

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Scienze della Terra

Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN

GEOLOGIA

**STUDIO SULL'ORIENTAZIONE PREFERENZIALE DEGLI  
ASSI C DEL RETICOLO CRISTALLINO DEL QUARZO IN  
UNA MILONITE GRANULITICA DELLA CALABRIA.**

**STUDY OF THE QUARTZ C-AXIS PREFERRED ORIENTATION IN A  
GRANULITE FACIES MYLONITE OF THE CALABRIA BASAMENT.**

*Relatore: Prof. Richard Spiess*

*Laureando: Roberta Carluccio*

ANNO ACCADEMICO 2012 / 2013



# Indice

<b>ABSTRACT</b>	pg. 5
<b>INTRODUZIONE</b>	pg. 7
<b>1. CAPITOLO 1: INQUADRAMENTO GEOLOGICO</b>	
1.1 Inquadramento geologico generale	pg. 9
1.2 Composizione della crosta	pg. 11
1.3 Assetto geodinamico	pg. 12
1.4 Evoluzione p,T,t dalla letteratura	pg. 13
<b>2. CAPITOLO 2: METODOLOGIE ANALITICHE</b>	
2.1 Metodo di analisi	pg. 15
2.2 Le orientazioni cristallografiche preferenziali	pg. 16
<b>3. CAPITOLO 3: LAVORO SVOLTO</b>	
3.1 Descrizione del campione	pg. 17
3.2 Microstrutture	pg. 19
3.2.1 Senso di shear	pg. 20
3.3 Analisi EBSD	pg. 23
<b>CONCLUSIONE</b>	pg. 29
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	pg. 31



## **ABSTRACT**

This study will focus on a granulite mylonite from the Amaroni Shear Zone in the Serre Massif within the Calabria-Peloritani-terrain arc.

The mylonite appears to be structurally and geometrically linked to the main Alpine thrust contact: the Curinga-Girifalco Line, which separates the basement units from those that underwent an Alpine overprint.

The researcher's aim is to identify the mylonitic shear zone.

In particular, to understand if the mylonite was subject to high temperature conditions during granulite facies metamorphism in the Variscan orogeny, or whether it formed at lower temperatures associated with amphibolite to greenschist facies metamorphism during the Alpine orogeny.

These uncertainties regarding emplacement conditions can be deduced quickly and effectively by studying the rock's microstructures, specifically the crystallographic preferred orientation of the minerals (CPO).

The analysis of the quartz microlattice structure, using the EBSD technique and analysis of kinematic indicators, will allow us to deduce the correct P-T-t conditions operating during the mylonite's formation.

From the experimental data, we assert that the mylonite formed during high temperature conditions pertaining to granulite facies metamorphism. The conditions necessary for the development and evolution of a high grade metamorphic environment were active during the extension and isothermal uplift phase, which is characteristic of the Calabria-Peloritani-terrain arc earlier than 300 Ma, but not after 252 Ma. After this time, it is known that temperatures were below the conditions necessary for granulite facies metamorphism.

La metapelite granulitica studiata in questo lavoro di tesi, proviene da una zona di taglio situata ad Amaroni nel massiccio delle Serre, appartiene all'arco dei terreni Calabro Peloritani.

La milonite analizzata, sembra strutturalmente e geometricamente legata al limite del principale contatto di thrust alpino: la Linea di Curinga ó Girifalco, che separa le sezioni delle unità di basamento non soggette a una sovraimpronta alpina da quelle che invece l'hanno subita.

Lo scopo della ricerca è l'identificazione della zona di shear milonitica, da cui proviene il campione.

Nello specifico, vogliamo capire se la roccia studiata si è formata in condizioni di alta temperatura, pertinenti la facies granulitica (quindi durante il Varisico), o se invece si è formata a temperature più basse, relative alla facies anfibolitica e scisti verdi (e perciò durante l'alpino).

L'unico modo per ottenere in tempi brevi informazioni sulla temperatura e sul contesto temporale di formazione del campione, è lo studio delle microstrutture, in particolare l'analisi della CPO (crystallographic-preferred orientation).

Lo studio della microstruttura cristallina del quarzo, mediante l'utilizzo della tecnica EBSD e degli indicatori cinematici, ha permesso di ricavare le informazioni necessarie all'identificazione del campione in esame.

Dai risultati emersi dal lavoro sperimentale, possiamo affermare che la roccia in esame appartiene a un contesto di alta temperatura, pertinente la facies granulitica.

Le condizioni necessarie allo sviluppo e all'evoluzione dell'ambiente di alto grado metamorfico, sono state attive durante la fase di estensione e di sollevamento isotermico che ha caratterizzato l'arco dei terreni Calabro Peloritani 300 milioni di anni fa, o successivamente, ma comunque non più tardi di 252 Ma, perché allora le temperature nel basamento profondo erano oramai scese sotto le condizioni della facies granulitica (Schenk, e al.).

## INTRODUZIONE

La metapelite granulitica studiata in questo lavoro di tesi, proviene da una zona di taglio situata ad Amaroni nel massiccio delle Serre, localizzata nell'arco dei terreni Calabro Peloritani.

Sulla base delle evidenze raccolte in campagna la milonite analizzata, sembra essere strutturalmente e geometricamente legata al limite del principale contatto di thrust alpino: la Linea di Curinga ó Girifalco (Fig. 1b). Questo contatto tettonico è comparato da Schenk (1981) alla Linea Insubrica delle Alpi, poiché separa le sezioni delle unità di basamento non soggette a una sovrainpronta alpina da quelle che invece l'hanno subita.

Inoltre, la sezione della crosta delle Serre è famosa per essere uno dei rari posti nel mondo dov'è ancora possibile osservare una quasi completa sezione della crosta continentale ercinica. L'asumazione di questa successione di layers metamorfici è stata possibile grazie all'azione della tettonica alpino-appenninica che tramite il meccanismo dello slab-break-off della litosfera oceanica dell'Oceano Ionico, ha provocato la migrazione SE e il sollevamento del basamento pre-mesozoico del complesso Calabro.

La porzione della crosta tardo varisica, esposta nel massiccio delle Serre, è di ca. 23 km di spessore. Schenk (1980) la descrive come composta dalle seguenti tre unità:

(i) una prima unità di crosta profonda pertinente la facies granulitica e anfibolitica; (ii) una seconda sequenza di granitoidi intrusi; (iii) una successione di filladi e paragneiss di facies anfibolitica o scisti verdi, a livello crostale superiore.

Schenk (1984) divide la crosta profonda in due unità litostratigrafiche: un'unità mafica a granulite piroclasite estesa al fondo della sequenza e un'unità superiore felsica metapelitica.

Acquafredda (2006, 2008), ha suggerito valori di picco p-T di 1100 MPa a 900 °C per la parte inferiore della crosta profonda e 800 MPa a 700 °C per la porzione sovrastante.

Il picco di metamorfismo è successivo alla fase collisionale dell'orogenesi ercinica, ed è coevo alla fase di estensione e uplift tardo varisica.

La fase di decompressione isoterma coincide con la messa in posto dei corpi granitoidi intrusi tra i 295 e i 310 Ma. Secondo Schenk, alla fase relativamente veloce di decompressione isoterma, ha fatto seguito quella più lenta di raffreddamento isobarico durata quasi 250 Ma. Fino a quando, 30-25 milioni di anni fa, la tettonica recente ha arrecato una rapida esumazione finale all'antica crosta sepolta.

Il lavoro di tesi si propone l'obiettivo di studiare la zona di shear milonitico.

Nello specifico, vogliamo capire se la roccia studiata si è formata in condizioni di alta temperatura pertinenti la facies granulitica (quindi durante il Varisico), o se invece si è formata a temperature più basse coinvolgenti la facies anfibolitica e scisti verdi (e perciò durante l'alpino).

Per ottenere informazioni a tal riguardo si è proceduto con l'analisi delle microstrutture mediante l'impiego del microscopio a scansione elettronica (SEM) utilizzando la tecnica EBSD (electron backscatter diffraction).

Con quest'analisi è stata investigata l'orientazione cristallografica preferenziale (CPO) del quarzo nella milonite.

È possibile usare la CPO del quarzo per identificare la temperatura di deformazione, perché sappiamo dalla letteratura (Passchier and Trouw, 1996) che nel quarzo a diverse temperature si attivano differenti sistemi di slip. Nel nostro caso specifico si tratta di riconoscere se il principale sistema di slip attivo durante la formazione della milonite era il sistema  $\langle c \rangle \{1-100\}$ , oppure i sistemi di slip di più bassa temperatura come il  $\langle a \rangle \{1-100\}$  e il  $\langle a \rangle \{1-101\}$  o addirittura il  $\langle a \rangle (0001)$ .

## CAPITOLO 1-INQUADRAMENTO GEOLOGICO.

### 1.1-Inquadramento geologico generale.

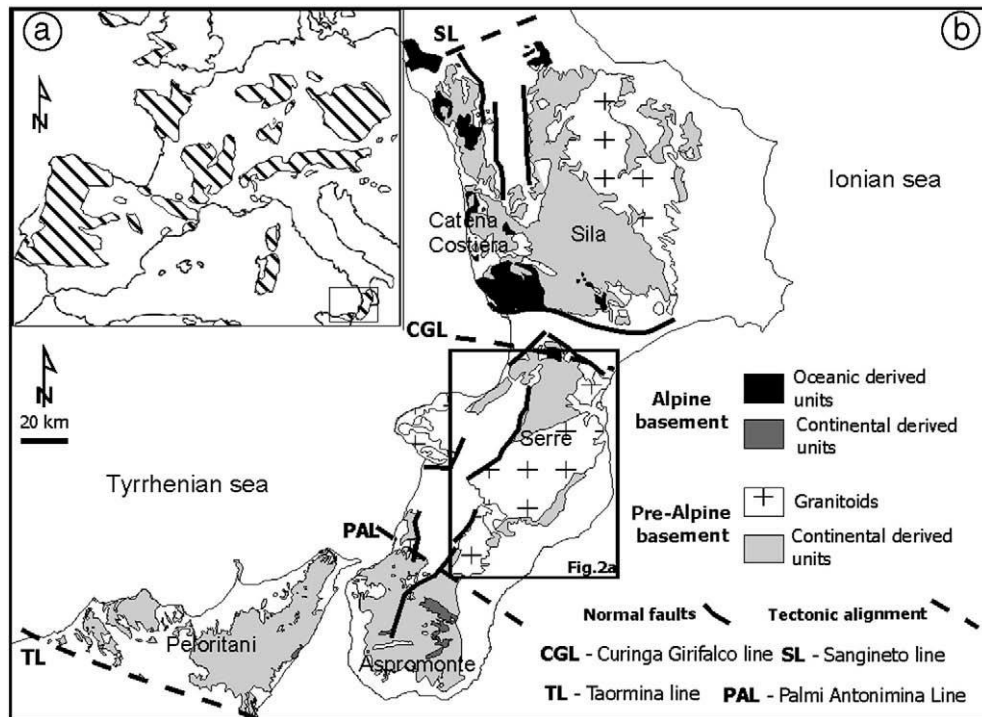


Fig. 1.1(a)- Distribuzione del basamento pre-alpino in Europa. (b)-Distribuzione delle rocce del basamento alpino e pre-alpino (ercinico o pre-ercinico) nei terreni Calabro-Peloritani e allineamenti tettonici principali. (Fonte G. Angì e al.)

I terreni Calabro Peloritani sono simili alle rimanenze delle altre catene meridionali occidentali europee (Fig. 1a) perché espongono i resti della crosta dell'antico basamento pre-mesozoico.

Questi complessi montuosi sono il risultato dei processi orogenetici Paleozoici e della successiva tettonica alpino-appenninica responsabile di aver impresso da una leggera a una pervasiva sovraimpronta metamorfica.

Il campione di roccia analizzato proviene dalla località di Amaroni (CZ), situata nel massiccio delle Serre della Calabria.

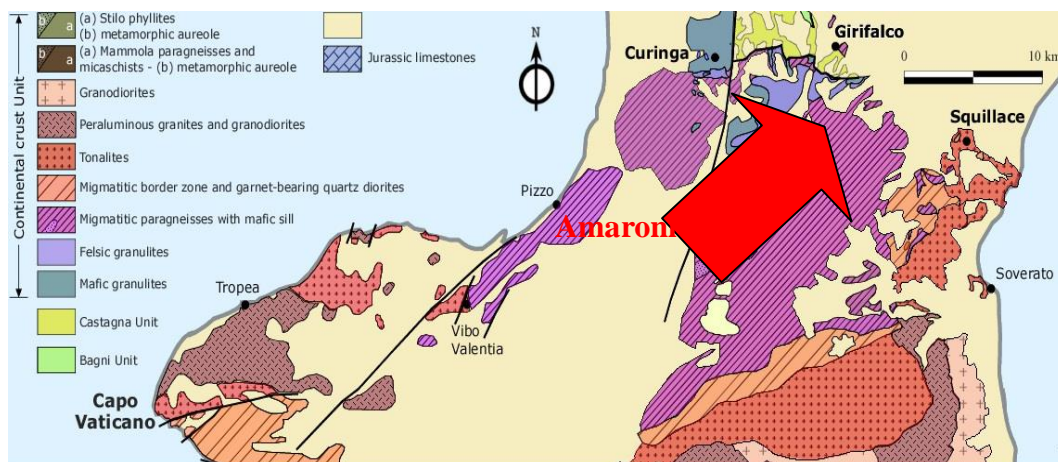


Fig. 1.2- Cartina geologica del massiccio delle Serre di Caggianelli e al., 2013. La freccia rossa indica la località di Amaroni dalla quale è stato prelevato il campione in prossimità della Linea di Curinga ó Girifalco (in nero).

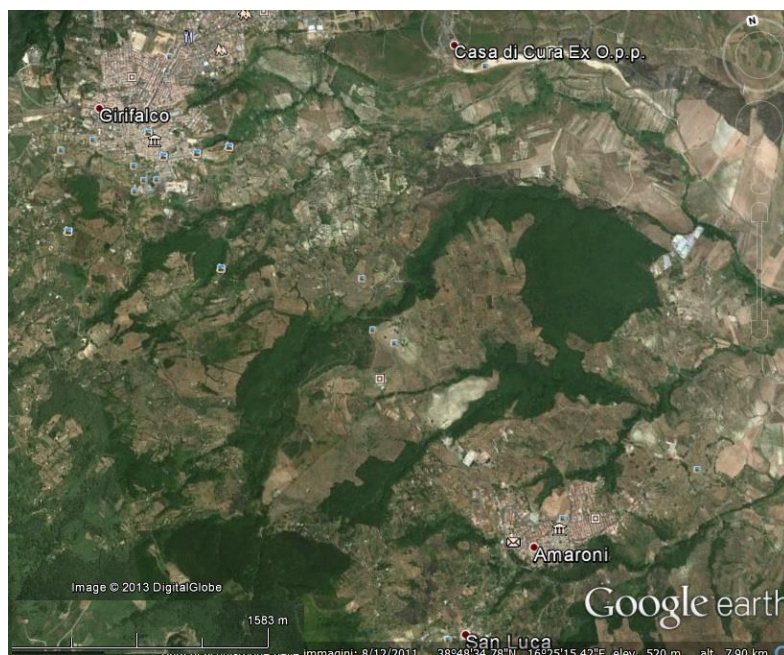
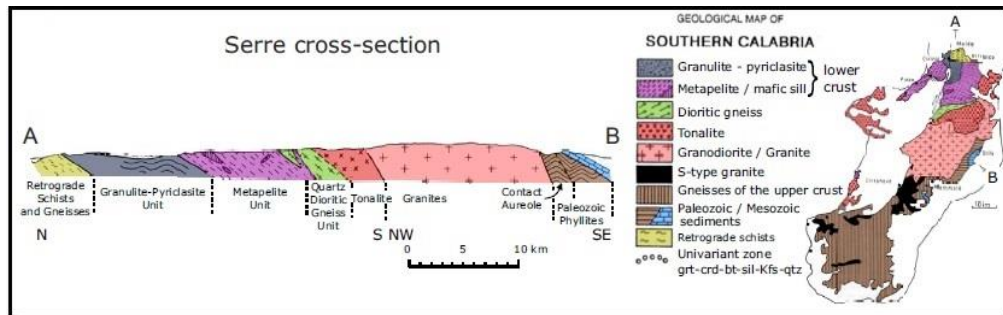


Fig. 1.3- La milonite studiata appartiene a una zona di taglio situata ad Amaroni poco distante da Girifalco.

## 1.2- Composizione della crosta

Il massiccio delle Serre è uno dei rari posti del mondo dov'è ancora possibile osservare una quasi completa sezione della crosta tiltata ercinica.



*Fig. 1.2.1- Dal profilo delle Serre orientato N-S, NW-SE, di Caggianelli e al. (2013), si vedono susseguirsi le unità della crosta profonda costituite da granuliti acide e mafiche, paragneiss migmatitici e una zona di bordo caratterizzata da migmatiti e quarzo dioriti; la crosta intermedia composta da tonaliti, quarzo-dioriti, graniti e grano-dioriti; la crosta superiore con sequenze di micascisti, paragneiss, filladi e ardesie, per ultime le coperture sedimentarie da giurassiche a mesozoiche. La successione della crosta manifesta un trend generale d'immersione di 40° SE.*

La porzione della crosta tardo varisica, esposta nel complesso montuoso delle Serre, è di ca. 23 km di spessore. Schenk (1980) la descrive composta dalle seguenti tre unità:

(i) una prima unità di crosta profonda pertinente la facies granulitica e anfibolitica, che si estende per pressappoco 7-8 km; (ii) una seconda sequenza di granitoidi intrusi per 10 km a livello crostale intermedio; (iii) una successione di filladi e paragneiss di facies anfibolitica o scisti verdi, a livello crostale superiore.

Schenk (1984) divide la crosta profonda in due unità litostratigrafiche: un'unità mafica a granulite piroclaste estesa per ca. 2-3 km e localizzata al fondo della sequenza e un'unità superiore felsica metapelitica sviluppata per ca. 5-6 km di spessore.

L'unità metapelitica consiste di metapeliti migmatitiche intervallate da metagrovacche, marmi e metabasiti.

L'associazione mineralogica più frequente di quest'unità è quella a biotite-sillimanite, plagioclasio, quarzo, granato, cordierite, K-feldspato e ilmenite o rutilo. Meno comuni in occorrenza sono staurolite, cianite, andalusite, muscovite e spinello (Acquafredda e al. 2006).

Questa successione metamorfica insieme all'unità granulite-piroclasite immerge costantemente a SE con un angolo approssimativo di 40°.

L'immersione verso SE è dovuta al tilting della crosta durante l'estensione e sollevamento (uplift) della regione calabra, come conseguenza dello slab-break-off alpino-appenninico (dai 30 Ma ai 5 Ma).

### 1.3-Assetto geodinamico.

Il processo che porta alla nascita del supercontinente soprannominato Pangea inizia durante il Devoniano-Carbonifero con la subduzione della crosta a litosfera oceanica dell'oceano Iapetus sotto la crosta del continente Laurussia. La fase collisionale tra questa placca e quella appartenente al mega-continente Gondwana raggiunge l'apice durante il Carbonifero medio.

Successivamente, 300 milioni di anni fa, si imposta una fase estensionale, che conduce a un periodo di decompressione.

Durante la fase distensiva è avvenuta la messa in posto di grandi intrusioni magmatiche granitoidi a livello crostale intermedio (320-280 Ma).

Alla fine del Permiano (ca. 252 Ma), possiamo considerare conclusa l'orogenesi ercinica e avviato il processo di estensione mesozoica, accompagnata da un ulteriore raffreddamento della crosta profonda varisica.

Nel Paleogene-Miogene seguono due fasi di estensione e sollevamento tettonico:

- (i) la prima contemporanea all'incorporazione della Calabria all'interno della catena alpino-appenninica (30-14 Ma) che determina localmente una sovraimpronta metamorfica da facies anfibolitica a facies degli scisti verdi/blu;
- (ii) la seconda, durante l'evoluzione del bacino meridionale e occidentale del Mediterraneo (14-0Ma) che porta, tramite la rottura e l'arretramento della placca

SE, la creazione e l'assetto attuale del complesso appenninico e dell'arco Calabro. L'azione di quest'ultima tettonica è responsabile dell'esumazione e del tilting della crosta profonda dei terreni Calabro Peloritani.

L'evoluzione geodinamica sopra descritta si riflette nel percorso pressione temperatura tempo (p-T-t) registrato dal basamento del massiccio delle Serre (Fig. 1.4.1).

#### 1.4- Evoluzione termo-barometrica-oraria dalla letteratura.

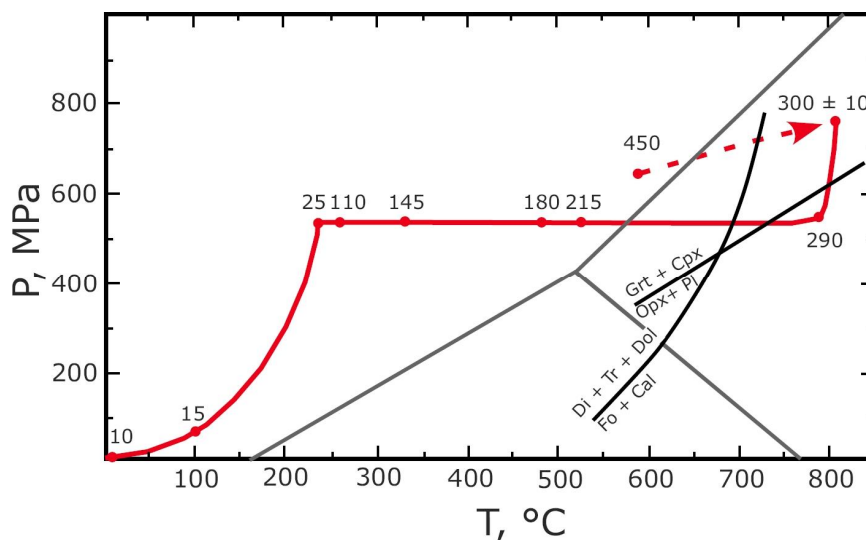


Fig. 1.4.1-Evoluzione dei livelli crostali profondi secondo la traiettoria di  $p, T$  e  $t$  redatta da Schenk (1989).

Schenk (1984, 1989), individua il picco metamorfico della facies granulitica alla pressione di 750 MPa e alla temperatura di 800°C per i livelli crostali più profondi, e 550 MPa a 690 °C per la porzione intermedia.

Acquafredda e al. (2006, 2008) ha riesaminato i dati e ha suggerito valori di picco p-T di 1100 MPa a 900 °C per la parte inferiore della crosta profonda e 800 MPa a 700 °C per la porzione sovrastante.

Il picco di metamorfismo è successivo alla fase d'ispessimento crostale (Devoniano-Carbonifero) ed è coevo alla fase di estensione e uplift.

La fase di decompressione isoterma coincide con la messa in posto dei corpi granitoidi avvenuta in un intervallo di tempo di 5-10 Ma. In queste condizioni la

crosta profonda ha subito fusione parziale e le metapeliti più profonde sono state interessate da tale processo con un grado di fusione del 50-60%.

Secondo Schenk, alla fase relativamente veloce di decompressione isoterma, ha fatto seguito quella più lenta di raffreddamento isobarico durata quasi 250 Ma. Fino a quando, 25 milioni di anni fa la tettonica recente ha arrecato una rapida esumazione finale all'antica crosta sepolta.

## CAPITOLO 2 ó METODOLOGIE ANALITICHE

### 2.1-Metodo di analisi

Le orientazioni preferenziali degli assi c del quarzo sono state studiate utilizzando il microscopio elettronico a scansione (SEM) con la tecnica EBSD (electron backscatter diffraction).

Il principio dell'analisi si basa sull'interazione tra un fascio multidirezionale di elettroni e il reticolo cristallino del campione. Quando gli elettroni del raggio incidente colpiscono il reticolo cristallino molti di loro subiscono diffrazione. Gli elettroni retrodiffusi (backscatterdö) sono captati dal rivelatore e danno luogo alla visualizzazione di un'immagine della diffrazione sullo schermo di fosforo.

Uno schema completo di rappresentazione delle CPO è fornito come punti in un diagramma tridimensionale: diagramma della funzione della distribuzione delle orientazioni preferenziali dei cristalli.

Esso è visualizzato come stereogramma (o figura polare) e può mostrare qualsiasi direzione cristallografica.

La CPO nella figura polare appare come massimo di punti (colori accessi) e come minimo punti (colore blu), come mostrato in Fig.3.3.1, oppure è visualizzato dalla distribuzione dei punti lungo cerchi di minimi, i cosiddetti "girdles" di Fig.3.3.4.

L'electron backscatter diffraction analysis (EBSD) permette la misurazione dell'orientazione cristallografica di cristalli delle dimensioni anche inferiori a 1µm, nonché il calcolo della mis-orientazione cristallografica tra due analisi adiacenti.

Questo tipo di tecnologia è molto importante perché permette lo studio dei meccanismi di deformazione, l'identificazione dei sistemi di slip, e pertanto la quantificazione empirica delle temperature alle quali le deformazioni avvengono.

## 2.2-Le orientazioni cristallografiche preferenziali (CPO)

Il processo di deformazione intracristallina duttile coinvolge tutti quei cristalli che non si deformano mediante rottura fragile ma, tramite il coinvolgimento dei difetti reticolati (difetti puntuali e lineari) come motori della deformazione duttile. Poiché le dislocazioni si muovono solo lungo piani reticolari specifici, un importante effetto della deformazione intracristallina duttile è lo sviluppo di un'orientazione cristallografica preferenziale.

Le CPO descrivono le caratteristiche delle orientazioni cristallografiche preferenziali di una specie mineralogica presente in un numero di granuli statisticamente significativo in una roccia metamorfica.

Una CPO si sviluppa per i meccanismi deformativi operanti durante i processi di ricristallizzazione dinamica. La forza motrice è l'energia deformativa immagazzinata nei minerali sotto forma di diverse configurazioni di dislocazioni e sistemi di slip.

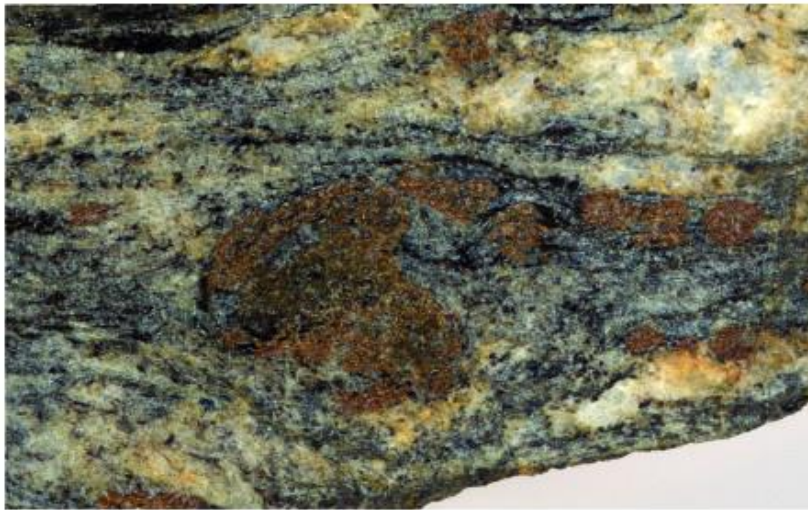
Attraverso il lavoro sperimentale è possibile associare a specifiche CPO i meccanismi fisici che sono alla base della loro formazione: il sistema di slip operativo, il tipo di finite strain e la traiettoria dello strain.

## CAPITOLO 3 - LAVORO SVOLTO

### 3.1- Descrizione macroscopica

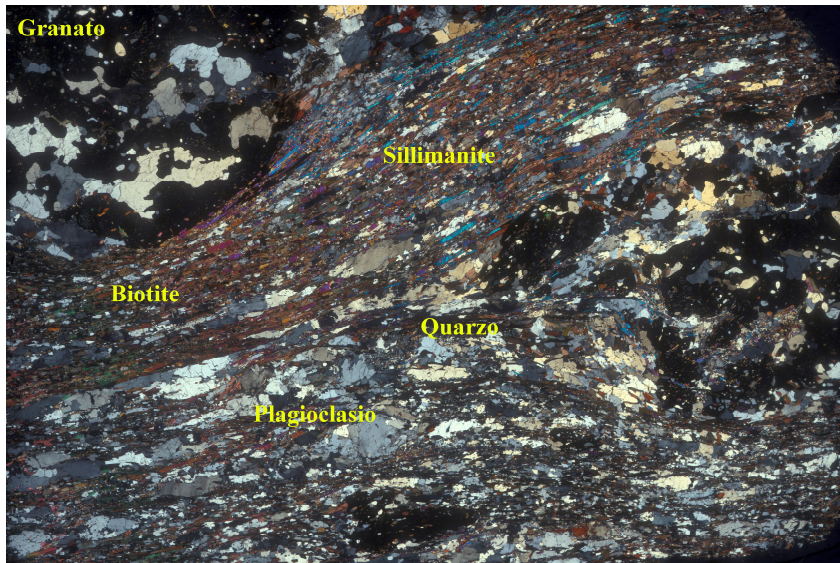
La sezione analizzata proviene dal massiccio delle Serre della Calabria, nello specifico da una zona di taglio localizzata ad Amaroni che si trova in prossimità della Linea di Girifalco.

Lo scopo della mia tesi è di capire se la milonite da me studiata, si è formata in condizioni di alta temperatura (quindi durante il Varisico) o se invece si è formata a temperature più basse (e perciò durante l'alpino).



*La Fig.3.1.1- Mostra il paragneiss migmatitico milonitizzato dal quale è stato prelevato il campione.*

La roccia in questione è un paragneiss migmatitico milonitizzato e nella Fig. 3.1.1 sono evidenti i letti scuri a biotite, sillimanite e granato che costituiscono la restite mentre il leucosoma è quarzoso e feldspatico.



*Fig.3.1.2- La sezione sottile mostra la granulite acida milonitizzata studiata, composta da granato, feldspato, biotite, sillimanite e quarzo.*

Si tratta di un paraderivato, una metapelite.

Durante il metamorfismo Varisico la metapelite ha raggiunto condizioni pertinenti la facies granulitica cioè condizioni di alto grado di metamorfico.

Le rocce possono conservare memoria dei processi e dei meccanismi di trasformazione subiti durante la loro lunga storia evolutiva.

Ad esempio, la presenza di sillimanite indica l'esistenza di condizioni metamorfiche di medio-alto grado e la presenza di questo minerale in uno gneiss migmatitico suggerisce metamorfismo in facies granulitica.

Per questo motivo si è proceduto con un'analisi più penetrativa, a livello microscopico verificando se il campione si è generato in condizioni di alto grado metamorfico corrispondenti all'orogenesi ercinica, o è pertinente alla facies anfibolitica-scisti verdi legata alla tettonica alpina.

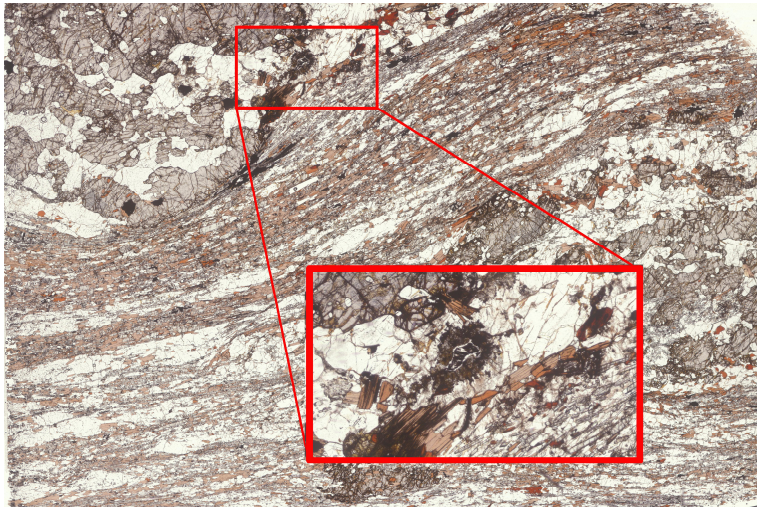
### 3.2.-Microstrutture

Ci troviamo di fronte a una milonite caratterizzata da un'intensa foliazione con i minerali allineati come visibile dalla Fig. 3.1.2 ottenuta in microscopia ottica a nicols incrociati.

La struttura è porfiroblastica, con grandi cristalli di granato e cristalli di K-feldspato, immersi in una matrice a grana fine di quarzo, plagioclasio, sillimanite e biotite.

Nella sezione sottile si possono osservare le inclusioni principalmente di quarzo all'interno dei granati (di Fig.3.1.2).

Sono visibili anche corone su granato costituite da aggregati di fibrolite e biotite, che riflettono una condizione di riequilibrio delle fasi dopo il picco di metamorfismo (Fig.3.2.1).



*Fig.3.2.1-Corone su granato*

### 3.2.1-Senso di shear

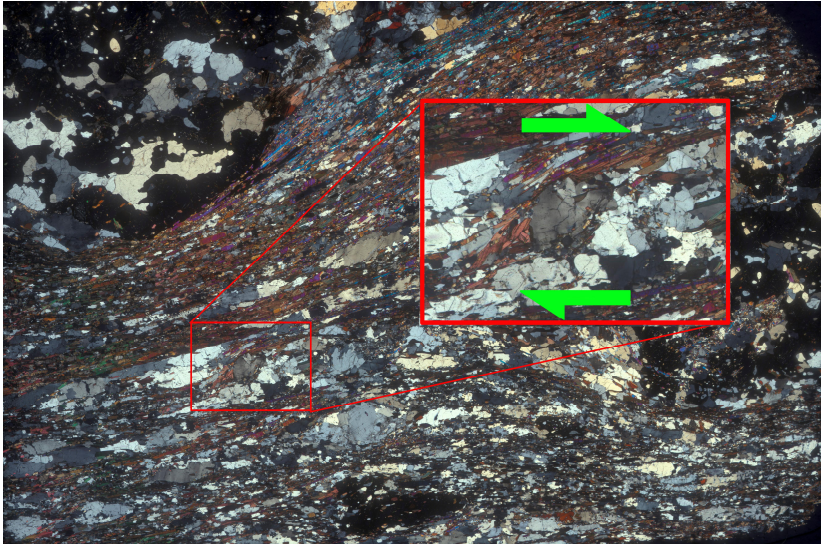


Fig.3.2.1-Ombre di deformazione asimmetrica indicano un senso di shear destro.

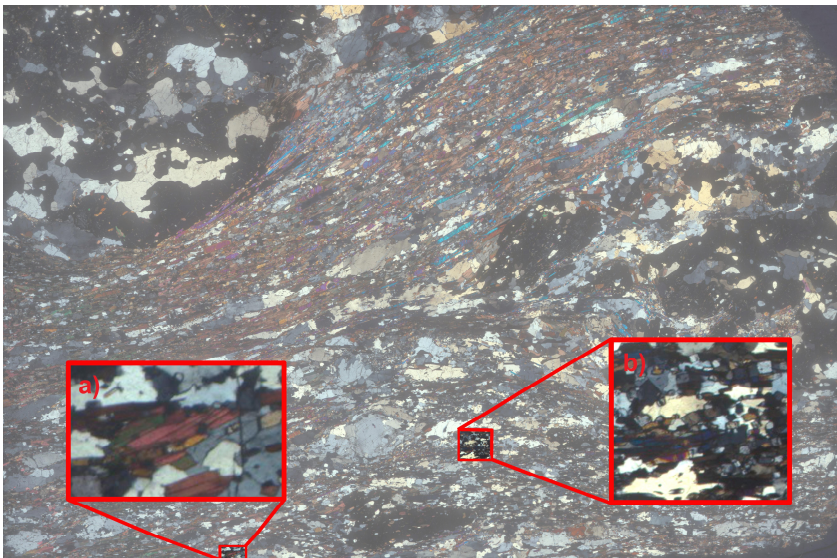


Fig. Fig. 3.2- a) Foliazione obliqua di biotite mostra un senso di shear destro.

b) Foliazione obliqua costituita da sillimanite, quarzo e plagioclasio.

Le foliazioni oblique si formano per deformazione passiva e rotazione dei grani in un regime di simple shear. Questo tipo di foliazione forma un angolo di circa  $20^\circ$  rispetto al fabric attractor (ossia la direzione di shear). L'angolo che la foliazione forma dipende dallo shear strain.

Infine, il senso di shear destro è anche determinabile dal confronto tra la figura polare ottenuta dalle analisi EBSD (Fig.3.3.1) e la figura rappresentante le CPO degli assi c del quarzo in deformazione progressiva da simple shear destro (Fig. 3.3.2).



### 3.3- Analisi EBSD

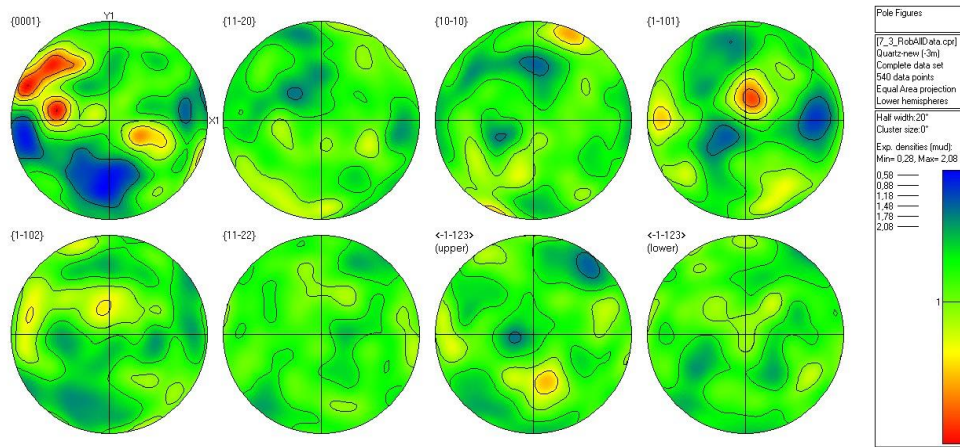


Fig.3.3.1- Figure polari basate su 540 dati analitici di quarzo. La foliazione è tracciata dalla direzione E-W, la lineazione è suborizzontale e anch'essa orientata E-W.

La massima densità di punti analitici è espressa con il colore rosso, quella minima in blu; il  $\sigma$ contouringö è basato su un cono di contaggio con apertura angolare di 20°.

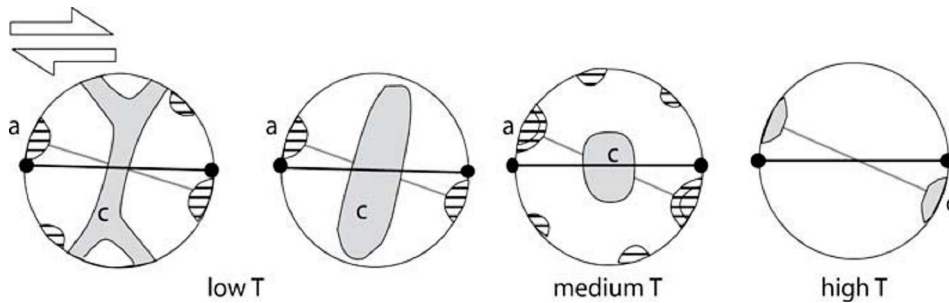
Si denota un'orientazione preferenziale degli assi  $c$  e del prisma  $m$  {10-10} compatibile con l'attivazione del sistema di slip prismatico  $m$  in direzione  $\langle c \rangle$ . Le figure polari sono state proiettate in modalità  $\sigma$ equal-areaö, i dati sono stati plottati come punto singolo per granulo. È mostrato l'emisfero inferiore e sono rappresentate le facce {0001}, {11-20}, {10-10}, {1-101}, {1-102}, {11-22}, {-1-123} e {-1-123} del quarzo.

Le misure sono state effettuate tagliando la sezione sottile parallelamente alla lineazione e perpendicolarmente alla foliazione, cioè analizzando la sezione XZ dell'ellissoide di strain.

Nelle figure polari la foliazione e la lineazione sono rappresentate come un piano a trend verticale EW e orizzontale rispettivamente.

Dalle figure polari si evince che i 594 punti d'analisi raccolti su altrettanti granuli di quarzo dimostrano un'orientazione cristallografica preferenziale (CPO), ben

evidente dai plot delle normali sulla basale  $\{0001\}$ , quindi l'asse  $c$ , e del prisma  $m$   $\{10-10\}$ .



*Fig.3.3.2- Mostra i 4 tipi di CPO del quarzo. Gli assi  $\langle c \rangle$  (grigi) e  $\langle a \rangle$  (a strisce) si distribuiscono in modo caratteristico all'aumentare del grado metamorfico durante una deformazione di simple shear destro.*

*Il primo stereogramma mostra attivo il sistema di slip della basale  $c \langle a \rangle$  (alla periferia del cerchio), funzionante in facies di bassa temperatura scisti verdi.*

*Il secondo pattern mostra attivo il prisma  $m \langle a \rangle$  corrispondente alla facies di basso-medio grado metamorfico.*

*La terza figura mostra ancora un'orientazione preferenziale dell'asse  $a$  del romboedro, per temperature pertinenti la facies anfibolitica.*

*Infine, l'ultima immagine mostra la disattivazione del sistema di slip in funzione dell'asse  $a$  e la sua attivazione in corrispondenza dell'asse  $c$  per il prisma  $m$ . La temperatura ha l'effetto di disattivare il sistema di slip prevalente a condizioni formative di grado più basso. (Passchier and Trouw, 1996).*

L'ultimo tipo di CPO mostrato nella Fig.3.3.2 è paragonabile all'immagine ottenuta per l'asse  $\langle c \rangle$  dallo studio EBSD (Fig.3.3.1). In questa figura polare si vede come la distribuzione degli assi  $\langle c \rangle$  è obliqua rispetto l'orientazione della foliazione formando un angolo di circa  $20^\circ$ .

L'analisi della figura 3.3.1 fa inoltre notare che nella figura polare relativa alla distribuzione dei poli del prisma  $m \{10-10\}$ , questi formano un massimo a circa  $20^\circ$  dalla normale alla foliazione. Anche il prisma  $\{11-20\}$  mostra una distribuzione simile, anche se meno marcata. Complessivamente queste posizioni

stanno a indicare che i piani prismatici sono inclinati rispetto alla foliazione milonitica di circa  $20^\circ$  e gli assi  $\langle c \rangle$  sono paralleli ai piani prismatici.

Tale distribuzione è compatibile con l'attivazione del sistema di slip  $\langle c \rangle \{10\cdot10\}$  di alta temperatura tipico della facies granulitica.

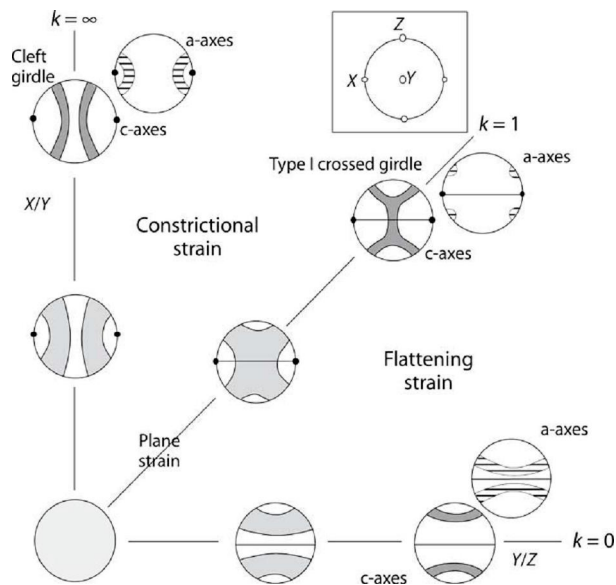


Fig. 3.3.4- Il diagramma di Flinn mostra le geometrie dei patterns delle CPO per gli assi  $\langle c \rangle$  (sagoma grigia) e degli assi  $\langle a \rangle$  (sagoma a strisce) del quarzo in caso di strain coassiale in deformazione progressiva. È mostrata l'orientazione dei principali assi di strain nei diagrammi polari. Le linee nere all'interno delle figure rappresentano la foliazione di riferimento mentre i punti indicano la lineazione di riferimento.

(Fonte dopo Lister and Hobbs 1980).

Per di più, le figure polari permettono di desumere un regime di deformazione da simple shear.

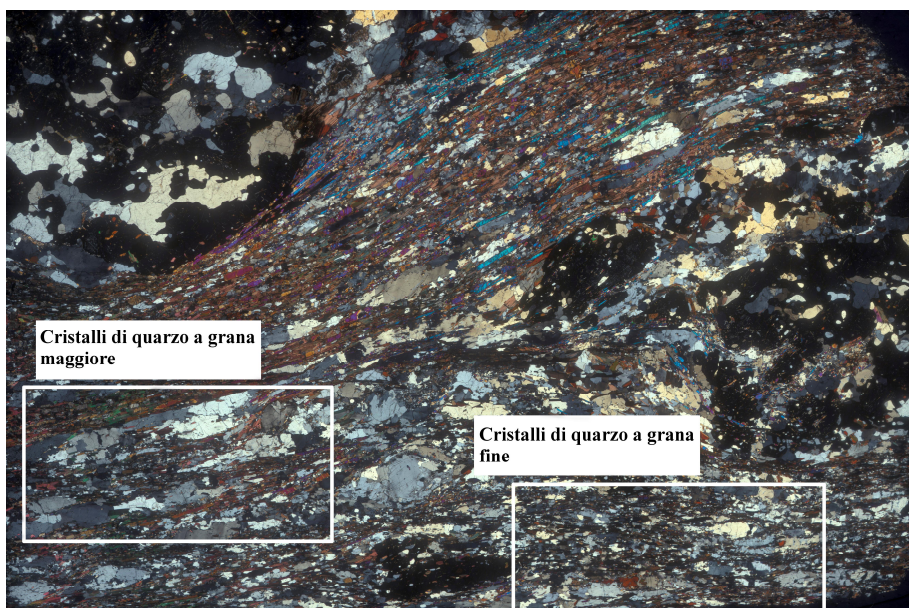
La presenza di taglio semplice si evince dalla disposizione dei punti in un girdle singolo asimmetrico rispetto la normale alla foliazione.

I 594 punti plottati nelle figure polari sono quindi compatibili con una deformazione milonitica accomodata dal dislocation creep e dall'attivazione del sistema di slip prismatico in direzione  $\langle c \rangle$ . Un'attenta osservazione della concentrazione degli assi  $\langle c \rangle$  mostra anche che i punti dati sono piuttosto dispersi

nella gridle e i massimi raggiungono appena un valore MUD (mean uniform density) pari a 2.08, cioè la densità massima è pari a solo 2.08 volte quella media. Questo significa che oltre al dislocation creep deve avere agito un altro meccanismo di deformazione in grado di disperdere l'orientazione cristallografica preferenziale dei cristalli di quarzo ottenuta tramite il dislocation creep: questo meccanismo è verosimilmente il grain boundary sliding.

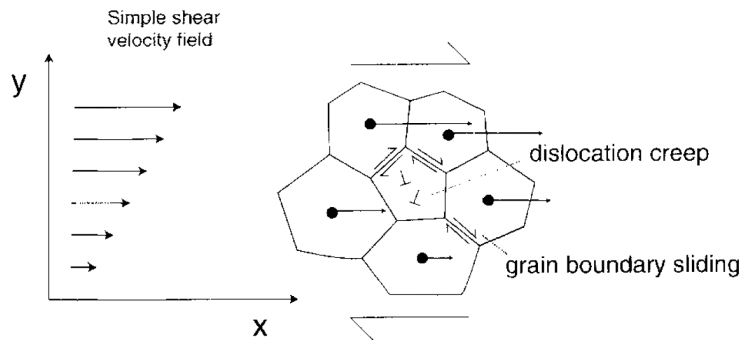
Questo studio del quarzo ha reso evidente come l'attivazione del sistema di slip prismatico in direzione c sia stato il meccanismo di deformazione prevalente alle alte condizioni metamorfiche (700°C- 800°C).

Durante la milonisi l'attività del dislocation creep insieme all'azione del meccanismo di ricristallizzazione dinamica provoca la diminuzione della grana dei cristalli (Fig.3.4.2).



*Fig.3.4.2- Dalla sezione sottile si nota la grana prevalentemente fine del quarzo ma sono visibili cristalli di dimensioni maggiori (competizione dislocation creep vs grain boundary sliding).*

In questa condizione di forte riduzione di grana e di elevata temperatura si imposta il grain boundary sliding come meccanismo deformativo aggiuntivo.



3.4.3- Il path di deformazione e i meccanismi attivi sono fondamentali per la rotazione delle direzioni cristallografiche rispetto alla direzione di finite stretching axis ( $L_r$ ). La figura mostra la competizione tra il meccanismo di dislocation creep e il grain boundary sliding che provoca la parziale dispersione della CPO. ( Passchier and Trouw, 1996)

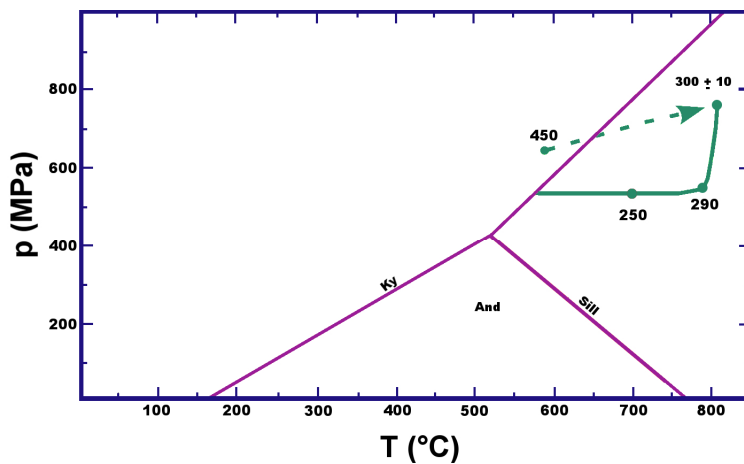


Fig. 3.4.3- Traiettorie p-T-t della crosta inferiore nel massiccio delle Serre della Calabria.

Infine, considerando un tasso di raffreddamento di  $3^\circ \text{Ma}^{-1}$  per il basamento profondo delle Serre (Schenk, 1990), la deformazione milonitica della roccia non può che essere avvenuta prima di 250 Ma., perché successivamente non sussistevano più le condizioni di temperatura necessarie per deformare la roccia in facies granulitica.



## CONCLUSIONE

L'analisi effettuata col microscopio elettronico a scansione (SEM) e la tecnica EBSD rivela l'attivazione del sistema di slip prismatico in direzione dell'asse C del quarzo e dimostra la formazione del campione in facies granulitica.

La stessa analisi rileva la presenza di simple shear destro e lo studio delle microstrutture conferma la traiettoria di taglio semplice destro.

La dispersione della CPO fa supporre che oltre al dislocation creep abbia agito anche il grain boundary sliding, un meccanismo di deformazione facilitato dalla forte riduzione di grana ottenuta dalla roccia durante il processo di milonisi.

La CPO messa in evidenza conferma condizioni di alta temperatura durante la milonisi, condizioni pertinenti l'orogenesi varisica.

L'analisi EBSD permette di ricavare tutti i dati sopracitati in tempi relativamente brevi e può rilevare tutte le direzioni cristallografiche di un reticolo cristallino.



## BIBLIOGRAFIA

1. Thorsten Graeßner *Thermal evolution of the continental crust of Calabria during the Hercynian orogeny: constraints from metamorphic phase equilibria and isotopic dating.* Dissertation Zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1999.
2. David J. prior, Alan P. Boyle, Frank Brenker, Michael C. Cheadle, Austin, Gloria Lopez, Luca Peruzzo, Graham J. Potts, Steve Reddy, Richard Spiess, Nick E. Timms, Pat Trimby, John Wheeler, Lena Zetterstrom. *The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks.* *American Mineralogist*, Volume 84, pages 1741-1759, 1999.
3. Thorsten Graessner and Volker Schenk. *An exposed Hercynian deep crustal section in the Sila Massif of Northern Calabria: Mineral Chemistry, Petrology and P-T path of Granulite facies Metapelitic Migmatites and Metabasites.* *J. Petrology* -42/5 -931-61-2001.
4. Antonio Lucchiari. *Deformazione in presenza di fuso della crosta inferiore mafica esumata in Calabria.* Tesi di laurea triennale in scienze geologiche 2010/2011.
5. V. Festa , A. Fornelli , A. Paglionico, A. Pascazio , G. Piccarreta , R. Spiess. *Asynchronous extension of the late-Hercynian crust in Calabria.* *Tectonophysics* 518-521\_29-43, 2012.
6. Alfredo Caggianelli , Giacomo Prosser, Vincenzo Festa, Antonio Langone, Richard Spiess. *From the upper to the lower continental crust exposed in Calabria.* 86° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana. Arcavacata di Rende (CS) 2012. Periodico semestrale del Servizio Geologico d'Italia - ISPRA e della Società Geologica Italiana, Geol.F.Trips, Vol. 5 No.1.2 (2013), 49 pp., 26 figs., 2 tabb. (DOI 10.3301/GFT.2013.02).

7. J. Carreras and A. Garcia Celma ÷Quartz of C-Axis fabric variation at the margins of a shear zone developed in shists from cap de Creus (Spain)ö. *Acta geologica* T. 17 no 3, pigs. 137-149, (1982).
8. G. Bonardi, A. Caggianelli, S. Critelli, A. Messina, V. Perrone. ÷Geotraverse across the Calabria-Peleoritani Terrane (Southern Italy). 32nd International Geological Florence ó Italy, August 20-28. Volume n° 6 - from P55 to PW06, 2004.
9. C.W. Passchier ÷The reliability of asymmetric c-axis fabrics of quartz to determine sense of vorticity.ö *Tectonophysics*, 99 (1983) TQ-108 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands.
10. Gerolamo Angì, Rosolino Cirrincione, Eugenio Fazio, Patrizia Fiannacca, Gaetano Ortolano, Antonino Pezzino.÷Metamorphic evolution of preserved Hercynian crustal section in the Serre Massif (Calabriaó Peloritani Orogen, southern Italy)ö. *Lithos* 115 237ó262(2010).
11. G. S. Lister. ÷ Fabric transitions in the Saxony granulite terrain.ö *Journal of Structural Geol.,qt.* Vol. 4, No. 1, pp. 81 to 92, 1982.
12. G.S. Lister. ÷ The effect of the basal-prism mechanism switch on fabric development during plastic deformation of quartzite.ö *Journal of Structural Geology*, Vol.3, No.1, pp.67 to 75, 1981.
13. G.S. Lister and B.E. Hobbs. ÷The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: the influence of deformation history.ö *Journal of Structural Geology*, Vol.2, No. 3, pp.355 to 370 (1980).
14. Cees W.Passchier and Rudolph A.J. Trouw. ÷*Micro-Tectonics*ö. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
15. Notes from unicitania SDASR, metapeliti.
16. F.D Hongna, J.F Hipperttb. ÷Quartz crystallographic and morphologic fabrics during folding/transposition in mylonitesö. *Journal of Structural Geology*. Volume 23, Issue 1, January 2001, Pages 81ó92.

17. Notes from Department UC Santa Barbara, Earth Science. Metamorphic petrology, lecture part.11-Interaction between metamorphism and deformation.
18. G. Molli, R. Tribuzio, D. Marquer. "Deformation and metamorphism at the eastern border of the Tenda Massif (NE Corsica): a record of subduction and exhumation of continental crust", *Journal of Structural Geology* 28 (2006) 1748-1766.
19. Domenico Liotta, Alfredo Caggianelli, Jörn H. Kruhl, Vincenzo Festa, Giacomo Prosser, Antonio Langone. "Multiple injections of magmas along a Hercynian mid-crustal shear zone (Sila Massif, Calabria, Italy)". *Journal of Structural Geology* 30 (2008) 1202-1217.



## RINGRAZIAMENTI

Concludendo, mi piacerebbe brevemente ringraziare le persone che mi hanno aiutata e accompagnata sia durante la produzione della tesi che nel corso di questi tre anni di università.

Innanzitutto, vorrei ringraziare il mio relatore di tesi Richard Spiess per aver suscitato in me passione e interesse verso le sue materie sin dal primo momento di studio, per avermi guidata con pazienza e volontà alla realizzazione di un elaborato scritto consentendomi di apprendere la metodologia del lavoro di ricerca.

Vorrei ringraziare la mia famiglia per avermi dato la possibilità di intraprendere la carriera universitaria.

Infine, un grazie particolare ai miei amici che mi hanno sempre sostenuto e hanno reso la mia esperienza a Padova speciale.

Roberta Carluccio