



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

**ANALISI DI IMMAGINE DI ROCCE DI FAGLIA
IN CARBONATI (FAGLIA DI TRE MONTI,
APPENNINO CENTRALE, ITALIA)**

Relatore: Prof. Giulio Di Toro
Correlatore/i: Dott. Steven Smith

Laureando: Francesca Prando

ANNO ACCADEMICO 2010 / 2011

Indice

Abstract	pg. 5
Introduzione	pg. 6
1. Inquadramento Geologico	pg. 7
2. Frammentazione e distribuzioni granulometriche	pg. 9
3. Analisi di Immagine dei campioni	
3.1 Il campione selezionato	pg. 11
3.2 Metodi	pg. 13
4. Risultati	
4.1 Clast Size Distribution(CSD) nelle cataclasiti	pg. 15
4.2 Descrittori di Forma	pg. 17
4.2.1 Orientazione dei clasti	pg. 17
4.2.2 Solidity	pg. 20
4.2.3 Circolarità	pg. 22
4.2.4 Roundness	pg. 24
5. Conclusioni	pg. 26
Bibliografia	pg. 27

Abstract

Active seismic fault can be hosted in carbonate, an important lithology not only in Central Italy but in many other seismically active area.

Thus the study of structure on slip zone that cut limestone host rock, such as the 'clast-cortex grain', peculiar rounded grains consisting of a central (often angular) clast wrapped by a laminated outer cortex of ultra-fine-grained calcite, can be useful for the understanding of localized deformation processes occurring during the seismic cycle. (Smith et Al. 2011)

In this work is studied a sample from the Tre Monti normal fault, Central Appennines, (Italy) an active fault that cuts limestone, with an exhumation from <2Km dept, where ambient temperature $\ll 100^\circ$.

The fabric of the slip zone, which can be divided in two distinct layers, is studied from a scanned image of the thin section, photo and photo-mosaic taken using optical microscope. Clast size distribution, orientation and shape descriptor are calculated using image analysis techniques. The results obtained are then discussed.

The Clast Size Distribution obtained suggest that a rework of the cataclasite is needed to obtain the microstructure defined as clast cortex grains. The (probably) co-seismic rolling of angular clast would lead to the formation of the clast cortex grain, with a minimum on the fragmentation.

Introduzione

La tesi ha come obiettivo lo studio microstrutturale della zona principale di scivolamento della faglia normale di Tre Monti, negli Appennini centrali (Italia) per meglio comprendere processi chimico-fisici attivati durante il ciclo sismico. In particolare, non sono noti in letteratura prodotti di faglia in rocce carbonatiche ascrivibili a rotture sismiche.

La faglia di Tre Monti taglia rocce carbonatiche, è stata esumata da una profondità < 1.5 km ed ha zone di scivolamento composte da cataclasiti (rocce di faglia frammentate coesive). Le cataclasiti includono “*clast cortex grains*” (CCG) o aggregati arrotondati costituiti da un clasto calcitico centrale, spesso policristallino e spigoloso, avvolto da una corteccia laminata esterna sempre di composizione calcitica.

Nella tesi procederemo alla:

- 1) determinazione delle distribuzioni granulometriche e dei parametri di forma (circolarità, ecc.) dei frammenti di roccia e dei CCG della zona di scivolamento mediante tecniche di analisi di immagine effettuate su sezioni sottili e campioni lucidati;
- 2) proposta di un modello meccanico di formazione dei CCA. Queste microstrutture potrebbero essere infatti associate a rotture sismiche che hanno interessato la faglia di Tre Monti.

Lo studio dei CCA può migliorare la comprensione dei processi fisici e chimici in zone di scivolamento in faglie in carbonati.

1. Inquadramento Geologico

Oggetto di studio è un campione proveniente dalla faglia normale di Tre Monti, sismogeneticamente attiva sin dal Pliocene, situata negli Appennini centrali.

Gli Appennini sono posti in una zona di regime estensionale, caratterizzati da un sistema di faglie normali attive con direzione preferenziale NW-SE.

Contrariamente all'andamento principale delle faglie dell'Appennino centrale, la zona di faglia di Tre Monti presenta un andamento NE-SW. Definisce il limite NW del bacino Fucino, il più grande bacino in tramontano negli Appennini centrali; affiora in una serie di scarpate di faglia Oloceniche disposte *en-echelon* per una lunghezza di circa 6 km lungo il margine del rilievo di Tre Monti. Presenta un rigetto verticale dell'ordine dei 1.5 -2 km, accomodato principalmente dalle faglie principali.

Le faglie normali segnano il passaggio tra i calcari di piattaforma Mesozoici del *footwall* e sedimenti di bacino plio-pleistocenici dell'*hanging wall*.

In seguito alla progressiva esumazione delle superfici di faglia, queste riportano evidenti effetti di *weathering* sulla superficie; in affioramento, alla base della scarpata è spesso presente una banda, di colore bianco, non più alta di 15 cm, che rappresenta la superficie di faglia esumata più recentemente. Questa banda, denominata localmente 'nastrino', è caratteristica di numerose faglie normali attive che si sviluppano in rocce carbonatiche negli Appennini Centrali.

Il nastrino, caratterizzato da una importante continuità laterale, può essere infatti seguito per distanze da centinaia di metri a chilometri, ed è una superficie adatta alla raccolta di campioni che abbiano risentito al minimo dell'influenza di fattori esterni.

La faglia principale, da cui proviene il campione, è identificata sulla superficie corrispondente alla scarpata Olocenica, con una immersione di 50-55° SE SSE.

La zona di scivolamento è inclusa in un nucleo di faglia di spessore variabile tra decimetri e metri, costituito da breccie di faglia carbonatiche poco coesive e cataclasiti, con una tendenza alla riduzione della granulometria verso la zona di scivolamento principale.

Cataclasiti ben cementate si riscontrano in livelli centimetrici molto vicini alla zona di scivolamento principale.



Figura 1. Foto della zona di Faglia. Il *footwall* della faglia mostra una zonazione nucleo di faglia- zona di danneggiamento tipica, tendendo verso rocce incassanti, calcari, relativamente indeformate su una distanza di pochi metri. (foto di S. Smith)

2. Frammentazione e distribuzioni granulometriche

In geologia numerosi fenomeni a scala invariante, in cui gli oggetti si mantengono simili a se stessi nonostante la variazione di scala, possono essere descritti attraverso una distribuzione frattale, che richiede una dipendenza, secondo una legge di potenza, del numero di oggetti più grandi di una specifica dimensione nella dimensione considerata.

Una distribuzione di frequenza vs dimensione dei frammenti di roccia si può considerare frattale, legata ad una legge di potenza del tipo

$$N_n = \frac{C}{r_n^D}$$

In cui N rappresenta il numero di oggetti (i.e. clasti) con una dimensione caratteristica lineare r_n , C la costante di proporzionalità ed D la dimensione frattale.

In natura questa relazione è applicabile approssimativamente, rendendo necessario considerare dei limiti superiori ed inferiori nell'intervallo di applicazioni, limiti che nel caso di una cataclasite possono essere dati dalle dimensioni stesse del campione (scala minore) e dal frammento di roccia più piccolo (scala massima).

La dimensione frattale D, dal punto di vista matematico, può essere un numero intero, nel qual caso è equivalente ad una dimensione euclidea (punto=0, linea=1, quadrato=2...), ma generalmente è una dimensione frattale definibile come

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{n+1}}{N_n}\right)}{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n+1}}\right)}$$

Esistono diversi modelli teorici per la frammentazione, che riportano differenti valori di D ; inoltre anche partendo da uno stesso modello matematico, si possono ottenere valori di D differenti in base alla descrizione del modello, che può essere effettuata in modo discreto o tramite statistica cumulativa. (Si prenda ad esempio il *comminution model* elaborato da Sammis, in cui il valore di D varia da 2.585 se descritto in modo discreto a 2.6 se descritto tramite cumulativa.) Nel lavoro si adotta in particolare la distribuzione cumulativa, che meglio si presta ad un confronto con eventuali dati sperimentali.

La dimensione frattale D è il termine importante nella definizione qualitativa della frammentazione ed è l'oggetto di calcolo in tutto il procedimento.

Si utilizza infatti nella **Clast Size Distribution** (CSD) come valore della pendenza della linea di tendenza che descrive il *best fit* dei dati raccolti.

La *Clast Size Distribution* è espressa tramite grafici in cui il logaritmo naturale di ogni diametro (ascissa) è confrontato con il logaritmo naturale del numero di clasti aventi dimensioni maggiori o uguali a quel diametro (ordinata).

3. Analisi di Immagine dei campioni

3.1. Il campione selezionato

Il campione 54B, composto quasi totalmente da calcite, proveniente dalla zona di scivolamento della faglia di Tre Monti è caratterizzato da due livelli distinti: un livello (*Cataclastic Layer*, CL) di cataclasite composto da clasti angolari (del tutto simile alla stragrande maggioranza di cataclasiti descritte in letteratura) ed un livello (*Grain-cortex layer*, GCL) immediatamente sottostante la superficie di scivolamento dallo spessore di 2-10 mm composto da *clast-cortex grains*. Il limite tra questi due *layers* è netto e circa parallelo rispetto alla superficie di slip. (fig. 2)

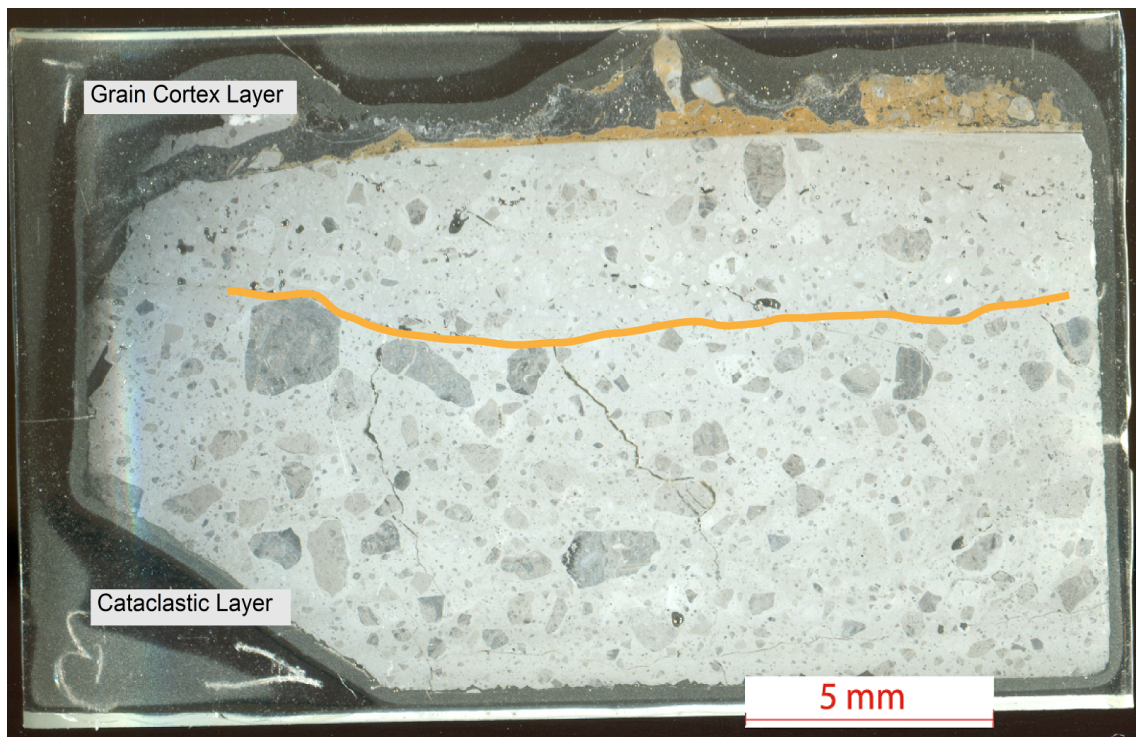


Figura 2. Scansione ad alta definizione della sezione sottile 54B, tagliata parallelamente alla lineazione.

I “*clast-cortex grain*” del livello GCL consistono in clasti angolari centrali avvolti da una ‘corteccia’ esterna laminata – l’*outer cortex*- composta da una matrice calcitica a grana ultrafine (Smith et Al., 2011).(fig. 3)La granulometria di questi *clast-cortex grain* è compresa tra i 50 μm e i 3 mm di diametro. I clasti centrali angolari sono principalmente composti da cataclasite polimittica rimaneggiata

proveniente dal livello CL sottostante o da frammenti micritici o fossiliferi dell'incassante calcareo.

Gli *outer cortex* sono composti da un materiale otticamente simile alla matrice fine circostante. I clasti centrali più piccoli (<1 mm diametro) sono circondati da *outer cortex* semplici o con al massimo due laminazioni; ai clasti con diametri superiori sono associati *outer cortex* più complessi, con numerose laminazioni, riconoscibili a causa di una bordatura di materiale ultra-fine più scuro.

Inoltre in non tutti gli *outer cortex* si può riconoscere un clasto centrale angolare, questo potrebbe indicare sia una effettiva inesistenza del clasto centrale, ma può essere legato anche al fatto che le osservazioni sono effettuate su una superficie e non su un volume.

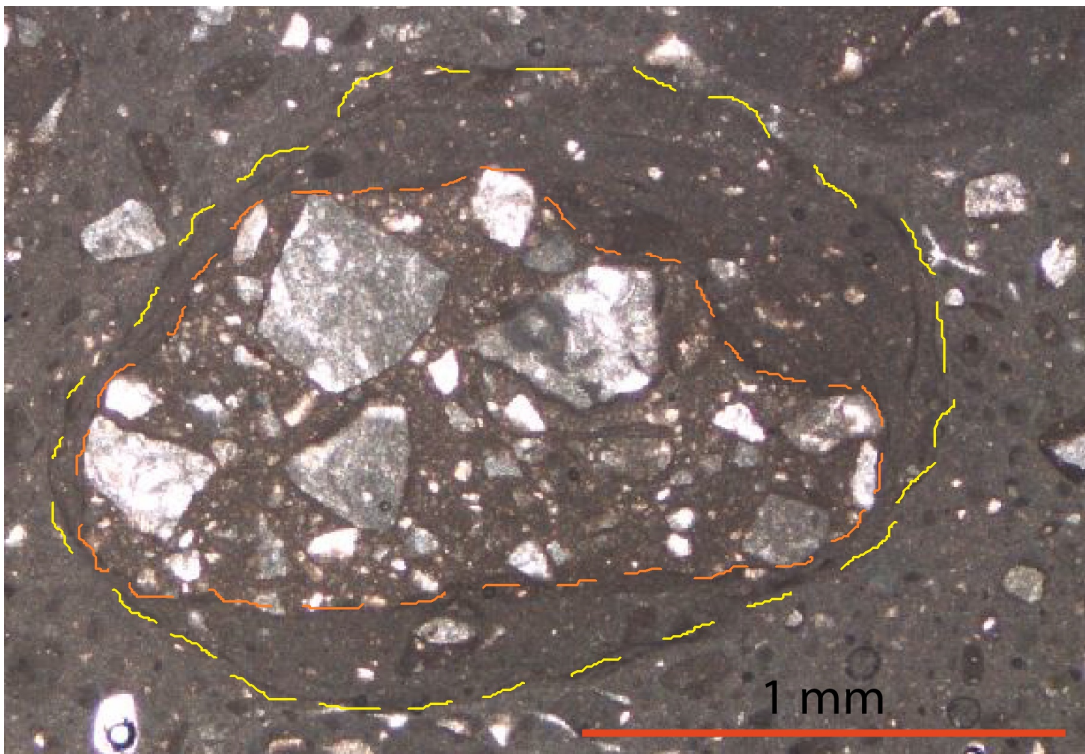


Figura 3. Esempio di "Clast-cortex grain" . Foto al microscopio ottico.

3.2. Metodi

Per l'analisi di immagine si è utilizzata una foto della sezione sottile rappresentativa dei *Cataclastic Layer* e *Grain Cortex Layer* tagliata parallelamente alla lineazione e perpendicolarmente alla zona di scivolamento(fig.2), un foto mosaico di foto da microscopio ottico con obiettivo 1x per la descrizione del *Grain-Cortex Layer* (fig.4),ed alcune foto sempre tratte da immagini al microscopio ottico del *Cataclastic Layer* sottostante.



Figura 4. Fotomosaico di immagini al microscopio ottico, è un ingrandimento del *Grain Cortex Layer* della sezione sottile 54B.

Le immagini sono state elaborate impiegando un programma di grafica, Adobe Illustrator, e tracciando i singoli clasti dei due layer. Si sono così ottenute delle immagini, definibili come mappe dei clasti, raffiguranti i clasti centrali, gli outer cortex ed i clasti angolari. (fig. 5)



Figura 5. Immagine dei clasti centrali presenti nel Fotomosaico ottenuta in seguito alla mappatura in Adobe Illustrator.

Tramite l'utilizzo del programma ImageJ (scaricabile gratuitamente da <http://rsbweb.nih.gov/ij/>), si sono effettuate misure dell'area, del perimetro e di altri parametri che identifichiamo come descrittori di forma, per ogni clasto contenuto nelle immagini.

In seguito è stata determinata, utilizzando un foglio di calcolo elettronico, la distribuzione granulometrica dei clasti e dei parametri di forma. Parametri dei clasti misurati con ImageJ

- **Area e Perimetro:** sono calcolati tramite il conteggio dei pixel che costituiscono l'interno o il perimetro di ciascuna selezione, una volta fatta la proporzione di scala (i.e., da pixel a micrometri), calibrata direttamente nel programma.
- **Orientazione:** Il programma fitta ciascuna forma selezionata con un ellisse equivalente e calcola in senso orario l'angolo dell'asse maggiore dell'ellisse (detto *asse di orientazione*) rispetto alla base
- **Solidity:** Rapporto tra l'area convessa e l'area reale dell'oggetto. Con Area convessa si indica l'area del più piccolo poligono (*convex Hull*) che contiene l'oggetto considerato e i cui punti sono unibili da segmenti contenuti nella regione stessa.
- **Circularity:** la circolarità di un clasto equivale a $4\pi \frac{[Area]}{[Perimetro]^2}$, con un valore di 1:0 indicante un cerchio perfetto; la tendenza a valori prossimi a 0:0, indica forme sempre più allungate.
- **Roundness:** equivale a $\frac{4[Area]}{\pi[AsseMaggiore]^2}$, utilizza i valori dell'Area e dell'asse Maggiore dell'ellisse di *best fit*.

4. Risultati

4.1. *Clast Size Distribution (CSD) nelle cataclasiti*

La pendenza D della distribuzione granulometrica (vedi cap. 2) è stata ricavata dai grafici log-log aventi in ascissa il diametro dei clasti ed in ordinata il numero cumulativo dei clasti.

Si sono quindi confrontate le CSD per ogni microstruttura individuata (clasti centrali, *outer cortex* ...) in relazione all'ingrandimento della foto utilizzata.

Nella costruzione dei grafici si sono riscontrati dei cambi di pendenza nelle curve granulometriche, dovute a sottocampionamento nella selezione di clasti vicini al limite inferiore di scala causa scarsa risoluzione. Si è stabilito di tagliare le serie di dati (*cut off*) determinati caso per caso.

[20 μ m di diametro per sezione sottile; 15 μ m foto mosaico; 10 μ m per le foto del *Cataclastic Layer*]

In sezione sottile (Fig. 2) Si sono confrontate le distribuzioni dei clasti della foto della sezione sottile. Il valore di D tende ad aumentare con l'angolarità dei clasti. Nel *Grain Cortex Layer*, i clasti al nucleo dei *Clast Cortex Grains* hanno una dimensione frattale $D = 1.5$ maggiore a quella degli *outer cortex* ($D = 1.4$) ; i clasti appartenenti al *Cataclastic Layer* hanno un valore di $D=1.5$ simile ai clasti centrali ($D = 1.5$) e superiore a quello degli *outer cortex* ($D = 1.4$) del GCL. (fig.)

Le distribuzioni del mosaico di foto raccolte al microscopio ottico del *Grain Cortex Layer*, si riferiscono ai dati riguardanti i clasti centrali, gli *outer cortex*, e gli *outer cortex* contenenti clasti centrali.

In questo caso il valore della dimensione frattale degli *outer cortex* è pari a $D = 1.53$ ed è superiore sia a quello dei clasti centrali ($D = 1.20$) , che a quello degli *outer cortex* che contengano o meno clasti centrali ($D = 1.22$). (fig. e)

Le distribuzioni delle foto raccolte al microscopio ottico del *Layer Cataclasite*, mostrano, ovviamente, solo distribuzioni dei clasti angolari (i *clast-cortex grains* sono assenti); i clasti angolari nelle foto 54b(1) e 54b(2) hanno valori di D molto simili ($D= 1.11$ per la foto 54b(1) e $D = 1.13$ per la foto 54b(2), mentre nella foto 54b(3) $D = 1.46$ Il maggior valore di D nella sezione 54b(3) potrebbe essere legato al fatto che, rispetto alle prime foto, i clasti di dimensioni maggiori non vengono conteggiati in quanto non sono contenuti totalmente nell'immagine. (fig 8)

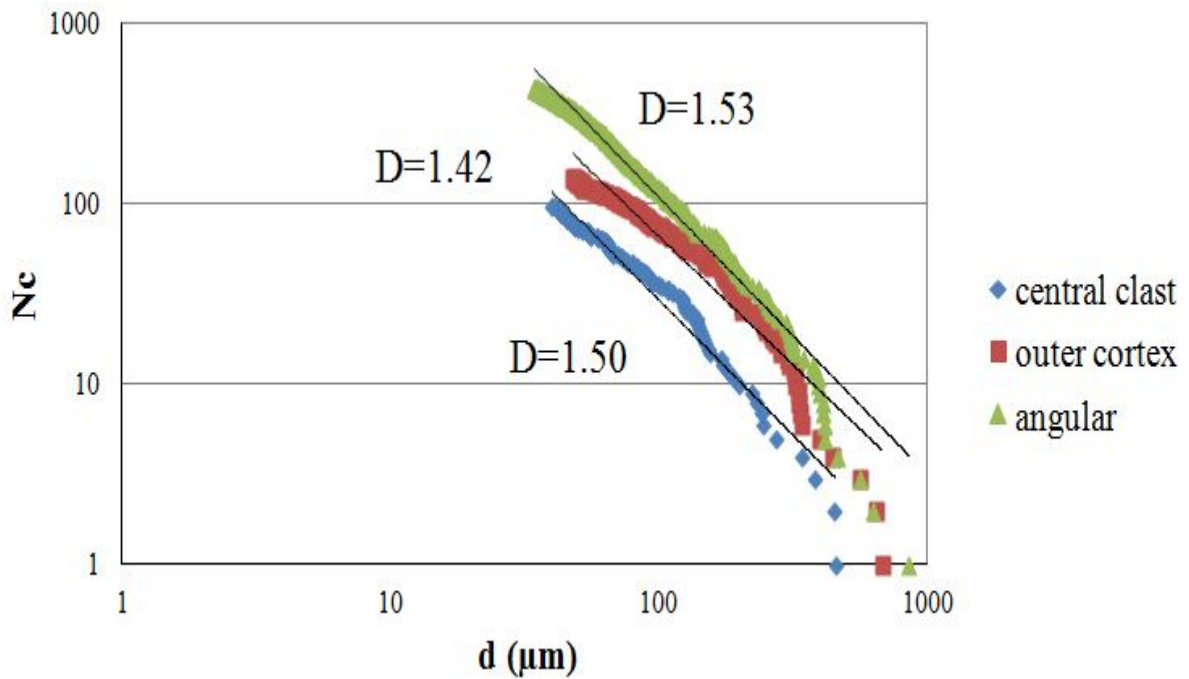


Figura 6. Clast Size Distribution riguardante i clasti della sezione sottile

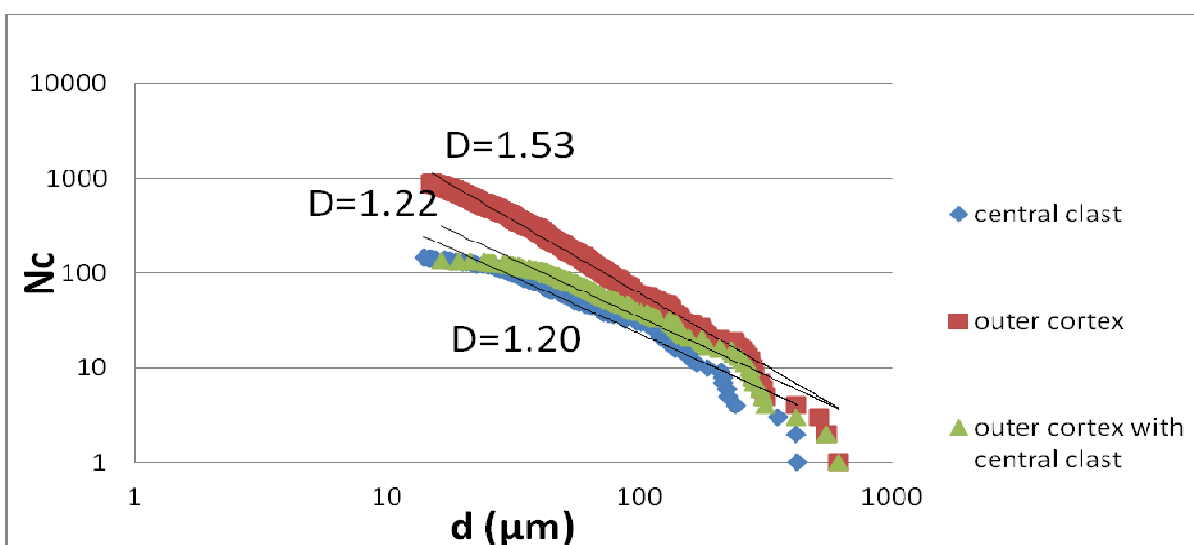


Figura 7. CSD riguardante i clasti del fotomosaico

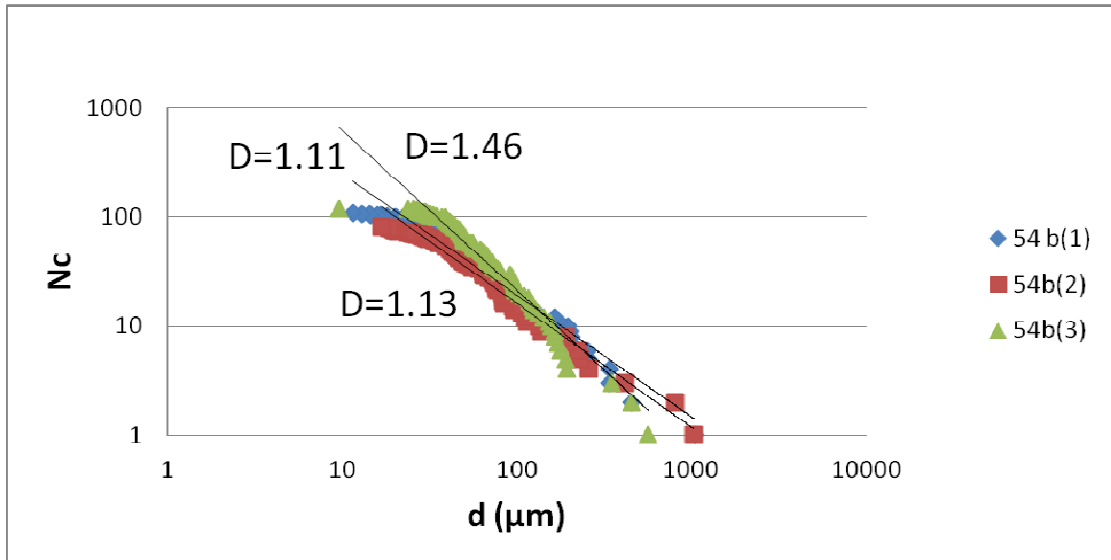


Figura 8. Clast Size Distribution per i dati riguardanti i clasti selezionati nelle foto del CL

4.2. Descrittori di Forma

4.2.1 Orientazione dei clasti

I grafici che seguono descrivono l'andamento dell'angolo, misurato in senso orario, compreso tra la base dell'immagine (parallela alla superficie di scivolamento) e l'asse maggiore dell'ellisse di *best-fit* dei clasti. In ascissa l'orientazione, in ordinata la frequenza relativa percentuale. I dati degli angoli di orientazione sono stati divisi in classi di cui è stato poi riportato il valore medio.

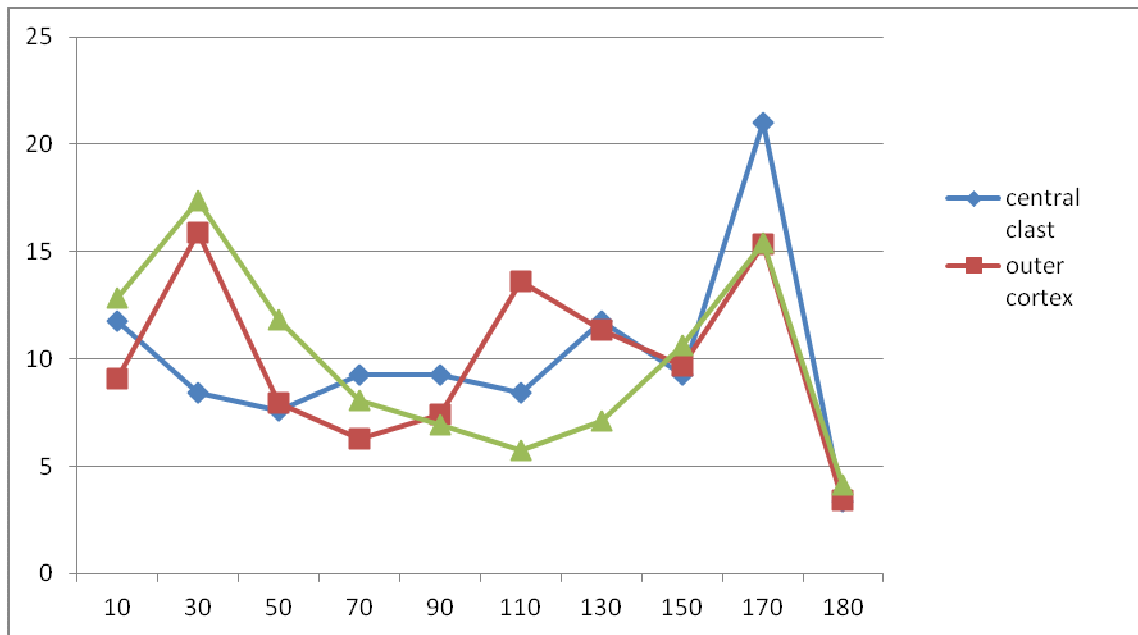


Figura 9 Orientazione sezione sottile

Nella figura (fig.11) i clasti angolari del CL tendono ad orientarsi con l'asse lungo sub-parallelo alla superficie di scivolamento (picchi a 10-30° e 160-180°). I clasti centrali del GCL (fig.10) tendono anch'essi a seguire l'orientazione generale dei clasti angolari del CL, e diviene più evidente il picco di orientazione preferenziale ad alti angoli nei dati della sezione sottile. Gli *outer cortex* mostrano una tendenza, come i clasti centrali ad orientazioni a basso angolo, nei dati ottenuti dalla sezione sottile(fig.9) presentano un picco a 90-130°.

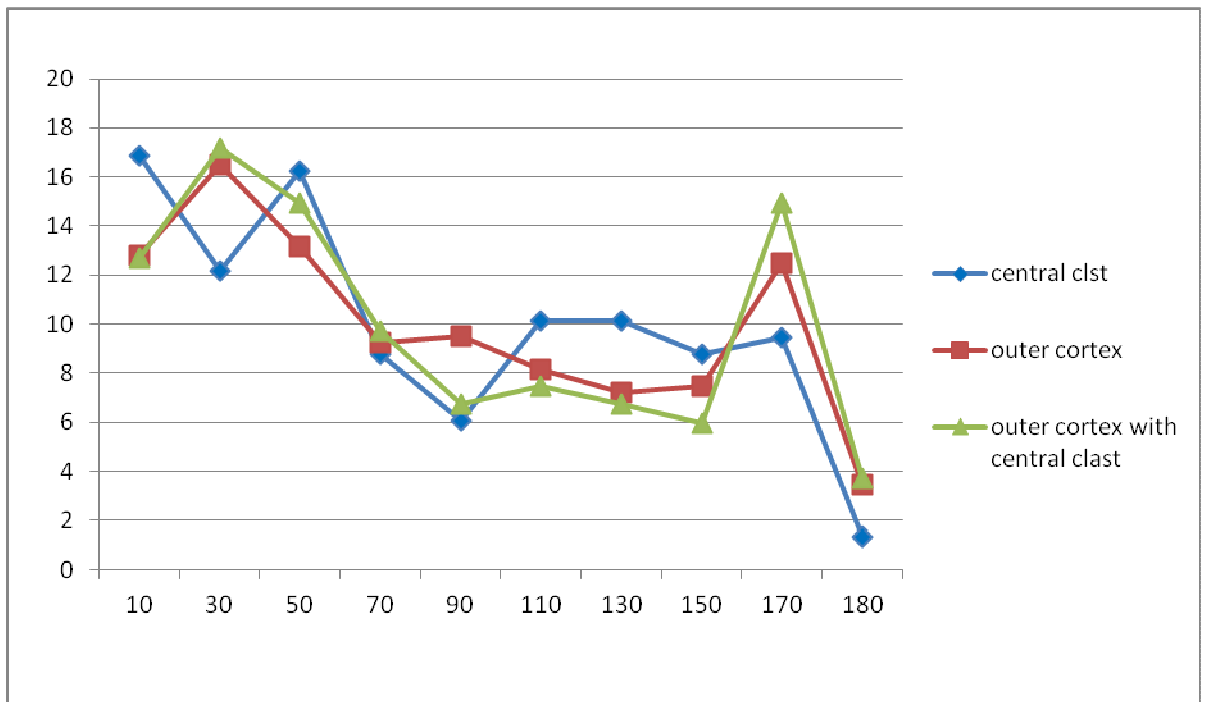


Figura 10 Orientazione fotomosaico

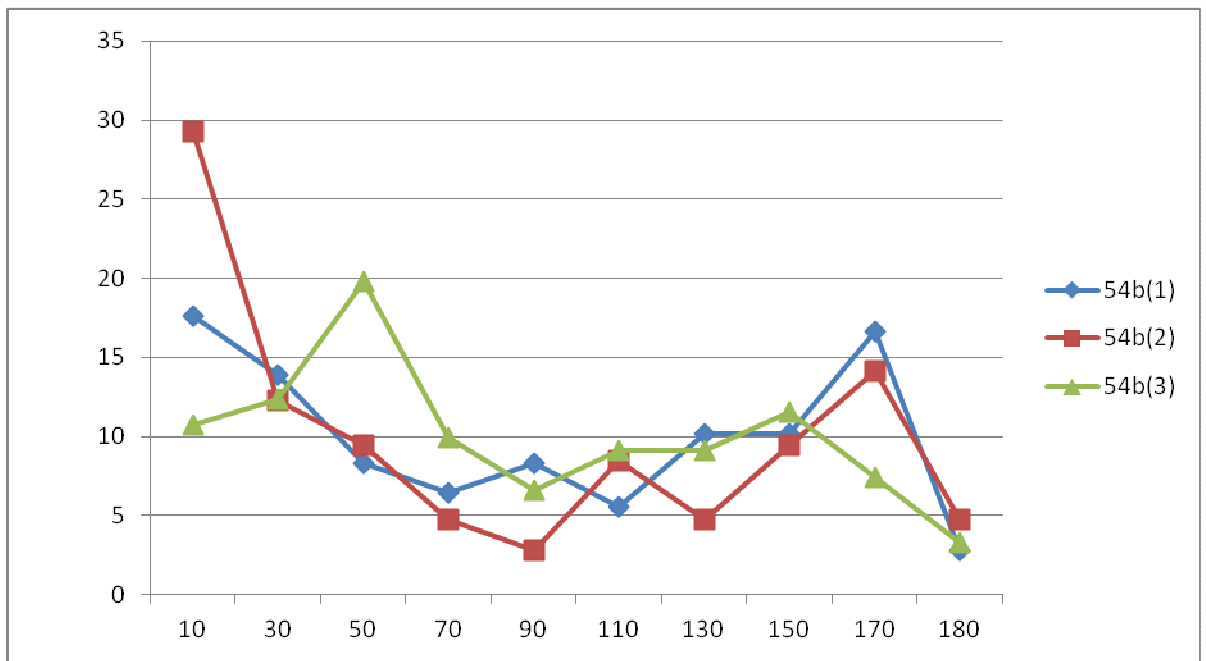


Figura 11 Orientazioni foto CL

4.2.2. Solidity

Un altro parametro di forma analizzato statisticamente è dato dalla *Solidity*, o rapporto tra l'area convessa e l'area reale dell'oggetto, i cui valori compaiono nei grafici in ascissa, mentre in ordinata è rappresentata la frequenza relativa percentuale. I dati di *Solidity* sono stati divisi in classi di cui è stato poi riportato il valore medio. Il rapporto tra le aree convesse e quelle reali ha dato per ogni tipologia di immagine analizzata valori tendenti all'uno. Si può notare che mentre i clasti centrali del GCL e quelli angolari del CL hanno un picco sul valore di solidità 0.93 (fig. 12, 14), gli *outer cortex* presentano un'area reale che molto si avvicina all'area convessa.(valori di solidità 0.97). (fig. 12, 13)

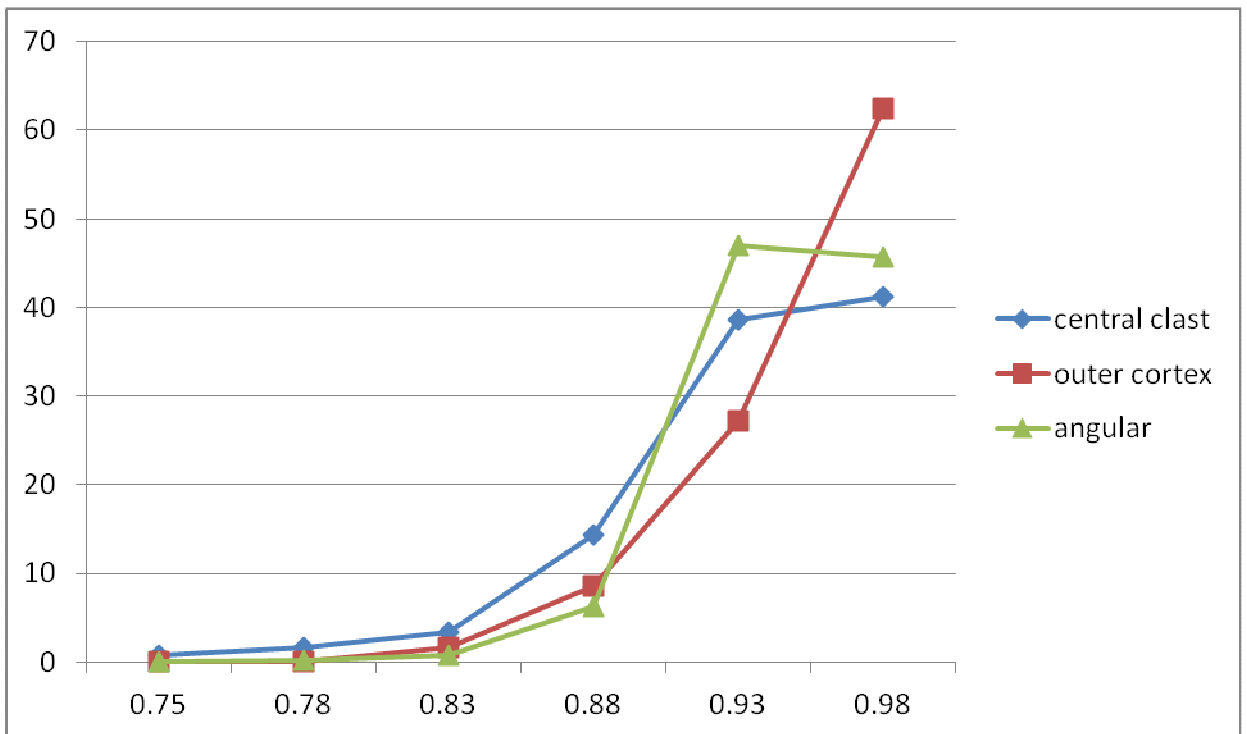


Figura 12 Solidity sezione sottile, rappresenta sia il CL che il GCL

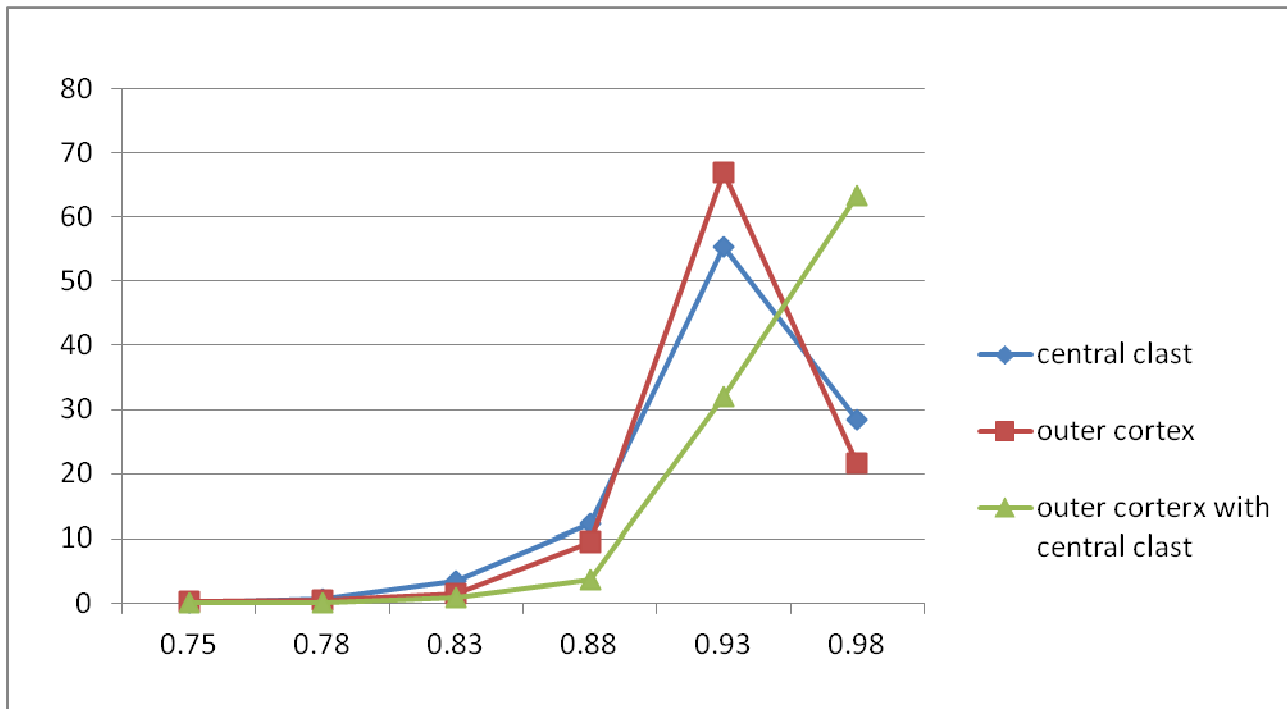


Figura 13 Solidity Fotomosaico, rappresentativa del GCL

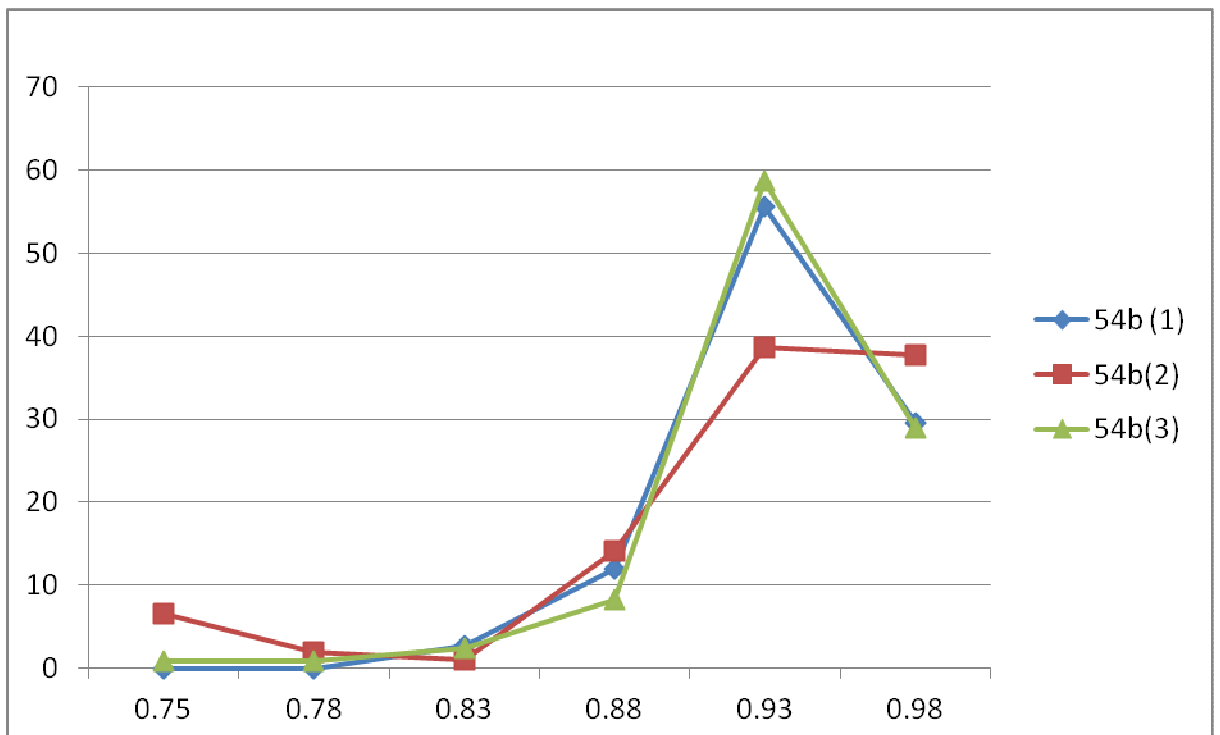


Figura 14 Solidity delle sezioni rappresentative del Cataclastic Layer

4.2.3. Circolarità

Sono quindi stati analizzati i dati riguardanti la Circolarità, o rapporto

$$4\pi \frac{[Area]}{[Perimetro]^2}$$

I valori di circolarità sono in ascissa, mentre in ordinata è rappresentata la frequenza relativa percentuale. I dati di Circolarità sono stati divisi in classi di cui è stato poi riportato il valore dell'estremo superiore.

Confrontando le distribuzioni dei clasti angolari, clasti centrali ed *outer cortex* non sono visibili differenze notevoli dei valori di circolarità (sono tutti compresi tra 0.5 e 0.9), che ci si aspetterebbe essere evidente almeno tra i clasti angolari del CL e gli *outer cortex* del GCL. (fig. 15, 16,17)

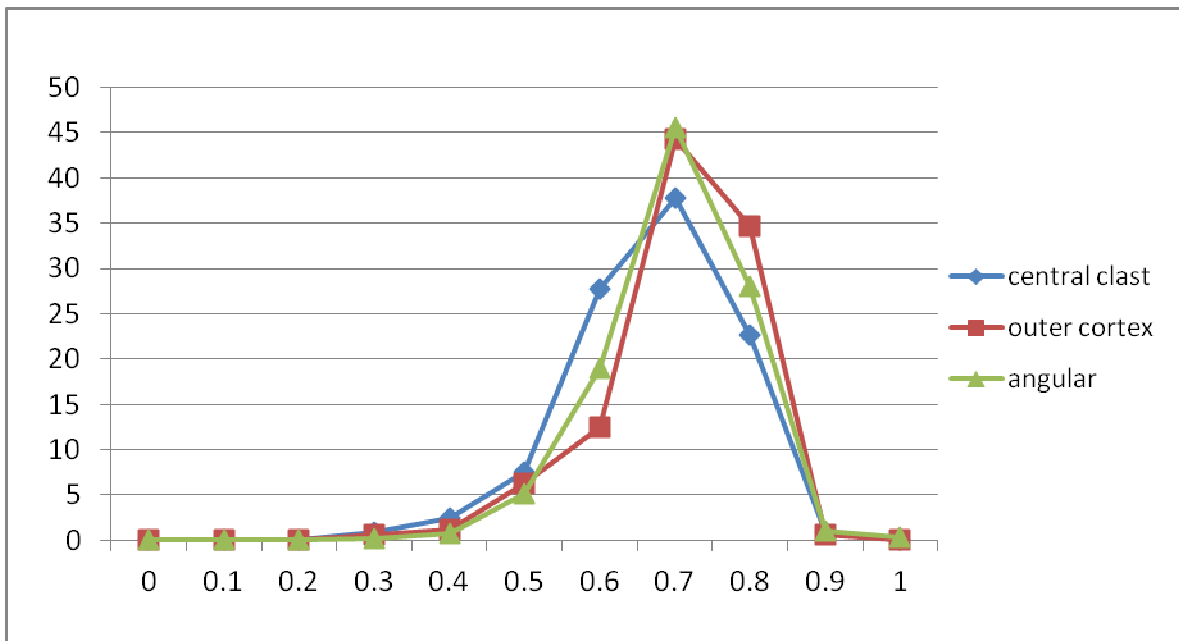


Figura 15 Circularity dei clasti mappati in sezione sottile, rappresentativa dei layer CL e CGL

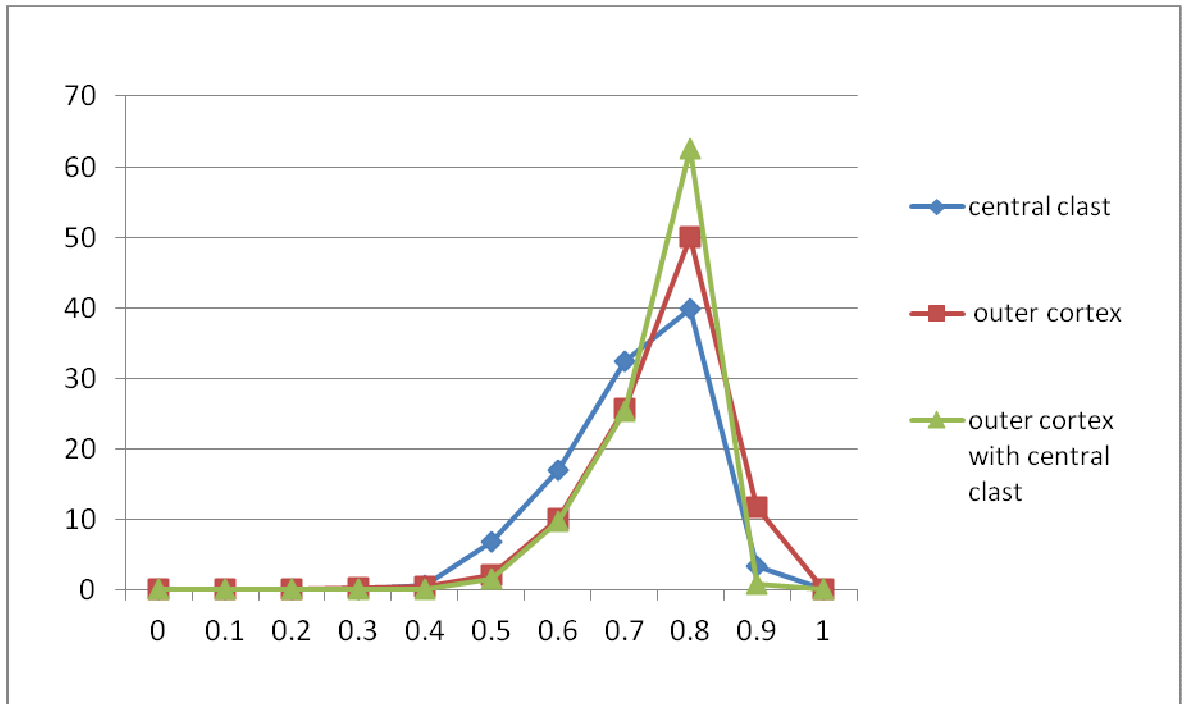


Figura 16 Circularity dei clasti tracciati sul Fotomosaico, rappresentativa del GCL

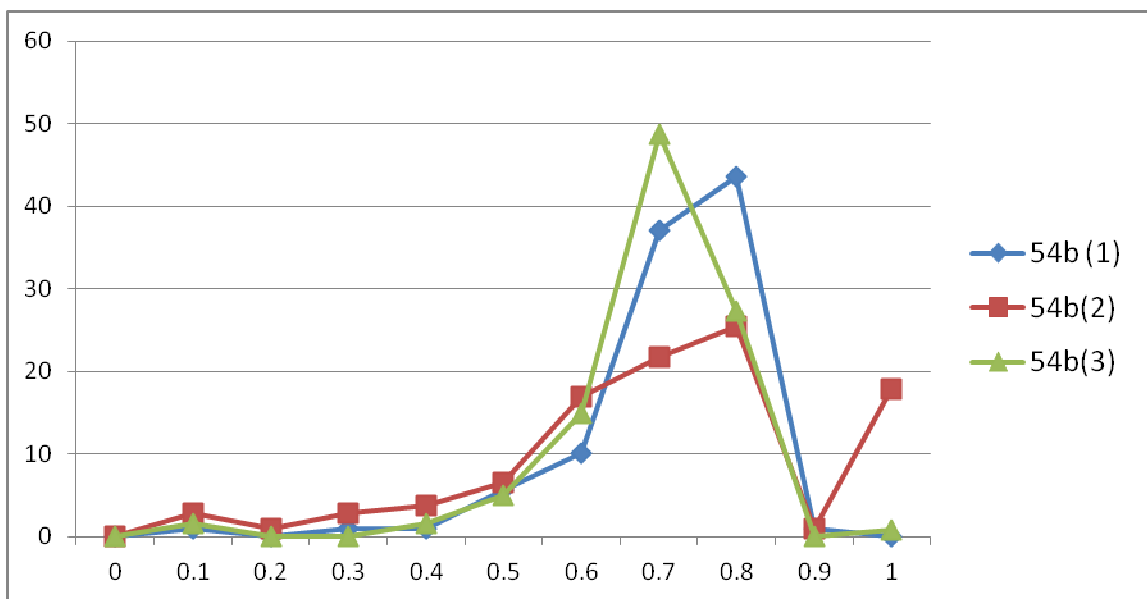


Figura 17 Circularity dei clasti mappati su foto da microscopio ottico rappresentative del CL

4.2.3. Roundness

La *Roundness* è pari a $\frac{4[Area]}{\pi[AsseMaggiore]^2}$ ed utilizza i valori dell'Area e dell'asse Maggiore dell'ellisse equivalente. La *Roundness*, i cui valori compaiono nei grafici in ascissa, mentre in ordinata sono riportate le frequenze relative percentuali. I dati di *Roundness* sono stati divisi in classi di cui è stato poi riportato il valore dell'estremo superiore. I valori di *roundness* sono compresi tra 0.3 e 0.9 e, come nel caso della Circolarità, non si apprezzano notevoli differenze di valori per i clasti angolari rispetto agli *outer cortex* più arrotondati.

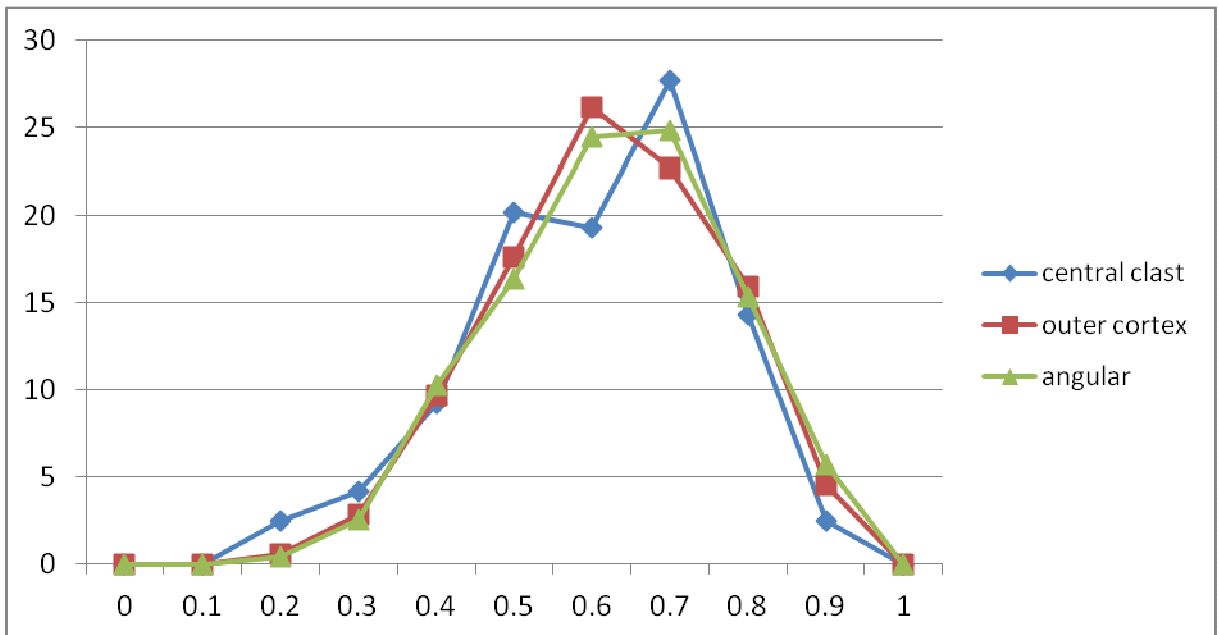


Figura 18 Roundness dei clasti mappati in sezione sottile, rappresentativa dei layer CL e CGL

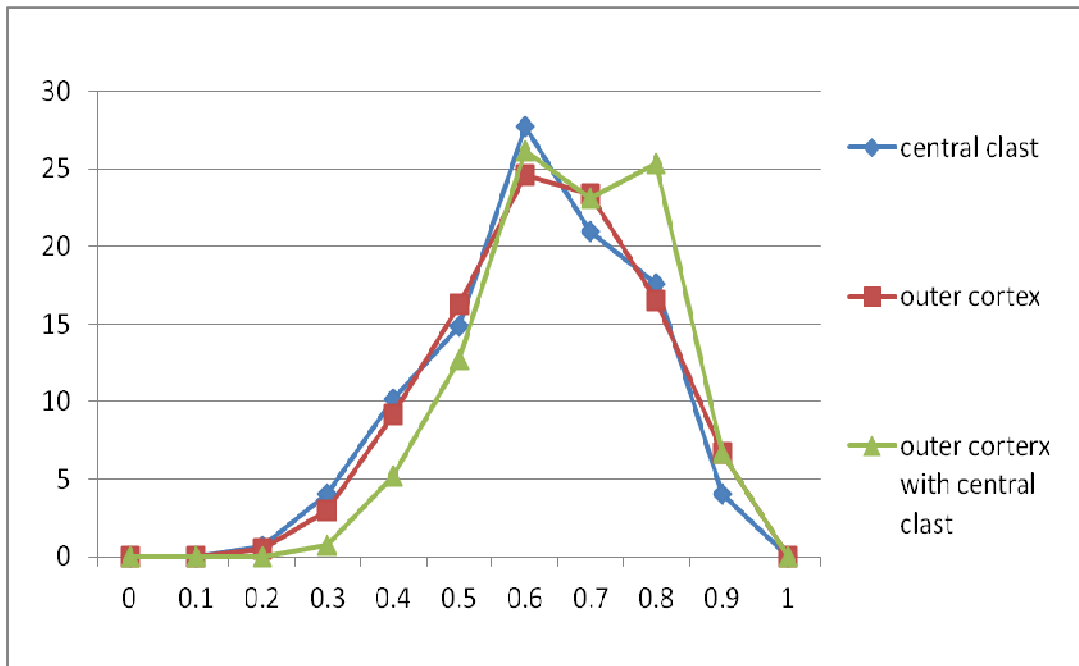


Figura 19 Roundness dei clasti tracciati sul Fotomosaico, rappresentativa del GCL

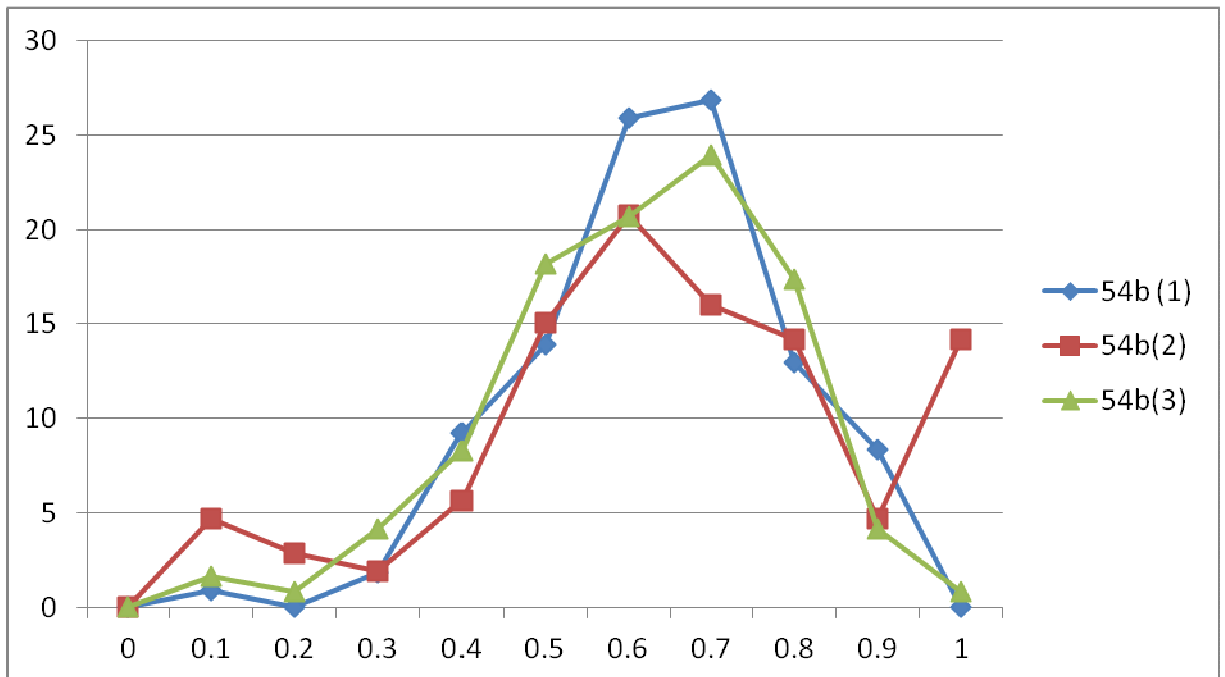


Figura 20 Roundness dei clasti mappati su foto da microscopio ottico rappresentative del CL

5. Conclusioni

- Le distribuzioni granulometriche mostrano che i nuclei dei *clast-cortex grains* contenuti nel *Grain Cortex Layer* sono simili ai clasti spigolosi presenti nel *Cataclastic Layer*, $D= 1.5$
- Il descrittore di forma *Solidity* rende evidente che i clasti al nucleo dei *clast-cortex grains* hanno forma simile a quella dei clasti del *Cataclastic Layer*.
- Per quanto riguarda i descrittori di forma *Circularity*, *Roundness* ed Orientamento non si osservano differenze per i clasti appartenenti al *Cataclastic Layer* e i clasti del soprastante *Grain Cortex Layer* .
- Le distribuzioni suggeriscono che il meccanismo di formazione delle microstrutture presenti nel *Grain Cortex Layer* comporti il rimaneggiamento dei clasti ‘spigolosi’ presenti nel *Cataclastic Layer*. Il rotolamento (probabilmente cosismico) dei clasti porterebbe quindi alla formazione dei *clast cortex grains*, con scarsa frammentazione dei clasti del *Cataclastic Layer* divenuti i clasti al nucleo della microstruttura.

In futuro prevediamo di

- confrontare dati provenienti da campioni tagliati con diversa orientazione rispetto la superficie di slip.
- Eseguire Analisi di Immagine utilizzando altri software, preposti per il calcolo di diversi descrittori di forma.

Bibliografia

Turcotte Donald L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.

Smith, S.A.F., Billi, A., Di Toro, G. & Spiess, R. (2011) *Microstructures of Principal Slip Zones in Limestone, and Implications for the Seismic Cycle (Tre Monti fault, central Apennines, Italy)*, Pure and Applied Geophysics, doi:10.1007/s00024-011-0267-5

Heilbronner, R., Keulen, N., 2006. *Grain size and grain shape analysis of fault rocks*. Tectonophysics, 427,199-216.

Sammis et al (1986) *Self-similar cataclasis in the formation of fault gouge*, Pure and Applied Geophysics, 124, 53-78

Sammis et al (1987) *The kinematics of gouge deformation*, Pure and Applied Geophysics, 125, 777-812

Cladouhos, 1999, *Shape preferred orientations of survivor grains in fault gouge*, Journal of Structural Geology 21 (1999) 419-436