

**INAIL**

**Valutazione dell'esposizione  
a silice libera cristallina  
nello scavo di gallerie  
Appennino umbro-marchigiano**



**RISCHI E PREVENZIONE**

**Edizione 2011**

**INAIL**

**Valutazione dell'esposizione  
a silice libera cristallina  
nello scavo di gallerie  
Appennino umbro-marchigiano**

**Edizione 2011**

Pubblicazione realizzata da

**INAIL**

Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (CONTARP)

Autori

**Contarp centrale**

M. Mecchia  
E. Incocciati  
C. Kunkar

**Contarp Marche**

D. Candido  
R. Compagnoni

**Contarp Umbria**

E. Della Penda

**Fotografie**

M. Mecchia  
E. Della Penda  
SUVA (Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni)

**Disegni**

M. Mecchia  
D. Candido

edizione - ottobre 2011

**Informazioni**

**CONTARP**

**Direzione Generale**

00143 Roma - Via Roberto Ferruzzi, 40  
**contarp@inail.it**

**Direzione Regionale Marche**

60124 Ancona - Via Piave, 25  
**marche-contarp@inail.it**

**Direzione Regionale Umbria**

06128 Perugia - Via Pontani, 3b  
**umbria-contarp@inail.it**

**www.inail.it**

© 2011 INAIL

Distribuzione gratuita. Vietata la vendita. La riproduzione su qualsiasi mezzo è consentita solo citando la fonte

ISBN 978-88-7484-244-5

Stampato dalla Tipolitografia INAIL - Milano, aprile 2012

# Indice

<b>PREMESSA</b>	5
<b>1 Esposizione a silice libera cristallina respirabile: problematica</b>	7
<b>2 Aspetti tecnico-normativi dell'esposizione a SLC respirabile</b>	11
<b>3 Fonti di esposizione a polveri silicotigene nei lavori di scavo in galleria</b>	15
<b>4 Tecniche di scavo e fasi del ciclo di lavoro in galleria</b>	17
<b>5 Strategie e tecniche di misura della concentrazione di SLC respirabile nei lavori di costruzione di gallerie</b>	25
<b>6 Geologia dell'Appennino umbro-marchigiano</b>	35
<b>7 Contenuto di quarzo nelle formazioni umbro-marchigiane</b>	43
<b>8 Concentrazione di SLC respirabile durante lo scavo di gallerie dell'Umbria e delle Marche</b>	45
<b>9 Metodologia di valutazione del rischio</b>	49
<b>10 Misure di prevenzione e protezione dalle polveri</b>	53
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	60
<b>APPENDICE: Determinazione del contenuto di quarzo nelle formazioni umbro-marchigiane</b>	61



## Premessa

*Questo volume è il risultato di un progetto condotto dalla CONTARP dell'INAIL sui cantieri per la costruzione di gallerie, e rientra in un'attività più ampia che la stessa Consulenza svolge a supporto di datori di lavoro e RSPP nell'ambito della prevenzione per la salute e sicurezza dei lavoratori.*

*Il prodotto editoriale riguarda il rischio da esposizione a polveri silicotigene nei lavori in galleria.*

*Constatato che la principale fonte di generazione di polveri in questo tipo di cantieri in sotterraneo è rappresentata dalla roccia in scavo, è stata messa a punto una metodologia predittiva dell'esposizione a silice libera cristallina basata sulle relazioni esistenti fra l'esposizione attesa e il tenore in quarzo della roccia in scavo.*

*Tali relazioni sono state identificate per un'area specifica del territorio italiano: l'Appennino umbro-marchigiano. Il campionamento delle rocce affioranti in Umbria e nelle Marche, realizzato dai geologi dell'Istituto che operano in tali regioni, e le successive analisi di laboratorio effettuate nel Laboratorio Centrale di Igiene Industriale CONTARP dell'INAIL, hanno fornito dati approfonditi sui tenori in quarzo delle singole formazioni geologiche.*

*Le numerose misure di esposizione a silice libera cristallina effettuate negli ultimi anni in cantieri in galleria nelle Marche e in Umbria, oggetto di indagini da parte dall'INAIL ai fini assicurativi istituzionali, hanno costituito l'altro elemento necessario per definire le relazioni ricercate.*

*Con l'insieme dei dati raccolti è stata elaborata una metodologia predittiva dell'esposizione dei lavoratori a silice libera cristallina respirabile nei cantieri di scavo di gallerie, da utilizzare nell'analisi di base per la predisposizione del documento di valutazione dei rischi.*

*Naturalmente, ciò non autorizza l'annullamento del programma di monitoraggio dell'esposizione a polveri durante l'esecuzione dei lavori, che deve sempre essere previsto nelle attività di scavo in sotterraneo, ma consente di progettare ed implementare misure di prevenzione e protezione mirate alle prevedibili condizioni di inquinamento da polveri silicotigene che si verificheranno nell'ambiente di lavoro. Ciò a garanzia di tutela della salute dei lavoratori e con l'obiettivo di ridurre l'entità degli interventi successivi.*



# 1 Esposizione a silice libera cristallina respirabile: problematica

Con la dizione “silice libera cristallina”, da qui in avanti indicata con l’acronimo SLC, si intendono tutte le fasi cristalline del biossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ) non combinato con altri elementi.

La forma più comune di SLC è il quarzo, minerale diffusissimo in natura, che entra a far parte in percentuali variabili in molti tipi di rocce, costituendo circa il 12% in volume di tutta la crosta terrestre. Il quarzo è abbondante sia nelle rocce magmatiche che in quelle sedimentarie e metamorfiche ed assume, quindi, un importante ruolo nella caratterizzazione di gran parte dei materiali naturali, oltre che di quelli artificiali che ne derivano.

Altre forme mineralogiche della SLC sono la tridimite e la cristobalite, che possono formarsi nell’ambito di alcuni processi tecnologici che comportano alte temperature, ma che sono rare in natura e non fanno parte di minerali comuni. Per questo motivo, le osservazioni riportate in questo volume, focalizzato sullo scavo e costruzione delle gallerie, considerano esclusivamente la SLC rappresentata dal quarzo.

Gli effetti dell’esposizione lavorativa a SLC per via inalatoria sono provati da lungo tempo. Nella prima metà del ‘900, infatti, la silicosi è stata la più frequente e la più grave tra le malattie professionali.

Tuttavia, la silicosi polmonare è solo l’aspetto maggiormente conosciuto dell’attività biologica della silice. L’inalazione protratta nel tempo di SLC respirabile conduce a questa infiammazione cronica ed irreversibile del polmone con formazione di fibromi che alterano la funzionalità polmonare. I primi sintomi della malattia si manifestano generalmente dopo molti anni dall’esposizione (eventualmente anche dopo il termine dell’attività lavorativa) e consistono in tosse, dispnea da sforzo, bronchiti ricorrenti, con possibilità di bronchite cronica, enfisema polmonare, tubercolosi polmonare, insufficienza cardiaca.

Inoltre, da decenni è stata riscontrata l’associazione tra malattia silicotica e patologie autoimmuni come lupus, artrite reumatoide e sclerodermia. Più recenti sono le evidenze scientifiche che legano l’effetto dell’esposizione a silice e la comparsa di malattie renali, sempre su base autoimmune (INAIL-Dir. Reg. Trentino, 2001).

Un nuovo ambito di considerazioni scaturisce dalle ricerche in merito all’associazione tra silicosi e cancro polmonare che, sulla base di numerosi studi

epidemiologici e dei risultati degli studi sperimentali, ha indotto, nel 1997, l'Agencia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) a valutare come sufficiente l'evidenza di cancerogenicità della silice cristallina, classificandola nel gruppo 1 degli agenti cancerogeni. Nella monografia del 1997 la IARC ha affermato: "La silice cristallina inalata in forma di quarzo o cristobalite da sorgenti occupazionali è cancerogena per gli umani". Nella stessa monografia, tuttavia, si sottolinea che la cancerogenicità negli esseri umani non è stata individuata per tutte le attività lavorative studiate, deducendo, quindi, che può dipendere dalle caratteristiche intrinseche del minerale o da fattori esterni che interessano la sua attività biologica.

A tutela della silicosi, sviluppatasi con l'espansione industriale e mineraria, in Italia venne introdotta l'assicurazione obbligatoria con la Legge 455 del 1943, ai sensi della quale si intende per silicosi una "fibrosi polmonare, complicata o non da tubercolosi polmonare, provocata da inalazione di polvere di biossido di silicio allo stato libero". A tutt'oggi vige l'obbligo del pagamento all'INAIL di un premio assicurativo supplementare a carico delle aziende che svolgono attività in cui i lavoratori siano esposti al rischio da polveri di SLC (cap. 2).

Tra le attività lavorative che possono comportare un rischio da SLC respirabile, i lavori edili in sottosuolo meritano particolare attenzione poiché le operazioni di scavo (capp. 3 e 4) generano rilevanti volumi di polveri che, in funzione della composizione mineralogica delle rocce scavate, possono contenere apprezzabili concentrazioni di quarzo (cap. 6).

Poiché la silicosi è una patologia a carattere evolutivo difficilmente contrastabile con le terapie attualmente a disposizione, gli interventi prevenzionali, mirati al contenimento dell'esposizione a polveri negli ambienti lavorativi, sono estremamente importanti.

Tali interventi consistono in misure tecniche ed organizzative (cap. 10) finalizzate a mantenere il livello di inquinamento ambientale da polveri aerodisperse al di sotto di una concentrazione (valore limite di riferimento) che si ritiene protegga "la maggior parte" dei lavoratori dall'eventualità di contrarre la malattia (cap. 2).

Ai sensi del D.Lgs. 81/2008 le misure di prevenzione e protezione devono essere adottate già all'avvio dell'attività. Questo implica uno studio predittivo ("analisi di base") che garantisca la protezione dal rischio ancor prima che sia possibile misurare la sua effettiva entità. Tale principio, naturalmente, è valido anche per i lavori di costruzione di gallerie.

Il presente volume si propone di fornire indicazioni sui metodi e le strategie di campionamento (cap. 5), nonché sulla valutazione del rischio derivante dall'esposizione a SLC nei cantieri sotterranei sin dalla fase progettuale. Constatato che la principale fonte di generazione di polveri è costituita dalla

roccia in scavo, lo studio ha focalizzato l'attenzione su un'area specifica del territorio italiano: l'Appennino umbro-marchigiano. Nel volume sono riportati dati sull'entità dell'esposizione a SLC riscontrata in cantieri reali attivi tra l'anno 1997 e il 2010 nell'Appennino umbro-marchigiano, e oggetto di indagini da parte dall'INAIL ai fini assicurativi istituzionali. Il campionamento sul posto delle formazioni geologiche che affiorano su questo territorio, operato dai geologi dell'Istituto, e le successive analisi effettuate nel Laboratorio Centrale di Igiene Industriale CONTARP dell'INAIL, hanno fornito i tenori in quarzo delle singole formazioni geologiche (cap. 7) e permesso di individuare le relazioni esistenti con i valori di esposizione (cap. 8). Il presente studio ha così portato all'individuazione di una metodologia predittiva dell'esposizione (cap. 9), da utilizzare nella predisposizione del documento di valutazione dei rischi per questi particolari ambienti di lavoro.



## 2 Aspetti tecnico-normativi dell'esposizione a SLC respirabile

### Valore limite di riferimento occupazionale

I valori limite di riferimento per la valutazione dell'esposizione professionale agli agenti di rischio vengono desunti dalla conoscenza che si ha del fenomeno, principalmente tramite studi scientifici sperimentali, ricerche epidemiologiche ed indagini igienistico-industriali.

In Italia non esiste un limite di riferimento ufficiale per l'esposizione professionale a SLC adottato ai sensi della normativa per la tutela della salute e sicurezza dei lavoratori sul luogo di lavoro (leggasi D.Lgs. 81/2008). Al riguardo, il TLV dell'ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) viene spesso adottato sia nei contratti collettivi nazionali di lavoro, sia dagli organi di controllo quale riferimento per la valutazione della salubrità degli ambienti di lavoro. L'ACGIH assume come TLV-TWA per la polvere di SLC respirabile il valore di 0,025 mg/m<sup>3</sup>.

È però necessario evidenziare che a livello internazionale gli Enti ed Organismi che si interessano della questione sono numerosi, e che i limiti di riferimento proposti sono diversi.

A livello Comunitario, con Decisione della Commissione Europea n. 95/320/EC è stato istituito lo SCOEL (*Scientific Committee on Occupational Exposure Limits*) col mandato di tenere aggiornata la Commissione relativamente ai limiti di esposizione occupazionale negli ambienti di lavoro. Nella sua raccomandazione del 2003 il Comitato, nel rilevare che il principale effetto dell'inalazione di polvere di silice respirabile nell'uomo è la comparsa della silicosi, evidenziava che il rischio di contrarre il cancro al polmone è più alto in soggetti affetti da silicosi e che perciò ogni azione finalizzata al contenimento della silicosi avrebbe conseguentemente ridotto il rischio di contrarre il cancro. In particolare consigliava la riduzione dei livelli di esposizione a SLC respirabile, individuando limiti di esposizione occupazionale (OELV) inferiori a 0,05 mg/m<sup>3</sup>. Peraltro va rilevato che, nonostante la posizione dello SCOEL, non sono stati definiti limiti di esposizione a livello comunitario relativamente alla SLC.

I limiti di esposizione a SLC adottati da vari paesi europei sono riportati di seguito.



Valori limite per la SLC respirabile adottati in Europa (mg/m<sup>3</sup> su 8 ore)

Negli Stati Uniti, il NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) adotta per la SLC respirabile, considerata un potenziale cancerogeno occupazionale, un limite di esposizione raccomandato (REL) di 0,05 mg/m<sup>3</sup> (inteso come media calcolata su una giornata lavorativa di durata fino a 10 ore, durante una settimana lavorativa di 40 ore).

### Valore limite di riferimento per la tutela assicurativa (premio supplementare a tutela dell'insorgenza della silicosi)

I datori di lavoro che svolgono le lavorazioni previste nell'allegato n. 8 al D.P.R. 30 giugno 1965, n. 1124, sono tenuti a corrispondere all'INAIL un premio supplementare a copertura del rischio per i lavoratori di contrarre la silicosi. Alla luce dell'indirizzo giurisprudenziale espresso dalla Corte di Cassazione (sentenza n. 2230 del 28 marzo 1986), il premio supplementare è dovuto unicamente nell'ipotesi in cui risulti accertato in concreto che, a causa dell'effettuazione delle suddette opere, si verifici nell'ambiente di lavoro una dispersione di silice libera in concentrazione non inferiore a quella idonea - in base alle vigenti disposizioni - a determinare, per il personale addetto, il rischio effettivo (e non già presunto) di contrarre la silicosi.

Il premio è calcolato in funzione dell'incidenza dei salari specifici degli addetti esposti a SLC, in concentrazione tale da determinare il rischio, sulle retribuzioni generali erogate a tutti i lavoratori dello stesso stabilimento, opificio, cantiere, ecc. Nel calcolo del rapporto di incidenza sono considerate retribuzioni specifiche quelle afferenti alle giornate di paga dei dipendenti adibiti alle lavorazioni morbigena, anche nel caso in cui detta adibizione sia limitata a parte della giornata stessa.

Riguardo al valore di concentrazione idoneo a determinare il rischio effettivo (e quindi a far scattare l'obbligo di pagamento del premio supplementare), la legge non indica alcun valore numerico, a differenza di altri ambiti normativi, in cui le soglie di accettabilità sono indicate. Si tratta di una precisa scelta della L. 27 dicembre 1975 n. 780, la quale ha abolito le precedenti definizioni legali della silicosi e dell'asbestosi dettate dalla Legge 12 aprile 1943, n. 455, artt. 3 e 4 (trasfusi rispettivamente nel D.P.R. 30 giugno 1965, n. 1124, artt. 142 e 143, ed abrogati appunto dalla Legge n. 780), e ciò al fine di lasciare alla ricerca scientifica l'autonomia per sviluppare le più opportune indicazioni.

Il limite di riferimento vigente è frutto di un consolidato orientamento del Ministero del Lavoro risalente al 1991 (Ispettorato Medico Centrale, Lettera circolare n. 737 del 3 dicembre 1991).

In materia si è anche espressa la Suprema Corte, che con sentenza n. 4540 del 1 marzo 2006 ha ritenuto "corretta la determinazione dell'autorità amministrativa che ha fissato il limite di concentrazione di silice libera ai fini del D.P.R. 30 giugno 1965, n. 1124, in campo nazionale in misura prudenziale allo 0,05 mg/m<sup>3</sup>".

Per la valutazione del rischio e la determinazione dell'incidenza di cui sopra, è necessario che il datore di lavoro, ad integrazione della denuncia dei lavori, fornisca all'INAIL tutti gli elementi necessari.

Per la determinazione del premio supplementare è previsto un tasso medio che può oscillare in aumento o in diminuzione. L'oscillazione è stabilita entro il limite del 35% e precisamente: fino al 10%, in rapporto all'entità intrinseca del rischio; fino al 25%, per l'attuazione di misure di igiene e di prevenzione. Avverso i provvedimenti concernenti l'oscillazione, il datore di lavoro può proporre ricorso alla Sede dell'INAIL territorialmente competente. In relazione, invece, all'obbligo assicurativo per la silicosi, il ricorso va presentato alla Direzione Provinciale del Lavoro.



### 3 Fonti di esposizione a polveri silicotigene nei lavori di scavo in galleria

La fonte di SLC di gran lunga più importante nello scavo di gallerie è rappresentata dal quarzo contenuto nella roccia.

L'ampia variabilità delle concentrazioni di quarzo nei terreni e nelle rocce naturali influenza necessariamente l'entità dell'esposizione dei lavoratori che operano in galleria e deve essere considerata ai fini dell'attivazione delle misure di controllo e prevenzione per la salute dei lavoratori.

In sede di valutazione preliminare, prima dell'inizio dell'attività di scavo, un'attenta analisi geologica è quindi un presupposto indispensabile per ottenere indicazioni predittive sull'entità del rischio da affrontare, in maniera da indirizzare le scelte tecniche, impiantistiche e tecnologiche con cui poi realizzare lo scavo del tunnel.

Un'altra possibile fonte di esposizione a SLC è rappresentata dal calcestruzzo, e in particolare dagli inerti in esso contenuti. Nel calcestruzzo la componente del cemento è generalmente esente da silice o ne contiene quantità trascurabili, mentre gli inerti possono contenere quarzo anche in elevati quantitativi. Gli inerti per la produzione di calcestruzzo devono rispettare le caratteristiche previste dalle norme tecniche e quelle indicate nei capitolati tecnici dei manufatti da realizzare, ma generalmente non vi sono prescrizioni particolari sulla loro composizione mineralogica, se non l'assenza di sostanze organiche, argillose e terrose (Arcangeli et al., 2008).

Nella maggior parte dei casi la scelta dei materiali da utilizzare nelle operazioni del cantiere fonda sulla vicinanza dei siti dove reperirli, e ciò anche in ragione dei notevoli quantitativi richiesti. Di conseguenza, volendo prediligere materiali privi o a basso tenore di quarzo, occorre fronteggiare eventuali difficoltà di tipo logistico, con le conseguenti problematiche connesse ai costi del trasporto e all'impatto sull'ambiente (Arcangeli et al., 2008).

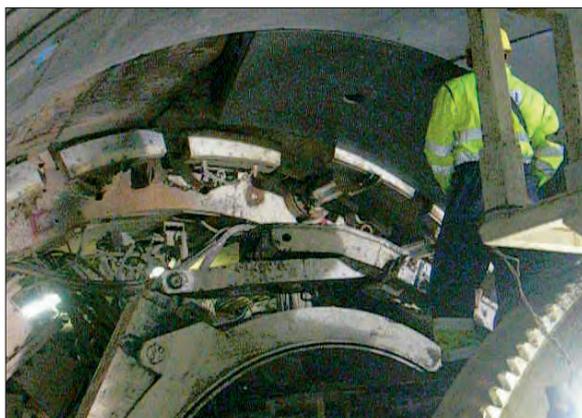
Nel processo di valutazione del rischio da esposizione a SLC le caratteristiche del calcestruzzo vanno considerate soprattutto nelle operazioni di perforazione, negli scavi che interessano il calcestruzzo già messo in posa e nelle operazioni di getto di calcestruzzo spruzzato (spritz beton).



Escavatore



Perforazione per carico esplosivo



Tunnel Boring Machine - Tecniche di scavo in galleria

## 4 Tecniche di scavo e fasi del ciclo di lavoro in galleria

### Tecniche di scavo in galleria

La scelta della tecnica di scavo, che influenza significativamente la polverosità dell'ambiente di lavoro, dipende da diversi fattori, quali la geologia strutturale del territorio e le caratteristiche litologiche dei terreni che vengono attraversati, e non può prescindere da valutazioni relative al costo e alla velocità di esecuzione dell'opera.

Oltre che per la definizione del metodo di avanzamento dello scavo, i risultati delle indagini tecniche preliminari vengono utilizzati per l'individuazione dei requisiti progettuali dell'opera quali la sagoma della galleria, le eventuali tecniche di stabilizzazione dell'ammasso roccioso e le caratteristiche del rivestimento. Rocce massicce, integre e non alterate chimicamente, potenzialmente sarebbero in grado di sostenere lo scavo addirittura senza bisogno di supporti strutturali di rivestimento. Lo scavo in questo tipo di rocce è per lo più effettuato con l'uso di esplosivi.

Nel caso di rocce stratificate, fratturate e/o degradate chimicamente, lo scavo viene spesso condotto con mezzi meccanici (per es., "martellone" montato su escavatore), e la sua stabilità dipende dallo spessore degli strati e dal loro orientamento rispetto all'asse della galleria. Lo scavo dovrà essere sostenuto artificialmente con un rivestimento portante ("centine") che ripristini l'equilibrio tensionale degli ammassi rocciosi interessati.

In natura, il passaggio tra tipi di rocce con caratteristiche diverse può essere brusco o graduale, come rivelano anche gli scavi in galleria, e generalmente può essere previsto in base agli studi geologici e geomeccanici preliminari. Una metodologia di scavo che genera una polverosità nell'ambiente di lavoro sotterraneo con caratteristiche molto diverse da quella che si determina con i metodi convenzionali, sopra accennati, è quella che prevede l'uso di tecniche meccanizzate con frese ad attacco integrale (tunnel boring machine, TBM). Questo metodo di scavo, che segue indirizzi tecnologici più recenti, crea una sezione intera circolare, dunque non flessibile relativamente alla sagoma della galleria. La TBM è una macchina adatta allo scavo di lunghe gallerie o di opere la cui esecuzione presenta condizioni e difficoltà particolari. In terreni con condizioni tensionali difficili, durante l'avanzamento si possono effettuare operazioni contemporanee di consolidamento e armatura dello scavo. L'uso di

questi mezzi determina una continuità operativa che va a vantaggio della stabilità dello scavo e della velocità di avanzamento. Tuttavia, essendo tali macchine molto costose, sono usate dove ciò sia economicamente giustificato. Nell'area appenninica di nostro interesse, fino ad oggi sono stati utilizzati soprattutto i metodi di scavo convenzionali, sia per le lunghezze delle gallerie, normalmente contenute, sia perché le caratteristiche geomeccaniche delle rocce, piuttosto variabili, necessitano di tecniche flessibili, in grado di adattarsi con rapidità alle diverse situazioni.

Nella progettazione di un'opera devono, naturalmente, essere previsti accorgimenti tecnici e organizzativi in grado di ridurre al minimo l'impatto sulla salute e sicurezza dei lavoratori, garantendo nel cantiere sotterraneo le migliori condizioni possibili. Questo assunto vale, ovviamente, anche per il rischio di esposizione a polveri respirabili di SLC. Un esame delle varie fasi del ciclo di lavoro in relazione ai problemi legati alla produzione di polvere è quindi molto utile.

### Ciclo di lavoro negli scavi con metodi convenzionali

Lo scavo "in tradizionale" segue una successione operativa le cui fasi principali sono illustrate nello schema esemplificativo che segue. Con questa tecnica è possibile effettuare scavi a sezione sia parziale che intera.

L'elenco delle mansioni tipiche della squadra sul fronte di scavo comprende il caposquadra, l'escavatorista, il palista, il lancista, l'autista, il fuochino e l'addetto alle perforazioni. Nelle operazioni di arco di murette, arco rovescio, calotta e piedritti si aggiunge il carpentiere.



Successione operativa dello scavo di gallerie con metodi di scavo convenzionali

Il **preconsolidamento** del fronte, finalizzato a migliorare la qualità dell'ammasso roccioso da attraversare, per assicurarne la tenuta e l'equilibrio durante la fase di scavo, è effettuato in genere subito prima dell'avanzamento. Può essere realizzato con un getto di "sprit beton" (miscela composta di calcestruzzo ed additivi, proiettata a pressione) tramite una "lancia" (pompa) alimentata da autobetoniera. Diverse tecniche prevedono la perforazione del fronte di scavo: iniezioni di cemento, infilaggi di tubi o barre di vetroresina, bullonatura.

Nelle metodologie convenzionali, lo **scavo del fronte** può essere condotto facendo uso di esplosivi o con mezzi meccanici quali escavatori (ripper, martelli, benne) o frese ad attacco puntuale. Nel caso di terreni incoerenti o debolmente coerenti possono essere usate le benne, mentre i ripper, che sono attrezzi muniti di uno o più denti molto robusti, sono particolarmente adatti su terreni coesivi. I martelli demolitori sono utili soprattutto nel caso di rocce poco resistenti e nel disgiungimento per correggere il profilo della sezione di scavo. Le frese ad attacco puntuale (TSM) possono avere la testa dotata di taglienti diversi a seconda del tipo di roccia da affrontare. In tratti successivi di una galleria in scavo possono essere utilizzati metodi di avanzamento diversi, adattando il profilo della sezione della galleria alle variazioni delle condizioni geologiche che si presentano. Le sollecitazioni create dai mezzi sugli ammassi rocciosi generalmente non sono eccessive, quindi le condizioni di equilibrio al contorno dello scavo vengono mantenute abbastanza a lungo. L'uso di queste macchine è preferito per gallerie di lunghezza media o breve.



Preconsolidamento: infilaggi (a sinistra) e getto spritz beton (a destra)

La tecnica tradizionale di avanzamento del fronte di scavo mediante perforazioni ed esplosivo è utilizzata soprattutto nelle gallerie di lunghezza limitata e nel caso di rocce dure, ma può dare utili risultati anche in presenza di ban-

chi e stratificazioni con caratteristiche di resistenza medio-alta. Il ciclo lavorativo standard comprende, in generale, le seguenti fasi:

- Preparazione dei fori da mina - con macchine perforatrici idrauliche o pneumatiche (jumbo) dotate di aste (fioretti) munite nell'estremità di un utensile da taglio al quale viene impresso un movimento roto-percussivo. I fori che si ottengono devono essere disposti secondo una geometria ben definita, al fine di ottenere l'abbattimento del volume di roccia prestabilito che rispetti la sagoma della galleria.
- Caricamento dell'esplosivo all'interno dei fori da mina - con cartucce di "gelatine", "slurries" o emulsioni esplosive.
- Esecuzione della volata di mine - il brillamento viene programmato in base alla geometria della distribuzione delle mine. Per l'evacuazione della polvere e dei gas dopo lo scoppio, viene riattivata la ventilazione, interrotta prima del brillamento; i lavori dovrebbero riprendere solo dopo una fase di attesa di durata sufficientemente prolungata.



Scavo del fronte: operazioni di perforazione con il jumbo

I detriti prodotti dallo scavo vengono portati all'esterno della galleria (**smarino**). La rimozione meccanica è la tecnica operativa più usata nei sistemi di avanzamento convenzionale. Per questa operazione si adoperano pale meccaniche o escavatori che caricano il materiale su dumpers o camion, i quali trasportano il "marino" in apposite discariche esterne. In alcune situazioni è necessario mettere contemporaneamente in sicurezza il fronte prov-

vedendo al “disgaggio” di parti di roccia instabili sulle pareti o in calotta che potrebbero costituire un pericolo potendo crollare nel prosieguo delle attività.



Disgaggio (a sinistra) e smarino (a destra) con l'escavatore

Il **prerivestimento** ha la finalità di mettere in equilibrio a breve termine la cavità, soprattutto se lo scavo ha interessato rocce di cattiva qualità e in generale quando le condizioni degli ammassi rocciosi non sono stabili. È necessario, quindi, armare la volta e le pareti della galleria mediante la posa di centine (profilati metallici a forma di arco) e/o reti elettrosaldate e getti di spritz beton, definendone così il profilo. Per questa operazione viene utilizzato un apposito mezzo posacentine, dotato di cestello.



Posa centine di prerivestimento

Le **murette** hanno funzione di sostegno e di rivestimento, ma servono anche come appoggio dei binari sui quali si muovono le macchine per l'impermea-

bilizzazione della calotta o il cassero per i getti della calotta e dell'arco rovescio. Vengono realizzate in posizione arretrata rispetto al fronte, previo scavo sui due lati della galleria di trincee che vengono impermeabilizzate, e nelle quali sono poi posizionate le cassaforme e gettato il calcestruzzo. In questa fase del ciclo vengono utilizzati l'escavatore e il camion per il trasporto del materiale scavato, nonché i mezzi tradizionalmente adoperati per il getto del calcestruzzo.



Arco rovescio: armo (a sinistra) e getto (a destra)

L'**arco rovescio**, in calcestruzzo rinforzato da armatura in ferro, si spinge al di sotto del piano stradale e viene realizzato in continuità con le pareti della galleria. Questo arco di contenimento distribuisce la pressione esercitata dalla roccia e conferisce resistenza meccanica alla galleria. È sempre necessario in presenza di rocce sciolte (coerenti e incoerenti) o di rocce spingenti: in questi casi può essere realizzato al passo con il fronte, oppure in momenti successivi. Anche in questa fase i mezzi utilizzati sono l'escavatore, la pala meccanica, il camion per il trasporto del materiale scavato, e l'autobetoniera per il getto del calcestruzzo.

L'**impermeabilizzazione**, quasi sempre necessaria, consiste nell'applicare un manto in PVC e/o geotessuti su tutte le pareti di scavo e sulla volta al fine di preservare l'opera dalle infiltrazioni d'acqua.



**Impermeabilizzazione**

L'ultima fase di lavoro è la realizzazione del **rivestimento definitivo** di calotta e piedritti che viene eseguito mediante getti di calcestruzzo, eventualmente armato, sulle pareti della galleria. Per tale operazione sono necessari casseri metallici, cioè forme in lamiera metallica sostenute da un telaio portante all'interno delle quali effettuare il getto, montati su un carro di movimentazione che si sposta per tutta la lunghezza della galleria.



## **5 Strategie e tecniche di misura della concentrazione di SLC respirabile nei lavori di costruzione di gallerie**

### **Strategie di misura**

Prima di avviare il cantiere per lo scavo di una galleria, ovvero ancora in fase progettuale, è necessario definire le misure di prevenzione e protezione da adottare (cap. 10).

Infatti, ai sensi del D.Lgs. 81/2008 - Titolo IX (come pure della previgente legislazione in materia di salute e sicurezza sul lavoro), le misure di prevenzione e protezione di carattere generale devono poter essere applicate ancor prima del concreto avvio delle operazioni di cantiere. In altri termini, qualsiasi valutazione puntuale ed approfondita del rischio chimico non può prescindere dall'attuazione preliminare e prioritaria da parte del datore di lavoro dei principi e delle misure generali di tutela dei lavoratori.

La misura dell'esposizione a SLC respirabile in un ambiente di lavoro è sempre finalizzata al confronto con il valore limite. Tuttavia, come si è precedentemente evidenziato (cap. 2), l'Europa e l'Italia non hanno ancora stabilito l'entità di tale valore. Nel nostro paese vengono utilizzati valori diversi in contesti diversi e di questo si deve tener conto nell'affrontare la problematica dell'esposizione a SLC.

Per quanto riguarda l'esposizione a polveri silicotigene, al fine di dimensionare preventivamente gli interventi, è quindi necessaria l'identificazione dell'esposizione potenziale e una "analisi di base" predittiva dell'entità di tale esposizione basata su un "giudizio professionale".

Una volta avviato il cantiere di scavo, dovrà essere effettuata una "prima valutazione" dell'esposizione professionale per tutte le mansioni attive nel cantiere. La nostra Legislazione dà precise indicazioni sulle metodiche a cui far riferimento per la misurazione degli agenti che possono presentare un rischio per la salute negli ambienti di lavoro. Le strategie adottabili per una corretta valutazione del rischio da esposizioni a polveri contenenti silice sono descritte nella norma UNI EN 689, mentre i requisiti generali per le prestazioni dei procedimenti di misura sono dettati dalla UNI EN 482. Entrambe le norme sono citate dal D.Lgs. 81/2008 al Titolo IX, Capo I - Protezione da agenti chimici, laddove all'art. 225 (Misure specifiche di protezione e di prevenzione) si fa menzione dell'Allegato XLI dello stesso decreto contenente l'elenco, dichiaratamente non esaustivo, delle metodiche standardizzate di riferimento.

La norma UNI EN 689 descrive le strategie e le metodologie utili per misurare la concentrazione degli agenti chimici aerodispersi, rapportare l'esposizione inalatoria degli operatori con i valori limite, consentire il confronto dei dati nel tempo, definire la periodicità delle misure. Tuttavia, la norma non stabilisce alcuna "procedura formale" per decidere se le esposizioni sono al di sotto del valore limite, lasciando spazio a diverse modalità di applicazione ed interpretazione delle indicazioni fornite.

La corretta valutazione del rischio silicosi prevede che vengano assunti criteri precisi e metodologie consolidate in tema di:

- strategia di campionamento;
- sistemi di prelievo della frazione respirabile delle polveri aerodisperse;
- tecniche d'analisi dei campioni prelevati;
- trattazione statistica dei dati di campionamento;
- valutazione della conformità con il valore limite di esposizione.

La norma UNI EN 482 indica che, al fine di valutare l'esposizione professionale da confrontare con il valore limite, l'utilizzo di postazioni di misura fisse è consentito solo se in grado di rappresentare l'effettiva esposizione del lavoratore. Nel caso degli addetti che operano nella costruzione delle gallerie, data la tipologia delle lavorazioni, il campionamento ambientale non può essere considerato adeguato e solo il campionamento personale, effettuato per mansione, può garantire la rappresentatività delle esposizioni professionali. Pertanto, deve essere stabilito uno schema di lavoro che preveda il campionamento delle polveri di tipo personale. La strategia può convenientemente essere studiata in modo da assicurare la rappresentatività dei risultati al costo più contenuto possibile. Il momento migliore per eseguire i campionamenti dovrà, evidentemente, tenere conto della successione delle operazioni di cantiere fra l'inizio dello scavo e la data prevedibile per la conclusione dei lavori stessi. Effettuati i campionamenti e le analisi di laboratorio, i risultati saranno elaborati ottenendo i valori di esposizione per mansione ("prima valutazione").

Le misure progettuali adottate per contenere la polverosità del posto di lavoro potranno essere ritenute adeguate se l'esposizione risulterà ben al di sotto del valore limite, in conformità alla norma UNI EN 689. Diversamente, dovranno essere messi a punto ed adottati interventi in grado di ridurre la concentrazione di SLC (cap. 10). Successivamente all'implementazione degli interventi, il programma di misure previste nello schema di lavoro verrà ripetuto per accertare l'efficacia dei provvedimenti adottati. Nel caso non risulti possibile ridurre l'esposizione al di sotto del valore limite, sarà necessario adottare misure di "protezione" dei lavoratori che garantiscano il rispetto del valore limite.

La norma UNI EN 689 precisa che nel caso di consistenti modifiche delle condizioni operative, la valutazione dell'esposizione professionale debba essere ripetuta. Per ciò che riguarda lo scavo di gallerie, questo implica una nuova valutazione del rischio silicosi quando l'avanzamento del fronte di scavo intercetta una formazione rocciosa con contenuto di quarzo significativamente superiore a quello caratteristico del tratto precedente, già oggetto di valutazione dell'esposizione. L'eventualità di dover predisporre una nuova valutazione dell'esposizione a SLC è, naturalmente, prevedibile già in fase progettuale, e desumibile dai tipi di formazioni geologiche che ci si aspetta di incontrare lungo il tracciato della galleria in base alle sezioni geologiche di progetto.

Per quanto riguarda la scelta degli addetti da sottoporre alle misurazioni di esposizione, possono naturalmente essere fornite solo delle indicazioni generali. L'approccio migliore prevede la suddivisione del personale in gruppi omogenei rispetto all'esposizione. Nelle attività che si svolgono sul fronte di scavo di una galleria il gruppo omogeneo è rappresentato dagli addetti ad una stessa mansione; si possono, per esempio, considerare le mansioni tipiche di caposquadra, escavatorista, palista, lancista, autista, fuochino e addetto alla perforazione. Per ogni mansione dovrà essere scelto il numero di addetti da includere nei campionamenti. La norma UNI EN 689 indica, come regola generale, che il campionamento dovrebbe essere eseguito per almeno un addetto su dieci per ogni mansione. Nei cantieri di scavo in galleria raramente sono presenti più di 10 addetti per mansione, quindi un solo addetto potrebbe generalmente già essere sufficiente a rappresentare la mansione, anche se è comunque preferibile sottoporre a misura più addetti per mansione. Nel caso di misure su più addetti di un gruppo omogeneo, sarà normale riscontrare differenze nei valori misurati. Di regola, nell'ambito di una mansione è da considerare anomala una singola esposizione che risulti minore della metà o maggiore del doppio della media aritmetica dei valori di esposizione riscontrati per il gruppo omogeneo.

Per ottenere misure rappresentative dell'esposizione a SLC per gli addetti ad una specifica mansione è necessario effettuare campionamenti che comprendano tutte le diverse fasi operative a cui la mansione è associata, con modalità e tempi proporzionati all'effettiva attuazione. Quindi, il luogo, il momento e la durata del campionamento sono decisivi. Molte attività lavorative sono caratterizzate da una modesta variabilità nel tempo e il campionamento a lungo termine (generalmente un periodo compreso fra 2 e 8 ore nel turno di lavoro) fornisce un quadro adeguato a misurare l'effettiva variabilità nelle caratteristiche di esposizione individuale all'aria inquinata. La norma UNI EN 689 specifica che nel caso di campionamenti di polvere su filtro è necessaria una durata di campionamento di almeno 1 ora. La durata del campionamento può variare anche in funzione del numero di ad-

detti per mansione sottoposti a misurazione: nel turno di lavoro, per 1 ora di campionamento il numero minimo di addetti per mansione da sottoporre a misurazione è pari a 2, mentre un solo addetto può essere rappresentativo nel caso di campionamenti di 2 o più ore. La norma evidenzia, comunque, che i tempi non campionati costituiscono un punto di debolezza per la rappresentatività di una misura di esposizione.

Nei casi in cui il ciclo di lavoro sia costituito da fasi distinte, la norma UNI EN 482 prevede la possibilità della misurazione "a step" in alternativa alla misure a lungo termine. Determinata la concentrazione media di SLC per ciascuna fase di lavoro, l'esposizione del lavoratore viene calcolata come concentrazione media pesata delle singole fasi. Esempi di calcolo della concentrazione di esposizione professionale sono riportati nella norma UNI EN 689. Nei calcoli si deve tener presente che le esposizioni professionali in qualsiasi periodo di turno sono considerate equivalenti ad una singola esposizione uniforme per 8 ore di esposizione (media ponderata di 8 ore TWA).

	addetto ESCAVATORISTA				addetto PALISTA	
	GIORNO				GIORNO	
	1	2	3		2	3
10:00						
10:10						
10:20				jumbo		
10:30						
10:40	scave					
10:50		bulonati		bulonati		
11:00						
11:10	jumbo					
11:20		caricamento				
11:30						
11:40	caricamento e volata			caricamento e volata		
11:50		caricamento				
12:00						
12:10						
12:20						
12:30						
12:40						
12:50						
13:00						
13:10						
13:20						
13:30						
13:40						
13:50						
14:00						
	0.088	0.060	0.096	mg/m <sup>3</sup>	0.100	0.111
	116	122	187	minuti	230	226
	<b>0.083 *</b>			mg/m <sup>3</sup>	<b>0.105 **</b>	

\*  $((0.088 \times 116) + (0.060 \times 122) + (0.096 \times 187)) / (116 + 122 + 187)$   
 \*\*  $((0.100 \times 230) + (0.111 \times 226)) / (230 + 226)$

Esempio di calcolo dell'esposizione personale a SLC respirabile per le mansioni di escavatorista e palista

Seguendo lo spirito della norma, nello schema della pagina precedente è riportato un esempio applicativo di misure personali di concentrazione di SLC e di calcolo dell'esposizione per mansione per il caso di una galleria, messo a punto nel corso di accertamenti INAIL. Sono rappresentate le misure eseguite in più giorni sugli addetti a due mansioni durante le operazioni di scavo con metodi convenzionali.

La strategia di misurazione è necessariamente basata su un approccio che consenta una razionalizzazione delle risorse. A tal fine può essere adottata una strategia di misurazione diretta inizialmente a determinare l'entità dell'esposizione nelle condizioni peggiori, che nelle attività di scavo di gallerie si riscontrano normalmente sul fronte di avanzamento, nello scavo e nelle operazioni di perforazione della roccia per il preconsolidamento. Qualora i risultati delle misurazioni nelle condizioni peggiori si collochino ben al di sotto del valore limite considerato, si può generalmente presumere che anche le altre attività lavorative nel cantiere si svolgano in condizioni di esposizione inferiori al valore limite.

Le linee guida tracciate dalla UNI EN 689 applicate alle attività di scavo in galleria sono sintetizzate nella Tabella riportata nella pagina successiva.

Per quanto riguarda le caratteristiche che il sistema di misura (campionamento sul luogo di lavoro e successiva analisi in laboratorio) deve essere in grado di soddisfare, la norma UNI EN 482 specifica che esso dovrebbe essere in grado di rilevare un intervallo di concentrazioni dell'agente chimico compreso fra 0,1 e 2 volte il suo valore limite (VL), nel caso di misure su lungo termine. Quindi, per le misure su lungo termine e considerando le due enunciazioni del valore limite della SLC più ampiamente usate in Italia (cap. 2):

- per un VL di  $0,025 \text{ mg/m}^3$ , il sistema dovrebbe essere in grado di rilevare concentrazioni di SLC fino a  $0,0025 \text{ mg/m}^3$ ;
- per un VL di  $0,050 \text{ mg/m}^3$ , il sistema dovrebbe essere in grado di rilevare concentrazioni di SLC fino a  $0,005 \text{ mg/m}^3$ .

L'incertezza estesa relativa della misura, ottenuta come somma dell'incertezza del campionamento e dell'incertezza dell'analisi di laboratorio, dovrebbe essere  $\leq 50\%$ . La norma riporta un dettagliato e complesso procedimento per il calcolo dell'incertezza di misura.

Identificazione dell'esposizione potenziale	Presenza di SLC	Contenuto di quarzo nelle rocce in scavo e nei materiali da costruzione
Determinazione dei fattori relativi al posto di lavoro	Mansioni	Compiti e funzioni, tempi di lavoro nelle varie fasi operative
	Fasi operative	Caratteristiche, fonti di emissione, precauzioni di sicurezza e procedure relative, forme di controllo dell'esposizione nelle fasi di preconsolidamento, scavo, smarino, priverestimento, murette, arco rovescio, impermeabilizzazione, calotta, ...
Valutazione delle esposizioni	Analisi di base (prima dell'avvio dei lavori)	Individuazione delle fonti di emissione (roccia in scavo, materiali da costruzione) e delle tecniche di scavo. Individuazione delle misure di controllo dell'esposizione da implementare all'avvio del cantiere sulla base delle informazioni desunte da misurazioni in condizioni confrontabili e di calcoli affidabili, fondati su dati quantitativi pertinenti
	Analisi dettagliata (a scavo avviato)	Misurazione dell'esposizione (campionamenti sul luogo di lavoro e analisi di laboratorio). Verifica del rispetto o del superamento del valore limite di esposizione

**Fasi della strategia di valutazione dell'esposizione professionale per le attività di scavo in galleria, secondo la UNI EN 689**

I requisiti sopra riportati, di riferimento per tutte le sostanze chimiche, sono particolarmente difficili da rispettare nel caso della SLC, almeno se si considerano i VL sopra indicati.

## Strumentazione per il campionamento delle polveri respirabili

La valutazione dell'esposizione professionale a SLC si basa su campionamenti personali della frazione respirabile della polvere aerodispersa.

Il sistema di prelievo personale della polvere respirabile prevede solitamente:

- un campionatore (selettore) in grado di selezionare la frazione respirabile della polvere (per es. un ciclone);
- un substrato di raccolta della polvere respirabile (per es. un filtro);
- un sistema di aspirazione dell'aria (per es. una pompa, collegata al campionatore attraverso un tubo).



Linea di campionamento personale

Il campionatore (selettore) per il prelievo del particolato respirabile deve essere scelto in modo tale che sia garantita la conformità allo standard UNI EN 481. Nella recente revisione del metodo UNICHIM MU 2010, riguardante la determinazione gravimetrica della frazione respirabile delle particelle aerodisperse, è riportato un ampio elenco di campionatori/selettori che, secondo

quanto dichiarato dai costruttori, garantiscono la conformità allo standard UNI. Ogni campionatore deve essere utilizzato con il flusso di aspirazione predeterminato dal costruttore. Con i campionatori attualmente disponibili, il range dei valori di flusso varia da 1,7 a 10 litri al minuto. È utile far presente che, benché tutti i campionatori in commercio siano dotati di dichiarazioni dei rispettivi costruttori che attestano l' idoneità dell'efficienza di campionamento della polvere respirabile, evidenze sperimentali dimostrano che in alcuni casi i risultati ottenuti utilizzando campionatori diversi sono significativamente differenti. La soluzione del problema è allo studio e nel futuro porterà probabilmente alla modifica delle norme europee che regolano le caratteristiche costruttive di questi dispositivi.

La scelta del mezzo filtrante su cui si deposita il particolato va fatta considerando la compatibilità con il tipo di campionatore e con il metodo analitico da impiegare. Alcuni campionatori possono essere utilizzati solo con specifiche schiume da cui il particolato va successivamente recuperato per essere ridepositato su substrato filtrante ed avviato all'analisi. Tuttavia, la maggioranza dei campionatori, per esempio i cicloni, richiede l'uso di filtri a membrana e permette la successiva analisi diretta. Tenendo presente che una determinazione analitica esaustiva comporta sia l'analisi gravimetrica (per quantificare le polveri respirabili nel loro insieme) che l'analisi diffrattometrica (per quantificare la frazione di SLC), fra i tipi di filtro reperibili sul mercato sono consigliabili le tipologie in argento, polivinilcloruro (PVC) ed esteri misti di cellulosa (riportati in ordine decrescente sia di qualità del dato analitico ottenibile che di costo). Nel caso in cui per la determinazione quantitativa della SLC venga utilizzata l'analisi in spettrometria infrarossa, i filtri d'argento non possono essere utilizzati per il campionamento.

Come già evidenziato, il tipo di filtro a membrana impiegato influisce sulla qualità del risultato. Per quanto riguarda l'analisi gravimetrica, il peso del substrato può subire, infatti, variazioni in funzione delle cariche elettrostatiche superficiali e dell'umidità relativa e ciò richiede che anche le bilance di precisione siano sufficientemente sensibili e rispondano a specifici requisiti descritti da appositi standard di buone prassi. Nell'analisi in diffrattometria dei raggi X, il materiale che costituisce il filtro produce un rumore di fondo; materiali diversi determinano una migliore o peggiore leggibilità del picco diffrattometrico di interesse (e quindi una diversa incertezza di misura); alcuni tipi di filtri producono significative interferenze con i picchi diffrattometrici delle fasi di SLC.

Le pompe da impiegare per il campionamento personale devono possedere specifiche caratteristiche indicate nella norma UNI EN 1232. Per il campionamento personale, durante il prelievo d'aria, la pompa deve essere posizionata all'altezza della vita dell'operatore, attaccata alla cintura o ad altro

sistema analogo (ad esempio, un sistema di cintura e tracolla), in modo che non intralci il normale svolgimento dell'attività lavorativa. Il tubo di raccordo tra pompa e selettore non deve essere soggetto a strozzature o piegature mentre la testa del selettore dimensionale deve essere posizionata nelle vicinanze della zona respiratoria del lavoratore, ad una distanza non superiore a 30 cm dalla bocca o dal naso.

## Analisi di laboratorio

A termine del campionamento il filtro viene inviato in laboratorio per le analisi strumentali, per quantificare la massa di SLC (solitamente il quarzo) che, rapportata al volume di aria campionata, fornisce il livello di concentrazione, espresso in  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

L'analisi gravimetrica effettuata su bilancia analitica, fornisce, per lettura differenziale prima e dopo il campionamento, la massa di polvere respirabile campionata. Successivamente, questo valore consentirà di determinare il tenore percentuale di quarzo nella polvere respirabile.

Per l'analisi delle fasi di SLC possono essere applicate due tecniche analitiche:

- diffrazione dei raggi X (DRX);
- spettrometria infrarossa a trasformata di Fourier (FT-IR).

Per entrambe le tecniche sono applicate diverse metodiche, messe a punto e validate da organismi ed enti di normazione internazionali. La DRX, basata sulla risposta delle fasi cristalline all'irraggiamento con raggi X, è la tecnica attualmente più utilizzata in Italia per la determinazione della SLC su filtro.

Il metodo UNICHIM MU 2398, di recente pubblicazione, descrive un metodo di analisi diffrattometrico a standard esterno per il dosaggio della SLC in campioni aerodispersi. Oltre ad affrontare nel dettaglio i passi procedurali di cui consta il dosaggio della SLC (materiali e strumentazioni per il campionamento e per le analisi di laboratorio, campionamento, analisi gravimetrica, analisi DRX qualitativa e quantitativa), il metodo contiene specifiche indicazioni sulla conservazione dei filtri-campione impiegati per la costruzione della retta di taratura, l'incertezza di misura dell'analisi ed il rapporto di prova "tipo". Inoltre il metodo, che per la fase di campionamento della frazione respirabile di polvere fa esplicito riferimento al MU 2010, affronta nel dettaglio, in una serie di appendici, i seguenti fattori ritenuti critici ai fini della qualità, in termini di accuratezza e precisione, del dato analitico:

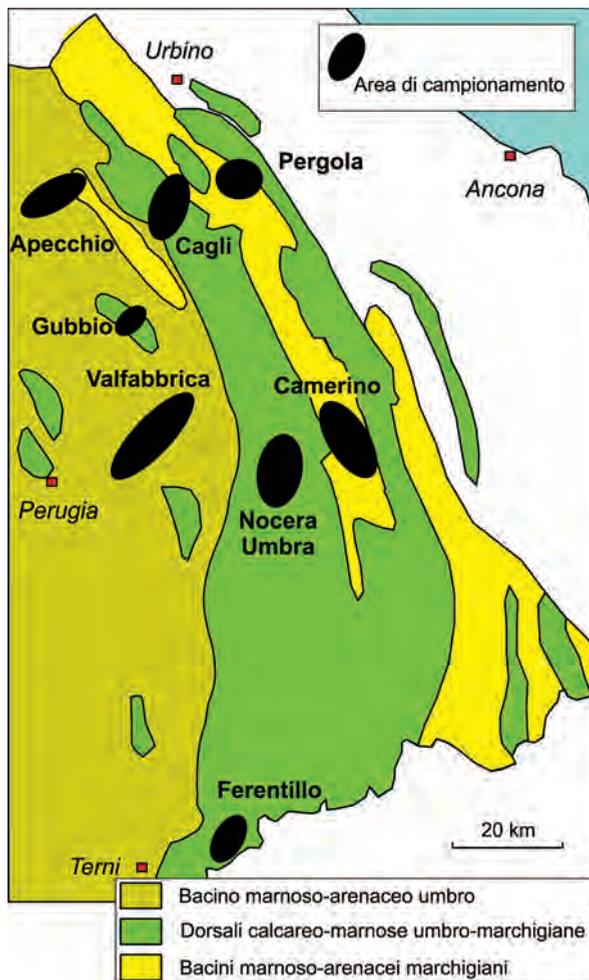
- membrane filtranti;
- caratteristiche e proprietà dei materiali di riferimento della SLC;
- sistemi di impolveramento dei campioni di riferimento;

- caratteristiche diffrattometriche delle fasi cristalline;
- settaggi strumentali del diffrattometro a raggi X e programmi di scansione;
- correzione dell'assorbimento dei raggi X dovuto all'effetto matrice;
- preparazione dei campioni di riferimento per le rette di taratura;
- costruzione delle rette di taratura e determinazione del minimo valore rivelabile;
- analisi delle interferenze.

Una volta quantificata l'esposizione professionale, i dati rilevati vengono confrontati con il valore limite (cap. 5).

## 6 Geologia dell'Appennino umbro-marchigiano

Il paesaggio umbro-marchigiano è modellato in rocce che si sono formate e trasformate nell'arco di oltre 200 milioni di anni. La successione geologica è rappresentata quasi per intero da rocce sedimentarie di origine marina.



Complessi litologici nella regione umbro-marchigiana e localizzazione degli affioramenti campionati dall'INAIL

Le rocce più antiche sono prevalentemente calcaree, più o meno ricche di selce e intervallate a depositi argillosi e marnosi, che gli eventi geologici hanno spinto in affioramento a costituire l'ossatura dell'Appennino umbro-marchigiano. Queste "rocce carbonatiche" formano il 30% del territorio (area verde in Figura).

La dorsale montuosa è bordata da rocce marnoso-arenacee stratificate (aree gialle dei bacini umbro e marchigiano in Figura), che complessivamente interessano il 34% dell'area umbro-marchigiana.

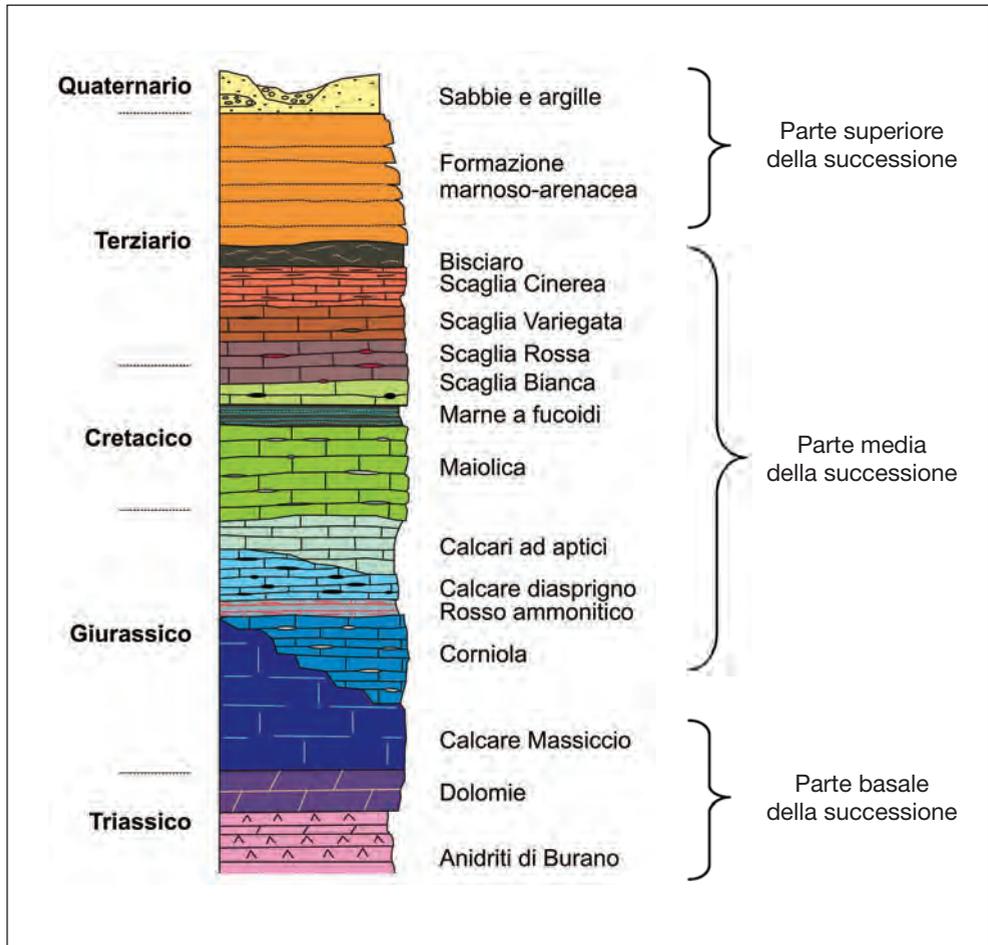
Terreni più giovani, costituiti da depositi continentali argillosi e sabbiosi, occupano vaste aree vallive e pedemontane, rappresentando il 35% dell'estensione delle due regioni (area bianca in figura).

Sul territorio, le rocce si presentano in successioni di strati sovrapposti; analizzandone le variazioni litologiche è possibile "leggere" l'evoluzione degli ambienti in cui esse si sono formate. A tal proposito, è utile riportare qualche definizione che faciliti la comprensione del linguaggio geologico.

Una serie di strati sovrapposti che presentano tra loro analogie litologiche riconducibili ad un ambiente di formazione omogeneo, costituisce una **formazione geologica**.

Una successione di più formazioni geologiche forma una serie stratigrafica. Questa è caratteristica di ciascuna località e testimonia gli eventi geologici in essa avvenuti: aree che presentano la stessa serie stratigrafica hanno subito i medesimi eventi geologici.

L'ambiente di formazione della successione umbro-marchigiana è legato al frazionamento del continente Pangea che portò, tra la fine del Paleozoico e l'inizio del Mesozoico, circa 250 milioni di anni fa, alla disarticolazione di zolle minori interposte tra la placca europea e quella africana e all'apertura di solchi oceanici. La progressiva apertura di un oceano oggi scomparso portò alla individuazione del vasto dominio paleogeografico marino umbro-marchigiano, del dominio toscano a Nordovest e della piattaforma laziale-abruzzese a Sud. Per **dominio paleogeografico** si intende un'area molto vasta corrispondente ad un particolare ambiente di sedimentazione marina, individuabile studiando le caratteristiche litologiche, il contenuto fossilifero, le strutture sedimentarie delle successioni geologiche su scala regionale e l'età dei terreni.



Colonna stratigrafica della successione umbro-marchigiana

Nell'evoluzione del dominio umbro-marchigiano si distinguono tre tappe fondamentali. Nella successione geologica si possono infatti evidenziare (Società Geologica Italiana, 1994):

- una parte basale, formata in ambienti costieri con bacini evaporatici e in ambienti marini di acqua bassa, che risale all'intervallo tra i periodi Triassico superiore e Giurassico inferiore (220-180 milioni di anni fa);
- una parte media, deposta in ambiente di mare aperto (ambiente pelagico), nell'arco temporale tra i periodi Giurassico medio e Paleogene (180-24 milioni di anni fa);

- una parte superiore, torbidity, formata in ambiente marino profondo nell'epoca Miocene (24-5 milioni di anni fa).

La colonna stratigrafica rappresenta una tipica successione delle formazioni geologiche dell'Appennino umbro-marchigiano. Naturalmente, la variabilità degli spessori a scala regionale può essere notevole, e non tutte le formazioni sono presenti in un'unica colonna stratigrafica valida per tutta questa porzione dell'Appennino.

### **Parte basale della successione geologica** ***(Triassico superiore - Giurassico inferiore)***

Nel Triassico superiore l'area umbro-marchigiana fu occupata da un esteso bacino evaporitico in cui si depositarono i materiali che oggi costituiscono la formazione delle Anidriti del Burano (alternanze di gesso e dolomia o brecce calcaree) per uno spessore presunto di oltre 1000 m che però si rinviene in affioramento in poche località, e perciò non è stata inclusa in questo studio. Successivamente, mutate le condizioni climatiche, si depositarono i sedimenti carbonatici delle formazioni delle Dolomie del Monte Cetona, nelle regioni in esame rappresentate da limitati affioramenti, e del "Calcere Massiccio", compatto, stratificato in banchi di molti metri di spessore e privo di intercalazioni significative. Lo spessore complessivo del Calcere Massiccio raggiunge i 700-800 m.

### **Parte media della successione geologica** ***(Giurassico medio - Paleogene)***

Per effetto di azione tettoniche distensive, connesse all'apertura del bacino oceanico ligure, la piattaforma carbonatica che si era formata nel Triassico si frammentò e in alcune aree gradualmente sprofondò. Il fenomeno tettonico provocò la suddivisione dell'area corrispondente all'Appennino centrale in due domini paleogeografici ben definiti: la piattaforma laziale-abruzzese che rimase in condizioni di mare basso, ed il bacino umbro-marchigiano che fu soggetto ad una rapida subsidenza ed accolse una sedimentazione di mare aperto. Il bacino marino che si formò dopo l'annegamento della piattaforma triassica presentava un fondale estremamente articolato con blocchi diversamente rialzati ed inclinati. Queste variazioni nella batimetria e nella velocità di subsidenza sono registrate da successioni sedimentarie diverse da zona a zona. Le formazioni geo-

logiche, in successione cronologica dalla più antica alla più giovane, sono elencate di seguito.

- **“Corniola”**: calcare micritico grigio, omogeneo e regolarmente stratificato; spessore variabile da qualche metro a 200 m con strati di 20-40 cm; presenta selce in liste e noduli soprattutto nella parte alta della formazione.
- **“Rosso Ammonitico”**: alternanze di livelli di marne e calcari rossi; il tenore in argilla diminuisce verso l'alto stratigrafico; ricco in fossili di ammoniti. Lo spessore è compreso fra qualche metro e 40 m.
- **“Calcari e marne a Posidonia”**: marne nella parte basale passanti a calcari a grana molto fine (micritici) caratterizzati dalla presenza di gusci di posidonia (molluschi lamellibranchi). Lo spessore può raggiungere alcune decine di metri.
- **“Calcari diasprigni”**: nella parte alta, calcari a grana molto fine sottilmente stratificati contenenti fossili di aptici (opercoli dei gusci delle ammoniti) ed echinodermi; nella parte inferiore con fitte intercalazioni di lenti e noduli di selce. Lo spessore complessivo può arrivare a circa 100 m.
- **“Maiolica”**: calcari micritici bianchi ben stratificati con selce grigio-nera per uno spessore variabile da 20 a 400 m. Presenta nella parte alta livelli marnoso-argillosi scuri, in frequenza e spessore crescenti al passaggio con la sovrastante formazione.
- **“Marne a fucoidi”**: argille marnose, marne e in subordine calcari marnosi per uno spessore di 45-90 m. Gli strati presentano le tipiche impronte di scavo (fucoidi) prodotte da organismi animali.
- **“Scaglia bianca”**: calcari micritici bianchi ben stratificati, con selce nera o grigia e con interstrati marnosi, per uno spessore di 40-70 m.
- **“Scaglia rossa”**: calcari micritici regolarmente stratificati (10-15 cm) con intercalazioni marnose e selciferi rossastre per uno spessore di 150-400 m.
- **“Scaglia variegata”**: calcari marnosi e marne calcaree stratificati per uno spessore di 20-50 m, di colore variabile dal rosa al bianco, e dal bianco al grigio-verde.

- **“Scaglia cinerea”**: marne e calcari marnosi color grigio o grigio-verde per uno spessore di 100-200 m.

In tutta l'area umbro-marchigiana la parte sommitale, selciferà, ha termine con un orizzonte vulcanoclastico (livello Raffaello) corrispondente al limite Oligocene-Miocene (risalente a circa 24 milioni di anni fa).

### Parte superiore della successione geologica (Miocene)

Nel Miocene il dominio umbro-marchigiano fu soggetto a fasi di corrugamento che modificarono la morfologia dei fondali ed influenzarono la sedimentazione. Si individuarono dei bacini orientati in senso appenninico che si spostarono progressivamente verso Est. Le successioni che si deposero in questi bacini sono caratterizzate inizialmente dai prodotti dell'attività vulcanica connessa all'orogenesi e successivamente dalla presenza di elevati spessori di torbiditi (sedimenti clastici che si depositano sul fondo marino in corrispondenza del piede della scarpata continentale in seguito all'apporto di grandi volumi di materiali provenienti dall'erosione delle terre emerse). La sequenza sedimentaria inizia con la deposizione del **“Bisciario”**: marne e calcari marnosi grigi e grigio-verdi con selce grigio-nera e intercalazioni di cineriti, tufiti e bentoniti vulcaniche. Lo spessore è variabile da 15 a 70-100 m. Nelle Marche, al di sopra del Bisciario è presente la formazione dello **“Schlier”**: alternanze di marne e marne argillose in strati sottili e da torbiditi calcaree in strati più spessi. Lo spessore varia da pochi metri a 400 metri. Nel bacino umbro, più antico rispetto ai bacini marchigiani, si deposita il complesso di sedimenti torbiditici della **“Formazione Marnoso-Arenacea”**: marne emipelagiche e successivamente arenarie torbiditiche; si distinguono successioni differenti in base alle caratteristiche litologiche e all'età procedendo da Ovest verso Est. Gli spessori arrivano fino a 2000 m. Inglobati nella formazione si trovano i depositi del **“Complesso argilloso di Casacastalda”**: argille in giacitura caotica, tipica di un olistostroma, con frammenti di calcari marnosi, selci e calciruditi a Pecten; costituiscono una massa con forma e dimensioni irregolari, con estensione fino a diverse decine di metri. Nelle Marche, al di sopra dello Schlier le successioni torbiditiche si accumularono in una serie di bacini minori, caratterizzati da depositi marnoso arenacei che colmarono depressioni strette e allungate. Fra le diverse formazioni geologiche distinte dai geologi, in questo studio sono stati effettuati campionamenti di rocce nelle **“Arenarie di Matelica (o di Camerino)”** e nelle **“Arenarie di Serraspina”**.

Nel Miocene superiore l'area umbra entrò in piena fase di deformazione ed arrivò ad emergere, mentre buona parte dell'area marchigiana rimase soggetta a sedimentazione marina. Nel Messiniano (fra 6 e 5 milioni di anni fa) il collegamento con l'Oceano Atlantico subì diverse interruzioni, il Mar Mediterraneo venne parzialmente prosciugato e la forte evaporazione delle acque marine determinò l'accumulo sui fondali marchigiani dei depositi evaporitici legati alla crisi di salinità noti come **"Formazione Gessoso-Solfifera"**: depositi di gesso, arenarie gessose, gessareniti, calcari solfiferi, argille, con spessori massimi di circa 200 m. La formazione Gessoso-Solfifera è seguita dalla **"Formazione a Colombacci"**: depositi di acque salmastre, con argille marnose e intercalati banchi arenacei. Lo spessore massimo è di 120 m. Nel Pliocene buona parte dell'Umbria fu nuovamente invasa dal mare, si formarono depositi marini e continentali di sabbie e conglomerati, argille, limi.



## 7 Contenuto di quarzo nelle formazioni umbro-marchigiane

Per determinare il contenuto di quarzo in una **successione di rocce** è innanzitutto necessario conoscere la **litostratigrafia** del territorio. La litostratigrafia suddivide e gerarchizza le successioni rocciose in unità formali, distinte sulla base della loro litologia, cioè dei caratteri fisico-chimici (composizione, tessitura, strutture, colore) che definiscono l'aspetto di una roccia (APAT, 2002).

L'unità litostratigrafica fondamentale è la **formazione geologica**, che individua un corpo roccioso distinguibile da quelli adiacenti sulla base delle caratteristiche litologiche e dalla sua posizione stratigrafica (età, generalmente stabilita in base al contenuto fossilifero). Una formazione può avere al suo interno discontinuità deposizionali, è però fondamentale che sia facilmente riconoscibile sul terreno, che sia cartografabile e che abbia una complessiva omogeneità litologica.

Le carte geologiche riportano le aree di affioramento delle formazioni. Le formazioni istituite dalla Commissione Italiana di Stratigrafia sono riportate nel "Catalogo delle Formazioni - Carta Geologica d'Italia 1:50.000", pubblicato da APAT e CNR. In ogni caso, l'evoluzione delle conoscenze fa sì che l'interpretazione delle caratteristiche delle formazioni geologiche sia soggetta ad una certa mutevolezza, e persino le loro denominazioni sono spesso oggetto di dibattito e revisione.

Nell'Appendice sono riportati, sotto forma di schede, i dati relativi al contenuto in quarzo delle formazioni geologiche umbro-marchigiane, così come ottenuti nello studio INAIL. A questo scopo i geologi dell'Istituto hanno effettuato campionamenti in 8 località dell'Appennino umbro-marchigiano (cap. 6), prelevando complessivamente 153 campioni di roccia, analizzati poi in diffrattometria dei raggi X nel Laboratorio CONTARP di Roma.

Nell'Appendice è anche descritto il metodo adottato per il calcolo del contenuto medio di quarzo nelle formazioni geologiche, che tiene conto della variabilità dei litotipi che costituiscono ogni formazione. Tipicamente, infatti, a causa delle variazioni ambientali che si ripetono ciclicamente nel tempo, una formazione è costituita da un'alternanza di due o più litotipi. Nel calcolo del contenuto di quarzo si è anche tenuto conto della variabilità da luogo a luogo delle caratteristiche della formazione.

La Tabella che segue riassume i risultati delle elaborazioni, riportati in dettaglio nelle schede dell'Appendice.

Per ogni formazione geologica descritta nel cap. 6, sono indicati in proporzione i diversi litotipi individuati, rappresentati con le seguenti sigle:

- C calcare  
 CM calcare marnoso  
 M marna  
 MA marna argillosa  
 A argilla  
 AR arenaria  
 S selce

Per i diversi litotipi è riportato poi il contenuto percentuale in quarzo nei valori medi e nei valori estremi indicando la condizione più favorevole e la più avversa presente sul territorio umbro-marchigiano.

Formazione geologica	Litotipi	Contenuto MINIMO di quarzo		Litotipi	Contenuto MASSIMO di quarzo	
		%				
Calcare Massiccio	C=100	0				
Corniola	C=95 S=5	min. 4	med. 5	C=70 A=15 S=15	med. 15	max. 17
Rosso Ammonitico	C=80 M=20	min. 2	med. 3	C=30 M=70	med. 5	max. 7
Calcarei a Posidonia	C=100	≈ 3				
Calcarei Diasprigni	C=90 M=5 S=5	≈ 10		C=50 S=50	med. 45	max. 47
Maiolica	C=95 S=5	min. 4	med. 5	C=80 A=5 S=15	med. 14	max. 16
Marne a Fucoidi	M=40 AM=60	min. 4	med. 10	max. 16		
Scaglia Bianca	C=85 M=10 S=5	min. 6	med. 9	C=65 M=20 S=15	med. 18	max. 22
Scaglia Rossa	C=75 M=20 S=5	min. 4	med. 5	C=80 M=5 S=15	med. 14	max. 15
Scaglia Variegata	C=90 M=10	min. 1	med. 3	C=60 M=40	med. 3	max. 5
Scaglia Cinerea	C=70 M=30	min. 2	med. 3	C=30 M=70	med. 3	max. 4
Bisclario	CM=100	min. 2	med. 3	CM=95 S=5	med. 7	max. 8
Schlier	M=100	min. 3	med. 8	max. 14		
Marnoso-Arenacea del bacino umbro	AR=20 M=80	min. 11	med. 17	AR=70 M=30	med. 23	max. 33
Complesso argilloso di Casacastalda	A=100	≈ 15				
Arenarie di Matelica	strato arenaceo	min. 15	med. 20	max. 25		
Arenarie di Serraspina	strato arenaceo	min. 43	med. 46	max. 49		
Gessosolfifera	strato marnoso	≈ 8				
Arenarie della Form. a Colombacci	strato arenaceo	≈ 23				

## 8 Concentrazione di SLC respirabile durante lo scavo di gallerie dell'Umbria e delle Marche

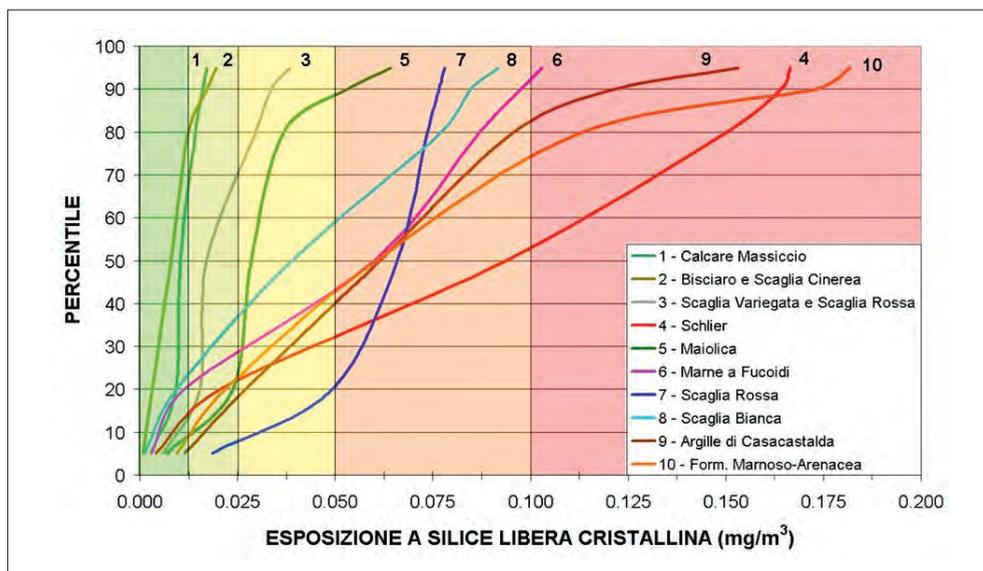
Per definire l'esposizione a SLC, sono stati utilizzati esclusivamente i dati di esposizione professionale ottenuti nelle numerose campagne di monitoraggio nei cantieri di scavo gallerie nel territorio dell'Umbria e delle Marche, estratti dall'archivio INAIL.

Si tratta di 125 misure personali riguardanti lavorazioni svolte in 13 gallerie nel tratto umbro-marchigiano dell'Appennino a partire dall'anno 1997. Tutte le misure si riferiscono a cantieri di scavo con metodologie convenzionali e rappresentano le condizioni di esposizione a SLC respirabile degli addetti alle varie mansioni (palista, lancista, escavatorista, fuochino, ecc.) nelle diverse fasi del ciclo di lavoro tipiche delle tecniche convenzionali (cap. 4). I dati riportati si riferiscono a situazioni in cui non erano stati adottati provvedimenti specifici ed efficaci per ridurre l'esposizione a SLC, se non la tradizionale ventilazione forzata in mandata.

Fra le informazioni disponibili per ogni campagna di misure è compresa anche la formazione geologica attraversata dalla galleria in scavo. Dato il numero elevato di formazioni presenti nella successione umbro-marchigiana, a volte anche di spessore esiguo, non tutte le formazioni sono state attraversate dalle gallerie oggetto degli accertamenti. Le misure rappresentano comunque una porzione importante della successione stratigrafica, riguardando ben 10 formazioni geologiche, caratterizzate da contenuti percentuali di quarzo variabili fino ad un massimo del 25%. L'esposizione è stata monitorata durante lo scavo nelle formazioni elencate nella figura che segue.

Naturalmente, i dati si riferiscono a mansioni diverse e a fasi del ciclo di lavoro differenziate, oltre che a litologie che possono avere un contenuto in quarzo molto variabile. La conseguenza è una dispersione dei dati in un range di concentrazioni spesso ampio e una difficoltà a definire le correlazioni esistenti.

Nella figura seguente è rappresentata la curva di distribuzione cumulativa delle frequenze dei dati di esposizione per ogni formazione geologica. Le formazioni sono state numerate in ordine crescente, in funzione del tenore medio di quarzo calcolato precedentemente (cap. 7).



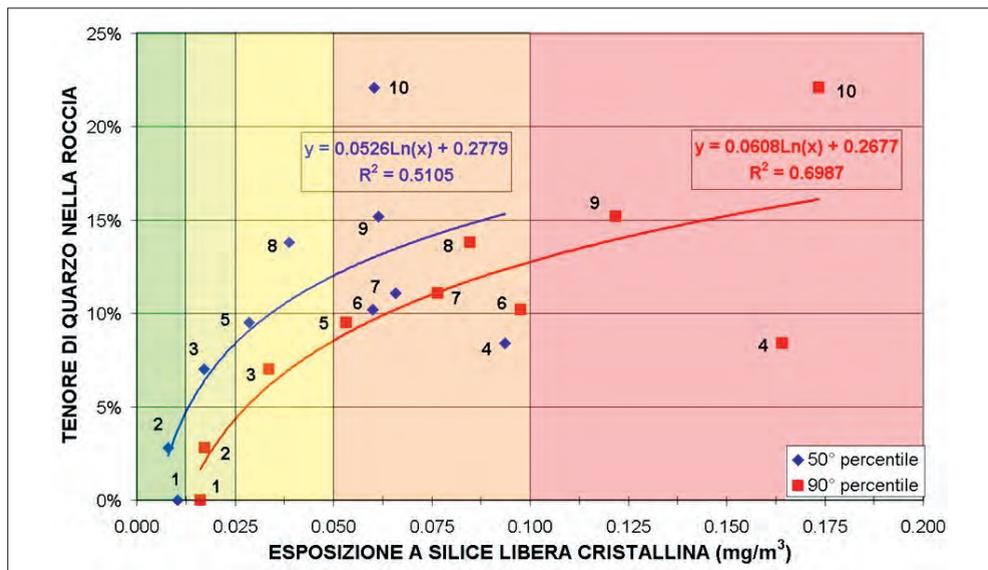
**Esposizione a SLC respirabile in 10 formazioni geologiche attraversate dallo scavo di gallerie**

Per quantificare la concentrazione di SLC dell'ambiente sotterraneo durante lo scavo di una determinata formazione geologica, più utile del valore medio dell'esposizione dei lavoratori a SLC appare il valore del 90° percentile dell'esposizione, ossia la concentrazione al di sotto della quale si situa il 90% delle misure. La scelta di adottare tale valore, indubbiamente molto conservativa, trova giustificazione nell'esigenza di garantire adeguata tutela a tutti i lavoratori impegnati nelle lavorazioni in galleria, in considerazione dell'ampiezza osservata per la distribuzione dei valori di esposizione a polveri. È inoltre utile anche la conoscenza del valore corrispondente al 50° percentile (detto mediana), il cui uso è da preferirsi rispetto alla media in quanto meno sensibile di quest'ultima alle esposizioni anomale.

Sul grafico si può evidenziare come, ad esempio, durante lo scavo attraverso le formazioni del Bisciaro/Scaglia Cinerea il 50° percentile del valore dell'esposizione a SLC corrisponda a soli 0,008 mg/m³, questo valore sale a 0,028 mg/m³ nel caso di scavo nella formazione della Maiolica, ed è di ben 0,060 mg/m³ nella formazione Marnoso-Arenacea. Per le tre formazioni geologiche, il 90° percentile del valore dell'esposizione aumenta a 0,017 (Bisciaro/Scaglia Cinerea), 0,053 (Maiolica) e 0,173 (Marnoso-Arenacea) mg/m³. Come si può osservare, per lo scavo nelle formazioni del Bisciaro/Scaglia Cinerea i valori si collocano al di sotto del valore limite occupazionale indicato

dall'ACGIH; diversamente per lo scavo nelle altre formazioni i valori sono superiori sia al limite ACGIH sia al limite SCOEL.

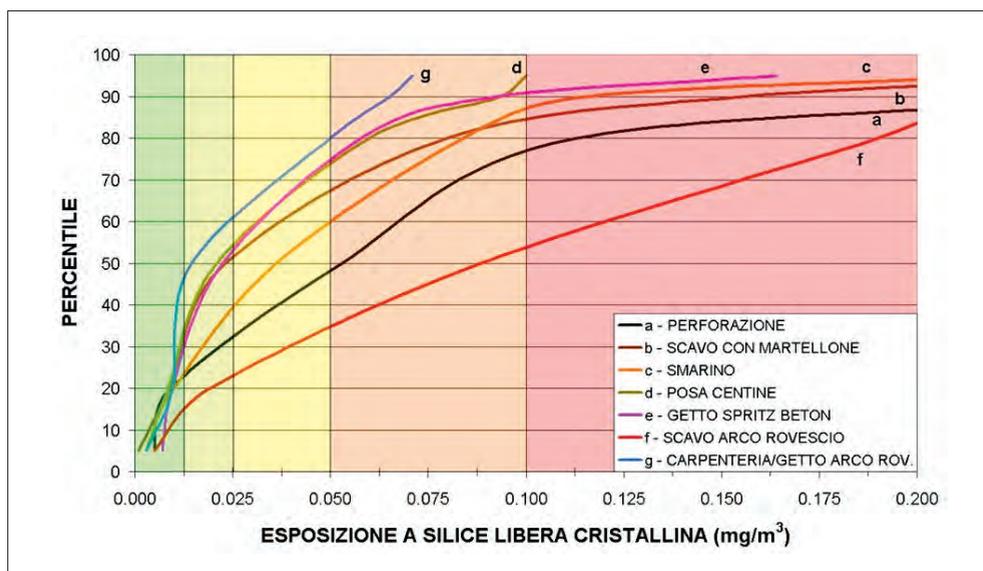
Le correlazioni esistenti fra l'esposizione a SLC respirabile e il contenuto in quarzo delle formazioni geologiche, sono state ottenute accorpando per formazione geologica in scavo i dati disponibili, calcolando quindi i percentili di esposizione.



**Correlazione fra esposizione a SLC respirabile e contenuto in quarzo nelle formazioni geologiche (i numeri sul grafico corrispondono alle 10 formazioni geologiche di cui alla Figura precedente)**

Il 50° e il 90° percentile di esposizione a SLC sono stati considerati rappresentativi della specifica formazione geologica in scavo, per la quale è stato calcolato il tenore percentuale medio di quarzo. Le 10 coppie di dati ottenute sono state poste su un grafico cartesiano al fine di studiarne la correlazione. Le elaborazioni finora presentate sono riferite all'esposizione complessiva dei lavoratori che operano in galleria, rappresentando l'intera durata del cantiere. Naturalmente, le varie fasi del ciclo di lavoro tipico dei metodi "convenzionali" di scavo si differenziano relativamente alle condizioni di polverosità nell'ambiente di lavoro. Per valutare in modo adeguato le differenze di esposizione a SLC nelle varie fasi, tenendo contemporaneamente conto anche della litologia in scavo, sarebbe necessario un numero di misure

più elevato di quello disponibile nella sola area umbro-marchigiana. Poiché l'informazione sulla variabilità dell'esposizione a SLC nell'arco delle operazioni che costituiscono il ciclo di lavoro in galleria è utile nell'ambito della progettazione degli interventi di prevenzione e protezione dai rischi di esposizione a polveri, sembra importante fornire dei dati anche se non legati alla litologia in scavo.



**Esposizione a SLC respirabile per i lavoratori che operano in galleria in Italia, per fase del ciclo di lavoro**

L'elaborazione riportata nella Figura precedente è stata ricavata utilizzando oltre 300 misure di esposizione a SLC effettuate in numerosi cantieri distribuiti in tutta Italia. I dati sono stati accorpati per fase del ciclo di lavoro, indipendentemente dalla roccia in scavo, dalla mansione e dalla tipologia di scavo "convenzionale".

La situazione ritratta dal grafico conferma quanto intuitivamente si poteva prevedere, fornendo però ulteriori elementi che consentono di affrontare la problematica attinente alla prevenzione e protezione dei lavoratori in termini quantitativi.

## 9 Metodologia di valutazione del rischio

Le elaborazioni presentate nel cap. 8 permettono di determinare la correlazione fra esposizione personale e tenore in quarzo nella roccia, in assenza di specifici provvedimenti di prevenzione, ad eccezione della tradizionale ventilazione forzata in mandata. La migliore equazione di correlazione risulta essere di tipo esponenziale:

90° percentile: Esposizione Attesa in  $\text{mg}/\text{m}^3 = \text{EXP}((Qz\% - 0,2677)/0,0608)$

50° percentile: Esposizione Attesa in  $\text{mg}/\text{m}^3 = \text{EXP}((Qz\% - 0,2799)/0,0526)$

dove Qz rappresenta il tenore in quarzo della formazione geologica in cui avviene lo scavo in galleria, mentre per esposizione attesa si intende il percentile dell'esposizione a SLC respirabile, espressa in  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

Inserendo nelle equazioni come ordinata il valore presunto del tenore di quarzo nella formazione geologica in scavo, si ottiene in uscita un valore indicativo del percentile della concentrazione di SLC respirabile nell'ambiente di lavoro. Per esempio, se il tenore in quarzo nella formazione della Maiolica è del 9,5% (valore medio calcolato in questo studio) il 90° percentile previsto per la concentrazione di SLC respirabile sarà pari a 0,058  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

La correlazione proposta fornisce un'esposizione a SLC non nulla anche in assenza di quarzo nella roccia in scavo. Infatti, inserendo un valore pari allo 0% per il tenore si ottiene un'esposizione di 0,012  $\text{mg}/\text{m}^3$  come 90° percentile (il 90% delle misure sarà sotto tale concentrazione) e di 0,005  $\text{mg}/\text{m}^3$  come 50° percentile (che corrisponde approssimativamente al valore medio). Questo risultato rende conto del fatto che anche in situazioni in cui il quarzo non è presente nella roccia in scavo può comunque essere presente nella polvere sollevata nell'atmosfera di lavoro, a causa dell'impiego di materiali edili che lo contengono (cap. 3).

L'uso delle equazioni con tenori di quarzo superiori al 25% fornisce valori non realistici. D'altra parte, contenuti molto elevati di quarzo nella roccia producono sempre condizioni dell'ambiente di lavoro che richiedono importanti interventi di prevenzione e protezione dalle polveri silicotigene.

L'applicazione delle equazioni per alcuni valori del tenore di quarzo nella roccia è riportata nella Tabella che segue.

Tenore medio di quarzo della formazione geologica	50° percentile di esposizione a SLC (mg/m <sup>3</sup> )	90° percentile di esposizione a SLC (mg/m <sup>3</sup> )
0%	0,005	0,012
2%	0,007	0,017
4%	0,011	0,024
6%	0,016	0,033
8%	0,023	0,046
10%	0,034	0,063
12%	0,050	0,088
15%	0,088	0,144
18%	0,155	0,236
22%	0,333	0,456

Valori del 50° e 90° percentile dell'esposizione a SLC attesi in funzione del contenuto di quarzo nella formazione geologica in scavo

Il valore del tenore di quarzo della formazione geologica, da inserire nelle equazioni o direttamente nella Tabella, può essere dettato direttamente da chi, per conto dell'impresa di scavo, è chiamato ad effettuare la valutazione del rischio. In questo caso l'impresa farà sottoporre ad analisi quantitative di laboratorio un numero di campioni di roccia adeguato a rappresentare la formazione geologica in scavo, prelevati da sondaggi o da affioramenti nel corso delle indagini preliminari, e adotterà un metodo di calcolo del tipo riportato nell'Appendice.

Nell'area umbro-marchigiana, in carenza di una specifica caratterizzazione del sito, possono essere utilizzate in fase di progettazione preliminare degli interventi, le stime dei tenori di quarzo e della conseguente esposizione a SLC riportate nella Tabella seguente.

FORMAZIONE GEOLOGICA	CONTENUTO DI QUARZO (%)		90° percentile ESPOSIZIONE a SLC (mg/m <sup>3</sup> )	
	minimo	massimo	minima	massima
Calcere Massiccio	0		0,012	
Corniola	5	15	0,028	0,140
Rosso Ammonitico	3	5	0,020	0,028
Calcarei a Posidonia	3		0,020	
Calcarei Diaspri	10	45	0,063	>1
Maiolica	5	14	0,028	0,120
Marne a Fucoidi	4	16	0,024	0,170
Scaglia Bianca	9	22	0,054	0,460
Scaglia Rossa	4	14	0,024	0,120
Scaglia Variegata	1	5	0,014	0,028
Scaglia Cinerea	2	4	0,017	0,024
Bisciario	3	7	0,020	0,039
Schlier	3	14	0,020	0,120
Marnoso-Arenacea	17	23	0,200	0,540
Compl. argil. Casacastalda	15		0,144	
Arenarie di Matelica	15	25	0,144	0,750
Arenarie di Serraspina	46		>1	
Gessosolfifera	8		0,046	
Arenarie della Formaz. a Colombacci	23		0,538	

Esposizione a SLC attesa (90° percentile) in funzione della formazione geologica in scavo

Poiché i dati di sperimentali sono alquanto dispersi, ci si deve attendere che il valore finale ottenuto sia affetto da un margine di oscillazione.

La formulazione dei valori probabili di esposizione a SLC **in caso di non attuazione di misure di prevenzione** specifiche per la galleria oggetto dello scavo, può essere di grande aiuto per la definizione delle soluzioni organizzative e impiantistiche da adottare per ridurre l'entità del rischio. È bene ribadire che lo studio di questi interventi deve essere affrontato già in fase di progettazione, in modo da operare le scelte più idonee per tutelare la salute dei lavoratori, spesso anche a minor costo rispetto a modifiche implementate tardivamente a cantiere già avviato.

È anche bene sottolineare che i valori di esposizione a SLC sopra indicati possono essere utilizzati ai fini di una valutazione dei rischi **preliminare** all'inizio delle operazioni di scavo. È però sempre necessario che a questa prima fase faccia seguito la valutazione specifica del sito (tramite l'effettuazione di misurazioni sul campo), come previsto dalla normativa, una volta avviati i lavori.



## 10 Misure di prevenzione e protezione dalle polveri

Alcuni recenti volumi (Regione Toscana, 2004; Arcangeli et al., 2008) fanno il punto sulle misure concepite fino ad oggi per la lotta contro le polveri silicotigene nello scavo delle gallerie con metodologie tradizionali. A questi lavori si rimanda per un esame più approfondito delle misure descritte nel seguito.

Il D.Lgs. 81/2008 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, art. 15, elenca le tipologie degli interventi che possono essere messi in atto per la salvaguardia dei lavoratori. La sostituzione dell'agente pericoloso è la misura di prevenzione prioritaria. Tuttavia, poichè il quarzo presente nelle polveri aerodisperse nell'ambiente di lavoro della galleria deriva primariamente dalle rocce oggetto dello scavo (di cui rappresenta molto spesso un costituente, in percentuali variabili), la sua sostituzione non è possibile. La presenza di SLC potrebbe però essere limitata nelle fonti secondarie di polverosità, in particolare scegliendo opportunamente la mineralogia degli inerti per il calcestruzzo. Infatti, l'esposizione a SLC si può generare nelle perforazioni e negli scavi del calcestruzzo già messo in posa e nelle operazioni di getto di spritz beton (calcestruzzo spruzzato). Naturalmente, sarebbe preferibile utilizzare inerti a contenuto in quarzo basso o nullo. In assenza di una normativa con prescrizioni particolari sulla composizione mineralogica degli inerti a tale finalità, la scelta del materiale è normalmente legata soprattutto ai costi di trasporto.

Facendo riferimento alla gerarchia di priorità dettata dal D. Lgs. 81/2008, per ridurre il rischio alla fonte devono essere preferibilmente adottate misure di protezione collettiva rispetto alle misure di protezione individuale. Inoltre, si può intervenire sui mezzi meccanici, sulle attrezzature di lavoro e sull'implementazione di corrette pratiche organizzative. L'uso di dispositivi di protezione individuale, e cioè di mascherine che riducano la quantità di polvere respirata, è l'ultimo tipo di risorsa da considerare.

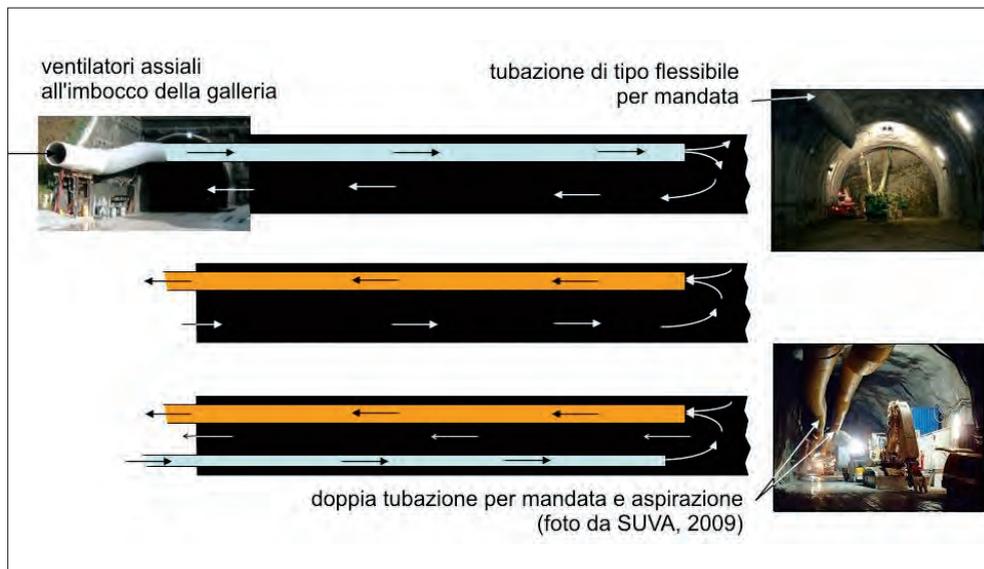
È bene sottolineare che l'efficacia delle misure di prevenzione fino ad oggi concepite per la riduzione dell'impatto delle polveri sulla salute dei lavoratori che operano in galleria, elencate più avanti in questo capitolo, non è stata ancora validata in termini quantitativi. In altre parole, mancano studi che dimostrino l'entità della riduzione delle polveri respirabili nell'ambiente di galleria a seguito dell'implementazione degli interventi. Le conoscenze attuali

appaiono quindi carenti, tenendo conto dei danni causati alla salute dei lavoratori e delle potenzialità che la tecnologia ha dimostrato di poter garantire in altri campi della prevenzione sul posto di lavoro. In tal senso, è auspicabile che uno sforzo congiunto da parte di imprese e organi di controllo sia intrapreso nel prossimo futuro.

## Misure di prevenzione

**Impianto di ventilazione** - Nello scavo di qualsiasi galleria è necessariamente prevista la ventilazione forzata del tunnel in scavo. Come è noto, un efficiente ricambio d'aria è di estrema importanza per garantire la presenza di ossigeno durante i lavori di scavo, per allontanare i gas di scarico prodotti dai mezzi a motore e i fumi tossici (e le polveri) prodotti dalla volata per l'abbattimento della roccia sul fronte di scavo. Solitamente l'impianto di ventilazione è costituito da ventilatori assiali posti all'imbocco della galleria e collegati a una tubazione di tipo floscio che porta l'aria esterna fino al fronte di scavo. La tubazione viene quindi progressivamente allungata con l'avanzamento dei lavori; al progredire del fronte di scavo il sistema di ventilazione deve ovviamente garantire portate e pressioni crescenti (D.P.R. n. 320, art. 30 comma 2).

Il sistema di ventilazione di gran lunga più comune, soprattutto nelle gallerie a fondo cieco, è quello della ventilazione in mandata, in cui l'aria proveniente dall'esterno viene soffiata sul fronte in scavo da una distanza di pochi metri e quindi defluisce per riflusso dal fronte verso l'imbocco percorrendo il tunnel. È necessario sottolineare che il dimensionamento di progetto degli impianti di ventilazione e la velocità dell'aria non sono calcolate in funzione delle polveri, ma con la finalità di mantenere gli inquinanti gassosi al di sotto di determinati limiti. L'effetto della ventilazione forzata sulla distribuzione e sui livelli di concentrazione delle polveri respirabili non sembra essere stato ancora studiato adeguatamente; la movimentazione e il trasporto delle polveri sarà funzione della velocità dell'aria e della dimensione del particolato. Nel caso in cui contemporaneamente allo scavo sul fronte della galleria si svolgano altre attività in posizione arretrata, ad una certa distanza dal fronte, il trasporto del particolato più fine verso l'uscita, prodotto dalla ventilazione, implica un'esposizione a polveri respirabili aggiuntiva per i lavoratori presenti.



**Sistemi di ventilazione: in mandata (in alto), in aspirazione (al centro), in contemporanea mandata e aspirazione (in basso)**

Il sistema di ventilazione in aspirazione non presenta l'inconveniente di spostare la polvere verso altre zone della galleria, ma ha il difetto di creare una zona morta di fumi e polveri tra l'estremità della tubazione e il fronte di scavo. Per eliminare, o ridurre, tale effetto devono essere adottati opportuni accorgimenti. La stessa tubazione di ventilazione può essere utilizzata alternando fasi di mandata a fasi di aspirazione, a seconda delle esigenze. La velocità dell'aria nel tubo di aspirazione dovrebbe però essere sufficientemente elevata da evitare la deposizione di polveri nella tubazione, in caso contrario la polvere verrebbe spinta nuovamente verso il fronte di scavo alla commutazione da aspirazione a mandata. Le forti perdite di carico legate all'utilizzo di velocità dell'aria elevate rendono questo sistema applicabile solo alle gallerie di breve lunghezza.

Un sistema che prevede l'installazione di due tubazioni, una di mandata e una di aspirazione, che operano contemporaneamente, è utilizzato in alcuni paesi europei per gli scavi a fondo cieco. Dal punto di vista della riduzione dell'esposizione a polveri questa appare la soluzione più efficace.

È bene osservare che tutti i dati di esposizione a SLC presentati nel cap. 8 sono stati ottenuti in gallerie in cui era attiva la ventilazione forzata in mandata.

**Scavo ad umido con martellone** - Bagnare il materiale nel punto di operatività del martellone durante lo scavo del fronte, per impedire alla polvere di alzarsi nell'aria, è tradizionalmente ritenuto un metodo efficace per la riduzione dell'emissione di polveri durante tale fase lavorativa. In questo caso, l'utensile di perforazione dovrebbe essere munito di un dispositivo per l'iniezione di acqua. L'efficienza del sistema è legata ad una corretta manutenzione mirata alla verifica della non otturazione degli ugelli.



**Bagnatura del fronte con tubo**

**Sistemi di nebulizzazione** - Si tratta in genere di sistemi ad acqua e/o ad acqua-aria. Attraverso una serie di ugelli nebulizzanti, l'impianto immette nell'area circostante finissime particelle di acqua nebulizzata. Le piccolissime gocce d'acqua, della dimensione di pochi micron, collidono con le particelle di polvere già presenti nell'aria, le inglobano e le fanno cadere al suolo per effetto di gravità.

Linee di nebulizzazione vengono utilizzate per ridurre la concentrazione di polvere, per esempio durante l'opera di scavo e nel trasporto del marino in galleria. La possibilità di intervenire su aree molto localizzate fa sì che il consumo di acqua possa essere molto basso, evitando la produzione di rivoli d'acqua a terra. Nell'evoluzione più recente, linee di nebulizzazione possono essere inserite anche nelle benne di pale gommate o escavatori, sfruttando l'impianto idraulico del mezzo stesso. In altri casi, cannoni nebulizzatori, formati da una serie di ugelli montati su una ghiera mobile, proiettano acqua

nebulizzata fino a 30-40 m di distanza. A volte i cannoni sono stati utilizzati per la bagnatura del fondo stradale in galleria, per evitare il sollevamento di polveri con il transito dei mezzi. In un altro sistema, l'arco di nebulizzazione, una serie di ugelli distribuiti su un telaio posizionato trasversalmente all'arco della calotta della galleria produce una "parete" di acqua nebulizzata. Le goccioline intercettano il flusso d'aria in uscita dal fronte verso l'esterno, costituendo una barriera contro la diffusione della polvere e riducendo l'esposizione a polveri dei lavoratori che operano a monte dell'arco, ad una certa distanza dal fronte di scavo.

**Nastro trasportatore del marino e gruppo di frantumazione** - In alternativa al trasporto su gomma del marino, che comporta il transito di camion e/o dumper per il trasporto all'esterno del materiale, con conseguente immissione in aria di polveri, è possibile utilizzare un sistema di nastri trasportatori. Tale soluzione, che richiede anche la creazione di un impianto di frantumazione del marino a ciclo chiuso e la previsione di sistemi di bagnatura del materiale trasportato, è particolarmente onerosa, quindi proponibile solo per gallerie di lunghezza significativa ed in cui siano presenti lavorazioni contemporanee arretrate rispetto al fronte.



**Nastro trasportatore in galleria (foto da Suva, 2003)**

**Macchine operatrici con adeguata cabinatura** - Per minimizzare il rischio di esposizione a polveri contenenti SLC gli operatori addetti alla conduzione di macchine operatrici (escavatore, pala, ecc.) devono essere isolati all'interno della cabina del mezzo, che deve essere dotata di un sistema di climatizzazione con ricambio di aria esterna opportunamente filtrata; inoltre, la cabina deve trovarsi in condizioni di sovrappressione rispetto all'ambiente esterno. Naturalmente, è necessario che i filtri siano efficienti rispetto alle particelle di dimensioni della frazione respirabile. La manutenzione è di fondamentale importanza per mantenere l'efficacia del sistema filtrante.

**Procedure di lavoro** - Interventi sul sistema organizzativo del cantiere e sulle procedure di lavoro possono agire efficacemente sulla riduzione del rischio da esposizione a polveri silicotigene per i lavoratori che si trovano ad operare in galleria. Questo è particolarmente importante quando l'escavazione in galleria è concomitante ad altre attività svolte in posizioni arretrate (ad esempio per la costruzione del rivestimento definitivo) e ancor più se sono interessati anche lavoratori dipendenti di altre imprese. Le principali misure di prevenzione da adottare, che interessano ogni fase lavorativa, e che riguardano le interferenze fra lavorazioni e le procedure di lavoro sono:

- organizzare l'attività in modo da limitare quanto più possibile la contemporaneità delle lavorazioni che generano polvere;
- fare in modo che durante le operazioni che comportano produzione di polvere sia permesso l'accesso nell'area di lavoro solo al personale direttamente coinvolto;
- prevedere congrui tempi di ripresa dei lavori in galleria dopo l'utilizzo di esplosivo tenendo conto del tempo necessario per l'evacuazione o il deposito delle polveri generate dalla volata.

**Formazione ed informazione** - I lavoratori esposti a rischio di inalazione di polveri silicotigene devono essere opportunamente formati sul rischio specifico, ponendo particolare attenzione all'informazione/formazione relativa a tutte le procedure organizzative che devono essere attuate in cantiere per la limitazione dell'esposizione dei lavoratori all'inquinante.

## Misure di protezione

**Dispositivi di protezione individuale** - Nel caso in cui, nonostante la messa in atto delle misure di prevenzione non sia possibile ridurre il rischio al di sotto del valore limite è necessario ricorrere all'utilizzo di Apparecchi di Protezione delle Vie Respiratorie (APVR). È bene, comunque, sottolineare che

le maschere antipolvere sono indicate in caso di esposizione temporanea ed eccezionale alle polveri, ma il loro uso prolungato non è sostenibile da parte del lavoratore. Pertanto non possono essere utilizzate in sostituzione delle misure tecniche di prevenzione. Inoltre, la loro efficacia è limitata e dipende dalla quantità di polveri presenti.

La corretta scelta di un APVR deve seguire i criteri dettati dal D.M. 2 maggio 2001 "Criteri per l'individuazione e l'uso dei DPI". Per le polveri contenenti SLC in genere la scelta più opportuna è costituita da respiratori a filtro di tipo non assistito, quali:

- respiratore a filtro con semimaschera (o quarto di maschera);
- facciale filtrante antipolvere.

Devono essere utilizzati i modelli marcati S, contro aerosol solidi e liquidi a base acquosa. La scelta della classe di efficienza della filtrazione (bassa, media, alta) deve essere effettuata in funzione della concentrazione e del valore limite dell'inquinante. In generale, risulta indispensabile l'uso di DPI delle vie respiratorie con filtro antipolvere perlomeno di classe 2 (media efficienza) e preferibilmente di classe 3 (alta efficienza).



**Mascherina antipolvere FFP3**

## Bibliografia

APAT (2002). *Guida italiana alla classificazione e alla terminologia stratigrafica*. Quaderni, Serie III, Vol. 9, 155 pp.

Arcangeli S., Buffa C., Cammarano A., Cenni I., Di Salvatore F., Fontana M., Mecchia M., Passeri G., Scibelli A.M., Zambonelli A., Zoppi P. (2008). *Misure di prevenzione e protezione per ridurre l'esposizione a polveri contenenti silice libera cristallina - Scavo di gallerie*. NIS - Network Italiano Silice, <http://www.ausl.mo.it/dsp/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/343>.

INAIL - Direzione Regionale per il Trentino (2001). *Patologie da silice: silicosi, cancro ed altre malattie*. Seminario di studio, Trento 8 maggio 2001. Atti. Ed. Tipolitografia INAIL- Milano, 110 pp.

Metodo UNICHIM N. 2010: *Ambienti di lavoro. Determinazione della frazione respirabile delle particelle aerodisperse. Metodo gravimetrico*. Ed. 2011.

Metodo UNICHIM N. 2398: *Ambienti di lavoro. Silice libera cristallina in polveri respirabili. Analisi diretta su filtro per diffrazione dei raggi X*. Ed. 2011.

Regione Toscana (2004). *Profili di rischio nei lavori di costruzione di grandi infrastrutture - Gallerie naturali e strade*. In collaborazione con ISPESL e ASL 10 Firenze, Edizioni Regione Toscana, 206 pp.

Società Geologica Italiana (1994). *Guide geologiche regionali - Appennino umbro-marchigiano*. BE-MA editrice, 301 pp.

SUVA (2003). *Sicurezza e protezione della salute nei lavori in sotterraneo*. Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni - Tutela della salute. 26 pp.

SUVA (2009). *Aria sana nei tunnel - un diritto per tutti - Informazioni tecniche per i lavoratori*. Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni - Tutela della salute. 24 pp.

## Appendice

### Determinazione del contenuto di quarzo nelle formazioni umbro-marchigiane

Le schede presentate nel seguito sintetizzano i dati relativi al contenuto in quarzo delle formazioni geologiche della successione umbro-marchigiana ottenuti in questo studio.

I geologi dell'Istituto hanno effettuato campionamenti in 8 località dell'Appennino umbro-marchigiano (cap. 6) prelevando complessivamente 153 campioni di roccia, analizzati poi in diffrattometria dei raggi X nel Laboratorio di Igiene Industriale CONTARP di Roma.

Le schede, ciascuna relativa ad una formazione geologica, riportano:

- una sintetica descrizione delle caratteristiche litologiche;
- l'età di deposizione;
- lo spessore nell'area umbro-marchigiana;
- una o due colonne stratigrafiche (la colonna rappresenta l'altezza di 1 metro), che illustrano, rispettivamente, la litostratigrafia più classica o due distinte litostratigrafie corrispondenti al contenuto, massimo e minimo, del quarzo presente. Sulla base dei dati diffrattometrici rilevati, viene infatti riportato il valore percentuale medio del contenuto in quarzo per la specifica formazione e la relativa variabilità. A tal fine si è impiegato il procedimento di calcolo descritto più avanti;
- alcune immagini fotografiche che illustrano i diversi litotipi caratteristici della formazione geologica: per ciascuno di essi sono riportati il contenuto medio di quarzo e la relativa variabilità, come determinati per via diffrattometrica.

Gran parte delle formazioni geologiche tipiche della successione umbro-marchigiana si sono formate secondo "sequenze stratigrafiche" che si sono ripetute nel tempo. La ciclicità in una successione sedimentaria, per esempio indotta dai periodi dei parametri orbitali terrestri, può produrre alternanze ritmiche di litologie diverse.

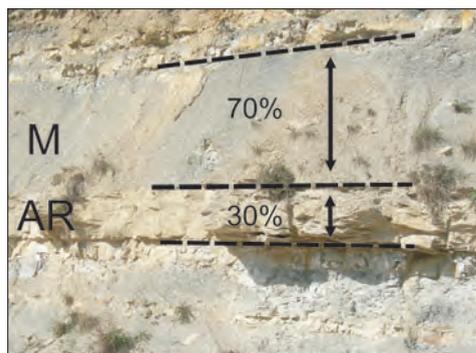
Così, ad esempio, la formazione delle "Marne a Fucoidi", ampiamente rappresentata nell'area umbro-marchigiana, ha uno spessore complessivo di 70-80 m ed è disposta in sequenze ritmiche, evidenziate da variazioni cromatiche e da variazioni nel contenuto di carbonato di calcio che determinano l'alternanza di strati più calcarei e strati argilloso-marnosi.

In altri casi, le sequenze stratigrafiche hanno formato, nel tempo, enormi spessori di depositi. Per esempio, nella formazione “Marnoso-Arenacea” lo spessore complessivo, strato dopo strato, può raggiungere i 2000 m, e chiaramente sull'area regionale la variabilità verticale e orizzontale della formazione può essere rilevante.

La formazione “Marnoso-Arenacea” è il risultato della stratificazione di correnti di torbida sottomarine, in cui ogni strato ha uno spessore di alcuni decimetri ed è costituito da due “litotipi”: una parte bassa a granulometria più grossa (arenacea) e una parte alta di materiale marnoso. Naturalmente il contenuto di quarzo nelle due parti dello strato è diverso. In base ai risultati dello studio INAIL, il contenuto in quarzo è del  $15\% \pm 5\%$  nella parte marnosa dello strato e del  $26\% \pm 12\%$  nella parte arenacea. La variabilità è stata considerata pari ad 1 deviazione standard di tutti i valori analitici.

Le differenze da luogo a luogo dello spessore relativo delle varie “parti” dello strato, valutate in base ai dati di letteratura, sono contenute entro i valori massimo e minimo riportati nelle schede di ogni formazione. Per esempio, per la formazione Marnoso-Arenacea la variabilità è compresa fra un massimo di “70% arenaria e 30% marna” e un minimo di “20% arenaria e 80% marna”. Disponendo del valore del rapporto specifico del sito dell'opera, il contenuto in quarzo può essere calcolato con una migliore approssimazione. Nell'esempio di calcolo di seguito riportato, è stato determinato un valore medio di 30% arenaria e 70% marna.

#### Esempio di calcolo del contenuto di quarzo:



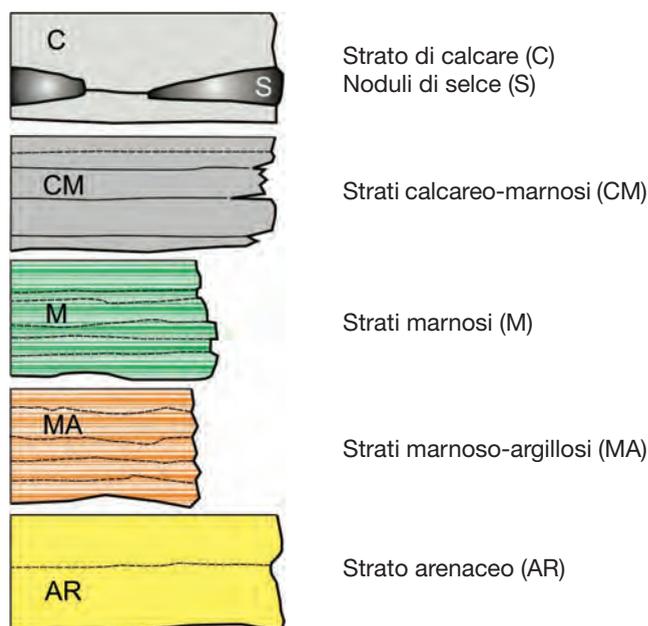
Parte marnosa:  
spessore = 70%  
contenuto in quarzo =  $15\% \pm 5\%$

Parte arenacea:  
spessore = 30%  
contenuto in quarzo =  $26\% \pm 12\%$

Contenuto MEDIO di quarzo nella formazione Marnoso-Arenacea =  $(70\% \times 15\%) + (30\% \times 26\%) = 18\%$

Contenuto MASSIMO di quarzo =  $(70\% \times (15\% + 5\%)) + (30\% \times (26\% + 12\%)) = 25\%$

Contenuto MINIMO di quarzo =  $(70\% \times (15\% - 5\%)) + (30\% \times (26\% - 12\%)) = 11\%$

**Legenda delle litologie****Analisi di laboratorio per la determinazione del tenore di quarzo nei campioni massivi**

Per definire il contenuto di quarzo di ogni formazione geologica, è stato messo a punto un procedimento per la preparazione ed analisi dei campioni raccolti sul campo.

Per ogni formazione geologica sono stati costituiti dei lotti omogenei di materiale aventi caratteristiche litologiche simili (strati calcarei, interstrati marnosi, noduli di selce, parti arenacee e parti marnose delle formazioni silico-clastiche, ecc.).

Per ogni campione, una porzione rappresentativa del materiale (circa 100 grammi) è stata frantumata con l'uso di un martello e passata al setaccio di 2,8 mm fino ad ottenere un'aliquota di 80 g, che è stata ulteriormente macinata in un mulino planetario con giara di carborundum. Una frazione (circa 2 g) ben miscelata della polvere così ottenuta è stata utilizzata per la preparazione della pasticche per l'analisi diffrattometrica.

Due diversi metodi, fondati sulla misura delle intensità dei picchi di diffrazione, sono stati messi a punto per l'analisi quantitativa del contenuto in quarzo dei campioni. L'applicazione dell'uno piuttosto che dell'altro è stata

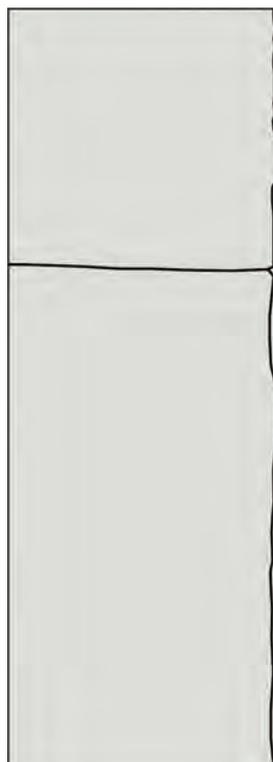
determinata in base al tenore in quarzo nel campione. Per valori minori del 15% è stato applicato il metodo delle aggiunte che consiste nell'aggiunta di quantità note della fase pura ad un campione che contiene una frazione incognita della stessa fase. Nei campioni con tenore in quarzo maggiore del 15% è stato applicato il metodo RIR (Reference Intensity Ratio) che consiste nella preparazione e nell'analisi di campioni ottenuti aggiungendo alla miscela in esame una frazione nota di corindone.

## FORMAZIONE DEL CALCARE MASSICCIO

Calcari di colore bianco, generalmente micritici, suddivisi in grosse bancate che conferiscono a questa formazione un aspetto massivo.

Età: Hettangiano - Pliensbachiano

Spessore: fino a 700-800 metri



Calcari = 100%

contenuto in quarzo:

0%



Affioramento della Formazione del Calcarea Massiccio



La formazione è costituita da grosse bancate calcaree



Strato calcareo: il quarzo è assente

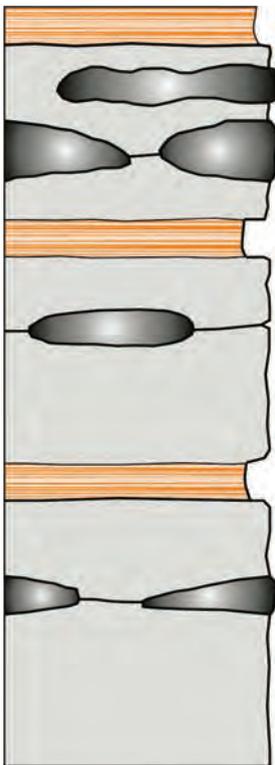
## FORMAZIONE DELLA CORNIOLA

Calcari micritici di colore grigio, con stratificazione regolare, con liste e noduli di selce bianca o grigia; nella porzione superiore, sottili interstrati argillosi.

Età: Sinemuriano - Toarciano

Spessore: da 10-20 metri fino a 200 metri

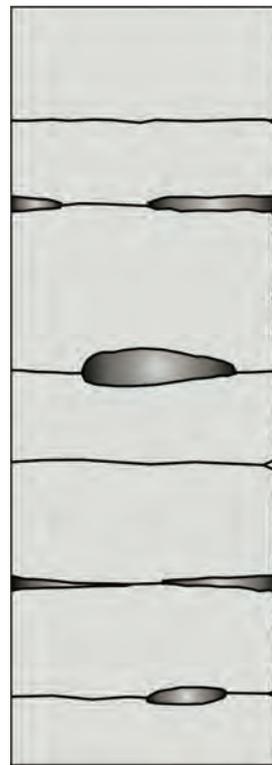
Contenuto massimo di quarzo



Calcari = 70%  
Argille = 15%  
Selce = 15%

contenuto in quarzo:  
15%  
(max. 17%)

Contenuto minimo di quarzo

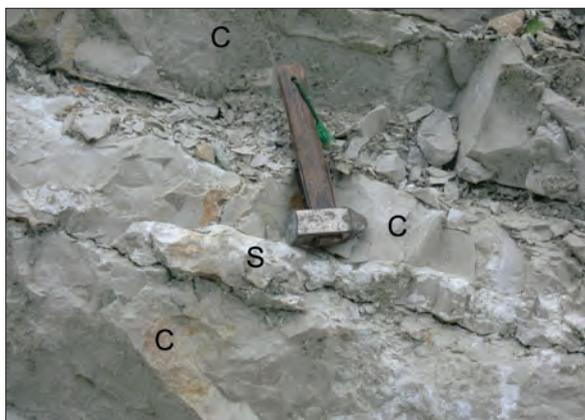


Calcari = 95%  
Selce = 5%

contenuto in quarzo:  
5%  
(min. 4%)

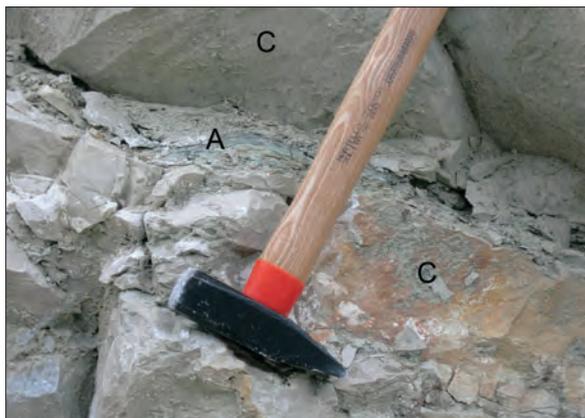


Affioramento della Formazione della Corniola



**C - Strato calcareo**  
contenuto in quarzo:  $0,8\% \pm 0,5\%$

**S - Lista di selce**  
contenuto in quarzo:  $88\% \pm 4\%$



**A - Interstrato argilloso**  
contenuto in quarzo:  $11\% \pm 2\%$

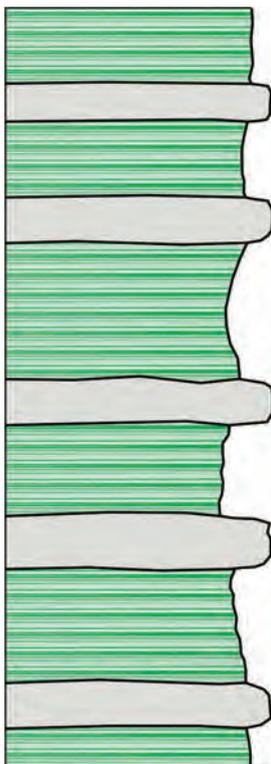
## FORMAZIONE DEL ROSSO AMMONITICO

Alternanze di calcari e marne nodulari, di colore rossastro, spesso con sedimentazione ciclica, con numerosi livelli ad Ammoniti.

Età: Toarciano

Spessore: da qualche metro fino a 40 metri

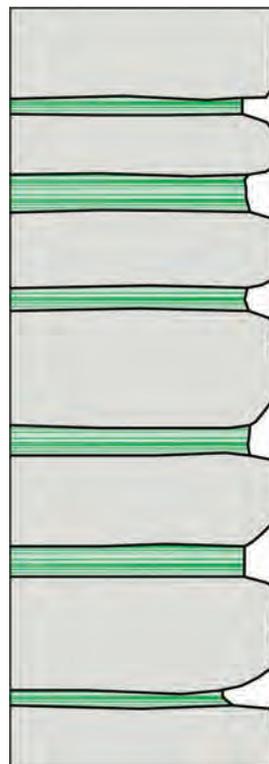
Contenuto massimo di quarzo



Calcari = 30%  
Marne = 70%

contenuto in quarzo:  
5%  
(max. 7%)

Contenuto minimo di quarzo

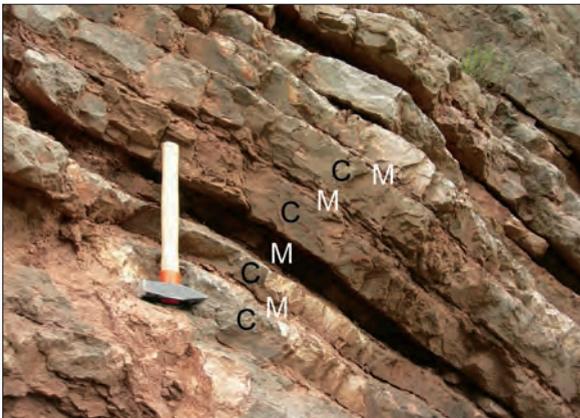


Calcari = 80%  
Marne = 20%

contenuto in quarzo:  
3%  
(min. 2%)



Affioramento della Formazione del Rosso Ammonitico



M - Strato marnoso  
contenuto in quarzo:  $7\% \pm 2\%$



C - Strato calcareo  
contenuto in quarzo:  $2\% \pm 0,2\%$

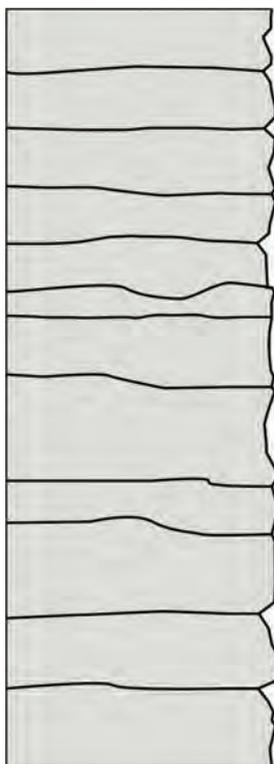
## FORMAZIONE DEI CALCARI A POSIDONIA

Nella parte superiore: calcari ricchi di resti filamentosi, con intercalati livelli risedimentati, a volte con selce in liste e noduli; nella parte inferiore: calcari marnosi e marne a volte nodulari.

Età: Toarciano - Bajociano

Spessore: fino ad alcune decine di metri

### Porzione superiore



Calcari = 100%

contenuto in quarzo: ≈3%



Affioramento della Formazione  
dei Calcari a Posidonia



Strato calcareo  
contenuto in quarzo:  $3\% \pm 1\%$

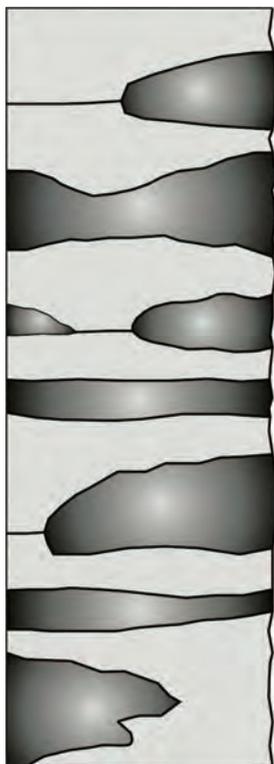
## FORMAZIONE DEI CALCARI DIASPRIGNI

Nella porzione superiore: calcari ad Aptici fittamente stratificati, con intercalazioni marnose e livelli di selce; nella porzione inferiore: sottili strati calcarei fittamente alternati a lenti e noduli di selce.

Età: Bajociano - Titoniano

Spessore: fino ad un centinaio di metri

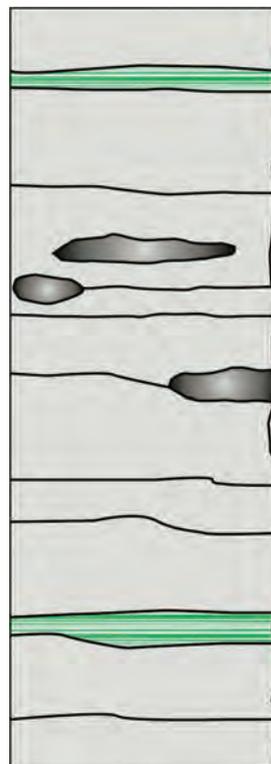
Contenuto massimo di quarzo



Calcari = 50%  
Selce = 50%

contenuto in quarzo: 45%  
(max. 47%)

Contenuto minimo di quarzo

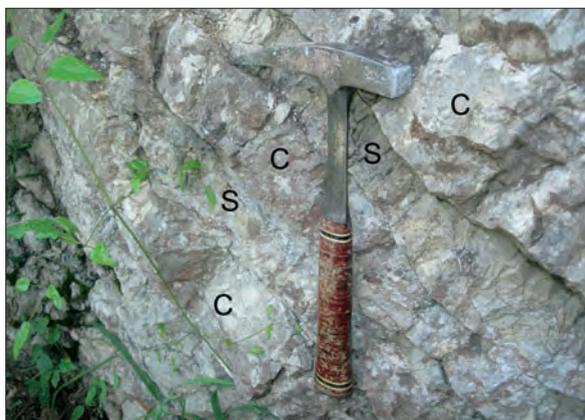


Calcari = 90%  
Marne = 5%  
Selce = 5%

contenuto in quarzo:  $\approx 10\%$



Affioramento della Formazione dei Calcari Diasprigni



Calcari ricchi di liste di selce

contenuto in quarzo dello strato calcareo (C):  $1,2\% \pm 0,6\%$

contenuto in quarzo della selce (S):  $88\% \pm 4\%$



Calcari ad Aptici  
contenuto in quarzo: 5%

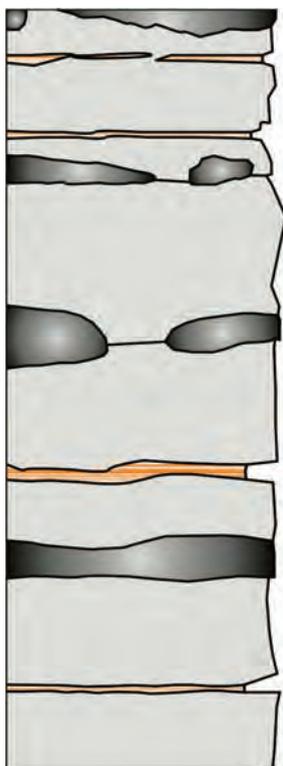
## FORMAZIONE DELLA MAIOLICA

Calcari micritici di colore bianco a grana finissima e frattura concoide, regolarmente stratificati, con selce grigia o nera in strati o noduli; a volte con sottili interstrati di marne argillose nerastre.

Età: Titoniano - Aptiano

Spessore: fino a 400 metri

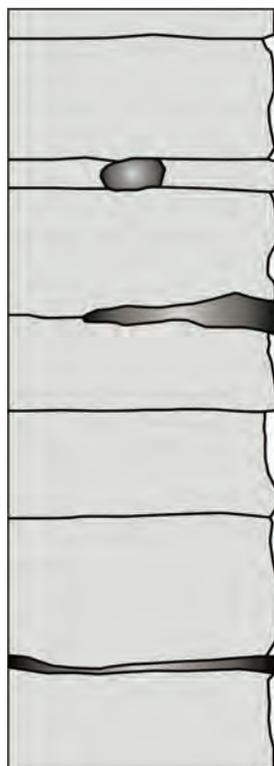
Contenuto massimo di quarzo



Calcari = 80%  
Marna Argillosa = 5%  
Selce = 15%

contenuto in quarzo: 14%  
(max. 16%)

Contenuto minimo di quarzo



Calcari = 95%  
Selce = 5%

contenuto in quarzo: 5%  
(min. 4%)



Affioramento della Formazione della Maiolica



C - Strato calcareo  
contenuto in quarzo:  $0,9\% \pm 0,7\%$

S - Lista di selce  
contenuto in quarzo:  $88\% \pm 4\%$



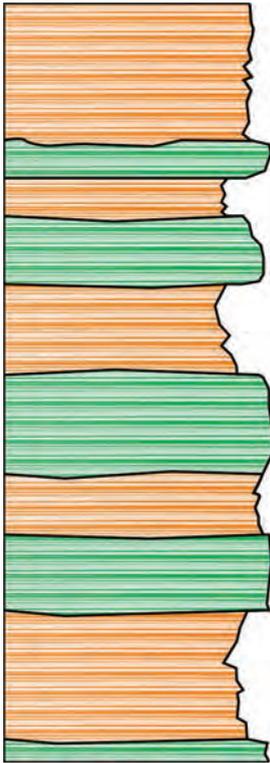
MA - Sottile interstrato  
di marna argillosa  
contenuto in quarzo: 10%

## FORMAZIONE DELLE MARNE A FUCOIDI

Alternanze ritmiche varicolori di marne e argille marnose, con intercalazioni di calcari marnosi.

Età: Aptiano - Albiano

Spessore: fino a 90 metri



Marna = 40%  
Marna argillosa = 60%

contenuto in quarzo: 10%  
(min. 4%; max. 16%)



Affioramento della Formazione delle Marne a Fucoidi



M - Strato marnoso  
contenuto in quarzo:  $8\% \pm 5\%$



MA - Strato marnoso-argilloso  
contenuto in quarzo:  $12\% \pm 6\%$

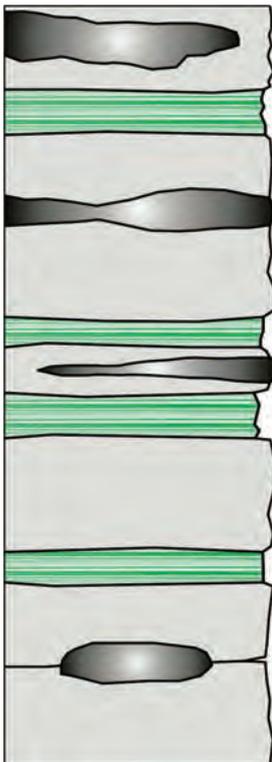
## FORMAZIONE DELLA SCAGLIA BIANCA

Calcari micritici di colore bianco, fittamente stratificati, con liste di selce nera o grigia e con interstrati marnosi.

Età: Albiano - Turoniano

Spessore: 40-70 metri

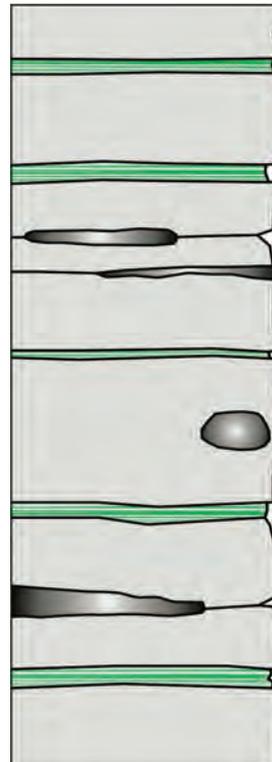
Contenuto massimo di quarzo



Calcari = 65%  
Marne = 20%  
Selce = 15%

contenuto in quarzo: 18%  
(max. 22%)

Contenuto minimo di quarzo



Calcari = 85%  
Marne = 10%  
Selce = 5%

contenuto in quarzo: 9%  
(min. 6%)



Affioramento della Formazione della Scaglia Bianca



**C - Strato calcareo**  
contenuto in quarzo:  $0,8\% \pm 0,5\%$

**S - Lista di selce**  
contenuto in quarzo:  $88\% \pm 4\%$



**M - Interstrato marnoso**  
contenuto in quarzo:  $11\% \pm 2\%$

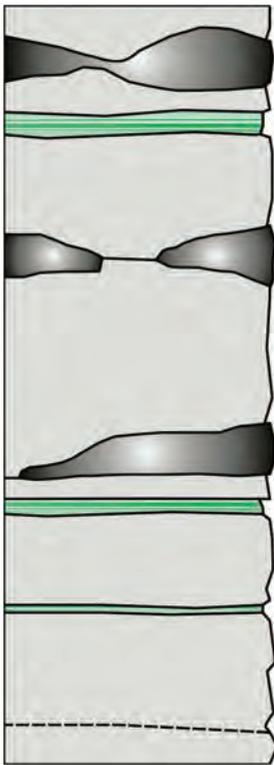
## FORMAZIONE DELLA SCAGLIA ROSSA

Calcari micritici di colore rosato, ben stratificati e a frattura scagliosa, con noduli e liste di selce rossa, con interstrati marnosi.

Età: Turoniano - Eocene medio

Spessore: 150-400 metri

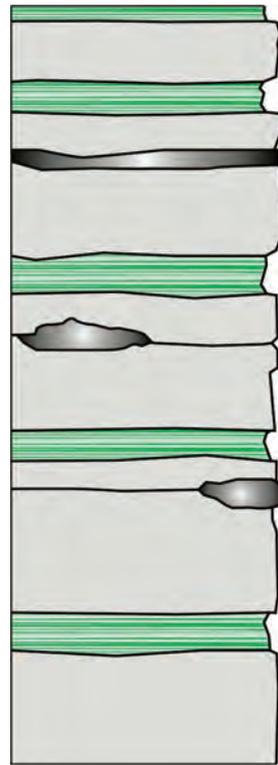
Contenuto massimo di quarzo



Calcari = 80%  
Marne = 5%  
Selce = 15%

contenuto in quarzo: 14%  
(max. 15%)

Contenuto minimo di quarzo



Calcari = 75%  
Marne = 20%  
Selce = 5%

contenuto in quarzo: 5%  
(min. 4%)



Affioramento della Formazione della Scaglia Rossa



**C - Strato calcareo**  
contenuto in quarzo:  $0,9\% \pm 0,4\%$

**S - Lista di selce**  
contenuto in quarzo:  $88\% \pm 4\%$



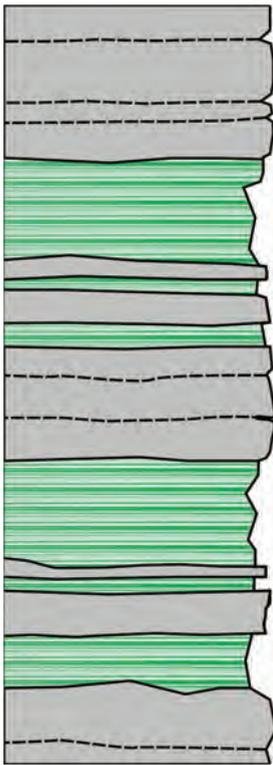
**M - Livello marnoso**  
contenuto in quarzo:  $0,7\% \pm 0,2\%$

## FORMAZIONE DELLA SCAGLIA VARIEGATA

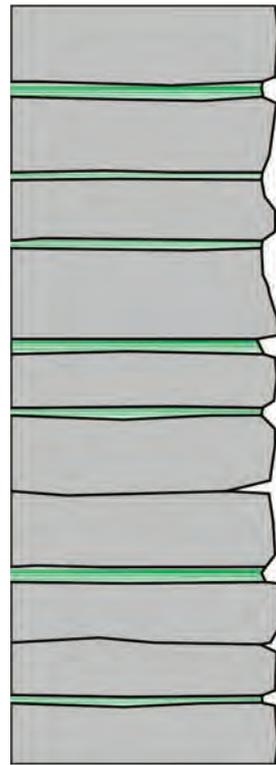
Calcari marnosi intercalati a marne, di colore rosa o grigio-verde.

Età: Eocene medio - Eocene superiore

Spessore: fino a 50 metri



Calcari marnosi = 60%  
Marne = 40%

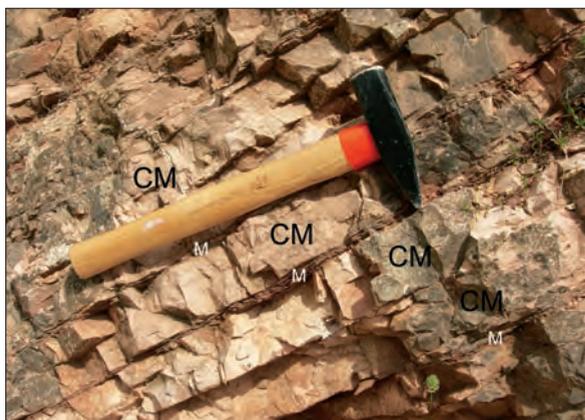


Calcari marnosi = 90%  
Marne = 10%

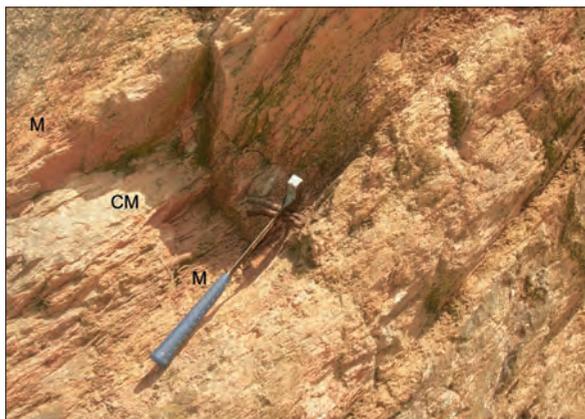
contenuto in quarzo: 3%  
(min. 1; max. 5%)



Affioramento della Formazione della Scaglia Variiegata



CM - Strato calcareo-marnoso  
contenuto in quarzo:  $3\% \pm 1\%$



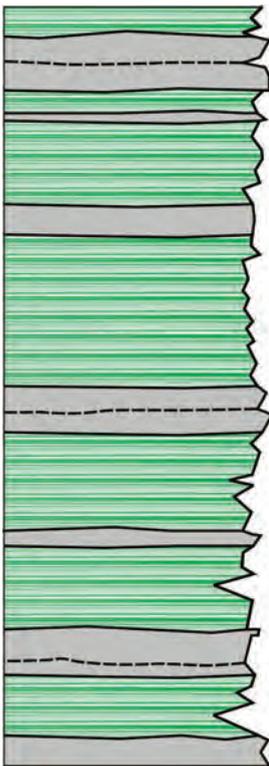
M - Livello marnoso  
contenuto in quarzo:  $3\% \pm 2\%$

## FORMAZIONE DELLA SCAGLIA CINEREA

Calcari marnosi e marne di colore grigio, marne argillose grigio-verdi fogliettate e con scistosità.

Età: Eocene superiore - Miocene inferiore

Spessore: fino a 200 metri



Calcari marnosi = 30%  
Marne = 70%

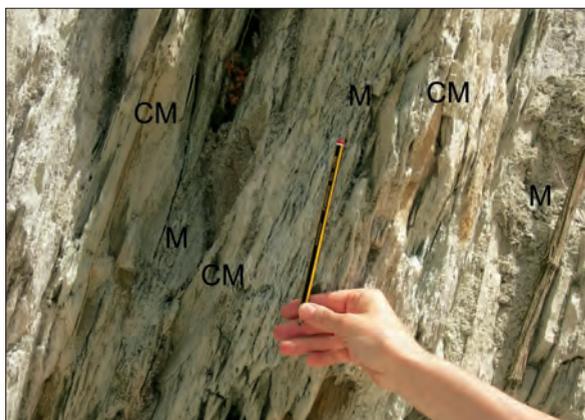


Calcari marnosi = 70%  
Marne = 30%

contenuto in quarzo: 3%  
(min. 2; max. 4%)



Affioramento della Formazione della Scaglia Cinerea



CM - Strato calcareo-marnoso  
contenuto in quarzo:  $2\% \pm 0,3\%$



M - Marna  
contenuto in quarzo:  $3\% \pm 0,7\%$

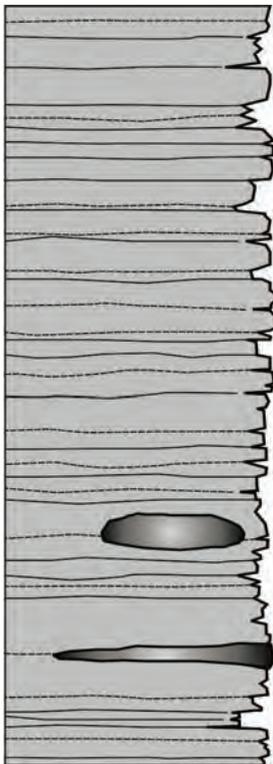
## FORMAZIONE DEL BISCIARO

Calcari marnosi ben stratificati e marne, con intercalazioni di vulcanoclastiti (cineriti e tufiti); nella parte inferiore della formazione sono presenti noduli di selce nera.

Età: Aquitaniano - Burdigaliano

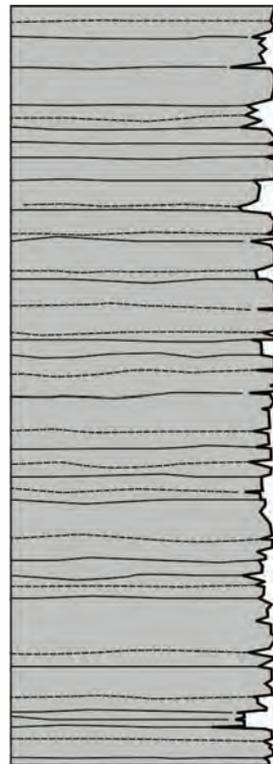
Spessore: generalmente fino a 70-100 metri

Contenuto massimo di quarzo



Calcari marnosi = 95%  
Selce = 5%  
contenuto in quarzo: 7%  
(max. 8%)

Contenuto minimo di quarzo



Calcari marnosi = 100%  
contenuto in quarzo: 3%  
(min. 2%)



Affioramento della Formazione del Bisciario



CM - Strati calcareo-marnosi  
contenuto in quarzo:  $3\% \pm 0,7\%$



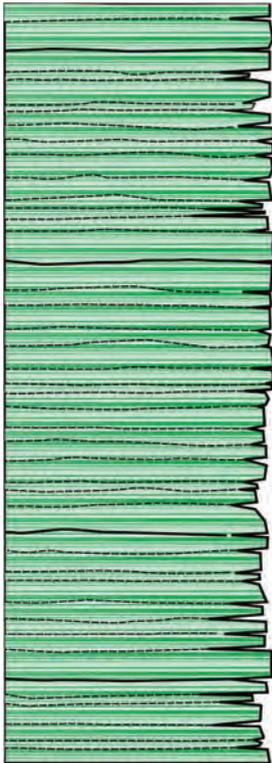
S - Nodulo di selce  
contenuto in quarzo:  $88\% \pm 4\%$

## FORMAZIONE DELLO SCHLIER

Marne, marne calcaree e marne argillose.

Età: Burdigaliano - Messiniano

Spessore: da pochi metri a 400 metri



Marne = 100%

contenuto in quarzo: 8%  
(min. 3%; max 14%)



Affioramento della Formazione dello Schlier



Strati marnosi  
contenuto in quarzo:  $8\% \pm 5\%$



Strati marnosi

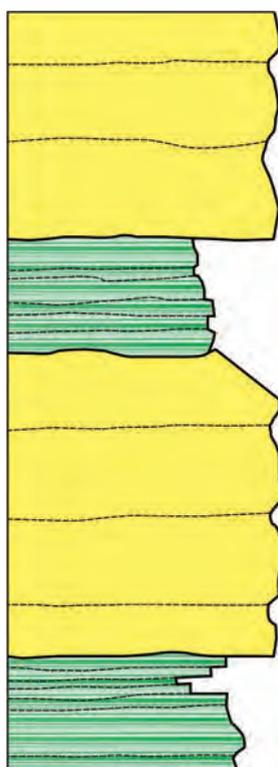
## FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA

Complesso di sedimenti torbiditici rappresentati principalmente da alternanze di marne argillose e arenarie.

Età: Burdigaliano - Messiniano

Spessore: fino a 2000 metri

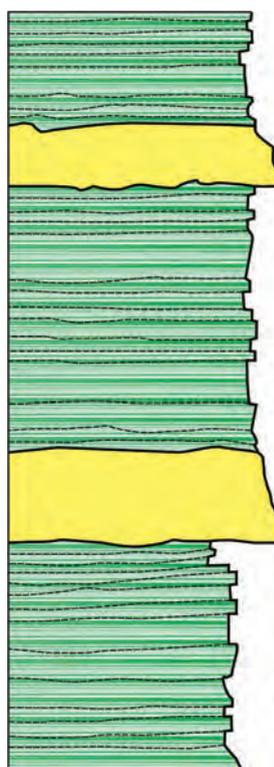
Contenuto massimo di quarzo



Arenarie = 70%  
Marne = 30%

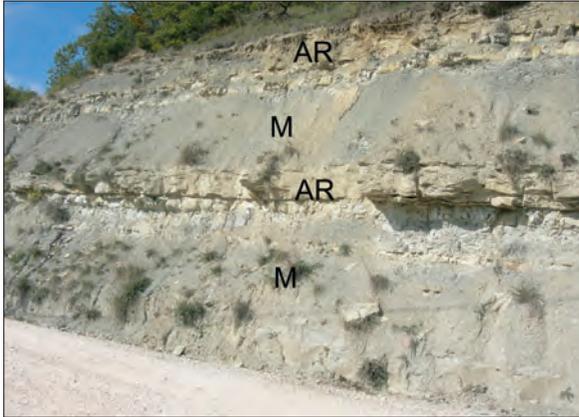
contenuto in quarzo: 23%  
(max. 33%)

Contenuto minimo di quarzo



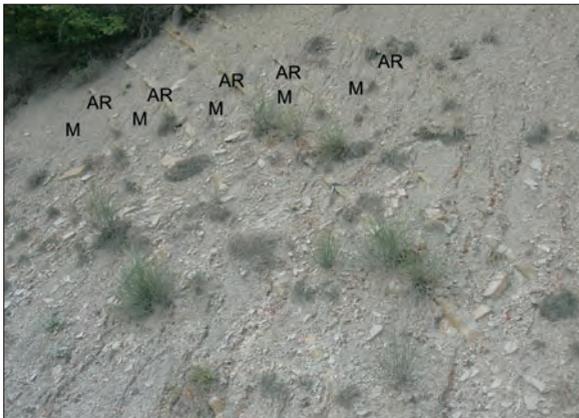
Arenarie = 20%  
Marne = 80%

contenuto in quarzo: 17%  
(min. 11%)



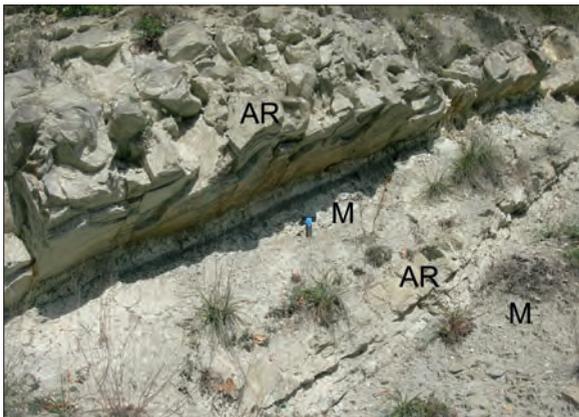
**Affioramento della Formazione  
Marnoso Arenacea**

AR - Strati arenacei 30%  
M - Strati marnosi 70%



**Affioramento della Formazione  
Marnoso Arenacea**

AR - Strati arenacei 20%  
M - Strati marnosi 80%



AR - Strato arenaceo  
contenuto in quarzo:  $26\% \pm 12\%$

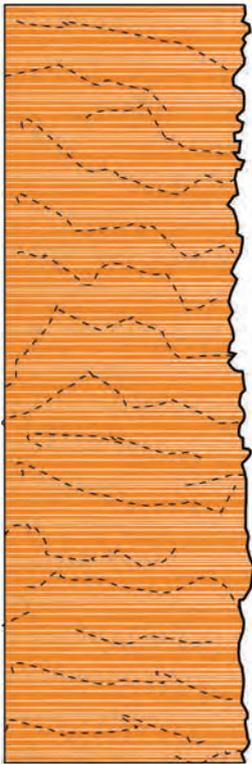
M - Strato marnoso  
contenuto in quarzo:  $15\% \pm 5\%$

## COMPLESSO ARGILLOSO DI CASACASTALDA

Argille in giacitura caotica, tipica di un olistostroma; costituiscono una massa con forma e dimensioni irregolari, inglobata nella formazione Marnoso-Arenacea.

Età: Miocene medio

Spessore: ammassi con estensione fino a diverse decine di metri



Argilla = 100%

contenuto in quarzo:  $\approx 15\%$



Affioramento di argille  
contenuto in quarzo: 15%



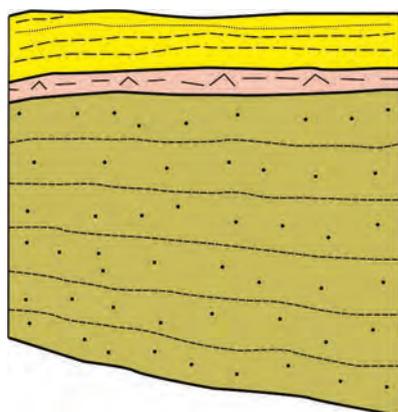
Complesso Argilloso  
di Casacastalda  
sul fronte di scavo di  
una galleria

## FORMAZIONI DEI BACINI MARCHIGIANI MINORI

Nel Miocene, all'interno dell'Appennino marchigiano si formarono una serie di piccoli bacini, che vennero riempiti da sedimenti torbiditici. Così, sopra lo Schlier si depositarono le arenarie di Serraspinosa a Nord e le arenarie di Matelica più a Sud, nel bacino di Camerino. Nel Messiniano, quando il Mar Mediterraneo divenne un'immensa salina, si depositarono i sedimenti evaporitici "gessoso-solfiferi", a loro volta ricoperti dalle argille, marne e localmente arenarie della Formazione a Colombacci.

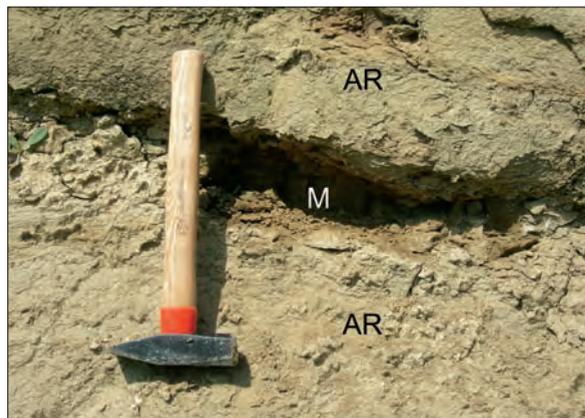
Età: Miocene

Spessore complessivo: alcune centinaia di metri

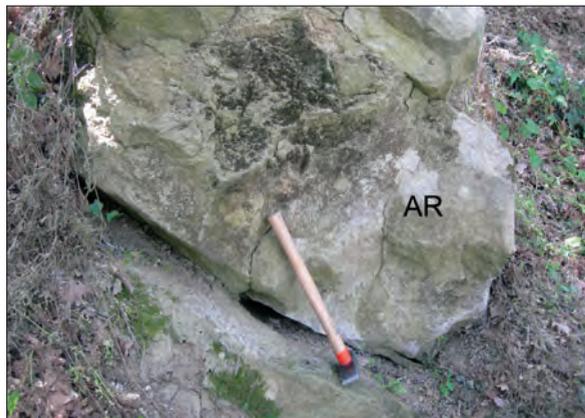


Formazione a Colombacci  
Formazione Gessoso Solfifera

Arenarie di Serraspinosa  
Arenarie di Matelica



**Arenaria di Matelica  
(o Formazione di Camerino)**  
contenuto in quarzo: 20% ± 5%



**Banco arenaceo della Formazione a Colombacci**  
contenuto in quarzo: 23%



**Formazione Gessoso-Solfifera**  
contenuto in quarzo: 8%



**Arenarie di Serraspino**  
contenuto in quarzo: 46% ± 3%

