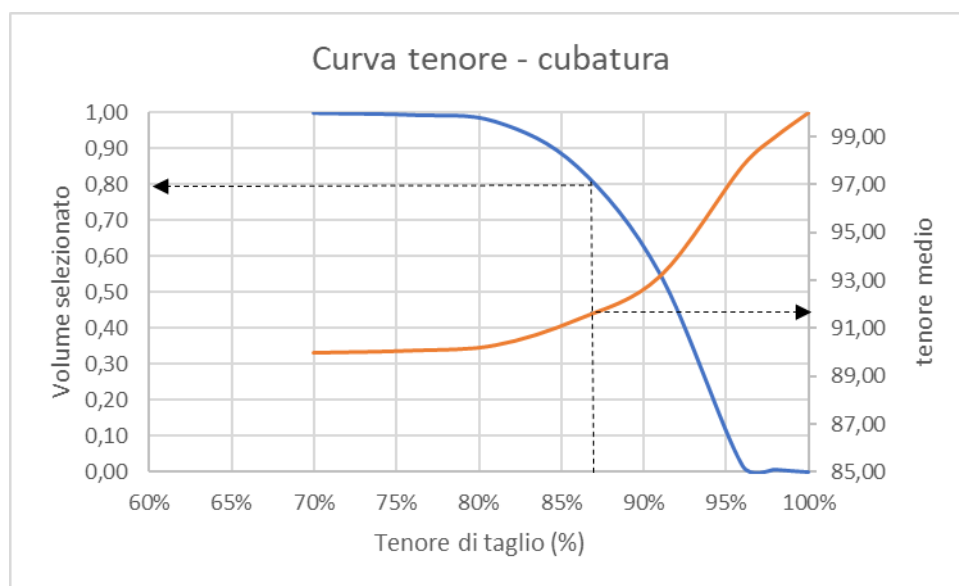


Fig. 5 Curva tenore di taglio - cubatura selezionata - tenore medio del selezionato

Nel caso del progetto di coltivazione del gesso di Monte Tondo, questo concetto è più complesso perché il minerale non fornisce un ricavo diretto, trattandosi di una cessione interna. L'obiettivo in questo caso è garantire un'alimentazione degli impianti con minerale a tenore dato, 87-88% in gesso, e il più possibile costante nel tempo. Questo significa che il tenore di taglio non coincide con il tenore richiesto dagli impianti, perché è sempre possibile selezionare delle volate con minerale più povero, miscelarle con minerale più ricco ed ottenere la concentrazione richiesta. La curva tenore-cubatura si può allora utilizzare all'inverso, ossia si entra col tenore medio richiesto e si identifica il cut-off che seleziona la porzione di giacimento con la concentrazione media ottimale. Ciò ha senso solo se è possibile operare una miscelazione perfetta, per questo diventa fondamentale focalizzarsi sulla pianificazione della produzione.

L'operazione di selezione, affinché sia ottimale, è più articolata rispetto alla cosiddetta selezione libera, perché entrano in gioco svariati fattori di progetto ed economici, alcuni vincolanti. Tra questi fattori, ad es., vi sono fattori tecnici come la scelta del metodo di coltivazione (nel nostro caso la coltivazione a cielo aperto per gradoni); fattori geometrici come la forma dell'unità di selezione (nel nostro caso altezza del gradone, pedata e larghezza della volata); fattori economici come il valore del minerale prodotto (nel nostro caso il valore di mercato del materiale sostitutivo atto ad alimentare gli impianti industriali a valle).



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Per il progetto che viene presentato, trattandosi del prolungamento di una coltivazione già autorizzata, molti elementi progettuali e vincolanti sono definiti.

- Il volume della risorsa disponibile è immediatamente desunto dal rilievo topografico e dalla superficie finale del progetto;
- l'unità di selezione ha un'altezza pari a quella dei gradoni (10, 15 e 20 m) e una profondità pari alle pedate (5 e 15 m); la larghezza delle volate potrebbe essere variabile in funzione di altri fattori contingenti;
- i tenori di alimentazione richiesti dall'impianto sono noti (87-88% in gesso).

Mancano sono i tenori delle unità di selezione. Non si conoscono i valori veri delle US finché non saranno effettuati i fori da mina e analizzate le polveri. Le concentrazioni delle US, prima, possono essere stimate, ma solo se si dispone di campioni nelle prossimità. Va sottolineato che la non conoscenza dei tenori veri delle US è un elemento specifico dei progetti minerari: si progetta su caratteristiche del giacimento, tipicamente i tenori, i cui valori non sono quelli veri, ma quelli stimati.

Nel nostro caso, conosciamo il tenore in gesso dei fori da mina, peraltro di lunghezza diversa, mediamente 16 e 12 m (cap.5). I fori da mina fanno riferimento a volumi già coltivati; quindi, essi non forniscono informazioni all'interno del volume da coltivare. Nel caso del deposito di Monte Tondo la stima dei blocchi avrebbe una precisione insufficiente per prevedere affidabilmente il risultato di una selezione, perché i dati sono molto distanti.

Dal punto di vista del recupero del giacimento, essendo il tenore medio paragonabile al tenore richiesto dall'alimentazione, la resa in peso della coltivazione può raggiungere teoricamente il 100%, potendosi sfruttare tutto il minerale estratto qualora si sia in grado di garantire la giusta miscelazione fra volate più ricche e volate più povere.

Il problema di una corretta miscelazione è complesso per varie ragioni tra cui:

- il tipo di processo applicato al tout-venant dall'abbattaggio all'alimentazione dell'impianto: sequenza di abbattaggio, caricamento con la pala, trasporto con dumper, frantumazione, etc.
- le modalità di miscelazione fra materiali provenienti da volate diverse;
- il valore dei tenori delle volate.

Da un punto di vista formale, date due volate, una con tenore maggiore, t_+ ed una con tenore minore t_- del tenore di alimentazione richiesto, è possibile ottenere un prodotto all'88% giocando sul rapporto dei volumi da miscelare

$$88\% = \frac{t_+ \times v_+ + t_- \times v_-}{v} \quad [1]$$

Ove $v = v_+ + v_-$. In termini di frazioni $\frac{v_+}{v} + \frac{v_-}{v} = r_+ + r_- = 1$



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

In generale, i volumi delle due volate, v_1 , v_2 non coincidono coi volumi richiesti per garantire le quote r_+ , r_- , anche accettando una tolleranza sul risultato della miscelazione, per cui una delle due volate non dovrà essere sarà totalmente miscelata, ma resterà parzialmente in posto e potrà esser utilizzata per successive miscelazioni.

In pratica, vi sono dei problemi tecnici, come ad es. la necessità di rispettare le condizioni di stabilità dei versanti, la sequenza di abbattaggio, la capacità di caricare volumi parziali di una volata/dumper, la necessità di garantire il carreggio, etc. Alla fine, benché si conoscano solo dopo perforazione i tenori di due volate da sparare in sequenza, si conoscono le caratteristiche delle zone di provenienza per cui si riesce a garantire di potere miscelare una volata con tenore maggiore della media globale, con un'altra di tenore minore. Analizzate le polveri dei fori da mina, la quota parte dei volumi delle due volate da miscelare si ricava utilizzando la relazione [1].

In conclusione, una corretta miscelazione richiede

1. una attenta programmazione dell'avanzamento dei fronti;
2. la continua conoscenza dei tenori delle volate;
3. una corretta miscelazione dei volumi provenienti da ciascuna volata.

Un potenziamento della capacità di miscelazione potrebbe derivare da una perforazione anticipata dei fori da mina di più volate, in modo da avere una maggiore capacità di selezione ottimale, compatibilmente coi vincoli geomeccanici e di transito. Eventuali piccoli stock tampone con materiale di caratteristiche prefissate, potrebbero rivelarsi utili in caso di attraversamento di zone con bassa variabilità del tenore.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

ANALISI DEI DATI

5. I DATI DISPONIBILI E LE STATISTICHE PRELIMINARI

I dati disponibili fanno riferimento ai fori da mina delle coltivazioni degli ultimi anni. Essi sono stati geolocalizzati ed elaborati. I dati dei fori da mina utilizzati sono:

- la lunghezza;
- le concentrazioni medie in gesso;
- la volata e il gradone di riferimento;
- le coordinate X, Y dell'intestazione.

Il numero dei fori da mina riportato è di 721, ma non tutti dispongono della serie completa delle quattro variabili. I fori da mina sono inclinati rispetto alla verticale in modo da essere paralleli ai fronti delle volate e mantenere una spalla costate. Per questo le coordinate di fine foro non coincidono con quelle dell'intestazione, che invece sono quelle utilizzate per caratterizzare i fori e li associano al livello del gradone.

Nel caso della variabile “lunghezza dei fori da mina”, la variabile è una grandezza sommabile, per cui è possibile costruire la distribuzione di frequenza sperimentale estremamente utile per capire la logica delle perforazioni.

La lunghezza dei fori è variabile in funzione di diverse condizioni locali, fra cui l'altezza dei gradoni e la presenza dei vuoti generati dallo scavo delle gallerie al livello 220. Si tratta di 690 fori di cui riportano in tab 1 i parametri elementari ed in fig.6 la distribuzione delle frequenze. E' evidente la presenza di due classi predominanti, di 12 e 16 m.

Tab. 1 Statistiche elementari delle lunghezze disponibili relative all'insieme dei dati dei fori da mina

n. dati	min	max	media	varianza
690	5	26	15,0	8,2



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

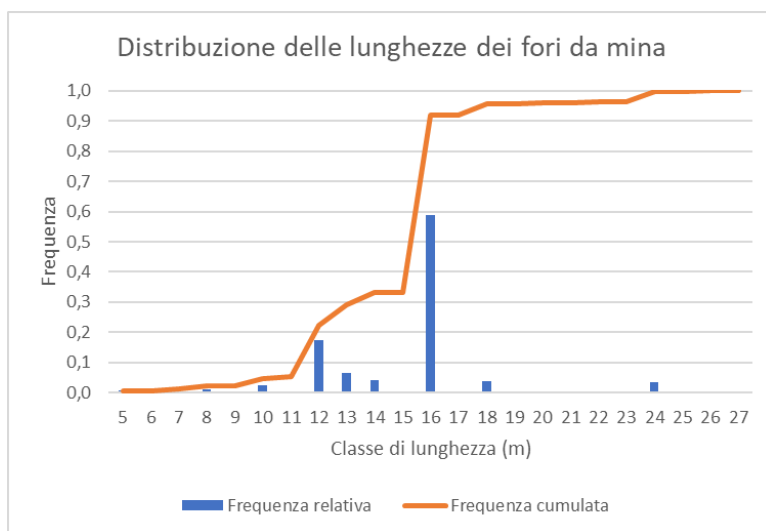


Fig. 6 Frequenza relativa e cumulata delle lunghezze dei fori da mina nel periodo 2021-2023.

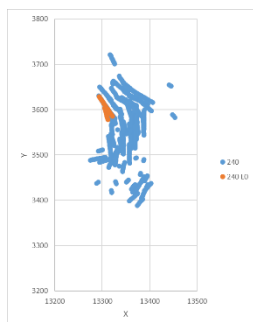


Fig. 7 Ubicazione dei fori da mina del livello 240 di cui manca il dato della lunghezza (in rosso),

Le concentrazioni in gesso sono disponibili per tutti i 721 fori da mina riportati, ovvero esistono 31 fori di cui non si conosce la lunghezza e che quindi non sono utili per il calcolo dei tenori medi. 28 di questi (fig.7) sono ubicati al livello 240, ove sono presenti 84 dati utili e sono i più distanti dai volumi da scavare. Ignorarli non comporta sostanziali problemi. Di altri 3 fori mancano tutte le informazioni.

Occorre riaffermare che la variabile tenore misurata su fori di lunghezza diversi, t_{l_i} , non è una grandezza sommabile, per cui non è possibile eseguirne le normali statistiche. Se ne può calcolare la media pesando i tenori dei fori da mina con le relative lunghezze:

$$\bar{t}_l = \frac{\sum_{i=1}^{nd} t_{l_i} l_i}{\sum_{i=1}^{nd} l_i} = 90,7\%$$

Per tale motivo il numero di dati disponibili (721) non coincide con quelli di cui si hanno i valori di tutte le variabili, gradone, tenore e lunghezza (690). In particolare, di 28 fori mancano le lunghezze, di 3 mancano lunghezze e gradone.

Analizzando i dati utili per livello e per classi di lunghezza si osserva che:

- 1) i fori di cui manca la lunghezza sono concentrati al livello 240 (tab.2);
- 2) il numero dei fori per gradone è abbastanza omogeneo, mentre le due classi di lunghezza principali (12, 16 m) sono sostanzialmente alternative per livello, perché riflettono le diverse altezze dei gradoni (fig. 8, tab.2);



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

- 3) la lunghezza dei fori influisce poco sul tenore medio, al contrario del livello del gradone (fig.9, tab.3).

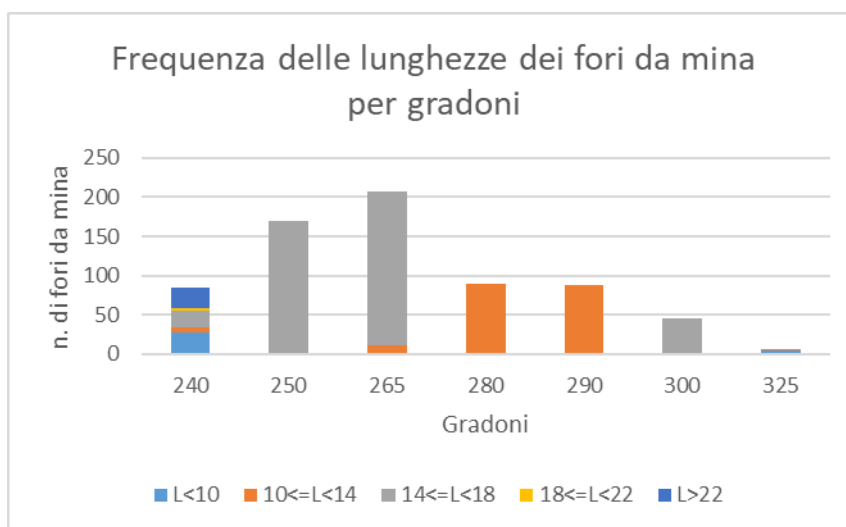


Fig. 8 Frequenza delle lunghezze dei fori da mina per livello

Tab. 2 Distribuzione dei dati disponibili per gradone e classe di lunghezza

Lmin	Lmax	240	250	265	280	290	300	325	N.dat
nd	nd	28							28
0	10	7		10	89	88		1	195
10	14	21	170	197			45		433
14	18	4							4
18	22	25							25
22	100								
		112	170	208	89	88	45	6	718



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

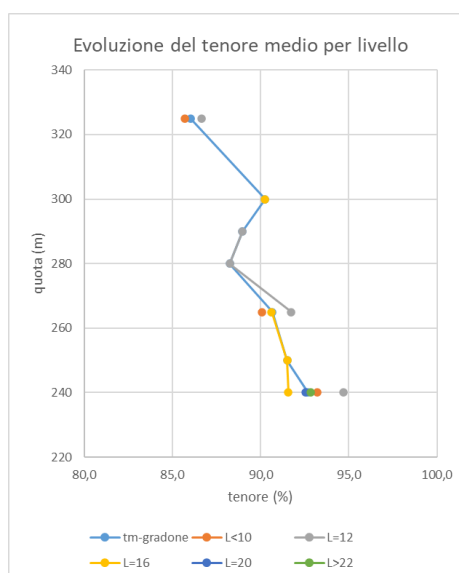


Fig. 9 Evoluzione del tenore medio dei fori da mina in funzione della quota dei gradoni, distinto per classi di lunghezza

Tab. 3 Tenore medio dei fori da mina per livello e per classe di lunghezza

	240	250	265	280	290	300	325	tm	N.dati
L<10	93,2		90,1				85,7	92,0	33
10<=L<14	94,7		91,7	88,2	89,0		86,7	89,0	195
14<=L<18	91,6	91,5	90,6			90,2		91,0	433
18<=L<22	92,6							92,6	4
L>22	92,8							92,8	25
	92,7	91,5	90,7	88,2	89,0	90,2	86,0	90,6	690

6. LA GEOREFERENZIAZIONE DEI DATI

La georeferenziazione dei dati, ovvero la localizzazione delle informazioni nello spazio 3D, è necessario per potere studiare la variabilità spaziale delle grandezze che interessano. Sono stati georeferenziati e analizzati i fori da mina disponibili e le volate nel periodo 2021-2023. Inoltre, è stata effettuata la trasformazione dal sistema di coordinate locale “Cava” al sistema WGS84-UTM32N, in modo da poter geolocalizzare tutti i punti su immagine satellitare, per un più agevole riconoscimento e identificazione. Il risultato è mostrato nella fig. 10. ove è riportato il baricentro superficiale delle volate.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

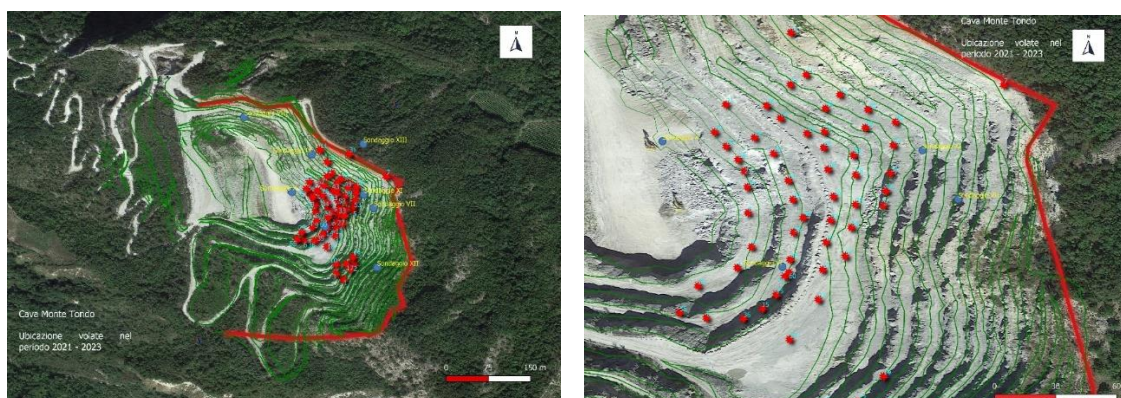


Fig. 10 Ubicazione delle volate e dei sondaggi per la cava Monte Tondo. Sovrapposizione con immagine satellitare e rilievo topografico 2023, a diversa scala.

Di molti dei fori da mina, e in particolar modo di quelli antecedenti al 2023, non si conosce l'ubicazione esatta, ma solo la geometria approssimativa nell'intorno del baricentro della volata. Per tale motivo, si è deciso di analizzare anche i valori medi di titolo di gesso, per ogni volata.

Ad ogni baricentro della volata, è stato quindi associato il tenore medio del gruppo di fori da mina, e la altezza del gradone, per un totale di 63 valori. I risultati sono riportati (nel sistema di coordinate locali "Cava") in fig. 11.

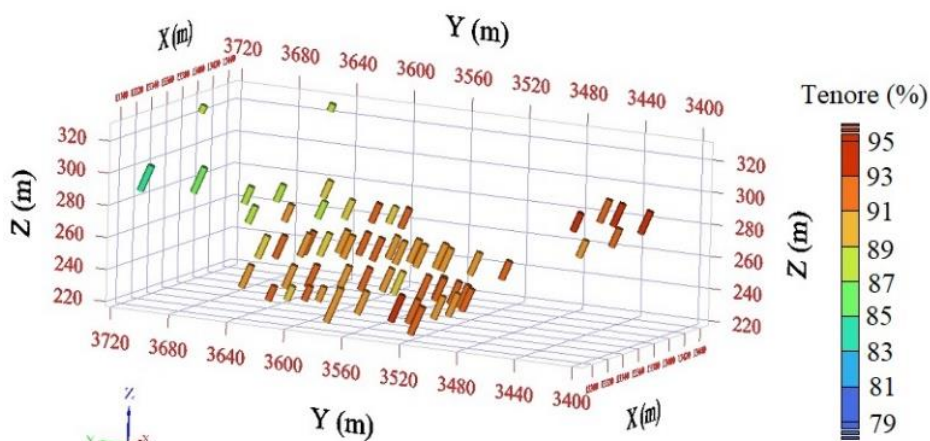


Fig. 11 Geolocalizzazione 3D delle volate con indicazione delle classi di concentrazione. Sistema di Coordinate Locale "Cava"



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

7. LO STUDIO DELLA VARIABILITA' SPAZIALE

La non sommabilità dei tenori deriva dai diversi supporti (lunghezze). Al fine di una elaborazione statistica e geostatistica occorrono supporti eguali. Per questo i fori da mina sono stati suddivisi in 2 gruppi, a seconda delle lunghezze predominanti dei fori: 12 ± 2 m, 16 ± 2 m. Considerando che tutti i dati all'interno di una classe di lunghezza sia riferibile al medesimo supporto, sono state eseguite le statistiche dei tenori, riportate in tab.4. I dati utili a tale analisi si riducono da 690 a 643, ma rappresentano oltre il 93% delle informazioni disponibili.

Tab. 4 Statistiche complessive del titolo in gesso dei fori da mina, suddivisa per classi di lunghezza

Classi di lunghezza	Numero di misure	Tolleranza	Range di lunghezza	Titolo in gesso - statistiche			
				min	max	Media	Varianza
L=12 m	212	2 m	10-14 m	78.69	97.47	89.1	20.49
L=16 m	431	2 m	14-18 m	71.77	96.70	91.0	13.68

Per le due classi di lunghezza sono state ricavate le distribuzioni delle frequenze (fig.12):

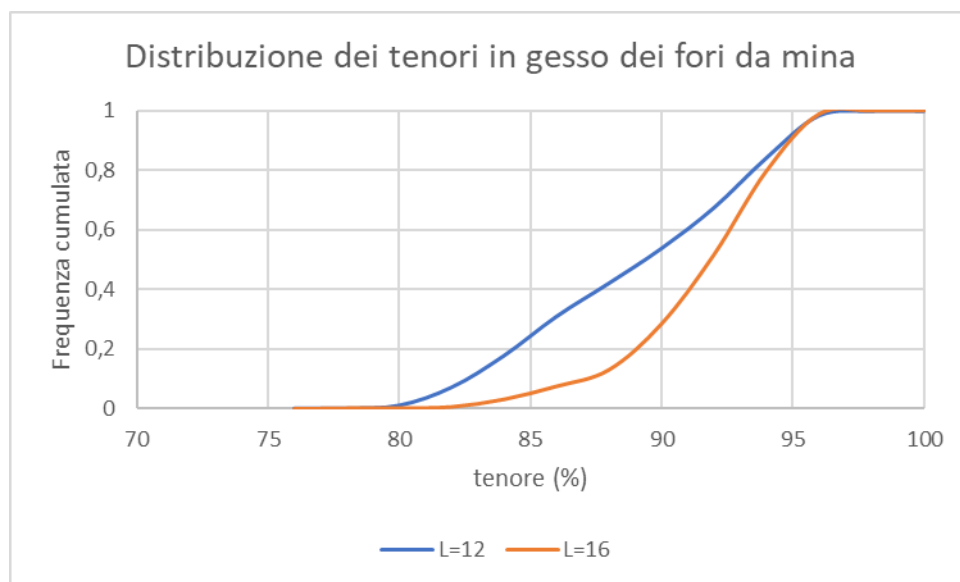


Fig. 12 Distribuzione dei tenori di gesso dei fori da mina per le classi di lunghezza 12m e 16m

Le medie sono paragonabili, ma non le varianze; infatti, la dispersione del tenore attorno alla media è minore nel caso del supporto maggiore, la variabile è più “regolarizzata” e si osserva una minore



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

varianza sperimentale. Per il 50% dei fori di lunghezza 12 m, il minerale ha una concentrazione in gesso minore di 88%, mentre tale percentuale scende al 20% per i fori da 16 m.

Una volta scelto il supporto, ci si è concentrati sulla identificazione di zone su cui ipotizzare la quasi stazionarietà, ovvero quei domini al cui interno la media può essere considerata stabile. Sono stati tralasciati i pochi fori da mina del livello 325 non interessato dalla coltivazione futura. E' stata considerata la suddivisione dei dati per livello, data la variabilità verticale delle medie dei tenori dei fori da mina, e si è osservato che l'evoluzione della coltivazione ha delineato un settore nord ed un settore sud, approssimativamente divisibili in base alla coordinata $Y=3460$. Rielaborando le medie dei fori da mina per livello, ma distinguendo anche per zona, si osservano due andamenti differenziati. In particolare, il trend di impoverimento del minerale procedendo dal basso verso l'alto osservabile nella zona nord, non trova riscontro nella zona sud (fig. 13).

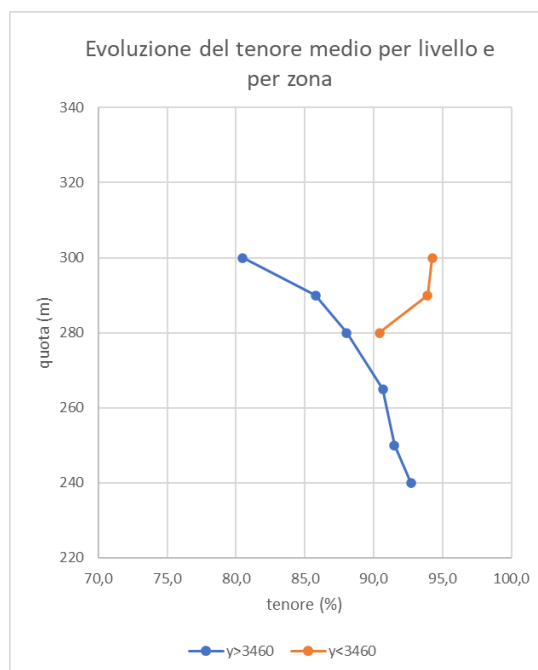


Fig. 13 Evoluzione del tenore in gesso per livello, nelle due zone considerate

Questo è corretto considerando che gli strati più alti sono più argillosi e che gli strati sono inclinati, per cui nella zona sud alla stessa quota si intercettano gli strati più bassi e più ricchi della zona nord. Recentemente, in due specifiche zone della cava, tra 300 e 320 m, sono state incontrati degli intercalari sterili di argilla importanti (fig. 14), che confermano la tendenza alla riduzione della concentrazione media del gesso salendo verso la bancata 300-310 della quale mancano dati di fori da mina.

La presenza di questo trend verticale impedisce di adottare l'ipotesi di stazionarietà a 3 dimensioni. Si è quindi proceduto ad esaminare il tipo di variabilità spaziale a 2D, nel piano x,y per $z=\text{costante}$.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

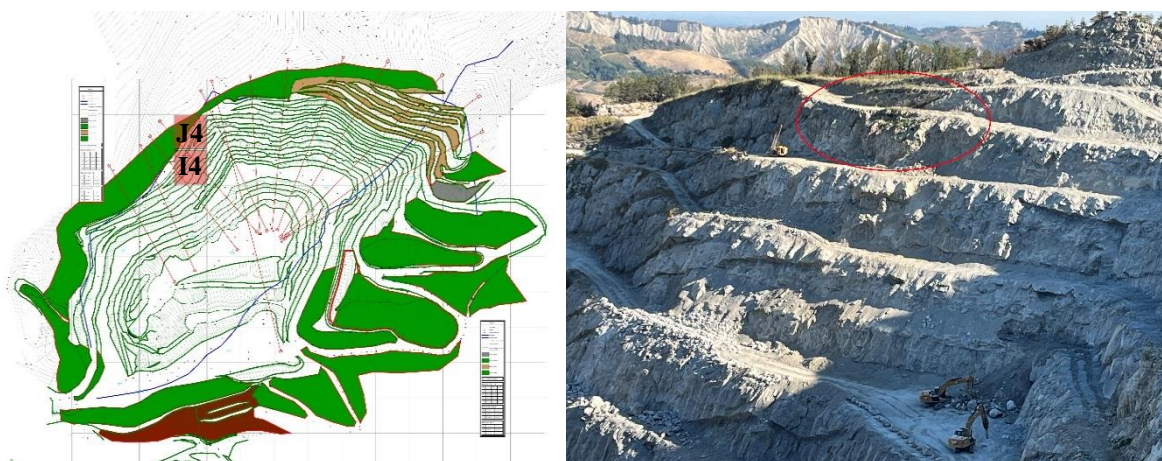


Fig. 14 Aree con minore concentrazione di gesso al livello 300-310 per presenza di lenti argillose (sinistra) e rilievo fotografico (destra)

Un'analisi geostatistica a 2D nelle direzioni orizzontali ha consentito di accertare se esistono eventuali trend anche in orizzontale e la scala alla quale si può adottare l'ipotesi di stazionarietà. In particolare, è stata eseguita una analisi variografica sperimentale che ha consentito di misurare il grado di correlazione fra due tenori dei fori da mina al variare della distanza. Si tratta di una variabile bidimensionale, perché tutti i fori appartengono allo stesso gradone ed hanno $z=\text{costante}$; variano le coordinate planari una volta fissata l'ubicazione del foro da mina sulla bancata. Le distanze sperimentali disponibili sono dei multipli della distanza fra fori da mina, per questo si è adottato un passo 3 m e si è studiata la variabilità spaziale a piccola scala (100m), ovvero a scala delle volate. Il calcolo dei variogrammi richiede variabili sommabili, per cui i variogrammi sono stati calcolati separatamente per le due classi di lunghezza dei fori da mina, 12 e 16 m. In realtà ad ogni gradone corrisponde principalmente una classe di lunghezza dei fori da mina, per cui non è possibile, in pratica, confrontare i variogrammi dei due supporti sullo stesso gradone. Ma si possono confrontare i variogrammi allo stesso supporto per due gradoni diversi, oltre che i variogrammi di classi di lunghezza diversa a differenti gradoni (fig. 15, 16).

Non per tutte le bancate i dati disponibili hanno consentito il calcolo dei variogrammi, perché i dati sono in numero insufficiente.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

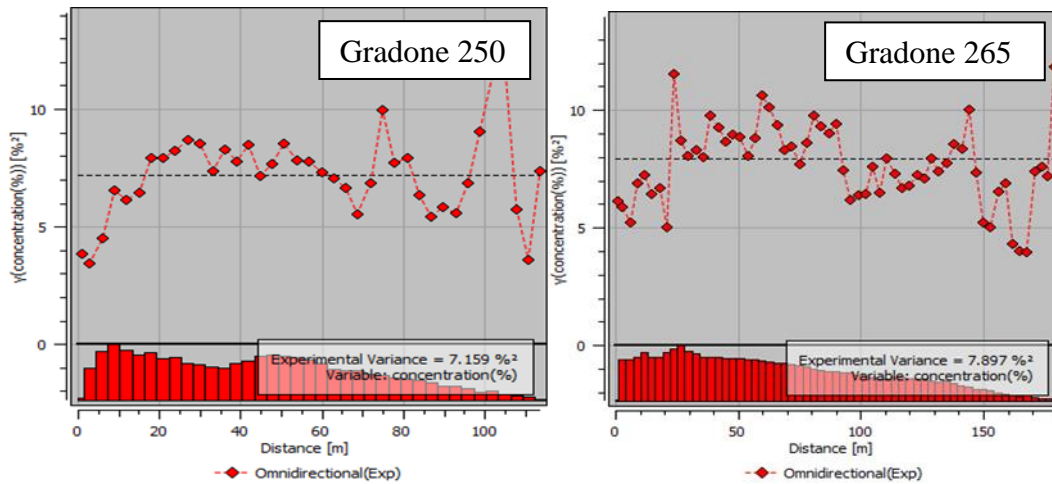


Fig. 15 Variogrammi sperimentali dei tenori medi dei fori da mina di lunghezza 16 m ai gradoni 250 e 265

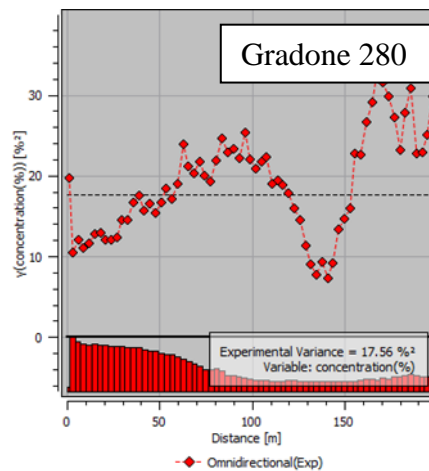


Fig. 16 Variogrammi sperimentali dei tenori medi dei fori da mina di lunghezza 12 m al gradone 280

L'analisi variografica mostra che il tipo di modello che si può adottare per la funzione variogramma è un modello annidato, piuttosto comune, composto dalla somma di due strutture elementari, un modello pepitico e uno sferico

$$\gamma(h) = \gamma_{pep}(h) + \gamma_{sf}(h)$$

Le due strutture elementari contribuiscono al 50% alla variabilità totale. Lo sferico mostra una prima distanza max di correlazione inferiore ai 100 m. Oltre tale distanza comincia a sentirsi l'effetto di altri fenomeni come ad es. la periodicità, legata alla stratificazione.

Mentre è emersa la sostanziale equivalenza dei modelli, in termini di portata per entrambe le classi di lunghezza, le soglie sono diverse (8 %², 18 %²) perché sono diverse le dispersioni a causa del diverso



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

supporto: le variabili a supporto maggiore, cosiddette a maggiore “regolarizzazione”, hanno dispersioni minori.

L’analisi strutturale condotta conferma e quantifica le caratteristiche di variabilità spaziale del deposito, ovvero la presenza di un trend verticale (“deriva”) e la sostanziale stazionarietà orizzontale del tenore per gradone, ad una scala non superiore alla centometrica. I risultati giustificano la scelta di adottare l’ipotesi di stazionarietà in orizzontale a piccola scala, perché a scala maggiore cominciano ad avere influenza altri fenomeni strutturali. Si tratta di indicazioni fondamentali per la scelta dello stimatore, perché impediscono di utilizzare un krigaggio ordinario a 3D e non giustificano l’utilizzo di un krigaggio ordinario a 2D in estrapolazione, stimatore che farebbe intervenire distanze maggiori delle portate dei modelli di variogramma. Ma soprattutto mancherebbe un modello puntuale di variabilità del gesso, perché i dati disponibili sono regolarizzati e da questi non è possibile ricavarli.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

LA STIMA GLOBALE

8. LA STIMA MEDIANTE ESTENSIONE

Si è costruito un modello a blocchi cubici di $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$. In questo modo si possono riprodurre gradoni da 10, 15 e 20 m. E pedate da 5 e 15 m. Il volume da coltivare risulta individuato dai blocchi compresi fra la superficie digitale del terreno alla data attuale e la superficie finale dello scavo previsto dal progetto (fig. 16). Il volume totale interessato dalla coltivazione corrisponde a 372.100 m^3 al netto dei vuoti delle gallerie.

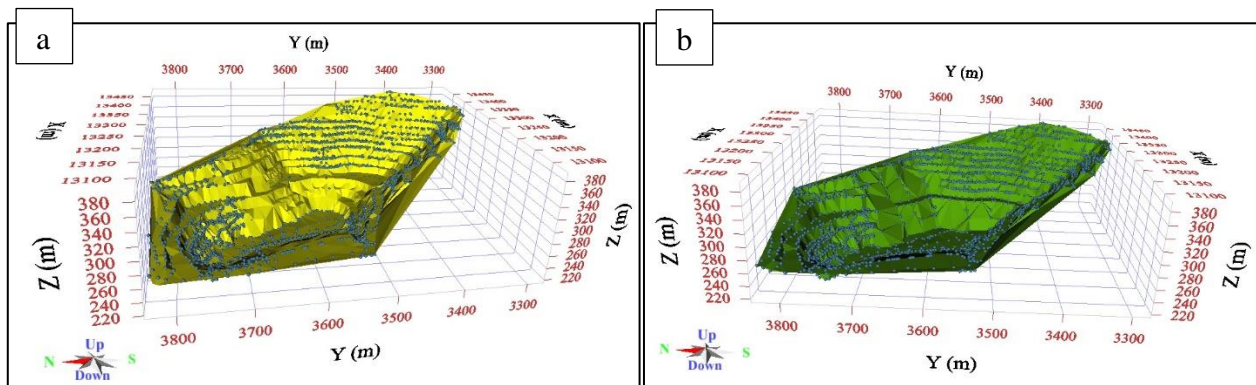


Fig. 16 Modello digitale del terreno DTM relativo allo stato di fatto della cava 2023 (a) ed allo stato finale del progetto (b)

Si possono raccogliere i blocchi del volume da coltivare in porzioni, identificate dal gradone di altezza nota e dalla zona, definita dalla coordinata Y (tab.5). In fig. 17 sono riportate le superfici dei volumi da abbattere per gradone. Una linea di separazione distingue fra zona nord ($Y > 3460$) e zona sud ($Y < 3460$). Nota l'altezza dei gradoni si ricavano i volumi da coltivare per gradone e per zona.

Tab. 5 Distribuzione del volume V_{kj} (m^3) oggetto di coltivazione per gradone (k) e zona (j).

Gradone	220-240	240-250	250-265	265-280	280-290	290-300	300-310	Tot
Zona Nor	64.110	49.015	84.252	47.796	28.653	30.482	22.557	326.865
Zona Sud			10.608	9.510	9.388	8.657	7.072	45.235
Tot	64.110	49.015	94.860	57.306	38.041	39.139	29.629	372.100



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

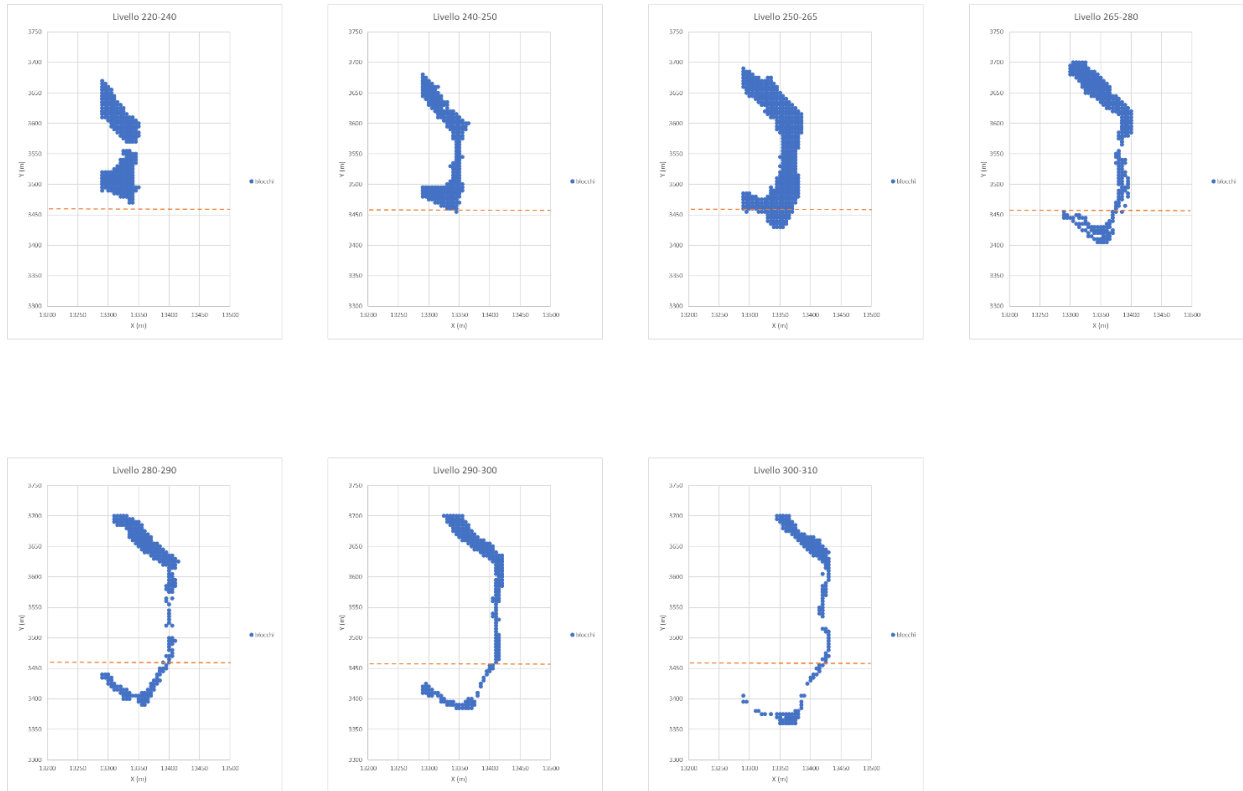


Fig. 17 Volumi da coltivare per livello. Distinzione tra zona nord ($Y > 3460$) e sud ($Y < 3460$)

E' stata introdotta la metodologia adottata per stimare le risorse disponibili, ovvero una stima globale del tenore del volume da coltivare suddiviso in domini (livelli, zone) omogenei. E di questi volumi elementari si stima il tenore estendendo il valore medio dei relativi fori da mina

$$t_V^* = \frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^7 t_{V_{kj}}^* V_{kj}}{V} \quad t_{V_{kj}}^* = \bar{t}_{l_{kj}}$$

Quindi sono selezionati tutti i dati relativi ai fori da mina intestati nei gradoni di interesse, suddivisi fra zona nord e sud. Si tratta di fori di lunghezza diversa, lunghezze da utilizzare per pesare i tenori dei singoli fori ed ottenerne così la media, questo per gradone e zona.

$$\bar{t}_{l_{kj}} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} t_{kj_i} l_{kj_i}}{\sum_{i=1}^{nd} l_{kj_i}}$$

La media pesata dei tenori delle singole porzioni consente in linea di principio di stimare il tenore medio del volume totale, ma sorge il problema che non tutti i volumi elementari da coltivare dispongono della corrispondente campionatura, ovvero di fori da mina pregressi su quel livello e quella zona (tab.6).



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Tab. 6 - Volumi elementari da coltivare per gradone e per zona ed i tenori medi dei fori da mina corrispondenti

		Gradone						
		220-240	240-250	250-265	265-280	280-290	290-300	300-310
Y > 3460	$t_{li}^*(\%)$	92,7	91,5	90,7	88,0	85,8	80,5	?
	$V_{li}(m^3)$	64.110	49.015	84.252	47.796	28.653	30.482	22.557
Y < 3460	$t_{li}^*(\%)$?	90,4	93,9	94,2	?
	$V_{li}(m^3)$			10.608	9.510	9.388	8.657	7.072

Occorre quindi valutare un criterio per assegnare una stima del valore medio ai 2 domini del livello 310 ed al volume del gradone 265 sud.

Per quanto riguarda il gradone 265 zona sud si può fare riferimento ai dati della zona nord dello stesso gradone (90,7%) oppure ai dati della zona sud, ma del gradone superiore (90,4%). La zona sud ha sempre dei tenori superiori ai pari gradoni della zona nord e le loro differenze per gradone sono sempre significative, anche se tendono a ridursi procedendo dall'alto verso il gradone 265. Sembra cautelativo considerare il valore minore dei campioni circostanti, semplicemente estendendo verso il basso il tenore medio (90,4%) del gradone 280 zona sud, ovvero dei dati più prossimi, distanti pochi metri in verticale (10-15 m).

Per quanto riguarda il gradone 310 zona sud i dati più prossimi sono quelli del gradone sottostante (94,2%). Ciò appare consistente con l'evoluzione verticale dei tenori della zona sud che mostrano una sostanziale costanza a piccola scala.

La ricostruzione di un tenore medio per il gradone 310 nord richiede maggiore attenzione. Da un lato occorre considerare i tenori disponibili più prossimi, ovvero quelli dei fori da mina del gradone sottostante (300) e dei fori eseguiti al livello 325, anche se non interessato dalla futura coltivazione. Dall'altro occorre sfruttare l'importante informazione relativa al ritrovamento di inclusioni argillose importanti, visibili sulla fronte. Sembra logico correggere il tenore medio dei due livelli contigui con un volume a tenore 0 di cui non si conoscono le dimensioni 3D, ma solo la superficie intersecata dal fronte:

$$\bar{t}_{l_{kj}} = (\lambda_1 t_{300,nord} + \lambda_2 t_{325,nord})(1 - \alpha)$$

Ove λ_1, λ_2 sono fattori proporzioni alla lunghezza delle due campionature. α è invece la quota di sterile presente nel volume di riferimento, percentuale che non è nota.

Si può quindi completare la tabella coi due valori desunti dai dati disponibili ed il terzo valore semplice funzione lineare di una informazione qualitativa che non può essere identificata oggettivamente, neanche probabilisticamente.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Ha senso proporre una piccola analisi di sensitività alle possibili percentuali di sterile nel dominio 310 nord, esistenti ma non misurate e quindi stimabili oggettivamente. Nell tabella 7 sono completati i tre tenori mancanti, con le due estensioni per la zona sud e con la relazione che diminuisce il valore medio dei dati soprastanti e sottostanti il gradone 310 (83,1%) con una percentuale di sterile da attribuire soggettivamente.

Tab. 7 Dati elementari della stima globale: tenori e volumi per livello e zona

		Gradone						
		220-240	240-250	250-265	265-280	280-290	290-300	300-310
$\gamma > 3460$	$t_{kj}^*(\%)$	92,7	91,5	90,7	88,0	85,8	80,5	81,3*(1- α)
	$V_{kj}(m^3)$	65725	50250	86375	49000	29375	31250	23125
$\gamma < 3460$	$t_{kj}^*(\%)$			90,4	90,4	93,9	94,2	94,2
	$V_{kj}(m^3)$			10875	9750	9625	8875	7250

Nella figura 18 è riportato il grafico che materializza la sensitività del tenore medio del deposito suddiviso in 12 pannelli al variare della percentuale di sterile attribuita al pannello 310 nord. Il risultato finale indica un tenore medio in gesso che varia fra l'87% e l'88% in caso di percentuali di sterile nel gradone 310 nord variabili fra il 30 e il 40%.

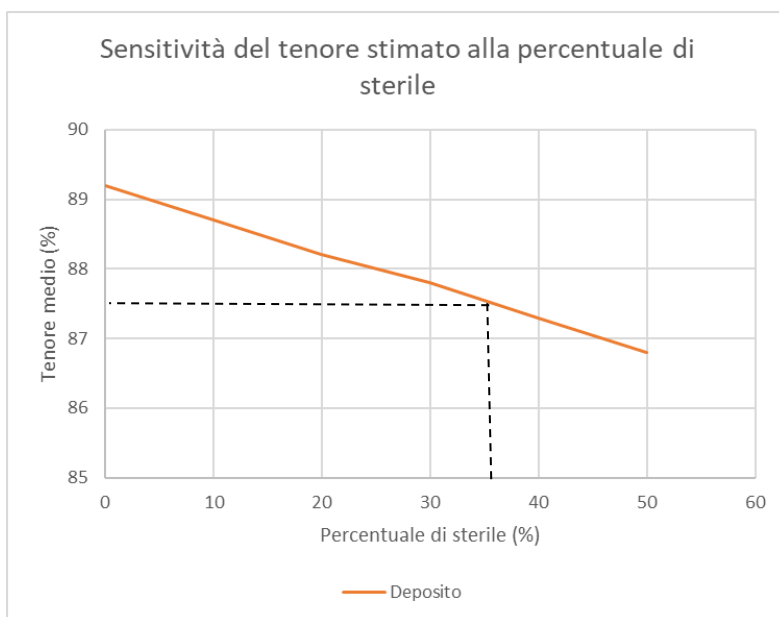


Fig. 18 Sensitività del tenore in gesso stimato del deposito alla variazione della percentuale di sterile del gradone 310 nord



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

I tenori così attribuiti ai pannelli completano coerentemente i due trend verticali dei tenori dei fori da mina per zona (fig.19).

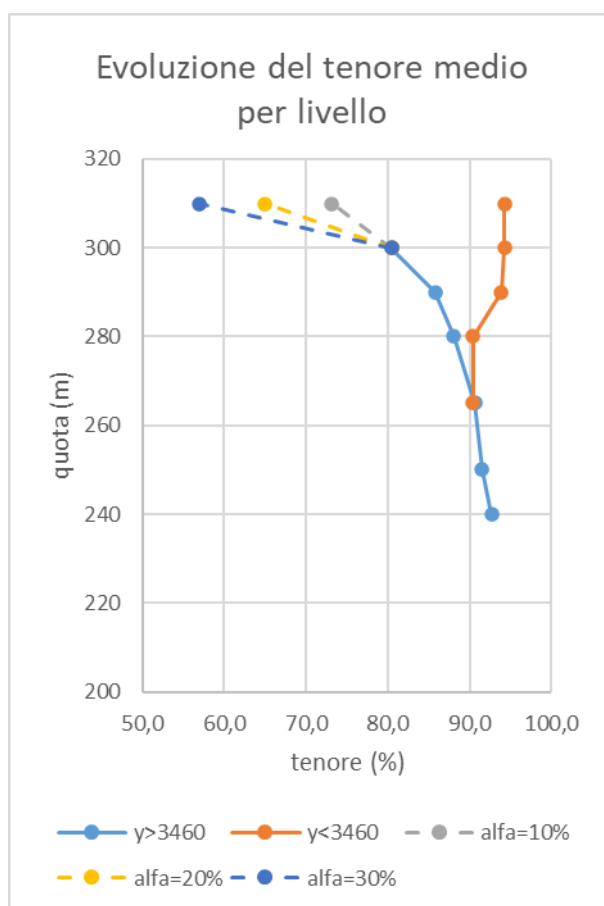


Fig. 19 Evoluzione verticale dei tenori medi stimati dei pannelli elementari per zona.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

LA PIANIFICAZIONE DELLA COLTIVAZIONE

9. LE UNITA' DI SELEZIONE

Ad ognuno dei 12 volumi per livello e zona corrisponde una distribuzione dei tenori dei blocchi elementari del modello. Da questi si possono ricavare le distribuzioni dei tenori delle volate del tipo illustrato nella figura 20. Questo lavoro sulle dodici distribuzioni potrebbe essere utile in fase di programmazione delle coltivazioni per identificare una politica di controllo dei tenori e di aggiornamento del modello a blocchi.

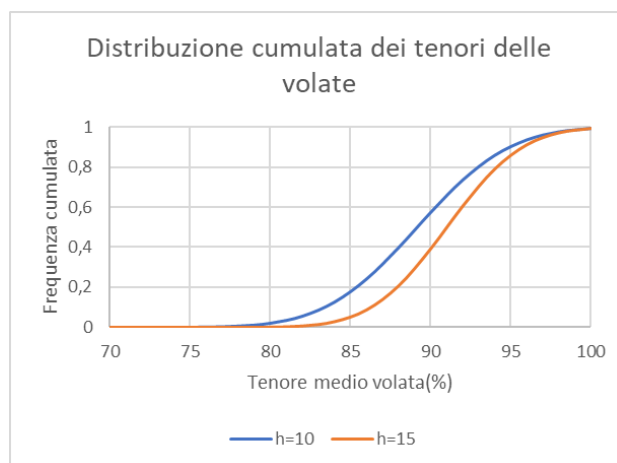


Fig. 20 Distribuzione cumulata dei tenori medi in gesso delle volate dei gradoni di $h=10$ m e $h=15$ m

È confermata la diminuzione della capacità di selezionare all'aumentare del supporto, ovvero la dimensione della volata.

10. UN MODELLO 3D

La disponibilità di un modello a blocchi consente diverse opzioni come quello illustrato nel successivo capitolo 12.

Per costruire un modello a blocchi, oltre alla loro dimensione occorre conoscerne le concentrazioni in gesso. Vi sono due modelli numerici con cui attribuire i tenori ai blocchi, quello in cui i tenori sono stimati e quello per cui i tenori sono simulati. Nel primo caso l'obiettivo è quello di ricostruire la distribuzione spaziale del tenore in gesso nel deposito con la maggiore precisione possibile. Nel secondo caso l'obiettivo è quello di saggiare la risposta del deposito a determinate politiche di produzione basate sul controllo del tenore.

Il prerequisito per entrambi i modelli numerici è la disponibilità del variogramma, ovvero della funzione di autocorrelazione spaziale che deve essere compatibile col supporto delle informazioni e



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

con le dimensioni dei blocchi. Ad esempio, un blocco può essere discretizzato in punti ed allora occorre un variogramma ottenuto a partire da dati assimilabili a punti.

Per costruire un modello stimato, oltre alla funzione variogramma, occorrono dei dati all'interno del deposito per potere stimare i blocchi, e questo non è il caso di Monte Tondo, perché i dati sono esterni.

Per costruire un modello simulato occorre conoscere, sempre oltre al variogramma, la legge (distribuzione di probabilità) dei tenori con supporto pari ai blocchi. Questa non è la distribuzione dei tenori dei campioni e deve essere dedotta da quella sperimentale con procedure opportune.

Riportiamo di seguito un esempio di costruzione di un modello stimato utilizzando un software geostatistico avanzato ISATIS.NEO®. Nell'esempio è stata utilizzata una popolazione fittizia di tenori in gesso a supporto puntuale, dedotta dai dati campionari.

Il modello a blocchi utilizzato per creare il modello 3D della cava "Monte Tondo" è costruito con griglia $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$. La tabella 8 mostra i dettagli della griglia 3D. Nella figura 21 si presenta una rappresentazione grafica 3D.

Tab. 8 - Parametri della griglia utilizzata per la stima dei blocchi

	X	Y	Z
Numero di nodi	90	120	100
Dimensione della griglia (m)	5	5	5
Origine della griglia (m)	13080	3260	100.00



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

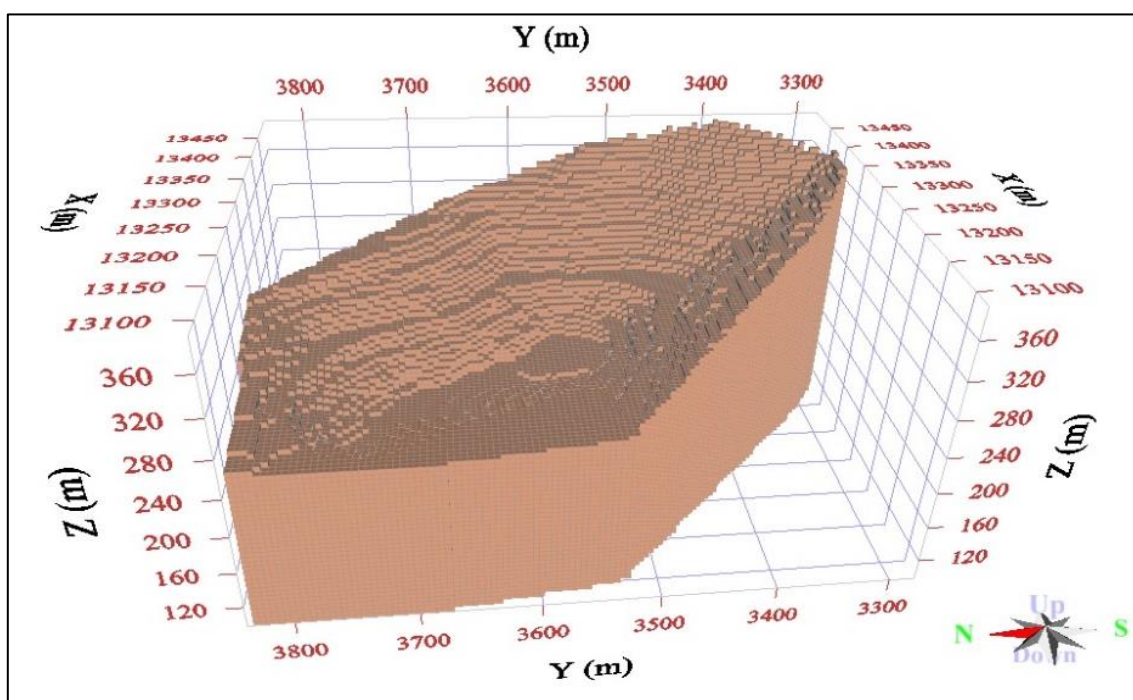


Fig. 21 Modello a blocchi della cava Monte Tondo

La prima operazione è la modellizzazione della variabilità spaziale (variogramma) alla scala di interesse e per il supporto utile. In figura 22 è riportato il risultato della modellizzazione del variogramma sperimentale

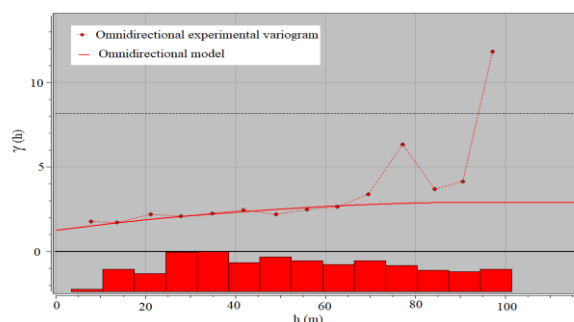


Fig. 22 Variogramma sperimentale, modello e numero di coppie.

Si procede quindi ad una stima lineare del tenore medio di ciascun blocco elementare del modello a 3D del deposito. La metodologia specifica di stima adottata in questo esempio è chiamata Krigaggio Ordinario (Ordinary Kriging). Ad ogni blocco corrisponde un valore stimato ed una misura della precisione della stima detta Varianza di Stima.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Si è identificato il volume di interesse selezionando tutti i blocchi compresi fra il DTM2023 e il DTM finale del progetto approvato (fig. 23).

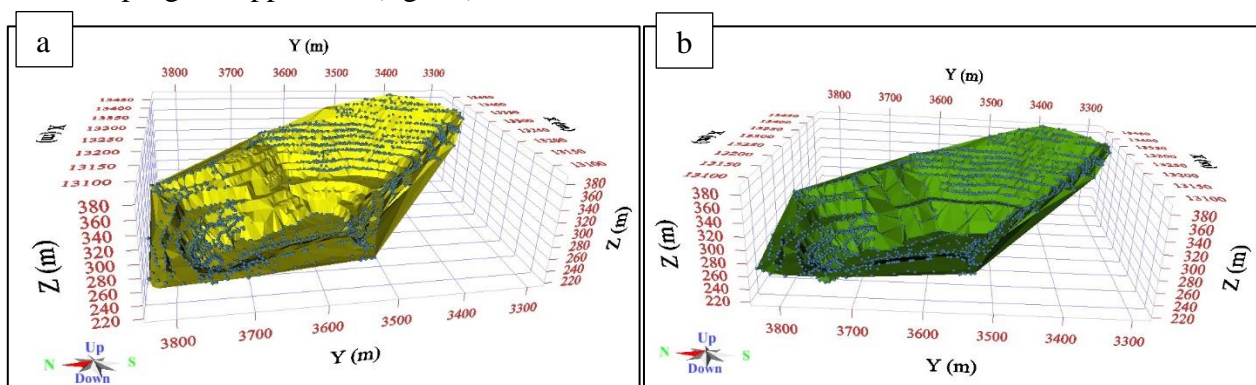


Fig. 23 Modello digitale del terreno DTM relativo allo stato di fatto della cava 2023 (a) ed allo stato finale del progetto (b)

Una rappresentazione grafica a 3D del modello numerico stimato è riportata nella fig. 24 ove si visualizzano per ogni blocco sia il tenore stimato, sia la varianza di stima.

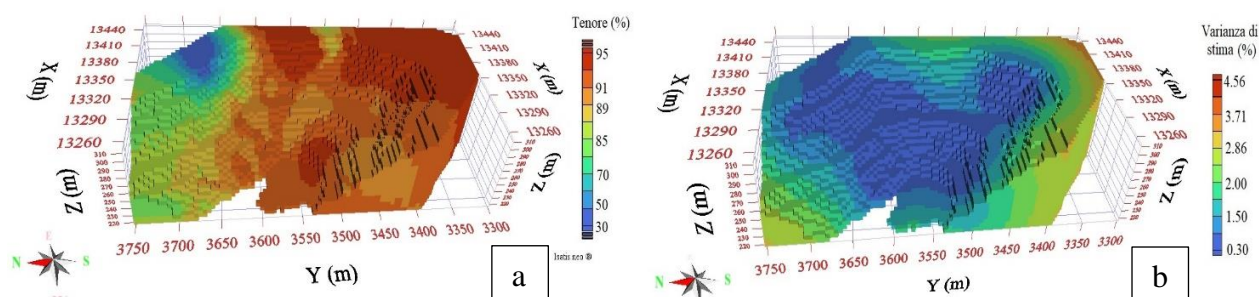


Fig. 24 Modello numerico a blocchi. a) valori stimati di gesso, b) varianza dell'errore di stima del tenore del blocco.

Dalla mappa della varianza di stima si può notare come la precisione sia maggiore (varianza inferiore) nei pressi dei campioni e dove si hanno informazioni, cioè principalmente dove sono state effettuate le volate tra il 2021 e il 2023.

11. LA PIANIFICAZIONE DELLA COLTIVAZIONE E LA STABILIZZAZIONE DEL TENORE DI ALIMENTAZIONE

Il problema della selezione delle riserve tecnicamente ed economicamente recuperabili, nel caso di Monte Tondo, non è quello di garantire l'economicità della volata, attraverso un cut-off determinato dal valore di mercato del gesso. Infatti, il tout-venant è oggetto di una cessione interna. È richiesta, invece, la costanza del tenore di alimentazione t_a agli impianti. pari all'87 – 88% in gesso.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Dal punto di vista del recupero del giacimento, essendo il tenore medio paragonabile al tenore richiesto dall'alimentazione, la resa in peso della coltivazione può raggiungere teoricamente il 100%, potendosi sfruttare tutto il minerale estratto qualora si sia in grado di garantire la giusta miscelazione fra volate più ricche e volate più povere.

Possiamo distinguere due diverse politiche atte a garantire una corretta miscelazione, una a media lunga scala temporale ed una a corto termine

La politica della miscelazione e la pianificazione a medio-lungo termine

- Si basa su valori stimati
- Deve garantire la coltivazione annuale di zone a tenori compatibili ai fini della miscelazione

La politica della miscelazione a breve termine sui dati veri delle volate

Il problema di una corretta miscelazione a corto termine è complesso per varie ragioni tra cui:

- il tipo di processo applicato al tout-venant dall'abbattaggio all'alimentazione dell'impianto: sequenza di abbattaggio, caricamento con la pala, trasporto con dumper, frantumazione, etc.
- le modalità di miscelazione fra materiali provenienti da volate diverse;
- il valore dei tenori delle volate.

Da un punto di vista teorico, date due volate, una con tenore maggiore ed una con tenore minore del tenore di alimentazione richiesto, è possibile ottenere il prodotto voluto giocando sul rapporto dei volumi da miscelare. Supponendo di mirare a un tenore di alimentazione dell'87%, la relazione elementare da considerare è la seguente

$$87\% = \frac{t_+ \times v_+ + t_- \times v_-}{v}$$

Le frazioni da miscelare sono immediatamente dedotte

$$v_{r+} = \frac{v_+}{v} \quad v_{r-} = \frac{v_-}{v}$$

In pratica, vi sono dei problemi tecnici, come ad es. la necessità di rispettare le condizioni di stabilità dei versanti, la progressione dei vuoti, la capacità di caricare volumi parziali di una volata/dumper. Alla fine, benché si conoscano solo dopo perforazione i tenori di due volate da sparare in sequenza, si conoscono le caratteristiche delle zone di provenienza per cui si riesce a garantire di potere miscelare una volata con tenore maggiore della media globale, con un'altra di tenore minore.

Analizzate le polveri dei fori da mina è possibile calcolare i volumi delle due volate da miscelare utilizzando le relazioni elementari considerate.

In conclusione, una corretta miscelazione richiede:

- una attenta programmazione dell'avanzamento dei fronti;
- una corretta miscelazione dei volumi provenienti da ciascuna volata.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Un potenziamento della capacità di miscelazione potrebbe derivare da una perforazione anticipata dei fori da mina di più volate, in modo da avere una maggiore capacità di selezione ottimale, compatibilmente coi vincoli geomeccanici e di transito. Eventuali piccoli stock tampone con materiale di caratteristiche prefissate, potrebbero rivelarsi utili in caso di attraversamento di zone con bassa variabilità del tenore.

Tutte queste politiche possono alimentare una simulazione della coltivazione e, una volta disponibile il corretto modello numerico del deposito, si possono testare diversi tipi di programmazione e, sulla base dei risultati di consuntivo virtuale, scegliere la più adeguata, in termini tecnico-economici.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

12. BIBLIOGRAFIA

- Casertano, D., 2023, “STUDIO SULL’OTTIMIZZAZIONE DELLE VOLATE EFFETTUATE NELLA CAVA MONTE TONDO MEDIANTE L’UTILIZZO DEL SOFTWARE O-PITBLAST”, Tesi di Laurea in Miniere e Cave M, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio, Università di Bologna “Alma Mater”, A.A. 2022-2023.
- Fanti, A., 2021, “PROGETTO PER IL PROSEGUIMENTO DELLA COLTIVAZIONE DELLA CAVA DI MONTE TONDO AUTORIZZATA CON LA DELIBERAZIONE MOTIVATA DELLA UNIONE DELLA ROMAGNA FAENTINA prot. N. 59321 del 05/10/2017 – Quinquennio 2022 – 2027” presentato da SAINT-GOBAIN ITALIA S.p.A., Borgo Rivola (RA).
- Ricci, R. 2004, “RELAZIONE GEOLOGICA INTEGRATIVA – PROGETTO DI AMPLIAMENTO DELL’ATTIVITÀ ESTRATTIVA PER LA CAVA DI GESSO DI MONTE TONDO”, Chieti, settembre 2004