



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Domenico Rio

TESI DI LAUREA TRIENNALE
IN
SCIENZE GEOLOGICHE

**CARATTERIZZAZIONE DELLE
MINERALIZZAZIONI A COBALTITE DEGLI
SKARN DI TRAVERSELLA (TORINO, ITALIA)**

Relatore: Prof. Paolo Nimis

Laureando: Loris Dalla Costa

ANNO ACCADEMICO 2010 / 2011

Indice

| | |
|---|-------|
| Abstract | |
| 1. Introduzione | p. 1 |
| 2. Inquadramento geologico | p. 2 |
| 3. Descrizione degli affioramenti mineralizzati | p. 4 |
| 4. Studio minerografico | p. 6 |
| 4.1. Sezioni TR | p. 6 |
| 4.2. Sezioni PN11 | p. 13 |
| 4.3. Sequenza paragenetica | p. 17 |
| 5. Analisi al SEM e alla microsonda elettronica | p. 18 |
| 5.1. Sezione TR7 | p. 19 |
| 5.2. Sezione PN11-2 | p. 22 |
| 6. Conclusioni | p. 22 |
| Ringraziamenti | p. 23 |
| Bibliografia | p. 24 |

Abstract

The main purpose of the present thesis is the characterization of a cobaltite mineralization which was recently found in skarns of the Traversella magnetite mine (Western Alps). The work has involved an underground survey and sampling of the cobaltite-bearing rocks and their examination by reflected-light microscopy. Some representative samples were further analyzed by electron microscopy and electron microprobe analysis to determine the compositional variations of the minerals and to estimate the conditions of formation of the cobaltite-bearing parageneses.

1. Introduzione

Nelle mineralizzazioni tipo-skarn legate a intrusioni granitoidi, la cobaltite costituisce un minerale di importanza economica secondaria (tipicamente <50 ppm Co; Meinert et al. 2005), ma discretamente diffuso (es. Rio Marina, Isola d'Elba, Moresi & Quagliarella Asciano, 1973; Hällefors, Svezia, Burke & Zakrzewsky, 1983). Solo recentemente sono state individuate alcune mineralizzazioni a cobaltite negli skarn della miniera di magnetite di Traversella (Zona Sesia-Lanzo, Alpi Occidentali). Tali mineralizzazioni sono state oggetto di studi preliminari da parte del Gruppo Mineralogico Valchiusella et al. (2005), ma non sono mai state studiate in dettaglio né dal punto di vista composizionale né da quello giacimentologico. Nella letteratura precedente, la cobaltite è semplicemente "citata" da Zucchetti (1966), che non ne dà descrizione alcuna; più tardi, Venerandi-Pirri (1986) segnala la presenza dell'end-member nichelifero gersdorffite e di una pirite in cui *"a volte si può trovare una struttura zonata con zone gialle alternate ad altre più rosate, forse correlate con un arricchimento in Ni"* (Venerandi Pirri, 1986, p. 168). Sulla base delle mie osservazioni (v. sotto), questa descrizione potrebbe teoricamente corrispondere in realtà ad una cobaltite concresciuta con pirite. Con il presente studio, si intende caratterizzare per la prima volta con un certo dettaglio i caratteri microtessiturali, composizionali e giaciturali della cobaltite di Traversella.

2. Inquadramento geologico

Le mineralizzazioni a cobaltite della miniera di Traversella si rivengono all'interno di tactiti prodotte dal metasomatismo di contatto tra il plutone dioritico di Traversella (Van Merke De Lummen & Vander Auwera, 1990) e le rocce incassanti carbonatiche, in questo caso rappresentate principalmente da marmi dolomitici (Vander Auwera & Andre, 1991). Il plutone di Traversella appartiene all'insieme dei plutoni calcocalini periadriatici e si è intruso a 30 ± 5 Ma (Krummenacher & Everden, 1960) nella parte più interna della Zona Sesia-Lanzo attraverso intrusioni multiple (Vander Auwera, 1990). La Zona Sesia-Lanzo costituisce una delle unità principali del dominio Austroalpino affiorante lungo la Linea del Canavese, nelle Alpi Occidentali. La Zona Sesia-Lanzo è suddivisa in due unità tettoniche principali, caratterizzate da differenti litologie e impronte metamorfiche (Compagnoni et al., 1977). L'unità superiore, detta II Zona Dioritico-Kinzigitica, consiste di metapeliti e metabasiti in facies da anfibolitica a granulitica, di età pre-alpina; l'unità inferiore consiste di metapeliti, metabasiti e metagranitoidi, appartenenti a due complessi che preservano l'impronta

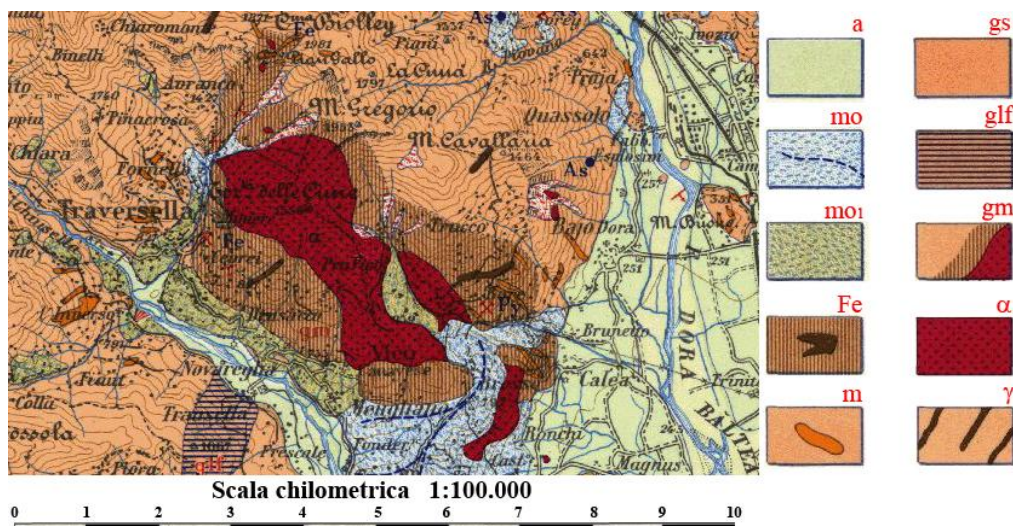


Fig. 1. Carta geologica della zona di Traversella (part. del Foglio 42-Ivrea, Carta Geologica d'Italia 1:100.000). a) Alluvioni recenti - mo) morene würmiane, postwürmiane e recenti - mo₁) morene prewürmiane - Fe) giacimenti di ferro - m) calcari cristallini, calcarei micacei e calcefiri - gs) Gneiss Minuti e Micascisti Eclogitici - glf) glaucofaniti - ac) aureola metamorfica di contatto - α) diorite - γ) filoni dioritici e lamprofirici.

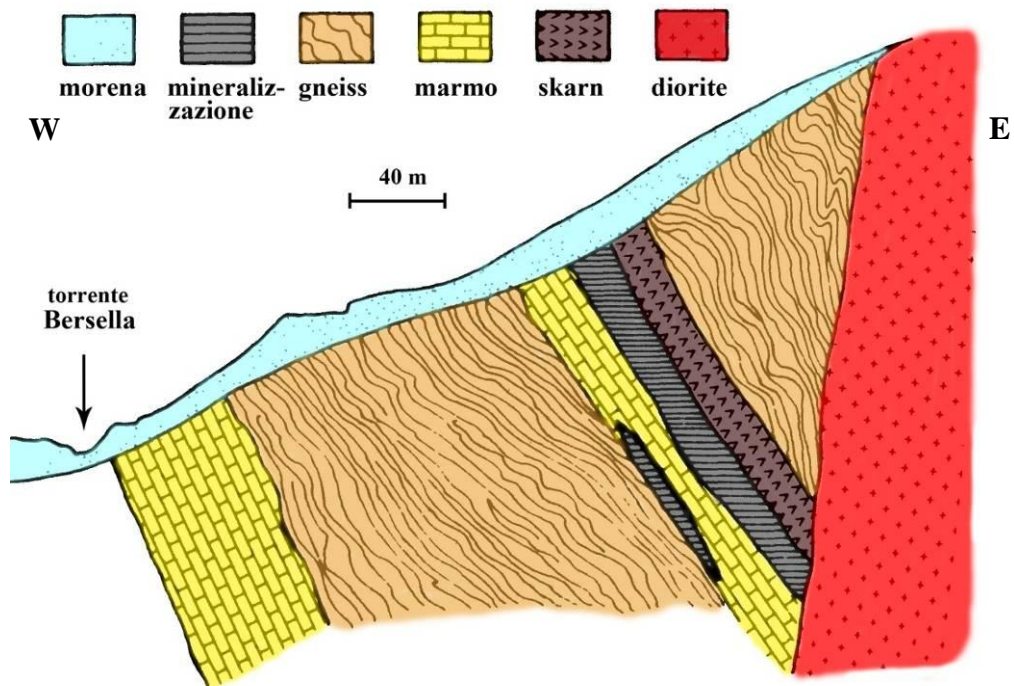


Fig. 2. Sezione W-E (mod. da Vander Auwera & Verkaeren, 1993, tratta da documento FIAT). Evidenza del contatto tra il plutone dioritico e le rocce incassanti, e la localizzazione preferenziale degli skarn al contatto gneiss - marmo dolomitico.

metamorfica alpina (Complesso dei Micascisti Eclogitici, in facies eclogitica-scisti blu; Complesso degli Gneiss Minuti, in facies degli scisti verdi). Il plutone di Traversella si è intruso nel Complesso dei Micascisti Eclogitici, costituiti qui essenzialmente da micascisti, gneiss, marmi dolomitici, cornubianiti calciche, calcefiri e lenti di eclogiti (**Fig. 1**). Il metasomatismo delle rocce incassanti, specialmente carbonatiche, ha sviluppato una varietà di litologie (tactiti o “skarn” s.l.), in seguito ad una estesa o anche totale silicatizzazione, ed è stato accompagnato da impregnazioni, in quantità variabilissima, di vari minerali metalliferi.

La massa principale dello skarn è localizzata tra uno spesso letto di marmo dolomitico e le metapeliti (paragneiss) che immergono verso il plutone (**Fig. 2**). Masse minori sono presenti lungo il contatto diorite–metapelite e all’interno delle metapeliti stesse (Dubru et al., 1988). La geometria degli skarn mostra che la maggior parte dei fluidi mineralizzanti si è infiltrata lungo i contatti tra rocce a

litologia differente e, in minor misura, lungo fratture (Vander Auwera & Verkaeren, 1993).

Agli skarn sono associate mineralizzazioni a magnetite prevalente, con subordinati solfuri e localizzate manifestazioni a scheelite. L'attività mineraria, già documentata in epoca romana, ha coinvolto essenzialmente le importanti masse di magnetite ed è perdurata fino al 1971. Negli ultimi anni venivano recuperate come sotto-prodotto anche scheelite e uraninite in modesta quantità. I dati più recenti indicano una produzione mineraria di 100 t/d di un tout-venant al 30% c. di Fe, con tenori di 40-50 g/t di scheelite e di 2-3 g/t in U_3O_8 (Bottino et al., 1975).

3. Descrizione degli affioramenti mineralizzati

Le mineralizzazioni a cobaltite mostrano uno stretto legame spaziale con la magnetite e con la scheelite (**Fig. 3**). Durante le osservazioni in sottosuolo si è potuto osservare come le mineralizzazioni a cobaltite siano sempre presenti nelle tactite carbonatiche ai margini *sud* delle Masse Ferriere (masse di magnetite), dalla parte opposta cioè rispetto alle metapeliti che limitano a *nord* lo sviluppo delle masse ferrifere.

In miniera sono stati studiati tre affioramenti mineralizzati a cobaltite (**Fig. 3**), precedentemente individuati dal Gruppo Mineralogico Valchiusella nel corso delle sue ricerche:

1) Margine sud della 1° Massa Ferriere, livello 860: la cobaltite compare in venule sub-centimetriche in una tactite contenente “fiamme” di magnetite (**Fig. 4**). Procedendo da sud a nord, su una distanza di pochi metri, si osserva la sequenza: marmo sterile – tactite con fiamme di magnetite e cobaltite - magnetite semimassiva. Nella 1° Massa Ferriere la scheelite si presenta sporadica e non mostra una relazione evidente con la cobaltite (F. Malfatto, com. pers. 2011). Gli affioramenti con cobaltite sono spesso ricoperti da una patina di eritrite dal caratteristico color rosa-viola, che localmente dà luogo alla formazione di vere e proprie “colate” e stalattiti sulle pareti dei vuoti di coltivazione.

2) Margine sud della 2° Massa Ferriere, livello 860: procedendo verso nord, si osserva alcuni metri prima dell'inizio della Massa una tactite contenente disseminazioni di scheelite e, successivamente, disseminazioni di cobaltite.

3) Margine sud della 2° Massa Ferriere, livello 826: la presenza di cobaltite nella tactite è qui marcata da efflorescenze di eritrite. La zona con cobaltite è separata dall'inizio della Massa da una fascia di circa 20 metri di tactite mineralizzata a scheelite.

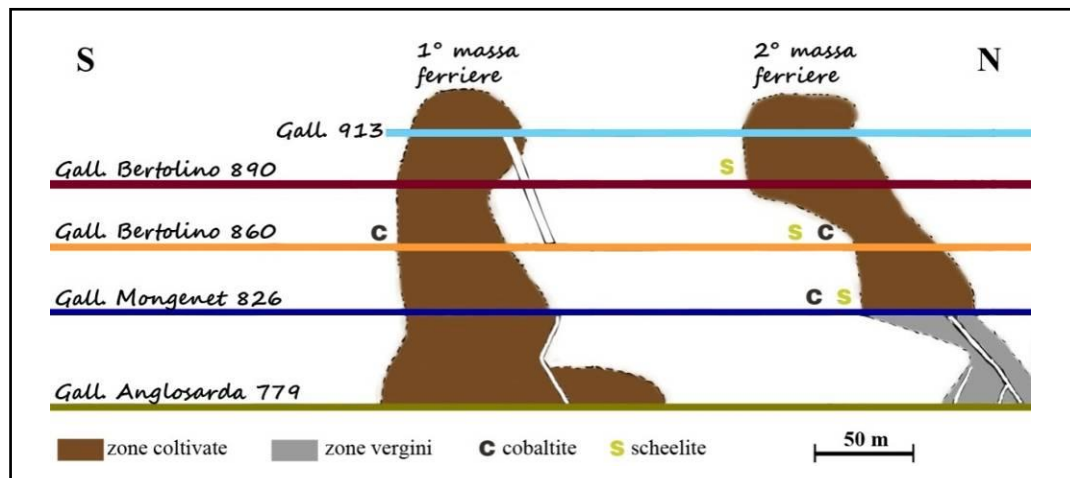


Fig. 3. Sezione longitudinale della 1° e 2° Massa Ferriere (mod. dalla “Sezione longitudinale”, Ing. Bonino, FIAT - Sezione Miniere, 1971). Localizzazione delle mineralizzazioni a cobaltite e scheelite.



Fig. 4. Campione raccolto in corrispondenza dell'affioramento mineralizzato a cobaltite al margine sud della 1° Massa Ferriere al livello 860. Sottili bande carbonatiche (Carb), con quarzo subordinato (Qtz), separano una vena di cobaltite (Cob) da due bande a magnetite (Mgt). Si noti la presenza di patine rosate di eritrite (Ery) sulla superficie della vena a cobaltite, e la distribuzione a “fiamme” delle disseminazioni di magnetite nella porzione destra del campione.

4. Studio minerografico

Lo studio minerografico è stato eseguito su campioni rappresentativi per individuare e caratterizzare i minerali associati alla cobaltite e i loro rapporti tessiturali. In totale sono state studiate 13 sezioni lucide:

- le sezioni TR (TR1–8), ottenute dai campioni degli affioramenti mineralizzati al margine sud della 1° Massa Ferriere, livello 860;
- le sezioni PN11 (PN11-1–5), ottenute dai campioni degli affioramenti mineralizzati al margine sud della 2° Massa Ferriere, livello 860.

4.1. Gruppo sezioni TR

Sezione TR-1

Il minerale metallifero più abbondante della sezione è la *magnetite*, presente in aggregati millimetrici di individui raramente idiomorfi, spesso arrotondati e raramente isolati, all'interno di una ganga a carbonati e talco prevalenti. In alcuni casi la magnetite può essere inclusa nella *calcopirite* (**Fig. 4-a**), minerale presente in abbondanti plaghe allotriomorfe. Sovente si rinviene della calcopirite concresciuta con magnetite e *pirite*. Quest'ultima appare ricca di inclusioni di calcite e quarzo. In quantità subordinate sono presenti arsenopirite e cobaltite. L'*arsenopirite* compare in granuli idiomorfi con le tipiche sezioni a losanga. Contiene frequentemente inclusioni di magnetite. La *cobaltite* è distinguibile dall'arsenopirite e dalla pirite per il suo colore bianco leggermente rosato e, talora, grazie alla sua debole anisotropia (visibile ai N+ soltanto nei cristalli opportunamente orientati). Si presenta in cristalli isolati tendenzialmente idiomorfi, oppure in venule costituite da allineamenti di piccoli cristalli cubo-pentagonododecaedrici nella ganga carbonatica (**Fig. 4-b**). E' spesso ricca di inclusioni di altri minerali metallici (bismutinite, bismuto nativo, pirrotina, calcopirite). La *bismutinite*, compare in piccole plaghe, spesso parzialmente sostituite da bismuto nativo, frequentemente incluse nella cobaltite. Il *bismuto nativo* si presenta in piccoli granuli gialli con fitte striature dovute alla sua scarsa durezza, sempre associati alla bismutinite. La *pirrotina*, osservata spesso

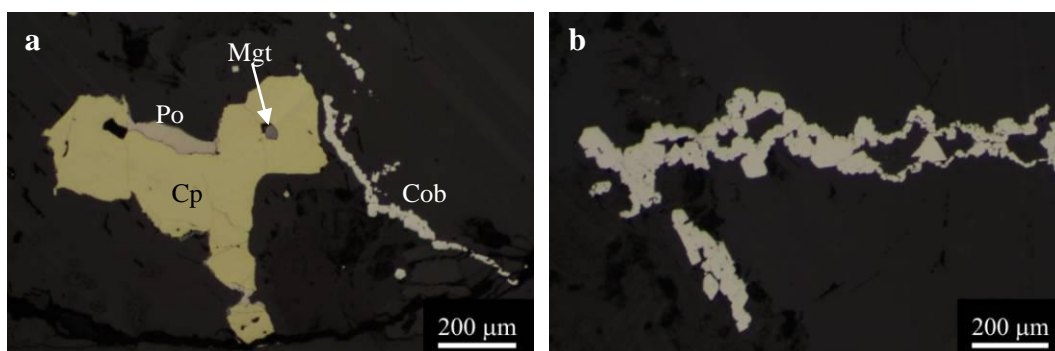


Fig. 4. a) Plaga di calcopirite (Cp) associata a pirrotina (Po), in ganga carbonatica ; all'interno della calcopirite si osserva un granulo di magnetite (Mgt), mentre nella parte destra della foto si presenta una venula di cobaltite (Cob). **b)** Venula di cobaltite, costituita da individui per lo più cubo-pentagonododecaedrici, in ganga carbonatica.

all'interno dei cristalli di cobaltite, forma anche individui allotriomorfi, che in alcuni casi bordano delle plaghe di calcopirite (**Fig. 4-a**).

Sezione TR-2

Il minerale più abbondante in questa sezione è la *magnetite*, i cui granuli allotriomorfi si riuniscono in bande millimetriche parallele tra di loro, separate da una matrice essenzialmente carbonatica. La *cobaltite* si presenta in cristalli tendenti all'idiomorfismo, dal color bianco e con una nuance rosa; è spesso associata a della *pirite*, piuttosto fratturata, talora concresciuta con *arsenopirite* (**Fig. 5-a**). L'*arsenopirite* si presenta anche in piccoli cristalli idiomorfi isolati. La *calcopirite* si rinviene in piccoli granuli allotriomorfi, isolati o associati alla magnetite e all'*arsenopirite*, oppure inclusi nella cobaltite. Sempre all'interno della cobaltite, possiamo osservare piccole plaghe di *bismutinite* parzialmente sostituite da *bismuto nativo*, e individui allotriomorfi di *pirrotina*. Nella sezione compare inoltre un piccolo aggregato costituito da due individui idiomorfi di pirrotina dalla sezione esagonale.

Sezione TR-3

La *magnetite* forma una vena sub-centimetrica a matrice carbonatica, che taglia la roccia carbonatica incassante ed è intersecata e dislocata a sua volta da una venetta minore. La magnetite si presenta in aggregati di individui allotriomorfi, a

volte fratturati. Interstiziali alla magnetite sono presenti individui millimetrici di *arsenopirite*, presente in cristalli tendenzialmente idiomorfi, ma anche in aggregati cataclastici. Può essere bordata da *pirite*, anch'essa sovente fratturata, interstiziale tra l'arsenopirite e la magnetite (**Fig. 5-b**). Associata all'arsenopirite si rinviene anche *calcopirite* in piccole plaghe sfrangiate. La *cobaltite* è presente in cristalli idiomorfi di color bianco rosato (**Fig. 5-c**), disseminati sia nella ganga carbonatica (con talco subordinato) che nelle vene a magnetite. Contiene inclusioni di numerosi minerali, quali *pirrotina*, *bismutinite*, *bismuto nativo* e calcopirite. La bismutinite forma anche plaghe discrete tra i cristalli di cobaltite, dove viene parzialmente sostituita dal bismuto nativo (soprattutto ai bordi). Una pirrotina degna di nota, per essere meno frequente nelle altre sezioni, è quella che cementa della magnetite piuttosto fratturata, associata a della cobaltite subidiomorfa.

Sezione TR-4

Anche in questo caso la *magnetite* è il minerale più abbondante, presente in aggregati di individui tendenzialmente auto-allotriomorfi. A differenza di altre sezioni, qui l'*arsenopirite* è massicciamente rappresentata, sottoforma di aggregati, spesso fratturati, oppure di piccoli cristalli dispersi nella matrice a carbonati e fillosilicati prevalenti; alcuni cristalli, meno fratturati, includono della pirrotina, calcopirite e bismutinite, inducendo a ritenerla un'arsenopirite di 2° generazione. La *calcopirite* è anche interstiziale tra i cristalli di arsenopirite. La *pirrotina* si presenta di frequente associata a granuli di magnetite e arsenopirite e, come nella sezione TR-3, cementa granuli di magnetite fratturati (**Fig. 5-d**). Solamente in questa sezione possiamo osservare delle piccole plaghe allotriomorfe di *bismutinite* incluse all'interno dell'arsenopirite. La *pirite* si presenta spesso in granuli fratturati, ma anche in piccoli cristalli idiomorfi associati alla magnetite. La *cobaltite* è presente in quantità subordinata, spesso in cristalli idiomorfi, ed è sempre associata all'arsenopirite di 2° generazione.

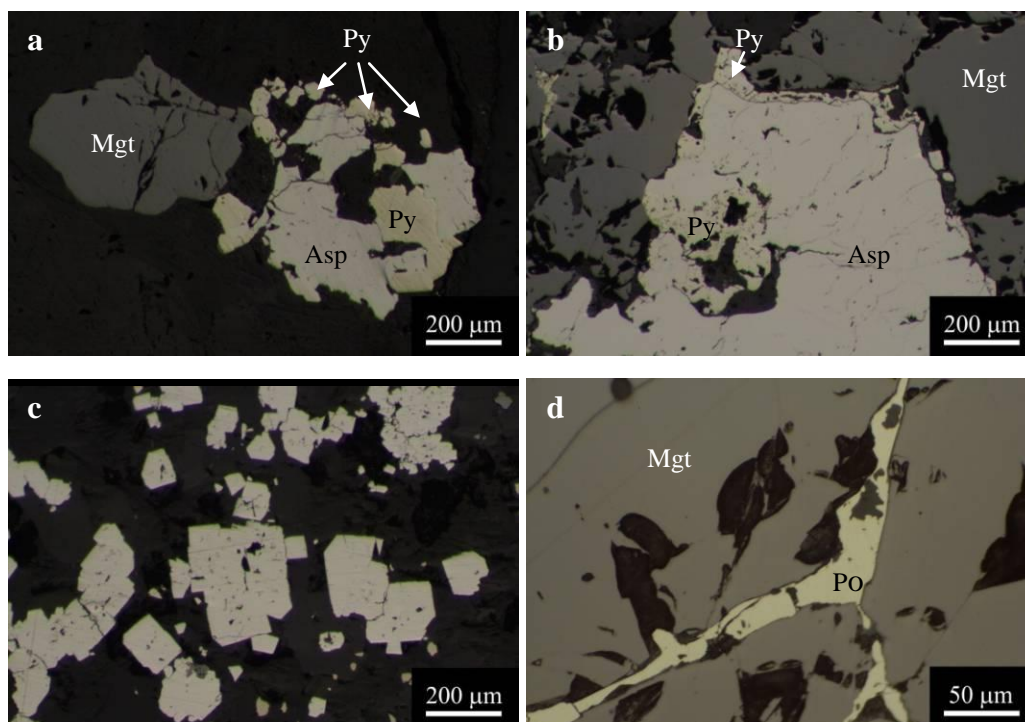


Fig. 5. **a**) Pirite (Py) concresciuta con arsenopirite (Asp), granulo di magnetite (Mgt), in ganga carbonatica (Carb). **b**) Pirite (Py) interstiziale tra arsenopirite (Asp) e magnetite (Mgt). **c**) Cristalli idiomorfi di cobaltite in matrice carbonatica. **d**) Pirrotina (Po) che cementa granuli di magnetite (Mgt) fratturata.

Sezione TR-5

La *magnetite* è massicciamente presente in aggregati di individui sub-idiomorfi in una ganga a carbonati con probabile biotite. È interessante notare la presenza di un piccolo incluso allotriomorfo di *arsenopirite* in un granulo di magnetite. La *pirrotina* è qui presente in granuli millimetrici allotriomorfi, in parte fratturati, con evidenti alterazioni di tipo bird's eye. La *cobaltite* è spesso presente in cristalli sub-millimetrici cubo-pentagonododecaedrici dal color bianco-rosato, non di rado cresciuti a formare bordi attorno agli individui più idiomorfi della matrice carbonatica e ai granuli di pirrotina, e venette all'interno di questi ultimi (**Fig. 6-a**); talvolta della cobaltite si rinviene anche all'interno di fratture nella *pirite*, che compare in plaghe fratturate. Sia la pirrotina che la cobaltite possono contenere piccoli inclusi allotriomorfi di *bismutinite*, spesso sostituiti al bordo da *bismuto nativo*, e talora circondati da *calcopirite*, e piccole plaghe isolate di calcopirite.

Sezione TR-6

La sezione è suddivisa in due principali domini: uno con preponderante magnetite, e l'altro costituito essenzialmente da cobaltite.

La *magnetite* appare tendenzialmente massiva ed è rappresentata da aggregati di individui allotriomorfi. All'interno della matrice (carbonati con subordinata probabile biotite) interstiziale ai cristalli di magnetite, si rinvencono *arsenopirite*, pirite, calcopirite e subordinata cobaltite (**Fig. 6-b**). La *calcopirite* è in plaghe allotriomorfe, talora interstiziali tra cristalli idiomorfi di carbonato (**Fig. 6-b**). La *pirite* compare in plaghe ricche di microinclusioni di ganga, che includono cristalli di cobaltite.

La *cobaltite* si presenta sotto forma di abbondanti cristalli cubo-pentagonododecaedrici isolati, talora con calcopirite interstiziale, oppure in aggregati, in una matrice costituita da talco, quarzo, carbonati e clorite (**Fig. 6-c**);

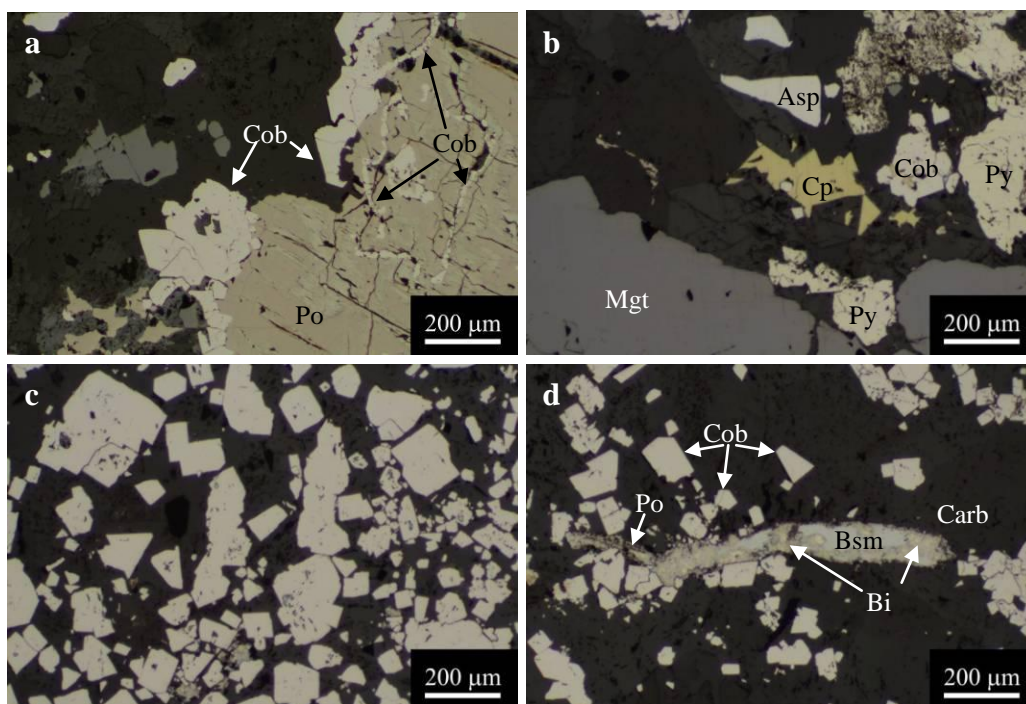


Fig. 6. a) cristalli di cobaltite (Cob) cresciuti a formare bordi attorno ai granuli di pirrotina(Po), e venette all'interno di questi ultimi. b) Porzione di un granulo millimetrico di magnetite (Mgt), arsenopirite (Asp), calcopirite (Cp) interstiziale tra granuli idiomorfi di carbonato, plaga di pirite (Py) che in parte include granuli di cobaltite (Cob), in ganga prevalentemente carbonatica. c) Aggregati e cristalli isolati di cobaltite, spesso contenenti inclusioni micrometriche di bismutinite, in ganga carbonatica. d) Cobaltite (Cob) con cristallo millimetrico di bismutinite (Bsm), parzialmente sostituito al bordo da bismuto nativo (Bi), pirrotina (Po) e carbonato (Carb).

presenta varie inclusioni, quali calcopirite, bismutinite, bismuto nativo e pirrotina. Sono degni di nota alcuni aggregati e cristalli idiomorfi di *bismutinite* da sub-millimetrici a millimetrici (**Fig. 6-d**), interstiziali tra cristalli isolati di cobaltite, contenenti a loro volta abbondanti inclusioni di bismutinite. La bismutinite interstiziale è parzialmente sostituita da *bismuto nativo*, e in parte dal carbonato della ganga, e risulta talora bordata da *pirrotina*.

Sezione TR-7

La sezione è costituita da una “fiamma” centimetrica di magnetite semi-massiva, intersecata da una venetta millimetrica a cobaltite prevalente in matrice di talco e clorite prevalenti; una banda millimetrica di carbonato e quarzo separa la venetta dalla magnetite incassante. Come nella sezione precedente, la *magnetite* è per lo più presente in individui auto-allotriomorfi. Nella matrice interstiziale alla magnetite (carbonato con subordinata probabile biotite), si osserva un aggregato formato da un granulo di *arsenopirite*, un cristallo cubo-pentagonododecaedrico di cobaltite, una plaga di *bismuto nativo* (pseudomorfo su bismutinite), un relitto di *bismutinite* e un piccolo granulo di *calcopirite*, il tutto cementato da *pirrotina* (**Fig. 7-a**). Sempre nella parte della sezione costituita principalmente da magnetite, sono presenti granuli di *pirite* tendenzialmente idiomorfi e, in alcuni casi, decisamente allotriomorfi.

La vena a *cobaltite* è costituita sia da piccoli cristalli idiomorfi che da aggregati. Contiene quasi sempre inclusioni di bismutinite, bismuto nativo, pirrotina e calcopirite. Tra gli aggregati di cobaltite si osservano anche plaghe discrete di bismutinite, parzialmente sostituite da bismuto nativo. Sempre nella vena di cobaltite, si sono osservati due granuli di *ilmenite* bordati da *rutile* (**Fig. 7-b**).

Sezione TR-8

Come per la sezione TR7, questo campione è costituito da un “fiamma” centimetrica di magnetite semimassiva, intersecata da una venula a cobaltite.

La *magnetite* forma aggregati costituiti da individui allotriomorfi o al massimo subidiomorfi. Nella matrice carbonatica interstiziale alla magnetite, si rilevano

arsenopirite, calcopirite e in minor misura pirrotina; l'*arsenopirite* è presente in granuli allotriomorfi, interstiziali tra granuli di magnetite, con bordi e fratture rivestite di *calcopirite* (Fig. 7-c). La *pirrotina* è invece presente soprattutto come inclusioni nella cobaltite, oppure in plaghe che orlano cristalli di bismutinite. La *cobaltite* si presenta in cristalli idiomorfi che, oltre alla pirrotina, contengono piccole plaghe di *bismutinite*, *bismuto nativo* e calcopirite. La calcopirite può formare anche plaghe sub-millimetriche tra i cristalli di cobaltite (Fig. 7-d). Al limite tra la porzione a magnetite e quella a cobaltite, si trova un gruppo di granuli subidiomorfi di *pirite*, con frequenti inclusioni di quarzo e calcite e, talora, di magnetite.

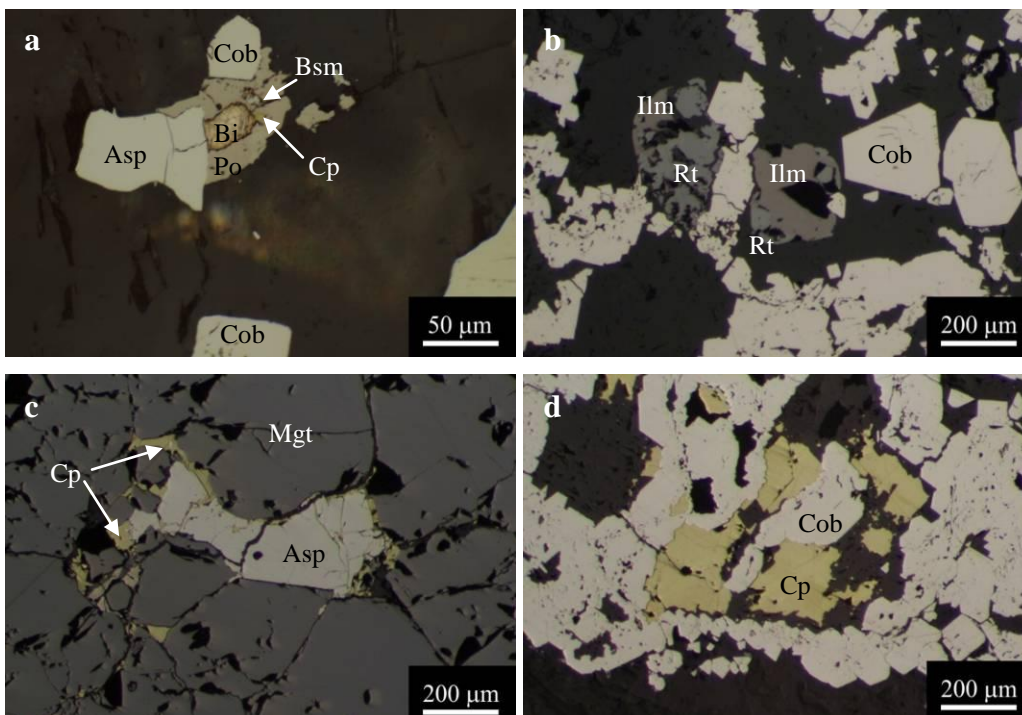


Fig. 7. a) Aggregato formato da arsenopirite (Asp), un cristallo pentagonododecaedrico di cobaltite (Cob), una plaga di bismuto nativo (Bi), un relitto di bismutinite (Bsm) e un piccolo granulo di calcopirite (Cp), il tutto cementato da pirrotina (Po) in matrice prevalentemente carbonatica. b) Granuli di ilmenite (Ilm) bordati da rutilo (Rt), associati ad aggregati di cobaltite (Cob). c) Granulo di arsenopirite (Asp) interstiziale in magnetite (Mgt) e orlato da calcopirite (Cp). d) Plaghe sub-millimetriche di calcopirite (Cp) tra cristalli di cobaltite (Cob), in matrice carbonatica.

4.2 Gruppo sezioni PN11

A differenza dei campioni della serie TR, i campioni della serie PN presentano un contenuto di minerali metalliferi decisamente inferiore. La mineralizzazione si presenta qui in forma molto più sporadica, in accordo con le osservazioni macroscopiche in sottosuolo.

Sezione PN11-1

Tra i minerali metallici, la *magnetite* è il minerale più abbondante, seguito dalla pirrotina. La magnetite è presente in gruppi di cristalli per lo più idiomorfi, raramente isolati all'interno della ganga carbonatica (con subordinata probabile clorite). In alcuni casi, la magnetite cresce sui granuli di pirrotina (**Fig. 8-a**). La *pirrotina* si presenta in granuli allotriomorfi sub-millimetrici; spesso borda o include completamente delle plaghe di *calcopirite*; quest'ultima compare anche in individui isolati nella matrice carbonatica. La *cobaltite* si presenta in cristalli o aggregati di cristalli sub-millimetrici, per lo più idiomorfi, di color bianco con una leggera nuance rosa (evidente soprattutto quando è in prossimità della pirite). In un particolare cristallo sono state osservate numerose inclusioni di magnetite, oltre a prismi allungati di minerali di ganga (probabile quarzo), per lo più paralleli alle facce dell'ospite (**Fig. 8-b**). A volte, ai N+, si osserva una debolissima anisotropia. La *pirite* è presente in cristalli sub-millimetrici, tendenzialmente idiomorfi ad abito cubico e spesso fratturati.

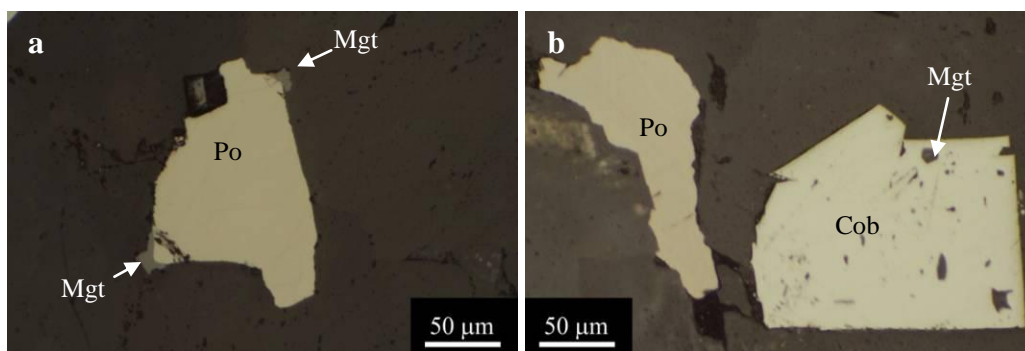


Fig. 8. a) Magnetite (Mgt) cresciuta sugli spigoli di un granulo di pirrotina (Po), in ganga carbonatica. b) Cobaltite (Cob) contenente magnetite (Mgt), prismi di quarzo e carbonati; presente anche un granulo di pirrotina (Po).

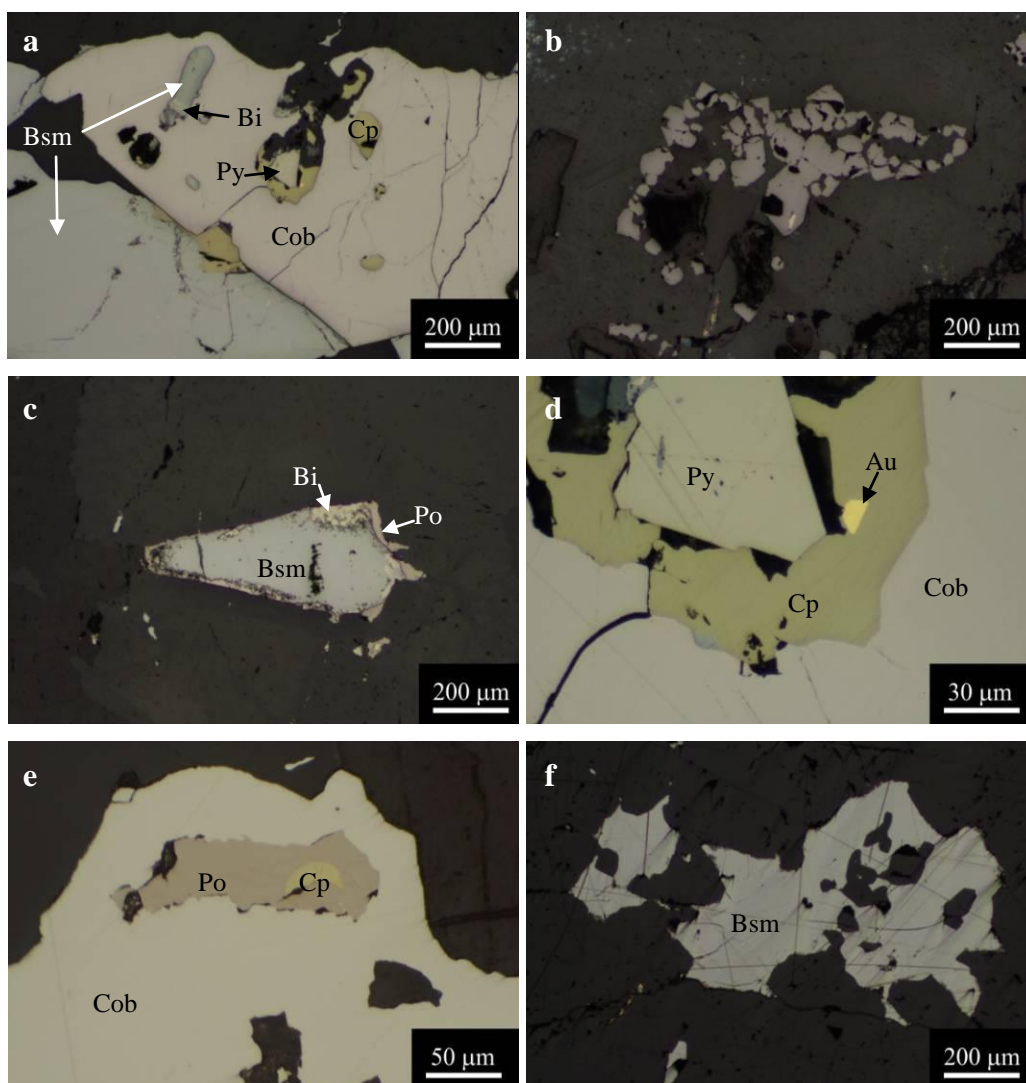


Fig. 9. a) Cobaltite (Cob) con inclusioni di bismutinite (Bsm), parzialmente sostituita da bismuto (Bi) e calcopirite (Cp), associata ad una plaga millimetrica di bismutinite. Della calcopirite, parzialmente inclusa nella cobaltite, include parzialmente un granulo idiomorfo di pirite (Py). b) Aggregato di individui sub-idiomorfi di magnetite. c) Bismutinite (Bsm) con bordi sostituiti da bismuto nativo (Bi) e pirrotina (Po). d) Granulo di oro nativo (Au) quasi completamente inglobato nella calcopirite (Cp) associata a cobaltite (Cob) e pirite (Py). e) Calcopirite (Cp) inclusa in una plaga di pirrotina (Po), a sua volta inglobata in un granulo di cobaltite (Cob). f) Plaga scheletrica di bismutinite (Bsm) in ganga carbonatica.

Sezione PN11-2

Il minerale più abbondante della sezione è la *cobaltite*, presente in granuli millimetrici tendenti all'idiomorfismo, dal color bianco rosato; vi è un cristallo in particolare, il più grande della sezione (**Fig. 9-a**), che ospita al suo interno della bismutinite, parzialmente sostituita da bismuto nativo, magnetite, calcopirite e oro

nativo, ed è inoltre bordato da una plaga di bismutinite. In una parte della sezione vi sono dei granuli di cobaltite associati a *pirite*. La ganga è prevalentemente carbonatica, con subordinata clorite che costituisce aggregati di individui lamellari. Anche in questa sezione, la *magnetite* è presente principalmente in aggregati di individui per lo più idiomorfi (**Fig. 9-b**). La *calcopirite* si presenta sovente in plaghe incluse nella pirrotina e nella cobaltite, e in alcuni casi bordata dalla *bismutinite*. Quest'ultima si rinviene spesso in plaghe parzialmente sostituite al bordo da *bismuto nativo* e *pirrotina* (**Fig. 9-c**) e, come sopra citato, come inclusioni nella cobaltite. Tutte le fasi presenti nella sezione possono essere associate a plaghe di pirrotina.

La sezione in esame è l'unica in cui è stato rilevato l'*oro nativo*, presente in rari granuli all'interno della cobaltite (**Fig. 9-d**).

Sezione PN11-3

La sezione contiene pochi granuli di minerali metallici, tra cui i più abbondanti sono cobaltite e bismutinite. La *cobaltite* si presenta per lo più in aggregati di individui tendenzialmente idiomorfi, mentre sono meno frequenti i cristalli isolati; in particolare, vi sono due aggregati millimetrici che presentano al loro interno una plaga di pirrotina, che a sua volta include della *calcopirite* (**Fig. 9-e**), e un'inclusione di bismutinite con bismuto nativo. Di solito la *bismutinite* forma plaghe millimetriche (**Fig. 9-f**), oppure monocristalli plurimillimetrici largamente sostituiti dal carbonato della ganga, nel qual caso essi si riducono a residui scheletrici interstiziali ai grossi granuli carbonatici; spesso la bismutinite è sostituita parzialmente al bordo o anche totalmente dal *bismuto nativo*. La *magnetite* è presente soprattutto in cristalli idiomorfi, mentre la *pirrotina* forma granuli allotriomorfi, che a volte includono parzialmente bismutinite/bismuto.

Sezione PN11-4

Il minerale metallico più abbondante è la *magnetite*, presente in individui prevalentemente idiomorfi, all'interno di una ganga a prevalente carbonato (con probabile clorite e talco). Segue poi la *pirrotina*, in granuli allotriomorfi

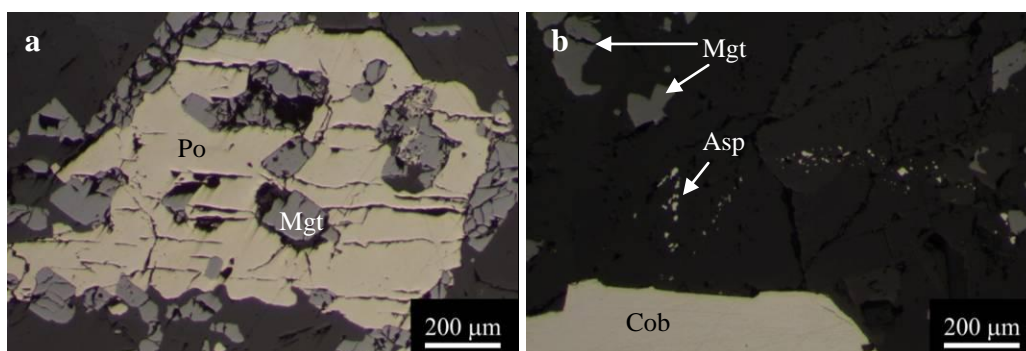


Fig. 10. a) Granuli di magnetite (Mgt) inclusi nella pirrotina (Po). **b)** Scia costituita da cristalli micrometrici di arsenopirite (Asp) in ganga carbonatica; nella parte inferiore della foto si nota una porzione di un cristallo di cobaltite (Cob), mentre nella zona superiore si notano granuli allotriomorfi di magnetite (Mgt).

millimetrici, sovente associata a piccoli individui allotriomorfi di *calcopirite*. La pirrotina può includere dei cristalli di magnetite (**Fig. 10-a**). La *cobaltite* è rappresentata essenzialmente da un unico cristallo idiomorfo millimetrico; in prossimità di tale cristallo, si trova una scia costituita da granuli micrometrici di *arsenopirite* (**Fig. 10-b**). Questa sezione è l'unica del gruppo PN11 che contiene arsenopirite. Infine si osservano aggregati di *pirite* costituiti da individui idiomorfi, tipicamente ad abito cubico e decisamente carciati.

Sezione PN11-5

La *magnetite* è il minerale metallico più abbondante, in aggregati di cristalli idiomorfi all'interno di una ganga prevalentemente carbonatica (con subordinata probabile clorite). La cobaltite è assente. Vi sono due vistosi cristalli millimetrici e idiomorfi di *pirite*, che includono magnetite e sono associati a pirrotina. La *pirrotina* si presenta in granuli allotriomorfi, talora associati a bismuto nativo (probabilmente in sostituzione di bismutinite) e *calcopirite*. La *bismutinite* è presente in plaghe millimetriche, sovente sostituite al bordo da *bismuto nativo*.

4.3. Sequenza paragenetica

I campioni delle serie TR e PN11 mostrano una sequenza paragenetica in larga misura confrontabile. Tra i minerali metallici, il primo a cristallizzare è la magnetite, seguita generalmente dal gruppo arsenopirite (prevalentemente nella serie TR), pirite, calcopirite, pirrotina (quest'ultima solo nella serie PN11). Non ci sono evidenze tessiturali che permettano di definire in maniera univoca l'età relativa dei solfuri. Le relazioni microstrutturali tra magnetite e arsenopirite (TR) o pirrotina (PN11), indicano una certa sovrapposizione tra lo stadio a magnetite e il primo stadio a solfuri.

In un terza fase, compare la bismutinite, talora seguita da un'arsenopirite-II (TR), che a differenza della prima è solo moderatamente fratturata. La precipitazione dell'arsenopirite-II è contemporanea alla cristallizzazione della cobaltite, a grana maggiore nella serie PN11, che contiene sovente piccole inclusioni di calcopirite, bismutinite (talora trasformata in bismuto nativo) e pirrotina. In entrambe le serie, la presenza di bismutinite (parzialmente sostituita da bismuto nativo e talora bordata da pirrotina) interstiziale tra cristalli di cobaltite contenenti a loro volta bismutinite (spesso non alterata), suggerisce (i) una cristallizzazione essenzialmente contemporanea di cobaltite e bismutinite, in accordo con la stretta associazione spaziale tra questi due minerali, e (ii) una trasformazione della bismutinite in bismuto \pm pirrotina successiva alla cristallizzazione della cobaltite.

In uno stadio più avanzato, la bismutinite e la pirrotina vengono parzialmente sostituite dal carbonato della ganga. La presenza di una probabile pirite-II, che include cobaltite, rimane sporadica e limitata alle porzioni ricche di magnetite della serie TR.

La sequenza proposta per i minerali metallici è pertanto la seguente: magnetite (\pm arsenopirite-I \pm pirrotina-I) \rightarrow arsenopirite-I + pirite-I + calcopirite (\pm magnetite \pm pirrotina-I) \rightarrow bismutinite + cobaltite (\pm arsenopirite-II) \rightarrow bismuto + pirrotina-II (\pm pirite-II).

5. Analisi al SEM e alla microsonda elettronica

Sono state ricavate alcune immagini degli elettroni retrodiffusi mediante SEM (Museo di Storia Naturale di Milano) delle sezioni TR3, TR7 e PN11-2. Tali immagini hanno permesso di riconoscere la presenza di zonature composizionali in alcuni granuli di cobaltite (**Fig. 11**). Su due sezioni, una lucida (TR7) e una sottile (ricavata dal testimone della sezione lucida PN11-2), sono state quindi eseguite delle analisi chimiche alla microsonda elettronica presso il Dipartimento di Geoscienze-IGG CNR (Padova) con una microsonda CAMECA modello SX50, dotata di 4 spettrometri verticali a dispersione di lunghezza d'onda, dedicati all'analisi quantitativa, ed uno spettrometro a dispersione di energia, utilizzato per l'analisi qualitativa. La precisione è dell'ordine dell'1% per gli elementi maggiori e del 3-5% per quelli minori.

Le analisi chimiche sono state finalizzate essenzialmente alla determinazione

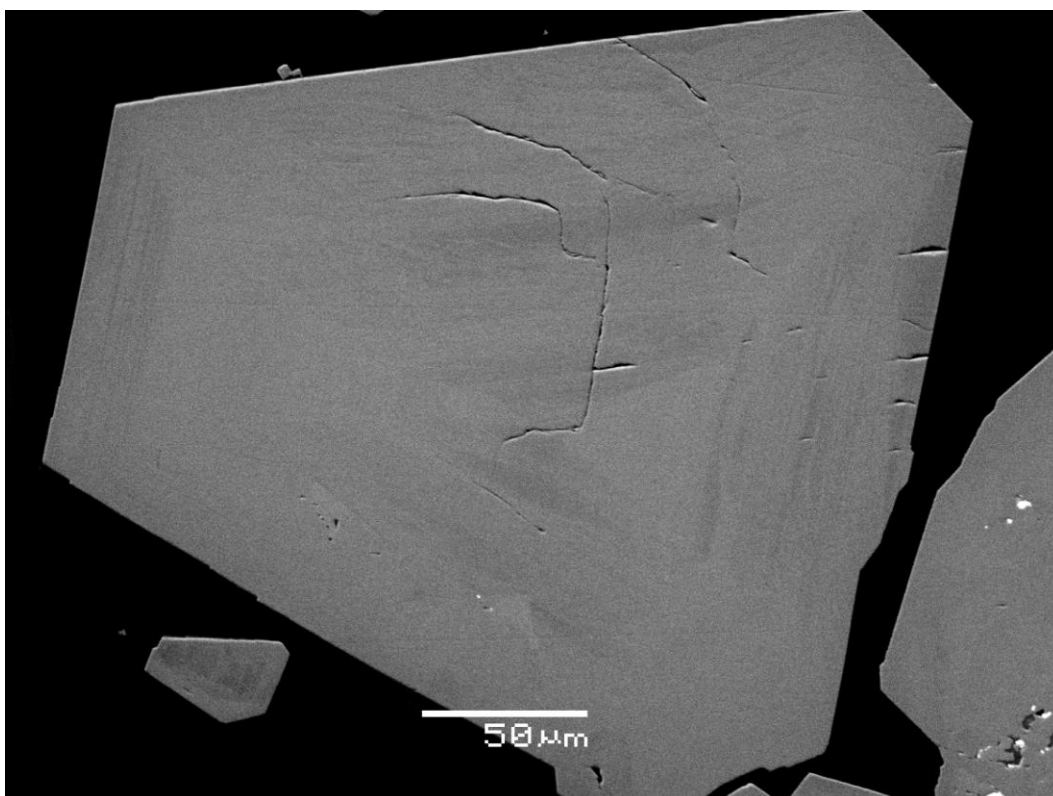


Fig. 11. Immagine degli elettroni retrodiffusi di un cristallo di cobaltite (sezione TR7); le bande più scure sono più ricche di Fe, mentre quelle più chiare mostrano un maggior contenuto di Co.

delle variazioni composizionali nei granuli di cobaltite e arsenopirite, e delle peculiarità composizionali delle cobaltiti del gruppo TR e PN11.

5.1. Sezione TR7

Le analisi sono state eseguite su (i) un cristallo di arsenopirite e uno di cobaltite, facenti parte di un aggregato costituito anche da pirrotina, bismutinite, bismuto nativo e calcopirite, situato nella ganga carbonatica interstiziale alla magnetite, in prossimità di un grosso cristallo di pirite e di uno più piccolo di cobaltite (**Fig. 12**); (ii) un cristallo di cobaltite zonato facente parte della venetta a cobaltite (v. cap. 4.1) (**Figg. 11, 14**).

Nel primo caso, i dati ottenuti evidenziano delle oscillazioni composizionali significative in termini di rapporti Co/Fe nell'arsenopirite e Ni/(Fe+Co) nella cobaltite coesistente (**Fig. 13-a**). Nel secondo caso, le oscillazioni composizionali

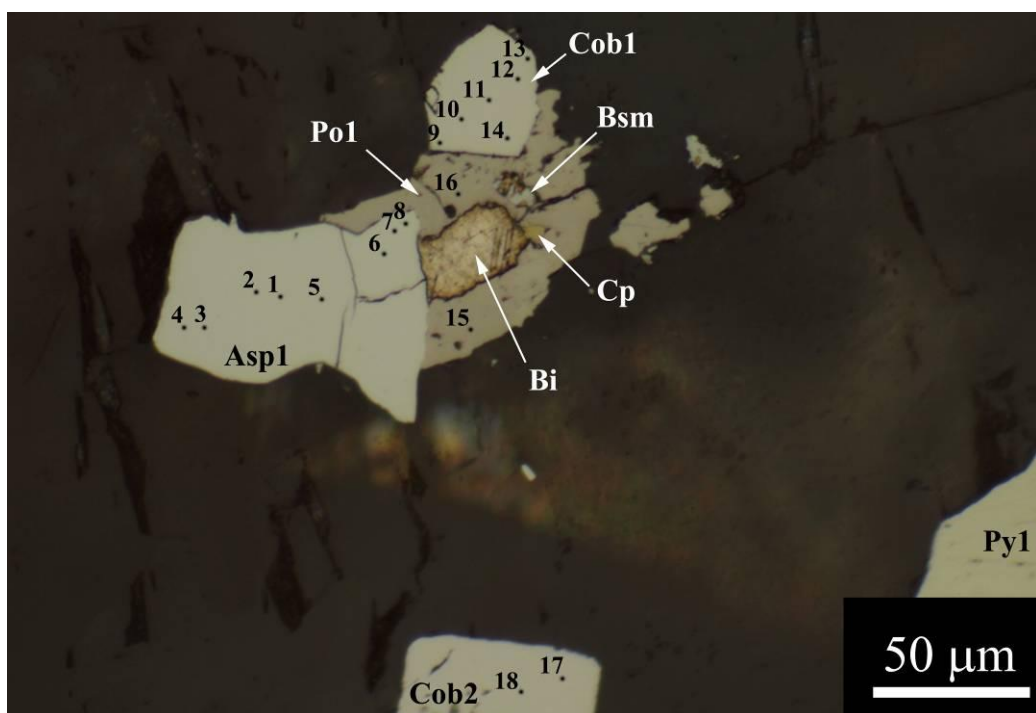


Fig. 12. Particolare della sezione TR7 con indicazione dei punti analisi effettuati in microsonda elettronica. Si nota un aggregato costituito da: arsenopirite (Asp1) coesistente con un cristallo idiomorfo di cobaltite (Cob1), una plaga di bismuto nativo (Bi), una plaga di bismutinite (Bsm), un individuo allotriomorfo di calcopirite (Cp), il tutto cementato da pirrotina (Po1), nella matrice prevalentemente carbonatica interstiziale alla magnetite. Nella parte inferiore della foto si nota una porzione di un cristallo di cobaltite (Cob2), mentre il cristallo a destra è di pirite (Py1).

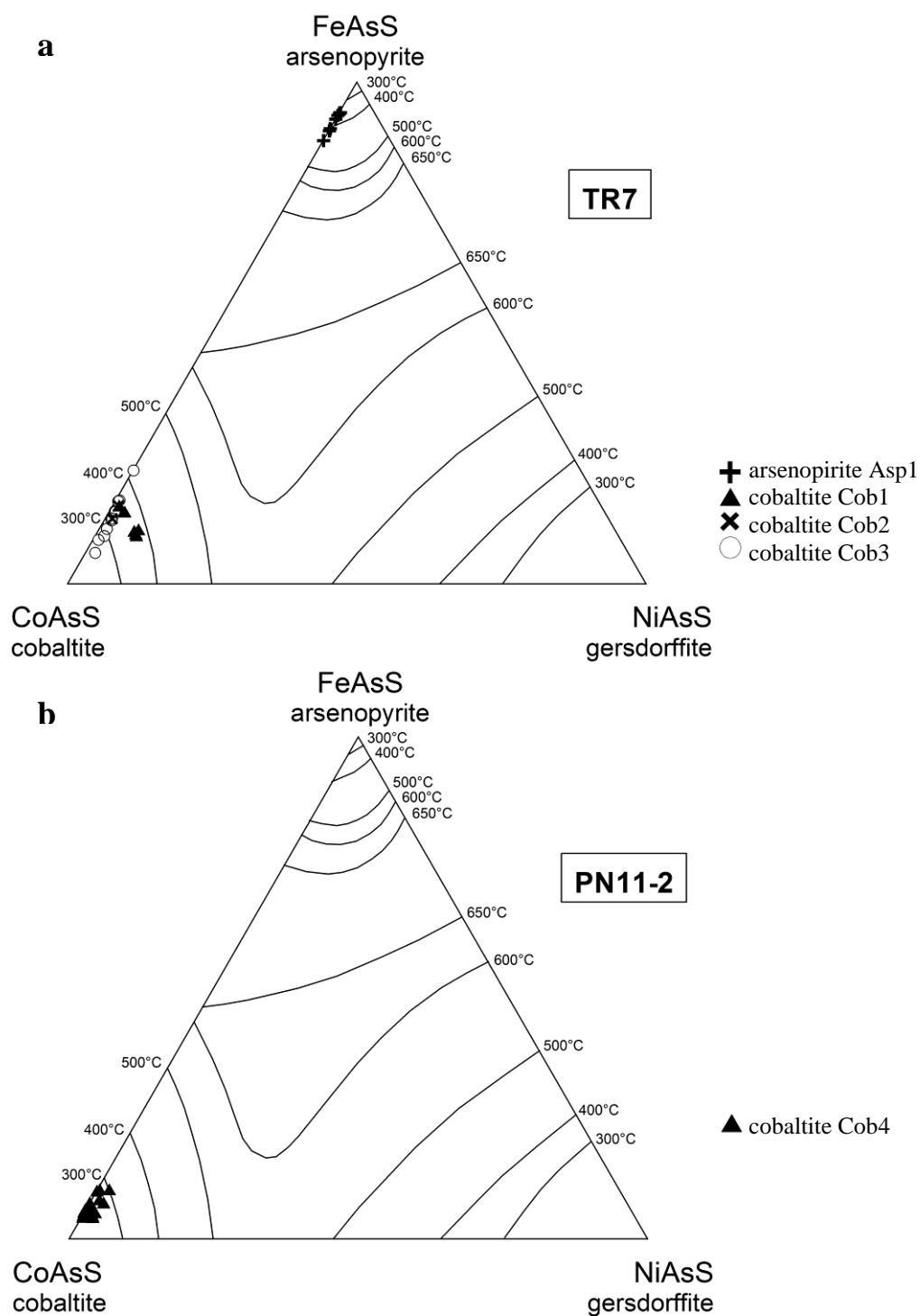


Fig. 13. Composizioni dei solfoarseniuri analizzati nel diagramma triangolare FeAsS–CoAsS–NiAsS (Klemm, 1965). **a)** Sezione TR7: punti analisi della cobaltite (Cob1) e dell’arsenopirite coesistente (Asp1), del granulo di cobaltite associata (Cob2) (v. Fig. 12), e del granulo di cobaltite zonata (Cob3, vedi Fig. 11). **b)** Sezione PN11-2: punti analisi della cobaltite (Cob4).

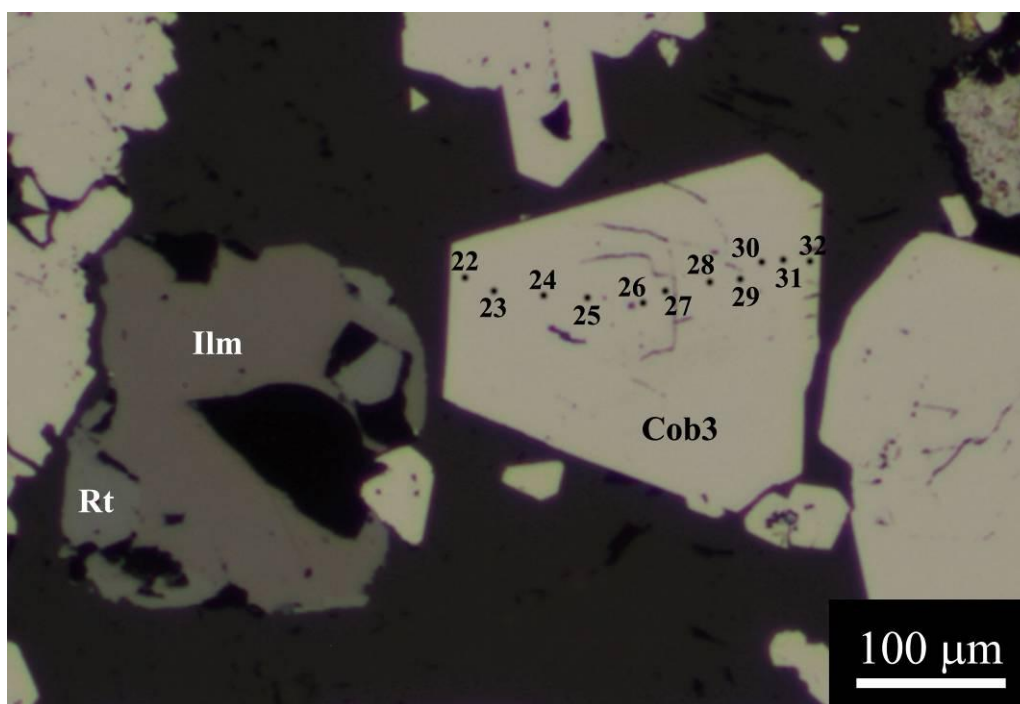


Fig. 14. Dettaglio della sezione TR7, con indicazione dei punti analisi effettuati in microsonda elettronica sul cristallo di cobaltite analizzato al SEM (v. Fig. 11). Il cristallo di cobaltite è in prossimità di un granulo di ilmenite (Ilm), parzialmente rivestita da rutilo (Rt).

della cobaltite (non associata ad arsenopirite) riguardano essenzialmente il rapporto Co/Fe. I rapporti As/S sono > 1 per l'arsenopirite (1.10–1.21, media = 1.14) e < 1 per le cobaltiti (0.78–0.90, media = 0.85, nella cobaltite associata ad arsenopirite; 0.59–0.79, media = 0.72, nella cobaltite non associata ad arsenopirite). I rapporti As/S nelle cobaltiti studiate sono correlati negativamente con il contenuto in Fe, in accordo con quanto osservato in letteratura, e cadono in buona parte entro l'ampio intervallo delle cobaltiti naturali e sperimentali (As/S per lo più tra 0.78 e 2.44; Béziat et al., 1996; Barkov et al., 1999; Wagner & Lorenz, 2002; Fanlo et al., 2004; Hem & Makovicky, 2004a,b; Nimis et al., 2008).

Nel diagramma triangolare FeAsS–CoAsS–NiAsS (Klemm, 1965), la maggior parte dei punti analisi dell'arsenopirite (Asp1) e della cobaltite coesistente (Cob1 e 2) cade tra le isoterme 300°C e 400°C (**Fig. 13-a**). In prima analisi, questo intervallo potrebbe corrispondere alle effettive condizioni di formazione delle due fasi. Nel caso della cobaltite (Cob3) non associata ad arsenopirite, le composizioni

registrano temperature apparenti molto variabili (approssimativamente tra 200 °C e 420 °C); data l'assenza di altri solfoarseniuri coesistenti, in questo caso la temperatura è da considerarsi come una temperatura minima di equilibrio.

Rimane ancora da stabilire se le zonature osservate siano da riferire a variazioni termiche o composizionali dei fluidi mineralizzanti, oppure ad oscillazioni del grado di soprassaturazione durante una crescita in condizioni di non-equilibrio, nel qual caso le temperature stimate non sarebbero significative.

5.2. Sezione PN11-2

L'oggetto dell'analisi è un cristallo millimetrico di cobaltite (Cob₄) che include della bismutinite con bismuto nativo, pirrotina e oro nativo (v. Fig. 9d). Rispetto alle cobaltiti della sezione TR7, quella di questa sezione ha mediamente un maggiore rapporto Co/Fe (**Fig. 13-b**), indice di una temperatura relativamente bassa, o, più probabilmente, di un fluido mineralizzante a minor contenuto di Fe; quest'ultima ipotesi spiegherebbe anche l'assenza di arsenopirite in questo particolare campione ed è comunque in linea con la generale scarsità di arsenopirite in tutto l'affioramento. Si noti che data l'assenza di altri solfoarseniuri, le temperature apparenti registrate ($\leq 300^\circ\text{C}$; **Fig. 13-b**) sono da considerarsi temperature minime di equilibrio. La cobaltite non presenta variazioni composizionali significative; il rapporto As/S è prossimo all'unità (0.91–0.98, media = 0.95) e non mostra correlazioni apprezzabili con i rapporti Co/Fe/Ni.

6. Conclusioni

Dal punto di vista giaciturale le mineralizzazioni a cobaltite di Traversella si rinvencono all'interno di tactiti carbonatiche, localizzate ai margini *sud* delle masse mineralizzate a magnetite, ai livelli 860 e 826. Il rapporto spaziale con le mineralizzazioni a scheelite è invece piuttosto variabile, dato che quest'ultima “precede” gli affioramenti mineralizzati a cobaltite nel caso del margine sud 2°

Massa Ferriere al livello 860, mentre “segue” la cobaltite al margine sud della 2° Massa Ferriere al livello 826, e risulta dispersa nella 1° Massa Ferriere.

Lo studio minerografico e le analisi al SEM e alla microsonda elettronica su campioni rappresentativi hanno permesso di evidenziare delle differenze tessiturali e compositive tra le mineralizzazioni a cobaltite della 1° e 2° Massa Ferriere al livello 860.

Nel primo caso, la cobaltite si presenta generalmente in venule sub-centimetriche a ganga di talco prevalente, con quarzo, carbonati e clorite subordinati, associate a concentrazioni di magnetite con disposizione a “fiamme”, queste ultime in ganga a prevalente carbonato con biotite subordinata; molto spesso tra le vene di cobaltite e le concentrazioni di magnetite si interpone una banda millimetrica di carbonato e quarzo. La cobaltite si presenta per lo più in cristalli idiomorfi submillimetrici ad abito cubo-pentagonododecaedrico. I cristalli di cobaltite analizzati mostrano significative oscillazioni composizionali relativamente al rapporto Co/Fe e As/S. La maggior parte delle composizioni della cobaltite e arsenopirite coesistenti sono compatibili con temperature di equilibrio tra 300°C e 400°C. Una mappatura elementare di dettaglio al SEM potrebbe aiutare a definire con maggior precisione la natura delle variazioni composizionali nella cobaltite e il loro effettivo significato termometrico.

La mineralizzazione a cobaltite al margine sud della 2° Massa Ferriere al livello 860 è disseminata all'interno di una tactite carbonatica, dove forma aggregati, costituiti da individui tendenzialmente idiomorfi, talora plurimillimetrici. L'arsenopirite è quasi assente. La cobaltite mostra qui una minore variabilità composizionale, un minore contenuto medio di Fe e temperature minime di formazione $\leq 300^\circ\text{C}$.

Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento va al Gruppo Mineralogico Valchiusella di Traversella, per aver fornito numerosi campioni e per il supporto durante le visite in sottosuolo, e al Comune di Traversella per il supporto economico durante il lavoro di tesi. Si ringrazia il Museo di Storia Naturale di Milano, per aver

permesso l'utilizzo del proprio SEM. Un particolare ringraziamento va ad Alessandro Guastoni, per l'assistenza durante le operazioni di acquisizione degli spettri e delle immagini al SEM.

Bibliografia

- Barkov A.Y., Thibault Y., Laajoki K.V.O., Melezhik V.A. & Nilsson L.P. (1999) Zoning and substitutions in Co–Ni–(Fe)–PGE sulfarsenides from the Mount General'skaya layered intrusion, Artic Russia. *Can. Mineral.* 37, 127-142.
- Béziat D., Monchoux P. & Tollon F. (1996) Cobaltite–gersdorffite solid solution as a primary magmatic phase in spessartite, Lacaune area, Montagne Noire, France. *Can. Mineral.* 34, 503-512.
- Bottino G., Mastrangelo F., Natale P. & Zucchetti S. (1975) Minerali di ferro, manganese, nichelio e cobalto. Alpi Occidentali. In: Castaldo G. & Stampanoni G., Memoria Illustrativa della Carta Mineraria d'Italia, scala 1:1.000.000, Mem. Carta Geol. It., vol. XIV, pp. 6-11, Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato, Servizio Geologico d'Italia.
- Compagnoni R., Dal Piaz G.V., Hunziker J.C., Gosso G., Lombardo B. & Williams P.F. (1977) The Sesia-Lanzo Zone: a slice of continental crust, with alpine HP-LT assemblages in the Western Italian Alps. *Rend. Soc. It. Min. Petrol.* 33, 281-334.
- Dubru M., Vander Auwera J., Van Merke De Lummen G. & Verkaeren J. (1988) Distribution of scheelite in magnesian skarns at Traversella (Piemontese Alps, Italy) and Costabonne (Eastern Pyrenees, France): Nature of associated magmatism and influence of fluid composition. In: Boissonas J. & Omenetto P. (Ed.), *Mineral Deposits within the European Community*. Spec. Publ. Soc. Geol. Appl. Mineral Dep., 117-134.
- Fanlo I., Subias I., Gervilla F., Paniagua A. & Garcia B. (2004) The composition of Co–Ni–Fe sulfarsenides, diarsenides and triarsenides from the San Juan de Plan deposit, Central Pyrenees, Spain. *Can. Mineral.* 42, 1221-1240.
- Gruppo Mineralogico Valchiusella, Pagano R. & Barresi A. (2005) La miniera di Traversella: passato, presente e futuro. *Riv. Mineral. It.*, 1/2005, 8-26.
- Hem S.R. & Makovicky E. (2004a) The system Fe–Co–Ni–As–S. I. Phase relations in the (Fe,Co,Ni)As_{1.5}S_{0.5} section at 650° and 500 °C. *Can. Mineral.* 42, 43-62.
- Hem S.R. & Makovicky E. (2004b) The system Fe–Co–Ni–As–S. II. Phase relations in the (Fe,Co,Ni)As_{1.5}S_{0.5} section at 650° and 500 °C. *Can. Mineral.* 42, 63-86.
- Klemm D. (1965) Synthesen und Analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS–CoAsS–NiAsS und FeS₂–CoS₂–NiS₂. *Neues Jahrb. Mineral. Abhand.* 103, 205-255.
- Krummenacher D. & Evernden J. (1960) Détermination d'âge isotopique sur quelques roches des Alpes par la method K–Ar. *Schweiz. Miner. Petrog. Mitt.* 40, 267-277.
- Moresi M. & Quagliarella Asciano F. (1973) Cobaltite negli skarn di Torre di Rio (Isola d'Elba) - Per. *Mineral.* 42, 173-182.

- Nimis P., Zaykov V.V., Omenetto P., Melekesteva I.Yu., Tesalina S.G. & Orgeval J.J. (2008) Peculiarities of some mafic-ultramafic and ultramafic-hosted massive sulfide deposits from the Main Uralian Fault Zone, southern Urals. *Ore Geol. Rev.* 33, 49-69.
- Van Merke De Lummen G. & Vander Auwera J. (1990) Petrogenesis of Traversella diorite (Piemonte, Italy): a major trace element and isotopic (O, Sr) model. *Lithos* 24, 121-136
- Vander Auwera J. (1990) The porphyritic facies and the endoskarns of the Traversella monzodiorite: Implications for the evolution of the main intrusion (Ivrea, Italy). *Schweiz. Miner. Petrog. Mitt.* 70, 237-245.
- Vander Auwera J. & Andre L. (1991) Trace element (REE) and isotopes (O, C, Sr) to characterize the metasomatic fluid source: evidence from the skarn deposit (Fe, W, Cu) of Traversella (Ivrea, Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.* 106, 325-339.
- Vander Auwera J. & Verkaeren J. (1993) Occurrence of contrasting skarn formations in dolomites of the Traversella Deposit (Ivrea, Italy). *Geol. Rundsch.* 82, 726-740.
- Venerandi Pirri I. (1986) Polymetallic Fe, Cu, Ni, As, Sb, Pb, Zn, Ag, U, Mo, W, paragenesis in the ore deposit of Traversella (Ivrea, NW Italy). In: Carter B. et al. (Ed.) *Mineral Parageneses*. Theophrastus Publ. S. A., Ed., Athens, 159-177.
- Wagner T. & Lorenz J. (2002) Mineralogy of complex Co–Ni–Bi vein mineralization, Bieber deposit, Spessart, Germany. *Mineral. Mag.* 66, 385-407.
- Zucchetti S. (1966) Studi sul giacimento di Traversella (Torino). I corpi mineralizzati a scheelite. *Atti del Simposio Internazionale sui Giacimenti Minerari delle Alpi, Trento*, vol. 3, 939-960.