

Gli amianti in Val di Susa e le rocce che li contengono

ROBERTO COMPAGNONI (*) & CHIARA GROPPA

RIASSUNTO

Per la legge italiana (D.L. 15/8/91) sei minerali fibrosi sono considerati amianti: di questi, solo il crisotilo, la tremolite e l'actinolite possono trovarsi nelle Alpi Occidentali. Questi minerali, ove presenti, compaiono generalmente in modeste quantità. Solo nella parte settentrionale del Massiccio Ultrabasico di Lanzo sono presenti importanti mineralizzazioni di crisotilo, estratto industrialmente fino al 1990 nella Miniera di Balangero (TO).

Gli amianti si trovano, da soli o in associazione con altri minerali, come riempimento di vene, dalle quali possono liberarsi per processi naturali di alterazione chimico-fisica delle rocce o a causa dell'attività antropica.

Per quanto riguarda le relazioni tra le rocce madri e gli amianti, il crisotilo è presente solo nelle rocce ultrafemiche serpentinite, mentre tremolite e actinolite possono trovarsi in uno spettro più ampio di litotipi della Zona Piemontese dei Calcescisti con meta-ofioliti.

Lo studio sistematico delle rocce alpine ha permesso di scoprire sia nuovi minerali fibrosi (es.: balangeroite e carlosturanite) sia minerali normalmente non fibrosi che localmente possono crescere con abito asbestiforme (es.: diopside e Ti-clinohumite).

Poiché molti minerali asbestiformi sono molto simili tra loro e possono concrescere anche a scala submicroscopica, il loro riconoscimento richiede l'utilizzo combinato di più tecniche analitiche, quali MO, SEM-EDS, TEM-EDS, FTIR, XRPD, μ -FTIR, e μ Raman.

TERMINI CHIAVE: *Amianto, ofioliti metamorfiche, Alpi Occidentali, Val di Susa.*

ABSTRACT

The asbestos in the rocks of the Susa Valley (Torino Province, Piemonte, Italy).

According to the Italian law, only six minerals are considered asbestos, i.e. chrysotile, actinolite, tremolite, anthophyllite, grunerite (commercial name: amosite), riebeckite (c.n.: crocidolite). Chrysotile belongs to the serpentine group, whereas the others to the amphibole group. For geologic reasons, in the western Alps the only chrysotile, actinolite and riebeckite asbestos may be found naturally.

Usually the asbestos occur in the rocks as accessory minerals, but exceptionally they may be so abundant to make a true economic mineralization: the best example is that occurring in the northernmost end of the Lanzo Ultramafic Massif near Lanzo (western Alps), where the most important chrysotile asbestos deposit of the western Europe was mined until 1990.

As a rule, the asbestos occurs as vein-filling minerals, and is released from the hosting rock either by natural physico-chemical alteration processes or by the human works. As to the asbestos-hosting rocks, chrysotile occurs in serpentinitized ultramafics, whereas tremolite and actinolite may be found in a wider spectrum of lithologies belonging to the Piemonte zone of calcschists with meta-ophiolites.

A systematic petrographic study of meta-ophiolites from the western Alps has allowed to find both new asbestiform minerals

(e.g.: balangeroite and carlosturanite) and minerals, usually non fibrous, which locally occur with a fibrous habit (e.g.: diopside and Ti-clinohumite).

Since many fibrous minerals are very similar under the optical microscope (OM) and often may occur intergrown even at submicroscopic scale, their unambiguous identification requires the joint use of more analytical techniques, such as OM, SEM-EDS, TEM-EDS, FTIR, XRPD, μ -FTIR, e μ Raman spectroscopy.

KEY WORDS: *Asbestos, metamorphic ophiolites, Val di Susa, western Alps.*

QUALI SONO GLI AMIANTI E GLI ALTRI MINERALI FIBROSI PRESENTI NELLE ALPI OCCIDENTALI

Per la Legge Italiana (D.L. N° 277 del 15/8/91) solo sei minerali sono considerati amianti (= asbesti): crisotilo, tremolite, actinolite, antofillite, amosite (varietà fibrosa della grunerite) e crocidolite (varietà fibrosa della riebeckite) (tab. 1). Ciò è dovuto al fatto che solo questi amianti erano utilizzati industrialmente.

Il *crisotilo* è un minerale del gruppo dei serpentini, fillosilicati idrati triottaedrici la cui struttura è definita dall'alternanza di strati tetraedrici $[\text{SiO}_4]$ con strati ottaedrici $\text{MgO}_2(\text{OH})_4$, di formula ideale $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (fig. 1). In particolare, il crisotilo ha una struttura cilindrica, derivante dall'incurvamento degli strati tetraedrico ed ottaedrico, responsabile del suo abito fibroso. Il suo diametro è generalmente compreso tra 70 μm (diametro interno) e 300 μm (diametro esterno); la crescita delle fibre per diametri maggiori porta alla transizione da una struttura curva ad una struttura planare, tipica del serpentino poligonale (altro serpentino che si presenta con abito fibroso, ma che non è riconosciuto come amianto dal D.L. N° 277).

Gli altri minerali fibrosi considerati amianto appartengono tutti alla famiglia degli anfiboli: la loro struttura consiste di catene tetraedriche $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ legate lateralmente a filari di ottaedri MO_6 . *Tremolite* e *actinolite* sono anfiboli di Ca in cui i siti M1, M2 ed M3 sono occupati dal Mg e dal Fe, mentre il sito M4 è occupato dal Ca (fig. 2). *Antofillite* e *amosite* sono anfiboli ferro-magnesiaci e in essi tutti i siti M sono occupati da Fe e Mg. La *crocidolite*, infine, è un anfibolo sodico: in esso il sito M4 è occupato dal Na, mentre i siti M1, M2 ed M3 sono occupati dal Fe.

Solo tre dei minerali fibrosi definiti amianto dalla Legge Italiana possono essere presenti nelle Alpi Occidentali, e cioè il crisotilo, la tremolite e l'actinolite. Tuttavia, uno studio sistematico delle rocce alpine (COMPAGNONI *et alii*, 1980; COMPAGNONI *et alii*, 1983; COMPAGNONI *et alii*, 1985; MELLINI *et alii*, 1985; MELLINI, 1986; FERRARIS *et alii*, 1987; MELLINI *et alii*, 1987; ALBERICO *et alii*, 1997; BELLUSO & FERRARIS, 1991) ha permesso di scoprire

(*) Dip. Scienze Mineralogiche e Petrologiche e (**) Dip. Interdipartimentale «G. Scansetti» per lo studio degli Amianti e di altri Particolati Nocivi. Università degli Studi di Torino. Via Valperga Caluso, 35 - 10125 Torino. Tel. 011/6705104. Fax. 011/6705128. E-mail: roberto.compagnoni@unito.it

TABELLA 1

I minerali fibrosi definiti come amianti dal D.L. N° 277 del 15/8/91.

– *The fibrous minerals considered as asbestos by the Italian law (D.L. N° 277 of 15 August 1991).*

Minerale	Definizione commerciale	Formula chimica
Crisotilo	Crisotilo	$Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$
Grunerite	Amosite	$(Mg,Fe^{2+})_7[Si_8O_{22}](OH)_2$
Actinolite	Actinolite	$Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5[Si_8O_{22}](OH,F)_2$
Antofillite	Antofillite	$(Mg,Fe^{2+})_7[Si_8O_{22}](OH,F)_2$
Riebeckite	Crocidolite	$Na_2Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2[Si_8O_{22}](OH)_2$
Tremolite	Tremolite	$Ca_2Mg_5[Si_8O_{22}](OH)_2$

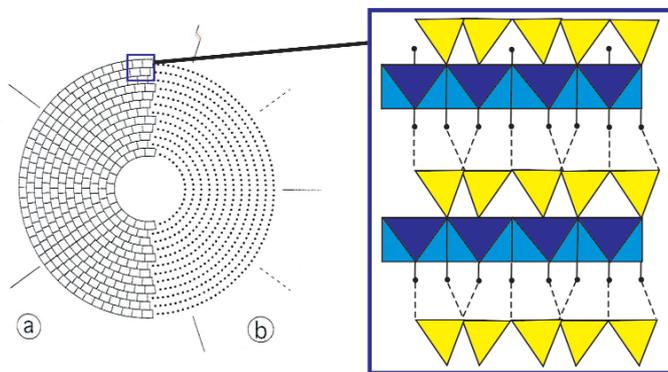


Fig. 1 - Struttura del crisotilo vista lungo l'asse della fibra (modificata da BARONNET & DEVOUARD, 1996 e MELLINI, 1982). In giallo sono riportati gli strati tetraedrici, in blu quelli ottaedrici. I pallini neri rappresentano gli ossidrilili.

– *Structure of chrysotile as seen along the fiber axis (from BARONNET & DEVOUARD 1996 and MELLINI 1982, modified). In yellow the tetrahedral sheets, in blue the octahedral sheets. The black small balls are the hydroxyls.*

l'esistenza sia di nuovi minerali fibrosi, sia di minerali normalmente con abito non fibroso che localmente possono crescere con abito asbestiforme. Tra di essi, i più diffusi sono l'antigorite, la balangeroite, la carlosturanite e il diopside (tab. 2); più rari sono invece l'olivina, la Tlclinohumite e la brucite con abito fibroso.

L'antigorite è un minerale del gruppo del serpentino, ma si differenzia dal crisotilo sia per struttura che per composizione chimica. L'antigorite ha infatti una struttura ondulata, risultante dalla periodica inversione di polarità dello strato tetraedrico (fig. 3). La sua formula chimica ideale è convenzionalmente espressa come $Mg_{3m-3}Si_{2m}O_{5m}(OH)_{4m-6}$ (KUNZE, 1961), dove m corrisponde al numero di tetraedri per lunghezza d'onda e normalmente assume valori compresi tra 13 e 17.

La balangeroite è un silicato idrato di Mg, Fe e Mn scoperto nelle serpentinita della miniera di amianto di Balangero (Torino) (COMPAGNONI *et alii*, 1983). Forma fasci di fibre marroni e rigide che possono raggiungere una lunghezza di decine di centimetri lungo la direzione [001] ed è generalmente associata a crisotilo a fibra lunga (fig. 4A,B). La sua varietà prismatica, riconosciuta solo recentemente (GROppo

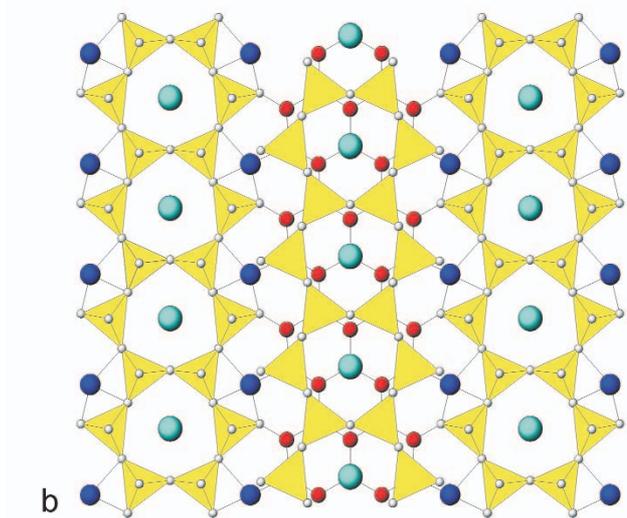
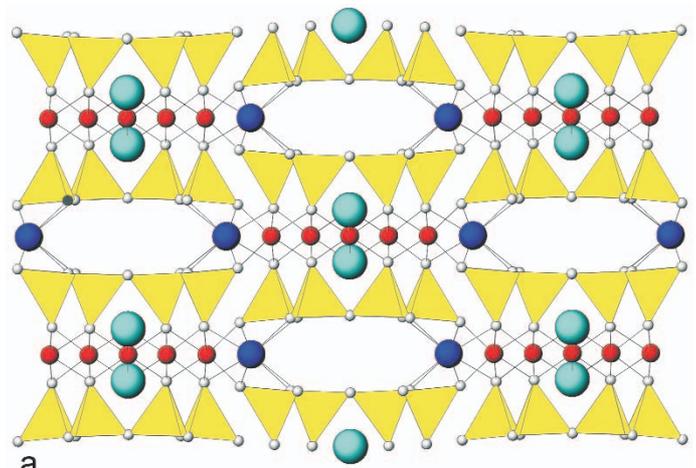


Fig. 2 - Struttura della tremolite vista lungo l'asse z (a) e perpendicolarmente all'asse z (b). In giallo sono riportati i siti tetraedrici con al vertice gli ossigeni (sfere grigie). Le sfere rosse rappresentano il Mg, quelle blu il Ca, mentre le grosse sfere azzurre rappresentano gli OH. – *Structure of tremolite as seen along (a) and perpendicular to the z axis, respectively. In yellow the tetrahedral sites with the oxygens (grey small balls). The red, blue and azure balls are Mg, Ca and hydroxyls, respectively.*

TABELLA 2

I principali minerali fibrosi «non amianti» presenti nelle Alpi Occidentali.

– *The main «non asbestos» minerals occurring in the Western Alps.*

Minerale	Formula chimica
Antigorite	$Mg_{3m-3}Si_{2m}O_{5m}(OH)_{4m-6}$ $m = n^\circ$ tetraedri lungo un'intera lunghezza d'onda
Balangeroite	$M_{42}O_6(OH)_{40}(T_4O_{12})_4$ $M = Mg_{0.62} + Fe^{2+}_{0.19} + Fe^{3+}_{0.10} + Mn_{0.05}$, $T = Si$
Carlosturanite	$M_{42}T_{24}O_{56}(OH)_{68}(H_2O)_2$ $M = (Mg, Fe, Ti, Mn, Cr, \square)$, $T = (Si, Al)$
Diopside	$CaMgSi_2O_6$

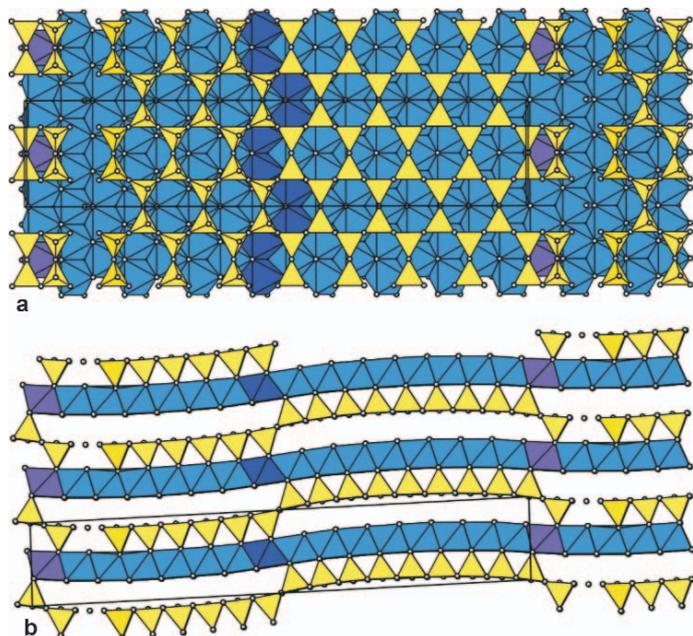


Fig. 3 - Struttura dell'antigorite vista lungo l'asse z (a) e lungo l'asse y (b). In giallo sono riportati gli strati tetraedrici, in blu-viola quelli ottaedrici.

– Structure of antigorite as seen along the z axis (a) and along y axis (b). In yellow the tetrahedral sheets, in blue the octahedral sheets.

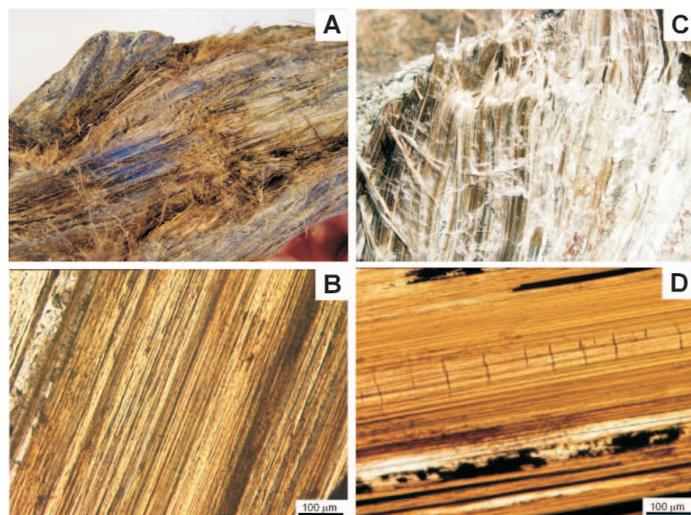


Fig. 4 - **A)** **Balangeroite** fibrosa osservata sul campione a mano. Le fibre sono lunghe 10 cm circa. Balangero (Valli di Lanzo). **B)** **Balangeroite** fibrosa osservata in sezione sottile al microscopio ottico (solo pol.). Balangero (Valli di Lanzo). **C)** **Carlosturanite** associata a crisotilo osservata sul campione a mano. Le fibre sono lunghe circa 10 cm. Sampeyre (Val Varaita). **D)** **Carlosturanite** osservata in sezione sottile al microscopio ottico (solo pol.). Fubina (Valli di Lanzo).
– **A)** Fibrous **balangeroite** on a hand specimen. The fibres are about 10 cm long. Balangero mine (Valli di Lanzo). **B)** Fibrous **balangeroite** as seen in thin section under the optical polarizing microscope (Plane Polarized Light). Balangero mine (Valli di Lanzo). **C)** **Carlosturanite** intergrown with chrysotile on a hand specimen. The fibres are about 10 cm long. Sampeyre (Val Varaita). **D)** **Carlosturanite** as seen in thin section under the optical polarizing microscope (Plane Polarized Light). Fubina (Valli di Lanzo).

et alii, 2004), è, talvolta, così abbondante da dover essere considerata un costituente principale di alcune serpentiniti. Curiosamente, finora la balangeroite non è mai stata trovata al di fuori della porzione settentrionale del Massiccio di Lan-

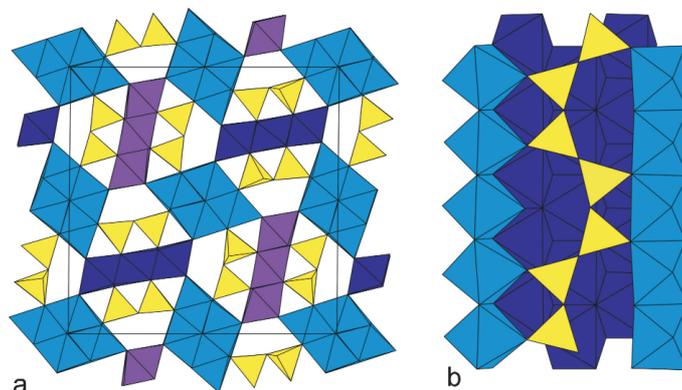


Fig. 5 - Struttura della **balangeroite** vista lungo la direzione [001] (a) e lungo la direzione [110] (modificato da FERRARIS et alii, 1987). In giallo sono riportati i siti tetraedrici, in blu-viola quelli ottaedrici.
– Structure of **balangeroite** as seen parallel to the [001] (a) e [110] directions, respectively (from FERRARIS et alii, 1987, modified). In yellow the tetrahedral sheets, in blue the octahedral sheets.

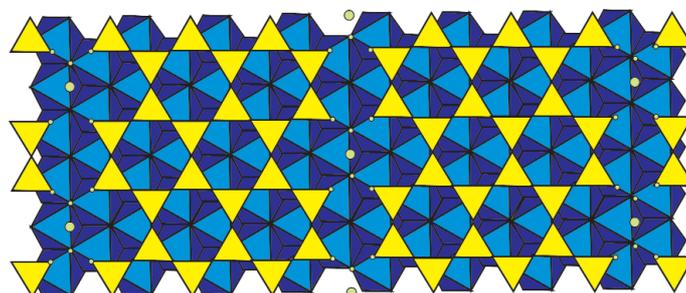


Fig. 6 - Struttura della **carlostanurite** vista lungo l'asse z (MELLINI et alii, 1985). In giallo sono riportati gli strati tetraedrici, in blu quelli ottaedrici. I pallini verdi rappresentano le molecole d'acqua, mentre quelli neri rappresentano gli ossidrilii.
– The structure of **carlostanurite** as seen perpendicularly to the z crystallographic axis (MELLINI et alii, 1985). In along the tetrahedral layers, in blue the octahedral layers. The green little balls are the water molecules, while the black ones the hydroxyls.

zo (COMPAGNONI et alii, 1983; BELLUSO & FERRARIS, 1991; BELLUSO, com. pers.). La struttura cristallina della balangeroite è costituita da un'impalcatura ottaedrica in cui catene singole di tetraedri silicatici occupano canali [001] (FERRARIS et alii, 1987) (fig. 5). La formula chimica ideale normalizzata ad una cella elementare è: $M_{42}O_6(OH)_{40}(T_4O_{12})_4$, dove M e T indicano rispettivamente i cationi ottaedrici (approssimativamente: $Mg_{0.62}+Fe_{0.19}^{2+}+Fe_{0.10}^{3+}+Mn_{0.05}+$ minori Al, Ca, Cr e Ti) e tetraedrici (Si).

La **carlostanurite** è un silicato idrato di Mg, Fe, Ti, Mn e Al con abito fibroso, riconosciuto per la prima volta nelle serpentiniti della miniera di Auriol presso Sampeyre in Val Varaita (COMPAGNONI et alii, 1985). A differenza della balangeroite, la carlosturanite è stata trovata in numerose località della Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi, nelle Valli di Viù, Po, Varaita e Maira (BELLUSO & FERRARIS, 1991). Forma fasci di fibre di colore marrone chiaro e rigide che possono raggiungere una lunghezza di decine di centimetri lungo la direzione [001], spesso parzialmente sostituiti da crisotilo e brucite (fig. 4C,D). La struttura della carlosturanite è simile a quella dei serpentinini (MELLINI et alii, 1985), dalla quale si differenzia per la presenza di filari infiniti di vacanze nello strato tetraedrico (fig. 6). Più in dettaglio, la struttura della carlostu-

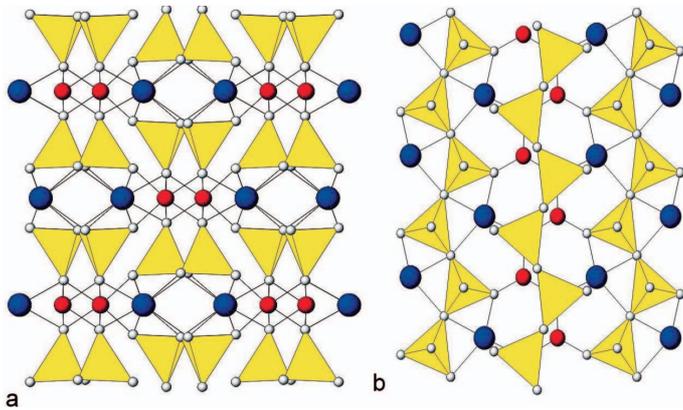


Fig. 7 - Struttura del **diopside** visto lungo l'asse z (a) e perpendicolarmente all'asse z (b). I pallini rossi rappresentano il Mg, quelli blu il Ca. - The structure of **diopside** as seen parallel (a) and perpendicular (b) to the z crystallographic axis, respectively. The red little balls are Mg and the blue ones are Ca atoms, respectively.

ranite si ottiene mantenendo lo strato ottaedrico dei serpentini ma introducendo vacanze ordinate nello strato tetraedrico; gruppi OH e/o molecole d' H_2O sostituiscono gli atomi di O nelle posizioni ora legate ad un solo atomo di Si. La sua formula chimica ideale può essere rappresentata come $M_{42}T_{24}O_{56}(OH)_{68}(H_2O)_2$, dove $M = (Mg, Fe, Ti, Mn, Cr, \square)$ e $T = (Si, Al)$.

Il **diopside** è un pirosseno calcico con formula ideale $CaMgSi_2O_6$, generalmente caratterizzato da un abito prismatico tozzo. La sua struttura consiste di catene infinite di tetraedri $(SiO_3)^{2-}$ parallele all'asse z , dove ciascun tetraedro ha la base approssimativamente parallela al piano (001) (fig. 7). Le catene sono legate lateralmente a livelli di ottaedri contenenti cationi M a coordinazione 6 e 8. I cationi M dei livelli ottaedrici occupano due posizioni diverse, M1 e M2. I cationi M1 (Mg) sono localizzati tra gli apici delle catene SiO_3 , mentre gli atomi M2 (Ca) giacciono tra le basi delle catene. La coordinazione degli O attorno al Mg è 6 (ottaedrica), mentre la coordinazione dei siti M2 occupati dal Ca è 8 (cubica) (DEER *et alii*, 1992).

DOVE SONO CONCENTRATI GLI AMIANTI E GLI ALTRI MINERALI FIBROSI

La maggior parte delle mineralizzazioni ad asbesto delle Alpi Occidentali è associata alle ofioliti metamorfiche della Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi (fig. 8). La Zona Piemontese, derivante dalla litosfera dell'oceano mesozoico Ligure-Piemontese, si allunga per circa 200 km nelle Alpi Occidentali, tra Italia, Francia e Svizzera ed è essenzialmente costituita da calcescisti con intercalazioni di corpi ofiolitici di varie dimensioni. È situata tra la Zona Brianzonese verso l'esterno della catena e i Massicci Cristallini Interni, che rappresentano il paleomargine europeo assottigliato. Le caratteristiche geologiche e petrografiche attuali sono il risultato della subduzione del Paleomargine Europeo e del Bacino Ligure-Piemontese al di sotto del paleomargine africano, seguita dalla successiva collisione continentale (vedi ad es.: Le PICHON *et alii*, 1988; PLATT *et alii*, 1989). Sulla base delle differenze litologiche, genetiche e di grado metamorfico è possibile distinguere:

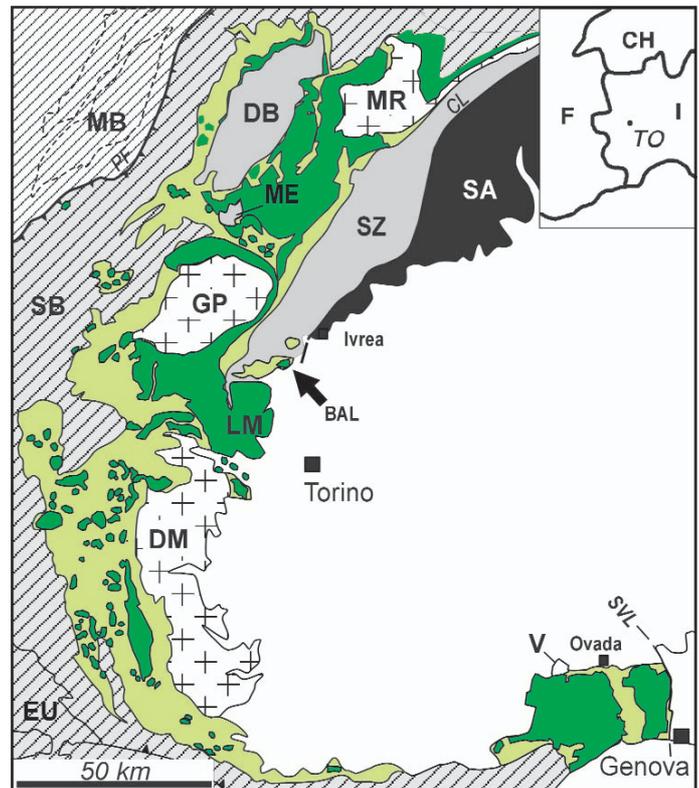


Fig. 8 - Schema tettonico semplificato delle Alpi Occidentali. *Dominiu Elveticu*: Monte Bianco-Aiguilles-Rouges (MB); *Dominiu Pennidico*: Zona del Gran San Bernardo (SB) e Massicci Cristallini Interni del Monte Rosa (MR), Gran Paradiso (GP), Dora-Maira (DM) e Valosio (V); *Zona Piemontese dei Calcescisti* (verde chiaro) con *Pietre Verdi* (= ofioliti metamorfiche: verde scuro): Massiccio Ultrabasico di Lanzo (LM); *Dominiu Australpino*: Falda della Dent-Blanche (DB), Falda del M. Emilius (ME) e Zona Sesia (SZ); *Dominiu Sudalpino* (SA); *Falda del Flysch Embrunais-Ubaye* (EU); Linea del Canavese (CL); Linea Sestri-Voltaggio (SVL); PF: Fronte Pennidico. BAL = miniera di Balangero (TO).

- Simplified tectonic sketch-map of the western Alps. Helvetic Domain: Mont Blanc-Aiguilles-Rouges (MB); Penninic Domain: Grand Saint Bernard Zone (SB) and Internal Crystalline Massifs of Monte Rosa (MR), Gran Paradiso (GP), Dora-Maira (DM) and Valosio (V); Piemonte Zone of calcschists (light green) with meta-ophiolites (dark green): Lanzo Ultramafic Massif (LM); Austro-alpine Domain: Dent-Blanche nappe (DB), M. Emilius nappe (ME) and Sesia Zone (SZ); Southalpine Domain (SA); Nappe of Embrunais-Ubaye Flysch (EU); Canavese Line (CL); Sestri-Voltaggio Line (SVL); PF: Penninic Thrust Front. BAL = chrysotile asbestos Balangero mine (Province of Torino).

- *Massiccio Ultrabasico di Lanzo*: principalmente costituito da peridotiti parzialmente serpentizzate, rappresenta una porzione di mantello sub-continentale (RAMPONE & PICCARDO, 2000; MÜNTENER *et alii*, 2004; PICCARDO *et alii*, 2004), che, insieme alla litosfera dell'oceano giurassico Ligure-Piemontese, è stato esumato dalle profondità mantelliche, e prima subdotto e metamorfosato in condizioni metamorfiche di alta pressione in facies eclogitica e poi coinvolto nell'impilamento tettonico della catena alpina e riequilibrato in condizioni metamorfiche della facies scisti verdi;

- *Zona Piemontese Interna*: costituita da calcescisti, derivanti dalla trasformazione metamorfica degli originali sedimenti dell'oceano della Tetide, e dalle ofioliti metamorfiche (serpentiniti, metagabbri, metabasalti, prasiniti) derivanti dalla litosfera oceanica. Nel corso dell'evoluzione metamorfica alpina, la Zona Piemontese Interna

TABELLA 3

I principali litotipi della Zona Piemontese potenzialmente contenenti amianto. In grassetto sono stati indicati i minerali che si trovano o si possono trovare con abito fibroso e che sono definiti amianti dal D.L. N° 277 del 15/8/91 (cfr. tab. 1).

– *The main lithologies of the Piemonte Zone, that may contain asbestos. In bold, the minerals that may grow with a fibrous habit and are considered asbestos by the Italian law.*

LITOTIPO	MINERALI PRINCIPALI
ROCCE METAMORFICHE (ofioliti e meta-ofioliti)	
PERIDOTITI	olivina, Opx, Cpx ± spinello ± plagioclasio (± Grt)
SERPENTINITI e SERPENTINOSCISTI	serpentino (Atg, Lz), magnetite ± olivina ± diopside ± crisotilo ± tremolite ± talco ± brucite
SCISTI ACTINOLITICI	actinolite , clorite, talco ± epidoto ± albite ± magnetite
CLORITESCISTI	clorite, tremolite-actinolite ± titanite ± magnetite
TALCOSCISTI	talco, ± clorite ± tremolite-actinolite ± titanite
PRASINITI	albite, epidoto, tremolite-actinolite ± glaucofane ± mica bianca, ± titanite
ECLOGITI	onfacite, granato, rutilo ± Na-anfibolo (glaucofane) ± Na-Ca anfibolo (barroisite, winchite)
ANFIBOLITI ad Ab ed Ep	orneblenda, albite, epidoto, clorite
OFICARBONATITI	serpentino (Atg, Lz), carbonati (Cal, Dol, Mgs), tremolite ± diopside ± crisotilo ± magnetite ± clorite ± talco
ROCCE METASOMATICHE	tremolite-actinolite , carbonati ± quarzo
ROCCE SEDIMENTARIE	
ROCCE e SEDIMENTI CLASTICI	tutti i minerali dei litotipi ofiolitici

(come il Massiccio Ultrabásico di Lanzo) raggiunse prima condizioni metamorfiche della facies eclogitica e poi quelle della facies scisti verdi;

– *Zona Piemontese Esterna*: litologicamente analoga alla Zona Piemontese Interna, ma più ricca di metasedimenti (calcescisti) e caratterizzata da un picco metamorfico in facies scisti blu.

Mentre il crisotilo è presente solo nelle rocce ultrafemiche serpentinite, la tremolite e l'actinolite possono formarsi in uno spettro più ampio di litotipi, appartenenti alla Zona Piemontese dei Calcescisti con meta-ofioliti, tra cui scisti actinolitici, cloritescisti, talcoscisti, prasiniti e rocce oficarbonatiche (tab. 3). Di norma gli amianti si trovano, da soli o in associazione con altri minerali, come riempimento di vene, dalle quali possono liberarsi per i processi naturali di alterazione chimico-fisica delle rocce che li contengono o a causa dell'attività antropica. Gli amianti, quindi, sono presenti generalmente in modeste quantità. Fa eccezione soltanto l'importante mineralizzazione di crisotilo localizzata nella porzione più settentrionale del Massiccio di Lanzo (fig. 8), coltivata industrialmente fino al 1990 nella Miniera di Balangero (Torino).

In Val di Susa i minerali fibrosi di gran lunga più diffusi sono l'antigorite, il crisotilo, la tremolite (± actinolite) e il diopside, mentre balangeroite e carlosturanite non sono ancora state trovate. Antigorite, crisotilo, tremolite e diopside sono localizzati in generazioni di vene ben distinte, che, in ordine cronologico, sono:

1) *vene a olivina + antigorite + diopside + Ti-clinohumite + magnetite*: sono le vene associate all'evento metamorfico in facies eclogitica (fig. 9A,B). In esse l'antigorite si presenta sempre con abito lamellare, mentre il diopside è spesso fibroso e forma fasci di fibre rigide e fragili, di co-

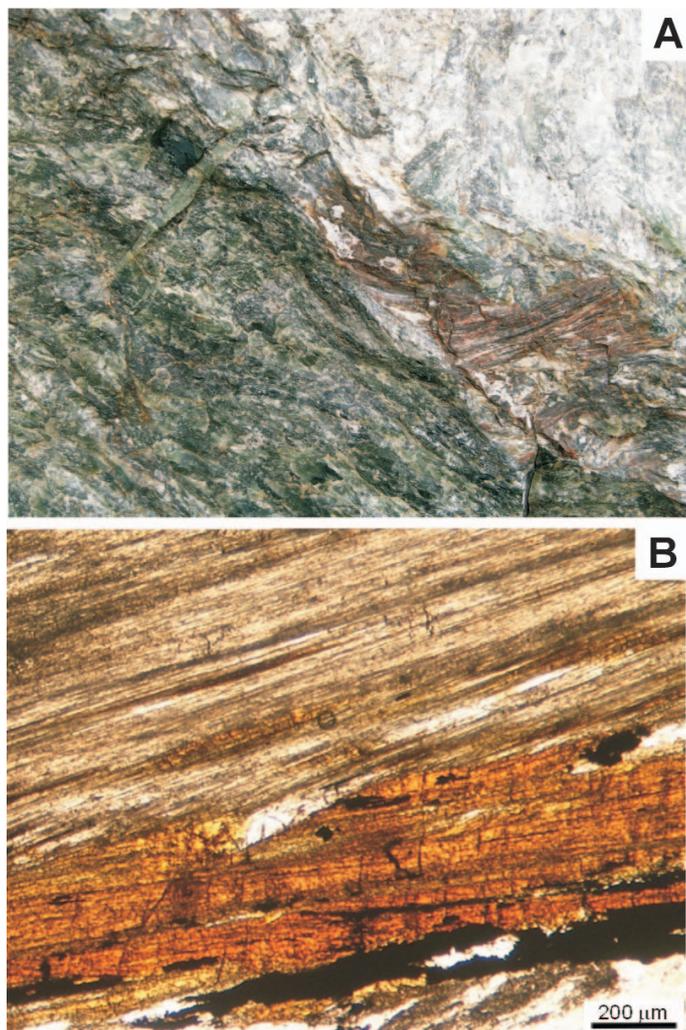


Fig. 9 - **A**) Vena a diopside + Ti-clinohumite + antigorite + magnetite. Le fibre di diopside e Ti-clinohumite sono concresciute ed appaiono di colore rosso-bruno. La vena è tagliata da una vena tardiva ad antigorite (in alto a sinistra: verde più chiaro). Trana (Val di Susa). **B**) Diopside e Ti-clinohumite fibrosi visti in sezione sottile al microscopio ottico in luce polarizzata. Balme (Val d'Ala).

– **A**) *Diopside + Ti-clinohumite + antigorite + magnetite metamorphic vein. Fibrous diopside and Ti-clinohumite with red-brown colour are intergrown. This vein generation is cut by a late antigorite vein (upper right: lighter green). Trana (Val di Susa).* **B**) *Fibrous diopside and Ti-clinohumite as seen in thin section under the optical polarizing microscope. Balme (Val d'Ala).*

lore bianco-giallino (spesso difficilmente riconoscibili dalla tremolite). Queste vene sono prevalentemente localizzate nella parte bassa della Valle, sia sul versante sinistro (es. cave dimesse di S. Ambrogio) sia su quello destro.

2) *vene ad antigorite ± diopside*: queste vene sono presenti nelle serpentiniti sia massicce che foliate di tutta la valle. Si tratta di vene generalmente piuttosto potenti (da plurimillimetriche fino a circa 10 cm), continue e con andamento rettilineo, di colore verde-grigio (fig. 10A). L'antigorite forma fibre rigide, lunghe fino oltre i 10 cm, talvolta deformate, che possono essere orientate perpendicolarmente o a basso angolo rispetto all'allungamento delle vene. Spesso presentano una caratteristica struttura a festoni paralleli alle salbande della vena (fig. 10B). Il diopside, se presente, non ha mai abito fibroso ed è concentrato nella porzione centrale delle vene (fig. 10C). Gli

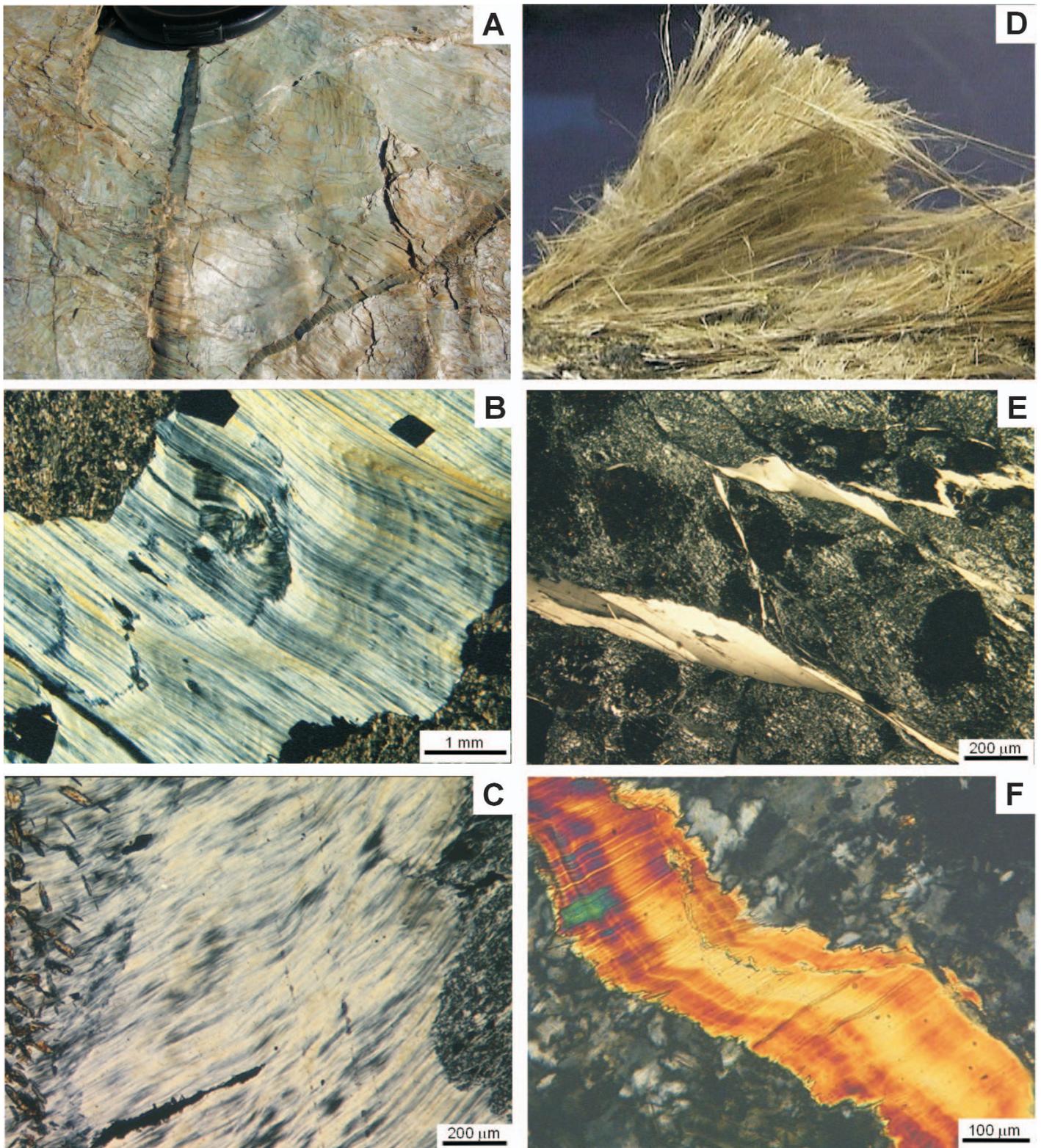


Fig. 10 - A) Vene ad antigorite fibrosa. Venaus, Fraz. Seghino (Val di Susa). B) Vena ad antigorite fibrosa caratterizzata da una struttura a bande, vista in sezione sottile al microscopio ottico. Fraz. Seghino, Venaus (Val di Susa). C) Vena ad antigorite fibrosa con diopside idioblastico nella sua porzione centrale, vista in sezione sottile al microscopio ottico. Balangero (Valli di Lanzo). D) Vena di crisotilo a fibra lunga osservata sul campione a mano. Balangero (Valli di Lanzo). E) Vena di crisotilo con fibre disposte a basso angolo rispetto alle salbande (vena di tipo slip) vista in sezione sottile al microscopio ottico. Balangero (Valli di Lanzo). F) Vena di crisotilo con fibre disposte perpendicolari alle salbande (vena di tipo cross) vista in sezione sottile al microscopio ottico in luce polarizzata. Colle del Lys (Val di Susa).

- A) Fibrous antigorite vein. Venaus, Frazione Seghino (Val di Susa). B) Fibrous antigorite vein characterized by a banded structure, as seen in thin section under the optical polarizing microscope. Frazione Seghino, Venaus (Val di Susa). C) Fibrous antigorite vein with idioblastic diopside in the inner portion, as seen in thin section under the optical polarizing microscope. Balangero (Valli di Lanzo). D) Long fibre chrysotile vein in a hand specimen. Balangero (Valli di Lanzo). E) Chrysotile vein with the fibres grown at low angle with respect to the vein selvages (slip chrysotile), as seen in thin section under the optical polarizing microscope. Balangero (Valli di Lanzo). F) Chrysotile vein with fibres grown perpendicular to the vein selvages (cross chrysotile), as seen in thin section under the optical polarizing microscope. Colle del Lys (Val di Susa).

studi termobarometrici e le relazioni microstrutturali con le altre generazioni di vene suggeriscono che quelle ad antigorite fibrosa si siano formate durante l'esumazione delle serpentiniti, a $T \approx 350-400^\circ\text{C}$ e $P \approx 3-6$ kbar e che siano legate a meccanismi di dissoluzione-precipitazione senza sviluppo di fratture beanti.

3) *Vene a crisotilo + magnetite*: formano spesso un reticolato di vene che suddivide la serpentinite incassante in porzioni angolose, con un aspetto simile a quello di una breccia. Sono costituite da crisotilo e da più rara magnetite, in cristalli allungati tra le fibre o concentrata alle salbande delle vene (fig. 10D,E,F). Le fibre di crisotilo possono essere disposte sia a basso (fig. 10E) che ad alto angolo (fig. 10F) rispetto alle salbande della vena. Queste vene sono presenti in molte serpentiniti affioranti in alta e bassa Val di Susa e la loro genesi è associata a deformazioni di tipo fragile. Esse sono, quindi, localizzate essenzialmente negli affioramenti più intensamente tettonizzati.

4) *Vene a tremolite ± calcite*: sono diffuse nelle piccole masse di serpentiniti incluse nei calcescisti della Zona Piemontese, in modo particolare in alta Val di Susa, ma sono presenti anche all'interno delle serpentiniti massicce come quelle che affiorano al margine occidentale del Massiccio Ultrabásico di Lanzo verso il Col del Lys. La tremolite si presenta generalmente in fibre bianche di lunghezza centimetrica (fig. 11A), spesso associate a calcite ed orientate ora perpendicolarmente ora parallelamente rispetto alle salbande delle vene (fig. 11B,C). Come per le vene a crisotilo, la loro genesi è associata ad eventi di fratturazione in ambiente molto superficiale. La formazione della paragenesi tremolite + calcite, inoltre, è fortemente influenzata dal chimismo del sistema e dalla presenza di fluidi ricchi in CO_2 .

LE TECNICHE ANALITICHE NECESSARIE PER UNA CORRETTA IDENTIFICAZIONE DEI MINERALI FIBROSI

Molti dei minerali fibrosi sopra elencati non solo presentano caratteristiche ottiche tra loro molto simili, ma possono crescere in concrescimenti paralleli anche a scala submicroscopica. Per questo motivo il loro riconoscimento richiede nella maggior parte dei casi l'utilizzo combinato di più tecniche analitiche, quali la microscopia ottica (M.O.), la microscopia elettronica a scansione con microanalisi (SEM-EDS), la microscopia elettronica a trasmissione con microanalisi (TEM-EDS), la spettroscopia infrarossa in Trasformata di Fourier (e la microspettroscopia IR: μFTIR), la spettroscopia Raman (e la microspettroscopia Raman: μRaman), la diffrazione a raggi X per polveri (e la micro-diffrazione a raggi X: μXRD).

La *microscopia ottica in luce polarizzata* è la tecnica più rapida per ottenere un rapido riconoscimento delle principali fasi fibrose presenti in una roccia. Se applicata su sezioni sottili, inoltre, presenta il grande vantaggio di consentire l'analisi dei rapporti microstrutturali tra diverse generazioni di vene, indispensabile per capirne le condizioni di formazione. La sola microscopia ottica, tuttavia, non è spesso in grado di fornire una caratterizzazione completa dei minerali fibrosi a causa dei frequenti concrescimenti a scala sub-microscopica. La tecnica, inoltre, non consente il riconoscimento dei diversi minerali del gruppo del serpentino quali crisotilo e anti-

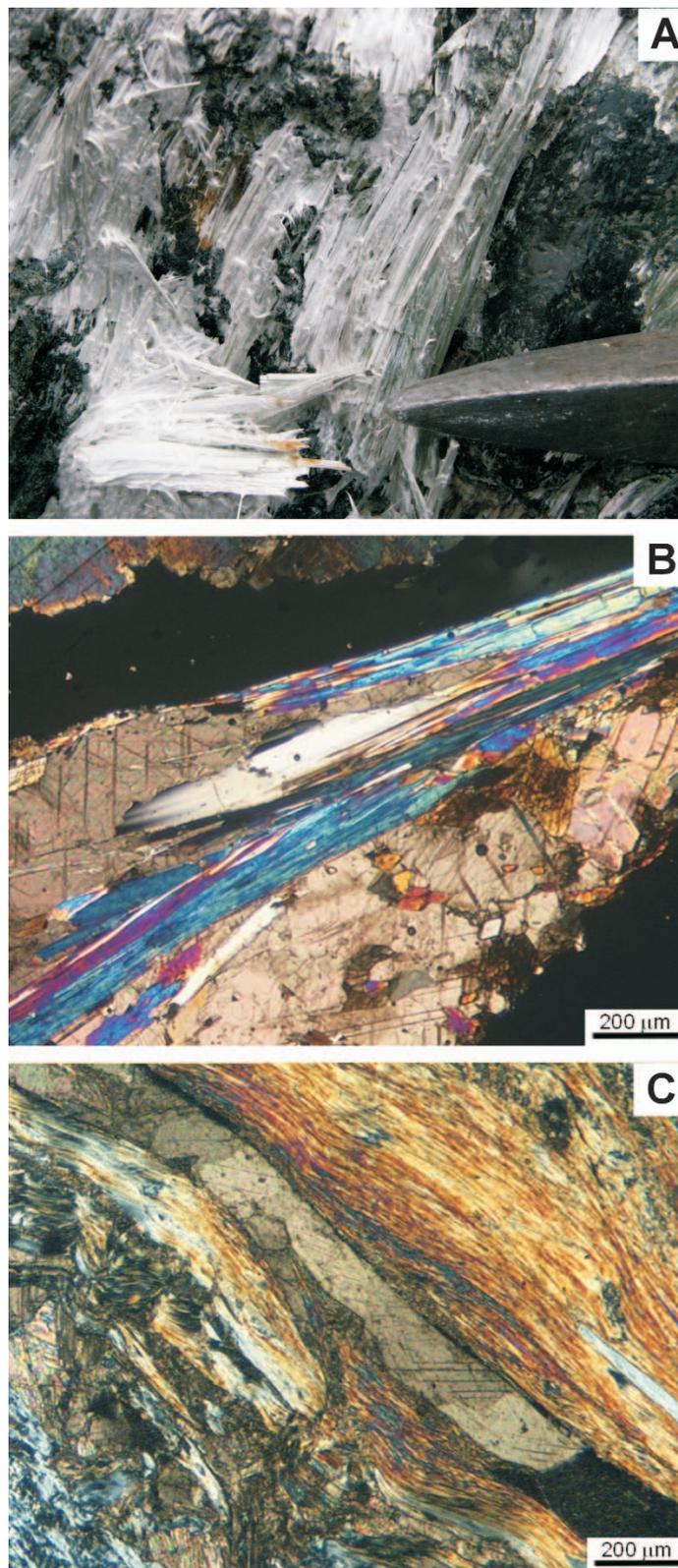


Fig. 11 - **A**) Vena a tremolite fibrosa in una serpentinite fortemente tettonizzata. Trana (Val di Susa). **B**) Vena a tremolite + calcite vista in sezione sottile al microscopio ottico in luce polarizzata. Jovenceaux (Val di Susa). **C**) Vena a tremolite + calcite vista in sezione sottile al microscopio ottico in luce polarizzata.

- **A**) Fibrous tremolite vein in a tectonized serpentinite. Trana (Val di Susa). **B**) Tremolite + calcite vein as seen in thin section under the optical polarizing microscope. Jovenceaux (Val di Susa). **C**) Tremolite + calcite vein as seen in thin section under the optical polarizing microscope.

gorite, e non fornisce nessun tipo di informazione composizionale.

La *microscopia elettronica a scansione* (SEM) permette di investigare più in dettaglio le relazioni tra i minerali fibrosi e, se accoppiata ad un sistema di microanalisi in dispersione di energia (EDS) o di lunghezza d'onda (WDS), consente anche di ottenere informazioni composizionali. La risoluzione spaziale della microanalisi, tuttavia, è di circa 2 µm: quindi, per concrescimenti a scala inferiore al micron, le analisi risultano miste. La tecnica, inoltre, non consente l'identificazione di fasi come antigorite e crisotilo, che possono presentarsi entrambi con abito fibroso.

La *microscopia elettronica a trasmissione ad alta risoluzione* (HRTEM) associata al sistema di microanalisi (EDS), supera tutti i limiti delle due tecniche precedenti, raggiungendo risoluzioni atomiche che consentendo il riconoscimento dei diversi minerali del gruppo del serpentino grazie alle figure di diffrazione elettronica. La tecnica, tuttavia, è molto costosa e la preparazione per assottigliamento ionico della sezione da analizzare è piuttosto complessa.

Anche le *spettroscopie vibrazionali FTIR e Raman* consentono un rapido riconoscimento delle fasi fibrose, fornendo informazioni sui diversi modi vibrazionali delle molecole. In particolare, le versioni «micro» delle due tecniche presentano il vantaggio di poter utilizzare le stesse sezioni sottili preparate per le osservazioni in microscopia ottica. Non essendo necessaria alcuna preparazione specifica per i campioni, gli spettri Raman possono essere ottenuti sulle stesse sezioni sottili e nei medesimi siti analizzati anche in microsonda: ciò consente, quindi, di associare a ciascun spettro vibrazionale la corrispondente analisi chimica. La risoluzione del micro-Raman (qualche µm) è di gran lunga migliore rispetto a quella del micro-FTIR (centinaia di µm): quest'ultima tecnica, quindi, non consente di identificare con certezza le fibre quando sono concrescite a scala submicroscopica.

La *diffrazione a raggi X per polveri* (XRPD) è da tempo utilizzata per l'identificazione dei minerali fibrosi sia nei campioni di roccia sia nei manufatti contenenti amianti. Il metodo presenta il grande vantaggio di permettere il riconoscimento dei diversi minerali del gruppo del serpentino ma, dal momento che si devono utilizzare delle polveri, non preserva l'informazione morfologica e microstrutturale. Queste informazioni possono essere ottenute tramite la versione micro (micro-XRD) dello strumento, la cui risoluzione è però dell'ordine delle centinaia di micrometri.

I risultati migliori, anche in termini di costi e di tempi di lavoro, sono ottenuti dalla combinazione di microscopia ottica ed elettronica (MO e SEM-EDS) e spettroscopia µ-Raman.

RINGRAZIAMENTI

Gli AA. sono grati a G. Ivaldi per aver preparato i disegni delle strutture dei minerali utilizzando il programma ATOMS per Windows V.6.2 della Shape Software e la banca dati delle Inorganic Crystal Structures (I.C.S.D.), Versione 2005.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERICO A., BELLUSO E., COMPAGNONI R. & FERRARIS G. (1997) - *Amianti ed altri minerali asbestiformi sul territorio piemontese*. In: *Giornata di Studio su: Il rischio amianto legato alle attività estrattive e alla bonifica di siti industriali dimessi*. Torino, 20 maggio 1997, Regione Piemonte e Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, Italy, Vol. Riassunti, 97-102.
- BARONNET A. & DEVOUARD B. (1996) - *Topology and crystal growth of natural chrysotile and polygonal serpentine*. *J. Crystal Growth*, **166**, 952-960.
- BELLUSO E. & FERRARIS G. (1991) - *New data on balangeroite and carlosturanite from alpine serpentinites*. *Eur. J. Mineral.*, **3**, 559-566.
- COMPAGNONI R., SANDRONE R. & ZUCCHETTI S. (1980) - *Some remarks on the asbestos occurrences in the Western Alps with special reference to the chrysotile asbestos deposit of Balangero (Valle di Lanzo, Piemonte, Italy)*. Fourth Conf. on Asbestos, Torino, 20-30 May 1980, Preprint, **1**, 49-71.
- COMPAGNONI R., FERRARIS G. & FIORA L. (1983) - *Balangeroite, a new fibrous silicate related to gageite from Balangero, Italy*. *Am. Mineral.*, **6**, 214-219.
- COMPAGNONI R., FERRARIS G. & MELLINI M. (1985) - *Carlosturanite, a new asbestiform rock-forming silicate from Val Varaita, Italy*. *Am. Mineral.*, **70**, 767-772.
- DEER W.A., HOWIE R.A. & ZUSSMAN J. (1992) - *An introduction to the rock-forming minerals*. Longman, Harlow, England, 2nd ed.
- FERRARIS G., MELLINI M. & MERLINO S. (1987) - *Electron-diffraction and electron-microscopy study of balangeroite and gageite: crystal structures, polytypism and fiber texture*. *Am. Mineral.*, **72**, 382-391.
- GROppo C., GULA A., COMPAGNONI R. & FERRARIS G. (2004) - *Balangeroite from the Lanzo Massif (Western Alps) revisited: fibrous vs. prismatic morphology and genetic considerations*. 32nd Int. Geol. Congress - Firenze, 20-28/8 (2004) - Abstract Vol., 249.
- KUNZE G. (1961) - *Antigorit. Strukturtheoretische Grundlagen und ihre praktische Bedeutung für die weitere Serpentin-Forschung*. *Fortschritte Mineral.*, **39**, 206-324.
- LE PICHON X., BERGERAT F. & ROULET M.J. (1988) - *Plate kinematics and tectonics leading to the Alpine belt formation; a new analysis*. *Geol. Soc. Am. Special Paper*, **218**, 111-131.
- MELLINI M. (1982) - *The crystal structure of lizardite 1T: hydrogen bonds and polytypism*. *Am. Mineral.*, **67**, 587-598.
- MELLINI M. (1986) - *Chrysotile and polygonal serpentine from the Balangero serpentinite*. *Min. Mag.*, **50**, 301-305.
- MELLINI M., FERRARIS G. & COMPAGNONI R. (1985) - *Carlosturanite: HRTEM evidence of a polysomatic series including serpentine*. *Am. Mineral.*, **70**, 773-781.
- MELLINI M., TROMMSDORFF V. & COMPAGNONI R. (1987) - *Antigorite polysomatism: behavior during progressive metamorphism*. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **97**, 147-155.
- MÜNTENER O., PETTKE T., DESMURS L., MEIER M. & SCHALTEGGER U. (2004) - *Refertilization of mantle peridotite in embryonic ocean basins: trace element and Nd isotopic evidence and implications for crust-mantle relationship*. *Earth Planet. Sci. Letters*, **221**, 293-308.
- PICCARDO G.B., MÜNTENER O., ZANETTI A., ROMAIRONE A., BRUZZONE S., POGGI E. & SPAGNOLO G. (2004) - *The Lanzo south peridotite: melt/peridotite interaction in the mantle lithosphere of the Jurassic ligurian Tethys*. *Ophioliti*, **29**, 63-74.
- PLATT J.P., BERHMANN J.H., CUNNINGHAM P.C., DEWEY J.F., HELMAN M., PARISH M., SHEPLEY M.G., WALLIS S. & WESTON P.J. (1989) - *Kinematics of the Alpine arc and the motion history of Adria*. *Nature*, **337**, 158-161.
- RAMPONE E. & PICCARDO G.B. (2000) - *The ophiolite-oceanic lithosphere analogue: new insights from the Northern Apennines (Italy)*. In: Y. Dilek, E.M. Moores, D. Elthon & A. Nicolas, Eds., *Ophiolites and oceanic crust: new insights from field studies and the oceanic drilling program*. *Geol. Soc. America Special Paper*, Boulder, Colorado, **349**, 21-34.