

455608

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Sedi Consorziatae: Università degli studi di GENOVA
Università degli studi di URBINO

DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE AMBIENTALI (SCIENZA DEL MARE)
~ IX CICLO~

APPLICAZIONE DI UN METODO AUTOMATICO PER L'ESTRAZIONE DI
PARAMETRI MORFOMETRICI DA CLASTI PER UNA CARATTERIZZAZIONE
DI SEDIMENTI MARINI E COSTIERI ANTARTICI IN OTTICA
PALEOAMBIENTALE

ew

Tutore

Prof. G.P. Fanzutti

Dipartimento di Scienze Geologiche,
Ambientali e Marine
UNIVERSITÀ DI TRIESTE

Dottoranda

Dott.ssa Ioanna Protopsalti '65

Coordinatore

Prof. A. Brambati

Dipartimento di Scienze Geologiche,
Ambientali e Marine
UNIVERSITÀ DI TRIESTE

“Comunque vada, sarà un successo!”

(P. Chiambretti, Sanremo 1997)

0199070

a Cristiano

INDICE

1. CENNI SULL'EVOLUZIONE DEL PENSIERO MORFOMETRICO.....	1
1.1 <i>Indici di Forma Complessiva ("Form").....</i>	2
1.2 <i>Indici di Sfericità.....</i>	5
1.3 <i>Indici di Arrotondamento.....</i>	8
2. INTRODUZIONE.....	11
2.1 <i>Obiettivi della ricerca.....</i>	12
3. METODI DI LABORATORIO.....	14
3.1 <i>Preparazione chimica dei campioni.....</i>	14
3.2 <i>Presentazione del Metodo Automatico.....</i>	15
4. VALIDAZIONE DEL METODO AUTOMATICO.....	18
4.1 <i>Confronto con altri tipi di metodo.....</i>	20
4.2 <i>Validazione del Perimetro.....</i>	21
4.3 <i>Validazione dell'Area.....</i>	27
4.4 <i>Validazione degli Assi.....</i>	29
4.4.1 <i>Asse maggiore (AS₁).....</i>	29
4.4.2 <i>Asse intermedio (AS₂).....</i>	31
4.5 <i>Conclusioni delle operazioni di validazione.....</i>	33
5. CALCOLO DEGLI INDICI MORFOMETRICI DAI PARAMETRI ESTRATTI.....	34
5.1 <i>Fitting.....</i>	34
5.2 <i>Indici Morfometrici.....</i>	34
5.3 <i>Campioni esaminati.....</i>	35
6. ANALISI E DISCUSSIONE DEI DATI.....	39
6.1 <i>Fitting Rettangolare.....</i>	39
6.2 <i>Fitting Ellittico.....</i>	40
6.3 <i>Fitting Circolare.....</i>	42
6.4 <i>Indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox (1927).....</i>	43
6.5 <i>Projection Sphericity (A/Ac) di Tickell (1931).....</i>	43
6.6 <i>Projection Sphericity (dc/Dc) di Wadell (1935).....</i>	46
6.7 <i>Elongazione (Lüttig, 1956).....</i>	47
6.8 <i>Perimetro Specifico (P/Pc).....</i>	49
6.9 <i>Dissimmetria dell'AS₁ rispetto all'AS₂ (Cailleux, 1952).....</i>	50
6.10 <i>Dissimmetria dell'AS₂ rispetto all'AS₁.....</i>	52
6.11 <i>Spettri di frequenza di tutti gli indici morfometrici considerati.....</i>	54
6.12 <i>Discussione.....</i>	64
6.13 <i>Considerazioni conclusive.....</i>	65
7. SCELTA DEI DESCRITTORI DELLO "SHAPE".....	66
7.1 <i>Analisi Fattoriale ed estrazione dei descrittori dello "shape".....</i>	66
7.2 <i>Cluster Analysis e gerarchizzazione dello "shape".....</i>	70
7.3 <i>Considerazioni conclusive.....</i>	79
8. RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DEL METODO AUTOMATICO SU SEQUENZE SEDIMENTARIE.....	80
8.1 <i>Litofacies del Mare di Ross.....</i>	80
8.2 <i>Sequenze sedimentarie considerate.....</i>	81
8.3 <i>Elaborazione e discussione dei dati morfometrici delle carote.....</i>	83
9. CONCLUSIONI.....	89
10. BIBLIOGRAFIA.....	92

1. CENNI SULL'EVOLUZIONE DEL PENSIERO MORFOMETRICO

Il problema morfometrico, inteso o come misura e o rappresentazione dei caratteri quantificabili dallo "*shape*" di una particella sedimentaria, è da tempo dibattuto nel campo delle Scienze della Terra.

Un primo tentativo di classificazione dei granuli sabbiosi, coinvolgente il concetto di forma, è stato effettuato da Sorby nel 1880 (in Aschenbrenner, 1956). Successivamente numerosi ricercatori hanno considerato aspetti generali e specifici della forma dei granuli o, più in generale, dei clasti proponendo vari indici¹, per una sempre più completa definizione del problema.

Un'utile rassegna dei diversi tentativi intrapresi, e della conseguente evoluzione del pensiero morfometrico a riguardo, è riassunta nella memoria di Barrett (1980).

Lo stesso Barrett (1980) puntualizza il concetto dello "*shape*". Questo include ogni aspetto della forma complessiva ["*overall shape*" o "*form*" secondo Sneed & Folk (1958)], dell'arrotondamento e della tessitura superficiale del singolo clasto.

- La forma complessiva "*form*" rappresenta una proprietà di primo ordine che riflette le variazioni nelle proporzioni della particella. Tutti gli indici che misurano la forma spesso sono rapporti e combinazioni dei tre assi del clasto (asse maggiore, asse intermedio, asse minore). Secondo Barrett gli indici che misurano la sfericità (almeno quelli basati sui tre assi principali) possono essere considerati descrittori della forma fondamentale. In letteratura troviamo, tuttavia, anche altri indici di sfericità che comprendono in sé qualche "pizzico" di informazione sull'arrotondamento: sono quelli che si riferiscono alla sfera nelle misure tridimensionali, oppure al cerchio nelle misure bidimensionali.
- L'arrotondamento, proprietà di secondo ordine, descrive le variazioni degli angoli di una particella, cioè le variazioni che si sovrappongono alla forma fondamentale.
- La tessitura superficiale, di terzo ordine nella scala gerarchica, si sovrappone all'arrotondamento: è una proprietà della superficie del granulo compresa tra due angoli consecutivi. Per questa terza proprietà, però, non sono stati ancora elaborati indici numerici.

¹Secondo Flemming (1965 p. 382) col termine "indice" viene indicata una funzione derivata dalla combinazione di vari parametri.

Forma fondamentale, arrotondamento e tessitura di superficie sono proprietà dello “*shape*” essenzialmente indipendenti poiché, in generale, ciascuna di queste può variare ampiamente senza generare sensibili variazioni sulle altre due.

1.1 Indici di Forma Complessiva (“form”)

Gli indici che misurano e descrivono la forma complessiva di una particella sono riassunti in *tabella 1.1*.

Dalle tre lunghezze assiali L (asse maggiore), I (asse intermedio) e S (asse

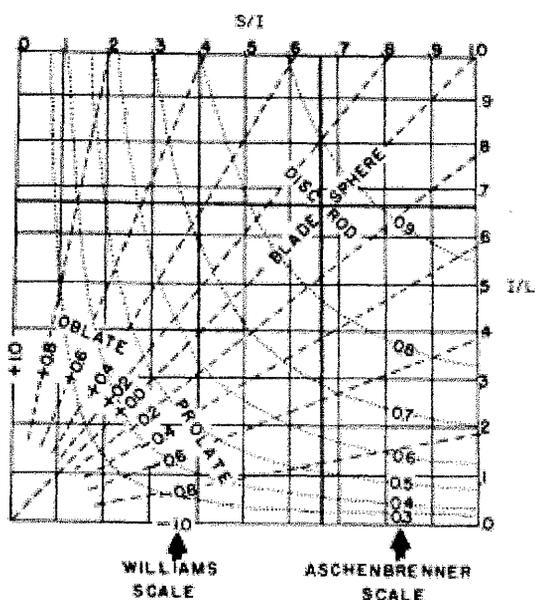


Figura 1.1. Diagramma di Zingg . Vengono evidenziate le relazioni tra i rapporti assiali I/L e S/I, la Working Sphericity di Aschenbrenner e lo Shape Factor di Williams (da Drake, 1970).

lamellare ed allungata. Altri autori quali Aschenbrenner (1956), Williams (1965) (in Drake (1970), hanno successivamente sviluppato il diagramma di Zingg proponendo nuovi indici (fig. 1.1).

Tuttavia la suddivisione del diagramma di Zingg in soli quattro campi formali risultava troppo rigida: è abbastanza comune che i clasti abbiano forme intermedie, che

possono essere ricavati sei rapporti, che sono stati utilizzati sempre in coppia per descrivere la forma complessiva da autori quali Zingg (1935), Lüttig (1956), Waltz (Hermite, 1959, in Flemming, 1965) e Blenk (1960, in Flemming, 1965).

Zingg (1935) propose una classificazione della forma complessiva, più volte ripresa e riproposta da altri ricercatori, “plottando” in un diagramma binario, I/L contro S/I e proponendo quattro classi formali fondamentali: discoidale, sferica,

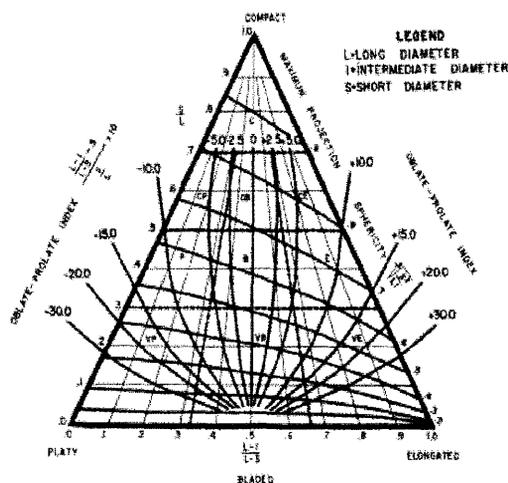


Figura 1.2. Diagramma di Sneed & Folk. Vengono evidenziate le relazioni tra S/L e (L-I)/(L-S), la Max Projection Sphericity e l'Oblate-prolate index. (da Sneed & Folk, 1958).

non possono essere apprezzate e descritte utilizzando questa suddivisione.

Uno spettro più ampio di campi o classi formali è fornito dal diagramma triangolare di Sneed & Folk (1958). In questo diagramma per ogni granulo si riporta, dalla base verso il vertice opposto, il valore del “*disk-rod index*”, e sui lati, parallelamente alla base, il valore di “*flatness index*”. Il punto di incontro di questi due valori ricade entro uno dei dieci campi formali in cui il diagramma è suddiviso (fig.2.2.)

Per la descrizione e la quantificazione della forma sono stati anche proposti indici non basati sulle combinazioni dei tre assi di un clasto, ma facendo riferimento ad un solido regolare di riferimento come la sfera, il cubo, particolari tipi di prisma ecc.

Heywood (1937, in Flemming, 1965, p. 384) propose il “*profile factor*”, definito come il rapporto tra l’area reale di una sezione assiale e l’area del rettangolo circoscrivente.

Rosfelder (1960, p. 217, in Flemming, 1965, p. 384), per riferirsi invece ad un’ellisse simmetrica, modificò l’indice di Heywood moltiplicandolo per una costante uguale a $\pi/4$.

Cailleux (1952) propose l’indice di dissimmetria definito come il rapporto AC/L dove L è la lunghezza dell’asse maggiore del granulo mentre AC è la distanza tra il punto di intersezione fra l’asse intermedio I e l’asse maggiore L e l’estremità A del granulo più lontana da C .

Altri indici formali sono stati proposti e discussi da vari autori nel corso dell’evoluzione del pensiero morfometrico, autori quali Lenk-Chevitch (1959), Blenck (1960), Konzewitsch (1961), Briggs et al. (1962), Flemming (1965), Dobkins & Folk (1958) ed altri citati da Dobkins & Folk (1970).

Williams (1965), propose un indice denominato “*shape factor*” comparando la forma di un clasto con quella di un’ellisse oblata² e prolata³. Tale indice è stato per prima volta proposto da Aschenbrenner (1956) ma il “*range*” risulta molto ampio ($0 \rightarrow \infty$) mentre l’indice proposto da Williams presenta un “*range*” compreso tra -1 e $+1$.

² Definizione della forma di un clasto che apparentemente è tabulare o discoidale. E’ caratterizzata da un rapporto tra l’asse intermedio e maggiore superiore a 2:3 ed un rapporto tra l’asse minore e quello intermedio inferiore a 2:3.

³ Definizione della forma di un clasto allungato, il cui rapporto tra l’asse minore e quello intermedio è superiore a 2:3 ed il rapporto tra l’asse intermedio e l’asse minore è inferiore a 2:3.

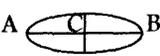
INDICI DI FORMA		
Wentworth 1922	Flatness Index	$\frac{L+I}{2S}$
Wentworth 1922	Isometry	$\frac{L+S}{I}$
Zingg 1935		$\frac{I}{L}, \frac{S}{I}$
Heywood 1937	Profile Factor	$\frac{A_s}{A_r}$
Cailleux 1952	Dissimetry	$\frac{AC}{AB}$ 
Lüttig 1956	Degree of Elongation: sigma (σ) Degree of Flatness: pi (π)	$\sigma = \frac{Ix100}{L}, \pi = \frac{Sx100}{L}$
Aschenbrenner 1956	Shape factor	$\frac{LxS}{I^2}$
Waltz (Hermite 1959)		$\frac{L}{S}, \frac{I}{S}$
Sneed & Folk 1958	Flatness index Disc-rod index	$\frac{S}{L}, \frac{L-I}{L-S}$
Rosfelder 1960	Profile Factor	$\frac{A_s}{A_r} \times \pi/4$
Blenk 1960		$\frac{S}{L}, \frac{S}{I}$
Williams 1965	Shape factor	$1 - \frac{LxS}{I^2}$ if $I^2 > LxS$ $\frac{I^2}{LxS} - 1$ if $I^2 \leq LxS$
Dobkins & Folk 1970	Oblate-prolate index	$\frac{10\left(\frac{L-I}{L-S}\right) - 0.5}{S/L}$

Tabella 1.1. Indici di Forma. L = asse maggiore; I = asse intermedio; S = asse minore; As = area di una generica sezione assiale del granulo; Ar = area del rettangolo circoscritto al granulo. La terminologia è conforme alla originale proposta dagli Autori.

1.2 Indici di Sfericità

E' la misura della forma di una particella in rapporto a quella di una sfera equivalente. (Allaby & Allaby, 1990, alla voce “*sphericity*”).

Sfericità ed arrotondamento sono state riconosciute come proprietà distinte fin dall'anno 1271 (Krynine, 1956 in Dobkins & Folk, 1970, p. 1178) ma ancora oggi vengono spesso confuse.

La proposta del primo indice di sfericità viene attribuita a Wentworth (1922a) il quale però, non ha differenziato le due proprietà ed è stato Wadell (1932) a chiarire questa distinzione (Dobkins & Folk, 1970).

Da allora molti altri autori hanno proposto indici diversi, anche se alcuni di essi non sono mai stati successivamente ripresi e utilizzati. Un compendio di tali indici viene riportato nella *tabella 1.2*.

Secondo Riley (1941), nel periodo intercorso tra la proposta dell'indice di sfericità di Wentworth 1919(22) e quello di Wadell (1932), altri ricercatori come Pentland 1927, Cox 1927 e Tickell 1931 hanno discusso altri indici per la misura bidimensionale di sfericità comparando il granulo con un cerchio circoscritto, anche se essi li hanno impropriamente definiti indici di arrotondamento. Comunque, secondo Barrett (1980) tutti gli indici che fanno riferimento ad una forma geometrica non sono indici “puri” della forma complessiva (“*form*”) ma includono anche altre informazioni.

Come detto, per ricercatori quali Flemming (1965), Drake (1969), Ricci Lucchi (1980), Wadell (1932) fu il primo a proporre un indice “puro” per la misura della sfericità, definito come il rapporto tra l'area superficiale della sfera di uguale volume e l'area superficiale del granulo. Secondo Barrett (1980), tale indice è concettualmente abbastanza complicato perché include anche informazioni di arrotondamento.

In un suo articolo successivo, Wadell 1934(a), ha sviluppato il concetto di “sfericità operativa” (“*working sphericity*”) perché la superficie di un granulo è spesso accidentata e pertanto non è pratico misurarne l'area. Questo indice viene definito come il rapporto tra il volume del granulo ed il volume della sfera circoscritta.

In un altro articolo del 1935 (in Riley, 1941) Wadell parlò della “*projection sphericity*” definita come il rapporto tra il diametro del cerchio che ha la stessa area del granulo ed il diametro del minimo cerchio circoscritto.

Riley nel 1941, propose il suo indice di sfericità, denominato "*inscribed circle sphericity*", e definito dalla radice quadrata del rapporto tra il diametro del massimo cerchio inscritto nel granulo ed il diametro del minimo cerchio circoscritto.

Krumbein (1941) riprese e rielaborò la sfericità operativa di Wadell mentre Corey (1949) sviluppò un nuovo indice per la sfericità, sempre basato sulla combinazione dei tre assi principali; Folk (1955) propose l'indice denominato "*maximum projection sphericity*".

Aschenbrenner (1956) adattò l'indice di sfericità reale ("*true sphericity*") di Wadell (1932) alle caratteristiche geometriche di un "*tetrakaidecaedron*" denominandolo "*working sphericity*".

Infine Rosfelder (1960, in Flemming 1965 p.387) adattò un indice presentato da Durand e de Lara (1953) definito come il rapporto tra la massima *cross-sectional* area di un ellissoide di riferimento e la *cross-sectional* area della sfera nominale, chiamandolo "*portance*".

Un altro semplice approccio, ma molto usato per la determinazione della sfericità, è quello della comparazione visiva del granulo in esame con profili di granuli riportati in apposite tavole, redatte da Rittenhouse (1943) o da Catacosinos (1965). Tuttavia questo rimane un metodo per confronto i cui risultati sono sempre legati alla soggettività dell'operatore (Griffiths,1967).

INDICI DI SFERICITÀ			
Pentland 1927	Roundness (Petland, 1927) Projection sphericity (φ_p) (Riley, 1941)	$\frac{A}{A_a}$	$A = \text{area del granulo (in proiezione);}$ $A_a = \text{area del cerchio avente la stessa}$ area del granulo.
Cox 1927	Roundness (Cox, 1927) Projection sphericity (φ_a) (Riley, 1941)	$\frac{4\pi A}{P^2}$	$P = \text{perimetro del granulo.}$
Tickell 1931	Roundness (Tickell, 1931) Projection sphericity (φ_i) (Riley, 1941)	$\frac{A}{A_c}$	$A_c = \text{area del minimo cerchio}$ circooscritto.
Wadell 1932	True sphericity	$\frac{A_s}{A_g}$	$A_s = \text{area della sfera di ugual}$ volume; $A_g = \text{area del clasto.}$
Wadell 1934a	Working Sphericity	$\sqrt[3]{\frac{V_g}{V_s}}$	$V_g = \text{volume del clasto;}$ $V_s = \text{volume della sfera circoscritta.}$
Wadell 1935	Projection Sphericity (φ_w)	$\frac{d_c}{D_c}$	$d_c = \text{diametro del cerchio avente la}$ $\text{stessa area del granulo;}$ $D_c = \text{diametro del minimo cerchio}$ circooscritto.
Riley 1941	Inscribed circle sphericity (φ_o)	$\sqrt{\frac{i}{D_c}}$	$i = \text{diametro del massimo cerchio}$ inscritto.
Krumbein 1941	Intercept sphericity	$\sqrt[3]{\frac{I \times S}{L^2}}$	$L = \text{asse maggiore;}$ $I = \text{asse intermedio}$ $S = \text{asse minore.}$
Krumbein 1942	Elliptical volume sphericity	$\sqrt[3]{\frac{S \times I}{L^2}}$	
Corey 1949		$\frac{S}{\sqrt{L \times I}}$	
Folk 1955	Max Projection sphericity (M.P.A.)	$\sqrt[3]{\frac{S^2}{L \times I}}$	
Aschenbrenner 1956	Working sphericity	$\frac{12.8^3 \sqrt{P^2 \times Q}}{1 + P(1+Q) + 6\sqrt{1 + P^2 \times (1+Q^2)}}$	$P = I/L$ $Q = S/L$
Rosfelder 1960	Portance (w)	$\sqrt[3]{\frac{L \times I}{S^2}}$	

Tabella 1.2. Indici di Sfericità. La terminologia è conforme alla originale proposta dagli Autori.

1.3 Indici di Arrotondamento

L'arrotondamento è una misura dell'acutezza degli angoli di una particella ed è una proprietà indipendente dalla sfericità. L'affermazione fu fatta da Wadell (1932), il quale ebbe una discussione scientifica con Wentworth, ma alla fine prevalse il suo punto di vista. Quindi l'arrotondamento è una proprietà tipica della sfera, anche se altre forme possono ugualmente essere arrotondate (Barrett, 1980).

Quando un granulo è appena liberato dalla roccia madre, presenta numerosi spigoli "vivi" i quali si logorano man mano che esso viene trasportato da un vettore sedimentario. Alla fine esso presenta contorni lisci anche se la forma primitiva non viene modificata sostanzialmente. Per esempio un granulo equiassiale diventerà una sfera perfetta, ma difficilmente diventerà allungato o piatto, a meno di fratturazioni intervenute nel corso della sua "storia".

Quindi l'arrotondamento indica l'entità dello smussamento delle asperità, cioè dell'usura subita dal granulo durante il trasporto. Questa proprietà dipende, oltre che dalla distanza percorsa dal granulo, anche dalla durata e dall'intensità del trasporto, dal tipo di roccia e delle dimensioni della particella.

Sebbene l'arrotondamento sia una proprietà tridimensionale, tutti i metodi proposti per misurarlo considerano il granulo in due dimensioni. Di fatto si lavora in sezione: quindi su granuli sezionati o proiettati sul loro piano di equilibrio.

L'importanza del punto più acuto presente sul profilo del granulo è stata per la prima volta riconosciuta da Wentworth (1919). Esso ha proposto come indice di "shape" il rapporto tra il diametro del cerchio adattato nell'angolo più acuto del granulo ed il diametro del granulo che insiste su quell'angolo (non si tratta sempre dell'asse maggiore del granulo, come hanno constatato Dobkins & Folk (1970) che hanno riproposto la stessa formula modificata).

Wentworth (1922b), in un suo articolo successivo, modificò la formula sostituendo il denominatore con la media aritmetica degli assi maggiore e minore.

Cailleux (1947) propose una misura simile, ma fu criticata da Kuenen (1956), Dobkins & Folk (1970), Swan (1974) e Folk (1977) perché nella stessa misurazione venivano fusi sia caratteri di arrotondamento che di forma complessiva.

Kuenen (1956) modificò la formula proposta da Cailleux sostituendo l'asse maggiore con l'asse intermedio.

Dobkins & Folk (1970) modificarono quella di Wentworth (1919) ponendo come denominatore il diametro del massimo cerchio inscritto, mentre Swan (1974)

cambiò il nominatore della formula di Dobkins & Folk con la media aritmetica dei diametri di due cerchi adattati nei due angoli più acuti.

Un concetto di arrotondamento, indipendente dal carattere degli angoli, è stato proposto da Szadeczky-Kardoss (1933, in Sames, 1966), denominato Rho (ρ). Questo è stato definito come il rapporto, espresso in percentuale, tra la lunghezza delle parti convesse lungo la circonferenza del granulo e la lunghezza della circonferenza.

Un compendio degli indici di arrotondamento viene riportato nella *tabella 1.3*.

Come per la sfericità, anche per l'arrotondamento sono state costruite tavole per la stima visiva da numerosi autori come Rusell & Taylor (1937), Powers (1953) e Krumbein (1941a). Quest'ultima è considerata la più soddisfacente e viene utilizzata fino ai nostri giorni (Haines & Mazzullo, 1988). Quasi tutte sono state redatte utilizzando l'indice di arrotondamento di Wadell (1932) eccetto quella di Sames (1966) che ha utilizzato l'indice di Szadeczky-Kardoss.

Un altro indice che, secondo Barrett (1980), include sia elementi di

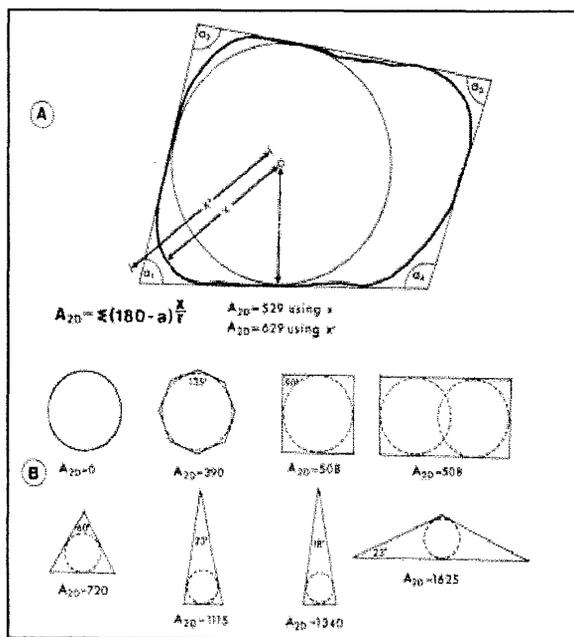


Figura 1.3. (A) Determinazione dell'angolarità bidimensionale di Lees. (B) Valori del grado di angolarità per varie figure regolari (da Lees, 1964).

arrotondamento che di forma complessiva ma che invece, secondo il suo proponente, è indipendente sia della sfericità che dell'arrotondamento classico è quello che Lees (1964) denominò "degree of angularity". Si determina il minimo quadrilatero circoscrivente il granulo e si misurano gli angoli interni. Si determina la massima circonferenza inscritta all'interno del granulo e si calcola il suo raggio r .

Si indica con x_i la distanza tra il centro della circonferenza e i vertici del quadrilatero e si calcola:

$$\sum (180^\circ - \alpha) \frac{x}{r}$$

L'angolarità aumenta all'aumentare dell'acutezza degli angoli e della distanza relativa tra i vertici del quadrilatero e il centro della circonferenza (fig. 1.3).

INDICI DI ARROTONDAMENTO			
Wentworth 1919	Shape index	$\frac{D_s}{D_x}$	$D_s =$ diametro del cerchio adattato nell'angolo più acuto; $D_x =$ diametro del granulo
Wentworth 1922		$\frac{D_s}{(L + S_m)/2}$	$S_m =$ asse minore nel piano di massima proiezione;
Wadell 1932		$\frac{(\sum_{k=1}^n D_k)/n}{D_i}$	$D_k =$ diametri de cerchi adattati negli angoli; $D_i =$ diametro del massimo cerchio inscritto.
Szadeczky-Kardoss 1933	ρ	$\frac{\text{Lenght of convex parts of C}}{C}$	$C =$ circonferenza del granulo.
Cailleux 1947		$\frac{D_s}{L} \times 1000$	$L =$ asse maggiore.
Kuenen 1956	Cailleux (1947) modificato	$\frac{D_s}{I}$	$I =$ asse intermedio.
Lees 1963	Angularity	$\sum (180^\circ - a) \frac{x}{r}$	$a =$ angolo; $x =$ distanza degli angoli dal centro del cerchio; $r =$ raggio del massimo cerchio inscritto.
Dobkins & Folk 1970	Wentworth (1919) modificato	$\frac{D_s}{D_i}$	
Swan 1974	Wadell (1932) modificato	$\frac{(D_{s1} + D_{s2})/2}{D_i}$	D_{s1} e $D_{s2} =$ diametri dei due cerchi adattati nei angoli più acuti.

Tabella 1.3. Indici di arrotondamento. La terminologia è conforme alla originale proposta dagli Autori.

2. INTRODUZIONE

Diverse metodologie di analisi per la definizione morfometrica dei clasti vengono impiegate, su campioni provenienti da depositi attuali o fossili, di riconosciuta origine, per cercare di associare ai diversi tipi di trasporto (fluviale, marino, eolico, glaciale) caratteristiche morfologiche peculiari. In questo modo, nei depositi fossili di origine incerta o in quelli alla cui formazione concorrono vettori sedimentari differenti (depositi misti) è possibile ottenere informazioni sui processi sedimentari all'origine del deposito stesso anche dai dati morfometrici.

Gli oggetti della misura sono comunemente rappresentati da ciottoli a causa della loro facile manipolabilità. L'estrazione dei parametri morfometrici, basati fondamentalmente sul rapporto tra assi ortogonali, avviene con sistemi di misura manuali (calibri), le misure del contorno vengono normalmente effettuate con curvimetri mentre quelle di superficie (proiettate sul piano x,y) si effettuano con planimetri.

Come i ciottoli, anche i granuli della sabbia conservano nella loro forma informazioni sui meccanismi di trasporto e sull'elaborazione da parte del mezzo sedimentario. In natura, inoltre, la frazione sabbiosa è molto più diffusa dalle ghiaie nelle successioni litologiche o negli ambienti sedimentari attuali e quindi il suo studio coinvolge potenzialmente un numero di ambienti e paleoambienti notevolmente maggiore.

Anche se meno diffusamente delle ghiaie (e quindi con una minore abbondanza in letteratura) pure la frazione sabbiosa è stata sottoposta ad analisi morfometriche. L'ostacolo tecnico che l'analisi di questa frazione pone è senz'altro rappresentato dalle dimensioni medie dei granuli, in quanto essi non possono essere manipolati facilmente. Quindi il loro studio necessariamente si limita alla posizione di equilibrio (piano x,y) riducendo il volume ad una forma piana e la superficie al profilo di massima proiezione.

Fino a pochi anni fa, lo studio morfometrico dei granuli di sabbia veniva eseguito "manualmente" utilizzando micrometri per la determinazione delle lunghezze e sagome e/o tavole di comparazione per l'apprezzamento dell'arrotondamento e della sfericità. Analizzando e misurando un granulo per volta, l'operazione risulta piuttosto lenta e, soprattutto, influenzata dalla soggettività dell'operatore.

L'introduzione di tecniche di digitalizzazione delle immagini, la larga diffusione di *personal computer* e l'utilizzo di software opportunamente elaborati,

almeno potenzialmente, consentono agli operatori l'estrazione di parametri formali con un buon grado di precisione.

Uno dei tipi di analisi attualmente in voga consiste nell'analizzare le proprietà legate al perimetro del singolo granulo secondo armoniche di Fourier (Ehrlich & Weinberg, 1970; Ehrlich et al., 1980; Schultz, 1980; Riestler et al. 1982; Dowdeswell, 1982; Mazzullo & Magenheimer, 1987; Mazzullo et al., 1986, 1992; Haines & Mazzullo, 1988; Mazzullo & Anderson, 1987; Orford & Whalley, 1991; Kennedy & Mazzullo, 1991; Diepenbroek et al., 1992; Thomas et al., 1995). Tuttavia, a nostro parere, questo sistema fa perdere rapidamente di vista la realtà fisica dell'oggetto sottoposto a misura.

In questo lavoro, invece, viene utilizzato per la prima volta un sistema esperto in grado di elaborare immagini bidimensionali di clasti acquisite con telecamera direttamente da microscopio o da un immagine fotografica.

Tale sistema, già impostato nell'ambito del PNRA dal DIBE (Università di Genova) in stretta collaborazione con il Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste, è stato ampiamente modificato, testato ed applicato. Con esso ci si propone di procedere all'analisi veloce dei campioni ed all'individuazione ed estrazione di misure di parametri morfometrici discriminanti delle proprietà formali.

2.1 Obiettivi della ricerca

Un primo obiettivo della ricerca era quello di verificare la potenzialità del metodo automatico, per mezzo di un confronto dei parametri morfometrici ottenuti in forma automatica con altri tipi di metodi attualmente in uso.

In questa fase della ricerca sono state utilizzate, dapprima forme geometriche-sintetiche, poi microfotografie di granuli regolari (sferule artificiali di vetro) e quindi microfotografie di un congruo numero di granuli reali etichettati affinché vi fosse garanzia di operare su popolazioni di dati perfettamente correlabili.

Il campo di applicazione della ricerca è rivolto alla frazione sabbiosa di sedimenti sciolti continentali, litorali e marini prossimi a Terra Nova Bay (Antartide).

La quantificazione dei diversi aspetti formali dei clasti è condizione essenziale per affrontare il problema del confronto, tra sedimenti (o frazioni granulometriche) di diversa genesi e “storia” sedimentaria.

La scelta di campioni provenienti da questo sito è stata motivata dalla ampia ed esclusiva diffusione di rocce intrusive di tipo granitoide, limitando potenziali variazioni morfometriche legate a diverse rocce madri. Inoltre le forme dei clasti possono essere considerate primarie, derivando fundamentalmente da fenomeni crioclastici, e verosimilmente non hanno subito eccessivi processi di trasporto, responsabili di elaborazione morfometrica secondaria. Operando pertanto in un ambiente così conservativo, variazioni anche modeste di parametri morfometrici registrate in diversi sub-ambienti (spiagge emerse, cordoni morenici, fondali marini) starebbero a provare la sensibilità e quindi la bontà del metodo proposto e quindi una sua facile estensione anche ad ambienti sedimentari a più spinta elaborazione dei granuli.

I sei campioni antartici: 2 spiagge (ADLS A, ADLN 7), 2 morene (TR 119, TR 129), 2 benne (MM 11, BN 34) sono stati comparati con due campioni di sabbie ad buon grado di elaborazione provenienti da litorali di mari temperati (Adriatico ed Ionio), assunti per apprezzare in modo immediato i *ranges* dei valori numerici assunti dagli indici morfometrici. In questa prima fase della ricerca sono stati elaborati circa 1600 granuli.

Una volta definiti i caratteri formali di ambienti sedimentari antartici attuali si è passati al confronto con quelli relativi a depositi sedimentari “antichi” carotati sui fondali del Mare di Ross. Sono stati elaborati circa 3200 granuli prelevati da 16 livelli appartenenti a 3 carote (2 prelevate nel Drygalsky Basin e 1 prelevata nel Joides Basin).

Lo scopo finale della ricerca consisteva nel verificare se queste ultime successioni sedimentarie, poco differenziabili da un punto di vista stratigrafico e mineralogico-composizionale, risultavano omogenee anche dal punto di vista della forma dei granuli. Ciò per poter avanzare ragionevoli ipotesi sulla loro genesi ed evoluzione nel tempo.

3. METODI DI LABORATORIO

3.1 Preparazione chimica dei campioni

Gli studi morfometrici sulla frazione sabbiosa utilizzano le caratteristiche della forma e del contorno solitamente dei granuli di quarzo (Wadell & Haxon, 1932; Wadell, 1935; Curray & Griffiths, 1955; Crook, 1968; Dowdeswell, 1982; Riester et al., 1982; Mazzullo & Magenheimer, 1987; Hains & Mazzullo, 1988; Mazzullo et al., 1986, 1992; Smith & O'Connell, 1990; Evans et al., 1994; Lee & Osborne, 1995). Questo minerale viene scelto perché abbondantemente diffuso in quasi tutti gli ambienti sedimentari e quindi bene si presta per confronti fra campioni provenienti da ambienti e zone diverse.

Dai campioni esaminati, raccolti in buona parte in ambiente antartico, è stata separata la classe granulometrica 500/210 μm , cioè la “sabbia media”. La frazione sabbiosa più grossolana non è stata utilizzata perché essa o è molto scarsa o assente in altri ambienti sedimentari con cui si vuole operare un confronto. Inoltre essa spesso è composta per gran parte da granuli polimineralogici.

Questa frazione viene preventivamente trattata con HCl 18% a caldo per eliminare la frazione carbonatica e poi accuratamente lavata su setaccio ed asciugata.

Nei sedimenti clastici antartici i feldspati sono minerali molto abbondanti e spesso confondibili con il quarzo. Tuttavia essi sono più usurabili e quindi, indiziariamente, più arrotondati. Quindi essi vanno eliminati dal campione in analisi. Per questo motivo si è sperimentato l'attacco della frazione sabbiosa a freddo con HF in soluzione al 50%, in modo da distinguere facilmente i due minerali, come suggeriscono Mazzullo & Anderson (1987) riferendosi a Schultz (1980).

Schultz ha sperimentato che l'immersione dei granuli di quarzo in acido fluoridrico fino a 30 minuti non provoca cambiamenti significativi sulle caratteristiche della loro forma complessiva. D'altra parte i feldspati reagiscono in fretta: infatti, dopo 60 secondi dalla loro immersione nell'acido, essi appaiono già con superfici ampiamente intaccate e bianche. Il tempo sufficiente per la distruzione dei feldspati varia da 1 a 5 minuti, a seconda della taglia dei granuli.

Ripetendo l'esperimento di Schultz sulla frazione prescelta, con concentrazioni di HF diverse e per tempi di reazione progressivamente crescenti, dopo attenti controlli al microscopio, si è ricavato che il migliore risultato si ottiene con soluzione di HF al 50% a freddo per 3 minuti. I feldspati risultano completamente disciolti o, comunque, facilmente distinguibili dai granuli di quarzo per la notevole riduzione di

volume e per il caratteristico aspetto assunto. La frazione attaccata viene poi lavata accuratamente su setaccio ripetutamente immerso in bagno ad ultrasuoni per allontanare i residui di corrosione. Il campione quindi pulito viene asciugato.

3.2 Presentazione del Metodo Automatico

Dopo la preparazione chimica dei campioni i soli granuli di quarzo, sono pronti per essere acquisiti ed elaborati.

La metodologia adottata è stata suddivisa in tre fasi principali:

1. acquisizione dell'immagine;
2. pre-elaborazione dell'immagine digitalizzata;
3. estrazione dei parametri (fig.3.1).

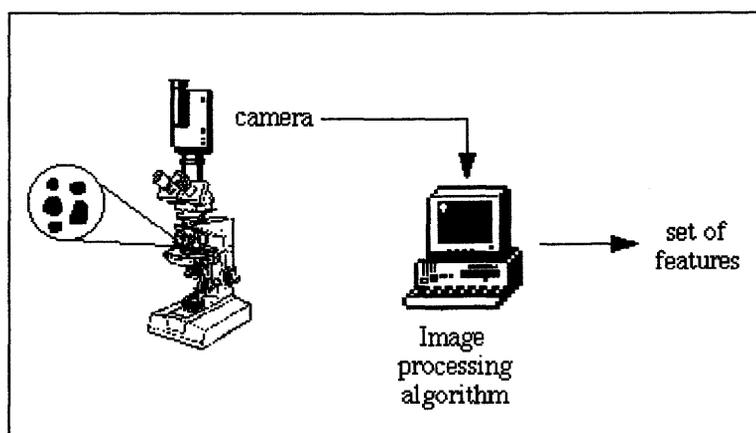


Figura 3.1. L'input dell'intero sistema è un insieme di granuli posti sul vetrino e l'output è una lista di parametri (features) associati ad ogni granulo.

1. L'acquisizione dell'immagine dei granuli di quarzo è stata condotta in due modi:
 - nelle prime fasi della ricerca, mediante acquisizione fotografica con microscopio ottico-mineralogico modello *Leitz Wetzlar* provvisto di oculare 10x ed obiettivo 2.5/0.08, collegato ad un tubo di prolunga fotografica. Per le riprese fotografiche è stata scelta una pellicola a grana fine (Kodak Ectar 100), onde ottenere una maggior definizione degli oggetti. Gli ingrandimenti fotografici sono stati, poi, digitalizzati per mezzo di scanner. Il ricorso all'ingrandimento su carta fotografica si è reso necessario, in questa prima fase, per l'esecuzione dei test di validazione del metodo sulla stessa popolazione di granuli, nonché per migliorare la scrittura del programma di calcolo dei parametri.

- una volta perfezionato il programma di calcolo dei parametri, l'acquisizione dell'immagine è avvenuta in forma diretta per mezzo di una telecamera CCD a colori montata sullo stesso microscopio ottico-mineralogico e sua digitalizzazione per mezzo di un convertitore analogico-digitale *Matrox Meteor*.

Durante tutti e due i modi di acquisizione si è posta particolare attenzione a riportare i granuli alla stessa scala dimensionale per mezzo di un micrometro Leitz in cui 1mm è suddiviso in 100 tacche.

2. L'interesse della ricerca era rivolto essenzialmente al rilevamento ottimale dei contorni dei granuli. Per questa ragione i granuli di quarzo sono stati posti su un vetrino piano trasparente e illuminati dal basso, curando di ottenere zone fortemente contrastate, molto scure e molto chiare corrispondenti, rispettivamente, ai granuli e allo sfondo.

Particolare cura è stata posta nel correggere la disposizione casuale assunta dai granuli sul vetrino per evitare che questi potessero sovrapporsi tra loro o risultare tangenti. Ciascuna immagine è quindi composta da granuli ben distinti dallo sfondo, non sovrapposti né fusi tra loro per tangenza.

Il tipo di acquisizione ha consentito di ottenere immagini a livelli di grigio con istogramma spiccatamente bimodale, con due valori massimi relativi ai valori dello sfondo (chiaro) e a quelli dei granuli (scuro).

E' stata inoltre riscontrata nelle immagini la presenza di rumore causato dal sistema di acquisizione: il problema è stato risolto mediante opportune tecniche di filtraggio digitale delle immagini.

Nel passo successivo del processo di acquisizione si individuano tutti i granuli presenti nell'immagine mediante un'operazione automatica di estrazione di regioni ("segmentazione a soglia") e si assegna a ciascun granulo una etichetta, affinché il sistema lo riconosca in modo univoco.

La foto della *figura 3.2* rappresenta un esempio di segmentazione di una immagine effettuata dal calcolatore: i granuli sono rappresentati dai contorni chiusi.

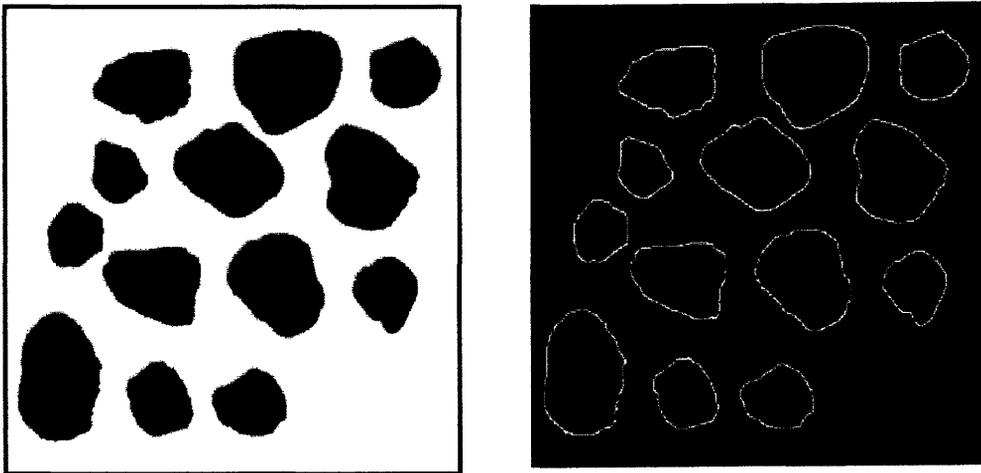


Figura 3.2. Esempio di immagine digitalizzata (formato .RAW) ed immagine segmentata.

L'immagine segmentata rappresenta il punto di partenza dal quale inizia la fase di estrazione di parametri.

Il formato delle immagini utilizzato è di 512×512 pixel a 256 livelli di grigio, ma la flessibilità del sistema consente, al contrario di altri programmi, di modificare il formato delle immagini a seconda delle necessità operative e conformemente alla risoluzione delle immagini.

3. Il cuore del sistema è rappresentato da un programma automatico di elaborazione di immagini ed estrazione di parametri, appositamente scritto in linguaggio C (compilatore XLC, versione 1.3.0), su un calcolatore IBM RISC 600 (Sistema

- Perimetro esterno ed interno di ciascun granulo;
- Area;
- Assi maggiore ed intermedio (in campo 2D);
- Quattro semiassi con il loro centro di intersezione;
- Fitting Rettangolare;
- Fitting Ellittico;
- Fitting Circolare.

Operativo AIX 3.2). I clasti identificati nella precedente fase vengono elaborati per estrarre da ciascuno di essi i parametri formali ritenuti caratteristici.

Il programma effettua in modo automatico le operazioni, svolte di solito manualmente, a livelli di precisione confrontabili con

metodi manuali o automatici ma con bassi tempi di elaborazione (1-2 minuti per un immagine di circa 20 granuli). I parametri forniti dal programma sono riassunti nella tabella 3.1.

Tabella 3.1. Parametri ed indici estratti automaticamente.

4. VALIDAZIONE DEL METODO AUTOMATICO

Un importante passo relativo a questa fase della ricerca è stato quello di verificare la potenzialità e l'affidabilità del metodo automatico confrontando i valori dei parametri estratti automaticamente con i medesimi ottenuti con altri tipi di metodo, dapprima su forme geometriche-sintetiche, quindi su granuli regolari (sferule artificiali di vetro) e poi su un congruo numero di granuli reali etichettati.

Al fine di valutare il numero ottimale di granuli da analizzare per ogni campione, si è utilizzato lo studio dell'andamento dell'*Errore Standard*⁴, ripetendo la misura su una popolazione progressivamente crescente di granuli. I parametri dipendenti dalle dimensioni dei granuli (perimetro, area, asse maggiore, asse intermedio) sono stati normalizzati per mezzo di reciproci rapporti.

Per i diversi test effettuati è stato scelto il campione TR 119 (classe 500-210 μ m) perché presentava un'ampia variabilità formale dei granuli.

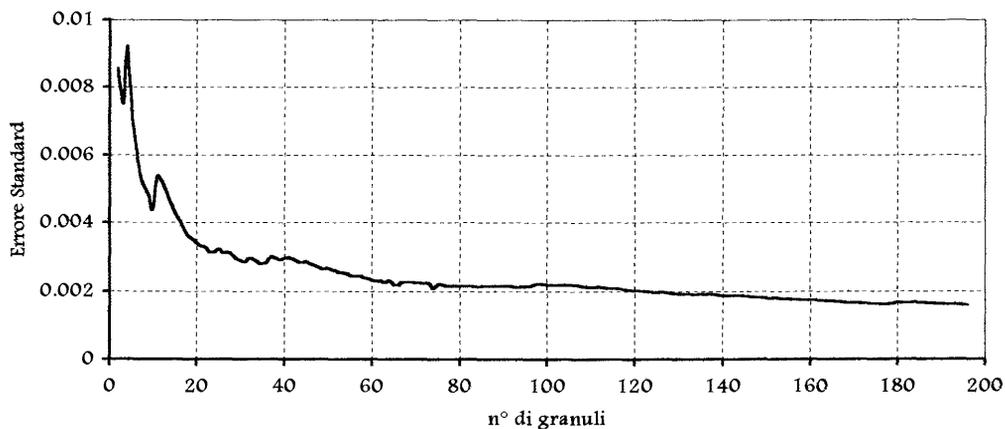


Figura 4.1. Andamento dell'errore standard per il rapporto Area/Perimetro.

⁴Viene definito *Errore Standard* il rapporto tra la deviazione standard dei valori del parametro considerato e la radice quadrata del numero di granuli considerati.

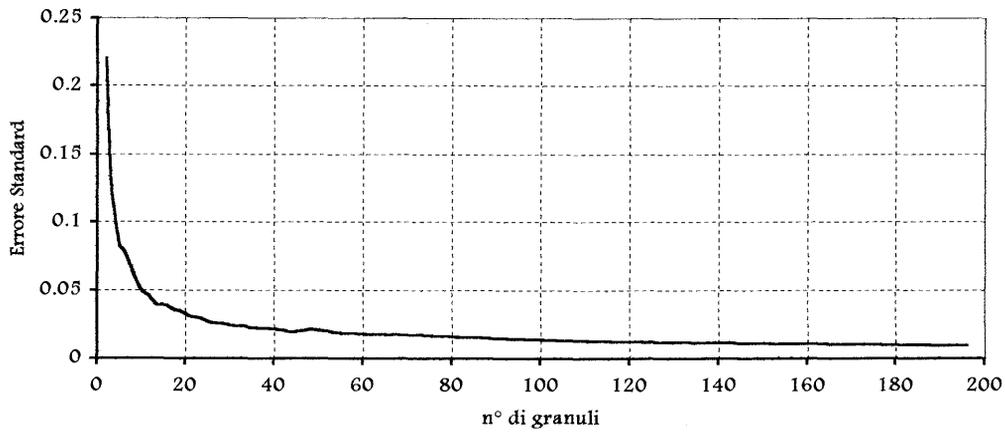


Figura 4.2. Andamento dell'errore standard per il rapporto AS2/AS1.

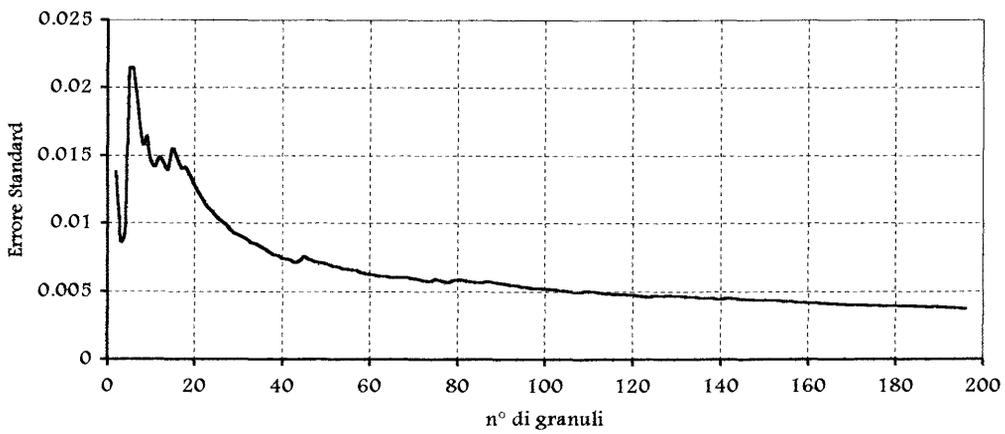


Figura 4.3. Andamento dell'errore standard per il Fitting Ellittico.

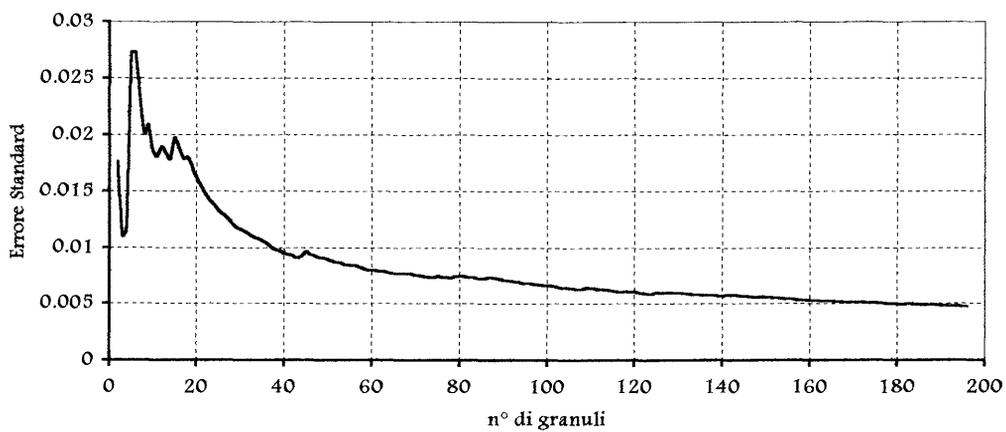


Figura 4.4. Andamento dell'errore standard per il Fitting Ellittico.

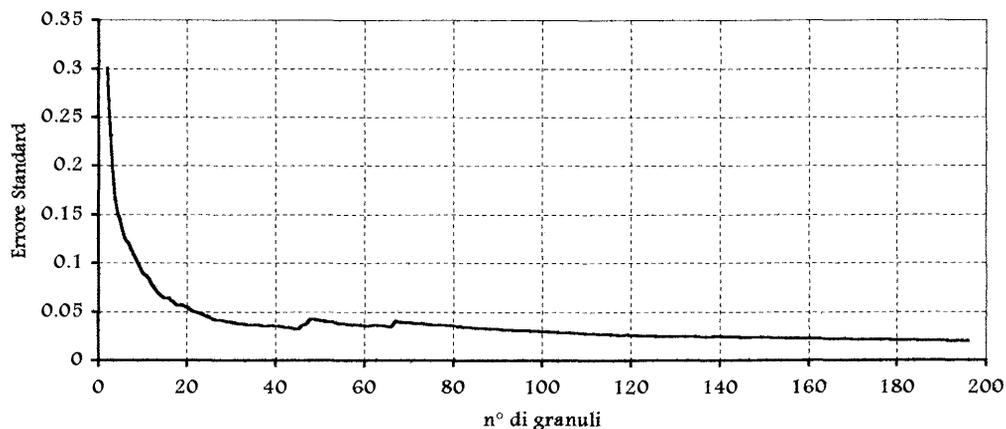


Figura 4.5. Andamento dell'errore standard per il Fitting Circolare.

Dai grafici delle figure 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, si evince che oltre un certo numero di granuli, variabile a seconda del parametro considerato, l'errore standard si stabilizza. Per rientrare nelle condizioni ottimali si è optato per campioni di 200 granuli.

4.1 Confronto con altri tipi di metodo

Per le misure sono stati scelti quattro fotogrammi, per un totale di circa 70 granuli, dopo aver verificato che il sottocampione fosse sufficiente per la significatività dei test (figg. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5).

Il confronto è stato effettuato con altri due metodi attualmente in uso.

- Metodo semiautomatico: E' stato usato lo strumento LEITZ ASM 68 K (*Semi-automatic image analysis system*). Si tratta di un metodo lento e "soggettivo" perché i risultati dipendono dalla pratica dell'operatore. Proprio per questa ragione, ogni valore ricavato con questo dispositivo, è stato attribuito non ad una singola misura ma ad una media di 3-4 determinazioni. Trattandosi di un metodo manuale, il profilo di ogni granulo deve essere digitato per mezzo di punti discontinui: nel nostro caso circa 30-40 punti.
- Metodo di acquisizione del profilo del granulo con sistema vettoriale (Catani com. person.).

4.2 Validazione del Perimetro

Dalle prove di validazione del perimetro, sono emerse alcune incongruenze del programma, nella sua primitiva formulazione (Pazzi e Degli Abbati, 1992; Venturi et al., 1994) nella determinazione di questo parametro. Esse sono state, di volta in volta, corrette nel corso della sperimentazione.

Infatti ad un primo esame dei valori forniti dal programma automatico, si è notato che, in numerosi casi, il valore del perimetro risultava minore della somma dei due assi del granulo, contrariamente a quanto, anche per via intuitiva, emerge:

$$\text{Perimetro} < (\text{AS}_1 + \text{AS}_2);$$

Infatti è lecito aspettarsi che la somma degli assi, sia piuttosto prossima alla metà del perimetro:

$$(\text{AS}_1 + \text{AS}_2) = \text{Perimetro} / 2$$

IMMAGINI SINTETICHE

Da prove effettuate su immagini sintetiche, si è evidenziata la medesima incongruenza.

Per esempio da immagini rettangolari, con lunghezze dei lati misurate in pixel, pari a AS_1 e AS_2 , si otterrebbero le seguenti misure:

1) rettangolo con $\text{AS}_1 = 54$ pixel ed $\text{AS}_2 = 49$ pixel

Perimetro "reale" = 206 pixel

2) rettangolo con $\text{AS}_1 = 91$ pixel ed $\text{AS}_2 = 87$ pixel

Perimetro "reale" = 356 pixel

Invece i primi risultati elaborati risultavano:

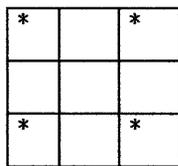
	AS ₁	AS ₂	PERIMETRO REALE	PERIMETRO MISURATO
1)	54	49	206	119
2)	91	87	356	183

Si è allora analizzato nel dettaglio il comportamento del programma, riscontrando che il calcolo del perimetro di un oggetto veniva effettuato sulla base dei pixel di contorno, cioè dei pixel appartenenti a linee di contrasto⁵.

Quando si rileva un contrasto, il pixel che appartiene all'oggetto (ed anche alla linea di contrasto) viene etichettato come pixel di contorno, e va ad incrementare di una unità il contatore della lunghezza del perimetro.

Tale contatore viene però incrementato una sola volta sia per pixel che si trovano su una linea di contrasto (cosa che è effettivamente corretta) sia per pixel che si trovano su uno spigolo (che genera errori nella misura). Per esemplificare questo comportamento, si considerino i seguenti casi:

a) Oggetto quadrato 3×3 (si assuma come unità di misura 1 mm)

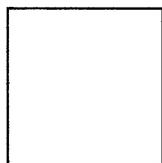


Perimetro effettivo: 12 mm

Perimetro calcolato: 9 mm

I pixel contrassegnati con “*” sono conteggiati una sola volta, e causano la perdita di precisione.

b) Oggetto quadrato 1×1 (si assuma come unità di misura 1 mm)

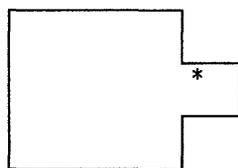


Perimetro effettivo: 4 mm

Perimetro calcolato: 1 mm

c) Oggetto di forma diversa in cui il perimetro effettivo è ricavato contando il numero di tutti i lati dei pixel di contorno. Il perimetro calcolato dal programma è ottenuto, invece, contando il numero di tutti i pixel di contorno.

⁵Vengono contati solamente i pixel della regione che appartengono al confine, cioè quelli adiacenti allo sfondo. Ad ogni pixel di regione viene sovrapposta una maschera quadrata 3×3 centrata su esso; se uno dei punti sottesi dalla maschera è di sfondo allora il pixel sotto esame è un pixel di perimetro per quella regione. Il numero totale di pixel di confine dà il parametro di perimetro per la regione (granulo). Tale numero viene moltiplicato per la radice quadrata dell'area del pixel ottenendo così la lunghezza in millimetri del perimetro del granulo. (Pazzi L. e Degli Abbati L.M., 1992).



Perimetro effettivo: 14 mm

Perimetro calcolato: 8 mm

Si è perso completamente il pixel “*”

Se si considera che le immagini dei granuli da analizzare hanno contorni molto frastagliati, si può spiegare la perdita di molti elementi nel calcolo del perimetro, per cui si rende necessario un calcolo più fine di tale parametro.

Dopo le opportune correzioni al programma, che consistono essenzialmente nell’incrementare il contatore del perimetro più volte per i pixel di spigolo, per le medesime immagini sintetiche di pagina 21 si sono ottenuti i seguenti risultati:

	AS1	AS2	PERIMETRO REALE	PERIMETRO MISURATO
1)	54	49	206	220
2)	91	87	356	368

I valori così determinati erano molto più vicini ai perimetri teorici noti, ma ora risultavano superiori a quelli “reali”.

Per ovviare anche a questa discrepanza di valore tra la misura automatica e quella manuale, si è reso necessario effettuare un’approssimazione della misura del perimetro, che si accostasse il più possibile ai valori ottenuti manualmente.

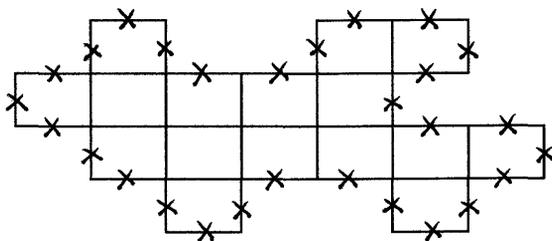
Occorre, infatti, considerare che l’estrazione del perimetro da un’immagine digitale spesso comporta inevitabili perdite di accuratezza, molto più consistenti se gli oggetti da analizzare hanno contorni frastagliati, come nel nostro caso.

Sulla base del lavoro di Haralick & Shapiro (1992), si sono realizzati quindi due diversi tipi di approssimazione, una per eccesso (denominata “*perimetro esterno*”) e l’altra per difetto (“*perimetro interno*”). Il valore del perimetro è stato assunto quale valore medio di queste due approssimazioni, ritenendo che la interpolazione del primo ordine (media aritmetica) sia sufficientemente accurata per questa applicazione (Mari, 1996).

Più in dettaglio si illustra come vengono calcolate le due approssimazioni:

1) PERIMETRO ESTERNO

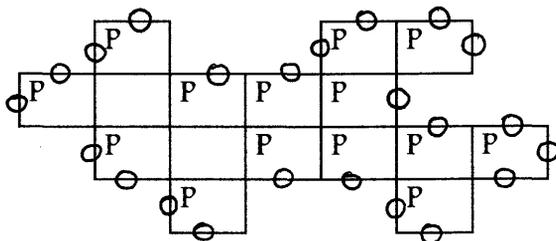
Se si suppone di scandire l'immagine in modo "raster", cioè per righe, partendo dal primo pixel in alto a sinistra e finendo con l'ultimo pixel in basso a destra, si considerano appartenenti al perimetro esterno tutti i lati dei pixel di contorno incontrati durante la scansione:



I lati indicati con X appartengono al perimetro esterno.

2) PERIMETRO INTERNO

Si considerano appartenenti al perimetro interno i lati dei pixel di contorno, con il vincolo che se due lati opposti (ad esempio Nord e Sud) dello stesso pixel appartengono al contorno, danno contributo unitario (anziché doppio) al totale.



I lati indicati con O appartengono al perimetro interno.

I pixel indicati con P sono i pixel del perimetro giusto.

3) PERIMETRO MEDIO

Perimetro esterno = 28 pixel

Perimetro interno = 22 pixel

Perimetro medio = $(28+22) / 2 = 25$ pixel

Il numero di pixel viene poi moltiplicato per la radice quadrata dell'area del pixel e si ottiene così la lunghezza in millimetri del perimetro del granulo.

RISULTATI DEI CONFRONTI DEL PERIMETRO TRA I TRE METODI

Nei grafici della *figura 4.6* si nota come i valori acquisiti con l'ultima versione del programma (perimetro medio), si correlano bene con i valori acquisiti con gli altri metodi confrontati reciprocamente a due a due. In tutti e tre i casi il coefficiente di correlazione delle rette di regressione è piuttosto elevato.

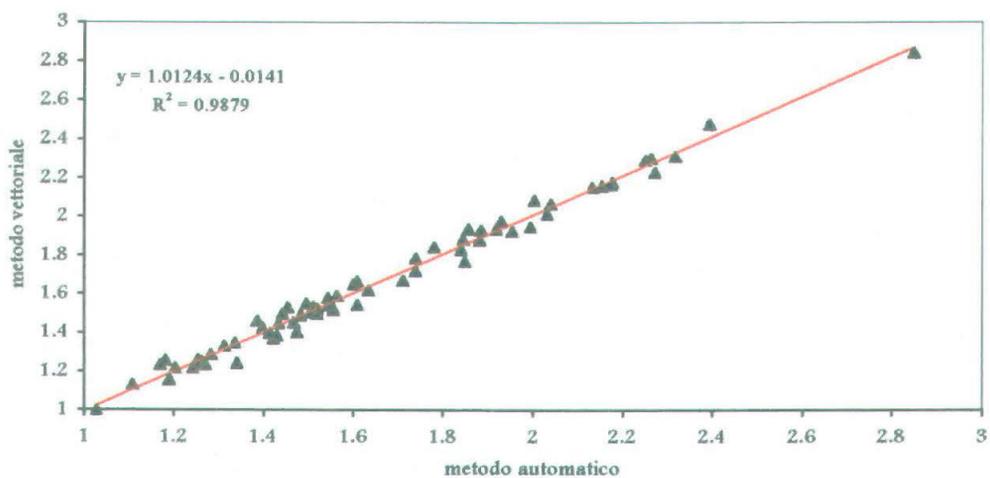
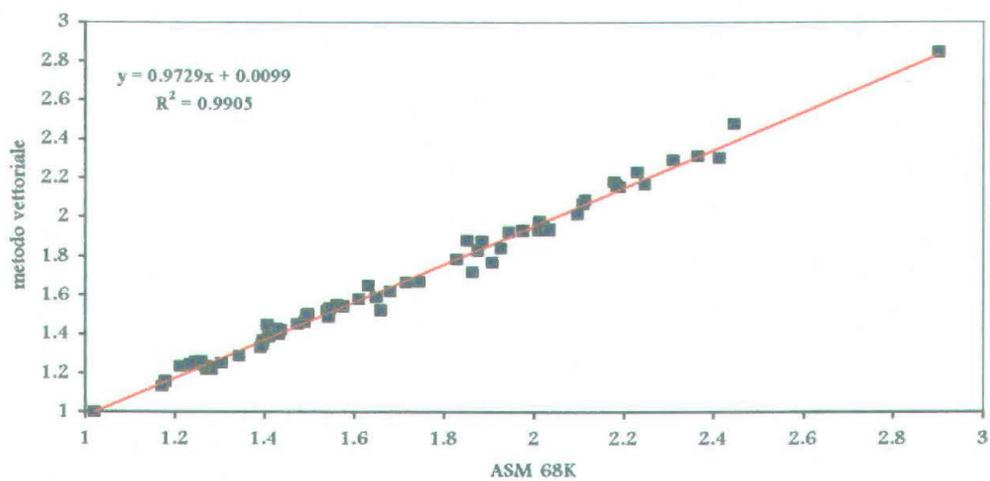
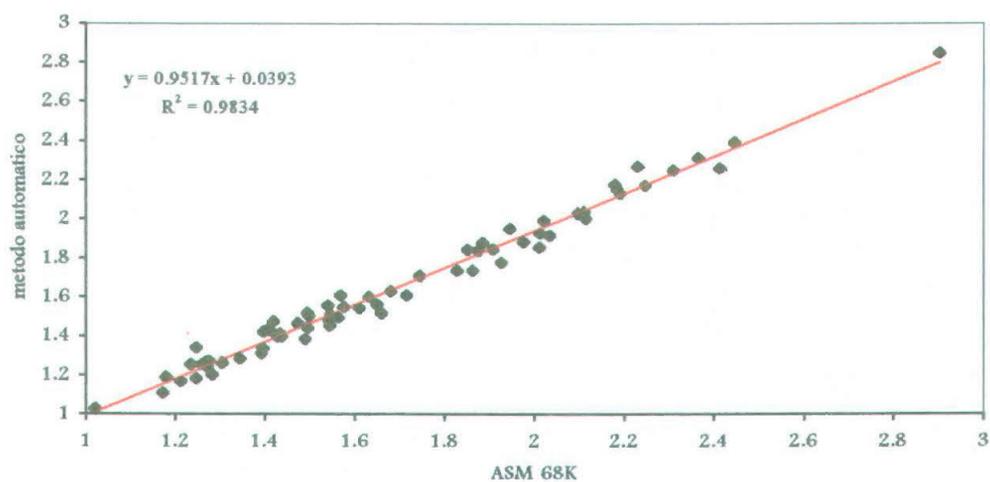


Figura 4.6. Confronti dei valori del Perimetro acquisiti con i diversi metodi.

4.3 Validazione dell'Area

Si definisce area di un granulo (in pixel) il numero di pixel ad esso appartenenti, compresi quelli della linea di contrasto. Moltiplicando l'area del pixel per il numero di pixel appartenenti al granulo otteniamo l'area in millimetri quadrati del granulo stesso.

Dalle prove di validazione non sono emerse particolari incongruenze del programma.

RISULTATI DEI CONFRONTI DELL'AREA TRA I TRE METODI

Dal confronto, per mezzo rette di regressione, dei risultati ottenuti su granuli reali col metodo proposto, rispetto a quelli ottenuti con le altre due tecniche, emerge che i tre metodi si correlano bene. Ciò si deduce dagli alti coefficienti di correlazione delle rette ottenute considerando i valori in coppia (*figura 4.7*).

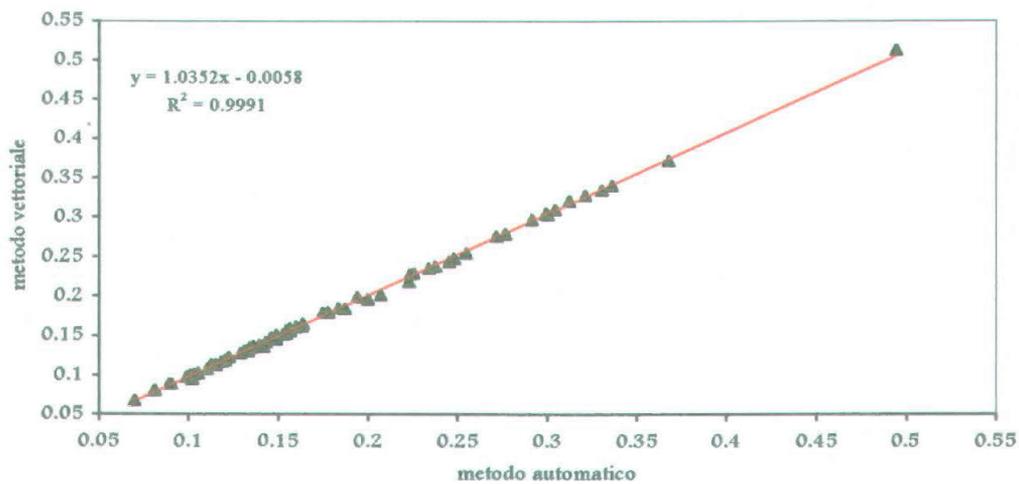
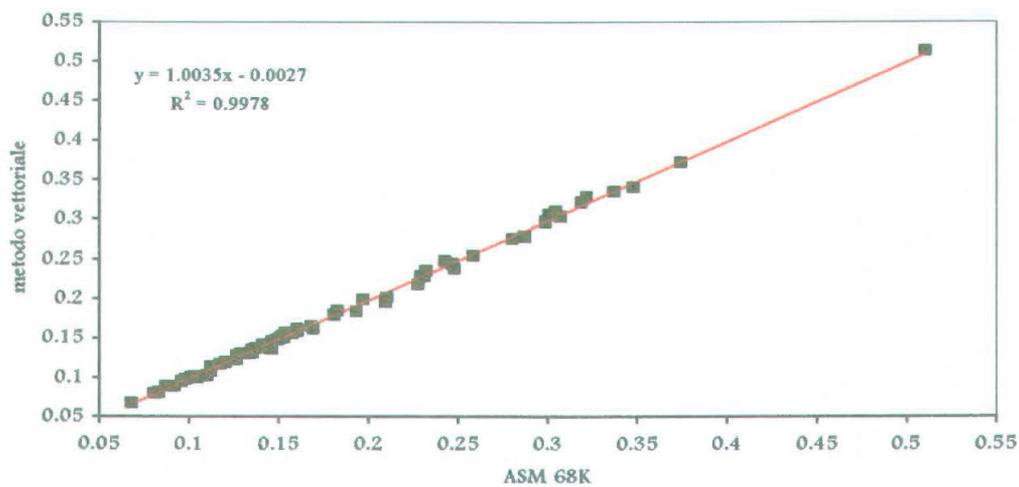
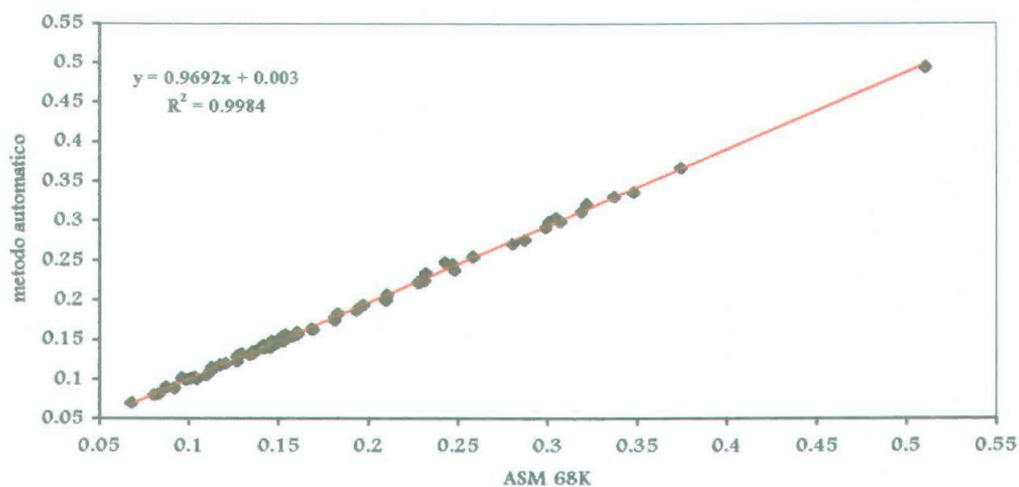


Figura 4.7. Confronti dei valori dell'Area acquisiti con i diversi metodi.

4.4 Validazione degli Assi

4.4.1 Asse maggiore (AS_1)

Nella prima versione del programma (Pazzi e Degli Abbati, 1992; Venturi et al., 1994), il granulo era esplorato con archi di cerchio di raggio progressivamente crescente, centrati nel centro geometrico del minimo rettangolo d'ingombro circoscrivente il granulo. Il diametro del cerchio tangente al granulo veniva assunto quale asse maggiore. Ma con questo metodo si verificavano alcune incongruenze.

Infatti:

- a) La circonferenza con cui si calcola l' AS_1 , centrata come sopra, identifica un asse maggiore che sempre passa per il centro del rettangolo parallelamente ai lati. Specie se il granulo è molto irregolare, ci possono essere assi che necessariamente non passano per il centro e quindi non sono identificabili dall'algoritmo.
- b) Perché l'asse è il diametro della circonferenza, un'altra fonte di possibili errori è costituita dal fatto che il secondo estremo di ogni asse non appartenga al contorno dell'oggetto ma ricada sempre al suo interno. Quindi il valore dell'asse può risultare minore di quello "reale".

Per questi motivi si è effettuata una importante correzione al programma, ponendo la condizione di ricerca dei punti all'interno di ogni granulo, a maggiore distanza tra di loro, e assumendo essi quali estremi dell'asse maggiore (Mari, 1996).

RISULTATI DEI CONFRONTI DELL'ASSE MAGGIORE TRA I TRE METODI

I risultati ottenuti con l'ultima versione del programma sono stati correlati con quelli forniti dalle altre due tecniche. Anche in questo caso tutti e tre i metodi sembrano essere validi, come si deduce dagli alti coefficienti di correlazione ottenuti dal confronto dei valori in coppia (*fig. 4.8*).

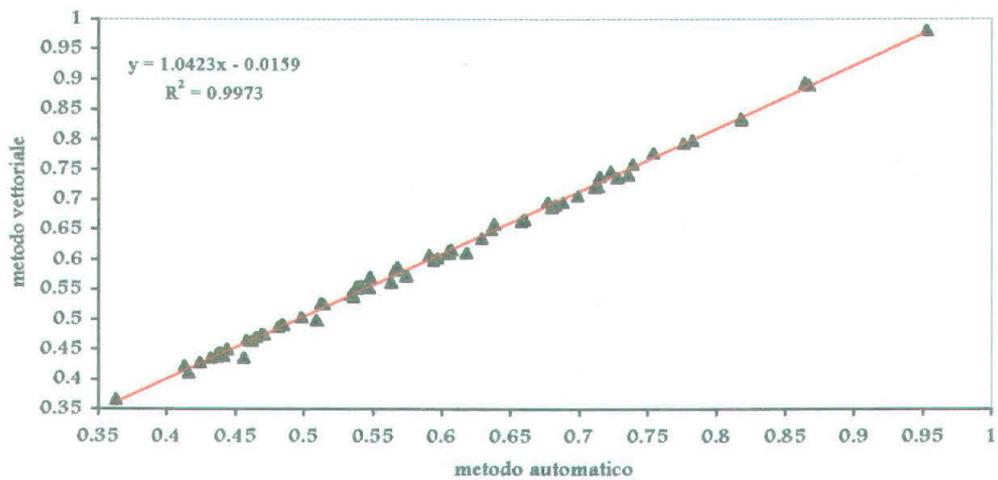
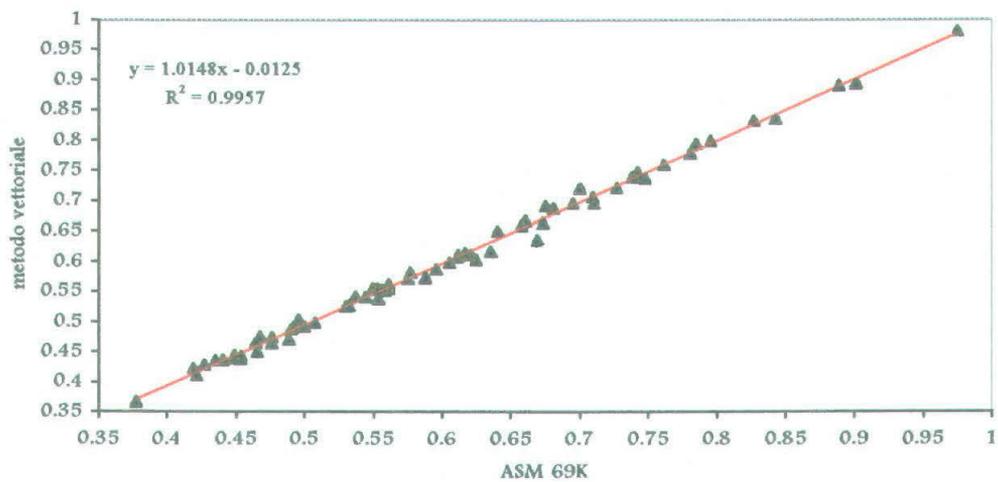
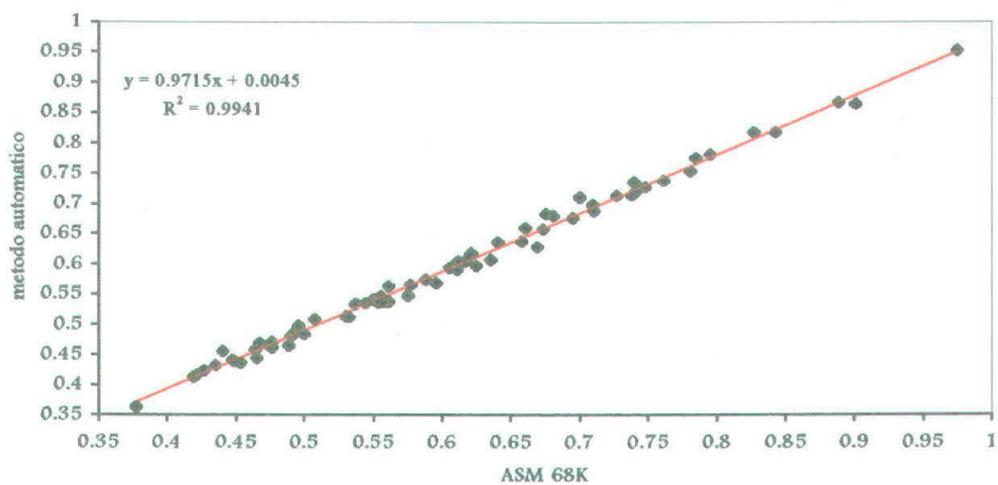


Figura 4.8. Confronti dei valori dell'asse maggiore acquisiti con i diversi metodi.

4.4.2 Asse intermedio (AS_2)

L'asse intermedio è stato così denominato in analogia a quanto spesso avviene in letteratura per *l'intermediate cross-section axis* di un granulo nella sua posizione di equilibrio. E' il segmento di massima lunghezza ortogonale all'asse maggiore e contenuto nell'oggetto.

Il confronto dei valori dell'asse intermedio calcolati con gli altri metodi suggeriva che il metodo automatico, nella sua primitiva formulazione (Pazzi e Degli Abbati, 1992; Venturi et al., 1994), poteva ancora essere migliorato per limitare ulteriormente il numero di granuli che ancora sfuggiva alla regressione di controllo.

Lo scarto tra i valori sembra aumentare all'aumentare della lunghezza dell'asse. In base all'esame dei punti "scatterati", le correlazioni incrociate tra i tre diversi metodi mettono in evidenza che il metodo semiautomatico è quello che erra più frequentemente, anche in questo caso, rispetto agli altri due.

Il metodo automatico è stato modificato per venire incontro alle caratteristiche delle immagini alle quali è applicato. Dal momento che gli errori più frequenti sono stati riscontrati nei casi di assi intermedi posti in posizione verticale (orientati Nord-Sud), si sono posti dei vincoli. Si è scelto di misurare l'asse intermedio nel modo precedentemente illustrato per tutte le orientazioni dell'asse, tranne che per i casi in cui l'orientazione supera un valore di soglia. Il valore di soglia è stato scelto in base di prove sperimentali e posto come "pendenza della retta" uguale a 7. Per i valori di pendenza della retta di orientazione superiori alla soglia, si è assunto che l'asse sia perfettamente verticale (pendenza infinita) e si è calcolato di conseguenza (Mari, 1996).

RISULTATI DEI CONFRONTI DELL'ASSE INTERMEDIO TRA I TRE METODI

I risultati ottenuti con l'ultima versione del programma sono stati correlati con quelli forniti dalle altre due tecniche. Anche in questo caso i tre metodi si correlano bene, come si deduce dagli coefficienti di correlazione (*fig. 4.9*).

La correlazione più elevata si nota nel diagramma di confronto tra il metodo automatico e quello vettoriale.

Tuttavia poiché una minore correlazione si nota nei dai diagrammi di correlazione del metodo semiautomatico vs. automatico e in quello semiautomatico vs. vettoriale, ciò fa pensare che è il metodo semiautomatico, più degli altri due, che introduce errori su alcuni dei granuli considerati.

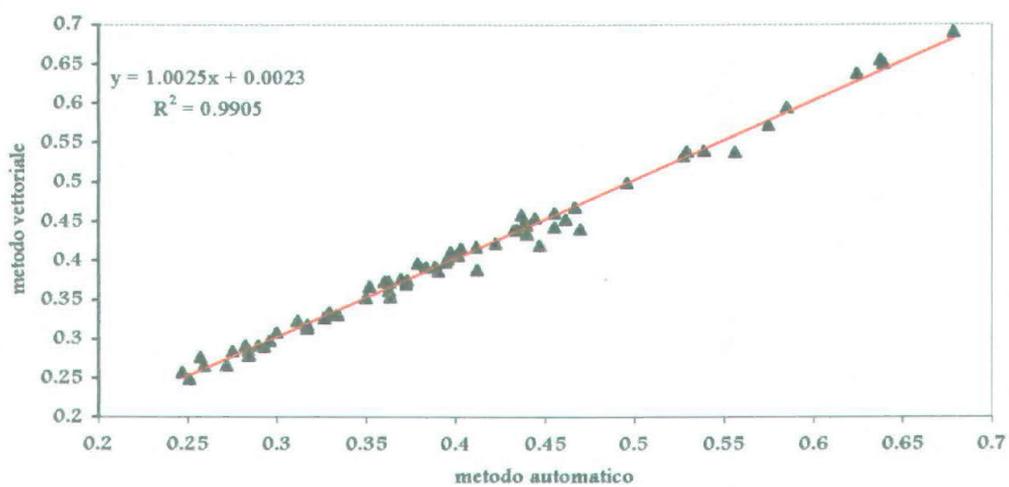
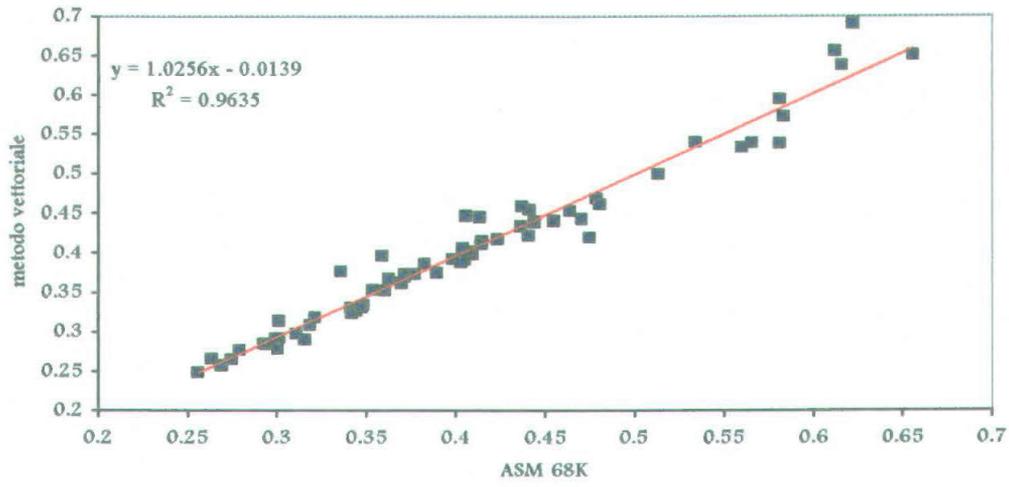
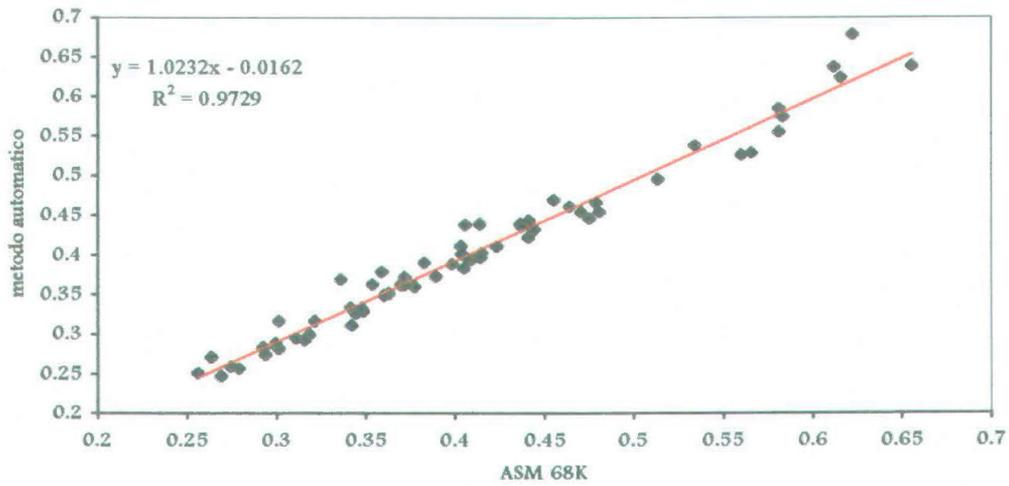


Figura 4.9. Confronti dei valori dell'asse intermedio acquisiti con i tre diversi metodi.

4.5 Conclusioni delle operazioni di validazione

A conclusione delle operazioni di validazione si può affermare che i parametri geometrici estratti in modo automatico risultano confrontabili con quelli testati, ma con notevole guadagno in velocità ed ottima ripetibilità anche sottoponendo il granulo a rotazione casuale.

5. CALCOLO DEGLI INDICI MORFOMETRICI DAI PARAMETRI ESTRATTI

5.1 Fitting

Il profilo bidimensionale, irregolare e di norma fortemente variabile di ogni granulo, in prima istanza, può essere descritto per mezzo di approssimazioni con figure piane fondamentali.

Di queste si sono considerate il rettangolo, l'ellisse, e il cerchio e quindi si sono definiti il fitting rettangolare, il fitting ellittico e il fitting circolare (Haralick & Shapiro, 1992; indici applicati ai profili di granuli da Venturi et al, 1994), (*tab. 5.1*).

- *Fitting Rettangolare*: E' il rapporto tra l'area del granulo e l'area del minimo rettangolo, detto anche rettangolo d'ingombro, circoscrivente il granulo, cercato fra 8 possibili rettangoli di rotazione attorno ad ogni granulo partendo da una casuale tangente al suo bordo. Questo indice non necessariamente coincide con il "shape factor" di Heywood (1937) (cfr. § 1.1). Il rettangolo è l'elemento fondamentale per la definizione dei successivi fitting. Si precisa che le dimensioni dei lati del rettangolo d'ingombro generalmente non coincidono con quelle degli assi AS_1 ed AS_2 .
- *Fitting Ellittico*: E' il rapporto tra l'area del granulo e l'area dell'ellisse inscritta nel rettangolo d'ingombro. Rosfelder (1960) (cfr. § 1.1) propone un "shape factor" simile a questo, basandosi tuttavia nel rettangolo di Heywood (1937).
- *Fitting Circolare*: E' il rapporto tra l'area del granulo e l'area del massimo cerchio inscrivibile nel rettangolo di ingombro, il cui diametro, quindi, coincide con la dimensione del lato minore.

5.2 Indici morfometrici

Disponendo di parametri geometrici validati (perimetro, area, asse maggiore, asse intermedio, quattro semiassi) si sono considerati alcuni indici morfometrici, individuati da rapporti fra i sopradetti parametri, già apparsi in letteratura, ma non sufficientemente impiegati perché di difficile uso e scarsa praticità. Infatti, come commenta Hofmann in un suo articolo del 1994, solo l'uso del computer e opportuni software di analisi di immagine ha reso possibile il loro effettivo impiego.

Gli indici morfometrici utilizzati in questa ricerca sono riassunti nella *tabella*

5.1.

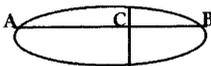
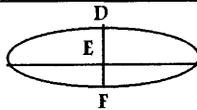
	Fitting Rettangolare	$\frac{A}{A_r}$	$A = \text{area del granulo};$ $A_r = \text{area del rettangolo d'ingombro.}$
	Fitting Ellittico	$\frac{A}{A_e}$	$A_e = \text{area dell'ellisse inscritta nel rettangolo d'ingombro.}$
	Fitting Circolare	$\frac{A}{A_{cr}}$	$A_{cr} = \text{area del massimo cerchio inscrivibile nel rettangolo d'ingombro.}$
Cox, 1927	Indice di Circolarità / Arrotondamento	$\frac{4\pi A}{P^2}$	$P = \text{perimetro del granulo.}$
Tickell, 1931	Projection Sphericity	$\frac{A}{A_c}$	$A_c = \text{area del minimo cerchio circoscritto.}$
Wadell, 1935	Projection Sphericity	$\frac{d_c}{D_c}$	$d_c = \text{diametro del cerchio avente la stessa area del granulo};$ $D_c = \text{diametro del minimo cerchio circoscritto.}$
Lütting, 1956	Degree of Elongation	$\frac{AS_2}{AS_1}$	$AS_2 = \text{asse maggiore};$ $AS_1 = \text{asse intermedio.}$
	Perimetro Specifico	$\frac{P}{P_c}$	$P_c = \text{perimetro del cerchio che ha area uguale a quella del granulo.}$
Cailleux, 1952	Dissimmetria dell' AS_1 (rispetto all' AS_2)	$\frac{AC}{AB}$	 $AB = AS_1$
	Dissimmetria dell' AS_2 (rispetto all' AS_1)	$\frac{DE}{DF}$	 $DF = AS_2$

Tabella 5.1. Indici morfometrici utilizzati.

5.3 Campioni esaminati

Sono stati considerati 8 campioni di cui 6 relativi a diversi ambienti antartici: 2 di spiaggia attuale (ADLN 7, ADLS A) campionati ad Adelie Cove, 2 di morena attiva (TR 119, TR 129), campionati rispettivamente nelle località Olson Nunatack e Hells Gate e 2 bennate (MM 11, BN 34) campionate a Baia Terra Nova.

Inoltre sono stati considerati anche 2 campioni di battigia di mari temperati (a Lignano in Adriatico e a Corfù in Ionio), denominati LIGN e CORFU, introdotti nella trattazione per apprezzare in modo immediato il valore numerico dei parametri

morfometrici. Infatti essi assumono un buon valore di riferimento considerato che si tratta di sabbie con buon grado di elaborazione.

Di ciascun campione sono stati computati circa 200 granuli di quarzo.

In base ai valori assunti dai suoi granuli costituenti, per ogni campione, può essere costruito lo spettro di frequenza relativo all'indice considerato.

Nelle *tabb. 5.2, 5.3*, vengono riassunte le distribuzioni di frequenza in termini di range e di valori di tendenza centrale (Mean, Median, St.D, Skw) per tutti i campioni in esame.

CAMPIONI		ADLN 7	ADLS A	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN	CORFU
INDICI	<i>n° granuli</i>	193	193	216	173	196	223	213	155
Fitting Rettangolare	<i>Min:</i>	0.544	0.564	0.525	0.531	0.539	0.535	0.549	0.605
	<i>Max:</i>	0.820	0.824	0.807	0.832	0.824	0.825	0.789	0.831
	<i>Median:</i>	0.690	0.687	0.686	0.701	0.686	0.676	0.682	0.730
	<i>Mean:</i>	0.691	0.690	0.684	0.697	0.685	0.677	0.681	0.733
	<i>St. D.:</i>	0.053	0.051	0.051	0.050	0.052	0.052	0.047	0.043
	<i>Skewness:</i>	-0.110	0.065	-0.199	-0.473	-0.120	0.176	-0.059	0.000
Fitting Ellittico	<i>Min:</i>	0.693	0.718	0.668	0.675	0.687	0.681	0.699	0.771
	<i>Max:</i>	1.044	1.050	1.028	1.059	1.050	1.051	1.005	1.059
	<i>Median:</i>	0.879	0.875	0.874	0.892	0.874	0.861	0.868	0.929
	<i>Mean:</i>	0.880	0.878	0.871	0.888	0.873	0.862	0.868	0.933
	<i>St. D.:</i>	0.067	0.065	0.065	0.064	0.066	0.067	0.060	0.055
	<i>Skewness:</i>	-0.110	0.065	-0.198	-0.473	-0.120	0.176	-0.059	0.000
Fitting Circolare	<i>Min:</i>	0.794	0.806	0.819	0.853	0.773	0.804	0.790	0.904
	<i>Max:</i>	2.385	2.846	2.532	1.911	2.685	1.988	2.130	2.363
	<i>Median:</i>	1.159	1.171	1.144	1.180	1.170	1.130	1.128	1.260
	<i>Mean:</i>	1.222	1.235	1.180	1.207	1.246	1.165	1.142	1.315
	<i>St. D.:</i>	0.269	0.311	0.235	0.209	0.278	0.210	0.200	0.245
	<i>Skewness:</i>	1.513	1.891	1.565	0.679	1.415	0.904	1.476	1.185
COX	<i>Min:</i>	0.584	0.502	0.581	0.638	0.569	0.575	0.550	0.632
	<i>Max:</i>	0.994	0.964	0.962	0.949	0.956	0.975	0.966	1.000
	<i>Median:</i>	0.816	0.798	0.803	0.823	0.799	0.825	0.827	0.873
	<i>Mean:</i>	0.807	0.794	0.798	0.819	0.790	0.818	0.817	0.864
	<i>St. D.:</i>	0.069	0.080	0.065	0.062	0.075	0.074	0.070	0.065
	<i>Skewness:</i>	-0.722	-0.545	-0.278	-0.574	-0.323	-0.460	-0.699	-0.570
A/Ac	<i>Min:</i>	0.365	0.283	0.332	0.456	0.336	0.391	0.335	0.336
	<i>Max:</i>	0.947	0.875	0.865	0.870	0.882	0.877	0.903	0.884
	<i>Median:</i>	0.659	0.653	0.666	0.668	0.633	0.660	0.690	0.672
	<i>Mean:</i>	0.651	0.649	0.665	0.664	0.632	0.661	0.680	0.677
	<i>St. D.:</i>	0.107	0.116	0.100	0.096	0.110	0.101	0.099	0.104
	<i>Skewness:</i>	-0.194	-0.549	-0.313	-0.077	-0.262	-0.178	-0.376	-0.195

Tabella 5.2. Continua..

CAMPIONI		ADLN 7	ADLS A	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN	CORFU
INDICI	<i>n° granuli</i>	193	193	216	173	196	223	213	155
dc/Dc	<i>Min:</i>	0.604	0.532	0.576	0.675	0.579	0.626	0.579	0.580
	<i>Max:</i>	0.973	0.936	0.930	0.933	0.939	0.936	0.950	0.940
	<i>Median:</i>	0.812	0.808	0.816	0.818	0.796	0.812	0.831	0.820
	<i>Mean:</i>	0.804	0.802	0.813	0.812	0.792	0.810	0.823	0.820
	<i>St. D.:</i>	0.067	0.075	0.063	0.060	0.071	0.063	0.062	0.065
	<i>Skewness:</i>	-0.439	-0.847	-0.552	-0.206	-0.463	-0.369	-0.625	-0.416
Elongazione	<i>Min:</i>	0.396	0.311	0.373	0.482	0.331	0.436	0.399	0.368
	<i>Max:</i>	0.979	0.992	0.987	0.998	0.970	0.963	0.984	0.969
	<i>Median:</i>	0.729	0.730	0.741	0.742	0.707	0.737	0.758	0.720
	<i>Mean:</i>	0.721	0.723	0.736	0.730	0.703	0.731	0.756	0.719
	<i>St. D.:</i>	0.125	0.142	0.117	0.111	0.135	0.114	0.115	0.118
	<i>Skewness:</i>	-0.284	-0.441	-0.310	-0.051	-0.142	-0.121	-0.400	-0.152
P/Pc	<i>Min:</i>	1.003	1.019	1.020	1.027	1.023	1.013	1.018	1.000
	<i>Max:</i>	1.309	1.411	1.312	1.252	1.326	1.318	1.349	1.258
	<i>Median:</i>	1.107	1.119	1.116	1.103	1.118	1.010	1.100	1.070
	<i>Mean:</i>	1.116	1.127	1.122	1.108	1.129	1.109	1.109	1.078
	<i>St. D.:</i>	0.051	0.061	0.047	0.044	0.056	0.053	0.051	0.043
	<i>Skewness:</i>	1.159	1.158	0.700	0.948	0.719	0.911	1.243	0.95
Dissimmetria dell'AS ₁ rispetto all'AS ₂ Cailleux (1952)	<i>Min:</i>	0.500	0.503	0.503	0.501	0.503	0.505	0.500	0.501
	<i>Max:</i>	0.871	0.801	0.803	0.789	0.856	0.855	0.817	0.810
	<i>Median:</i>	0.579	0.587	0.592	0.587	0.598	0.595	0.594	0.591
	<i>Mean:</i>	0.602	0.602	0.607	0.599	0.611	0.613	0.606	0.602
	<i>St. D.:</i>	0.081	0.074	0.074	0.068	0.079	0.079	0.071	0.071
	<i>Skewness:</i>	1.054	0.641	0.591	0.62	0.632	0.868	0.729	0.654
Dissimmetria dell'AS ₂ rispetto all'AS ₁	<i>Min:</i>	0.502	0.501	0.500	0.502	0.500	0.502	0.502	0.503
	<i>Max:</i>	0.996	0.981	0.981	0.981	0.963	0.975	0.912	0.878
	<i>Median:</i>	0.589	0.600	0.603	0.602	0.613	0.611	0.611	0.596
	<i>Mean:</i>	0.615	0.619	0.624	0.618	0.628	0.638	0.625	0.613
	<i>St. D.:</i>	0.093	0.092	0.089	0.090	0.093	0.099	0.089	0.084
	<i>Skewness:</i>	1.194	1.077	1.114	1.030	1.010	0.956	0.858	0.852

Tabella 5.2. Parametri statistici desunti dalla distribuzione di frequenza degli indici morfometrici nei campioni in esame.

Può inoltre risultare utile l'indicazione degli intervalli modali principali, secondari e di 3° ordine che modulano lo spettro di frequenza. Per intervallo modale secondario (o di 3° ordine) è stato considerato quello che supera in frequenza di almeno il 3% l'intervallo immediatamente precedente o seguente.

Virtualmente ciascun indice descrive meglio degli altri un qualche aspetto formale del granulo, ossia possiede un proprio contenuto descrittivo intrinseco, anche se nessuno, da solo, riesce a restituire la complessità formale del granulo.

Va tuttavia subito osservato che tre coppie di indici risultano strettamente correlate:

- il Fitting Ellittico (FE) con il Fitting Rettangolare (FR) presentano una correlazione lineare del tipo $FE = 1.273 \times FR$ ($R = 1$; $n = 1562$);
- la *Projection Sphericity* di Wadell (dc/Dc) con la *Projection Sphericity* di Tickell (A/Ac) presentano una correlazione esponenziale del tipo $dc/Dc = A/Ac^{0.5}$ ($R = 1$; $n = 1562$);
- l'indice di Circolarità/Arrotondamento di Cox con il Perimetro Specifico (P/Pc) presentano una correlazione esponenziale del tipo $Cox = P/Pc^{-2}$ ($R = 1$; $n = 1562$).

Pur riconoscendo a ciascun indice un suo caratteristico significato descrittivo, la trattazione che segue si propone di verificare analiticamente quanto ciascun indice, considerato singolarmente, riesce a differenziare campioni antartici da campioni non-antartici. E, tra quelli antartici, quelli di differente ambiente sedimentario.

Poiché taluni indici presentano campi di variabilità teorici piuttosto stretti (0.5-1), la identità o diversità di campioni a gradi di elaborazione molto simili quali quelli antartici non può essere apprezzata a “vista” ma solo in base a un processo di *cluster analysis* degli spettri di frequenza di tutti gli indici e a test di significatività (T-test).

La *cluster analysis* è stata effettuata con lo scopo di raggruppare gli spettri di frequenza dei vari campioni in gruppi con caratteristiche simili. In questo caso è stato usato il metodo di ammalgamazione medio e come distanza il coefficiente di correlazione di Pearson.

Per quanto riguarda i test di significatività (T-test), si sono considerati i confronti delle medie sulla totalità delle possibili combinazioni che ogni indice permette (28 coppie). La risposta è fornita in termini di probabilità secondo le seguenti classi (Spiegel, 1992):

- 0-0.01 differenza molto significativa
- 0.01-0.05 differenza significativa
- > 0.05 differenza non significativa

Gli esiti positivi dei T-test sono riferiti alle differenze tra campioni.

6. ANALISI E DISCUSSIONE DEI DATI

6.1 Fitting Rettangolare

Il range teorico di questo parametro, che approssima il profilo del granulo ad un rettangolo, varia tra 0.5-1; valori uguali a 0.5 vengono assunti da triangoli rettangolo-isosceli ed equilateri, valori uguali a 0.78 vengono assunti da cerchi ed ellissi, mentre valori uguali ad 1 corrispondono a quadrati e rettangoli.

Il range dei granuli dei campioni in esame è di 0.525-0.832.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.677-0.697; LIGN presenta un valore medio di 0.681 mentre CORFU di 0.733, collocandosi totalmente al di fuori del range dei campioni antartici.

Valori modali

I campioni ADLS A, TR 119 e LIGN presentano la moda principale nell'intervallo 0.65-0.675; invece BN 34 e TR 129 nell'intervallo 0.675-0.70; ADLN 7, MM 11 e CORFU nell'intervallo 0.70-0.725.

Un secondo intervallo modale poco accentuato è presente nel solo campione CORFU tra 0.775-0.80 quindi spostato verso il campo delle forme più elaborate (*fig.6.11*).

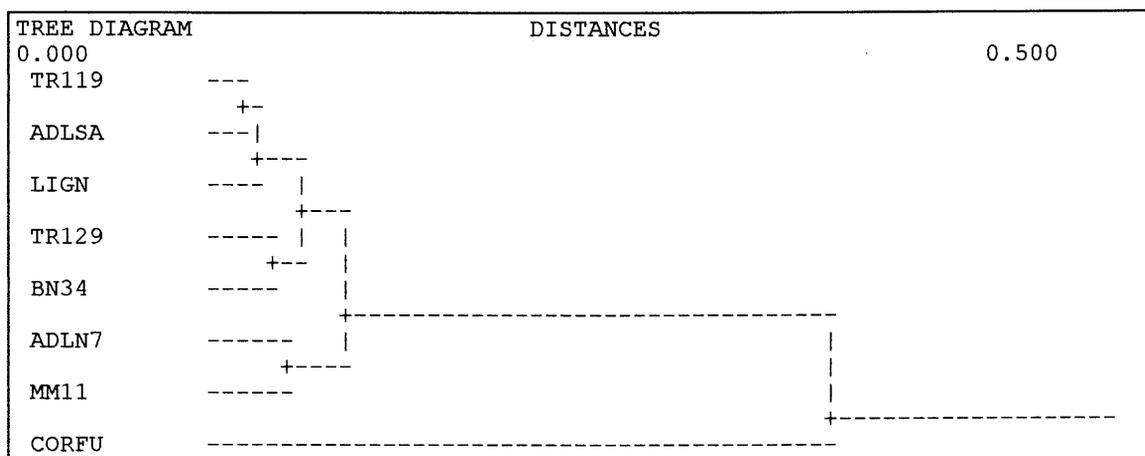


Figura 6.1. Fitting Rettangolare: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN7	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLSA	0.764	1					
BN 34	0.168	0.293	1		14 Esiti Positivi (50%)		
MM 11	0.257	0.146	0.012	1			
TR 119	0.269	0.412	0.840	0.025	1		
TR 129	0.007	0.016	0.155	0.000	0.116	1	
LIGN	0.048	0.092	0.538	0.001	0.412	0.390	1
CORFU	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabella 6.1. Fitting Rettangolare: valori di probabilità dal T-test.

Per questo indice il campione CORFU risulta essere significativamente differente da tutti gli altri.

6.2 Fitting Ellittico

Il range teorico di questo parametro varia tra 0 e $4/\pi$. Valore uguale ad 1 viene assunto da granuli ellittici, valori $\ll 1$ sono propri di granuli molto angolati inscritti nell'ellisse mentre valori uguali a $4/\pi$ sono propri di granuli rettangolari e quadrati.

Il range relativo alla totalità dei granuli in esame è compreso tra 0.668 e 1.059.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.862-0.888; LIGN (valore medio di 0.868) si colloca presso il limite inferiore mentre CORFU (0.933) si colloca al di fuori del range dei campioni antartici.

Valori modalì

Per questo parametro la distribuzione degli intervalli modalì principali e secondari è piuttosto articolata. I campioni TR 119 e LIGN presentano doppio intervallo modale principale: negli intervalli 0.8345-0.855 e 0.8755-0.896 il primo, e 0.8345-0.855 e 0.9165-0.937 il secondo. I campioni ADLS A, BN 34 e TR 129 presentano la moda principale nell'intervallo 0.855-0.8755; il solo MM 11

nell'intervallo 0.8755-0.896 ed infine i campioni ADLN 7 e CORFU tra 0.896-0.9165.

Il campione BN 34 presenta la moda secondaria nell'intervallo 0.814-0.8345; ADLN 7 tra 0.855-0.8755; il campione ADLS A tra 0.937-0.9575; CORFU nell'intervallo 0.978-0.9985. Il campione TR 129 presenta inoltre una doppia moda secondaria negli intervalli 0.7935-0.814 e 0.896-0.9165. Inoltre i campioni ADLS A, ADLN 7 e BN 34 presentano una spiccata terza moda negli intervalli 0.732-0.7525, 0.9985-1.019, 0.9165-0.937 rispettivamente (fig. 6.12).

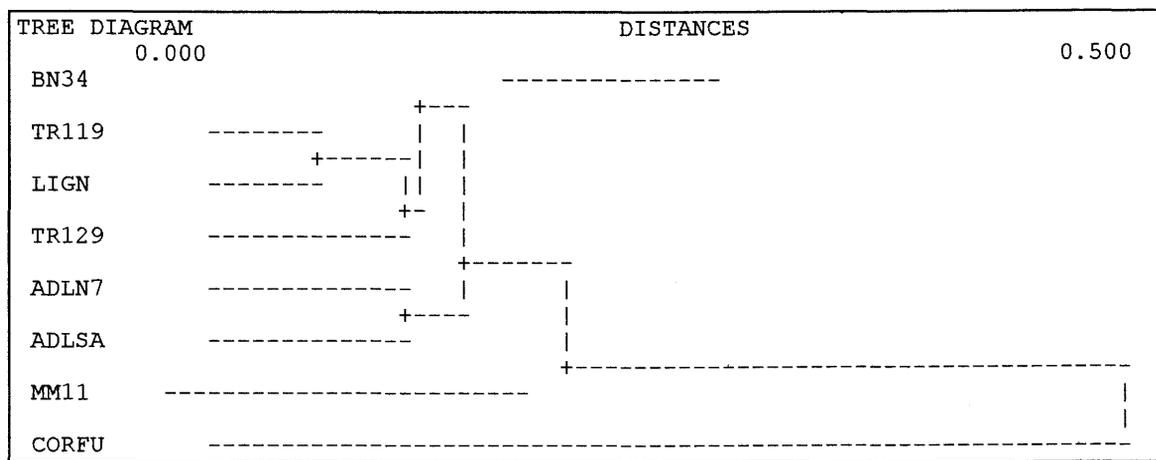


Figura 6.2. Fitting Ellittico: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN7	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLSA	0.763	1					
BN 34	0.179	0.293	1		14 Esiti Positivi (50%)		
MM 11	0.258	0.146	0.012	1			
TR 119	0.269	0.412	0.840	0.025	1		
TR 129	0.007	0.016	0.155	0.000	0.116	1	
LIGN	0.048	0.091	0.538	0.001	0.421	0.391	1
CORFU	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabella 6.2. Fitting Ellittico: valori di probabilità dal T-test.

Anche per questo indice il campione CORFU risulta essere significativamente differente da tutti gli altri.

6.3 Fitting Circolare

Il range teorico di questo parametro presenta variabilità tra 0 e ∞ . Valori uguali ad 1 vengono assunti dalle forme circolari, valori $\ll 1$ vengono assunti dalle forme molto angolari (con elevato perimetro) mentre valori $\gg 1$ vengono assunti dalle forme molto allungate.

I granuli dei campioni in esame presentano un range di 0.773-2.46.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 1.165-1.246; LIGN (valore medio di 1.142) e CORFU (1.315) si collocano esternamente e da parti opposte rispetto detto intervallo.

Valori modali

Le mode principali di tutti i campioni ricadono entro un range piuttosto ristretto. Infatti i campioni BN 34, TR 119, TR 129, ADLN 7, LIGN e CORFU presentano l'intervallo modale principale il range 1.065-1.17, invece i campioni ADLS A, MM 11 il range di 1.17-1.275.

Mode secondarie sono presenti nei campioni ADLN 7, MM 11 e LIGN relativamente agli intervalli 1.275-1.38; 1.38-1.485; 1.485-1.59 rispettivamente (fig. 6.13).

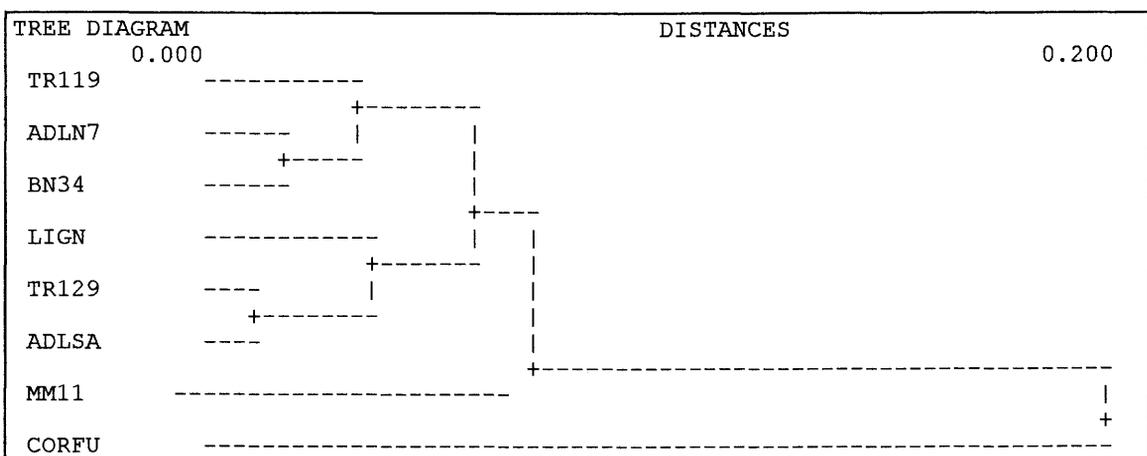


Figura 6.3. Fitting Circolare: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN	ADLS A	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN 7	1						
ADLS A	0.668	1					
BN 34	0.091	0.043	1				
MM 11	0.548	0.319	0.238	1			
TR 119	0.404	0.726	0.010	0.138	1		
TR 129	0.015	0.007	0.473	0.047	0.001	1	
LIGN	0.001	0.000	0.070	0.002	0.000	0.240	1
CORFU	0.001	0.009	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000

Tabella 6.3. *Fitting Circolare: valori di probabilità dal T-test.*

Anche per questo indice il campione CORFU risulta essere significativamente differente da tutti gli altri.

6.4 *Indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox (1927)*

Quello di Cox è un indice che stima la circolarità del profilo bidimensionale di un granulo. Include, però, anche informazioni di un'altra proprietà dello "shape": l'arrotondamento.

Il suo range teorico è compreso tra 0.5-1; le figure triangolari assumono valori uguali a 0.5, quelle quadrate valori uguali a 0.785; approssimandosi ad 1 (cerchi) si incontrano granuli con bordi progressivamente smussati.

La totalità dei granuli presenta il range 0.502-1.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.790-0.819; LIGN presenta un valore medio di 0.817 mentre CORFU, con 0.864, si pone totalmente al di fuori del range dei campioni antartici.

Valori modali

I campioni BN 34, TR 119, ADLN 7, MM 11 presentano la moda principale nell'intervallo 0.80-0.825 mentre ADLS A e LIGN in quello 0.825-0.85. Il solo campione TR 129 presenta la moda principale nell'intervallo 0.85-0.875 mentre quella di CORFU ricade nell'intervallo 0.875-0.90, quindi spostata verso forme più elaborate.

Una moda secondaria abbastanza pronunciata è presentata dal campione LIGN nell'intervallo 0.75-0.775; da ADLS A nell'intervallo 0.775-0.80; da ADLN 7 e MM 11 nell'intervallo 0.85-0.875 e da CORFU nell'intervallo 0.925-0.95.

Presentano un terzo intervallo modale ADLN 7 tra 0.65-0.675 e CORFU tra 0.775-0.80 (fig. 6.14).

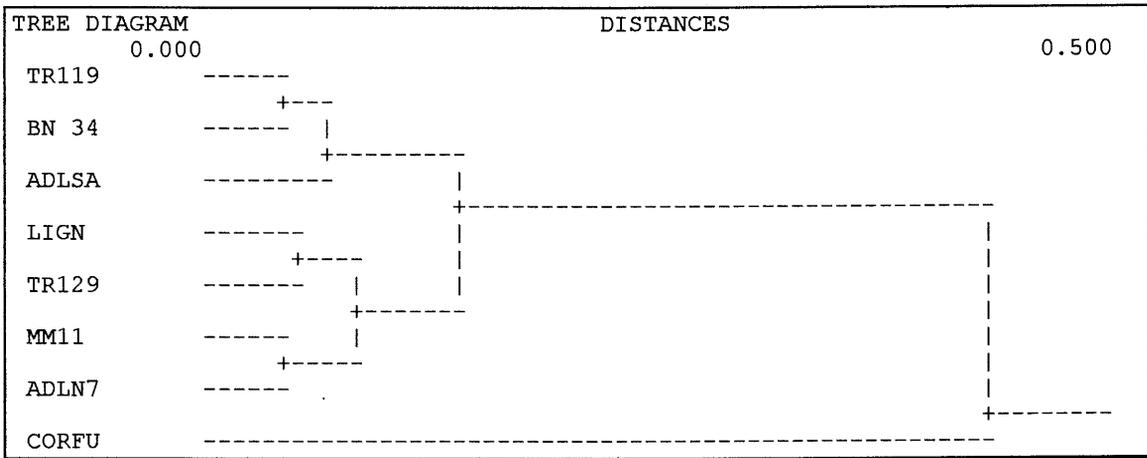


Figura 6.4. Indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN7	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN 7	1						
ADLS A	0.081	1					
BN 34	0.189	0.526	1		17 Esiti Positivi (60.7%)		
MM 11	0.091	0.001	0.002	1			
TR 119	0.022	0.655	0.244	0.000	1		
TR 129	0.118	0.001	0.003	0.922	0.000	1	
LIGN	0.133	0.002	0.004	0.848	0.000	0.927	1
CORFU	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabella 6.4. Indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox: valori di probabilità dal T-test.

Si noti come il campione CORFU risulta essere significativamente differente da tutti gli altri.

6.5 Projection Sphericity (A/Ac) di Tickell (1931)

Questo parametro, che stima la circolarità del profilo del granulo, ha un range teorico 0-1; valori uguali ad 1 vengono forniti dalle forme circolari mentre valori via via più bassi sono assunti dalle forme che sempre più si discostano dal cerchio.

La totalità dei granuli in esame presenta il range 0.283 e 0.947.

I valori medi nei campioni antartici variano tra 0.632-0.665 mentre LIGN presenta un valore medio di 0.680 e CORFU di 0.677: entrambi i valori medi di questi campioni sono esterni al range dei campioni antartici, denotando maggior circolarità.

Valori modali

La distribuzione degli intervalli modali è piuttosto complessa, infatti il campione MM 11 presenta una doppia moda principale negli intervalli 0.56-0.60 e 0.64-0.68; TR 119 e CORFU nell'intervallo 0.60-0.64; TR 129 nel doppio intervallo 0.60-0.68; BN 34 tra 0.64-0.68. La moda principale di ADLN 7 e LIGN ricade nell'intervallo 0.68-0.72, quella di ADLS A tra 0.72-0.76.

Il campione BN 34 presenta moda secondaria nell'intervallo 0.48-0.52; ADLS A e ADLN 7 tra 0.56-0.60; TR 119 e CORFU negli intervalli 0.72-0.76 e 0.76-0.80 rispettivamente.

Una terza moda pronunciata è presentata dal TR 119 nell'intervallo 0.44-0.48 (fig. 6.15).

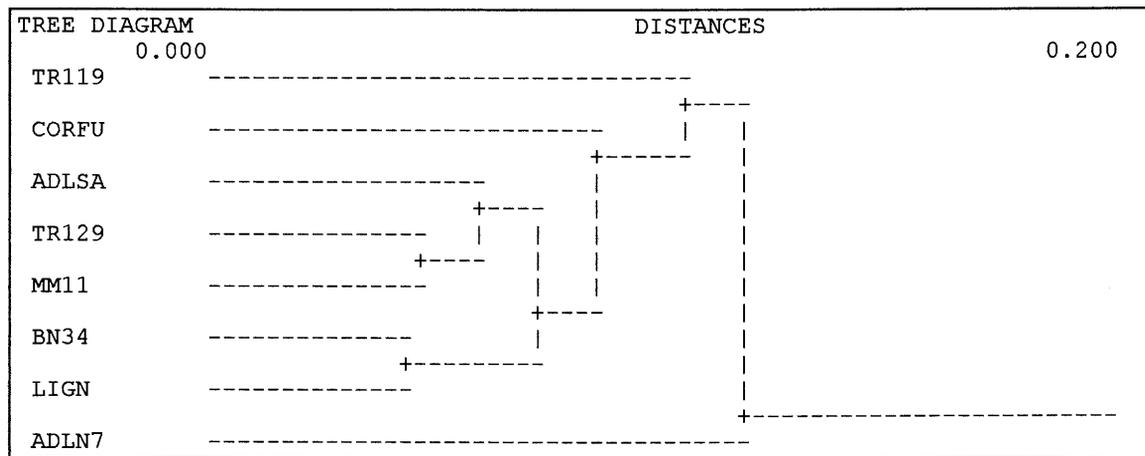


Figura 6.5. Projection Sphericity di Tickell: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLSA	0.874	1					
BN 34	0.178	0.145	1				
MM 11	0.238	0.200	0.905	1			
TR 119	0.091	0.144	0.002	0.004	1		
TR 129	0.335	0.275	0.681	0.783	0.006	1	
LIGN	0.004	0.004	0.103	0.092	0.000	0.041	1
CORFU	0.023	0.021	0.256	0.227	0.000	0.132	0.742

Tabella 6.5. Projection Sphericity di Tickell: valori di probabilità dal T-test.

6.6 Projection Sphericity (dc/Dc) di Wadell (1935)

Si tratta di un altro parametro che misura la circolarità di una figura. Ha un range teorico tra 0.5 e 1; valori uguali ad 1 sono propri del cerchio.

Il range della totalità dei granuli considerati è di 0.532-0.973.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.792-0.813. CORFU e LIGN presentano entrambi valori medi più elevati: 0.820 e 0.823 rispettivamente.

Valori modali

I campioni TR 119 e CORFU presentano la moda principale nell'intervallo 0.775-0.80; TR 129 tra 0.80-0.825; ADLS A, ADLN 7, BN 34 e LIGN tra 0.825-0.85 mentre MM 11 presenta l'intervallo modale più ampio (0.80-0.85).

Il campione BN 34 presenta una moda secondaria nell'intervallo 0.70-0.725; ADLS A e MM 11 tra 0.75-0.775; TR 119 tra 0.825-0.85 ed infine CORFU nell'intervallo 0.875-0.90.

Il campione ADLS A presenta una terza moda nell'intervallo 0.65-0.675 (fig. 6.16).

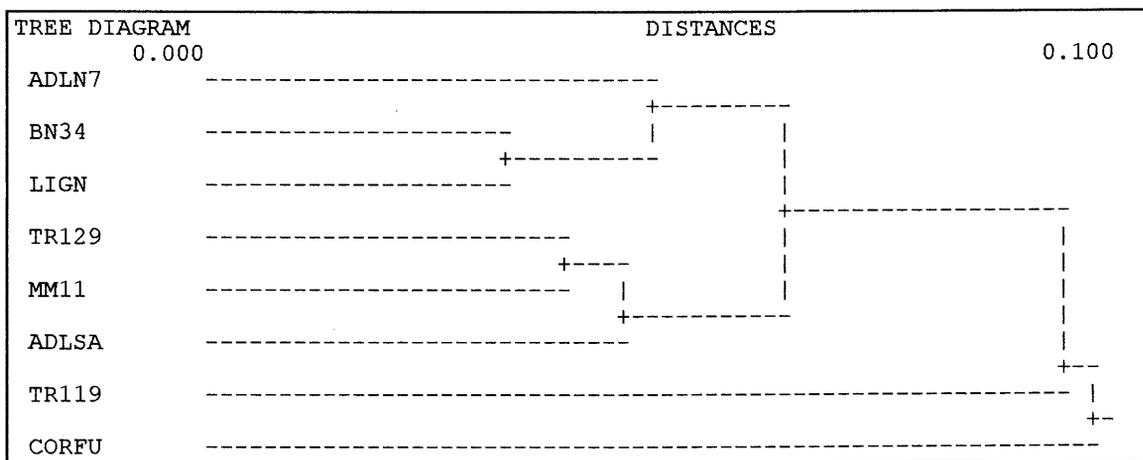


Figura 6.6. Projection Sphericity di Wadell: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLSA	0.804	1					
BN 34	0.168	0.118	1		10 Esiti Positivi (35.7%)		
MM 11	0.209	0.153	0.938	1			
TR 119	0.089	0.171	0.002	0.003	1		
TR 129	0.316	0.225	0.682	0.751	0.005	1	
LIGN	0.004	0.003	0.108	0.102	0.000	0.043	1
CORFU	0.023	0.018	0.273	0.254	0.000	0.142	0.723

Tabella 6.6. Projection Sphericity di Wadell: valori di probabilità dal T-test.

6.7 Elongazione (Lüttig, 1956)

Il range teorico di questo parametro si estende tra 0 e 1. Valori prossimi a 0 vengono assunti da granuli molto stretti ed allungati ($AS_1 \gg AS_2$), valori pari a 0.5 da granuli con $AS_1 = \frac{1}{2} AS_2$ mentre valori uguali ad 1 da granuli di forma circolare e quadrata ($AS_1 = AS_2$).

Il range complessivo assunto dalla totalità dei granuli degli 8 campioni in esame è tra 0.311-0.998.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.703-0.736; CORFU è di 0.719 mentre LIGN (valore medio di 0.756) ricade all'esterno del range antartico, verso forme meno allungate.

Valori modali

Anche per questo parametro la distribuzione degli intervalli modali principali e secondari risulta piuttosto complessa.

Il campione ADLN 7 presenta una doppia moda principale negli intervalli 0.65-0.685 e 0.755-0.79. I campioni TR 119 e CORFU presentano la moda principale nell'intervallo 0.72-0.755; ADLS A e MM 11 tra 0.755-0.79; i campioni BN 34 e TR 129 nell'intervallo 0.79-0.825. La moda principale del campione LIGN risulta invece spostata nell'intervallo 0.825-0.86.

I campioni TR 129 e MM 11 presentano una moda secondaria nell'intervallo 0.615-0.65; ADLS A e LIGN tra 0.65-0.685; BN 34 presenta una doppia moda secondaria negli intervalli 0.65-0.685 e 0.72-0.755 ed infine TR 119 e CORFU tra 0.825-0.86.

Il campione CORFU presenta un terzo pronunciato intervallo modale tra 0.65-0.685; TR 129 tra 0.72-0.755; ADLS A tra 0.825-0.895 ed infine BN 34 tra 0.895-0.93 (*fig. 6.17*).

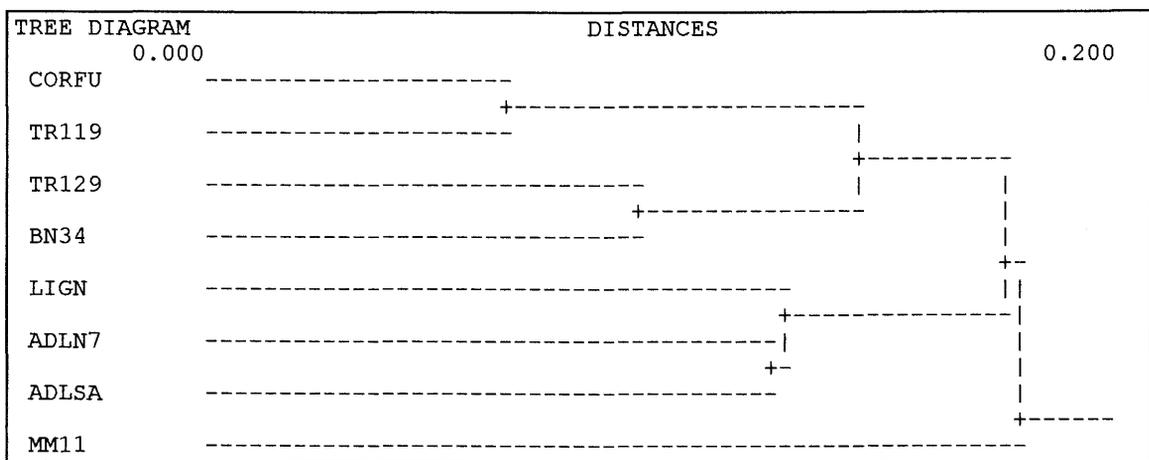


Figura 6.7. Elongazione: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN7	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLS A	0.860	1					
BN 34	0.217	0.335	1				
MM 11	0.459	0.614	0.631	1			
TR 119	0.164	0.140	0.008	0.034	1		
TR 129	0.409	0.564	0.642	0.966	0.022	1	
LIGN	0.003	0.010	0.068	0.024	0.000	0.020	1
CORFU	0.880	0.759	0.176	0.378	0.233	0.336	0.002

Tabella 6.7. Elongazione: valori di probabilità dal T-test.

6.8 Perimetro specifico (P/Pc):

Si tratta di un altro parametro che stima la circolarità di una figura; il suo range teorico si estende tra 1 (cerchio) e ∞ .

La totalità dei granuli presi in esame presenta il range 1-1.411, quindi molto più ristretto del teorico.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 1.108-1.129; LIGN è prossimo al suo estremo inferiore con il valore medio di 1.109 mentre CORFU con 1.078 si colloca al di fuori del range dei campioni antartici.

Valori modali

I campioni CORFU e ADLS A presentano la moda principale compresa in un intervallo di ampiezza doppia, pari a 1.045-1.09 e 1.0675-1.1125 rispettivamente. I campioni ADLS A, ADLN 7 e TR 129 tra 1.0675-1.09; BN 34, MM 11 e LIGN tra 1.09-1.1125. Il campione TR 119 tra 1.1125-1.135.

Il solo campione TR 119 presenta una moda secondaria nell'intervallo 1.18-1.2025 (fig. 6.18).

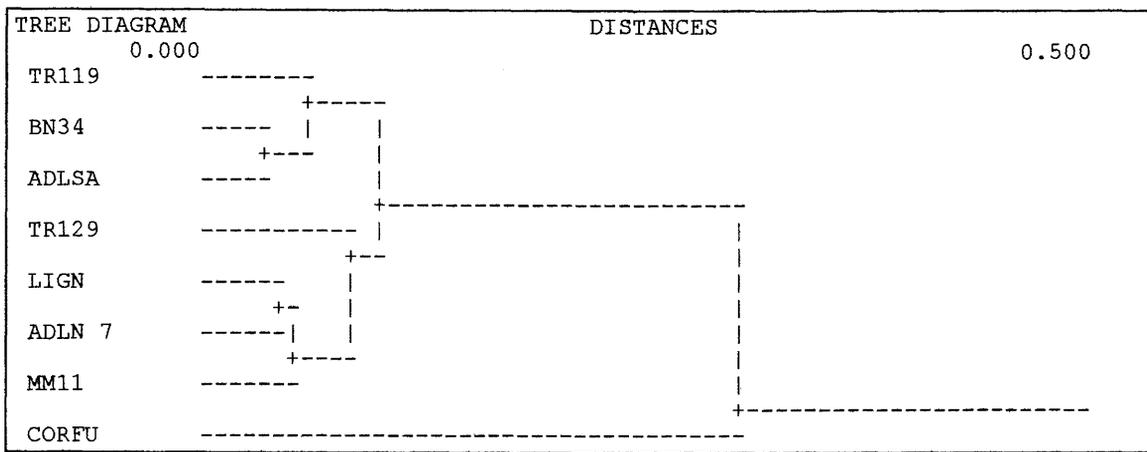


Figura 6.8. Perimetro specifico: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN7	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLS A	0.064	1					
BN 34	0.240	0.363	1				
MM 11	0.084	0.001	0.002	1			
TR 119	0.022	0.750	0.184	0.000	1		
TR 129	0.158	0.001	0.007	0.767	0.000	1	
LIGN	0.163	0.002	0.007	0.743	0.000	0.978	1
CORFU	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabella 6.8. Perimetro specifico: valori di probabilità dal T-test.

Le coppie dei campioni che risultano significativamente differenti tra di loro secondo i T-test effettuati sono 17 pari al 60.7% delle coppie totali (28). In particolare il campione CORFU risulta essere diverso da tutti gli altri.

6.9 Dissimmetria dell'AS₁ rispetto all'AS₂ (Cailleux, 1952)

Il range teorico di questo parametro si estende tra 0.5 -1; valori uguali a 0.5 vengono assunti da forme quali ellissi, cerchi, quadrati, rombi, etc. mentre uguali ad 1 da triangoli equilateri ed isosceli nonché da semicerchi e semiellissi, derivati dalla fratturazione di granuli molto elaborati in corrispondenza dell'AS₂.

Il range di tutti i granuli considerati si estende tra 0.50-0.871.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.599-0.613 mentre LIGN presenta un valore medio di 0.606 e CORFU 0.602.

Valori modali

I campioni ADLS A e TR 119 presentano la moda principale nell'intervallo 0.50-0.525; ADLN 7 e CORFU tra 0.525-0.55; TR 129 e LIGN tra 0.55-0.575 mentre BN 34 e MM 11 nell'intervallo 0.575-0.60.

Il campione TR 119 presenta una moda secondaria nell'intervallo 0.575-0.60; ADLN 7 tra 0.60-0.625; BN 34 e CORFU tra 0.625-0.65 ed infine LIGN tra 0.725-0.75.

Il campione BN 34 presenta una terza moda nell'intervallo 0.70-0.725 e CORFU tra 0.75-0.775 (*fig. 6.19*).

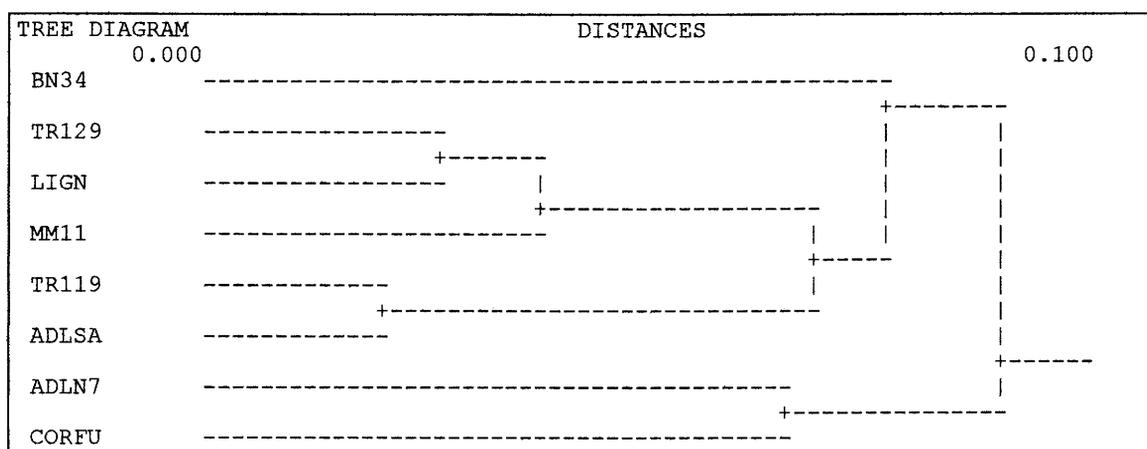


Figura 6.9. Dissimmetria dell'AS₁ rispetto all'AS₂ (Cailleux): clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN7	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLS A	0.910	1					
BN 34	0.452	0.507	1		0 Esiti	Positivi	
MM 11	0.716	0.615	0.237	1			
TR 119	0.246	0.272	0.626	0.113	1		
TR 129	0.150	0.167	0.447	0.060	0.809	1	
LIGN	0.521	0.583	0.895	0.280	0.536	0.368	1
CORFU	0.911	0.996	0.528	0.623	0.297	0.190	0.602

Tabella 6.9. Dissimmetria dell'AS₁ rispetto all'AS₂ (Cailleux): valori di probabilità dal T-test.

La dissimmetria di Cailleux dell'asse maggiore (AS₁) rispetto all'AS₂ è l'unico parametro per cui il T-test non discrimina alcun campione dagli altri.

6.10 Dissimmetria dell'AS₂ rispetto all'AS₁.

Come nel caso precedente il range teorico di questo parametro si colloca ancora tra 0.5 e 1.

Il range di tutti i granuli considerati si estende tra 0.50-0.996.

Il range dei valori medi dei campioni antartici è di 0.615-0.638; LIGN presenta un valore medio di 0.625, mentre CORFU con 0.613 si colloca esternamente al range dei campioni antartici.

Valori modali

Il campione ADLN 7 presenta la moda principale nell'intervallo 0.50-0.525 mentre tutti gli altri campioni nell'intervallo 0.55-0.575.

I campioni BN 34 e MM 11 presentano la moda secondaria nell'intervallo 0.625-0.65 ed il campione CORFU tra 0.6-0.625 e una terza moda tra 0.65-0.675 (fig. 6.20)

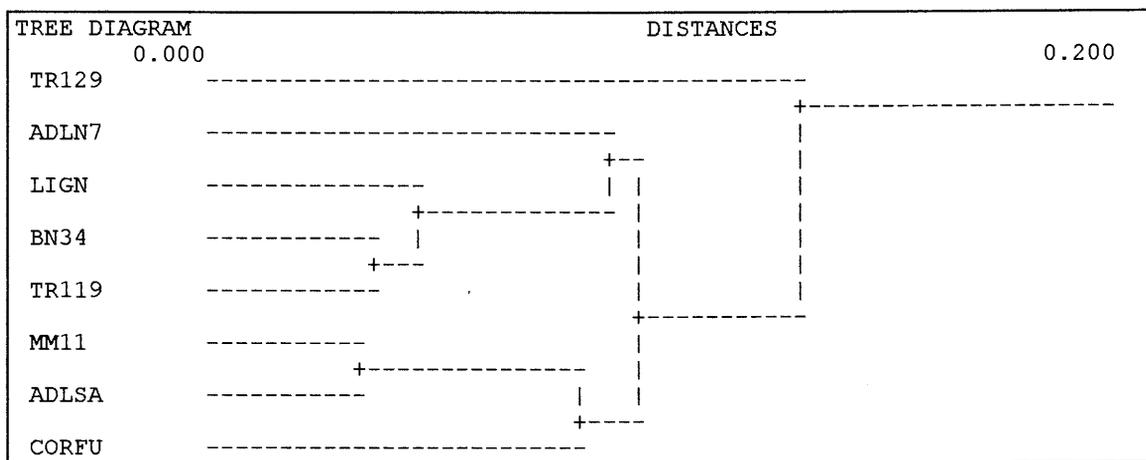


Figura 6.10. Dissimmetria dell'AS₂ rispetto all'AS₁: clusterizzazione degli spettri di frequenza.

	ADLN	ADLSA	BN 34	MM 11	TR 119	TR 129	LIGN
ADLN7	1						
ADLSA	0.631	1					
BN 34	0.309	0.605	1				
MM 11	0.744	0.883	0.508	1			
TR 119	0.163	0.358	0.654	0.293	1		
TR 129	0.014	0.048	0.118	0.037	0.287	1	
LIGN	0.248	0.513	0.884	0.425	0.758	0.155	1
CORFU	0.841	0.500	0.225	0.600	0.115	0.010	0.178

Tabella 6.10. Dissimmetria dell'AS₂ rispetto all'AS₁: valori di probabilità dal T-test.

Considerando i due indici di dissimmetria degli assi maggiore ed intermedio, si può avanzare l'ipotesi che nei granuli di quarzo siano favorite le dissimmetrie rispetto l'asse principale piuttosto che quelle rispetto l'asse intermedio. Non è improbabile che ciò dipenda dalla anisotropia mineralogica dei cristalli.

6.11 Spettri di frequenza di tutti gli indici morfometrici considerati

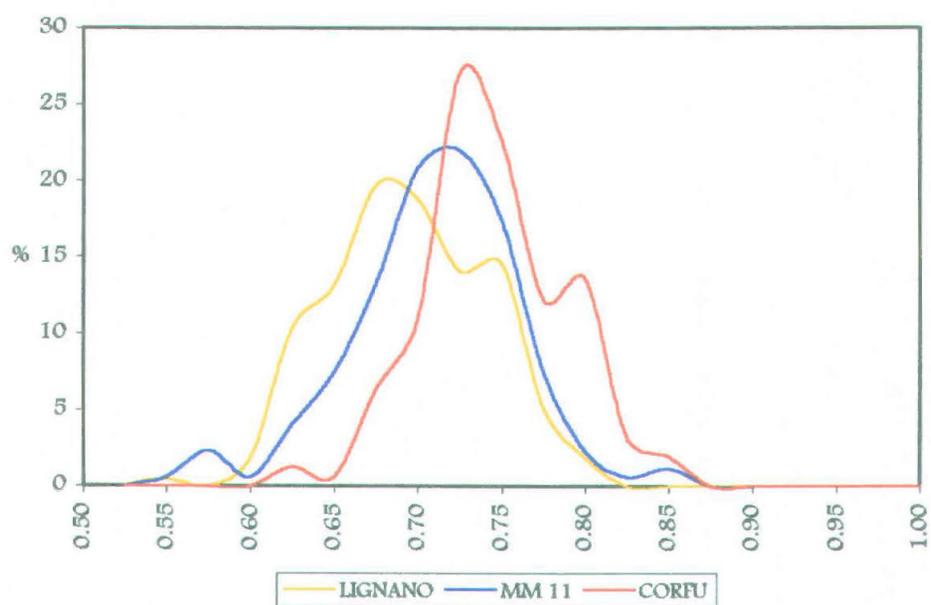
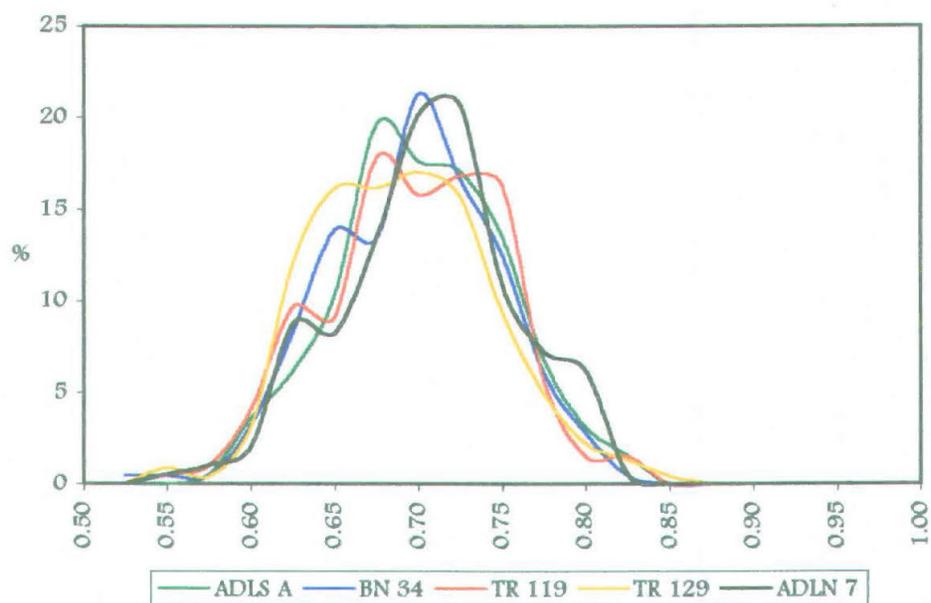


Figura 6.11. Fitting Rettangolare: spettri di frequenza.

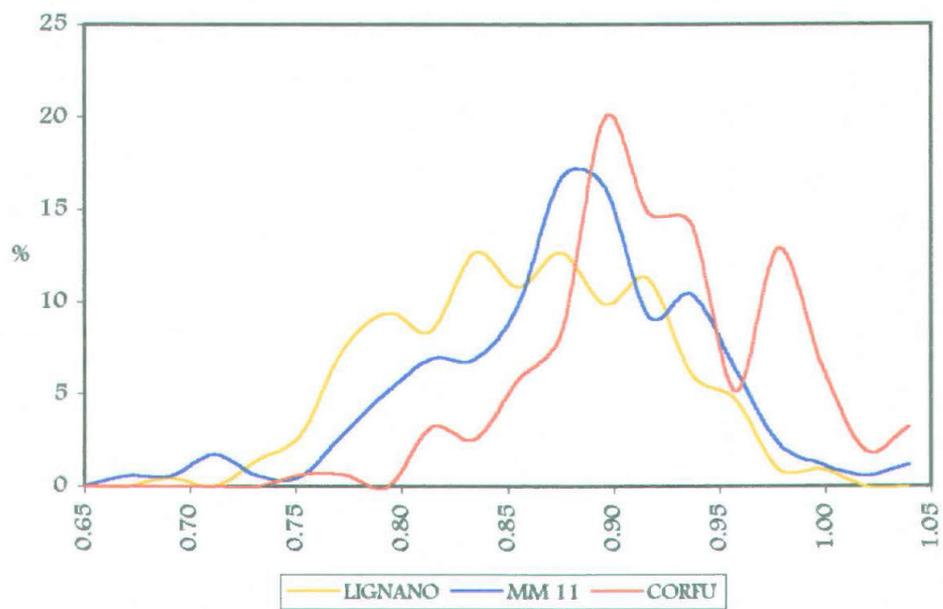
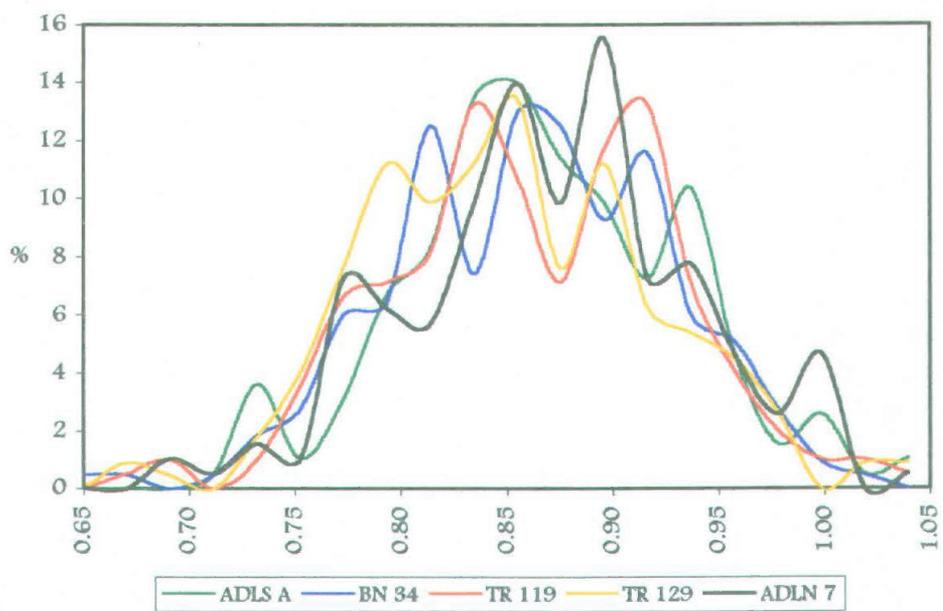


Figura 6.12. Fitting Ellittico: spettri di frequenza.

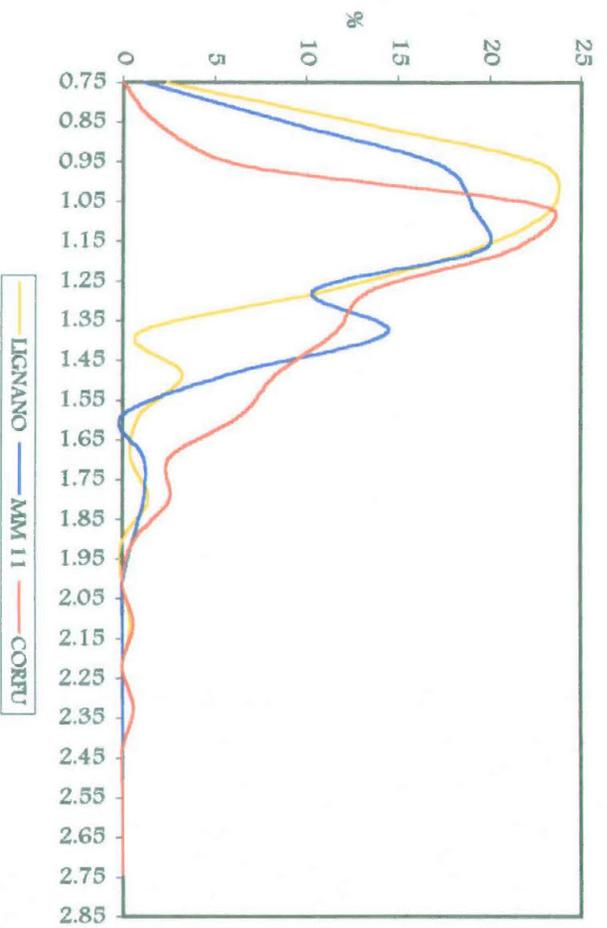
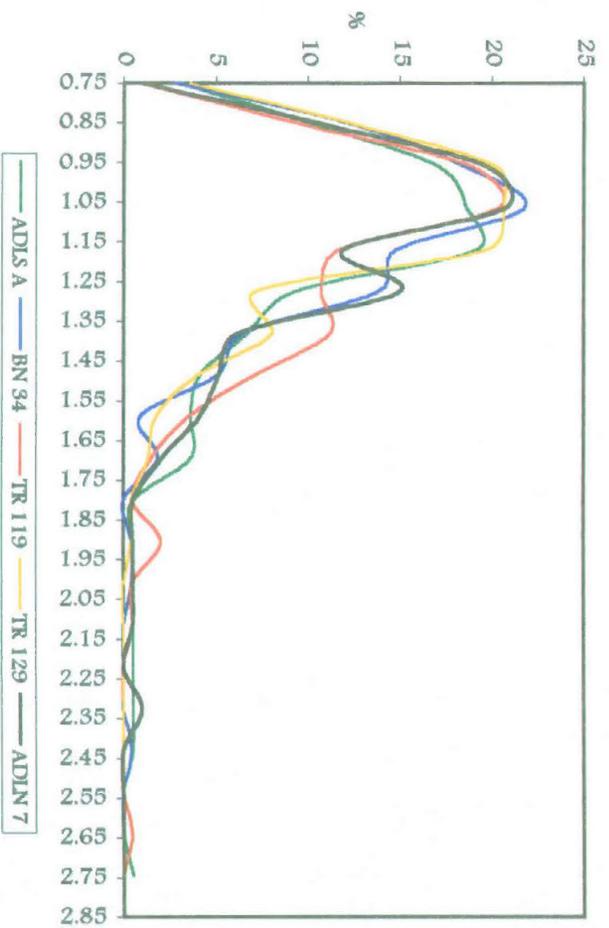


Figura 6.13. Fitting Circolare: spettri di frequenza.

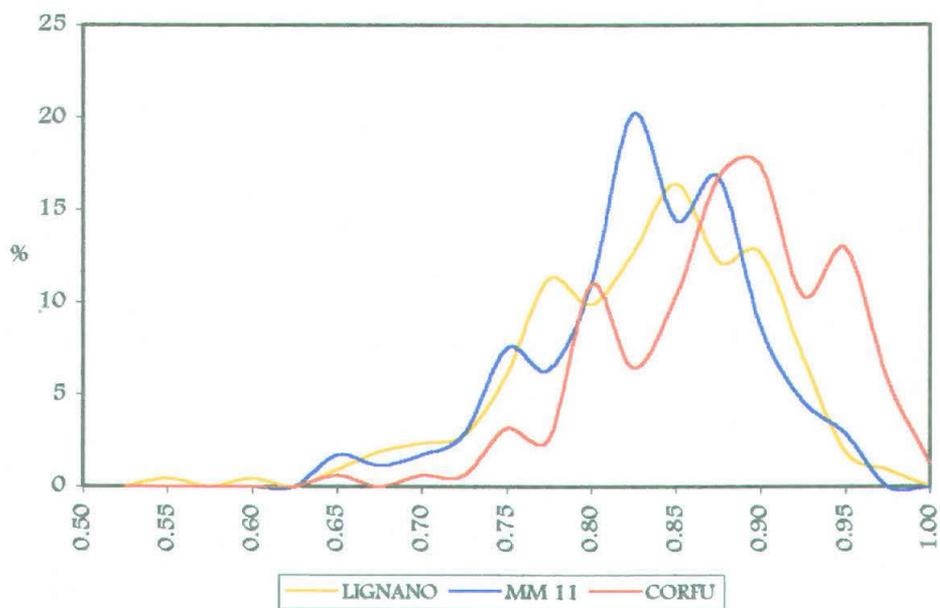
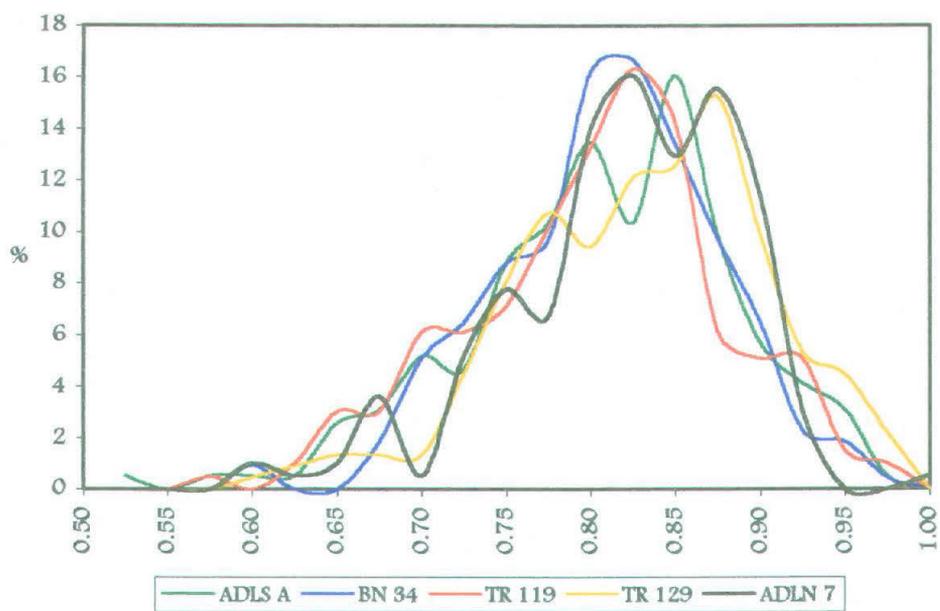


Figura 6.14. Indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox: spettri di frequenza.

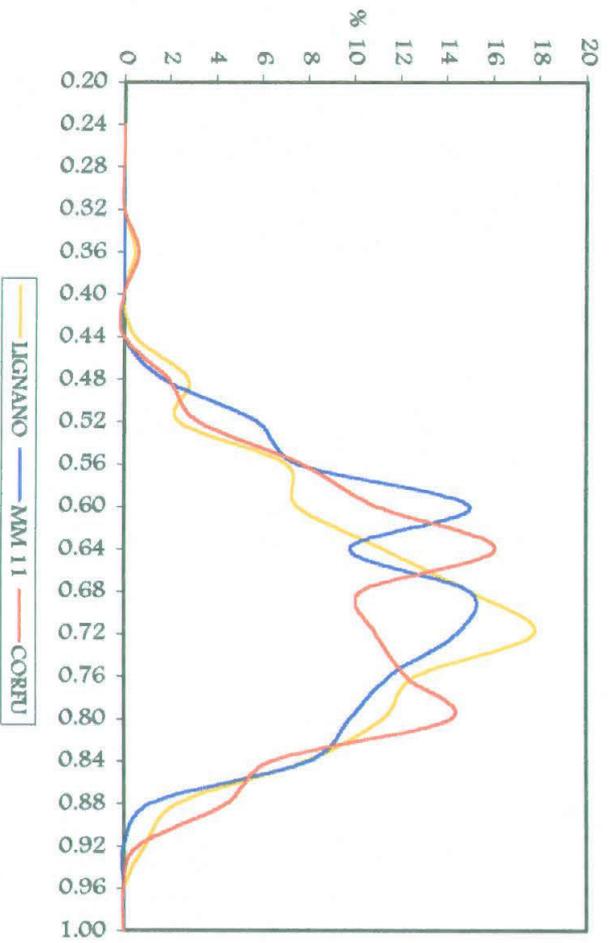
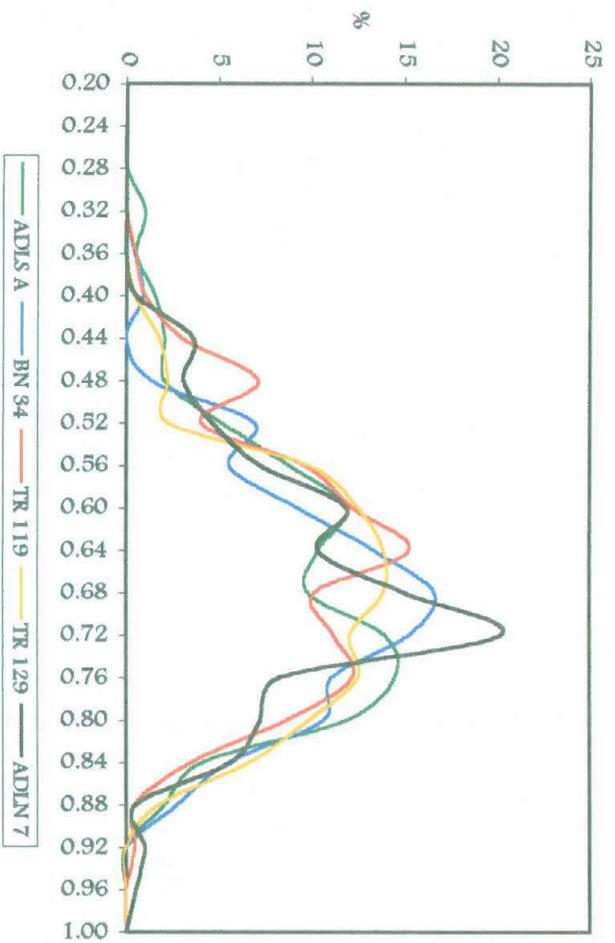


Figura 6.15. Projection sphericity di Tickell: spettri di frequenza.

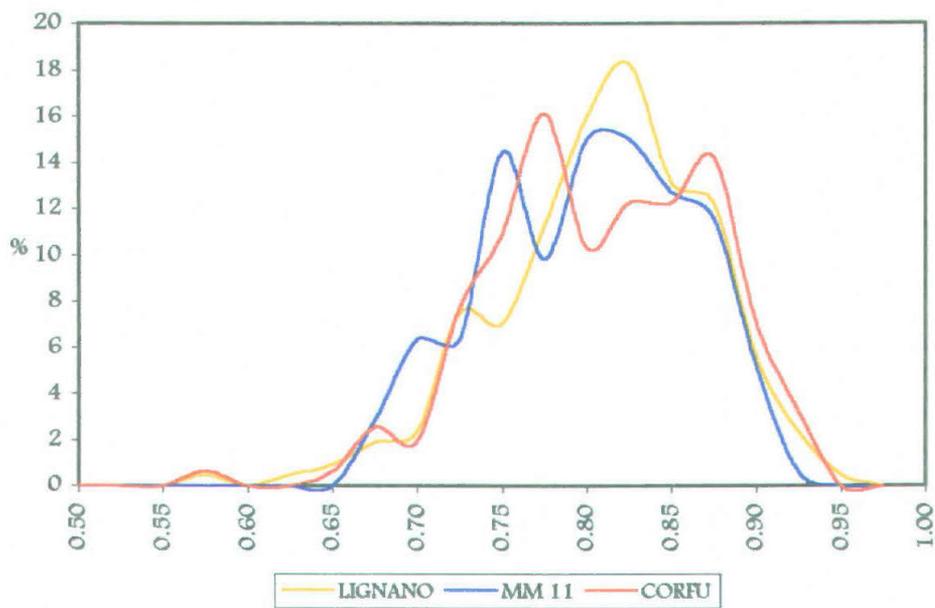
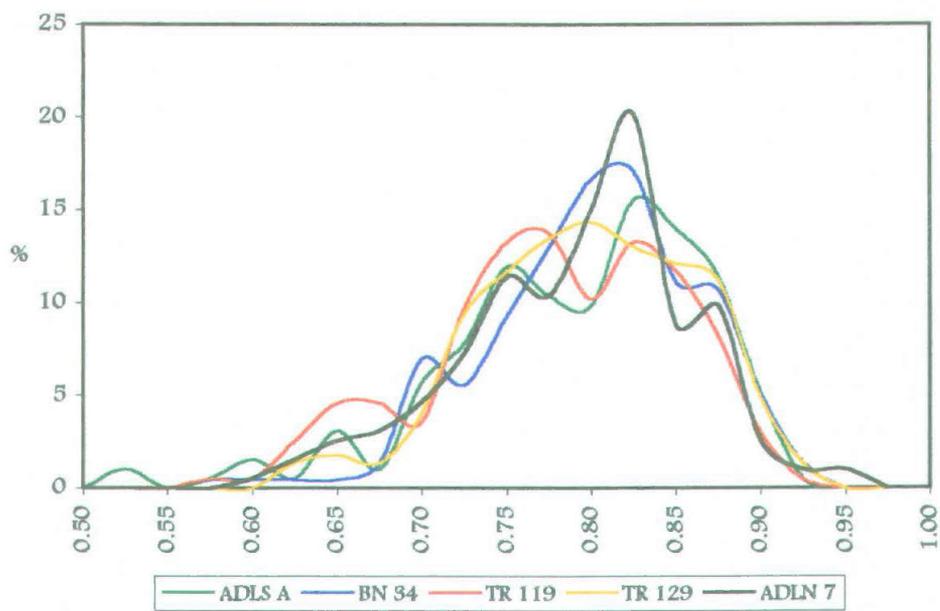


Figura 6.16. Projection sphericity di Wadell: spettri di frequenza.

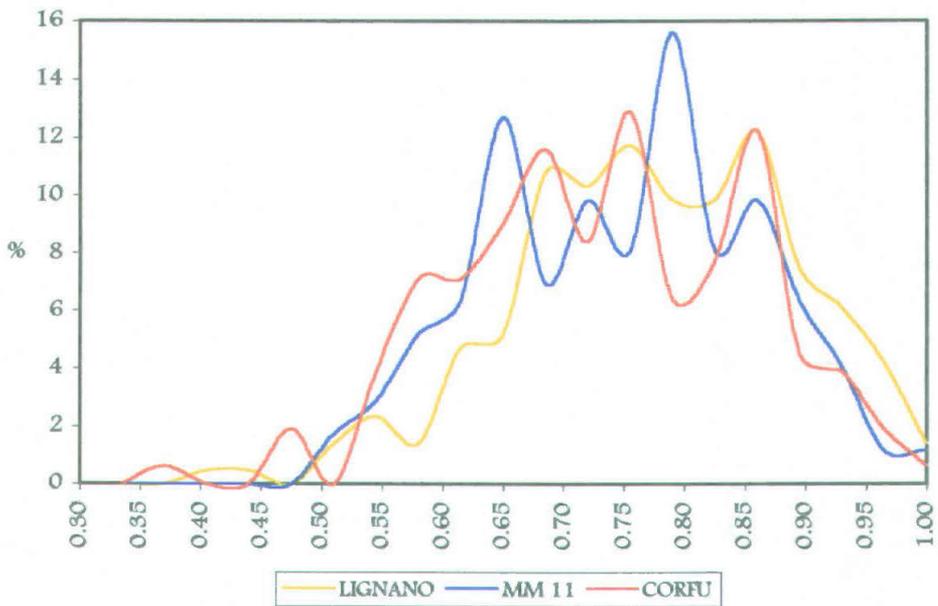
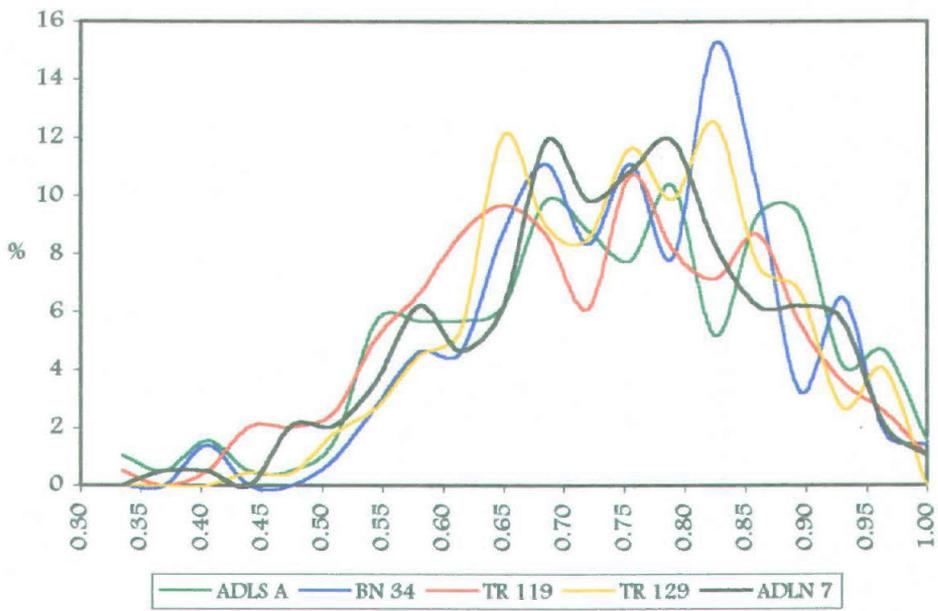


Figura 6.17. Elongazione: spettri di frequenza.

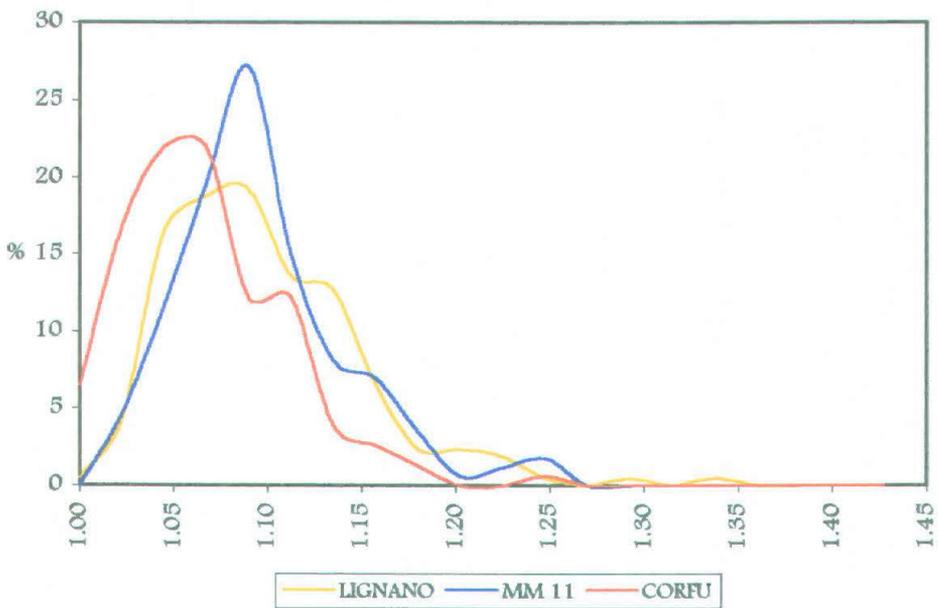
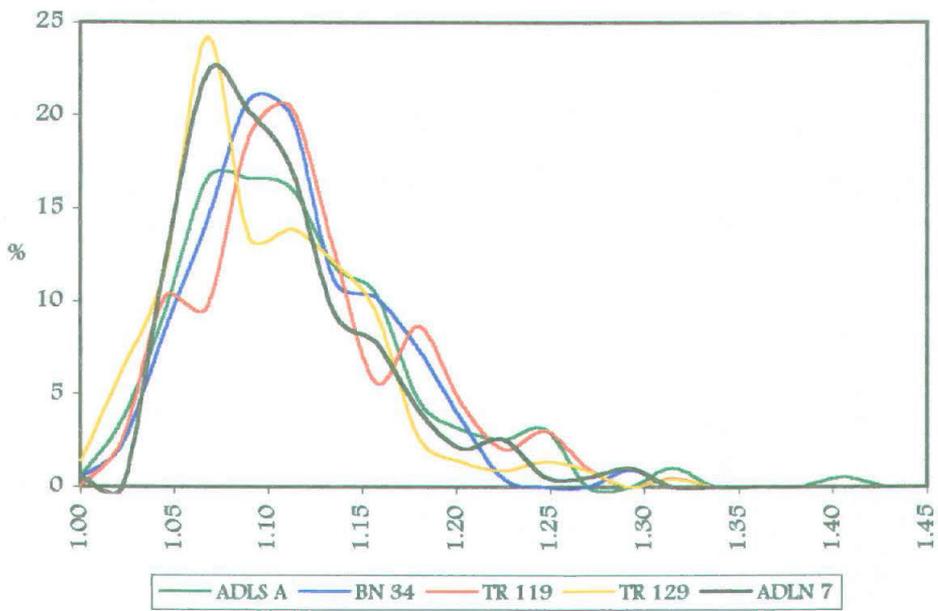


Figura 6.18. Perimetro specifico: spettri di frequenza.

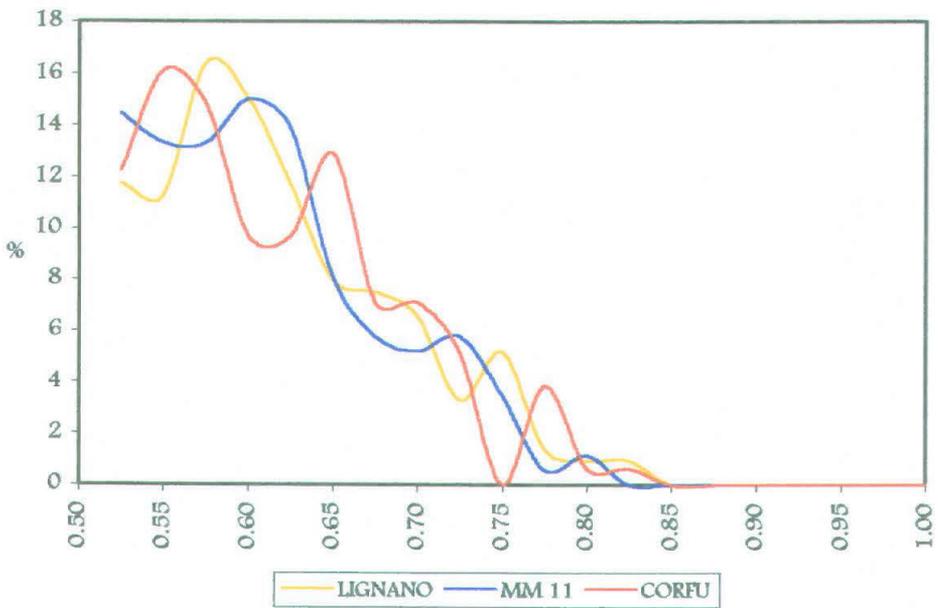
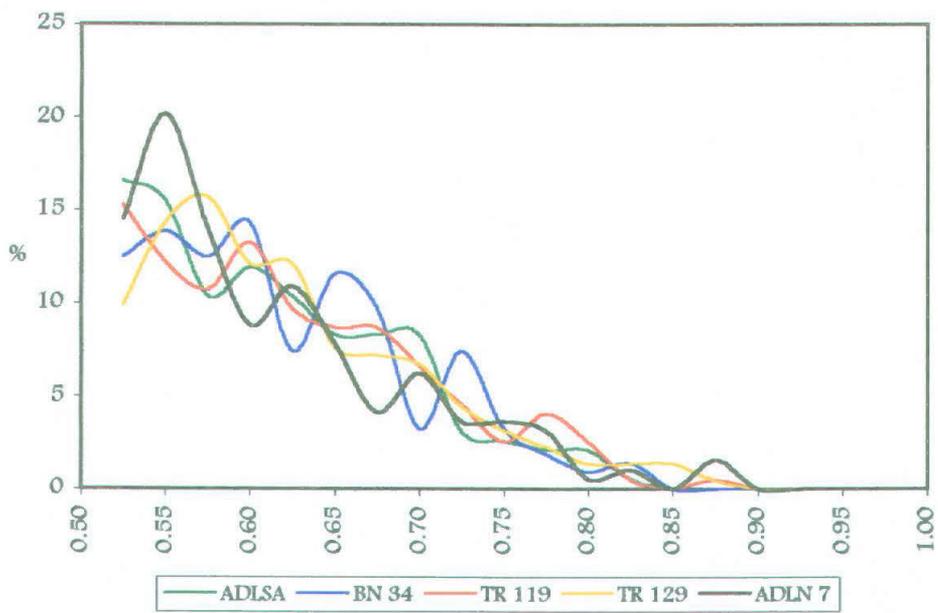


Figura 6.19. Dissimmetria dell'AS₁ rispetto all'AS₂ (Cailleux): spettri di frequenza.

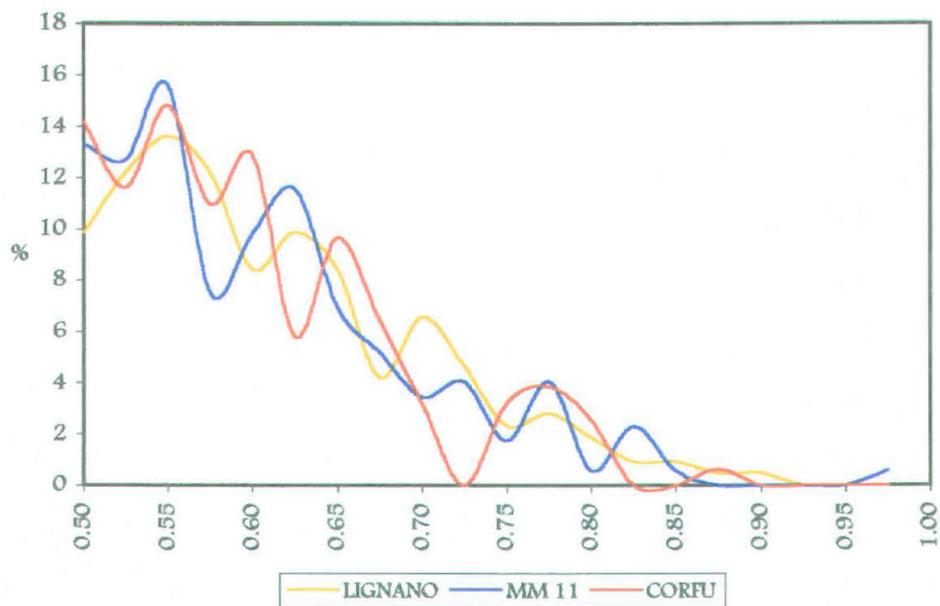
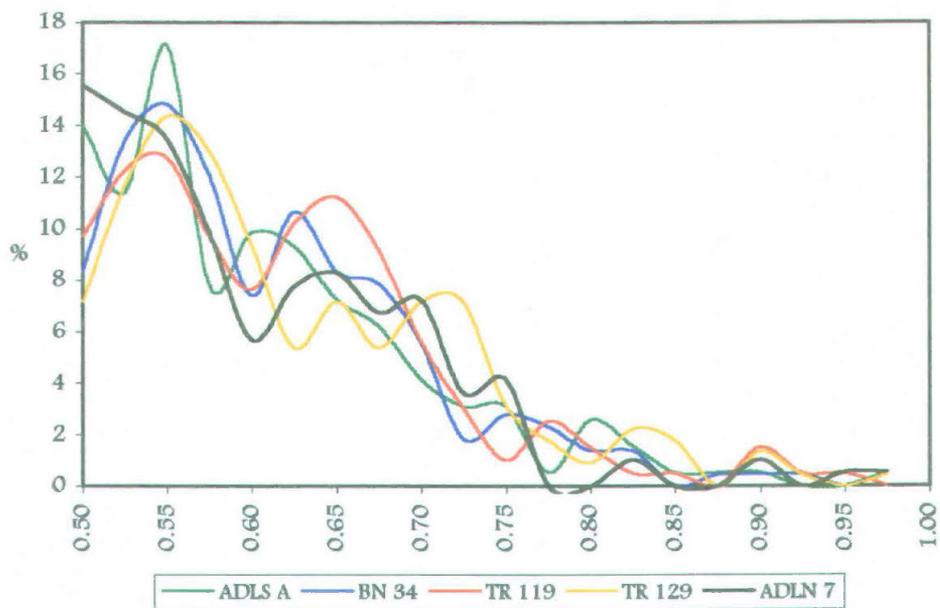


Figura 6.20. Dissimmetria dell' AS_2 rispetto all' AS_1 : spettri di frequenza.

6.12 Discussione

La clusterizzazione degli spettri di frequenza del Fitting Rettangolare associa i campioni TR 119, ADLS A e LIGN allo stesso cluster mentre, le due coppie TR 129, BN 34 e ADLN 7, MM 11 vengono riunite in due cluster distinti. Il campione CORFU risulta essere isolato (*fig. 6.1*). Queste somiglianze tra i vari campioni vengono confermate anche dagli esiti del T-test. L'unico campione che rimane sempre distinto dagli altri è CORFU (*tab. 6.1*).

La clusterizzazione dei spettri di frequenza del Fitting Ellittico riunisce i campioni TR 119, TR 129, LIGN allo stesso cluster, come anche i campioni ADLN 7 e ADLS A. I campioni MM 11, CORFU e BN 34 si presentano isolati (*fig. 6.2*). L'analisi del T-test conferma perfettamente quanto sopra (*tab. 6.2*).

Gli spettri di frequenza del Fitting Circolare sono riuniti in 2 cluster. Al primo appartengono i campioni TR 119, ADLN 7 e BN 34, al secondo LIGN, TR 129 ed ADLS A. I campioni MM 11 e CORFU restano isolati (*fig. 6.3*). Per quanto riguarda il confronto dei valori medi di questo parametro, gli esiti del T-test forniscono risultati assai discordi (*tab. 6.3*).

L'indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox è raggruppato in 3 cluster. I campioni TR 119, BN 34 e ADLS A ne costituiscono il primo, LIGN e TR 129 il secondo e MM 11 e ADLN 7 il terzo. CORFU rimane isolato (*fig. 6.4*). Gli esiti del T-test confermano la clusterizzazione (*tab. 6.4*).

Dalla clusterizzazione dei spettri di frequenza della *projection sphericity* di Tickell vengono individuati 2 cluster. Infatti, i campioni TR 119, CORFU e ADLN 7 restano isolati mentre risultano raggruppati i campioni ADLS A, MM 11 e TR 129 nonché BN 34 e LIGN (*fig. 6.5*). Le somiglianze individuate con la *cluster analysis* vengono conservate anche dall'analisi con i T-test (*tab. 6.5*).

Per la *projection sphericity* di Wadell, i cluster individuati sono 2. Risultano raggruppati i campioni ADLS A, MM 11 e TR 129 nonché BN 34 e LIGN. Restano isolati, invece, i campioni TR 119, CORFU e ADLN 7 (*fig. 6.6*). Le somiglianze individuate con la *cluster analysis* vengono conservate anche dall'analisi con i T-test (*tab. 6.6*).

Dalla clusterizzazione dei spettri di frequenza dell'Elongazione vengono individuati 3 cluster. I campioni CORFU e TR 119 costituiscono il primo, TR 129 e BN 34 il secondo, LIGN, ADLN 7 e ADLS A il terzo. Il campione MM 11 resta isolato (*fig. 6.7*). L'analisi dei test di significatività delle medie conferma soltanto in parte i

raggruppamenti della clusterizzazione, riconoscendo un numero di raggruppamenti più ampio (*tab. 6.7*).

Per il Perimetro Specifico sono stati individuati 2 cluster. Il primo è costituito da campioni TR 119, BN 34 e ADLS A, il secondo da TR 129, LIGN, ADLN 7 e MM 11. Il CORFU resta isolato (*fig. 6.8*). Le stesse somiglianze vengono confermate anche dagli esiti del T-test (*tab. 6.8*).

Dalla clusterizzazione dei spettri di frequenza dell'indice di Dissimmetria dell'AS₁ (rispetto all'AS₂) di Cailleux sono stati individuati 2 cluster. BN 34, ADLN 7 e CORFU risultano isolati mentre il primo cluster raggruppa i campioni TR 129, LIGN e MM 11 ed il secondo TR 119 e ADLS A (*fig. 6.9*). Il confronto dei valori medi con T-test, invece, dimostra invece che tutti i campioni sono uguali (*tab. 6.9*).

Dalla clusterizzazione dei spettri di frequenza dell'indice di Dissimmetria dell'AS₂ (rispetto all'AS₁) sono stati individuati 5 cluster. Il primo è costituito dai campioni LIGN, BN 34 e TR 119 ed il secondo da MM 11 ed ADLS A. TR 129, ADLN 7 e CORFU risultano isolati (*fig. 6.10*). Per questo parametro gli esiti del T-test confermano la suddetta clusterizzazione (*tab. 6.10*).

6.13 Considerazioni conclusive

Come già ricordato, ciascun indice descrive meglio degli altri un qualche aspetto formale del granulo, ossia possiede un proprio contenuto descrittivo intrinseco, contenuto che ora può essere "quantificato" in termini non più aleatori bensì oggettivi. Le quantità formali possono inoltre essere riconosciute nell'intera popolazione dei granuli costituenti il campione e considerate in funzione sia della loro distribuzione di frequenza sia in termini di valori di tendenza centrale.

Ma risulta evidente anche che nessun indice, da solo, riesce a restituire la complessità formale del granulo né, da solo considerato, a discriminare campioni in modo netto. La ricerca quindi è proseguita nel tentativo di descrivere e discriminare i campioni per mezzo di una combinazione di più indici.

7. SCELTA DEI DESCRITTORI DELLO “SHAPE”

7.1 Analisi fattoriale ed estrazione dei descrittori dello “shape”

Scopo principale dell'elaborazione dei dati è quello di descrivere, nel modo più esaustivo possibile, l'estrema variabilità formale di un elevato numero di granuli con il minor numero di indici formali.

A questo proposito si è proceduto ad una scelta degli indici descrittori. Il primo elemento da verificare era la presenza di eventuali correlazioni tra gli indici disponibili allo scopo di trascurare quelli risultati ridondanti. Strette correlazioni tra Fitting Ellittico e Fitting Rettangolare, *Projection Sphericity* di Wadell e *Projection Sphericity* di Tickell, Indice di Circolarità/Arrotondamento di Cox e Perimetro Specifico sono infatti già state evidenziate (cfr. § 5.3.)

E' stata eseguita un'analisi fattoriale di tipo *R-mode* utilizzando il programma statistico *Systat*. L'analisi fattoriale è stata applicata sulla matrice di correlazione degli indici invece che sulla matrice di covarianza, per dare a ciascun indice un ugual peso nell'analisi (Illenberger, 1991). Per ottimizzare il risultato si è operata una rotazione ortogonale degli assi con il metodo *Varimax*.

Per ridurre il più possibile l'entità della varianza irrisolta, normalmente funzione del numero di fattori con *eigenvalue* <1, si è deciso di estrarre i fattori significativi attraverso il metodo grafico dello “*scree plot*” che ha incluso anche un fattore con *eigenvalue* <1 ma con gradiente pronunciato rispetto al successivo. In tal modo, la soluzione finale è costituita da 3 fattori che rappresentano una varianza totale del 79.33% (*tab. 7.1*). La varianza residua è attribuibile all'estrema variabilità dei due indici Dissimmetria dell'AS₁ rispetto all'AS₂ di Cailleux (1952) e Dissimmetria dell'AS₂ rispetto all'AS₁, come dimostrato dai bassissimi valori di *factor loading* in ciascuno dei tre Fattori.

Poiché non è possibile ottimizzare in nessun modo l'utilizzo di queste due variabili, la cui distribuzione è del tutto casuale e totalmente indipendente dagli altri descrittori, si è deciso di ripetere l'analisi fattoriale escludendoli, e utilizzando solamente 8 indici. La risoluzione a tre fattori, ottenuta applicando gli stessi criteri descritti in precedenza, ha portato ad una varianza totale del 97.76% (*tab. 7.2*).

	EIGENVALUES	% VARIANZA	% VARIANZA CUMULATA	FATTORI
1	4.700	47.00	47.00	1
2	2.462	24.62	71.62	2
3	0.738	7.38	79.00	3
4	0.068			
5	0.018			
6	0.003			
7	-0.003			
8	-0.013			
9	-0.018			
10	-0.055			

ROTATED VARIMAX FACTOR LOADING			
INDICI	FATTORE 1	FATTORE 2	FATTORE 3
	<i>factor loadings</i>		
Elongazione	-0.925	-0.034	0.258
dc/Dc	-0.888	0.256	0.363
A/Ac	-0.886	0.262	0.354
FC	0.819	0.480	-0.206
FR	0.003	0.987	0.150
FE	0.003	0.987	0.150
Cox	-0.334	0.238	0.911
P/Pc	0.339	-0.229	-0.908
Cailleux (AS1)	0.133	0.002	-0.148
Dissimmetria (AS2)	0.057	-0.157	-0.132
% DELLA VARIANZA TOTALE	33.473	24.476	21.045

Tabella 7.1. Eigenvalues e factor loadings per gli indici considerati.

	EIGENVALUES	% VARIANZA	% VARIANZA CUMULATA	FATTORI
1	4.638	46.36	46.36	1
2	2.442	24.42	70.78	2
3	0.734	7.34	78.12	3
4	0.032	0.32		
5	0.001	0.01		
6	-0.003	-0.03		
7	-0.010	-0.01		
8	-0.019	-0.19		

ROTATED VARIMAX FACTOR LOADING			
INDICI	FATTORE 1	FATTORE 2	FATTORE 3
	<i>factor loadings</i>		
Elongazione	0.925	-0.075	0.242
dc/Dc	0.900	0.213	0.364
A/Ac	0.898	0.220	0.355
FC	-0.805	0.513	-0.180
FR	0.031	0.980	0.186
FE	0.031	0.980	0.186
P/Pc	-0.355	-0.184	-0.914
Cox	0.351	0.193	0.913
% DELLA VARIANZA TOTALE	42.142	29.455	26.082

Tabella 7.2. Eigenvalues e factor loadings per gli indici residui.

Dalla seconda analisi fattoriale si evince che il primo fattore raggruppa 4 indici, il secondo 2 ed il terzo altri 2. Essi sono raggruppati nella *tabella 7.3*.

FATTORE 1	FATTORE 2	FATTORE 3
Elongazione (Lüttig, 1956) $\frac{AS_2}{AS_1}$	Fitting Rettangolare $\frac{A}{A_r}$	Indice di Circolarità / Arrotondamento di Cox (1927) $\frac{4\pi A}{P^2}$
Projection Sphericity (Wadell, 1935) $\frac{d_c}{D_c}$	Fitting Ellittico $\frac{A}{A_e}$	Perimetro Specifico $\frac{P}{P_c}$
Projection Sphericity (Tickell, 1931) $\frac{A}{A_c}$		
Fitting Circolare $\frac{A}{A_{cr}}$		

Tabella 7.3. Raggruppamento degli indici nei tre fattori.

A questo punto può essere estratto un solo descrittore “tipo” da ciascun fattore che raggruppa distinte tipologie di descrittori di forma intercorrelati. In questo modo ogni granulo può essere rappresentato da un numero piccolo di indici “chiave”, facilmente manipolabili, che tuttavia devono soddisfare, possibilmente, tutti i seguenti requisiti, in ordine di priorità:

- a) minimo valore del coefficiente di correlazione extra-gruppo;
- b) massimo valore del coefficiente di correlazione inter-gruppo;
- c) massimo grado di discriminazione, tra campioni differenti, fornito dalla sommatoria degli esiti positivi del T-test (cfr. cap. 6).

Inoltre, deve essere sempre verificata la condizione che i 3 descrittori siano di tipo semplice e che nel loro insieme utilizzino tutti i parametri geometrici primitivi da cui derivano, ossia area, perimetro, AS_1 , AS_2 . I requisiti a) e b) possono essere facilmente testati attraverso l’analisi della matrice di correlazione di Pearson (*tab. 7.4*).

	FR								
FE	1.000	FE							
FC	0.442	0.442	FC						
COX	0.370	0.370	-0.345	COX					
A/Ac	0.306	0.306	-0.663	0.684	A/Ac				
dc/Dc	0.302	0.302	-0.676	0.689	0.998	dc/Dc			
Elong	0.005	0.005	-0.840	0.532	0.896	0.896	Elong		
P/Pc	-0.362	-0.362	0.359	-0.994	-0.681	-0.690	-0.534	P/Pc	
Diss. Cailleux	-0.024	-0.024	0.140	-0.184	-0.155	-0.153	-0.192	0.176	Diss. Cailleux
Diss.(AS ₂)	-0.174	-0.174	-0.017	-0.178	-0.127	-0.124	-0.117	0.176	0.033

Tabella 7.4. Matrice di correlazione di Pearson di tutti gli indici morfometrici.

L'elongazione, il Fitting Rettangolare e l'indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox, sono risultati i tre indici che meglio soddisfano le condizioni sopra esposte.

7.2 Cluster Analysis e gerarchizzazione dello "shape"

In base a questi tre indici, è stata eseguita una *cluster analysis* con il metodo *k-means* sull'intera popolazione di granuli.

Sono stati ricavati 4 cluster che rappresentano la totalità dei granuli testati ad esclusione delle forme limite.

Negli istogrammi di frequenza dei tre indici migliori descrittori, (figg. 7.1, 7.2, 7.3), si osserva come si collocano le medie e le deviazioni standard dei quattro cluster, considerando l'intera popolazione di granuli testati.

Per quanto riguarda l'indice dell'elongazione, il "Cluster 1" con una media pari a 0.83 si colloca tra le forme più equantcy⁶ mentre gli altri tre cluster con medie pari a 0.79, 0.63 e 0.59 rispettivamente indicano forme via via più allungate (fig. 7.1).

Per il Fitting Rettangolare, invece, si osserva una sovrapposizione dei cluster. I "Cluster 1" e "Cluster 3" con una media pari a 0.73 si posizionano tra le forme più

⁶ Questo termine è stato usato da Teller (1976) come sinonimo esclusivo di sfericità. In questo lavoro invece, viene usato per rappresentare le forme bidimensionali equiassiali (quali cerchio e quadrato).

circolari ed ellittiche mentre i “Cluster 2” e “Cluster 4”, presentando media pari a 0.65, si collocano tra quelle più angolari (*fig. 7.2*).

Per quanto riguarda l'indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox il “Cluster 1” presentando una media pari a 0.89 si posiziona tra le forme circolari e arrotondate, i “Cluster 2” e “Cluster 3” con una media pari a 0.81 si collocano verso le forme più quadrate (aumenta l'angolarità) mentre il “Cluster 4” (media 0.71) si posiziona verso le forme nettamente più angolate (*fig. 7.3*).

Per rappresentare graficamente la ripartizione nello spazio della totalità dei granuli, sui tre piani Cox-Elongazione, Cox-Fitting Rettangolare e Fitting Rettangolare-Elongazione, sono state usate le curve di isodensità (Silverman, 1986) (*fig. 7.4*).

Nel complesso il “Cluster 1” rappresenta granuli equantcy, circolari ed arrotondati mentre il “Cluster 4” granuli molto allungati con profili angolati. I “Cluster 2” e “Cluster 3”, invece, rappresentano granuli di “shape” intermedio rispetto agli altri due ma si differenziano tra di loro in quanto il primo rappresenta granuli meno allungati ma di profilo più angolato ed il secondo granuli più allungati ma di profilo più arrotondato.

Il grafico della *figura 7.5*, viene inserito a titolo di esempio; esso illustra come si ripartiscono i granuli “reali” di un singolo campione di morena (TR 119) nel piano Cox-Elongazione.

A questo punto è stato possibile ripartire i granuli di ogni campione nelle 4 forme tipo identificate dall'operazione di clusterizzazione, esprimendo i risultati in percentuale. Quindi la diversità o analogia tra campioni appartenenti a siti differenti è evidenziata dalla combinazione di queste percentuali. Il risultato è riassunto nel grafico della *figura 7.6*.

ELONGAZIONE

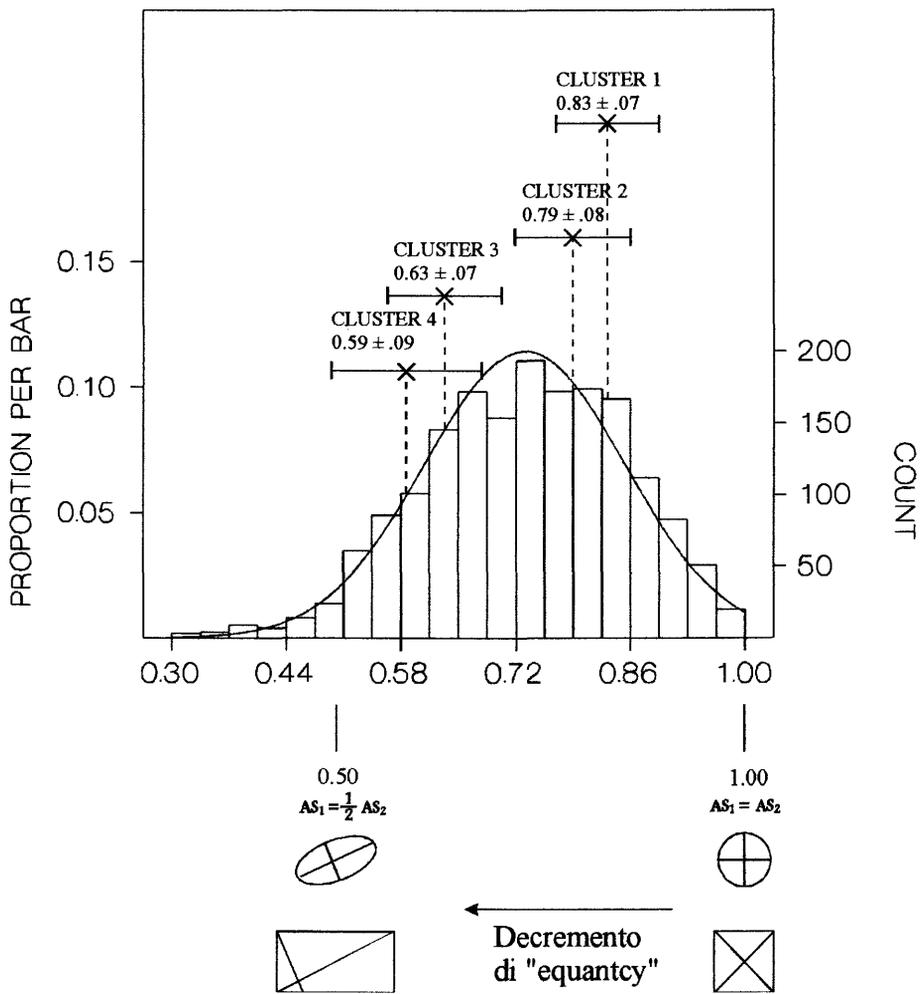


Figura 7.1. Istogramma dell'Elongazione. Evidenzia come si collocano le medie e le deviazioni standard dei 4 cluster, considerando l'intera popolazione di granuli testati.

FITTING RETTANGOLARE

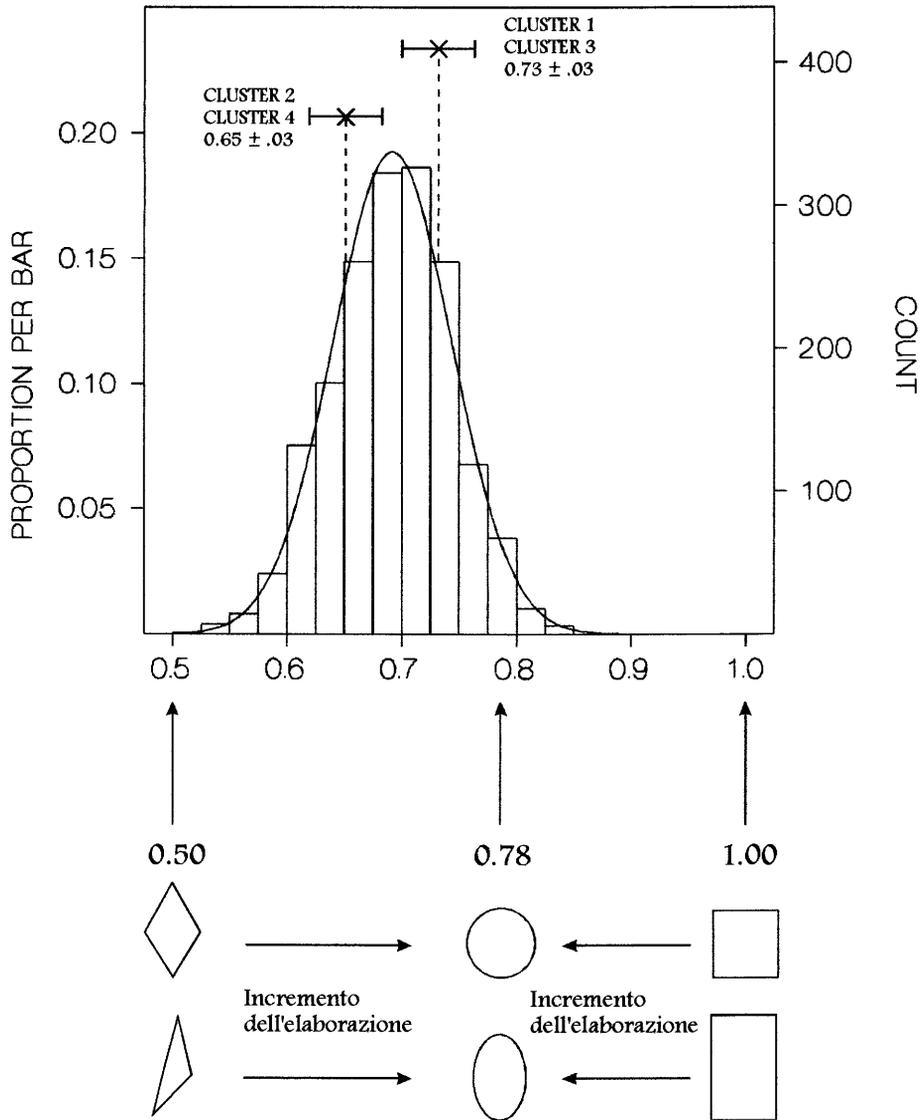


Figura 7.2. Istogramma del Fitting Rettangolare. Evidenza come si collocano le medie e le deviazioni standard dei 4 cluster, considerando l'intera popolazione di granuli testati.

COX

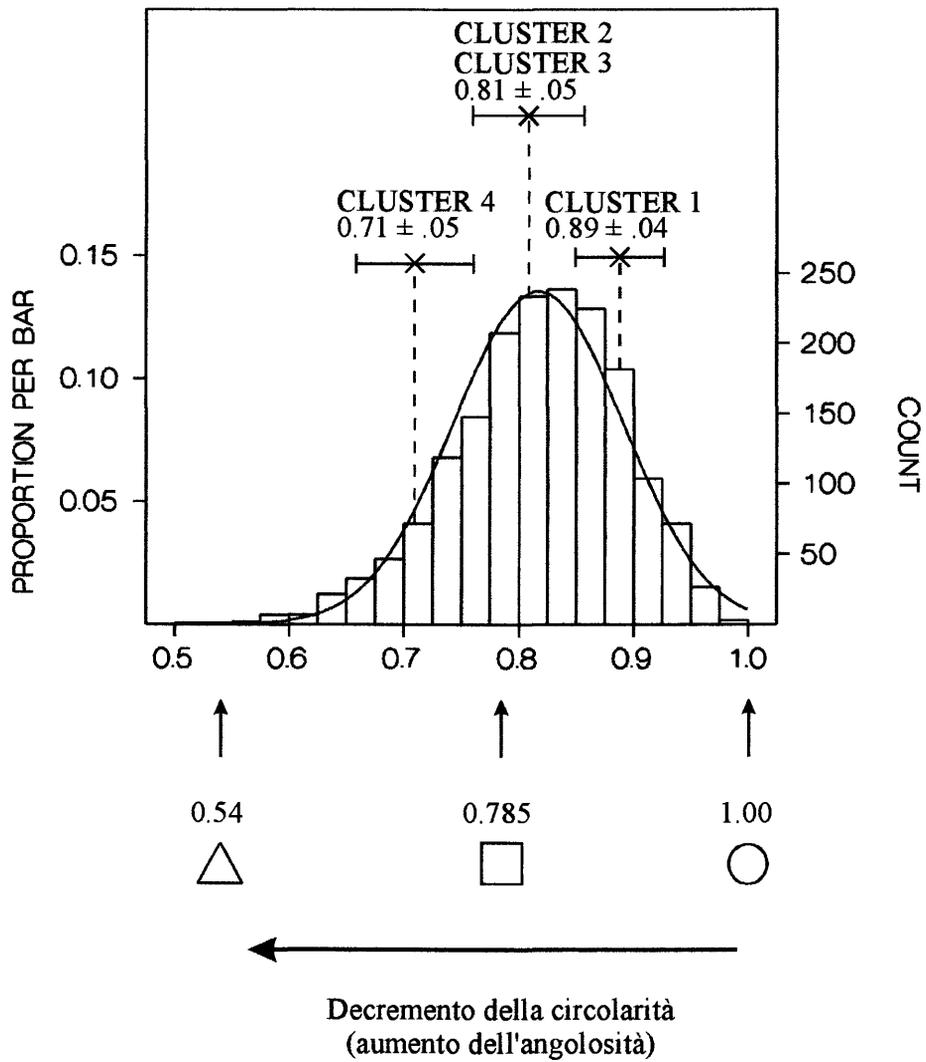


Figura 7.3. Istogramma dell'indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox. Evidenzia come si collocano le medie e le deviazioni standard dei 4 cluster, considerando l'intera popolazione di granuli testati.

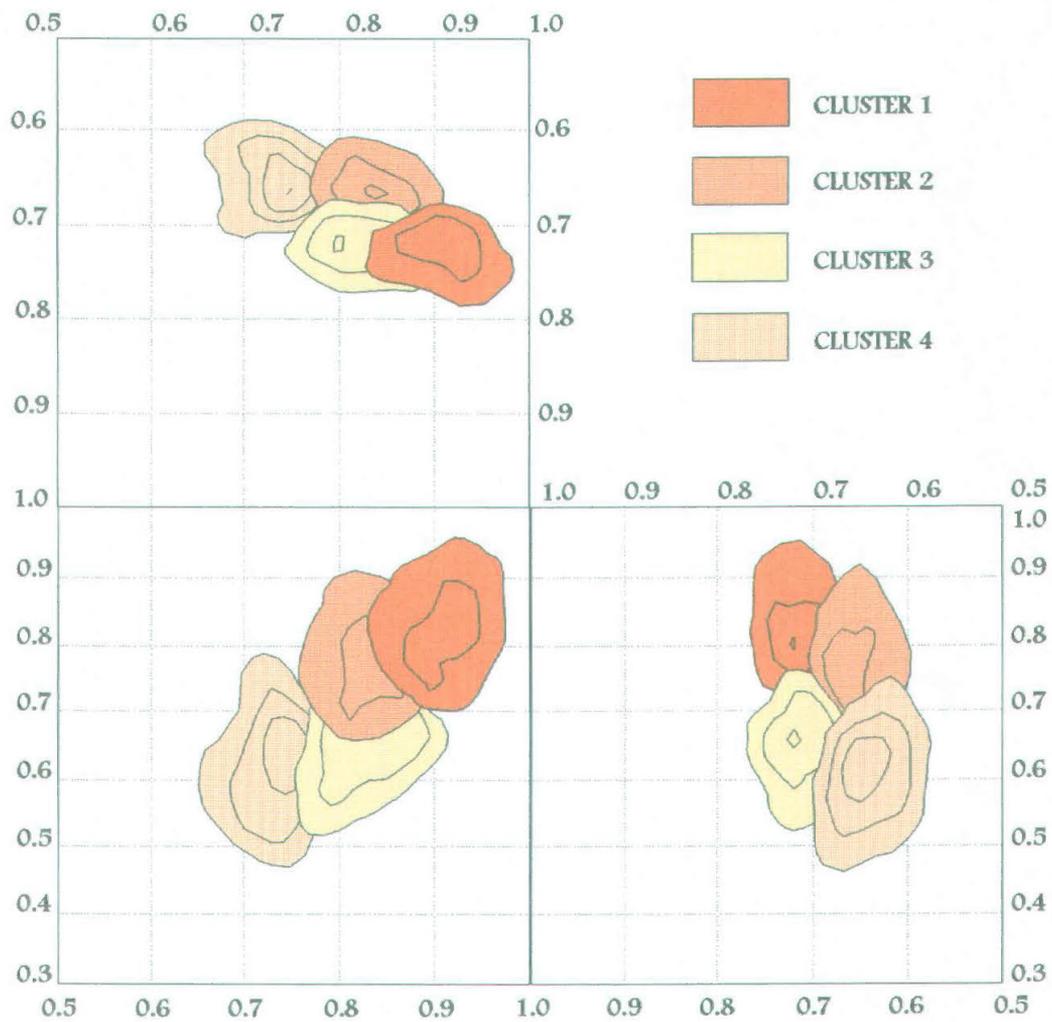


Figura 7.4. Rappresentazione delle quattro forme-tipo, per mezzo di curve di isodensità, sui tre piani: Cox-Elongazione, Cox-Fitting Rettangolare, Fitting Rettangolare-Elongazione.

TR 119

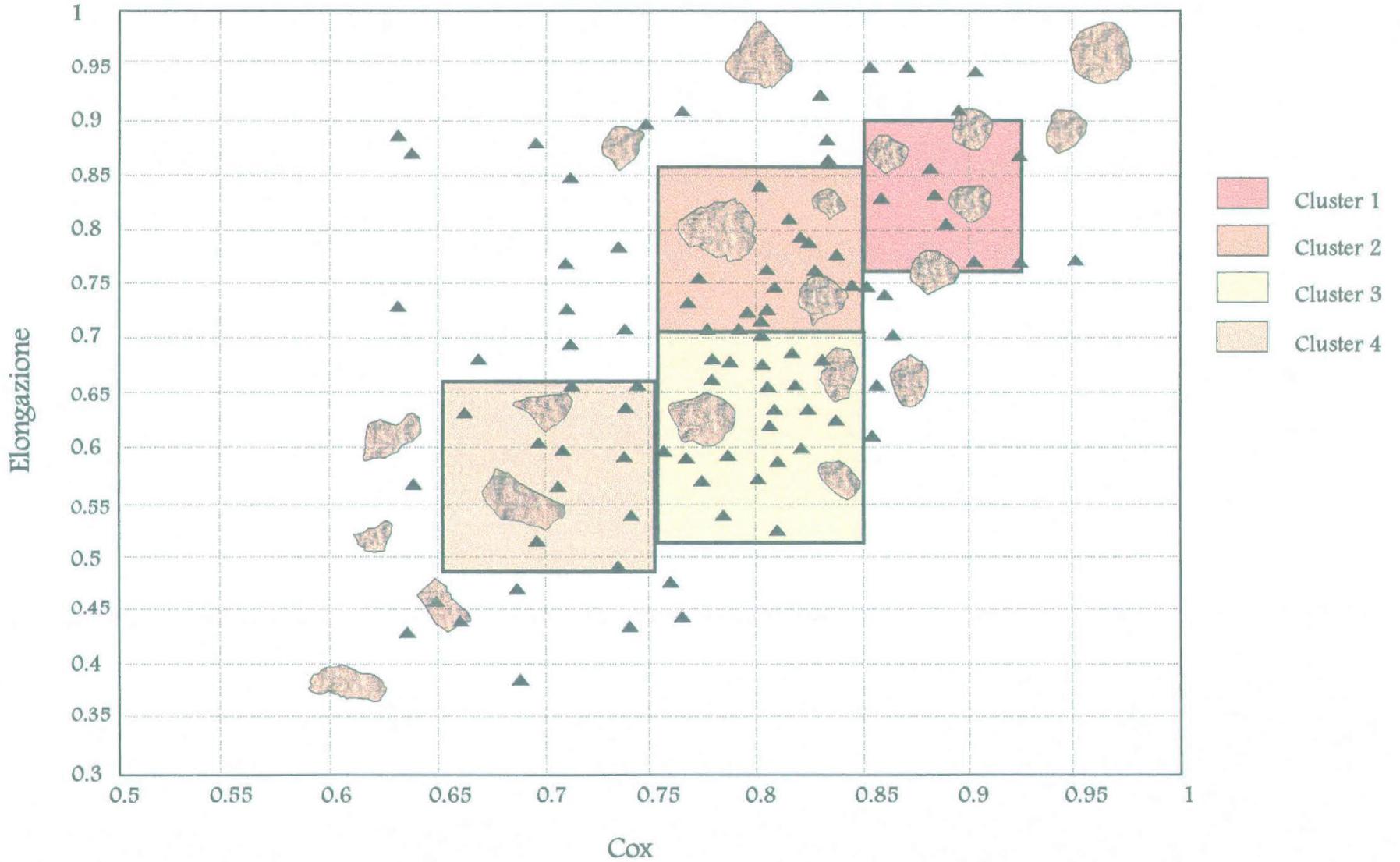


Figura 7.5. Esempio di forme-tipo (campione TR 119) e loro ripartizione nel piano Cox-Elongazione secondo i 4 cluster.

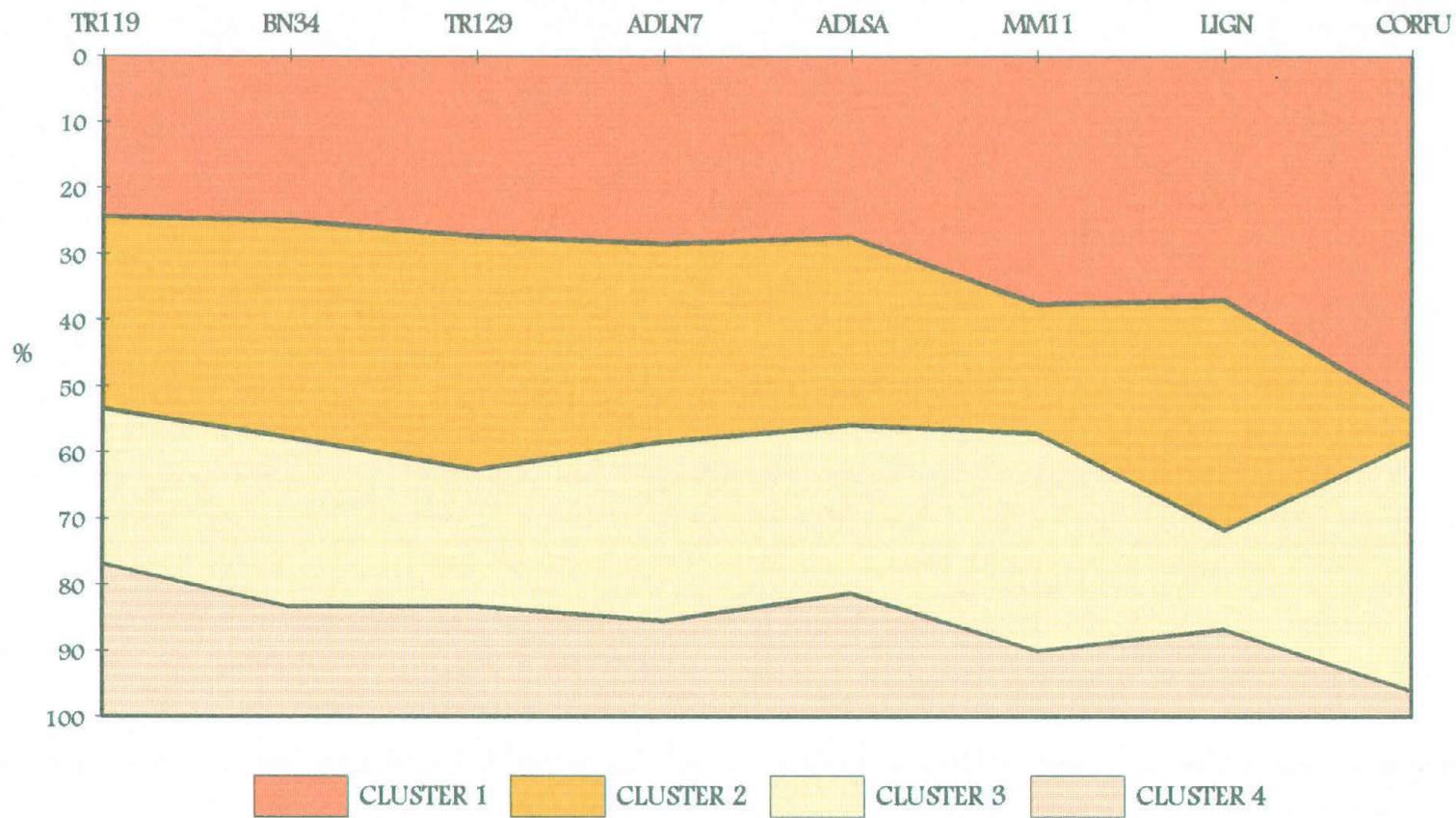


Figura 7.6. Ripartizione grafica delle 4 forme-tipo nei campioni esaminati.

7.3 Discussione

Come si può notare dal grafico della *figura 7.6* i campioni antartici si differenziano da quelli non antartici, inseriti questi ultimi nella trattazione quale gruppo di confronto.

Il campione CORFU, raccolto in corrispondenza di un “*pocket beach*” a basso valore di “*surf scaling*” (del tipo “riflessivo” di Masselink & Short, 1993), risulta nettamente diverso in quanto costituito da granuli più elaborati, rappresentati da percentuali molto elevate dei “Cluster 1” e “Cluster 3”, e bassissime percentuali dei “Cluster 2” e “Cluster 4” (*tab. 7.5*).

Il secondo campione di controllo LIGN, raccolto su una spiaggia di delta fluviale ad elevato valore di “*surf scaling*” (del tipo “dissipativo” di Masselink & Short, 1993), presenta, invece, un insieme di granuli a “shape” misto caratterizzati da percentuali abbastanza elevate dei “Cluster 1” e “Cluster 2” e basse percentuali degli altri due cluster, “Cluster 3” e “Cluster 4” (*tab. 7.5*).

Tra i campioni antartici, si può notare come nelle morene (TR 119, TR 129) e nelle morene sommersa (BN 34) le quattro forme fondamentali sono pressoché equidistribuite in percentuale.

Le battaglie delle spiagge antartiche (ADL 7, ADLS A) e il campione MM 11 (raccolto a 30 m di profondità, molto prossimo alla linea di riva) benché definite molto poco energetiche, tuttavia manifestano una modesta elaborazione dei granuli: compaiono infatti con maggior abbondanza le forme più elaborate del “Cluster 1” a discapito di quelle più angolate ed allungate del “Cluster 4” (*tab. 7.5*).

<i>Campioni</i>	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
TR 119	24.5%	29.1%	23.5%	23%
BN 34	25%	32.9%	25.5%	16.7%
TR 129	27.4%	35.4%	20.6%	16.6%
ADLN 7	28.5%	30.1%	26.9%	14.5%
ADLS A	27.5%	28.5%	25.4%	18.7%
MM 11	37.6%	19.7%	32.9%	9.8%
LIGN	37.1%	34.7%	15%	13.1%
CORFU	53.5%	5.2%	37.4%	3.9%

Tabella 7.5. Ripartizione percentuale delle quattro forme-tipo nei campioni in esame.

7.4 Considerazioni conclusive

Da quanto emerso, con l'applicazione dei metodi di analisi statistica multivariata (analisi fattoriale, cluster analysis), risulta evidente che l'uso dei tre descrittori dello “*shape*” nella gerarchizzazione *k-means* può permettere un buon grado di discriminazione dei gradi di elaborazione subiti dai granuli.

Per tale ragione si è ritenuto opportuno applicare la stessa metodologia per il confronto di campioni di 3 carote raccolte nel Mare di Ross, le cui elaborazioni sono riportate e discusse nel capitolo successivo.

8. RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DEL METODO AUTOMATICO SU SEQUENZE SEDIMENTARIE

8.1 *Litofacies del Mare di Ross*

I sedimenti superficiali del fondale marino antartico includono una ampia varietà di tipi e indicano che attualmente i processi marini prevalgono su quelli glaciali. Essi giacciono sopra depositi antichi, che riflettono la predominanza di una passata sedimentazione glaciale. Uno degli obiettivi più importanti dello studio di questi depositi “antichi” è la definizione della loro distribuzione spazio-temporale al fine di ricostruire gli episodi glaciali del passato.

I modelli di sedimentazione della piattaforma del Mare di Ross, proposti in letteratura, suddividono la serie sedimentaria successiva all'ultimo evento glaciale in 4 tipi:

1. basal tills (diamicton massivo sovraconsolidato);
2. depositi glacio-marini di transizione;
3. sedimenti glacio-marini composti, ricchi in frazione fine;
4. sedimenti glacio-marini residuali (*current-winnowed*).

I sedimenti residuali consistono in depositi glacio-marini grossolani sono stati depositati da ghiacci galleggianti (*floating ice*) in ambiente marino ad alta energia di fondo mentre i sedimenti glacio-marini composti, sono stati depositati da ghiacci galleggianti in ambiente marino a bassa energia (Anderson, 1980b).

Una delle più estese litofacies tardo-pleistoceniche della piattaforma continentale antartica è rappresentata da un diamicton massivo subaffiorante. Analisi dettagliate di diamicton campionati in carote nelle piattaforme del Mare di Ross (Kellog et al. 1979; Anderson et al., 1980b, 1984; Brambati et al., 1994), del Mare di Waddell (Anderson et al., 1980b; Elverhoi, 1981) e del George V Land (Anderson et al., 1980b; Domack, 1982) hanno dimostrato che tali materiali comprendono basal tills.

La distinzione tra il basal till e il diamicton glacio-marino, tuttavia, presenta molte difficoltà. Secondo Anderson (1983, 1989) il basal till, per essere distinto dal diamicton glacio-marino, dovrebbe presentare le seguenti caratteristiche:

1. elevata forza di coesione;
2. assenza totale di classazione;
3. assenza di fossili marini o presenza solo di fossili marini rimaneggiati;
4. assenza di stratificazione;
5. orientazione casuale dei ciottoli presenti;
6. *pebbles* arrotondati;
7. omogeneità tessiturale e mineralogica.

Alcuni dei risultati più promettenti, per la distinzione di tali depositi vengono dati dagli studi dello “shape” dei *pebbles* dei depositi glaciali. Vari ricercatori hanno dimostrato che esso è legato non solo alla distanza del trasporto ma è influenzato sia dal modo in cui avviene tale trasporto che dal modo in cui avviene la deposizione (Boulton, 1978; Benn et al., 1994).

Drake (1972), Boulton (1978) e Domack et al. (1980), dimostrarono che i ciottoli appartenenti ai depositi di basal till presentano elevato grado di arrotondamento a causa della continua abrasione in cui questi erano esposti all'interno del deposito in lento movimento. I clasti dei depositi glacio-marini, invece, poiché hanno subito un tipo di trasporto passivo (*englacial* o *supraglacial*) presentano un elevato grado di angolosità.

Studi più recenti (Dowdeswell, 1982; Mazzullo & Anderson, 1987) hanno dimostrato che anche lo “shape” dei granuli sabbiosi registra tali differenze. Mazzullo & Anderson (1987) hanno applicato la “*Fourier grain shape analysis*” su granuli sia di basal till che di sedimenti glacio-marini campionati nel Mare di Ross. Queste analisi hanno dimostrato che anche i granuli dei sedimenti glaciomarini si presentano molto più irregolari ed angolari rispetto a quelli dei basal tills che presentano un buon grado di arrotondamento.

8.2 Sequenze sedimentarie considerate

Il procedimento di acquisizione ed elaborazione dati, discusso nei precedenti capitoli, è stato applicato a 16 livelli di 3 carote antartiche per verificare se queste successioni sedimentarie, poco differenziabili da un punto di vista stratigrafico e mineralogico-composizionale, risultavano omogenee anche dal punto di vista della forma dei granuli. Ciò per poter avanzare ragionevoli ipotesi sulla loro genesi e sulla evoluzione nel tempo della successione sedimentaria campionata.

Carota 19

Sono stati elaborati circa 800 granuli di quarzo prelevati da 4 livelli della carota (lunghezza di 569 cm) prelevata a 552 m di profondità nel Joides Basin (74° 26.04' S, 173°46.14' E).

Questa carota oggetto di studio di tesi di dottorato (Salvi, 1996) presenta un livello sommitale (0-200 cm) marino pressoché privo di componente sabbiosa.

Nei livelli inferiori (200-575 cm) sono state proposte, sulla base delle analisi tessiturali e micropaleontologiche, due unità litologiche:

- 200-300 cm: unità glacio-marina;
- 300-575 cm: unità inferiore costituita da diamicton.

Carota 29

Sono stati elaborati circa 1200 granuli di quarzo prelevati da 6 livelli della carota (lunghezza di 413 cm) prelevata a 1225 m di profondità nel Drygalsky Basin (75° 10.98' S, 164°21.97' E).

Dalle prime analisi tessiturali e composizionali disponibili, si può supporre che il lato terminale (ultimi 250 cm) della carota sia rappresentata da sedimenti glacio-marini.

Carota 30

Sono stati elaborati circa 1400 granuli di quarzo estratti da 7 livelli della carota (lunghezza 310 m) prelevata a 1112 m di profondità nel Drygalski Basin (75° 57.05' S, 165°46.96' E) (Brambati et al., 1994).

La quota di 1 metro circa separa inferiormente un diamicton, interpretato come basal till (*sensu* Anderson, 1987), dalla successione glaciomarina stratigraficamente superiore sedimentata in ambiente marino per avanzata e ritiro dell' ice-shelf.

Il riconoscimento delle diverse facies ha presentato notevoli difficoltà a causa della generale grossolanità del sedimento e della mancanza di fossili lungo tutta la successione sedimentaria, eccezione fatta per il livello olocenico di chiusura. Per questa ragione si è cercato di vedere se l'analisi morfometrica potesse confermare il modello di sedimentazione proposto.

8.3 Elaborazione e discussione dei dati morfometrici delle carote

In base ai 3 indici (Elongazione, Fitting Rettangolare, Indice di Circolarità-Arrotondamento di Cox), ritenuti dall'analisi fattoriale precedentemente discussa, migliori descrittori della forma è stata eseguita una *cluster analysis* con il metodo *k-means* sull'intera popolazione di granuli delle tre carote in esame. Sono stati ricavati, anche in questa fase, 4 cluster che identificano le 4 forme tipo (cfr. § 7.2). Nella *tabella 8.1* vengono riportate le medie e le deviazioni standard dei 4 cluster identificati con i tre indici nei 16 campioni di carota.

I granuli di ogni campione sono stati ripartiti nelle 4 forme tipo, esprimendo i risultati in percentuale. Quindi, anche in questo caso, la diversità o analogia tra campioni appartenenti ai livelli delle diverse carote è apprezzabile dalla combinazione di queste percentuali. Il risultato complessivo è riassunto nel grafico della *figura 8.1*.

INDICI		Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Elongazione	<i>Media</i>	0.859	0.83	0.695	0.658
	<i>St.D.</i>	0.06	0.064	0.062	0.084
Fitting Rettangolare	<i>Media</i>	0.742	0.678	0.742	0.675
	<i>St.D.</i>	0.028	0.028	0.028	0.036
Cox	<i>Media</i>	0.937	0.878	0.877	0.794
	<i>St.D.</i>	0.034	0.038	0.037	0.044

Tabella 8.1. Medie e deviazioni standard dei 4 cluster, identificati dai 3 indici nei 16 campioni di carota..

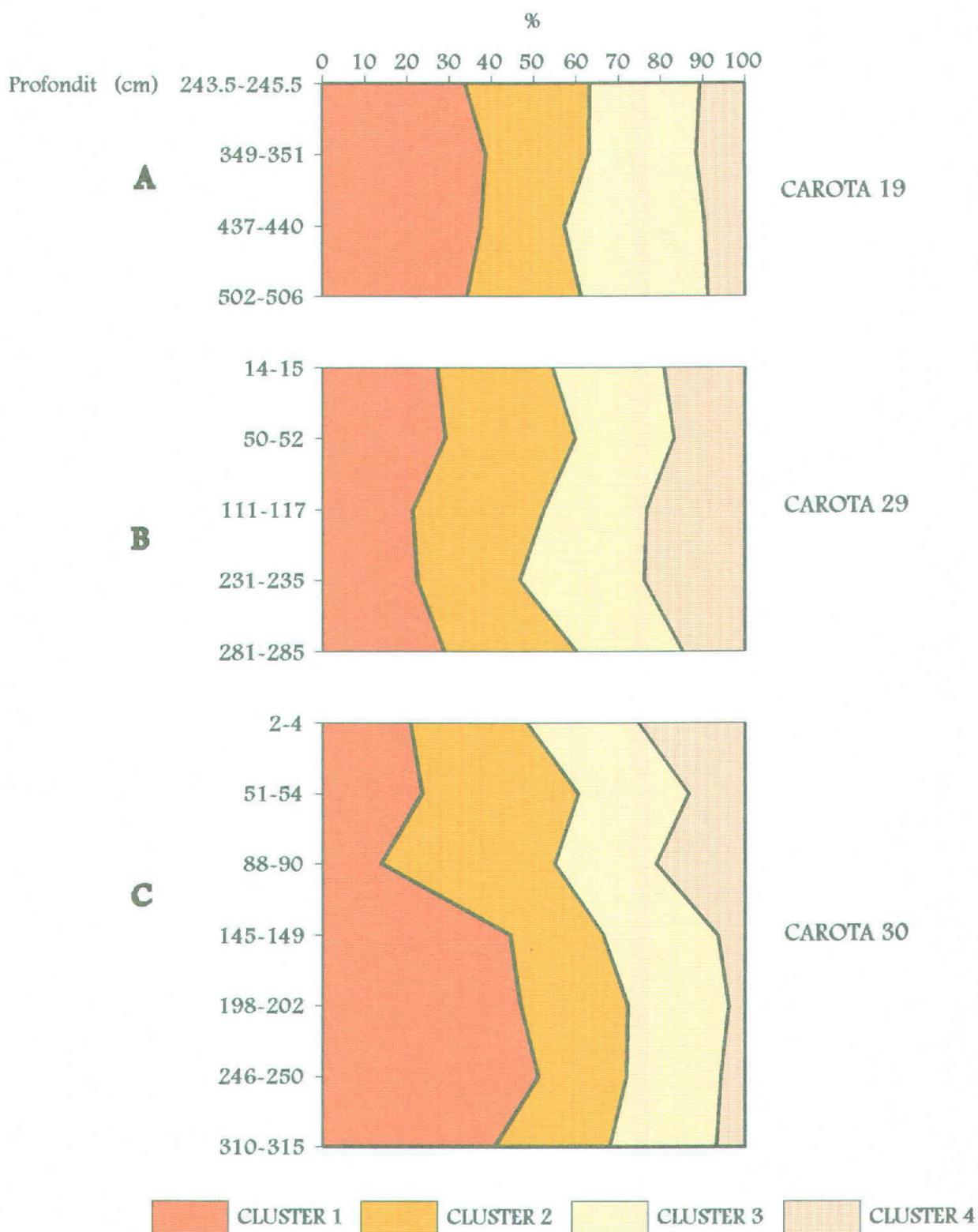


Figura 8.1. Ripartizione grafica delle 4 forme-tipo nei campioni delle tre carote.

Carota 19

LIVELLI (in cm)		243.5-245.5	349-351	437-440	502-506
INDICI	<i>n° granuli</i>	207	209	218	204
Elongazione	<i>Min:</i>	0.460	0.506	0.478	0.403
	<i>Max:</i>	0.989	0.998	0.989	0.992
	<i>Median:</i>	0.794	0.788	0.777	0.792
	<i>Mean:</i>	0.782	0.784	0.782	0.787
	<i>St. D.:</i>	0.102	0.101	0.098	0.101
	<i>Skewness:</i>	-0.351	-0.349	-0.199	-0.369
Fitting Rettangolare	<i>Min:</i>	0.580	0.610	0.602	0.608
	<i>Max:</i>	0.820	0.838	0.828	0.809
	<i>Median:</i>	0.716	0.726	0.724	0.722
	<i>Mean:</i>	0.718	0.723	0.722	0.718
	<i>St. D.:</i>	0.042	0.044	0.041	0.040
	<i>Skewness:</i>	-0.247	-0.215	-0.083	-0.336
Cox	<i>Min:</i>	0.740	0.688	0.754	0.658
	<i>Max:</i>	1.000	1.000	1.000	1.000
	<i>Median:</i>	0.892	0.901	0.891	0.897
	<i>Mean:</i>	0.890	0.893	0.895	0.892
	<i>St. D.:</i>	0.053	0.056	0.053	0.055
	<i>Skewness:</i>	-0.201	-0.739	-0.239	-0.529

Tabella 8.2. Parametri statistici desunti dalla distribuzione di frequenza dei 3 indici morfometrici nei singoli campioni della carota 19.

Livelli (cm)	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
243.5-245.5	33.8%	29.5%	26.1%	10.6%
349-351	38.8%	24.4%	25.4%	11.5%
437-440	37.6%	19.7%	33%	9.6%
502-506	34.3%	27%	29.9%	8.8%

Tabella 8.3. Ripartizione percentuale delle 4 forme-tipo nei campioni della carota 19.

Nei quattro livelli elaborati di questa carota (243.5-245.5 cm, 349-351 cm, 437-440 cm, 502-506 cm) le percentuali più elevate e abbastanza omogenee sono quelle dei “Cluster 1” e “Cluster 3” (tab. 8.3 e fig. 8.1 A).

Anche in questi livelli, quindi, predominano le forme più elaborate. Tuttavia il grado di elaborazione dei granuli risulta di tipo intermedio, cioè collocato tra valori del “basal till” della carota 30 e valori del “glacio-marino” della carota 29.

Carota 29

LIVELLI (in cm)		14-15	50-52	111-117	231-235	281-285
INDICI	<i>n° grains</i>	209	209	210	210	198
Elongazione	<i>Min:</i>	0.496	0.540	0.321	0.380	0.497
	<i>Max:</i>	0.988	0.994	0.987	0.981	0.967
	<i>Median:</i>	0.778	0.795	0.766	0.751	0.776
	<i>Mean:</i>	0.768	0.782	0.762	0.752	0.776
	<i>St. D.:</i>	0.114	0.102	0.111	0.117	0.095
	<i>Skewness:</i>	-0.202	-0.270	-0.451	-0.232	-0.250
Fitting Rettangolare	<i>Min:</i>	0.592	0.598	0.575	0.590	0.574
	<i>Max:</i>	0.860	0.816	0.832	0.824	0.819
	<i>Median:</i>	0.714	0.711	0.701	0.709	0.710
	<i>Mean:</i>	0.713	0.711	0.704	0.707	0.704
	<i>St. D.:</i>	0.045	0.041	0.047	0.043	0.046
	<i>Skewness:</i>	0.080	-0.152	-0.081	-0.059	-0.441
Cox	<i>Min:</i>	0.707	0.701	0.578	0.649	0.682
	<i>Max:</i>	1.000	1.000	0.997	1.000	1.000
	<i>Median:</i>	0.880	0.878	0.868	0.867	0.883
	<i>Mean:</i>	0.875	0.881	0.861	0.862	0.876
	<i>St. D.:</i>	0.060	0.057	0.063	0.060	0.058
	<i>Skewness:</i>	-0.345	-0.252	-0.769	-0.521	-0.424

Tabella 8.4. Parametri statistici desunti dalla distribuzione di frequenza dei 3 indici morfometrici nei singoli campioni della carota 29.

Livelli (cm)	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
14-15	27.3%	27.3%	26.3%	19.1%
50-52	30.6%	30.6%	23.4%	16.7%
111-117	31%	31%	24.3%	23.3%
231-235	24.3%	24.3%	29.5%	23.8%
281-285	31.3%	31.3%	25.3%	14.6%

Tabella 8.5. Ripartizione percentuale delle 4 forme-tipo nei campioni della carota 29

Le forme dei granuli dei 5 livelli (14-15 cm, 50-52 cm, 117-117 cm, 231-235 cm, 281-285 cm) di questa carota sono miste. Infatti le quattro forme tipo individuate dalla clusterizzazione sono pressoché equidistribuite (tab. 8.5 e fig. 8.1 B).

Questa ripartizione delle quattro forme è simile a quella dei livelli superiori della Carota 30. Pertanto si può supporre che tutti i livelli appartengano ad una successione glacio-marina.

Carota 30

LIVELLI (in cm)		2-4 cm	51-54	88-90	145-149	198-202	246-250	310-315
INDICI	<i>n° grains</i>	221	195	209	218	209	211	209
Elongazione	<i>Min:</i>	0.415	0.466	0.474	0.530	0.552	0.546	0.431
	<i>Max:</i>	0.970	0.983	0.969	0.978	0.987	0.990	0.975
	<i>Median:</i>	0.766	0.787	0.771	0.810	0.808	0.810	0.808
	<i>Mean:</i>	0.754	0.778	0.765	0.793	0.806	0.807	0.799
	<i>St. D.:</i>	0.118	0.107	0.105	0.095	0.083	0.097	0.105
	<i>Skewness:</i>	-0.405	-0.291	-0.379	-0.442	-0.256	-0.265	-0.738
Fitting Rettangolare	<i>Min:</i>	0.599	0.604	0.569	0.612	0.604	0.626	0.631
	<i>Max:</i>	0.815	0.809	0.812	0.829	0.844	0.829	0.818
	<i>Median:</i>	0.708	0.711	0.700	0.725	0.726	0.733	0.728
	<i>Mean:</i>	0.708	0.711	0.698	0.724	0.723	0.730	0.724
	<i>St. D.:</i>	0.043	0.042	0.047	0.038	0.040	0.039	0.040
	<i>Skewness:</i>	-0.168	0.056	-0.069	-0.154	-0.232	-0.200	-0.157
Cox	<i>Min:</i>	0.669	0.703	0.685	0.784	0.760	0.765	0.716
	<i>Max:</i>	1.000	0.996	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000
	<i>Median:</i>	0.860	0.883	0.870	0.905	0.920	0.922	0.903
	<i>Mean:</i>	0.855	0.880	0.861	0.908	0.914	0.916	0.899
	<i>St. D.:</i>	0.067	0.053	0.060	0.049	0.045	0.047	0.053
	<i>Skewness:</i>	-0.359	-0.349	-0.507	-0.155	-0.606	-0.551	-0.626

Tabella 8.6. Parametri statistici desunti dalla distribuzione di frequenza dei 3 indici morfometrici nei singoli campioni della carota 30.

Livelli (cm)	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
2-4	20.8%	27.6%	26.2%	25.3%
51-54	23.6%	36.9%	26.2%	13.3%
88-90	13.9%	41.1%	23.9%	21.1%
145-149	44.5%	22%	27.1%	6.4%
198-202	46.9%	25.4%	23.9%	3.8%
246-250	51.2%	20.9%	22.3%	5.7%
310-315	40.7%	27.3%	25.4%	6.7%

Tabella 8.7. Ripartizione percentuale delle 4 forme-tipo nei campioni della carota 30.

In questa carota è evidente la netta differenziazione tra i primi 3 livelli e i 4 sottostanti riferita alla composizione percentuale delle 4 forme tipo.

Nei primi tre livelli (2-4 cm, 51-54 cm, 88-90 cm) le forme intermedie abbastanza circolari ma angolose (“Cluster 2”) presentano percentuali elevate

accompagnate da altrettanto elevati valori di quelle molto allungate e con profili molto angolati (“Cluster 4”).

Nei livelli inferiori i 100 cm (145-149 cm, 198-202 cm, 310-315 cm) le percentuali più elevate sono quelle dei “Cluster 1” e “Cluster 3”. Il “Cluster 1” con percentuali del 44.5%, 46.9%, 51.2%, 40.7%, rispettivamente per ogni livello, rappresenta le forme più *equiantcy* e più arrotondate, quindi più elaborate (*tab. 8.7*).

Visto che le forme elaborate si trovano in abbondanza nella successione inferiore della carota si ritiene che l’analisi morfometrica comprovi il modello sedimentario proposto e confermi l’interpretazione della successione inferiore come basal till. Con motivazioni analoghe si conferma l’interpretazione della successione superiore come glacio-marina.

9. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato ampiamente modificato, testato ed applicato un sistema esperto, precedentemente progettato, in grado di elaborare immagini bidimensionali di clasti acquisite con telecamera direttamente da microscopio o da un'immagine fotografica. Con esso ci si propone di procedere all'analisi veloce dei campioni ed all'individuazione ed estrazione di misure di parametri morfometrici discriminanti delle proprietà formali.

Il primo obiettivo della ricerca era quello di verificare la potenzialità del metodo automatico, per mezzo del confronto dei parametri geometrici primitivi da esso ottenuti con quelli forniti da altri tipi di metodi attualmente in uso. Tale confronto è stato effettuato dapprima su forme geometriche-sintetiche e poi su microfotografie di granuli "reali" etichettati.

A conclusione della fase di validazione, si può affermare che i parametri geometrici estratti in modo automatico risultano confrontabili con quelli testati, ma con un notevole guadagno in velocità ed ottima ripetibilità, anche sottoponendo il granulo a rotazione casuale.

La ricerca si è quindi applicata alla frazione sabbiosa di sedimenti sciolti continentali, litorali e marini antartici. La scelta di campioni antartici, provenienti da Baia Terranova, è stata motivata dalla ampia ed esclusiva diffusione di rocce intrusive di tipo granitoidi, che limitano potenziali variazioni morfometriche legate a differenti litologie. Inoltre le forme dei clasti possono essere considerate primarie, derivando fondamentalmente da fenomeni crioclastici, e quindi verosimilmente non hanno subito eccessivi processi di trasporto, responsabili di elaborazione morfometrica secondaria.

I campioni antartici sono stati comparati con alcuni campioni di sabbie litorali di mari temperati (Adriatico ed Ionio), assunti per apprezzare in modo immediato il valore numerico degli indici morfometrici, avendo quest'ultime un buon grado di elaborazione.

Sono stati considerati alcuni indici morfometrici, rapporti fra i parametri geometrici validati. Molti di questi erano già apparsi in letteratura, ma spesso essi non sono stati sufficientemente impiegati perché di difficile uso e scarsa praticità. Infatti, solo l'uso del computer e opportuni software di analisi di immagine ha reso possibile il loro effettivo impiego.

In questa seconda fase della ricerca sono stati elaborati gli indici morfometrici (Fitting Rettangolare, Fitting Ellittico, Fitting Circolare, *Index of Circularity-Roundness* di Cox (1927), *Projection Sphericity* di Tickell (1931), *Projection Sphericity* di Wadell (1935), Elongazione (Lüttig, 1956), Dissimmetria sull'asse maggiore (rispetto l'asse intermedio) di Cailleux (1947), Dissimmetria sull'asse intermedio (rispetto l'asse maggiore)) relativi a circa 1600 granuli.

Come conclusione della fase elaborazione dei dati si può affermare che ciascun dei sopraddetti indici descrive meglio degli altri un qualche aspetto formale del granulo, ossia possiede un proprio contenuto descrittivo intrinseco e quindi descrive e discrimina in maniera diversa i campioni in esame. Ma visto che nessun indice, da solo, riesce a restituire la complessità formale del granulo si è pensato di continuare la ricerca cercando di descrivere e discriminare i campioni attraverso una combinazione degli indici più significativi.

Per mezzo di opportune elaborazioni statistiche (analisi fattoriale) sono stati individuati 3 indici (Cox, Elongazione, Fitting Rettangolare) ritenuti migliori descrittori dello "shape". In base a questi è stata eseguita una cluster analysis (k-means) sull'intera popolazione di granuli a disposizione. Sono stati ricavati 4 cluster che identificano altrettante forme tipo. E' stato possibile ripartire i granuli di ogni campione nelle 4 classi identificate dai cluster, esprimendo i risultati in percentuale.

Le diversità o analogie tra campioni appartenenti a siti differenti di provenienza è apprezzata dalla combinazione di queste percentuali.

I campioni antartici si differenziano da quelli non-antartici sulla base delle 4 forme tipo. Per i secondi, infatti, gli indici morfometrici indicano forme molto elaborate. Tra i campioni antartici, si riesce a cogliere come, nelle morene, le quattro forme tipo sono pressoché equidistribuite. Invece nelle battigie delle spiagge antartiche, che possono essere definite poco energetiche a causa della lunga permanenza del ghiaccio stagionale, si assiste ad una prima elaborazione dei granuli.

Da quanto emerso per mezzo dell'applicazione dei due metodi di analisi statistica multivariata (analisi fattoriale e *cluster analysis*), risulta evidente che l'uso dei tre descrittori dello "shape" nella gerarchizzazione *k-means* può permettere un buon grado di discriminazione dei processi di elaborazione subiti dai granuli.

Scopo finale di questa tesi è la quantificazione dei diversi aspetti formali dei clasti, essenziale per affrontare il problema del confronto tra sedimenti (o frazioni granulometriche) di diversa genesi e "storia" sedimentaria. Per tale ragione si è adottata la stessa metodologia nel confronto di campioni di carota raccolte nel Mare di Ross. Sono stati elaborati circa 3200 granuli estratti da 16 livelli appartenenti a 3

carote antartiche (2 prelevate nel Drygalsky Basin ed 1 nel Joides Basin) con lo scopo di quantificare i diversi aspetti formali dei granuli e per verificare se l'analisi morfometrica potesse confermare le ipotesi genetiche dei corpi sedimentari da cui essi sono stati estratti.

Nella carota 30 è evidente la netta differenziazione tra i primi 3 livelli e i 4 sottostanti riferita alla composizione percentuale delle 4 forme-tipo. Infatti la parte sommitale presenta forme con profili molto angolati mentre la parte basale presenta forme più *equiantcy*e più arrotondate, quindi più elaborate.

Visto che le forme elaborate rinvergono in abbondanza nella successione inferiore della carota, si ritiene che l'analisi morfometrica comprovi il modello sedimentario proposto e confermi l'interpretazione della successione inferiore come basal till. Con motivazioni analoghe si conferma l'interpretazione della successione superiore come glacio-marina

La carota 29, invece, presenta granuli di forma mista (sia forme arrotondate che forme angolari) in proporzioni equidistribuite. Questa ripartizione delle quattro forme richiama quella dei livelli superiori della Carota 30. Pertanto si può supporre che tutti i livelli appartengano ad una successione glacio-marina.

Anche nella carota 19 predominano le forme più elaborate. Tuttavia il grado di elaborazione dei granuli risulta di tipo intermedio, cioè collocato tra valori del "basal till" della carota 30 e valori del "glacio-marino" della carota 29.

10. BIBLIOGRAFIA

- ALLABY A. & ALLABY M. (1990): Concise Dictionary of Earth Sciences. Oxford University Press, New York.
- ANDERSON J.B (1983): Ancient glacial-marine deposits: Their spatial and temporal distribution. In: *Glacial-Marine Sedimentation*, Ed. B.F. Molnia, New York, 3-92.
- ANDERSON J.B. & MOLNIA B.F. (1989): Glacial-Marine Sedimentation. *Short Course in Geology*, Vol. 9, A.G.U., 127 pp.
- ANDERSON J.B., BRAKE C. & MYERS N. (1984): Sedimentation on the Ross Sea Continental shelf, Antarctica. *Marine Geology*, Vol. 57, 295-333.
- ANDERSON J.B., KUTZ D.D, DOMACK E.W. & BALSHAW K.M. (1980b): Glacial and glacial marine sediments of the Antarctic continental shelf. *Journal of Geology*, Vol. 88, 399-414.
- ASCHENBRENNER B.C. (1956): A new method of expressing particle sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 26, 15-31.
- BARRETT P.J. (1980): The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology*, Vol. 27, 291-303.
- BEAL M.A. & SHEPART F.P. (1956): A use of roundness to determine depositional environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 26, n° 1, 49-60.
- BENN D.I. & BALLANTYNE C.K. (1992b): Pebble shape (and size!). Discussion. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 62, 1147-1150.
- BENN D.I. & BALLANTYNE C.K. (1994): Reconstructing the transport history of glacial sediments: a new approach based on the co-variance of clast form indices. *Sedimentary Geology*, Vol. 91, 215-227.
- BENN D.I. & BALLANTYNE C.K.. (1993): The description and representation of particle shape. *Earth Surf. Process. Landforms*, n° 18, 665-672.
- BENN D.I. (1994): Fabric shape and the interpretation of sedimentary fabric data. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. A64, n° 4, 910-915.

- BENN D.I. (1994): Fluted moraine formation and till genesis below a temperated valley glacier: Slettmarkbreen, Jotunheimen, southern Norway. *Sedimentology*, Vol. 41, 279-292.
- BLATT H. (1959): Effect of size and genetic quartz type on sphericity and form of beach sediments, northern New Jersey. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 29, 197-206.
- BLENK M. (1960): Morphologie der nordwestlichen Harzes und seines Vorlandes: Sonderdruck aus Zeitschr. für Geomorphologie. Vol. 4, n° 3-4, 202-242.
- BOGGS S.JR. (1967): Measurement of roundness and sphericity parameters using an electronic particle size analyzer. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 37, 908-913.
- BOULTON G.S. (1978): Boulder shapes and grain-size distributions of debris as indicators of transport paths through glacier and till genesis. *Sedimentology*, Vol. 25, 773-799.
- BRAMBATI A., CECCARONI L., D'ONOFRIO S., FANZUTTI G.P., FINOCCHIARO F., FRIGNANI M., LANGONE L., MELIS R. & RAVAIOLI M. (1994): Paleoenvironmental Inferences from the Core ANTA91-30 (Drygalski Basin ~ Ross Sea, Antartica). *Terra Antartica (Special issue)*, 1 (2), 335-337.
- CAILLEUX A. (1945): Distinctions des sables marins et fluviatiles. *Soc. Geol. de France*, Vol. 5, n°13, 125-128.
- CAILLEUX A. (1947): L'indice d'émoussé: définition et première application: Compte Rendu Sommaire des Séances. *Soc. Geol. de France*, n°13, 250-252.
- CAILLEUX A. (1952): Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und ihre Bedeutung für die Palaoklimatologie. *Geol. Rundschau*, Vol. 40, 11-19.
- CATACOSINOS P.A. (1965): Tables for the determination of sphericity and shape of the rock particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 35, n° 2, 354-365.
- COREY A.T. (1949): Influence of shape on fall velocity of sand grains [unpubl. M.S. thesis]. Colorado A&M College, 102 p. (in Dobkins & Folk, 1970).

- CORTEMIGLIA G.C. (1985): Valutazione sperimentale del grado di elaborazione dei ciottoli in ambiente marino. *Bolletino della Soc. Geologica Italiana*, CIV (3), 429-443.
- COX E.P. (1927): A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology*, Vol. 1, 179-183.
- CROOK K.A.W. (1968): Weathering and roundness of quartz sand grains. *Sedimentology*, Vol.11, 171-182.
- CUI B. & KOMAR P.D. (1984): Size measures of the ellipsoidal form of clastic sediment particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 54, 783-797.
- CULVER S.J., BULL P.A., CAMPBELL S., SHAKESBY R.A. & WHALLEY W.B. (1983): Environmental discrimination based on quartz grain surface textures: A statistical investigation. *Sedimentology*, Vol. 30, 129-136.
- CURRAY J.R. & GRIFFITHS J.C. (1955): Sphericity and roundness of quartz grains in sediments. *Geol. Soc. America Bulletin*, Vol. 66, 1075-1096.
- DAL CIN R.: Miscellanea: Le ghiaie del Piave. *Memorie Soc. Trentina di Scienze Naturali*. 1966-67.
- DIEPENBROEK M., BARTHOLOMÄ A. & IBBEKEN H. (1992): How round is round? A new approach to the topic "roundness" by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology*, Vol. 39, n° 2, 411-422.
- DOBKINS & FOLK (1970): Shape development on Tahiti-nui. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 40, n° 4, 1167-1203.
- DOMACK E.W. (1982): Sedimentology of glacial and glacial-marine deposits on the George V-Adelie continental shelf, East Antarctica. *Boreas*, Vol. 11, 79-97.
- DOMACK E.W., ANDERSON J.B. & KURTZ D. (1980): Clast shape as an indicator of transport and depositional mechanisms in glacial marine sediments: George V continental shelf, Antarctica. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 50, n° 3, 813-820.

- DOWDESWELL J. (1982): Scanning electron micrographs of quartz sand grains from cold environments examined using Fourier shape analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 52, n° 4, 1315-1323.
- DRAKE L.D. (19..): Rock texture: An important factor for clast shape studies. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. , n° , 1356-1361.
- DURAND R. & DE LARA G.C. (1953): Vitesse de chute des grains de sable dans les fluides en milieu infini. Relation entre le coefficient de traînée et le coefficient de forme. *Houille Blanche*, t. 8, 254-259.
- EHRlich R. & WEINBERG B. (1970): An exact method for characterization of grain shape. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 40, n° 1, 205-212.
- EHRlich R., BROWN P.J., YARUS J.M., & PRZYGOCKI (1980): The origin of shape frequency distributions and the relationship between size and shape. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 50, n° 2, 475-484.
- ELVERHOI A. (1981): Evidence for a late Wisconsin Glaciation of the Weddell Sea. *Nature*, Vol. 293, 641-642.
- EVANS J., HOGG A.J.C., HOPKINS M.S. & HOWARD R.J. (1994): Quantification of quartz cements using combined SEM, CL, and image analysis. *Journal of Sedimentology Research*, Vol. A64, n°2, 334-338.
- EYLES N. & ROGERSON R.J. (1978): Sedimentology of medial moraines on Berendon Glacier, British Columbia, Canada: Implications for debris transport on a glacierized basin. *Geol. Soc. America Bull.*, Vol. 89, 1688-1693.
- FLEMMING N.C. (1965): Form and function of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 35, 381-390.
- FOLK R.L. (1955). Student Operator Error in determination of roundness sphericity and grain size. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 25, 112-122.
- FOLK R.L. (1972): Experimental error in pebble roundness determination by the modified Wentworth method. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 42, n° 4, 973-974.

- GLEZEN W.H. & LUDWICK J.C. (1963): An automated grain-shape classifier. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 33, n° 1, 23-40.
- GRIFFITHS J.C. (1967): Scientific Method in Analysis of sediments. *McGraw-Hill, New York*, 549 p.
- HAINES J. & MAZZULLO J. (1988): The original shapes of quartz silt grains: A test of the validity of quartz grain shape analysis to determine the sources of terrigenous silt in marine sedimentary deposits. *Marine Geology*, Vol. 78, 227-240.
- HARALICK R. & SHAPIRO L. (1992): Computer and Robot Vision. *Addison Wesley, USA*, 60-61.
- HARALICK R. AND SHAPIRO L.G. (1992): Computer and robot vision. *Addison Wesley, USA*.
- HEYWOOD H. (1937): Measurement of the fineness of powdered materials. *Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 140, 257-347.
- HOCKEY B. (1970): An improved coordinate system for particle shape representation. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 40, n° 3, 1054-1056.
- HOFMAN H.J. (1994): Grain-shape indices and isometric graphs. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. A64, n° 4, 916-920.
- HOLMES C.D. (1960): Evolution of till-stone shape, central NewYork. *Geol. Soc. America Bull.*, Vol. 71, 1645-1660.
- HOWARD J.L. (1992): An evaluation of shape indices as palaeoenvironmental indicators using quartzite and metavolcanic clasts in Upper Cretaceous to Palaeogene beach river and submarine fan conglomerates. *Sedimentology*, Vol. 39, n°2, 471-486.
- ILLENBERGER W.K. (1991): Pebble shape (and size!). *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 61, 756-767.
- ILLENBERGER W.K. (1992a): Pebble shape (and size!). Reply. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 62, n° 3, 538-540.

- ILLENBERGER W.K. (1992b): Pebble shape (and size!). Reply. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 62, 1150-1153.
- KELLOG T.B., TRUESDALE R.R.S. & OSTERMAN L.E. (1979): Late Quaternary extent of the West Antarctic Ice Sheet: New evidence from Ross Sea cores. *Geology*, Vol. 7, 249-253.
- KENNEDY S. & ERHLICH R. (1985): Origin of shape changes of sand and silt in a high-gradient stream. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 55, 57-64.
- KENNEDY S.K. & LIN WEI-HSINNG (1992): A comparison of Fourier and Fractal Techniques in the Analysis of Closed Forms. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 62, n°5, 842-848.
- KENNEDY S.K. & MAZZULLO J. (1991): Image analysis method of grain size measurement. In: *Principles, methods and application of particle size analysis*, ed. J.P.M. Syvitski. New York: Cambridge University Press, 77-87.
- KING C.A.M. & BUCKLEY J.T. (1968): The analysis of stone size and shape in arctic environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 38, 200-214.
- KRUMBEIN W.C. (1941a): Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 11, 64-72.
- KRUMBEIN W.C. (1941b): The effects of abrasion on size shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 49, 482-520.
- KRUMBEIN W.C. (1942): The effects of abrasion on size shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 11, 64-72.
- KRYNINE P. (1956): Sphericity and roundness through the ages. *Bull. Geol. Soc. America Bull.*, Vol. 67, 1661-1662.
- KUENEN PH.H. (1956): Experimental abrasion of pebbles: 2, Rolling by current. *Journal of Geology*, Vol. 64, 336-338.
- KUHN G., MELLES M., EHRMANN W.U., HAMBREY J. & SCHMIEDL G. (1993): Character of clasts in glaciomarine sediments as an indicator of transport and depositional

- processes, Weddell and Lazarev Seas, Antarctica. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 63, n° 3, 477-487.
- KURTZ D.D. & ANDERSON J.B. (1979): Recognition and sedimentologic description of recent debris flow deposits from the Ross and Weddell Seas, Antarctica. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 49, n° 4, 1159-1170.
- L'HERMITE R. (1959): Traité d'expertise et d'essais des matériaux et des constructions. *Méthodes générales d'essais et de contrôle*, Vol. 1, Eyrolles, Paris.
- LEE A.C. & OSBORNE R.H. (1995): Quartz grain-shape of Southern California Beaches. *Journal of Coastal Research*, 11 (4), 1336-1345.
- LEES G. (1964): A new method for determining angularity of particles. *Sedimentology*, Vol. 3, 2-21.
- LÜTTIG G. (1956): Eine neue, einfache gerölmorphometrische Methode. *Eiszeitalter u. Gegenwart*, Öhringen 7, 13-20.
- MARI M. (1996): "Applicazioni di metodi di pre-elaborazione ad analisi ad immagini di provenienza geologica", *Relazione interna del Dipartimento di Ingegneria Elettronica ed Informatica (DIBE)*, Università di Genova.
- MASSELINK G. & SHORT A.D. (1993): The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9, 785-806.
- MAZZULLO J. & ANDERSON J. (1987): Grain shape and surface texture analysis of till and glacial - marine sand grains from the Weddell and Ross Seas, Antarctica. In: *Clastic Particles*, ed. J.R. Marshall. New York: Van Nostrand Reinhold, 314-327.
- MAZZULLO J. & KENNEDY S.K. (1985): Automated measurement of the nominal sectional diameters of individual sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 55, 593-595.
- MAZZULLO J. & MAGENHEIMER S. (1987): The original shapes of quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 57, n° 3, 479-487.
- MAZZULLO J., ALEXANDER A., TIEH T. & MENGLIN D. (1992): The effects of wind transport on the shapes of quartz silt grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 62, n° 6, 961-971.

- MAZZULLO J., SIMS D. & CUNNINGHAM D. (1986): The effects of eolian sorting and abrasion upon the shapes of fine quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 56, 1, 45-56.
- ORFORD J.D. & WHALLEY W.B. (1991): Quantitative grain form analysis. In: *Principle, methods and application of particle size analysis*, ed. J.P.M. Syvitski. New York: Cambridge University Press, 77-87.
- PAZZI L. & DEGLI ABBATI L.M. (1992): "Estrazione di parametri e classificazione statistica supervisionata e non supervisionata di clasti della regione antartica". *Tesi di Laurea, inedita, in Ing. Biof. ed Elet.*, Università di Genova, pp. 157.
- PÉREZ F. (1987): A method for contouring triangular particle shape diagrams. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 57, n° 4, 763-765.
- PEREZ-ROSALES C. (1972): A new method for determining sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 42 n° 4, 975-977.
- PETLAND A. (1927): A method of measuring the angularity of sands. *Royal Soc. Canada, Proc. And Trans.*, (ser. 3), Vol. 21.
- PETTIJOHN F.J. & LUNNDAHL A.C. (1943): Shape and roundness of Lake Erie beach sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 13, 69-78.
- POWERS M.C. (1953): A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 23, 117-119.
- PROTOPSALTI I., FANZUTTI G.P., MARI M. & VENTURI G. (1996): Automatic method for the extraction of morphometric parameters with an imaging technique: Examples of applications to antarctic sands. V Workshop GIAST, S. Sepolcro, 11-13 Giugno 1996, Abstracts.
- PRYOR W.A. (1971): Grain Shape. In: *Procedures in Sedimentary Petrology*. Ed. by R.E. Carver, 131-150. Wiley-Interscience, New York.
- RICCI LUCCHI F. (1980): Materiali e tessiture dei sedimenti. *Collana Sedimentologia, Parte I*, 200 p.

- RIESTER D.D., CRAIG SHIPP R. & EHRLICH R. (1982): Patterns of quartz sand shape variation, Long Island littoral and shelf. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 52, n° 4, 1307-1314.
- RILEY N.A. (1941): Projection sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 11, n° 2, 94-97.
- RITTENHOUSE G. (1943): A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 13, 79-81.
- RITTENHOUSE G. (1943a): Measuring intercept sphericity of sand grains. *Amer. Journal Science*, Vol. 241, 1725-1780.
- ROBSON D.A. (1958): New technique for measuring roundness of sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 28, n° 1, 108-110.
- ROSFELDER A. (1960): Contribution à l'analyse textural des sédiments. *Unpublished Thesis, University of Algiers*, 356 p.
- RUSSELL R.D. & TAYLOR R.E. (1937): Roundness and shape of Mississippi River sands. *Journal of Geology*, Vol. 45, 225-267.
- SAMES C.W. (1966): Morphometric data of some recent pebble associations and their application to ancient deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. 36, n°1, 126-142.
- SAROCCHI D. & CAPACCIONI B. (1994): Impiego dell'elaborazione delle immagini nello studio tessiturale delle successioni piroclastiche: risultati preliminari sul Tufo di Orvieto e sul Tufo Giallo Napoletano. *Geoinformatica*, n° 2, 39-56.
- SCHULTZ D. (1980): The effect of hydrofluoric acid on quartz shape. Fourier grain shape analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 50, n° 2, 644-645.
- SERRA J. (1992): *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press, New York.
- SILVERMAN B.W. (1986): Density estimation for statistics and data analysis. *London: Chapman and Hall*.
- SMALLEY I.J. (1966): The expected shapes of blocks and grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 36, n° 2, 625-629.

- SMITH C.H. & O'CONNELL S.B. (1990): Provenance and glacial history of very fine quartz sand from the Weddell Sea, Antarctica. *Proceedings of the Ocean drilling Program, Scientific Results*, Vol. 113, 89-108.
- SNEED & FOLK (1958): Pebbles in the lower Colorado River, Texas, a study in particle morphogenesis. *Journal of Geology*, Vol. 66, 114-150.
- SORBY H.C. (1880): On the structure and origin of non calcareous stratified rocks. *Geol. Soc. London Quart. Jour.*, Vol. 36, 46-92.
- SPIEGEL M.R. (1992): "Statistica". *Collana Schaum, Teoria e Problemi*. ETAS-LIBRI, pp. 503.
- SWAN B. (1974): Measures of particle roundness: a note. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 44 n° 2, 572-577.
- SZADECZKY-KARDOSS E. VON (1933): Die Bestimmung des Abrollungsgrades. *Centralbl. Miner. Geol. Palaont.*, 1933B, Stuttgart, Germany, 389-401.
- TELLER J.T. (1976): Equantcy versus sphericity. *Sedimentology*, Vol. 23, 427-428.
- THOMAS M.C., WILTSHIRE R.J. & WILLIAMS A.T. (1995): The use of Fourier descriptors in the classification of particle shape. *Sedimentology*, Vol. 42, 635-645.
- TICKELL F.G. (1931): The examination of fragmental rocks. *Stanford University Press*, 6-7.
- TWENHOFEL W.H. (1945): The rounding of sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 15, 59-71.
- VAN ANDEL T.J., WIGGERS A.J. & MAARLEVELA G. (1954): Roundness and shape of marine gravels from Urk (Netherlands); a comparison of several methods of investigation. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 24, 100-116.
- VENTURI G. (1993): "Integrazione di metodologie numeriche e simboliche per la segmentazione di immagini". *Tesi di Dottorato, inedita*, DIBE, Università di Genova.
- VENTURI G., VERNAZZA G., FANZUTTI G.P. & FINOCCHIARO F.: Morfometric features of Antarctic sands using computer vision techniques. *Inter. Ass. of Sedim. I.A.S.*, 15th Regional Meeting, 13/15 April 1994, Ischia Italy.

- WADELL H. & HAXON (1932): Volume, shape and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, Vol. 40, 443-451.
- WADELL H. (1933): Sphericity and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, Vol. 41, 310-331.
- WADELL H. (1935): Volume, shape and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, Vol. 43, 250-280.
- WENTWORTH C.K (1919): A laboratory and field study of cobble abrasion. *Journal of Geology*, Vol. 29, 507.
- WENTWORTH C.K. (1922 b): A method of measuring and plotting the shapes of pebbles. *Bulletin of the U.S. Geological Survey*, 730C, 91-114.
- WENTWORTH C.K. (1933): Shapes of rock particles, a discussion. *Journal of Geology*, Vol. 41, 306-309.
- WHALLEY W.B. & KRINSLEY D.H. (1974): A scanning electron microscope study for surface textures of quartz grains from glacial environments. *Sedimentology*, Vol. 21, 87-105.
- WHALLEY W.B. (1972): The description of sedimentary particles and the concept of form. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 42 n° 4, 961-965.
- WILLIAMS A.T. & CALDWELL N.E. (1988): Particle size and shape in pebble-beach sedimentation. *Marine Geology*, Vol. 82, 199-215.
- WILLIAMS E.M. (1965): A method of indicating particle shape with one parameter. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 35, 993-996.
- WINDOM W.L. (1975): Eolian contributions to marine sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 45, 520-529.
- WINKELMOLEN A.M. (1982): Critical remarks on grain parameters, with special emphasis on shape. *Sedimentology*, Vol. 29, 255-265.
- WOODCOCK N.H. (1977): Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geol. Soc. America Bulletin*, Vol. 88, 1231-1236.

- WORONOW A. (1992a): Pebble shape (and size!). Discussion. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 62, n° 3, 536-537.
- WRIGHT A.E. (1957): Three-dimensional shape analysis of fine-grained sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 27, n° 3, 306-312.
- ZINGG TH. (1935): Beitrag zur Schotteranalyse. Schweiz, Mineralog. u. Petrog. Mitt., Vol. 15, 38-140.

Desidero ringraziare tutti coloro che in diversi modi hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro:

Il mio tutore Prof. G.P. Fanzutti, per la sua disponibilità, i preziosi consigli, la revisione del testo e per l'incoraggiamento durante tutto il periodo della ricerca.

Il Dott. Ing. Mari per la costante collaborazione soprattutto nelle fasi di messa a punto del programma "features".

Il Dott. Ing. Venturi per le utili discussioni nelle fasi progettuali.

Il Dott. G. Fontolan per la preziosa collaborazione durante le analisi statistiche e l'elaborazione dei dati e per la sua continua disponibilità.

Il Sign. C. Landucci, tecnico di laboratorio Antartide presso il Dip. di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste, per lo sviluppo dell'applicazione di acquisizione d'immagine ("Winmorfo") dal sistema microscopio-telecamera

Il Prof. Vernazza, la Dott.ssa S. Dellepiane, il Dott. S. Serpico per aver promosso ed incentivato lo sviluppo di questa ricerca.

Il Prof. G. Catani per le elaborazioni di alcune immagini con il proprio metodo vettoriale inedito.

Il Prof. A. Brambati per aver caldeggiato lo sviluppo di questa ricerca.

Un affettuoso ringraziamento a mio ragazzo Cristiano per avermi incoraggiato, aiutato e sopportato durante tutto questo periodo di "crisi".

I miei cari genitori per l'incoraggiamento, il sostegno morale nonché economico in tutto questo periodo.

Inoltre vorrei ringraziare i miei amici e compagni d'avventura Erika (Erikau), Raffaella (Furlanaki), Giorgio (Ciuffetto), Tullio (Tul), Antonio (Antony), Stefano (Steve Cov) per esserci stati.

Infine un grazie a Paolo (barbetta).

E adesso?!