

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

Direttore Prof. sa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA TRIENNALE

IN

GEOLOGIA

**STUDIO MICROSTRUTTURALE DI ROCCE DI
FAGLIA IN CALCESCISTI (CORSICA ALPINA,
FRANCIA)**

Relatore: Prof. Giulio Di Toro

Laureando: Alberto Pirollo

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

INDICE

Abstract	
Introduzione	
• Motivazioni	pg. 1
• Risultati principali	pg. 2
1 Inquadramento geologico	
1.1 La Corsica Alpina	pg. 3
1.2 Le faglie estensionali	pg. 5
1.3 Faglia selezionata e campioni	pg. 5
2 Metodi	
2.1 Preparazione campioni	pg. 8
2.2 SEM - EDS	pg. 8
2.3 XRD	pg. 10
3 Risultati	
3.1 Risultati microstrutturali - Microscopio ottico e SEM	pg. 11
3.2 Risultati microanalisi - XRD	pg. 18
4 Discussione e Conclusioni	pg. 21
Bibliografia	
Ringraziamenti	

Abstract

We are not able to investigate most of the complex phenomena occurring during earthquake propagation by means of seismological methods, mainly because of source, path and attenuation effects that result in loss of information transported by seismic waves. At present, this limitation forces us to a complementary approach which involves field geology (e.g., investigation of ancient now exhumed seismogenic structures), microstructural (e.g., investigation of natural fault rocks) and laboratory (e.g., experiments reproducing seismic deformation conditions) studies.

In this preliminary study, we propose that, because of the eastward migration of the lithospheric extension starting from the Oligocene, the normal faults now outcropping in Alpine Corsica are the exhumed analogs of the seismogenic structures now active at depth in the Apennines. Microstructural (EDS equipped scanning electron and optical microscopes) and X-Ray powder diffraction studies conducted on fault rocks from the Corsican normal faults, evidenced a sequence of seismic and inter-seismic deformation processes during exhumation: pseudotachylyte (scars of ancient seismic ruptures) produced at 8-15 km depth are overprinted by carbonate-rich veins and eventually cut by amorphous silica-rich (silica gel ?) mirror like fault surfaces. The above overprinting microstructural relationships suggests continuous seismicity aided by the ingress of pressurized CO₂-rich fluids during exhumation. These relationships are consistent with those proposed between crustal-mantle degassing and CO₂ fault fluid ingress that characterize the actual seismicity in the Apennines.

Introduzione

Motivazioni

Nel corso degli ultimi decenni il fenomeno sismico è stato ampiamente affrontato dal punto di vista geofisico-sismologico; un'attenta e capace modellizzazione ha permesso di risolverne i problemi più basilari (localizzazione, magnitudo, legge di Gutenberg-Richter, legge di Omori, ecc.). D'altro canto, la sola sismologia non è in grado di comprendere affondo tutti i complessi fenomeni che avvengono durante un terremoto. L'interpretazione delle onde sismiche ad esempio, può essere messa a dura prova a causa dell'eventuale attenuazione delle stesse, trasformando anche il modello più complesso e preciso, in uno approssimativo contraddistinto dalla perdita di importanti informazioni (per esempio, l'evoluzione del coefficiente di attrito durante il terremoto). Causa delle limitate conoscenze, è prima di tutto l'impossibilità fisica di esplorazione diretta del fenomeno, vista la profondità di nucleazione degli stessi (in media tra 7-25 km per i terremoti crostali che provocano i danni maggiori per le attività umane). Tutto ciò comporta una incompleta comprensione dei processi chimico-fisici che avvengono durante il ciclo sismico. Per realizzare modelli più specifici, ad esempio, risulta doverosa un'adeguata caratterizzazione della geometria del piano di faglia e/o la determinazione dei diversi meccanismi di indebolimento dinamico cosismico. Efficace risulta quindi l'attività di sperimentazione per determinare l'evoluzione del coefficiente d'attrito durante lo scivolamento cosismico, come determinante risulta l'attività di campagna per lo studio dei processi già avvenuti in natura.

Questa tesi procede quindi secondo il principio *“cercare nel passato per comprendere il presente”*, in quanto si prefigge lo studio microstrutturale in senso lato di rocce di faglia campionate in una struttura estensionale presente in Corsica, che presumibilmente è stata caratterizzata da attività sismica nel passato (Oligocene). È ipotizzabile infatti che la faglia oggetto di studio, sia l'analogo esumato delle radici più profonde di una delle diverse faglie normali Appenniniche (antitetiche alle faglie estensionali a basso angolo Ovest vergenti) identificate come sorgenti sismiche recenti. Questa ipotesi è avvalorata dal presunto stesso contesto geodinamico di tipo estensionale dovuto al roll-back dello slab e alla progressiva migrazione verso Est del fronte di subduzione della placca Adria,

che ha successivamente determinato, dal Miocene in poi, l'apertura del Mar Tirreno e la formazione della catena appenninica stessa.

Risultati principali

Con questo studio preliminare è stato possibile accertare l'attività sismica della faglia normale oggetto d'indagine testimoniata dal ritrovamento di pseudotachiliti (fusi solidificati di frizione prodotti durante lo scivolamento sismico sulla superficie di faglia), presumibilmente prodotte in ambiente profondo (8-15 km). Durante l'esumazione, la zona di faglia è stata interessata dall'ingresso di fluidi da cui si sono depositate vene di carbonato che tagliano le pseudotachiliti. Alcuni di questi eventi di deposizione sono associabili ad eventi sismici in presenza di fluidi in sovrappressione. Inoltre il ritrovamento di silice quasi-amorfa nella zona di scivolamento di alcune faglie può anche essere associata al passaggio di rotture sismiche. Ulteriori studi sperimentali (anche microanalitici) correlati ad attività di campagna sono comunque necessari per avvalorare quest'ultima ipotesi.

1 - Inquadramento geologico

1.1 - *La Corsica Alpina*

La Corsica può essere suddivisa in due domini principali: la maggior parte dell'isola è caratterizzata da un basamento Ercinico formato da granitoidi (Carboniferi-Permiani), mentre la parte settentrionale-orientale è invece caratterizzata da una struttura di tipo Alpino. La formazione di quest'ultima è dovuta alla particolare evoluzione geodinamica avvenuta nel bacino del Mediterraneo centro-occidentale. Si ha infatti dal Cretaceo all'Eocene la progressiva chiusura dell'*Oceano Ligure Piemontese*, subdotto al di sotto della Placca Adria secondo un piano Sud-Est immergente (Durand-Delga et al. 1984, Fellin et al. 2005). Si forma quindi un cuneo di accrezione, e con il concludersi del processo subduttivo un margine convergente continentale collisionale. Tutto ciò ha determinato il progressivo impilamento di falde Alpine mediante thrust Ovest vergenti al di sopra del basamento pre-Alpino Ercinico e l'accatastamento delle stesse. Successivamente, dall'Eocene Superiore-Oligocene, una fase estensionale causata dal cambiamento del fronte di subduzione interessa l'area. L'*Oceano Ionico* subduce al di sotto della Placca Europea (Corsica) con una immersione verso Nord-Ovest. L'indentazione dell'Oceano a Ovest causa un progressivo roll-back dello slab e una conseguente tettonica distensiva nei pressi del blocco Sardo-Corso. Si instaura un bacino di retroarco, la rotazione antioraria del blocco stesso, e la conseguente apertura dell'*Oceano Ligure Provenzale*. Con il progressivo arretramento verso est del punto di cerniera, vengono quindi riattivate in distensione nell'Oligocene gran parte delle strutture compressive esistenti, con conseguente esumazione delle diverse unità più profonde che hanno conosciuto metamorfismo anche eclogitico. L'arretramento dello slab continua a protrarsi tutt'ora; ciò ha causato, dal Miocene in poi, lo sviluppo di una per-oceanizzazione con apertura del *Mar Tirreno* e la formazione della catena appenninica (Jolivet et al. 1998). Il carattere distensivo in Corsica si è però invertito dal Tortoniano al Messiniano (fase compressiva), ritornando poi nuovamente ad un regime estensionale dal Messiniano al Pliocene. Successivamente, una nuova fase compressiva ha interessato l'isola e sembra a tutt'oggi in atto (Fellin et al. 2005).

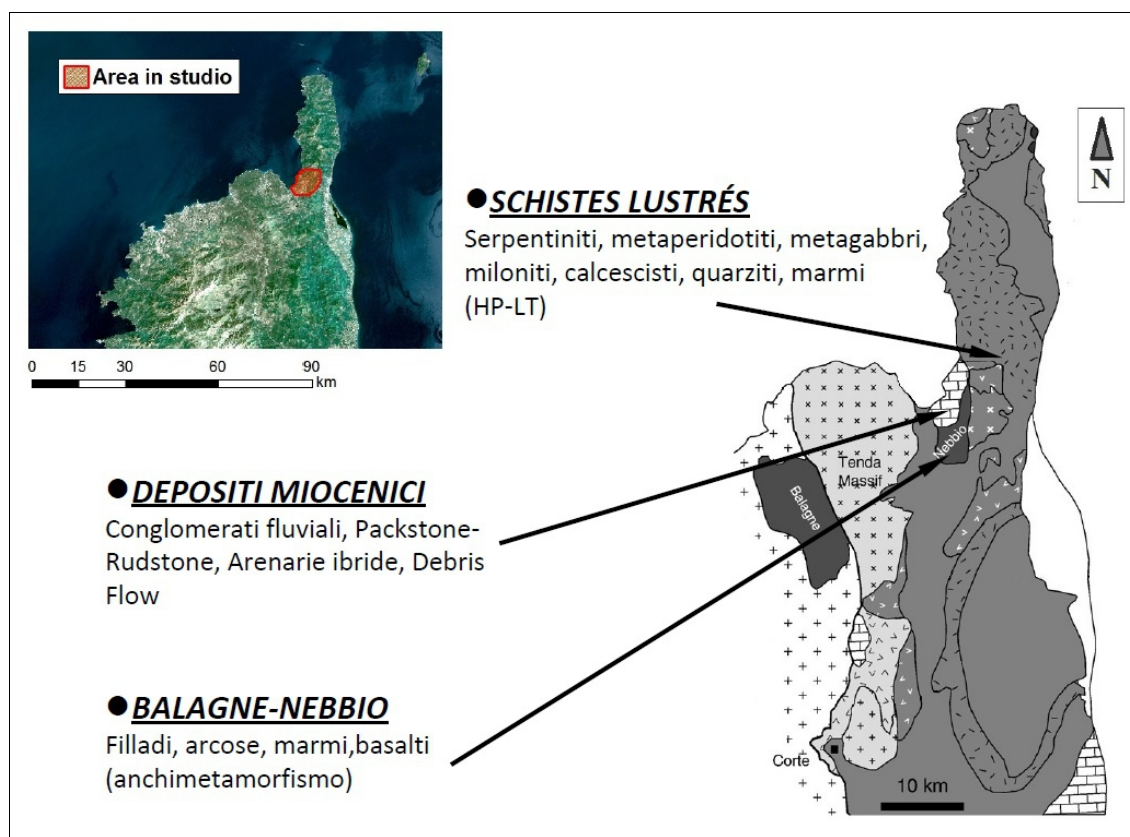


Figura 1 - Corsica Alpina - Da Fellin et. al. (2006), modificata

Le unità principali che caratterizzano l'area del golfo di *Saint Florent* sono (Figura 1):

- *Schistes Lustrés*: sono costituiti in gran parte da litosfera oceanica con relative coperture e in minor parte da brandelli di crosta continentale. Inglobati nel cuneo accrezionale, hanno subito un metamorfismo che va da facies Eclogitica a facies Scisti Blu (unità di alta pressione e bassa temperatura HP-LT). Successivamente hanno subito un'importante esumazione tettonica causa regime estensionale.
- *Unità del Nebbio*: corrisponde a rocce oceaniche Giurassiche e rocce derivate da depositi di avanarco, interessate da un quasi assente o bassissimo grado metamorfico (fino a facies Anchimetamorfica).
- *Depositi Miocenici e post-Miocenici*: Sono formati da conglomerati fluviali, Packstone-Rudstone, arenarie ibride, e debris flow depositatesi causa trasgressione marina, su contatto erosivo a partire dal Burdigaliano.

1.2 - Le faglie estensionali

Gli Schistes Lustrés (HP-LT) e l'unità del Nebbio fanno parte della pila di Falde Alpine appilate da trust Ovest vergenti durante il processo subduttivo dell'Oceano Ligure Piemontese, dove l'unità del Nebbio corrisponde alla falda più superficiale. Tutta questa fase compressiva è testimoniata dal diverso grado metamorfico riscontrato nelle unità; tuttavia la fase distensiva che nell'Eocene Superiore-Oligocene ha interessato l'area ha determinato la riattivazione in estensione delle vecchie strutture compressionali, e la formazione di una serie di faglie normali. In particolare, una grande faglia normale con trend Nord-Sud e Ovest immergente (*Figura 2*), ha portato a contatto le unità HP-LT ad Est con le unità anchimetamorfiche del Nebbio a Ovest. Entrambe soggette a esumazione, hanno comunque accumulato un rigetto verticale di almeno quattro chilometri, testimoniato dall'improvviso cambiamento di facies metamorfica tra le stesse. Altri esempi di faglie normali Est vergenti sintetiche rispetto alla grande struttura prima citata, si ritrovano nelle unità di HP-LT; ne è un esempio quella oggetto di questa tesi. Le indicazioni di faglie sinsedimentarie e le differenze negli spessori presenti nei depositi Miocenici, suggeriscono la presenza di una struttura estensionale a scala maggiore. È infatti ipotizzabile una grande faglia listrica immergente verso Est ubicata nel golfo di *Saint Florent*, che ha portato alla formazione del bacino causa il formarsi di una struttura di rollover e il conseguente collasso gravitativo di una parte dell'*hanging wall*. È quindi ipotizzabile una relazione tra la faglia listrica in parte esposta fuori dall'area di studio e le faglie normali presenti nell'area studiata; queste ultime sono antitetiche alla grande faglia listrica est-immersa e consentono l'accomodamento della deformazione fragile nel relativo blocco di tetto.

1.3 - Faglia selezionata e campioni

I campioni di rocce di faglia raccolti dal Prof. Di Toro e dal Prof. Giorgio Pennacchioni durante il campo di rilevamento del corso di laurea "*Scienze Geologiche*" (*Saint Florent, Corsica* - giungo 2013) provengono da un sistema di faglie di probabile età Oligocenica sintetiche rispetto alla grande faglia normale con direzione Nord-Sud già citata. In particolare, il sistema è caratterizzato da una fault zone che si sviluppa nei

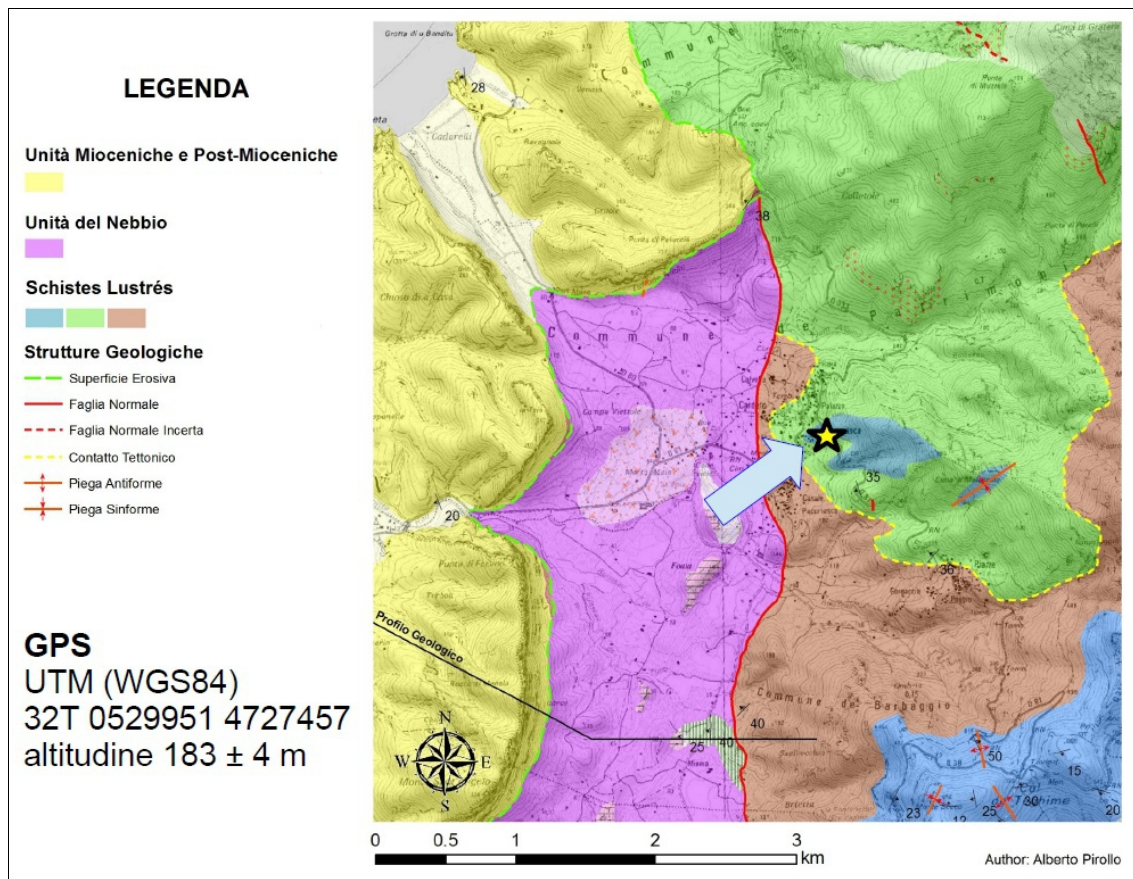


Figura 2 - Faglie estensionali e faglia oggetto di indagine

pressi della località *Santa Maria* lungo la strada che sale al *Col de Teghime* (Figura 2). L'area è caratterizzata da uno scasso stradale con direzione circa Est-Ovest dove affiorano le unità di HP-LT; sono infatti presenti diverse litologie (marmi, calcescisti, quarziti) delle unità di copertura a contatto le serpentiniti delle unità francamente oceaniche. In particolare la faglia normale studiata (Figura 3) ha piano di scivolamento principale con giacitura 60 N290 e mette a contatto calcescisti all'*hanging wall* con quarziti al *footwall*. Il rigetto non è definito, ma marker nei calcescisti indicano il senso di shear comprovandone la natura estensionale. Ben visibile risulta una porzione di specchio di faglia nerastra delle dimensioni di qualche decimetro quadrato con giacitura 75 N242; qui è stato prelevato un campione caratterizzato da una elevata porosità al di sotto della presunta superficie di scivolamento. Ulteriori campioni sono stati raccolti a ridosso dell'interfaccia principale di scivolamento. In questi campioni, la zona di

scivolamento è di colore nerastro, ha tipicamente uno spessore inferiore al mm e si osservano vene di iniezione nell'incassante: queste caratteristiche sono tipiche delle pseudotachiliti, almeno in campagna. Sono stati inoltre raccolti in campioni di entrambe le litologie dei muri di faglia e sono state campionate due vene estensionali con orientamento ca. 85 N241 all'interno delle quarziti. Infine, un campione è stato raccolto all'interno delle serpentiniti, ad una decina di metri ad Est dal punto di studio, dove si ritrovano vene estensionali che non tagliano la faglia principale e che si sviluppano secondo l'orientamento 80 N69. Per l'elenco completo dei campioni raccolti e le relative caratteristiche, fare riferimento alla tabella presente nella sezione “*Risultati microstrutturali - Microscopio ottico e SEM*” (Tabella 1, pagina 11).

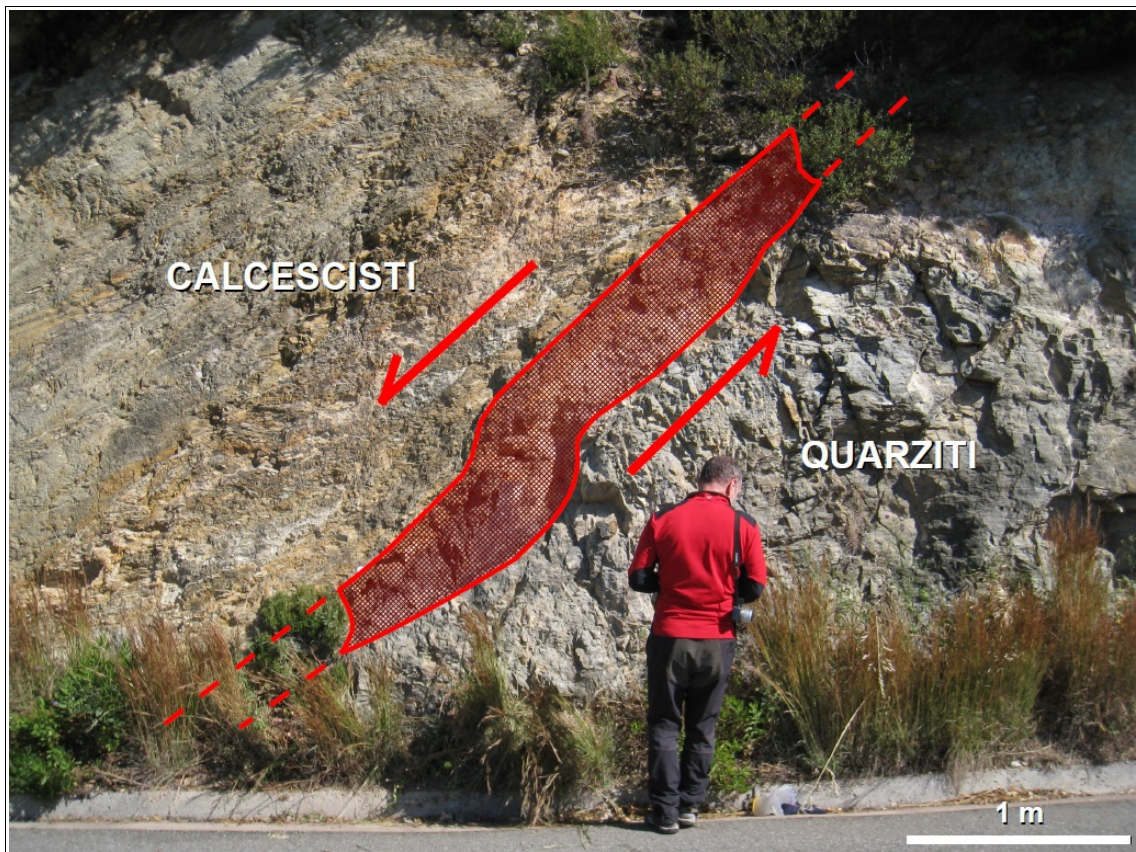


Figura 3 - Faglia normale oggetto di studio

2 - Metodi

2.1 - *Preparazione campioni*

Al fine di poter effettuare tutte le analisi necessarie, i campioni sono stati suddivisi così da consentire la produzione sia di sezioni sottili (spessore 30 μm) da studiare al microscopio ottico e al microscopio a scansione elettronica (SEM), sia di polveri da analizzare tramite diffrazione a raggi X (XRD). Nel “*Laboratorio macinazione rocce e separazione minerali*” si è provveduto alla riduzione di una parte dei campioni tramite processo di frantumazione con dispositivi manuali (pinza, mortaio, e pestello) per ottenere polveri di granulometria adatta (circa 10 μm o inferiori) che in seguito verranno distribuite su provini (in modo che i reticoli cristallini siano statisticamente orientati in tutte le direzioni) adatti allo studio diffrattometrico. Nel “*Laboratorio sezioni sottili*”, invece, si è provveduto dapprima al consolidamento di alcuni campioni tramite resina vista la loro natura più incline al disfacimento, e successivamente alla realizzazione delle sezioni sottili tagliate perpendicolarmente rispetto alla superficie del piano di scivolamento e parallelamente rispetto alla foliazione. Per permetterne lo studio anche al microscopio a scansione elettronica si è dovuto ricorrere alla metallizzazione delle stesse: le sezioni hanno subito un lavaggio con etanolo e successivamente, presso il “*Laboratorio microscopia elettronica SEM*”, sono state ricoperte con un film di carbonio tramite evaporatore automatico “*Emitech K950X*”.

2.2 - *SEM-EDS*

Le analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM) sono state eseguite presso il “*Laboratorio microscopia elettronica SEM*” attraverso l'utilizzo dello strumento in dotazione: un “*CamScan MX3000*” (Figura 4). La macchina è equipaggiata con un filamento del diametro di circa 0.1 mm di Esaboruro di Lantanio (LaB_6) posizionato su di un materiale isolante. Il filamento viene quindi riscaldato da una corrente di circa 1.79 A raggiungendo una temperatura adatta al verificarsi dell'effetto termoionico, consentendo l'emissione di elettroni (da 2 μA a 30 μA). All'interno di una colonna che opera ad elevatissima differenza di potenziale (20 kV), gli elettroni che avranno

sufficiente energia termica per superare la barriera potenziale alla superficie (work function) andranno a formare un fascio elettronico. Tramite bobine che scansionano il fascio e tramite specifici detector che raccolgono gli elettroni secondari e gli elettroni backscattered, vengono prodotte le immagini visualizzabili su degli appositi schermi. L'Esaboruro di Lantanio, adottato per diminuire il diametro del fascio di elettroni e aumentare così la risoluzione spaziale dell'immagine, ha una brillantezza almeno dieci volte superiore ad un filamento di Tungsteno (andando quindi a controbilanciare la perdita di energia causata dalla diminuzione del diametro del fascio), una più bassa work function, ma una pressione di vuoto a regime necessaria di circa 10^{-6} torr. Lo strumento ha una risoluzione di 100 nm; il massimo ingrandimento utilizzato è stato di 2202 x, ma il range medio utilizzato si attesta tra i 100 e i 1500 ingrandimenti. Le sezioni sottili oggetto dell'indagine sono state studiate rispettando una working distance che va da 21.86 mm ai 21.91 mm per la prima sezione (sezione 10a), e una working distance che va da 25.07 mm ai 25.37 mm per la seconda (sezione 10a). È stato inoltre possibile effettuare un'analisi chimica elementare dei principali minerali presenti nelle sezioni sottili grazie allo spettrometro applicato alla strumentazione; il microscopio è infatti dotato di EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Nello spettro EDS sono riportate in ascissa le energie, e in ordinata l'intensità; ogni singolo picco corrisponde ad un elemento chimico rilevato (ad esclusione degli elementi con numero atomico troppo basso).

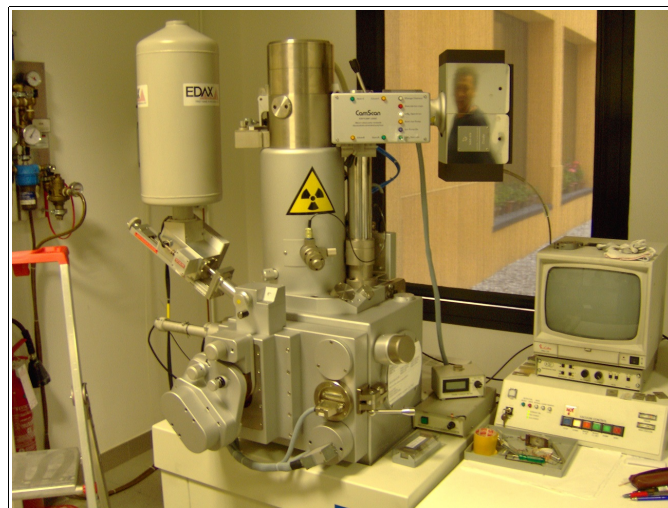


Figura 4 - SEM equipaggiato con EDS

2.3 - XRD

Le analisi delle polveri per identificare le fasi cristalline sono state eseguite presso il “Laboratorio di diffrazione a raggi X di polveri” attraverso l'utilizzo dello strumento in dotazione, ovvero un “Panalytical X'Pert Pro” (Figura 5). La macchina è basata secondo il principio: produzione raggi X, diffrazione da parte del campione, rilevamento raggi diffratti, e interpretazione dati. È infatti equipaggiata con un tubo a raggi X “Long Fine Focus” dotato di filamento in tungsteno a 40 mA e anodo in rame sottoposti ad una differenza di potenziale di 40 kV; la radiazione media generata $k\alpha$ è pari a 1.5418 Å. Il diffrattometro presenta una geometria parafocalizzante Bragg-Brentano con goniometro verticale theta-theta e raggio goniometrico di 240 mm, dove la rotazione del campione avviene tramite spinner. Le ottiche sono rappresentate da fenditure divergente da $1/2^\circ$, fenditura antiscatter da 1° e fenditure Soller da 0.04 radianti; mentre il rivelatore allo stato solido è del tipo “RTMS, X'Celerator”. Possiede inoltre un filtro al nichel per schermare ed abbattere la $k\beta$ generata. Tutte le indagini sono state condotte nel range angolare tra 3 e 70° di 2θ , con un tempo di conteggio pari a 100s e incremento di 0.017° 2θ di passo per step. L'interpretazione qualitativa dei diffrattogrammi è stata condotta con il software “Panalytical High Score Plus” e le banche dati utilizzate sono la “PDF-2” (Powder Diffraction file) di ICDD (The International Center for Diffraction Data), e la “ICSD” (Inorganic Crystal Structure Database) per le strutture.

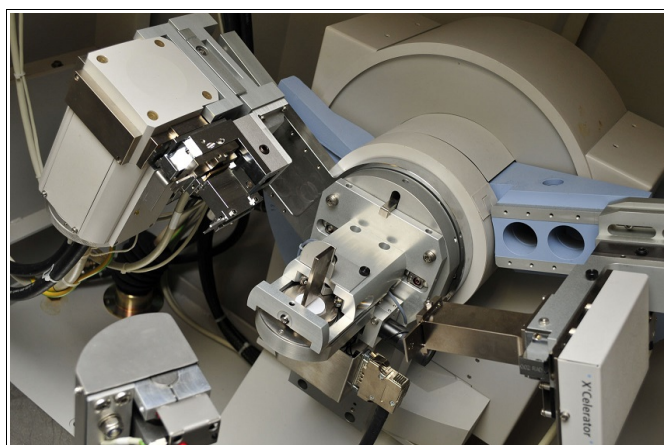


Figura 5 - Diffrattometro “X'Pert Pro”

3 - Risultati

3.1 - Risultati microstrutturali - Microscopio ottico e SEM

La tabella sottostante (*Tabella 1*) riassume le varie sezioni sottili prodotte e le loro principali peculiarità. Di queste, solo la *10a* e la *11b* sono state esaminate tramite SEM. Al microscopio ottico è stato possibile apprezzare in diverse sezioni la presenza di pseudotachilite relitte e abbondanti vene di carbonati. Silice pseudoamorfa (vedi “*risultati microanalisi*”) è stata riscontrata sulla superficie di scivolamento.

N° CAMPIONE	CARATTERISTICHE CAMPIONE	MICROSCOPIO OTTICO	SEM - EDS
8	Piano di scivolamento e vena	Sezione	-
9	Vena estensionale in serpentiniti	Sezione	-
9b		Sezione	-
10a	Frammenti di pseudotachilite	Sezione	Effettuato
10b		Sezione	-
11a1	Porzione foliata con vena (hanging wall)	2 Sezioni	-
11a2	Porzione non foliata con vena (footwall)	Sezione	-
11b	Specchio di faglia	Sezione	Effettuato
12	Vena estensionale in quarziti	Sezione	-

Tabella 1 - Campioni e indagini effettuate



Figura 6 - Campione 11b

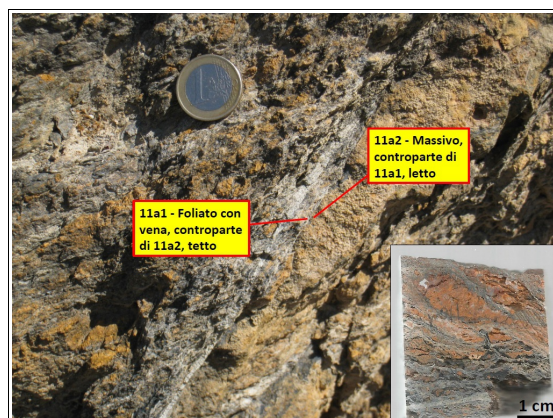


Figura 7 - Campione 11a1

La sezione *11b* è ricavata dal campione relativo alla porzione affiorante nerastra delle dimensioni di qualche decimetro quadrato (*Figura 6*) riconducibile allo specchio di faglia. La roccia ospitante consiste in una quarzite micacea con livelli a dolomite (la roccia ha conosciuto un metamorfismo di alta pressione e bassa temperatura, almeno in facies scisti blu); l'estinzione ondulata presente nella maggior parte dei cristalli di quarzo ben sviluppati è indice di plasticità cristallina (dislocation glide). L'analisi a microscopio ottico (*Figura 8*) ha permesso di suddividere la sezione in tre distinte zone, ognuna delle quali presenta peculiarità differenti in base alla distanza dalla superficie di slip. A ridosso della superficie di scivolamento si sviluppa una zona scura indistinguibile al microscopio a luce trasmessa dello spessore che va dai pochi micrometri al millimetro. Più distale si sviluppa una zona altamente porosa dello spessore di circa 20 mm composta da quarzo e mica; la foliazione visibile è dettata proprio da quest'ultima, e le plaghe corrispondenti alla porosità ne seguono la direzione mimandone pure la forma.

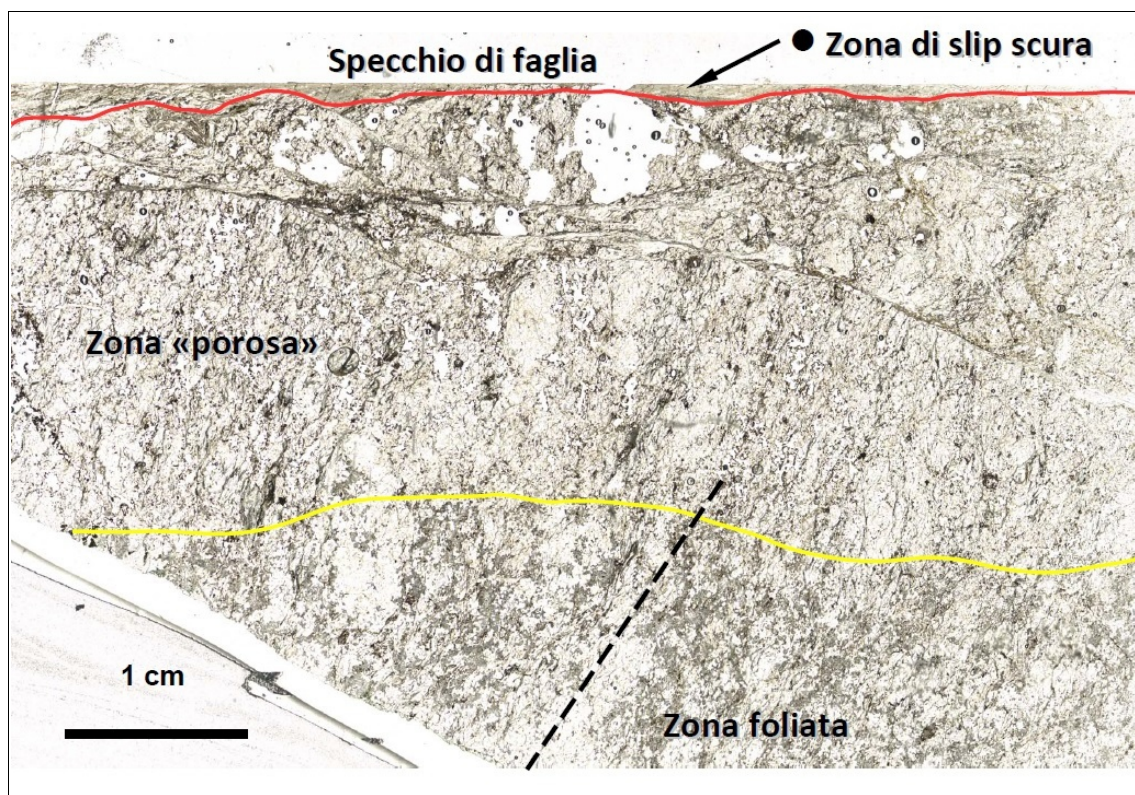


Figura 8 - Sezione 11b - Nicol Paralleli

All'interno di questa porzione, è presente inoltre una sorta di superficie di taglio a circa 5-6 mm dalla zona precedente all'interno della quale si sviluppa una sorta di aggregato di quarzo micro - criptocristallino, e dove al di sopra della stessa, l'abito della mica risulta essere più minuto rispetto alla porzione sottostante. La terza zona, che ipoteticamente rappresenta la roccia madre, si distingue per la presenza della dolomite (analisi EDS-SEM) che gradualmente va a sostituire la porosità. L'indagine SEM rivela come i grain boundaries della dolomite diventino sempre più irregolari avvicinandosi alla superficie di slip.

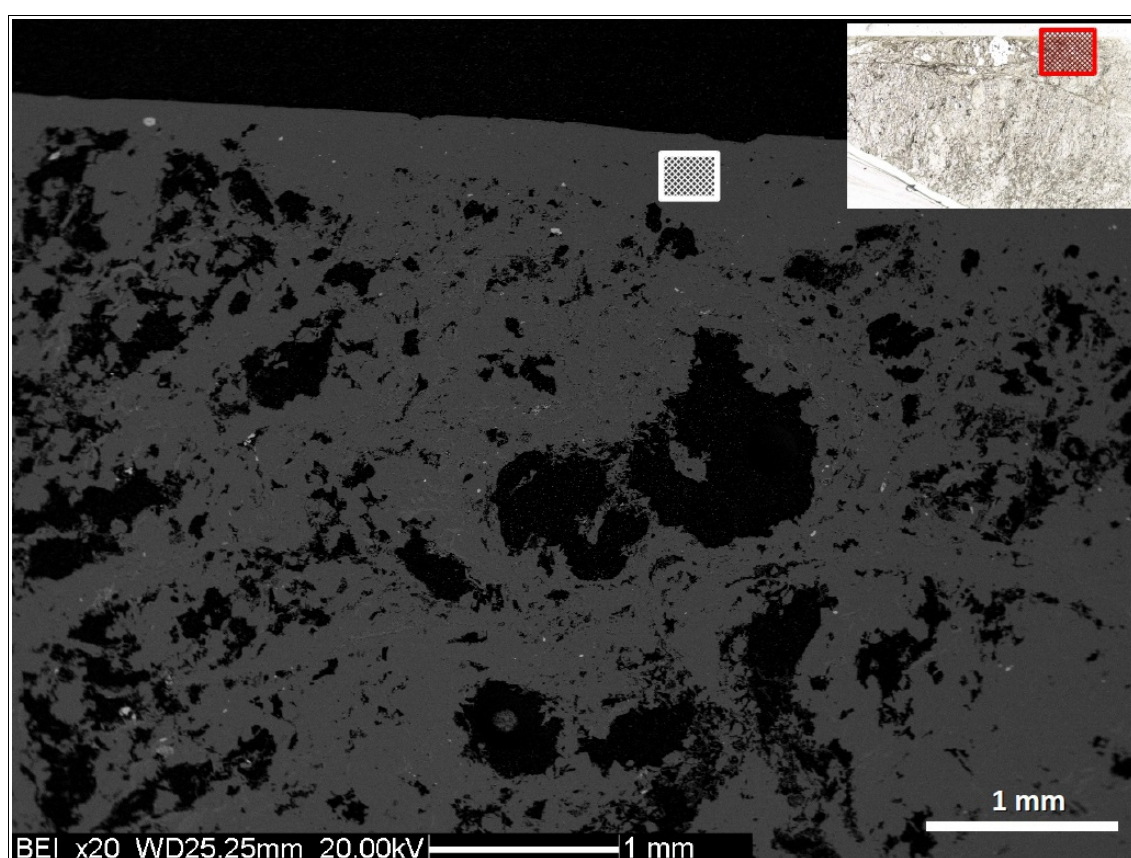


Figura 9 - Superficie di scivolamento, immagine SEM

Di particolare interesse risulta proprio la zona più vicina alla superficie di scivolamento; l'immagine SEM (*Figura 10*) (ingrandimento relativo alla porzione bianca tratteggiata di *Figura 9*) rivela come questa consista in una matrice uniforme di silice (analisi EDS-SEM) e ipotizzabile come pseudoamorfa (vedi “risultati microanalisi”).

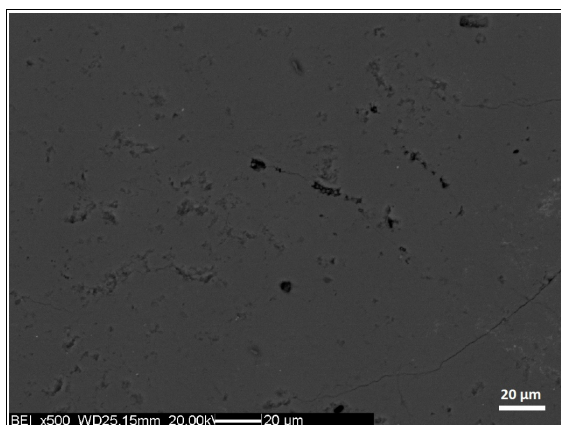


Figura 10 - Matrice uniforme

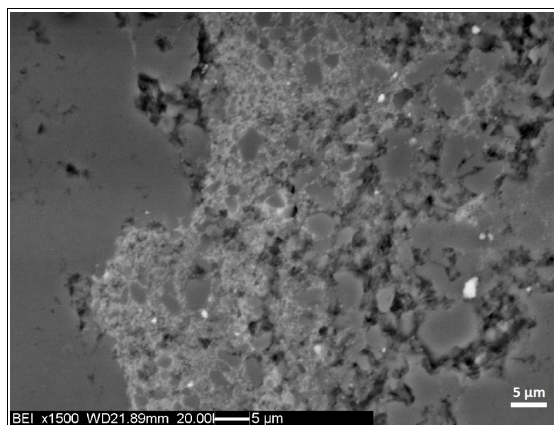


Figura 11 - Possibile pseudotachilite

All'interno della matrice silicatica risultano sospesi anche alcuni clasti di minerali opachi quali ossidi di ferro (EDS-SEM) che presentano una sorta di bordo di reazione. Ossidi simili e aggregati policristallini della stessa composizione sono comunque rilevati in tutta la sezione, anche a diversi cm dalla zona di scivolamento.

Pseudotachiliti relitte sono state riscontrate in diverse sezioni. L'indagine SEM (*Figura 11*) eseguita sulla sezione relativa al campione *10a* evidenzia nella zona di taglio quella che sembra una sorta di ultracataclasite formata da una matrice chiara e a clasti, anche arrotondati, sospesi. Tuttavia nonostante non abbia strutture evidenti (ad esempio non presenta strutture di iniezione), può essere ipotizzata come pseudotachilite in base ai dati globali raccolti. Infatti, più significative e apprezzabili risultano le sezioni *8*, *10b*, *11a1*, *11a2* dove l'indagine al microscopio ottico ha rivelato la presenza di pseudotachiliti relitte troncate da vene di carbonati. In particolare, in una delle sezioni *11a1* (*Figura 7*, *Figura 12*) è ben visibile una sorta di apofisi relitta semi-obliterata da vene di carbonato precipitate da fluidi in sovrappressione. Nella parte più sommitale della stessa è possibile riconoscere porzioni “vetrose” di pseudotachilite con all'interno i caratteristici clasti sospesi arrotondati e le tipiche strutture fluidali, evidenziate nell'immagine con delle linee rosse (*Figura 13*). A contatto con la parte superiore destra dell'apofisi si riscontra un aggregato di quarzo microcristallino (*Figura 14*) con tipiche strutture da cristallizzazione dinamica (bulging recrystallization ?).

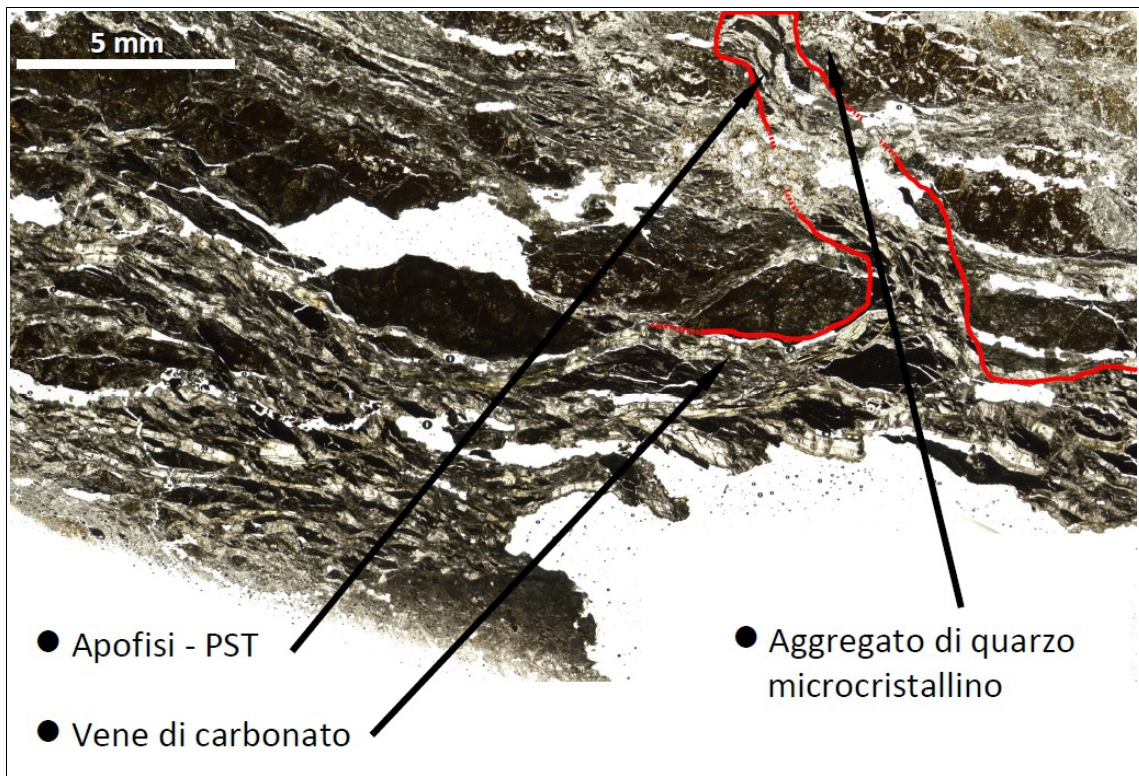


Figura 12 - Sezione 11a1 - Nicol Paralleli

In generale, la presenza di microstrutture quali tipo bulging recrystallization associate a cataclasi nelle quarziti, suggerisce temperature attorno ai 200-250° C.

Il complesso sistema di vene di carbonati (*Figura 15*) ha causato la frantumazione dell'originale pseudotachilite e denota una storia deformativa associata all'esumazione della zona di faglia: porzioni che probabilmente erano contraddistinte da una foliazione tipo S-C sono state smembrate lungo le superfici “scistosité” isolando così porzioni a forma di losanga tipo mica-fish. L'azione di questi fluidi in sovrappressione è sicuramente successiva alla fase contraddistinta dalle pseudotachiliti e suggerisce una progressiva diminuzione del carico litostatico nel tempo indicando quindi sia un aumento della permeabilità della faglia che l'esumazione della struttura. Vene a coccarda sono osservate nelle sezioni 9, 9b, 12 dove sono ben visibili strutture di crescita indice di un'apertura graduale, probabilmente asismica (*Figura 16*). Geodi di calcedonio (silice) che suturano le vene di carbonato in sezione 12 suggeriscono un cambio della composizione dei fluidi circolanti nelle fasi più tardive dell'esumazione.

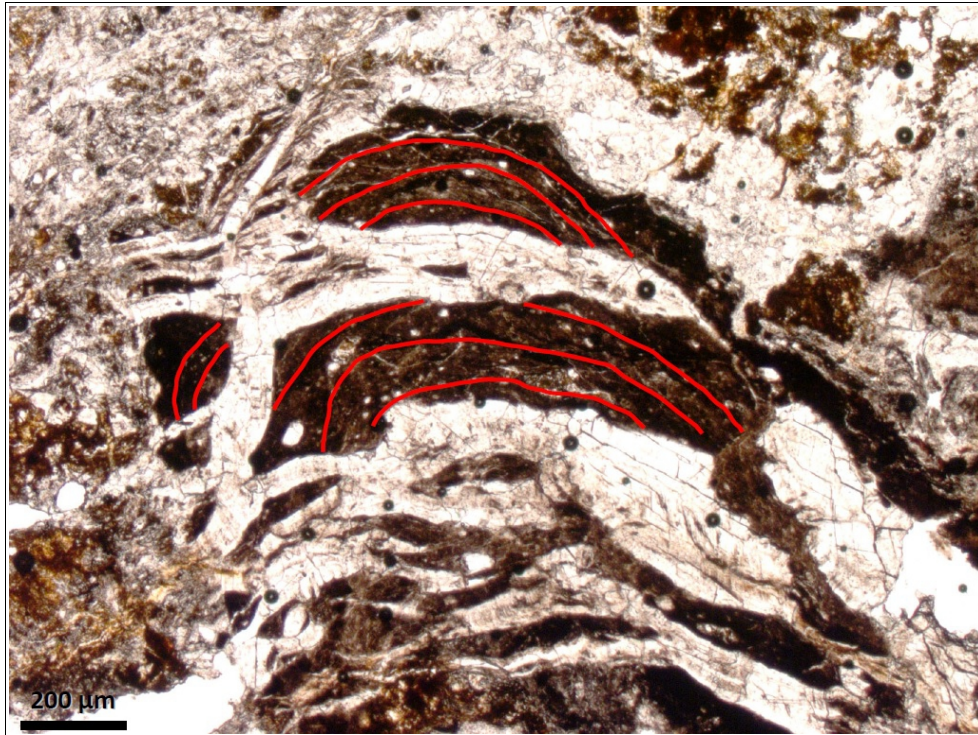


Figura 13 - Strutture fluidali in pseudotachilite relitta - Nicol Paralleli

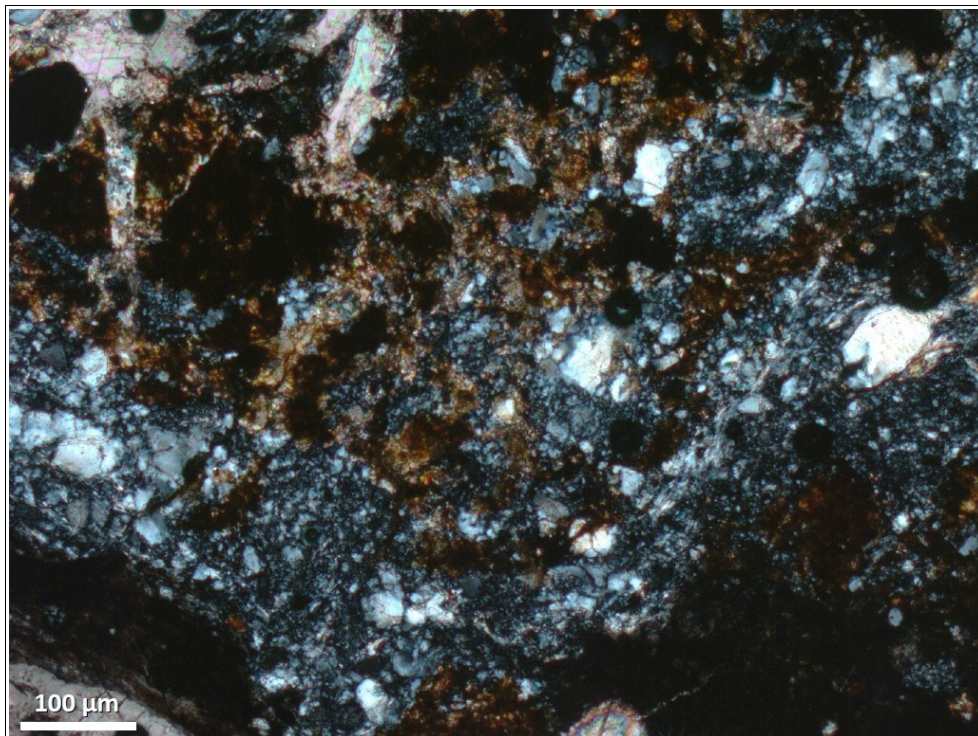


Figura 14 - Aggregato microcristallino di quarzo - Nicol incrociati

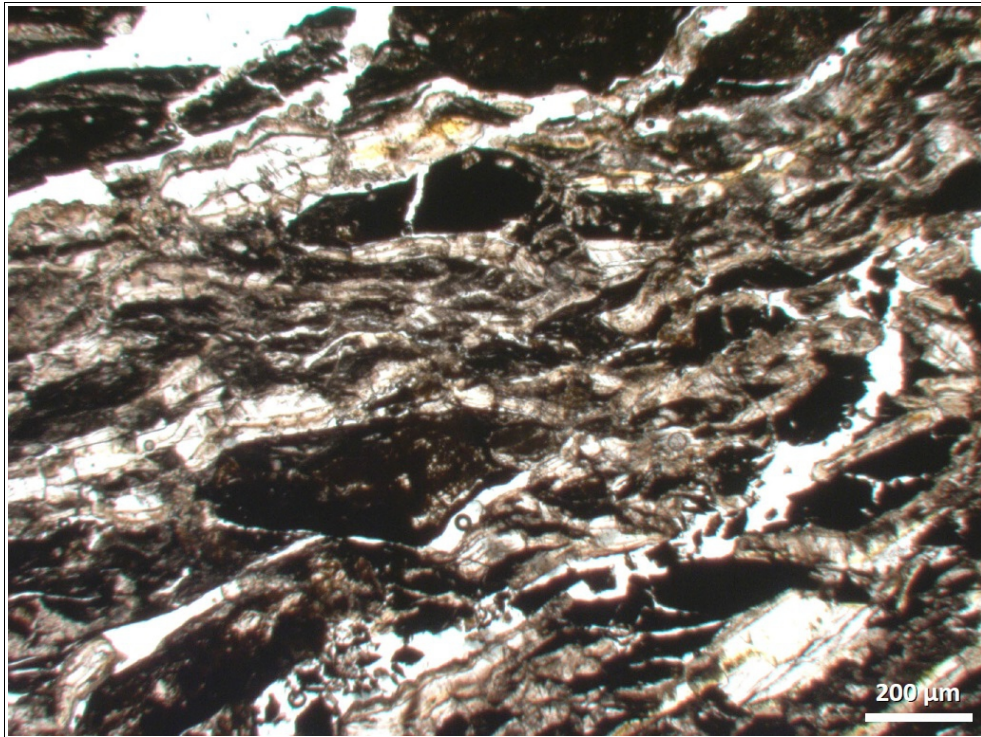


Figura 15 - Pseudotachilite troncata da vene - Nicol Paralleli

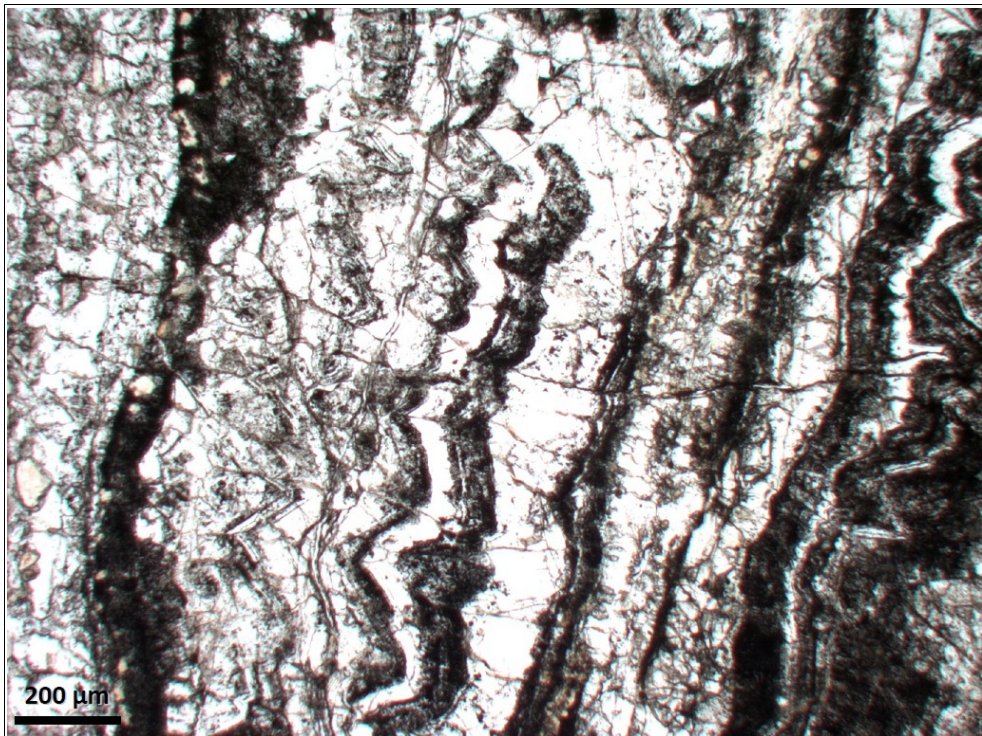


Figura 16 - Vene di crescita - Nicol Paralleli

3.2 - Risultati microanalisi - XRD

Lo studio eseguito tramite diffrazione a raggi X ha permesso un'indagine di tipo qualitativo, garantendo la distinzione tra le varie fasi mineralogiche presenti in ogni campione e sua frazione. Tuttavia si è provveduto ugualmente ad eseguire una stima quantitativa (errore 2-5%), per determinare la percentuale di minerale presente grazie all'interpretazione dei diffrattogrammi. Risulta comunque necessaria un'indagine quantitativa più rigorosa (impiego di standard interni, ecc.) per determinare con maggior precisione la proporzione tra le fasi presenti.

Qui a seguito (*Tabella 2*) vengono elencati i campioni, eventualmente suddivisi in frazioni, e le fasi minerali caratteristiche che li compongono.

N°	FRAZIONE	CARATTERE FRAZIONE	XRD
8	8-Massivo	Specchio di faglia	Caolinite (abbondante), quarzo, svambergite (fosfato-solfato idrato di Al e Sr)
	8-Gray	Foliazione grigiastra	Quarzo (prevalente), calcite, calcite magnesiacca, caolinite, mica (muscovite)
	8-Whitish	Concrezione biancastra	Calcite (34%), calcite magnesiacca (23%), mica chiara (22%), caolinite (12%), quarzo (9%), smectite (tracce)
	8-Brown	Porzione marrone	Calcite, calcite magnesiacca, quarzo, caolinite, mica chiara, smectite (tracce)
9	9-Green	Porzione verdastra	Dolomite, quarzo (in minima quantità)
	9-White	Porzione biancastra	Dolomite, quarzo (tracce)
10b	10b-Gray	Foliazione grigiastra	Calcite (30%), quarzo (26%), calcite magnesiacca (21%), caolinite (18%), mica (5%)
	10b-White	Porzione biancastra	Calcite, calcite magnesiacca, quarzo, caolinite, mica
12	12	Porzione di vena	Quarzo, dolomite, mica (muscovite, phengite), caolinite (tacce)

Tabella 2 - Frazioni di campione e risultati microanalisi

Dai dati raccolti si può constatare come i campioni 8 e 10b abbiano una composizione abbastanza simile; in entrambi, i componenti principali sono dati da calcite, calcite magnesiacca, quarzo, caolinite, e mica. Il rapporto pressoché costante tra i diversi carbonati nelle varie frazioni, conferma che la presenza degli stessi è intrinseca alla

roccia. La presenza di caolinite, abbondante in alcune porzioni, potrebbe essere dovuta alla destabilizzazione della mica, la quale invece risulta aumentare nelle frazioni di campione più distali dalla zona di scivolamento. Il campione *8-Massivo* denota come la superficie di slip sia contraddistinta dalla totale assenza di carbonati, mentre la presenza di svambergite (fosfato associato all'alterazione tipica nei suoli) è da ritenersi come una probabile contaminazione. Più importante risulta il confronto tra la larghezza di picco (FWHM) relativa al quarzo registrata nei diffrattogrammi delle diverse frazioni (*Figura 17*). Si riscontra infatti una larghezza maggiore nei campioni relativi alla superficie di scivolamento (esempio lampante la frazione *8-Massivo*) rispetto a quella relativa al picco normale del quarzo di vena estensionale presente nel campione *12*. L'allargamento è generalmente legato alla dimensione media dei cristalliti (inferiori a $1\ \mu\text{m}$) o alla presenza di microstrain. Fenomeni di overgrinding (macinazione eccessiva) possono essere scartati considerata l'applicazione della stessa procedura nella preparazione dei campioni. È quindi ipotizzabile l'effettiva presenza di silice pseudoamorfa sulla superficie di scivolamento.

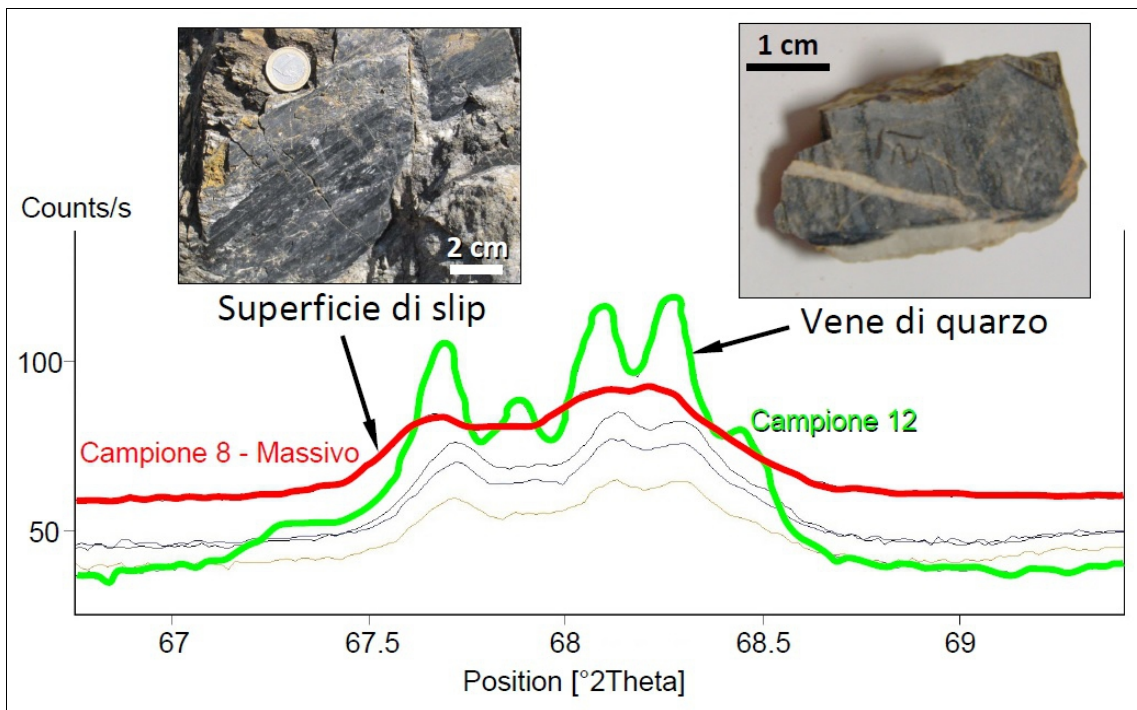


Figura 17 - Diffrattogrammi, confronto picchi del quarzo

4 - Discussione e Conclusioni

L'ipotesi di lavoro della tesi era che la faglia oggetto di indagine, fosse l'analogo esumato delle strutture sismogenetiche più profonde delle faglie normali Appenniniche (antitetiche alle faglie estensionali a basso angolo Ovest vergenti) identificate come sorgenti sismiche recenti. Questo studio preliminare ha accertato l'antica (probabilmente Oligocenica) attività sismica della faglia studiata, testimoniata dal ritrovamento di pseudotachiliti relitte nelle varie sezioni. Questa fase deformativa, contraddistinta da pochi fluidi, può essere ricondotta ad un ambiente relativamente profondo (10-15 km ?) durante la fase estensionale che ha interessato l'area. Con il procedere dell'esumazione della struttura viene invece registrato l'ingresso di fluidi carbonatici in pressione, comprovata dall'abbondante quantità di vene di carbonato che vanno a troncare le pseudotachiliti relitte precedenti. Sono presenti inoltre vene di crescita che confermano la progressiva fase estensionale e di probabile ambiente di minor profondità. Superfici a specchio nere composte da silice troncano le vene ricche di carbonato. L'allargamento di picco (FWHM) riscontrato nel quarzo relativo ai diffrattogrammi delle diverse frazioni, e la composizione uniforme della silice nella *sezione 11b* (immagine BSE-SEM e analisi EDS-SEM), permettono di ipotizzare la presenza di silice pseudoamorfa sulla superficie e nella sottile zona di scivolamento. La silice pseudoamorfa può essere dovuta all'ingresso di fluidi tardivi ricchi in silice durante gli ultimi stadi dell'esumazione (vedasi anche le geodi che suturano le fratture beanti nelle vene di carbonato); il basso grado di cristallinità del quarzo potrebbe essere dovuto alla formazione di gel di silice. Esperimenti preposti alla determinazione dell'evoluzione del coefficiente d'attrito durante lo scivolamento cosismico in rocce ricche di quarzo hanno infatti prodotto gel di silice (Di Toro et al., 2004). Se la presenza di silice pseudoamorfa corrispondesse ad un evento cosismico, essa potrebbe essere associata ad attività sismica durante le fasi finali di attività della faglia. Ulteriori studi sperimentali e microanalitici correlati ad attività di campagna sono comunque necessari per avvalorare quest'ultima ipotesi.

Bibliografia

André Niemeijer, Giulio Di Toro, W. Ashley Griffith, Andrea Bistacchi, Steven A. F. Smith, Stefan Nielsen (2012) *Inferring earthquake physics and chemistry using an integrated field and laboratory approach*. Journal of Structural Geology 39, 2 - 36

Cees W. Passchier, Rudolph A. J. Trouw (2005) *Microtectonics - 2nd, Revised and Enlarged Edition*. Springer

Giulio Di Toro, David L. Goldsby & Terry E. Tullis (January 2004) *Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates*. Nature, Vol. 427, 436 - 439

Giulio Di Toro, Silvia Mittempergher, Fabio Ferri, Thomas M. Mitchell, Giorgio Pennacchioni (2012) *The contribution of structural geology, experimental rock deformation and numerical modelling to an improved understanding of the seismic cycle Preface to the Special Volume "Physico-chemical processes in seismic faults"*. Journal of Structural Geology 38, 3 - 10

Fellin, M. G., V. Picotti, and M. Zattin (2005) *Neogene to Quaternary rifting and inversion in Corsica: Retreat and collision in the western Mediterranean*. Tectonics, 24, TC1011, doi:10.1029/2003TC001613

J.D. Kirkpatrick, C.D. Rowe, J.C. White and E.E. Brodsky (2013) *Silica gel formation during fault slip: Evidence from the rock record*. Geology, GSA, www.gsapubs.org, Data Repository item 2013283, doi:10.1130/G34483.1

Laurent Jolivet, Claudio Faccenna, Bruno Goffé, Massimo Mattei, Federico Rossetti, Christophe Brunet, Fabrizio Storti, Renato Funicello, Jean Paul Cadet, Nicola d'Agostino and Teddy Parra (June 1998) *Midcrustal shear zones in postorogenic extension: Example from the northern Tyrrhenian Sea*. Journal Of Geophysical Research, Vol. 103, No. B6, Pages 12,123 - 12,160

M. Giuditta Fellin, Joseph A. Vance, John I. Garver, Massimiliano Zattin (2006) *The thermal evolution of Corsica as recorded by zircon fission-tracks* Tectonophysics 421, 299 - 317

Nao Hayashi and Akito Tsutsumi (2010) *Deformation textures and mechanical behavior of a hydrated amorphous silica formed along an experimentally produced fault in chert*. Geophysical Research Letters, Vol. 37, L12305, doi:10.1029/2010GL042943

Yu Nakamura, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama, Ichiko Shimizu, Takashi Miura and Ichiro Arakawa (2012) *Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces*. Geophysical Research Letters, Vol. 39, L21303, doi:10.1029/2012GL053228

Ringraziamenti

Per prima cosa, voglio ringraziare la mia famiglia più stretta: un grazie per i sacrifici fatti e per tutti gli insegnamenti, diretti e indiretti, ricevuti in questi lunghi anni. Gratitudine va inoltre, anche, a tutti i parenti materni.

Ringrazio i pochi, ma veri amici, in particolare il Sarto... Chitarrista di fiducia!

Ringrazio i colleghi che mi hanno accompagnato in questi tre anni di università, e tutti quei professori di geologia che son riusciti ad alimentare le nostre passioni. In particolare ringrazio il Professor Di Toro e il Professor Pennacchioni: il primo per l'enorme disponibilità dimostrata e le ottenute soddisfazioni, il secondo per i consigli dati e le importanti lezioni. Un grazie va pure ai tecnici, altrimenti... niente campioni.

In fine, ringrazio tutte le svariate persone "chiave" incontrate nel corso della mia vita, chi per soli cinque minuti... chi per anni.

Kia Ora !!!