Il camino di collasso del 25 aprile 1984 in territorio di Belvedere di Spinello (Crotone)

Cesare Roda, Grazia Martelli

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università. Via Cotonificio, 114, 33100 Udine roda@uniud.it, grazia.martelli@uniud.it

The sink hole of April 25 1984 near the Belvedere di Spinello Village (Crotone, Calabria)

ABSTRACT: Abstract: Near the Belvedere di Spinello village (Crotone, Calabria) a rock salt mine worked by solution method is active since 1970. The exploited salt layer is a member of the well known Messinian evaporite formation, that in the mine area outlines an asymmetrical antiform with N20E-S20W axial direction. The eastern limb of the anticline has a gentle dip, whereas the western limb is sub vertical and truncated by a fault. The thickness of the exploited salt layer decreases eastward from a maximum comprised between 250 and 600 meters in correspondence to the hinge of the anticline to few meters at the border of the mine area. The closure of the salt layer westward is unknown. In the North South direction the thickness of the salt layer varies, and the salt layer is also present outside the mine area northward and southward, as shown by some exploration wells. In the mine area the maximum thickness is reached in the southern side, were the anticline becomes an initial diapir fold. In the northern area, the first one mined with the method of two wells connected by hydrofracturation, the solution reached the top of the salt layer and five sink holes reached the topographic surface. The largest sink hole formed on April 25, 1984 during a few days pause of the mining activity, outside the mined area. This sink hole reached the surface at the toe of a hill triggering a slide and overflow of the brine. The hole is located in correspondence of the maximum height of the hinge of the anticline, where the formations capping the salt layer have the minimum thickness. Although the sink hole is located outside the mined area, the formation of the underground cavity responsible for the collapse is mainly due to the mining activity. Nevertheless natural dissolution has also contributed to the enlargement of the cavity.

Key terms: Sink hole, Solution mine, Rock salt, Crotone basin, Calabria Termini chiave: Camino di collasso, Coltivazione mediante dissoluzione, Salgemma, Bacino crotonese, Calabria

Riassunto

Il giorno 25 aprile 1984 alle ore 5 del mattino lungo il torrente Valle Acqua del Gallo, ai piedi del rilievo di quota 201, al confine occidentale del comprensorio della miniera di salgemma di Belvedere di Spinello (Crotone), si sono verificati i seguenti tre fenomeni: formazione di un camino di collasso pieno di acqua salata; frana della collina di quota 201 che è scivolata, con movimento da Ovest verso Est, entro il camino di collasso; fuoruscita dal camino di collasso di acqua salata che ha alluvionato la pianura sottostante. Nei giorni successivi il camino di collasso aveva in superficie la forma di un laghetto circolare con diametro di circa 50 m e profondità massima di circa 60 m.

Le indagini eseguite per appurare le cause dei tre fenomeni citati sono state limitate alla relazione tra l'attività della miniera, nella quale l'estrazione del salgemma avveniva mediante dissoluzione tra coppie di pozzi, ed il fenomeno di collasso. Questa nota riprende la relazione elaborata dal primo dei due autori nel settembre del 1984, con alcune notazioni sulle condizioni naturali che hanno favorito la formazione del camino di collasso al di fuori

dell'area interessata dalla attività mineraria.

Successione stratigrafica nell'area della miniera

Il giacimento di salgemma coltivato in comune di Belvedere di Spinello (Crotone) è parte della regione al bordo orientale della Sila nota nella letteratura geologica come Bacino Crotonese (BC) (Ogniben, 1955; Roda, 1965; Van Dijck, 1991).

La rocce sedimentarie affioranti nel BC si sono tutte sedimentate durante il Neogene; i banchi di salgemma sfruttati fanno parte della successione evaporitica messiniana diffusa in tutto il Bacino Mediterraneo. Tenuto conto del carattere di questo lavoro, la successione sedimentaria del bordo Nord Occidentale del BC, nella quale si trova la miniera, viene solo delineata, rinviando ai lavori citati in bibliografia per approfondimenti.

La successione sedimentaria, trasgressiva sul Cristallino della Sila, inizia con le arenarie ed i conglomerati della Formazione di San Nicola, sovrastati dalle Argille marnose del Ponda di età Tortoniana. I nomi delle due formazioni, introdotti da Ogniben (1955), sono stati utilizzati anche

nella letteratura geologica successiva. Le argille marnose passano gradualmente verso l'alto a laminiti organogene di colore chiaro, simili al Tripoli noto in Sicilia.

La successione delle sovrastanti formazioni evaporitiche non è facilmente ricostruibile in superficie nell'area mineraria (Figura 1) per la cattiva esposizione degli affioramenti; è pertanto necessario affidarsi ai risultati dei sondaggi. Nei lavori del primo dei due autori è stata descritta una successione di tre distinte formazioni, denominate: Formazione evaporitica inferiore, Formazione detritico salina, Formazione evaporitica superiore.

A separare i terreni che contengono strati di gesso dai sovrastanti terreni che non contengono depositi evaporitici

si trova una formazione conglomeratica, denominata Conglomerato delle Carvane, da una località nei pressi di Marcedusa dove la formazione è particolarmente sviluppata. Al tetto dei conglomerati il passaggio è graduale ma rapido ai sedimenti più fini, prima arenaria poco cementata poi argilla sabbiosa e infine marna argillosa.

Si tratta della formazione nota con il nome di Marna argillosa dei Cavalieri. Nella sezione illustrata da Roda (1965) la formazione ha uno spessore di circa 300 metri, mostra un contenuto di calcite decrescente dal basso verso l'alto, contiene sottili intercalazioni con granulometria siltitico-arenitica, e contiene una microfauna che permette di attribuire la formazione allo Zancleano.

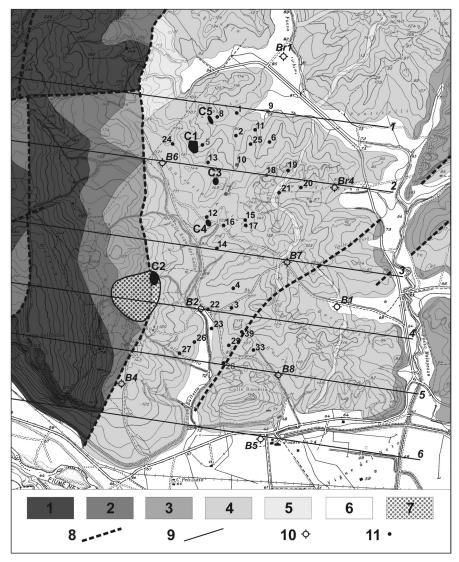


Figura 1: Carta geologica dell'area della miniera. 1: Molassa di Zinga; 2: Formazione di Spartizzo; 3: Arenaria di Scandale; 4: Argilla marnosa di Cutro; 5: Intercalazioni arenacee nella Formazione di Cutro; 6: Alluvioni recenti; 7: Frana del 25 aprile 1984; 8: Faglie; 9: Tracce delle sezioni; 10: Sondaggi esplorativi; 11: Pozzi di produzione.

Geological map of the mining area. 1: Zinga sandstone; 2: Spartizzo Formation; Scandale sandstone; 4: Cutro marly clay; 5: Layers of sandstone intercalated in the Cutro Formation; 6: Alluvial plain; 7: Landslide of April 25 1984; 8: Fault; 9: Trace of geological profiles; 10: Exploration wells; 11: Production wells.

Al di sopra ed in parziale eteropia di facies la Marna argillosa dei Cavalieri passa gradualmente ad una formazione arenacea nota con la denominazione di Molassa di Zinga. Si tratta di una formazione con significato regressivo rispetto alla Marna argillosa dei Cavalieri.

Le tre formazioni del Pliocene antico (Carvane, Cavalieri e Zinga) non sono state attraversate dai pozzi nell'area della miniera, dove le formazioni Plioceniche più recenti poggiano direttamente sui depositi evaporitici.

Nell'area della miniera, così come in una ampia zona al bordo Nord Occidentale del BC, la successione attribuibile al Piacenziano inizia con la Formazioni di Spartizzo di deposito lagunare, che passa verso l'alto e verso Est alla Formazione delle arenarie di Scandale e quindi alle Argille marnose di Cutro, le quali completano, nell'area della miniera, la successione sedimentaria.

I depositi evaporitici nell'area della miniera

Nei sondaggi ubicati nella parte settentrionale dell'area mineraria è possibile distinguere unità litostratigrafiche di rango inferiore a quello della formazione, rappresentate da pacchi di strati ben caratterizzati mediante le misure geofisiche in pozzo. Al contrario, nella parte meridionale dell'area mineraria la mancanza di pozzi che hanno attraversato tutte le formazioni evaporitiche e l'ispessimento dei banchi di salgemma, con la formazione di una struttura di tipo diapirico, rendono più difficile riconoscere la successione stratigrafica di dettaglio evidenziata nella zona settentrionale. Nei sondaggi perforati a Sud del Fiume Neto, al di fuori dell'area della miniera, si ritrova la stratigrafia di dettaglio, cosicché la struttura diapirica appare limitata alla parte meridionale della zona mineraria.

Qui di seguito vengono elencati i litotipi attraversati dal pozzo TS 14, ubicato nell'area centrale della miniera, procedendo dal basso verso l'alto e facendo riferimento alle profondità misurate a partire dalla tavola rotary.

L'intervallo più antico è stato attraversato tra le profondità di m 753 e m 817: si tratta di argilla marnosa con litologia omogenea e tempo di transito compreso tra 90 e 105 microsecondi per piede nei 27 metri più bassi e con litologia più varia nei 37 metri più alti. Nei rapporti interni questo intervallo è stato indicato con la denominazione di *Argilla marnosa di base*; probabilmente essa corrisponde alla parte sommitale della Formazione del Ponda ed alle sovrastanti laminiti.

Segue un banco di anidrite potente 10 metri, che passa gradualmente verso l'alto ad una alternanza di strati di anidrite, argilla e gessarenite: *Anidrite di base* nel lessico della miniera.

Al di sopra della Anidrite di base il pozzo TS 14 ha attraversato un banco di salgemma intercalato tra due strati di anidrite. Lo spessore complessivo dei tre strati è di 18 m, mentre il solo salgemma ha uno spessore di 11 m: *Terzo banco di sale*. È stato attraversato da altri nove pozzi, con spessore variabile tra 4 e 22 metri.

Al di sopra del Terzo banco di sale il sondaggio TS 14 ha attraversato un intervallo potente 22 m formato da quattro strati di anidrite separati da sottili partimenti argillosi: *Quattro strati di anidrite*. Si tratta di un intervallo facilmente riconoscibile nei pozzi per il caratteristico profilo del sonic log, e quindi esso rappresenta un livello utile per le correlazioni tra le diverse successioni attraversate nei pozzi.

Proseguendo verso l'alto si rinviene il *Secondo banco di sale*, potente 15 m, attraversato da tutti i pozzi perforati nella zona settentrionale della miniera con spessore variabile tra 10 e 36 metri.

Al di sopra si trova un intervallo con spessore di 31 metri facilmente riconoscibile nei pozzi; è formato, dal basso, da uno strato di gessarenite che passa gradualmente verso l'alto ad argilla, da due strati di anidrite separati da un partimento argilloso, da uno strato di salgemma (Banco di sale 1L), ed infine da un secondo banco di gessarenite che passa verso l'alto ad argilla. L'intero intervallo è detto *Partimento principale*.

Proseguendo la descrizione del pozzo TS 14 verso l'alto, si rinviene il *Primo banco di sale*, che comprende l'intervallo tra le profondità di m 379 e m 619 per uno spessore complessivo di m 240. Nel pozzo TS 14 il primo banco di sale è diviso in quattro strati separati da partimenti sterili. I due strati più recenti sono formati da salgemma ad elevato tenore di NaCl, mentre i due strati più antichi sono ricchi di noduli di argilla e di anidrite. Questa suddivisione del Primo banco di sale non è sempre evidente nei pozzi, anche se nella maggior parte di essi al tetto del Primo banco di sale si trova un livello con alto tenore di salgemma. Solo il Primo banco di sale viene coltivato nella miniera.

Nel pozzo TS 14 segue uno strato di 2 metri di argilla e quindi si trova la formazione mediopliocenica nota come Argille marnose di Spartizzo, con una ampia lacuna che comprende formazioni visibili in affioramento ed in parte anche nei pozzi ubicati all'estremità orientale dell'area mineraria. In questi pozzi, tra il Primo banco di sale e la Formazione di Spartizzo si trova un potente intervallo formato dalla alternanza di strati di argilla con strati di gessarenite, gessorudite e anidrite. Localmente nella parte bassa di questo intervallo si trovano anche straterelli di salgemma di limitato spessore, e probabilmente anche di limitata estensione. In miniera l'intervallo, che può essere correlato con la Formazione evaporitica superiore, è noto come *Gessi di tetto*.

Struttura tettonica

In affioramento, nella zona della miniera le formazioni plioceniche (Zinga, Spartizzo, Scandale e Cutro) disegnano una sinclinale con asse orientato in direzione Nord-Sud. Il fianco orientale della sinclinale è tagliato da una faglia diretta, anch'essa con direzione Nord-Sud nella zona della miniera: Faglia di Timpa del Salto. Il fianco orientale della sinclinale è tagliato da una faglia diretta, orientata da NE a

SW (Faglia di Serra Filetto), e probabilmente da altre superfici di rottura con dislocazioni minori, e pertanto non facilmente riconoscibili in superficie.

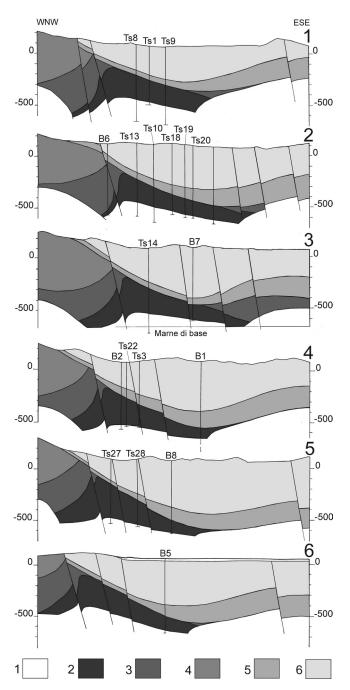


Figura 2 – Sezioni geologiche nell'area mineraria. 1: Argille marnose del Ponda; 2: Formazioni evaporitica inferiore e detritico salina; 3: Formazione evaporitica superiore; 4: Marne dei Cavalieri e Molassa di Zinga; 5: Formazione di Spartizzo; 6: Arenarie di Scandale e Argille marnose di Cutro.

Geological profiles in the mining area. 1: Ponda marly clays; 2: Lower and salt bearing evaporites; 3: Upper evaporites; 4: Cavalieri marl and Zinga sandstone; 5: Spartizzo Formation; 6: Scandale sandstone and Cutro marly clays.

Tutte queste faglie hanno il blocco orientale ribassato. La Faglia di Timpa del Salto si estende per decine di chilometri e delimita verso Ovest l'area mineraria.

In sottosuolo i pozzi hanno messo in evidenza che i depositi messiniani sono invece piegati a formare una anticlinale con asse che, nella zona della miniera, forma un angolo di circa 20° verso Est rispetto alla direzione meridiana, e pertanto con cerniera che, nella zona settentrionale della miniera, dista circa 300 m dalla linea di affioramento della Faglia di Timpa del Salto, mentre nella zona meridionale della miniera coincide con la linea di affioramento della Faglia di Timpa del Salto.

Il fianco orientale della anticlinale è stato attraversato da numerosi pozzi, e pertanto può essere ricostruito con buona precisione, mentre il fianco occidentale è stato attraversato solo dal sondaggio esplorativo Barretta 6 e dal Pozzo TS 24, e pertanto risulta impossibile disegnare in dettaglio il suo andamento. L'analisi delle misure geofisiche eseguite nel pozzo TS 24, nel quale sono evidenti ripetizioni della successione, ha permesso di concludere che il fianco occidentale della anticlinale ha pendenza vicina alla verticale o, localmente, è anche rovesciato. L'anticlinale è pertanto asimmetrica con vergenza verso Ovest.

Tra le deformazioni tettoniche che hanno interessato la successione stratigrafica nell'area della miniera solamente quelle verificatesi dopo la sedimentazione dei banchi di salgemma possono avere contribuito alla formazione del camino di collasso. Nell'area della miniera si possono distinguere due fasi tettoniche posteriori al deposito del salgemma: la prima contemporanea e posteriore al deposito della Formazione di Zinga e la seconda posteriore alla sedimentazione della Formazione di Cutro.

Alla prima fase tettonica è attribuibile l'anticlinale asimmetrica, riconosciuta mediante i pozzi, che deforma le formazioni evaporitiche. Il fianco occidentale dell'anticlinale si chiude in corrispondenza della Faglia di Timpa del Salto, che, in sottosuolo, non si caratterizza come una faglia diretta, ma come una faglia inversa, con innalzamento del blocco orientale. Su questo blocco rialzato l'erosione ha inciso profondamente asportando tutto l'intero pacco di strati del Pliocene inferiore e, localmente, anche parte delle formazioni evaporitiche. In alcuni pozzi è stato osservato il contatto diretto tra la Formazione di Spartizzo ed il Primo banco di sale.

La coltivazione della miniera

L'area interessata dalla attività mineraria per la produzione di salgemma ha forma sub rettangolare ed è delimitata in superficie: ad Ovest dalla Faglia di Timpa del Salto, a Nord e ad Est dalla Strada Provinciale che collega l'abitato di Belvedere di Spinello con la Strada Statale di fondo valle del Fiume Neto, a Sud dalla predetta Strada Statale. I limiti orientale ed occidentale delimitano anche in sotterraneo il giacimento salino, mentre i limiti settentrionale e meridionale non corrispondono in sotterraneo a limiti

geologici, cosicché il banco salino si estende nelle direzioni Nord e Sud molto oltre i limiti dell'area interessata dalla attività mineraria.

La miniera di salgemma di Timpa del Salto è stata messa in produzione nel 1969 mediante dissoluzione in situ del salgemma e recupero della salamoia satura. La produzione è iniziata nella parte settentrionale della concessione (Bacino Nord), con l'obiettivo di migrare gradualmente verso Sud in relazione con il progressivo esaurimento del giacimento.

Inizialmente è stato adottato il metodo di produzione che utilizza una coppia di pozzi: un pozzo per l'iniezione di acqua dolce ed un secondo pozzo per l'eduzione della salamoia satura. Il collegamento tra i due pozzi veniva realizzato mediante idrofratturazione lungo una superficie di stratificazione alla base del banco di salgemma.

Questo metodo produce in sottosuolo cavità che, fino a quando la dissoluzione non raggiunge il tetto del banco salito, sono in parte riempite dai residui insolubili depositati per decantazione e per il resto da salamoia. Quando la dissoluzione raggiunge il tetto del banco salino, dalle sovrastanti formazioni detritiche cominciano a staccarsi blocchi i quali spiazzano la salamoia e producono la migrazione della cavità verso l'alto. Questo processo è destinato ad arrestarsi quando la cavità, per effetto dello smembramento dell'ammasso roccioso, viene riempita, ovvero quando la cavità raggiunge la superficie, formando in tal modo un camino di collasso o sink hole.

La formazione dei camini di collasso dipende dalle caratteristiche meccaniche delle formazioni interessate al fenomeno, dalle dimensioni della cavità; lo spessore delle formazioni al tetto della cavità determina il fatto che il progressivo collasso raggiunga o meno la superficie topografica.

La formazione dei camini di collasso è stata studiata in diverse condizioni. Si tratta quindi di fenomeni sufficientemente conosciuti per potere essere previsti con buona approssimazione, note le condizioni del sottosuolo: dimensioni della cavità, struttura geologica e caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso.

La produzione, nella zona settentrionale della miniera di Timpa del Salto è proseguita fino al 1986 mediante la perforazione di numerose coppie di pozzi. In sottosuolo sono state create varie cavità, tra le quali si sono realizzati numerosi collegamenti, come è dimostrato dal bilancio tra l'acqua dolce iniettata nei vari pozzi e la salamoia prodotta.

Un primo camino di collasso si è formato nel 1983 in corrispondenza del pozzo TS 24 senza conseguenze collaterali, in quanto il volume di salamoia fuoruscito per lento trabocco è risultato molto modesto. Dopo l'evento del 25 aprile 1984 si sono formati altri tre camini di collasso nell'area Nord della concessione, sempre senza conseguenze ulteriori rispetto alla formazione di un laghetto inizialmente pieno di salamoia.

L'evento del 25 aprile 1984 si distingue dagli altri camini di collasso per il fatto che si è verificato ad di fuori

dell'area interessata dai pozzi di produzione, per la maggiore area del laghetto e per la contestuale formazione di una frana superficiale.

Nella zona meridionale della concessione (Bacino Sud) è stato adottato il metodo di coltivazione che prevede l'utilizzazione di pozzi singoli dotati di due tubazioni: la tubazione più interna per la iniezione dell'acqua dolce e l'intercapedine tra le due tubazioni per l'eduzione della salamoia.

L'adozione di questo metodo si è reso necessario in quanto la struttura diapirica del banco di salgemma non permetteva di realizzare collegamenti tra coppie di pozzi. Peraltro il metodo di produzione a pozzo singolo, che non si era potuto adottare nella zona settentrionale della concessione per la accentuata stratificazione ed il minore spessore del banco salino, è risultato perfettamente adeguato al maggiore spessore del banco salino della zona Sud ed alla presenza dei fitti sistemi di fratturazione del salgemma, prodotti dalle sollecitazioni che hanno determinato l'ispessimento del banco stesso.

Il metodo di produzione per mezzo di pozzi singoli determina la formazione di cavità approssimabili a cilindri irregolari con asse verticale, tra loro separate, la cui forma può essere periodicamente ricostruita mediante misure in situ. Questa procedura permette di controllare la migrazione della cavità verso la superficie, e pertanto permette di evitare la formazione di camini di collasso, rendendo disponibili le cavità, completata la produzione, per l'accumulo degli sterili.

L'attività della miniera

Fino al 25 aprile 1984 l'attività della miniera è stata ripartita tra due aree, dette bacino Nord e bacino Sud, le quali non sono collegate idraulicamente. Al di fuori di queste due aree vi erano delle coppie di pozzi e dei pozzi singoli che sono rimasti isolati dalla due aree principali.

Il bacino Nord comprendeva i pozzi TS 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 24, 25. Il bacino Sud comprendeva i pozzi TS 3, 4, 12, 14, 16, 22, 23, 26. Le coppie isolate sono: TS 15, 17, TS 18, 19, TS 20, 21. Altri pozzi già perforati non erano ancora entrati in produzione prima dell'evento del 25 aprile.

Nelle tre Tabelle 1, 2, 3 sono riportati i pozzi in attività nel quinquennio precedente l'evento del 25 aprile, distintamente per il bacino Nord, il bacino Sud e le coppie. L'ultima riga di ogni tabella indica la situazione in atto nei giorni precedenti la sosta che ha preceduto l'evento del 25 aprile 1984.

I metodi di produzione

Nei due anni 1970 e 1971 sono stati messi in produzione i primi 17 pozzi. Si tratta di dieci pozzi del Bacino Nord (TS 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13), di tre pozzi del Bacino Sud (TS 12, 14, 16) e delle due coppie TS 17-15 e TS 19-18.

Fino al 1974 l'attività nel Bacino Sud è stata modesta a causa delle difficoltà di realizzare e mantenere i collegamenti.

Tabella 1 – Pozzi attivi nel bacino Nord Wells working in the Northern mining area before the the sink hole

Data	Iniezione						Scarico					
12/78		5	10		13			2	6	7		11
07/79		5	10					2	6	7		
12/79		5	10		13			2	6			
07/80		5	10		13			2	6	7		
12/80		5	10		13			2	6	7		11
07/81			10	11		24	25	2	6			
12/81				11		24	25	2	6			
07/82				11			25	2	6			
12/82				11			25	2	6			
07/83		7	10				25	2	6			
12/83		7		11			25	2	6		9	
04/84	1						25	2	6		9	

Tabella 2 – Pozzi attivi nel bacino Sud Wells working in the Southern mining area before the the sink hole

Data	Iniezione							Scarico					
12/78	3		12					4		14			
07/79	3		12					4		14			
12/79	3		12		23			4		14	22		
07/80	3		12		23/22			4		14	22	/23	
12/80		4	12		23		3			14	22		
07/81		4			23		3				22		
12/81	3.	/4			23		3,	/4			22		
07/82	3	/4			23	26	3,	/4	12	14			
12/82					23	26			12	14			
07/83					23	26					22		
12/83						26					23		
04/84				16		26					23		

Tabella 3 – Coppie isolate

Pair of wells working before the formation of the sink hole

Data		
12/78	15 - 17	
07/79	15 - 17	20 - 21
12/79		21 - 20
07/80		20 - 21
12/80		20 - 21
07/81		20 - 21
12/81		21 - 20
07/82		21 - 20
12/82		21 - 20
07/83		21 - 20
12/83		21 - 20
04/84		21 - 20

Nel Bacino Nord e nelle coppie la produzione è stata realizzata iniettando nel pozzo o nei pozzi nei quali il banco di salgemma si trovava a quota più bassa e scaricando nel pozzo o nei pozzi nei quali il banco di salgemma si trovava a quota più elevata. Questa procedura è stata seguita per controllare l'andamento della dissoluzione, in quanto nelle cavità sotterranee si realizza una stratificazione tra acqua dolce più leggera in alto e salamoia più pesante in basso e la dissoluzione segue le superfici di stratificazione guidata dagli strati a diverso grado di solubilità o dagli strati insolubili. Per questo motivo la dissoluzione si muove verso l'alto seguendo le linee di massima pendenza degli strati.

Iniettando nel pozzo che ha intercettato il salgemma a quota più bassa, l'acqua si muove verso l'alto seguendo le linee di massima pendenza degli strati e pertanto la cavità tenderà a formarsi nell'intervallo fra i due pozzi della coppia, o comunque nelle adiacenze.

La possibilità che la caverna si formi al di fuori della congiungente i due pozzi sarà praticamente nulla se la congiungente stessa coincide con la linea di massima pendenza degli strati e aumenterà con il crescere dell'angolo tra la congiungente i due pozzi e la linea di massima pendenza degli strati. Tra due pozzi che hanno intercettato un banco di salgemma non orizzontale alla stessa quota la possibilità che la cavità si formi nell'intervallo tra i due pozzi sarà praticamente nulla.

Lo svantaggio di questo metodo consiste nel fatto che la lunghezza del percorso dell'acqua nel sottosuolo è limitata dalla distanza tra i due pozzi ed in tal modo per ogni coppia di pozzi viene definita una portata critica massima oltre la quale non si ottiene in scarico salamoia satura. Il valore della portata massima aumenta con il tempo, in relazione con l'ampliarsi della cavità.

Iniettando invece nel pozzo che ha intercettato il salgemma a quota più alta l'acqua dolce si trova già al di sopra della salamoia, e pertanto non è spinta a miscelarsi con la salamoia, ma rimane in posto, sciogliendo il tetto e le pareti della caverna e la dissoluzione procede verso l'esterno dell'intervallo tra i due pozzi, seguendo le linee di massima pendenza delle superfici degli strati. L'acqua saturata dal sale, spiazzata dalla nuova acqua dolce iniettata, si sposta verso il basso e si muove verso il pozzo di scarico, dove si trovano gli strati di liquido più denso, cioè la salamoia satura.

Questo metodo pertanto fornisce una portata maggiore di salamoia satura, essendo la portata critica massima definita solo dalla struttura del giacimento e non dalla distanza tra i due pozzi. Lo svantaggio sta nel fatto che la caverna si forma al di fuori della congiungente i due pozzi, cioè verso aree che generalmente non sono sufficientemente conosciute dal punto di vista strutturale per l'assenza di pozzi.

Nei primi anni di attività della miniera la pressione di iniezione era tale da equilibrare le perdite di carico per attrito, la differenza di densità tra salamoia di scarico e acqua dolce di iniezione e per portare la salamoia direttamente sul Colle Barretta, dove si trova la vasca della salamoia di carico per il salinodotto.

Questo schema di funzionamento è stato utilizzato nel Bacino Nord e nelle coppie fino all'inizio del 1980, quando si sono avute emergenze di salamoia legate all'attività della miniera; si ricorda in particolare l'emergenza lungo la faglia di Timpa del Salto del Febbraio 1980.

Per eliminare le emergenze di salamoia, dall'Aprile 1982 è stata abbassata la pressione di iniezione fino ad ottenere la salamoia alla bocca del pozzo di scarico. Questo provvedimento ha eliminato numerose emergenze.

Dallo stesso periodo è stata anche cambiata la direzione di iniezione sia nel Bacino Nord sia, dal Luglio 1981, nell'unica coppia rimasta in produzione (TS 20-21), e sono entrati in attività nel Bacino Nord i pozzi TS 24 e TS 25.

E' opportuno sottolineare il fatto che le emergenze indicano senza alcun dubbio che dal 1980 le cavità del bacino Nord non rappresentano un sistema isolato idraulicamente, come invece erano con ogni probabilità in precedenza, per il fatto che le cavità erano tutte all'interno del banco impermeabile di salgemma. Ciò significa che, a partire dal 1980, si sono create delle connessioni tra il sistema idraulico delle cavità ed il sistema delle falde idriche presenti negli acquiferi sovrastanti il salgemma. Queste connessioni possono essersi realizzate o lungo le linee di faglia ovvero attraverso sfondamenti del tetto del salgemma, che hanno messo a contatto le formazioni permeabili di Spartizzo e di Scandale con le sottostanti cavità piene di salamoie.

Nel Bacino Sud l'attività è stata avviata in tempi successivi e precisamente:

nel 1970/71: pozzi TS 12, 14, 16

nel 1973/74: pozzi TS 3, 4

nel 1980: pozzi TS 22, 23

nel 1982: pozzo TS 26.

Le difficoltà di collegamento tra i pozzi non hanno permesso di procedere con l'iniezione dal basso verso l'alto e l'attività dei pozzi è stata sempre legata alle necessità ed alle possibilità contingenti.

Il regime delle pressioni di iniezione è lo stesso che per il Bacino Nord.

Il bacino Nord

Nel bacino Nord sono stati iniettati fino all'agosto del 1984 18,8 milioni di m³ di acqua utilizzando 12 pozzi, con una media di oltre 1,5 milioni di m³ per pozzo.

I primi dieci pozzi (TS 1. 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13) sono stati perforati tra il 1968 ed il 1970, mentre i due pozzi TS 24 e 25 sono stati perforati nel 1980 e sono stati utilizzati esclusivamente come pozzi di iniezione. I due pozzi TS 1 e 2 sono stati utilizzati prevalentemente come pozzi di scarico, Nel pozzo TS 6, dal 1979 utilizzato come pozzo di scarico, è stata installata una pompa sommersa.

Nei giorni precedenti l'evento del 25 aprile l'iniezione avveniva attraverso i pozzi TS 1 e 25 e lo scarico mediante i pozzi TS 2, 6, 9.

Le misure eseguite nel Dicembre del 1984 nei pozzi agibili hanno mostrato che la dissoluzione non aveva raggiunto la base della Formazione di Spartizzo e che rimaneva in posto una soletta dello spessore di seguito indicato di anidriti, argille e gessareniti. TS 1, 52 m; TS 6,

98 m; TS 9, 117 m; TS 10, 18 m; TS 11, 106 m; TS 25, 79 m. Nei pozzi non agibili la situazione era la seguente: TS 2, rottura della colonna di rivestimento alla profondità di 54 m; TS 5, varie deviazioni della colonna da m 253 a m 34; TS 7, rottura della colonna a m 54; TS 8, deviazioni della colonna a m 348, 268, 93; TS 13, varie deviazioni da m 343 a m 48; TS 24, deviazione della colonna a m 225.

La presenza di consistenti spessori di evaporiti al tetto delle cavità di dissoluzione in corrispondenza dei cinque pozzi TS 1, 6, 9, 11 25 rappresenta una condizione che impedisce la risalita degli scavernamenti, in quanto i banchi di anidrite e di gessarenite realizzano un effetto arco scaricando sulle aree circostanti il carico litostatico dei terreni sovrastanti.

Il bacino Sud

La produzione nel bacino Sud è iniziata con i tre pozzi TS 12, 14, 16 perforati nel 1970. I tre pozzi sono stati spinti al di sotto del primo banco di salgemma. I pozzi TS 3 e 4, perforati nel 1968, sono entrati in produzione solo nel 1974 a causa della difficoltà di stabilire un collegamento tra i due pozzi e sono restati in attività fino all'inizio del 1982.

Dei numerosi pozzi successivamente perforati nella zona meridionale della miniera sono entrati in produzione solo i pozzi TS 22, di scarico, TS 23, prima di iniezione verso il pozzo TS 22 e quindi di scarico dal pozzo TS 26. La coppia TS 26 – TS 23 era l'unica in attività nel bacino Sud nell'aprile del 1984.

Complessivamente nei pozzi del bacino Sud sono stati iniettati 13 milioni di m³ di acqua, con una media di oltre 1,6 m³ per pozzo.

Nel corso della produzione sono state registrate rotture e deformazioni delle colonne dei tre pozzi TS 12, 14 e 16, In particolare, nel 1974 si è verificata una deviazione della colonna alla profondità di m 478 nel pozzo TS 14; nel 1978 il crollo della colonna del pozzo TS 12 dalla profondità di m 481; nel 1981 nuovo crollo della colonna dalla profondità di m 398 nel pozzo TS 12 e rottura della colonna alla profondità di m 28 nel pozzo TS 14; nel 1982 abbassamento di alcuni centimetri della testa del pozzo TS 16; nel 1983 deviazione della colonna dei tre pozzi TS 12, 14 e 16 rispettivamente alle profondità di m 130, 473 e 491.

Le coppie

La produzione nella coppia TS 18, 19 è stata interrotta nell'aprile del 1978 in quanto l'acqua iniettata non ritornava a giorno. La perdita di circolazione si ebbe mentre si iniettava nel pozzo TS 18, che riceveva ad alta portata e bassa pressione. Il pozzo TS 19 smise di scaricare e nello stesso tempo si ebbe anche un abbassamento del livello della salamoia. La perdita di circolazione è stata attribuita alla rottura della colonna del pozzo TS 19 alla profondità di m 382. La coppia ha lavorato prevalentemente con iniezione dal pozzo TS 19, cioè dal basso verso l'alto, e non è mai entrata in collegamento con il bacino Nord.

La produzione nella coppia TS 15 – 17 è cessata nel 1979 in quanto la coppia è stata considerata esaurita. La

coppia ha funzionato prevalentemente con iniezione dal pozzo TS 17, cioè dal basso verso l'alto.

L'unica coppia in attività nel 1984 è quella formata dai pozzi TS 20 e 21. Fino al luglio del 1981 l'iniezione è avvenuta dal pozzo TS 20; da quella data l'iniezione è avvenuta dal pozzo TS 21.

L'evento del 25 aprile 1984

Il 25 aprile 1984 alle ore 5 di mattina, dopo una fermata dell'attività mineraria di alcuni giorni, si sono verificati i seguenti fenomeni lungo la faglia di Timpa del Salto:

- a) Formazione di un camino di collasso di profondità sconosciuta e con dimensioni in superficie di 50 m per 120 m circa, secondo valutazioni non più verificabili.
- b) Franamento della collina di quota 201 m, con movimento diretto all'incirca verso NE, cioè verso la bocca del camino di collasso.
- c) Fuoriuscita dal camino di collasso di un volume sconosciuto di salamoia che, mista ad argilla, è scesa con violenza lungo il Fosso Barretta, ha ostruito il canale principale di derivazione del sistema di irrigazione ed ha alluvionato circa 80 ettari nella valle del Fiume Neto.

Nelle immediate vicinanze del camino di collasso l'onda di piena ha divelto le tubazioni della miniera, deformandole e trasportandole verso valle; in corrispondenza della ex strada per Belvedere di Spinello, attualmente abbandonata, l'onda di piena non ha danneggiato il canale principale di derivazione, semplicemente ostruendolo e provocando la fuoriuscita dell'acqua, mentre ha divelto le canalette di irrigazione trasportandole verso valle per alcune decine di metri. La zona della pianura, con gli argini costituiti dai rilevati stradali, ha funzionato da vasca di espansione.

Le prime valutazioni sulla quantità di acqua fuoriuscita hanno portato a valori compresi tra 10.000 e 100.000 m³; non è stato possibile ricavare un valore più preciso in mancanza di elementi sui quali basare un qualsiasi calcolo. L'unico dato sicuro è rappresentato dalle tracce del livello massimo raggiunto dalla salamoia lungo il Fosso Barretta, tracce che si trovano alcuni metri più in alto rispetto al letto del fosso. Questo fatto indica il passaggio di grandi volumi unitari di salamoia, ancorché per tempi molto brevi.

La successione degli eventi

Nei giorni successivi all'evento sono state formulate diverse ipotesi sulla successione relativa dei tre eventi sopra elencati e, di conseguenza, delle cause che hanno determinato l'evento. Le possibili combinazioni dei tre eventi sono teoricamente sei:

- a) Formazione del camino di collasso, Frana, Fuoriuscita della salamoia.
- b) Formazione del camino di collasso, Fuoriuscita della salamoia; Frana.
- c) Frana, Formazione del camino di collasso, Fuoriuscita della salamoia.
- d) Frana, Fuoriuscita della salamoia, Formazione del camino di collasso.

- e) Fuoriuscita della salamoia, Frana, Formazione del camino di collasso.
- f) Fuoriuscita della salamoia, Formazione del camino di collasso, Frana.

Le due successioni e) ed f), che vedono al primo posto la fuoriuscita della salamoia, corrispondono ad una eruzione. Non esistono in superficie indizi di sorta del fatto che l'evento del 25 aprile possa essere descritto come una eruzione. Infatti mancano, tutto intorno al camino di collasso, i segni della ricaduta della salamoia e del fango lanciati in alto dalla ipotetica eruzione, e il traliccio della linea elettrica, ubicato in corrispondenza del camino di collasso, è stato inghiottito non lanciato nella zona adiacente.

Se poi si considera la questione dal punto di vista del fatto che l'attività mineraria abbia potuto realizzare nel sottosuolo una pressione in grado di lanciare verso l'alto, non solo il volume della salamoia fuoriuscita ma anche il volume della roccia sovrastante, si deve concludere per l'impossibilità dell'evento, sia tenuto conto dell'energia disponibile sia per il fatto che le rocce di tetto, variamente permeabili, hanno una elevata capacità di dissipazione della pressione idrostatica.

Le due successioni di eventi c) e d) vedono al primo posto la formazione della frana. La prima delle due ipotesi non appare impossibile; essa permette di spiegare la fuoriuscita in massa della salamoia come dovuta allo spiazzamento della stessa ad opera della roccia franata e inghiottita nel camino di collasso, mentre attribuisce a cause superficiali (movimento franoso) l'avvio del fenomeno complessivo. La seconda delle due successioni di eventi appare invece non possibile per considerazioni analoghe a quelle esposte per le successioni e) ed f).

Restano le due successioni che vedono al primo posto la formazione del camino di collasso. La successione a) è simile alla successione c), con la sola differenza che attribuisce a cause sotterranee l'avvio del fenomeno complessivo. Nella successione b) la fuoriuscita della salamoia sarebbe una diretta conseguenza della formazione del camino di collasso, mentre le frana costituirebbe un evento successivo, accessorio e accidentale. Accettando come vera questa ultima successione appare difficile spiegare la fuoriuscita della salamoia dalla bocca del camino di collasso con grandi volumi in tempi molto brevi.

Le uniche due successioni che appaiono possibili sono pertanto quelle nelle quali la fuoriuscita della salamoia è stata causata dallo sprofondamento nel sottosuolo di volumi di roccia derivanti dalla frana, volumi che hanno spiazzato la salamoia in tempi estremamente ridotti, e cioè le seguenti due successioni di venti:

Frana, camino di collasso, fuoriuscita della salamoia; Camino di collasso, frana, fuoriuscita della salamoia.

Per stabilire se si è verificata l'una o l'altra delle due successioni ci si può basare esclusivamente su indizi di non univoca interpretazione. A favore della prima successione sta il fatto che nelle settimane precedenti il 25 aprile erano state osservate fessure di distacco a monte della collina di quota 201 poi franata. A favore della seconda successione di eventi sta la forma del corpo di frana, nel quale le direzioni di movimento sono convergenti verso la bocca del camino di collasso, con superficie di scorrimento che non si vede affiorare al piede della frana.

In ogni caso la formazione del camino di collasso presuppone la presenza in sottosuolo di una cavità con dimensioni che, paragonate allo spessore ed alle caratteristiche tecniche della copertura, abbiano potuto determinare il collasso del tetto, che vi sia stata o meno la sollecitazione aggiuntiva dovuta all'evento franoso.

La fuoriuscita violente della salamoia è dovuta allo spiazzamento della salamoia stessa da parte di un volume equivalente di roccia che ha riempito gran parte del laghetto. L'energia cinetica della massa franata è stata assorbita in parte dallo spostamento dell'acqua e in parte dall'impatto della massa franata con le rocce in posto.

Nel caso della prima delle due successioni la frana sarebbe stata causata da un innalzamento del livello freatico e conseguente riduzione della resistenza lungo la superficie di scivolamento. Nel caso della seconda successione la frana sarebbe derivata dallo scalzamento al piede dovuto alla formazione del camino di collasso, lungo un pendio in condizioni prossime alle condizioni critiche di equilibrio.

Il laghetto formatosi il 25 aprile

Nel laghetto formatosi in corrispondenza del camino di collasso confluisce l'acqua di una sorgente manifestatasi, dopo il 25 aprile, al bordo settentrionale del camino. Non è stato possibile accedere alla sorgente per misurarne la portata.

Dal laghetto fuoriusciva nei mesi successivi l'evento, acqua con una portata che, dall'inizio di giugno, si è stabilizzata intorno a 6 m³/ora. L'acqua conteneva in soluzione salgemma in quantità che è andata diminuendo dai 182 gr/l misurati il 25 aprile ai 60 gr/l misurati all'inizio di agosto. Nell'ipotesi che il bilancio tra portata della sorgente e acqua che fuoriesce sia in pareggio, il volume complessivo di acqua scaricata dalla sorgente dal 25 aprile alla fine di agosto si aggira intorno a 35.000 m³. Poiché la sorgente drenava essenzialmente le rocce del corpo di frana, posta una porosità utile del 10%, il drenaggio della sorgente avrebbe indotto nella falda freatica un abbassamento dell'ordine di 2 metri in quattro mesi.

Utilizzando i valori delle portate in uscita dal laghetto e la percentuale di cloruro di sodio accertato mediante analisi sui campioni periodicamente prelevati, si può valutare che dal 25 aprile al 10 agosto il volume complessivo di salgemma fuoriuscito sia di circa 4.400 tonnellate, escluso il salgemma trasportato dalla prima ondata.

La presenza di salgemma nell'acqua che fuoriesce dal laghetto, il quale ha attualmente un volume non superiore a 1.000 m³, indica che esiste una circolazione profonda, attivata dal carico idraulico della falda freatica: le acque dolci superficiali vengono a contatto con il salgemma e il carico idraulico è sufficiente per portare a giorno salamoia

satura con una portata dell'ordine di 1 m³/ora.

Questa ultima osservazione avvalora l'ipotesi che anche prima dell'inizio della attività mineraria sia esistita una analoga circolazione, che può avere contribuito alla formazione della cavità sotterranea in corrispondenza del camino di collasso del 25 aprile.

La frana del 25 aprile

La frana ha coinvolto il fianco NE della collina di quota 201 e, parzialmente, anche il fianco SE della collina di quota 207, immediatamente a Nord della precedente. La Figura 3 riporta i principali elementi geometrici della frana, rilevati in modo speditivo. Sulla figura sono segnati i limiti della zona ribassata e della zona di accumulo, nonché l'ubicazione delle principali fratture di tensione. All'esterno del corpo principale di frana si osservano altre fratture di tensioni e movimenti. Ad esempio, nella carta tecnica della Calabria, la collina a Nord di quella franata ha una quota di 207 m; il rilievo eseguito dopo il 25 aprile attribuisce a questa collina una quota di m 204.

Nel corpo della frana, circa 50 metri a Sud del laghetto, si osserva una depressione a forma di cono, con diametro alla bocca di 12 m e profondità massima di 4 m circa.

Osservando le delimitazioni della Figura 3, si osserva che la zona di accumulo ha una estensione minore della restante area della frana. Dalle sezioni riportate nella Figura 4 si ricava che l'incremento di volume nella zona di accumulo è inferiore al decremento di volume della zona di abbassamento, cosicché si ha una mancanza di roccia rispetto alla situazione precedente all'evento franoso.

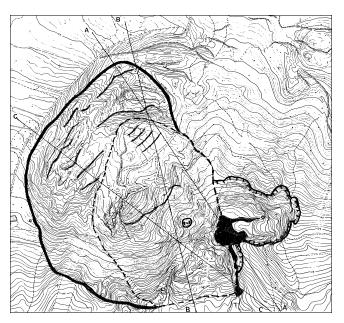


Figura 3: La frana ed il camino di collasso. Linea continua: orlo della nicchia di distacco; linea tratteggiata: zona di accumulo; linea dentata delimita: orlo visibile del camino di collasso.

The slide and the sink-hole. Continue line: xxx; dashed line yyy, toothed line: visible edge of the sink hole.

In parte questa mancanza può essere imputata al terreno asportato dall'onda del 25 aprile ed in parte, sicuramente maggiore, allo sprofondamento di roccia all'interno del camino di collasso, la cui bocca doveva estendersi anche al disotto della zona di accumulo della frana.

La cavità sotto il camino di collasso

La ricostruzione geologica della struttura del sottosuolo nella zona della miniera mette in evidenza che la cerniera della anticlinale delle formazioni messiniane raggiunge, in corrispondenza del camino di collasso, la Faglia di Timpa del Salto, dando luogo ad un alto strutturale nel quale il tetto del salgemma raggiunge una quota prossima a quella del livello del mare, con una copertura detritica con spessore di poco superiore al centinaio di metri, costituita dalle Formazioni di Spartizzo e di Scandale. E' altresì probabile che lo spessore del banco di salgemma sfruttato dalla attività mineraria raggiunga il suo valore massimo, a causa dell'ispessimento legato deficit tensionale al corrispondenza della zona di cerniera della anticlinale.

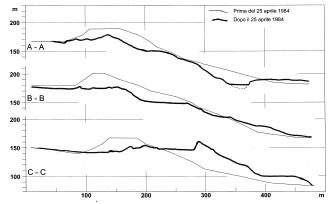


Figura 4: Sezioni topografiche dell'area della frana. *Topographical profiles the slide area*

Si viene in tal modo a verificare una straordinaria coesistenza di condizioni che favoriscono sia la formazione di una cavità sotterranea sia la successiva formazione di un camino di collasso, anche solo per cause naturali, fermo restando che la attività mineraria ha contribuito ai due processi accelerandoli.

La grande area della bocca del camino di collasso è legata ad una cavità di notevole ampiezza, seppure di altezza non necessariamente eccezionale, compatibile con il presumibile spessore del banco di salgemma nell'area del camino, e con una copertura di spessore non elevato, compatibile con quello che si ricava dalla ricostruzione geologica.

La formazione della cavità sotto il camino di collasso

Tenuto conto del quadro esposto nei paragrafi precedenti si pone in ogni caso il problema di ricercare le cause della formazione della cavità sotterranea, distinguendo le cause legate alla attività della miniera dalle cause naturali e, nel primo caso, di individuare la provenienza dell'acqua che ha prodotto la cavità.

La zona della faglia rappresenta una via preferenziale per la circolazione dell'acqua, inoltre anche i terreni immediatamente a tetto del salgemma (Formazione di Spartizzo e Sabbie di Scandale) sono acquiferi permeabili alimentati dall'infiltrazione che si realizza sul costone di Timpa del Salto.

Queste osservazioni portano a concludere che, in corrispondenza del camino di collasso, a contatto con il banco di salgemma può sempre essere esistita una circolazione naturale di acqua sotterranea con relativa dissoluzione del salgemma, realizzata nei tempi geologici.

Per valutare l'apporto della attività mineraria alla formazione della cavità sotterranea in corrispondenza del camino di collasso vengono presi in considerazione quattro fenomeni da mettere in relazione con l'attività mineraria: le emergenze di salamoia lungo la Faglia di Timpa del Salto; la subsidenza nell'area della miniera, la pressione alla bocca dei pozzi e le rotture o le deformazioni dei tubi di rivestimento dei pozzi.

Possibile modello di processo naturale

Nella zona della miniera non esisto in affioramento segni evidenti di sprofondamenti dovuti a crollo del tetto di cavità di origine naturale, anche se è opportuno segnalare l'interpretazione fornita da Guerricchio (1989) dei lineamenti di forma circolare rilevati in tutto il Bacino Crotonese mediante l'analisi delle foto aeree.

Anche le perdite del fluido di circolazione verificatesi nel corso della attività mineraria, come è il caso della coppia di pozzi TS 18 e TS 19 che si è dovuta abbandonare proprio per questo motivo, non sono sufficienti di per sé per testimoniare univocamente la presenza di cavità nel salgemma dovute a dissoluzione. La anomala presenza di cloruro di sodio nelle acque del Fiume Neto, impone di verificare se sono esistite, nella zona del camino di collasso, condizioni che abbiano favorito il processo di formazione di cavità di dissoluzione di origine naturale.

Detta verifica viene realizzata mediante un modello di circolazione con questi parametri, compatibili con la situazione strutturale e con le caratteristiche degli ammassi rocciosi interessati.

Consideriamo che: la superficie piezometrica nell'acquifero freatico a monte della frana raggiungesse, prima dell'evento del 25 aprile, la quota massima di 180 m; il tetto del salgemma raggiungesse, prima della dissoluzione, il livello del mare, e cioè fosse circa 100 metri al di sotto della superficie topografica; il letto del materasso alluvionale del Fiume Neto sia ad una quota di 50 metri s.l.m. ed infine che la distanza tra l'area di infiltrazione e l'emergenza sul letto del Fiume Neto sia, in linea d'aria, di circa 1.800 m, si otterrebbe un gradiente idraulico di 0,05.

Questo valore permette una circolazione significativa con una portata della emergenza sul letto del Fiume Neto, dipendente dalla permeabilità degli acquiferi e dall'area della sezione di scorrimento interessate, ma in ogni caso anch'essa significativa.

Per produrre una portata della emergenza sul letto del Neto di un litro all'ora è sufficiente una sezione di 20 m^2 ed un coefficiente di permeabilità $K = 2.8 \cdot 10^{-4}$. Tenuto conto della solubilità del salgemma, questa portata potrebbe realizzare una cavità di 100.000 m^3 in 120.000 anni, con un modesto apporto di cloruro di sodio al Fiume Neto. Si tratta di quantità tutte compatibili con le caratteristiche delle rocce interessate e dei tempi geologici a disposizione.

Emergenze di salamoia lungo la Faglia di Timpa del Salto Nel corso della vita della miniera le cavità coltivate sono state in collegamento idraulico con la Faglia di Timpa del Salto in tre occasioni, come dimostrato dalla temporanea fuoriuscita di salamoia, che si è interrotta modificando modalità operative.

Marzo 1969.

Durante il tentativo di collegamento tra i pozzi TS 3 e TS 4 si sono avute fuoriuscite di salamoia nelle adiacenze del pozzo esplorativo Ba 4, immediatamente ad Est della Faglia di Timpa del Salto e circa 700 m a Sud del camino di collasso del 25 aprile. Le difficoltà di collegamento tra i due pozzi sono derivate dal fatto che non è stato possibile individuare la correlazione di dettaglio tra le colonne stratigrafiche dei due pozzi.

Una volta stabilito il collegamento i due pozzi hanno lavorato per numerosi anni senza dare problemi. Quando, nel giugno del 1982, sono stati abbandonati, senza che nell'intorno dei pozzi fosse stata raggiunto il tetto del banco di salgemma, erano stati iniettati 2,86 milioni di m³ di acqua nel pozzo TS 3 e 2,18 milioni di m³ di acqua nel pozzo TS 4.

Nel corso della produzione si sono realizzate comunicazioni con i pozzi TS 12, TS 14 e TS16, ubicati a Nord della coppia TS 3, TS 4, tuttavia questi collegamenti non hanno modificato sostanzialmente il bilancio tra acqua iniettata e salamoia estratta nei due pozzi. Il pozzo TS 16 è stato utilizzato per meno di due anni, tra il 1972 e il 1974, in quanto frequentemente intasato; l'attività di iniezione nei due pozzi TS 12 e TS 14 è cessata nel dicembre del 1980. I tubi di rivestimento dei due pozzi hanno subito rotture rispettivamente alle profondità di 37 m e 28 m, fatto che ha dato luogo a fuoriuscita di salamoia in corrispondenza delle piazzole dei due pozzi nel febbraio del 1981 e nel mese di maggio del 1982.

Anche i pozzi TS 23 e TS 26, in attività nel mese di aprile del 1984 con iniezione nel pozzo 26 e scarico nel pozzo 23, sono stati collegati alla coppia di pozzi TS 3 e TS 4. Prima della perforazione del pozzo TS 26, l'acqua iniettata nel pozzo 23 veniva scaricata dal pozzo TS 22.

L'evento del 25 aprile 1984 non ha avuto riflessi significativi sul gruppo di pozzi citati in questo paragrafo (TS 3, 4, 12, 14, 16, 22, 23, 26) sia per quanto si riferisce a cambiamenti della pressione a bocca di pozzo, sia per il processo di subsidenza, sia infine per la rottura o deformazione dei tubi di rivestimento. Questo fatto permette

di concludere che la cavità sottostante il camino di collasso del 25 aprile non era, a quella data, collegata idraulicamente alle cavità prodotte dall'esercizio dei pozzi citati.

Febbraio 1980

Si è trattato di acqua salata (10-15 g/l) con una portata di alcuni litri al minuto. La venuta d'acqua è continuata fino a che non è stata ridotta la pressione di esercizio della miniera nell'aprile del 1981. Nel periodo della fuoriuscita l'iniezione veniva effettuata, nel bacino Nord, dai pozzi TS 5, 13 e 10 con scarico nei pozzi più orientali. Iniettando dai pozzi nel quale il salgemma si trova a quote più elevate, la dissoluzione migra ancora più in alto seguendo le linee di massima pendenza.

In tutti i pozzi del bacino Nord l'evento del 25 aprile ha determinato una accelerazione del moto di subsidenza, con un massimo in corrispondenza del pozzo TS 13. E' opportuno segnalare che nel bacino Nord, prima del 25 aprile, è stato accertato il crollo del tetto del salgemma in numerosi punti, con fuoriuscita di salamoia anche in aree lontane dalla Faglia di Timpa del Salto.

Settembre 1983

Durante prolungati tentativi di mettere in collegamento i pozzi TS 28 e TS 29, tentativi peraltro non riusciti, si è avuta una fuoriuscita di salamoia nella zona del camino di collasso del 25 aprile 1984. La quantità di acqua iniettata in questa occasione, circa 10.000 m3, non è tuttavia sufficiente per spiegare la formazione della cavità, la quale doveva essere già presente.

L'iniezione nei due pozzi TS 28 e 29 ha in ogni caso determinato un incremento della pressione interstiziale nelle formazioni di copertura, favorendo il processo di crollo del tetto della cavità.

La subsidenza

Sono state eseguite misure di livellazione di precisione di caposaldi appositamente realizzati nelle seguenti date: 27.10.80, 25.04.81, 29.04.82, 05.05.83, 10.02.84, 10.05,84. La prima serie di misure costituisce la superficie di riferimento per le misure successive, non potendo fare un confronto con la carta topografica alla scala 1:1.000, che è l'unico riferimento disponibile.

La subsidenza complessiva misurata dall'ottobre 1980 al maggio 1984 evidenzia: una depressione in corrispondenza del bacino Nord, con due massimi relativi in corrispondenza dei pozzi TS 10 e 13; una seconda depressione con massimo in corrispondenza del camino di collasso del 25 aprile. Quest'ultimo massimo di subsidenza non è messo in evidenza dai rilievi precedenti per il fatto che esso si trova al bordo dell'area rilevata.

Se si considera solo la subsidenza tra le ultime due campagne di misura, cioè la subsidenza più direttamente collegabile con l'evento del 25 aprile, si osserva la formazione dell'avallamento in corrispondenza del camino di collasso, con massimo abbassamento di 13,06 cm, e l'accentuazione dell'avallamento del bacino Nord, con

massimo in corrispondenza del pozzo TS 13 di 7,22 cm.

Nelle aree circostanti i due avallamenti gli abbassamenti sono risultati modesti ed in linea con l'andamento precedentemente osservato.

L'abbassamento intorno al camino di collasso è la manifestazione superficiale dell'abbassamento, in sotterraneo, del tetto della cavità. Più complessa è la relazione tra l'evento del 25 aprile e l'abbassamento nel bacino Nord. Sono state prese in considerazione tre ipotesi:

- a) Che non vi sia alcuna relazione tra i due fenomeni, in quanto l'abbassamento nel bacino Nord è solo la conseguenza dell'arresto della attività produttiva, con conseguente diminuzione delle pressioni idrostatiche.
- b) Che il collegamento tra i due fenomeni sia determinato dall'esistenza di un collegamento idraulico tra le cavità del bacino Nord e la cavità sotto il camino di collasso.
- c) Che il collegamento tra i due fenomeni sia il risultato della azione delle onde elastiche prodotte dal movimento della frana su un'area già in fase di subsidenza.

Con la prima ipotesi non si spiega perché l'abbassamento abbia valori elevati solo nel bacino Nord e non nel resto della miniera, in particolare in corrispondenza dei pozzi in produzione, per i quali l'ipotesi dell'abbassamento conseguente all'arresto della attività dovrebbe valere come per il bacino Nord.

Considerazioni analoghe valgono anche per la terza ipotesi, e pertanto non rimane che considerare la possibilità di un collegamento idraulico tra il bacino Nord e la cavità al di sotto del camino di collasso.

Calcolando il rapporto *R* tra subsidenza della bocca dei pozzi e volume di acqua iniettata, espresso in m/m³•10⁻⁷, possiamo raggruppare i pozzi come riportato nella Tab. 4.

Tabella 4 – Rapporto tra subsidenza e volume di acqua iniettata. Subsidence versus volume of injected water, $m/m^3 \cdot 10^{-7}$.

Rapporto	Pozzi
R < 0.5	TS 3, 12, 23, 26
0.5 < R < 1	TS 4, 6, 7, 8, 9, 11, 19
1 < R < 2	TS 5, 10, 14, 17, 21, 25
2 < R < 4	TS 2, 16, 18, 22, 24

I pozzi che mostrano un basso rapporto tra subsidenza e acqua iniettata sono quelli nei quali le condizioni nel sottosuolo, al di sotto dei pozzi, si sono mantenute stabili; è tuttavia da presumere che da questi pozzi sia derivata l'acqua che ha creato caverne in aree distanti fuori dall'area interessata dalla produzione, come è il caso della cavità al di sotto del camino di collasso del 25 aprile 1984.

La pressione alla bocca dei pozzi

Dal 1 maggio al 25 giugno 1984 sono state registrate le pressioni alla bocca dei pozzi. La pressione alla bocca di tutti i pozzi del bacino Sud è aumentata, mentre la pressione alla testa dei pozzi del bacino Sud è diminuita. Il differente comportamento dei pozzi nella due aree principali di produzione può essere attribuita al fatto che a tetto delle cavità del bacino Nord si trovano terreni permeabili in grado di dissipare la pressione, mentre nel bacino Sud le uniche vie di comunicazione con l'esterno sono rappresentate dai pozzi.

Questo significa che l'evento del 25 aprile ha prodotto la chiusura di collegamenti idraulici tra la cavità sotto il bacino di collasso, in gran parte riempita per effetto del crollo del tetto, e le cavità del bacino Sud. Considerazioni analoghe valgono anche per il bacino Nord, cosicché le misure della pressione alla bocca dei pozzi non ha permesso di trarre alcuna conclusione in merito alla provenienza dell'acqua che ha creato la cavità sotto il camino di collasso.

Considerazioni finali

Il lavoro qui presentato deriva dalla relazione prodotta dal primo dei due autori nel settembre del 1984, frutto di una serie di osservazioni e di analisi effettuate a partire da una decina di giorni dopo la formazione del camino di collasso. La relazione aveva l'obiettivo di chiarire le modalità e le cause della formazione del camino di collasso. Il limitato tempo a disposizione e la mancanza di molti dati non hanno permesso di approfondire tutti gli aspetti del problema affrontato.

Nel 1984 la ricostruzione della successione degli eventi ha permesso di porre le basi per analisi più approfondite. Lo studio della subsidenza, del quale qui per motivi di spazio sono riportati solo alcuni cenni, ha fornito le informazioni più significative. In particolare ha permesso di formulare la ragionevole ipotesi che l'acqua che ha creato la cavità sotto il bacino di collasso sia derivata dai pozzi del bacino Sud.

Lo studio della subsidenza ha anche permesso di riconoscere che l'area del bacino Nord poteva considerarsi esaurita, in quanto la dissoluzione aveva raggiunto in vari punti il tetto del salgemma, rappresentato dalla Formazione di Spartizzo, creando condizioni di instabilità.

L'attività mineraria è proseguita negli anni successivi nella zona più meridionale della concessione mineraria, adottando la metodologia di coltivazione che utilizza singoli pozzi isolati.

Bibliografia

Guerricchio A., 1989. Lo sprofondamento della collina di Timpa del Salto a Belvedere di Spinello (CZ). Un esempio di impatto ambientale da attività mineraria. Geol. Appl. e Idrogeol., 24, 27-54.

Ogniben, L., 1955. Le argille scagliose del

Crotonese. Mem. E Note Ist. Geol. Appl. Napoli., 6, 1-72

Roda, C., 1965. Geologia della tavoletta Belvedere di Spinello (Prov. Catanzaro, F. 237, I – SE). Boll. Soc. Geol. Ital.., 84 (2), 159-285 Van Dijk, J. P., 1991. Sequence stratigraphy, kinematics and dynamic geohistory of the Crotone Basin (Calabrian Arc, Central Mediteranean): an integrated approach. Mem Soc. Geol. Ital., 44, 259-285