



Consiglio Nazionale delle Ricerche



Nota Interna

**Uso della trasformata wavelet 2D per il riconoscimento di difetti
di porosità in immagini ricavate con ispezione ad ultrasuoni
Studio di fattibilità**

Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti

B4-09
giu-2000

I.E.I.
ISTITUTO DI
ELABORAZIONE DELLA
INFORMAZIONE

INDUCE
Project N° BE 97 - 4057
Contract N° BRPR - CT98 - 805

Uso della trasformata wavelet 2D per il riconoscimento di difetti di porosità in immagini ricavate con ispezione ad ultrasuoni.

Studio di fattibilità

Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti

Istituto di Elaborazione della Informazione – CNR, Pisa

Sommario

| | |
|--|----|
| Introduzione | 2 |
| Materiali e metodi | 3 |
| Immagini di prova..... | 3 |
| Insieme A | 3 |
| Insieme B..... | 3 |
| Insieme C | 3 |
| Insieme D..... | 3 |
| Insieme E..... | 4 |
| Insieme F..... | 4 |
| Insieme G | 4 |
| Insieme H..... | 4 |
| Insieme I..... | 4 |
| Analisi univariata | 6 |
| Estrazione dei contorni | 6 |
| Calcolo degli istogrammi..... | 7 |
| Interpolazione | 7 |
| Analisi multivariata | 8 |
| Risultati..... | 10 |
| Elaborazione mediante filtro passa-alto..... | 10 |
| Istogrammi delle immagini..... | 10 |
| Istogramma cumulativo..... | 10 |
| Interpolazione | 11 |
| Elaborazione mediante funzioni wavelet..... | 12 |
| Conclusioni | 29 |

Introduzione

Durante l'ispezione a ultrasuoni di un campione, quando il segnale attraversa una zona contenente porosità, una frazione di esso viene riflesso in corrispondenza di ciascuna interfaccia di separazione tra materiali con differenti impedenze acustiche: la presenza di porosità all'interno del campione causa quindi una diminuzione dell'eco di fondo rispetto all'intensità misurata in assenza di porosità.

In una mappa C-scan, ricavata ponendo la finestra temporale di misura in corrispondenza dell'eco di fondo, la presenza di porosità è indicata da macchie di piccole dimensioni, distribuite in maniera irregolare; se la mappa è costruita assegnando il livello d'intensità dei pixel come funzione crescente rispetto all'intensità del segnale a ultrasuoni misurato, le zone di materiale contenenti porosità mostrano delle macchie più o meno scure.

La localizzazione completa di un difetto di porosità può essere fatta analizzando il segnale di A-scan ricavato per ciascun punto di scansione del campione: infatti, il ritardo temporale dell'eco provocato da eventuale difetto di porosità rispetto all'eco frontale dipende dalla profondità del difetto, mentre la forma dell'eco dipende dalla dimensione del difetto nella direzione di propagazione dell'onda ultrasonora.

Nelle normali procedure di controllo di qualità, può essere sufficiente determinare la porosità media del campione e verificare che essa non superi una soglia di tolleranza predefinita. In questo caso è possibile fare uso della mappa C-scan, ricavata in opportune condizioni di campionamento, eseguendo un'elaborazione d'immagini di tipo globale, relativa ai valori di luminanza dei pixel.

La procedura riportata nel seguito consente di stimare la quantità di macchie presenti in un'immagine e attribuibili alla porosità, senza individuarle singolarmente e senza determinarne la posizione all'interno dell'immagine.

La procedura è costituita dalle seguenti fasi:

- pre-elaborazione dell'immagine d'ingresso (mappa C-scan) mediante un filtro spaziale, al fine di rivelare i contorni delle macchie presenti sull'immagine
- calcolo dell'istogramma dei valori fotometrici sull'immagine pre-elaborata ed estrazione di caratteristiche dipendenti dalla presenza di macchie sull'immagine d'ingresso.

Al fine di determinare la risposta della procedura come sistema per la valutazione della porosità sono state esaminate delle immagini di sintesi con caratteristiche note. Inizialmente dall'immagine d'ingresso si è ricavata una singola immagine, sulla quale è stato calcolato l'istogramma ricavandone un singolo parametro; si è quindi analizzato l'andamento del parametro in funzione dell'immagine d'ingresso. Successivamente, usando un banco di filtri dall'immagine d'ingresso si è ricavato un insieme d'immagini e conseguentemente un insieme di parametri; si è quindi analizzato l'andamento dell'insieme di parametri in funzione dell'immagine d'ingresso.

Materiali e metodi

Immagini di prova

Mediante il programma Paint Shop si sono costruite alcuni insiemi di 5 immagini, ciascuna delle quali è definita da una matrice di 200×200 pixel, con 256 livelli di grigio.

Insieme A

L'immagine A_0 è costituita da due bande verticali di 100×200 pixel, una con valore di luminanza $L = 100$ e l'altra con $L = 200$: A_0 è dunque un'immagine a due livelli, che simula un campione privo di difetti, costituito da due zone omogenee.

Al fine di simulare dei difetti di porosità, nelle altre quattro immagini dell'insieme sono stati inseriti dei quadrati di 2×2 pixel con valori di luminanza compresi tra il 40 e l'80% del valore della zona omogenea. Nell'immagine A_1 , la striscia definita da $L = 100$ contiene 10 macchie con $L = 80$, 10 macchie con $L = 70$, 10 macchie con $L = 60$, 10 macchie con $L = 50$ e 10 macchie con $L = 40$; la striscia definita da $L = 200$ contiene 10 macchie con $L = 160$, 10 macchie con $L = 140$, 10 macchie con $L = 120$, 10 macchie con $L = 100$ e 10 macchie con $L = 80$. L'immagine A_1 contiene quindi 100 macchie, per complessivi 400 pixel; se si definisce indice di porosità P il rapporto tra l'area complessiva delle macchie e l'area totale dell'immagine (40.000 pixel), l'immagine A_1 è caratterizzata da $P = 1\%$.

Le immagini A_2 , A_3 e A_4 , contengono rispettivamente 200, 300 e 400 macchie, con la distribuzione dei valori fotometrici descritta in precedenza: le suddette immagini sono dunque caratterizzate da $P = 2, 3$ e 4% .

Insieme B

Le immagini di questo insieme sono state ottenute trattando le immagini dell'insieme A con due moduli di elaborazione del programma Paint Shop. Su ciascuna immagine sono stati applicati successivamente i moduli Normal filter-Softener e Add Noise-Normal (3%): il primo modulo è costituito da un filtro passa-basso, che smussa i contorni presenti nell'immagine d'ingresso, simulando quindi in parte la risposta non ideale di un sistema di acquisizione di segnali a ultrasuoni; il secondo modulo introduce sull'immagine un rumore con caratteristiche predefinite.

Insieme C

Le immagini di questo insieme sono state ottenute in modo analogo a quanto descritto in precedenza, trattando le immagini dell'insieme A mediante i moduli Normal filter-Softener e Add Noise-Random (3%).

Insieme D

Le immagini di questo insieme sono costruite in maniera simile alle immagini di A. In particolare, l'immagine D_0 è costituita da due bande verticali di 100×200 pixel, una con valore di luminanza $L = 100$ e l'altra con $L = 200$ ed è quindi eguale a A_0 ; D_1 contiene un quadrato di 14×14 pixel con $L = 60$, situato sulla striscia con $L = 100$, e un rettangolo di 10×20 pixel con $L = 120$, situato sulla striscia con $L = 200$: l'area complessiva dei pixel con valori di luminanza diversi da quelli del fondo equivale quindi all'area della porosità simulata nell'immagine A_1 , in modo che anche

D_1 è caratterizzabile con l'indice di porosità $P = 1\%$. Le immagini D_2 , D_3 e D_4 contengono un rettangolo e un quadrato con aree crescenti, eguali rispettivamente a 400, 500 e 600 pixel, corrispondenti a $P = 2, 3$ e 4% .

Insieme E

Le immagini di questo insieme sono state ottenute trattando le immagini dell'insieme D con i moduli Normal filter-Soften e Add Noise-Normal (3%) del programma Paint Shop.

Insieme F

Le immagini di questo insieme sono state ottenute trattando le immagini dell'insieme D con i moduli Normal filter-Soften e Add Noise-Random (3%) del programma Paint Shop.

Insieme G

Anche le immagini di questo insieme sono costruite in maniera simile alle immagini di A. In particolare, l'immagine G_0 è eguale a A_0 ; G_1 contiene due aree circolari con diametro $d = 16$ i cui pixel hanno luminanza diverse, generate mediante lo strumento Airbrush di Paint Shop: nell'area situata sulla striscia con $L = 100$ si ha $30 < L < 50$ e nell'area situata sulla striscia con $L = 200$ si ha $130 < L < 150$. Le immagini G_2 , G_3 e G_4 contengono coppie di aree circolari con $d = 23, 26, 28$. Anche per questo insieme d'immagini si può definire un indice P compreso tra 0 e 4%.

Insieme H

Le immagini di questo insieme sono state ottenute trattando le immagini dell'insieme G con i moduli Normal filter-Soften e Add Noise-Normal (3%) del programma Paint Shop.

Insieme I

Le immagini di questo insieme sono state ottenute trattando le immagini dell'insieme G con i moduli Normal filter-Soften e Add Noise-Random (3%) del programma Paint Shop.

La figura 1 mostra le immagini con indice 1 di ciascuno dei suddetti insiemi.

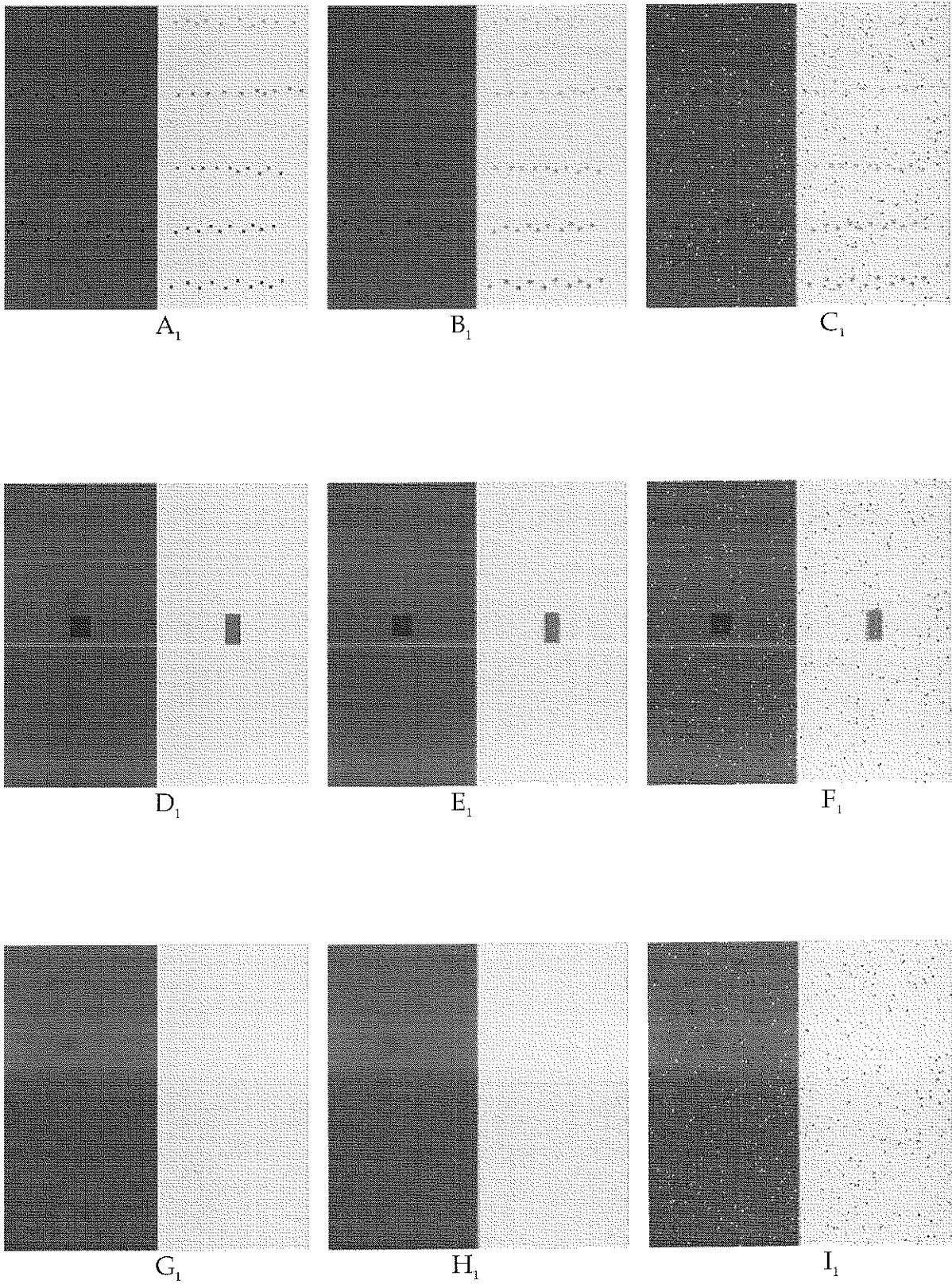


Figura 1. Esempi di immagini di prova.

Analisi univariata

Utilizzando dei moduli elaborativi del software Inspector le immagini di alcuni dei suddetti insiemi sono state inizialmente trattate al fine di ricavare i punti di contorno delle macchie che simulano la presenza di porosità; successivamente si sono ricavati i dati degli istogrammi calcolati su ciascuna immagine.

Estrazione dei contorni

Per rivelare i contorni presenti nell'immagine definita dalla matrice X si è ricavata l'immagine definita da:

$$Y = |X \otimes M|$$

dove:

$$M = \begin{matrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{matrix}$$

La matrice M definisce un filtro di tipo passa-alto che rivela in prevalenza i bordi verticali: poiché è stato preso il valore assoluto del prodotto di convoluzione, i bordi di destra e quelli di sinistra hanno lo stesso valore di luminanza. I risultati dell'operazione di convoluzione sono riportati nell'intervallo $(0, 255)$ mediante una trasformazione modulo 255.

La figura 2 mostra le immagini A'_1 , B'_1 e C'_1 , ottenute elaborando le immagini A_1 , B_1 e C_1 . In tutte le immagini, oltre ai bordi relativi alle macchie, compare anche il bordo tra le due strisce con valori di luminanza diversi; nelle immagini ricavate dagli insiemi B e C compaiono anche dei pixel con valore di luminanza diverso da zero, provocati dalla presenza del rumore aggiunto.

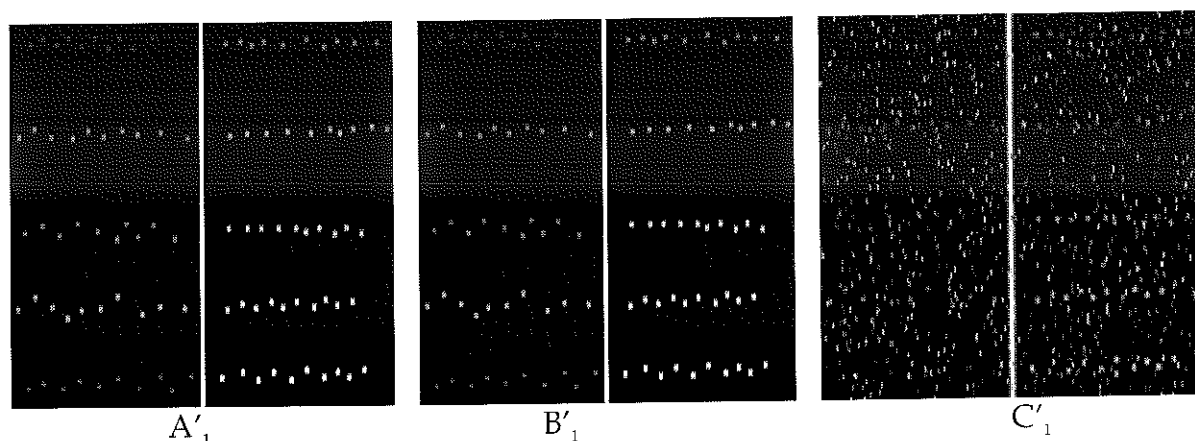


Figura 2. Esempi di immagini ricavate mediante l'operatore di rivelamento di bordi verticali.

Calcolo degli istogrammi

Sulle immagini elaborate col filtro passa-alto sono stati calcolati gli istogrammi $H(L)$, che forniscono la popolazione dei pixel con valore di luminanza $L = L_i$, con $i = 0, 1, 2, \dots, 255$. Si è calcolato quindi l'istogramma cumulativo parziale H_c , dato da:

$$H_c = \sum_{L_1}^{L_2} H(L)$$

con $0 \leq L_1 \leq L_2 \leq 255$. Come caso particolare di H_c si è considerato il parametro H_i , dato da:

$$H_i = \sum_1^{255} H(L)$$

E' stata calcolata la deviazione standard sd degli istogrammi $H(L)$ usando la relazione:

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_i^M H_i (L_i - m)^2}{N - 1}} \quad (1)$$

dove m è il valor medio, definito da:

$$m = \frac{\sum_i^M H_i L_i}{N} \quad (2)$$

con M = numero dei livelli e N = numero dei pixel dell'immagine su cui è stato calcolato l'istogramma.

Interpolazione

Se si considera un'immagine binaria, costituita da un fondo omogeneo con $L = L_1$ e un insieme di macchie con valore di luminanza $L = L_2$, l'istogramma dell'immagine elaborata col filtro passa-alto è diverso da zero soltanto per $L = 0$, con popolazione N_0 , e per $L = |L_2 - L_1|$, con popolazione N_c .

La popolazione N_c dipende dal numero delle macchie e quindi dall'indice P ; si ha: $N_c = k P$. Se $N_0 \gg N_c$, l'equazione 2 diventa:

$$m \approx 0$$

e quindi l'equazione 1 è approssimata da:

$$sd \approx \sqrt{\frac{N_c (C)^2}{N - 1}} = \frac{C}{\sqrt{N - 1}} \sqrt{N_c} = k_1 \sqrt{P}$$

con $C = |L_2 - L_1|$ e $k_1 = C \sqrt{\frac{k}{N-1}} = \text{cost.}$

Con queste ipotesi la deviazione standard dell'istogramma della matrice filtrata è proporzionale alla radice quadrata dell'indice di porosità dell'immagine di prova.

Le immagini di prova sono costruite in modo che al variare dell'indice P varia l'ampiezza dei picchi dell'istogramma ma non la loro posizione: in queste condizioni la deviazione standard dell'istogramma è una funzione crescente di P. In base al modello sopra descritto sui valori di deviazione standard ricavati dagli istogrammi è stata eseguita la regressione non lineare definita da:

$$P = a_1 + a_2 \times \sqrt{sd} \quad (3)$$

Analisi multivariata

Le immagini di tutti gli insiemi di prova sono state elaborate usando gli strumenti del Wavelet Toolbox dell'ambiente Matlab.

Data un'immagine d'ingresso I, la trasformata wavelet produce un'immagine di approssimazione e tre immagini di dettaglio (H, V e D). Indicando con ψ la funzione wavelet e con ϕ la funzione di scala, l'immagine di approssimazione è data sostanzialmente dalla convoluzione dell'immagine d'ingresso con la funzione $\phi(x,y) = \phi(x) \phi(y)$, mentre le immagini dei dettagli sono date dalla convoluzione con $\phi(x) \psi(y)$ (H, orizzontali), $\psi(x) \phi(y)$ (V, verticali) e $\psi(x) \psi(y)$ (D, diagonali). Le matrici che definiscono i dettagli hanno valore zero quando l'immagine d'ingresso è costante su tutta l'area coperta dal filtro; si hanno valori positivi o negativi in corrispondenza, rispettivamente, di contorni con fronte positivo o negativo. Per la rappresentazione delle immagini, i valori delle matrici sono proiettati linearmente sull'intervallo L = (0-255), con L = 128 per il valore 0. La figura 9 mostra i risultati ottenuti al livello 1 applicando la trasformata con la funzione Haar all'immagine A_1 .

Ripetendo l'analisi wavelet, ad ogni livello di applicazione si ricava una terna di immagini di dettaglio; considerando un'applicazione a 3 livelli, si ottengono quindi nove immagini di dettaglio e un'immagine di approssimazione.

Si è quindi definito un operatore O che, data un'immagine d'ingresso definita dalla matrice X, fornisce vettore W; si ha:

$$O(X) = W$$

Gli elementi di W sono i valori di deviazione standard sd_k degli istogrammi calcolati su ciascuna immagine di dettaglio ricavata mediante la trasformata wavelet; per 3 livelli si ha $k = 1, 2, \dots, 9$.

I vettori W ricavati da ciascun insieme di immagini di prova sono stati elaborati mediante la tecnica PCA (Principal Component Analysis). Poiché ogni insieme è costituito da 5 immagini, la PCA determina una base di 5 vettori ortogonali (autovettori) e fornisce 5 componenti principali c_i ; si sono considerate soltanto le componenti c_1 e c_2 e si sono quindi ottenute rappresentazioni dei risultati mediante grafici a due dimensioni.

L'elaborazione dei dati è stata eseguita usando un modulo del software StatMost, scegliendo l'opzione di matrice Varianza-Covarianza.

Risultati

Elaborazione mediante filtro passa-alto

Istogrammi delle immagini

La tabella 1 riporta i valori delle classi piene dell'istogramma $H(L)$ calcolato sull'immagine A'_1 . L'istogramma è diverso da zero, oltre che per $L = 0$, per i livelli L_k corrispondenti alle differenze esistenti in A_1 tra il valore di fondo e il valore delle macchie, per esempio, per $L = 100 - 80 = 20$, $L = 100 - 70 = 30$, $L = 100 - 60 = 40$, e così via. Inoltre, in A'_1 compaiono anche i punti di bordo tra le due bande coi valori di luminanza 100 e 200. Analoghi risultati sono ottenuti elaborando le altre immagini dell'insieme A .

Nel caso di immagini contenenti rumore gli istogrammi $H(L)$ sono diversi da zero per buona parte della dinamica dei livelli: nel caso di rumore random l'istogramma presenta ancora dei picchi, mentre nel caso di rumore uniforme l'istogramma presenta dei massimi con pendenze abbastanza smussate.

La figura 3 riporta gli istogrammi $H(L)$ calcolati sulle immagini A'_1 , B'_1 e C'_1 .

| L | A'_0 | A'_1 | A'_2 | A'_3 | A'_4 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 39600 | 38000 | 36400 | 34800 | 33200 |
| 20 | 0 | 80 | 160 | 240 | 320 |
| 30 | 0 | 80 | 160 | 240 | 320 |
| 40 | 0 | 240 | 480 | 720 | 960 |
| 44 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 50 | 0 | 80 | 160 | 240 | 320 |
| 60 | 0 | 240 | 480 | 720 | 960 |
| 80 | 0 | 240 | 480 | 720 | 960 |
| 100 | 0 | 160 | 320 | 480 | 640 |
| 120 | 0 | 240 | 480 | 720 | 960 |
| 160 | 0 | 80 | 160 | 240 | 320 |
| 200 | 0 | 80 | 160 | 240 | 320 |
| 240 | 0 | 80 | 160 | 240 | 320 |

Tabella 1. Valori degli istogrammi $H(L)$ ricavati dalle immagini dell'insieme A' .

Istogramma cumulativo

La tabella 2 riporta la popolazione complessiva H_i nei livelli con $L \neq 0$ per le immagini dell'insieme A' .

| | P | H_i |
|--------|---|-------|
| A'_0 | 0 | 400 |
| A'_1 | 1 | 2000 |
| A'_2 | 2 | 3600 |
| A'_3 | 3 | 5200 |
| A'_4 | 4 | 6800 |

Tabella 2. Popolazione complessiva H_i per le immagini dell'insieme A' .

In assenza di rumore la popolazione H_i è linearmente proporzionale all'indice di porosità artificiale P . Nel caso di immagini contenenti rumore, le curve rappresentative degli istogrammi $H(L)$ si modificano al variare delle macchie introdotte nell'immagine e quindi dell'indice P , ma passano tutte per uno stesso punto: la figura 4 riporta le curve relative all'insieme B' . Si è quindi calcolato l'istogramma cumulativo H_c tra il livello iniziale $L_1 = 10$ e il livello finale $L_2 = 200$: L_1 è stato scelto in base all'intersezione delle curve degli istogrammi, mentre L_2 è stato scelto in modo da eliminare il picco di popolazione causato dalla codifica dei valori d'uscita introdotta dall'operatore di filtro passa-alto (vedi figura 5).

La tabella 3 riporta i risultati ottenuti per gli insiemi B' e C' .

| P | B' | C' |
|---|-------|-------|
| 0 | 1535 | 6415 |
| 1 | 4105 | 8643 |
| 2 | 6697 | 10867 |
| 3 | 9250 | 13094 |
| 4 | 11795 | 15261 |

Tabella 3. Iistogrammi cumulativi H_c calcolati sugli insiemi di immagini contenenti rumore.

Interpolazione

Eseguendo la regressione lineare dei dati di tabella 3 rispetto all'indice P si ottengono i risultati riportati in tabella 4: l'istogramma cumulativo è linearmente proporzionale alla porosità simulata, sia in assenza che in presenza di rumore.

| | B' | C' |
|------------------------|----------|----------|
| Regression Coefficient | 2566,5 | 2214,3 |
| Y-Intercept | 1543,4 | 6427,4 |
| Adjusted R-Squared | 0,999984 | 0,999962 |

Tabella 4. Parametri di regressione lineare dell'istogramma cumulativo in funzione dell'indice di porosità P .

La tabella 5 riporta le deviazioni standard degli istogrammi calcolati sugli insiemi di immagini elaborate A' , B' e C' .

| P | A' | B' | C' |
|---|-------|-------|-------|
| 0 | 4.40 | 23.35 | 33.84 |
| 1 | 21.28 | 26.04 | 35.19 |
| 2 | 29.35 | 28.25 | 36.40 |
| 3 | 35.26 | 30.10 | 37.41 |
| 4 | 40.00 | 31.63 | 38.36 |

Tabella 5. Valori della deviazione standard ds degli istogrammi calcolati sulle immagini A' , B' e C' .

Eseguendo la regressione non lineare definita dall'equazione 3 sui dati di tabella 5 si ottengono i risultati mostrati in tabella 6; le figure 6, 7 e 8 riportano i dati di misura e le curve di interpolazione.

| | A' | B' | C' |
|----------------|----------|----------|----------|
| a ₁ | 4,08453 | 22,8129 | 33,5032 |
| a ₂ | 17,8755 | 4,11721 | 2,22637 |
| SS | 0,635097 | 1,59321 | 0,633781 |
| CoD | 0,999188 | 0,962978 | 0,950297 |
| CC | 0,999593 | 0,981314 | 0,974832 |
| MSC | 6,315566 | 2,496243 | 2,201693 |

SS = SumSquare
 CoD = Coefficient of Determination
 CC = Correlation Coefficient
 MSC = Model Selection Criterion

Tabella 6. Parametri della regressione non lineare eseguita sui dati di tabella 5.

Elaborazione mediante funzioni wavelet

La tabella 7 riporta i valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini di dettaglio ottenute elaborando gli insiemi di immagini di prova A, B e C mediante la trasformata wavelet, usando la funzione Haar e arrestando l'analisi al primo livello (vedi figura 9). La tabella 8 riporta i parametri risultanti dalla regressione non lineare dei dati di tabella 7, usando l'equazione 3; le figure 10, 11 e 12 mostrano i grafici dei punti di misura e delle curve interpolanti.

| P | A | | | B | | | C | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | H ₁ | V ₁ | D ₁ | H ₁ | V ₁ | D ₁ | H ₁ | V ₁ | D ₁ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.65 | 5.99 | 5.84 |
| 1 | 2.8 | 2.8 | 1.7 | 1.0 | 2.8 | 2.8 | 5.81 | 6.16 | 5.87 |
| 2 | 4.1 | 3.9 | 2.5 | 2.0 | 4.1 | 3.9 | 5.98 | 6.34 | 5.91 |
| 3 | 4.9 | 5.2 | 3.1 | 3.0 | 4.9 | 5.2 | 6.15 | 6.52 | 5.93 |
| 4 | 6.0 | 6.0 | 3.6 | 4.0 | 6.0 | 6.0 | 6.41 | 6.68 | 5.93 |

Tabella 7. Deviazioni standard degli istogrammi delle immagini di dettaglio H₁, V₁ e D₁ ottenute applicando la trasformata wavelet alle immagini di prova A, B e C (Haar, livello 1).

| | A | | | B | | | C | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | H ₁ | V ₁ | D ₁ | H ₁ | V ₁ | D ₁ | H ₁ | V ₁ | D ₁ |
| a ₁ | -0,0627 | -0,0999 | -0,0999 | 0,7950 | 1,7445 | -0,0355 | 5,5667 | 5,9240 | 5,8353 |
| a ₂ | 2,9470 | 2,9936 | 2,9936 | 1,0388 | 0,7887 | 1,8023 | 0,3524 | 0,3371 | 0,0494 |
| SS | 0,05956 | 0,09926 | 0,09926 | 0,0616 | 0,1394 | 0,0070 | 0,0460 | 0,0251 | 0,0004 |
| CoD | 0,99720 | 0,99549 | 0,99549 | 0,9772 | 0,9160 | 0,9991 | 0,8684 | 0,9172 | 0,9427 |
| CC | 0,99860 | 0,99774 | 0,99774 | 0,9885 | 0,9571 | 0,9996 | 0,9319 | 0,9577 | 0,9709 |
| MSC | 5,07863 | 4,60143 | 4,60143 | 2,9802 | 1,6773 | 0,9996 | 1,2283 | 1,6904 | 2,0602 |

SS = SumSquare
 CoD = Coefficient of Determination
 CC = Correlation Coefficient
 MSC = Model Selection Criterion

Tabella 8. Parametri della regressione non lineare eseguita sui dati di tabella 7.

Le tabelle 9 ÷ 17 riportano i valori ottenuti applicando l'operatore O agli insiemi di immagini di prova; i grafici delle figure 13 ÷ 21 riportano gli andamenti

delle deviazioni standard degli istogrammi delle 9 immagini di dettaglio H, V e D ricavate da ciascuno degli insiemi di immagini di prova.

I grafici delle figure 22 ÷ 24 riportano le mappe dei risultati ottenuti applicando separatamente a ciascun insieme di 5 immagini di prova la tecnica PCA (Principal Component Analysis); per la costruzione dei grafici sono state considerate soltanto le prime due componenti c_1 e c_2 .

| k | | A₀ | A₁ | A₂ | A₃ | A₄ |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | H ₁ | 0 | 2.8 | 4.1 | 4.9 | 6.0 |
| 2 | V ₁ | 0 | 2.8 | 3.9 | 5.2 | 6.0 |
| 3 | D ₁ | 0 | 1.7 | 2.5 | 3.1 | 3.6 |
| 4 | H ₂ | 0 | 2.5 | 3.4 | 4.3 | 4.7 |
| 5 | V ₂ | 0 | 2.6 | 3.6 | 4.2 | 4.8 |
| 6 | D ₂ | 0 | 2.2 | 3.0 | 3.6 | 4.0 |
| 7 | H ₃ | 0 | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.8 |
| 8 | V ₃ | 10 | 10.1 | 10.2 | 10.2 | 10.3 |
| 9 | D ₃ | 0 | 1.4 | 2.1 | 2.4 | 2.7 |

Tabella 9. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme A (Haar, livello 3).

| k | | B₀ | B₁ | B₂ | B₃ | B₄ |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | H ₁ | 0.9 | 1.66 | 2.2 | 2.60 | 3.00 |
| 2 | V ₁ | 1.9 | 2.30 | 2.7 | 3.17 | 3.50 |
| 3 | D ₁ | 0.9 | 1.06 | 1.2 | 1.30 | 1.44 |
| 4 | H ₂ | 0.4 | 1.70 | 2.44 | 3.10 | 3.38 |
| 5 | V ₂ | 1.3 | 2.28 | 2.8 | 3.28 | 3.7 |
| 6 | D ₂ | 0.4 | 1.21 | 1.6 | 2.06 | 2.24 |
| 7 | H ₃ | 0.2 | 1.27 | 1.7 | 1.90 | 2.5 |
| 8 | V ₃ | 8.7 | 8.80 | 8.9 | 9.00 | 9.00 |
| 9 | D ₃ | 0.2 | 1.14 | 1.7 | 2.00 | 2.17 |

Tabella 10. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme B (Haar, livello 3).

| k | | C₀ | C₁ | C₂ | C₃ | C₄ |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | H ₁ | 5.65 | 5.81 | 5.98 | 6.15 | 6.41 |
| 2 | V ₁ | 5.99 | 6.16 | 6.34 | 6.52 | 6.68 |
| 3 | D ₁ | 5.84 | 5.87 | 5.91 | 5.93 | 5.93 |
| 4 | H ₂ | 2.84 | 3.3 | 3.71 | 4.19 | 4.41 |
| 5 | V ₂ | 3.12 | 3.59 | 3.96 | 4.29 | 4.62 |
| 6 | D ₂ | 2.9 | 3.13 | 3.28 | 3.52 | 3.64 |
| 7 | H ₃ | 1.34 | 1.79 | 2.06 | 2.3 | 2.78 |
| 8 | V ₃ | 8.88 | 8.94 | 9.01 | 9.06 | 9.14 |
| 9 | D ₃ | 1.43 | 1.79 | 2.21 | 2.41 | 2.56 |

Tabella 11. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme C (Haar, livello 3).

| k | | D ₀ | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D ₄ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | H ₁ | 0 | 0.7 | 0 | 0.7 | 0.7 |
| 2 | V ₁ | 0 | 3.4 | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| 3 | D ₁ | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | H ₂ | 0 | 1.7 | 0 | 1.3 | 0.4 |
| 5 | V ₂ | 0 | 2.2 | 3.4 | 3.5 | 3.9 |
| 6 | D ₂ | 0 | 0.4 | 0 | 0.4 | 0.1 |
| 7 | H ₃ | 0 | 1.3 | 2.6 | 2.4 | 2.3 |
| 8 | V ₃ | 10 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.6 |
| 9 | D ₃ | 0 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |

Tabella 12. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme D (Haar, livello 3).

| k | | E ₀ | E ₁ | E ₂ | E ₃ | E ₄ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | H ₁ | 0.9 | 1.08 | 0.08 | 0.67 | 0.71 |
| 2 | V ₁ | 1.9 | 2.36 | 2.75 | 2.75 | 2.75 |
| 3 | D ₁ | 0.9 | 0.91 | 0.09 | 0.1 | 0.1 |
| 4 | H ₂ | 0.4 | 1.41 | 0.042 | 1.3 | 0.47 |
| 5 | V ₂ | 1.3 | 2 | 3.43 | 3.53 | 3.92 |
| 6 | D ₂ | 0.4 | 0.56 | 0.05 | 0.41 | 0.15 |
| 7 | H ₃ | 0.2 | 1.35 | 2.6 | 2.44 | 2.31 |
| 8 | V ₃ | 8.7 | 9.66 | 11.53 | 11.55 | 11.61 |
| 9 | D ₃ | 0.2 | 0.55 | 0.63 | 0.51 | 0.53 |

Tabella 13. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme E (Haar, livello 3).

| k | | F ₀ | F ₁ | F ₂ | F ₃ | F ₄ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | H ₁ | 5.65 | 5.7 | 5.68 | 5.67 | 5.68 |
| 2 | V ₁ | 5.99 | 6.14 | 6.14 | 6.16 | 6.17 |
| 3 | D ₁ | 5.84 | 5.84 | 5.85 | 5.85 | 5.85 |
| 4 | H ₂ | 2.84 | 3.1 | 2.86 | 3.01 | 2.9 |
| 5 | V ₂ | 3.12 | 3.48 | 3.85 | 3.93 | 4 |
| 6 | D ₂ | 2.9 | 2.92 | 2.91 | 2.92 | 2.91 |
| 7 | H ₃ | 1.34 | 1.83 | 2.63 | 2.62 | 2.46 |
| 8 | V ₃ | 8.88 | 9.76 | 9.73 | 9.75 | 9.74 |
| 9 | D ₃ | 1.43 | 1.51 | 1.52 | 1.46 | 1.45 |

Tabella 14. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme F (Haar, livello 3).

| k | | G₀ | G₁ | G₂ | G₃ | G₄ |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | H ₁ | 0 | 0.07762 | 0.1051 | 0.1079 | 0.1093 |
| 2 | V ₁ | 0 | 0.07533 | 0.1067 | 0.1057 | 0.1148 |
| 3 | D ₁ | 0 | 0.02646 | 0.03666 | 0.0383 | 0.0438 |
| 4 | H ₂ | 0 | 0.1307 | 0.17 | 0.1779 | 0.1766 |
| 5 | V ₂ | 0 | 0.1391 | 0.172 | 0.1868 | 0.1751 |
| 6 | D ₂ | 0 | 0.03087 | 0.06402 | 0.0595 | 0.0539 |
| 7 | H ₃ | 0 | 0.2653 | 0.2856 | 0.3159 | 0.2959 |
| 8 | V ₃ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 9 | D ₃ | 0 | 0.08356 | 0.1071 | 0.0823 | 0.0967 |

Tabella 15. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme G (Haar, livello 3).

| k | | H₀ | H₁ | H₂ | H₃ | H₄ |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | H ₁ | 0.9 | 0.911 | 0.9104 | 0.9111 | 0.9115 |
| 2 | V ₁ | 1.9 | 1.945 | 1.946 | 1.947 | 1.947 |
| 3 | D ₁ | 0.9 | 0.9109 | 0.9115 | 0.9113 | 0.9112 |
| 4 | H ₂ | 0.4 | 0.4632 | 0.4763 | 0.4777 | 0.4761 |
| 5 | V ₂ | 1.3 | 1.311 | 1.314 | 1.316 | 1.315 |
| 6 | D ₂ | 0.4 | 0.4564 | 0.4571 | 0.4576 | 0.4575 |
| 7 | H ₃ | 0.2 | 0.3342 | 0.3686 | 0.3824 | 0.3773 |
| 8 | V ₃ | 8.7 | 8.784 | 8.787 | 8.786 | 8.787 |
| 9 | D ₃ | 0.2 | 0.2421 | 0.2519 | 0.2436 | 0.2459 |

Tabella 16. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme H (Haar, livello 3).

| k | | I₀ | I₁ | I₂ | I₃ | I₄ |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | H ₁ | 5.65 | 5.652 | 5.65 | 5.649 | 5.653 |
| 2 | V ₁ | 5.99 | 5.992 | 5.993 | 5.994 | 5.995 |
| 3 | D ₁ | 5.84 | 5.84 | 5.84 | 5.84 | 5.84 |
| 4 | H ₂ | 2.84 | 2.846 | 2.846 | 2.85 | 2.845 |
| 5 | V ₂ | 3.12 | 3.119 | 3.122 | 3.117 | 3.116 |
| 6 | D ₂ | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.901 |
| 7 | H ₃ | 1.34 | 1.36 | 1.37 | 1.368 | 1.379 |
| 8 | V ₃ | 8.88 | 8.885 | 8.892 | 8.891 | 8.889 |
| 9 | D ₃ | 1.43 | 1.431 | 4.429 | 1.426 | 1.424 |

Tabella 17. Deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini di dettaglio H, V e D ottenute applicando l'analisi wavelet all'insieme I (Haar, livello 3).

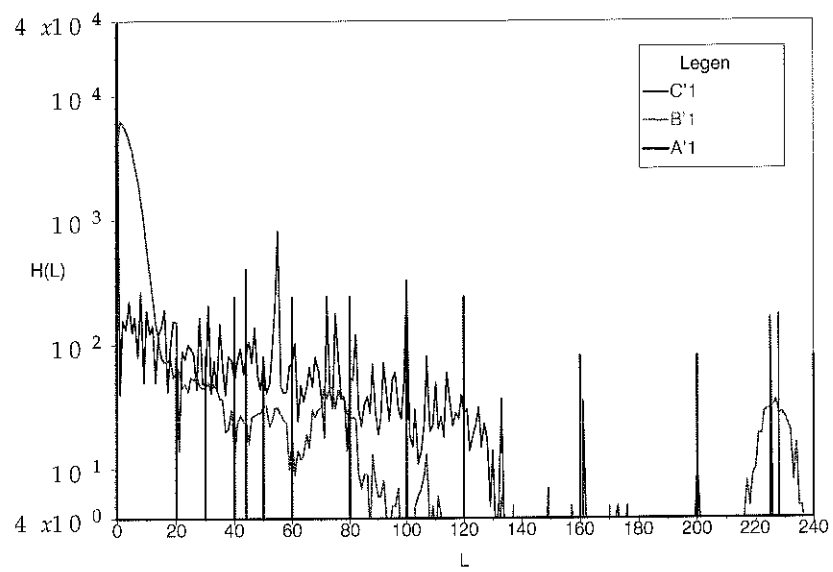


Figura 3. Istogrammi calcolati sulle immagini elaborate A'_{1} , B'_{1} e C'_{1} .

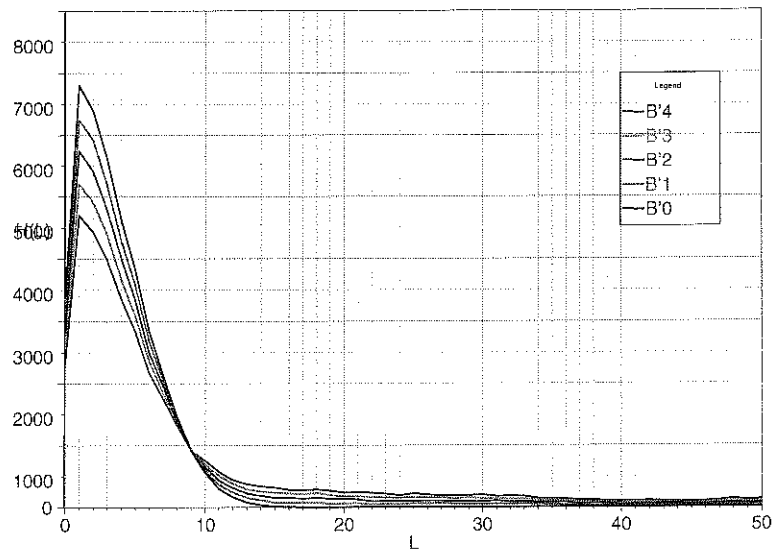


Figura 4. Rappresentazione dell'intervallo $L = 0, 50$ degli istogrammi calcolati sull'insieme di immagini B' .

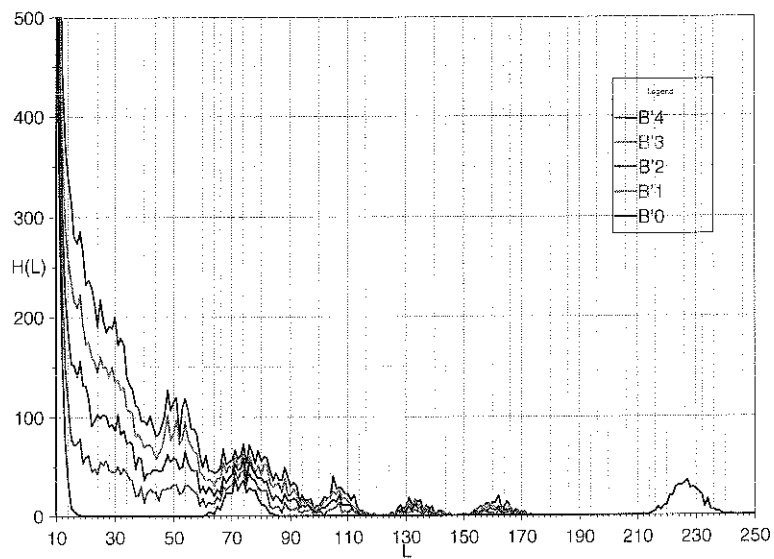


Figura 5. Rappresentazione dell'intervallo $L = 10, 250$ degli istogrammi calcolati sull'insieme di immagini B' .

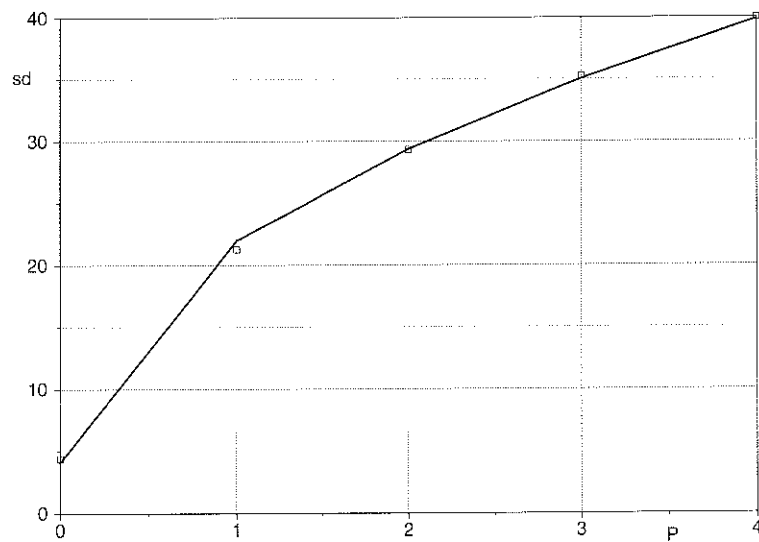


Figura 6. Valori di deviazione standard sd degli istogrammi calcolati sull'insieme A' e curva di regressione.

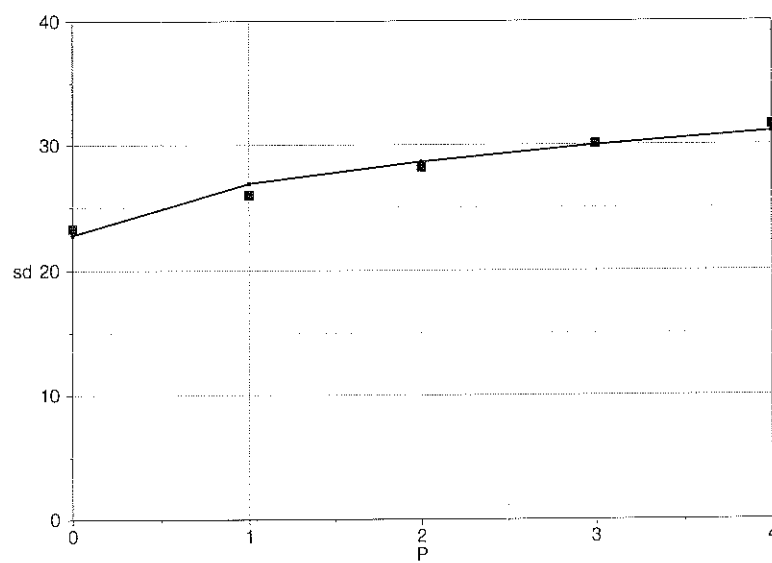


Figura 7. Valori di deviazione standard sd degli istogrammi calcolati sull'insieme B' e curva di regressione.

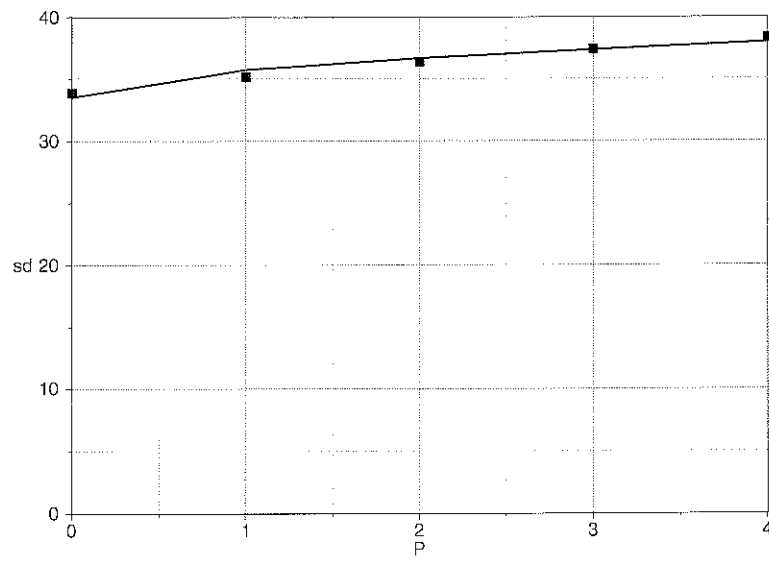


Figura 8. Valori di deviazione standard sd degli istogrammi calcolati sull'insieme C' e curva di regressione.

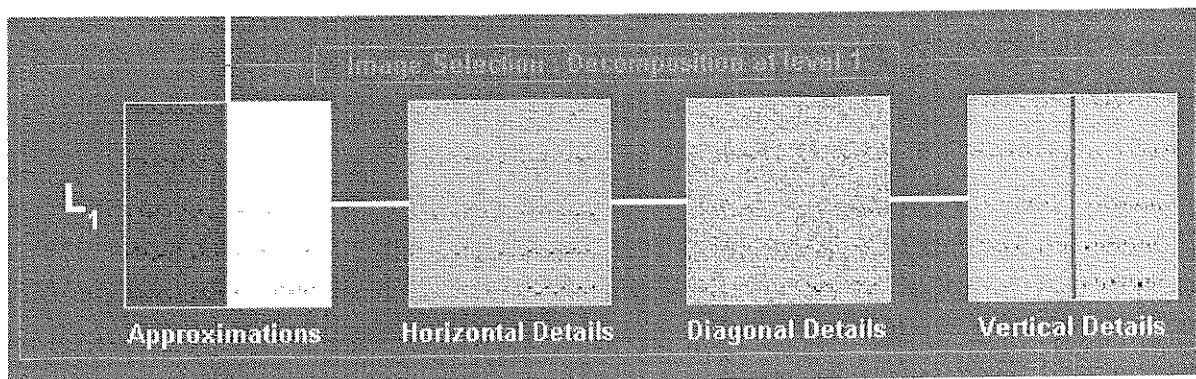


Figura 9. Immagini di approssimazione e dettaglio ottenute applicando la trasformata wavelet all'immagine A_1 (Haar, livello 1).

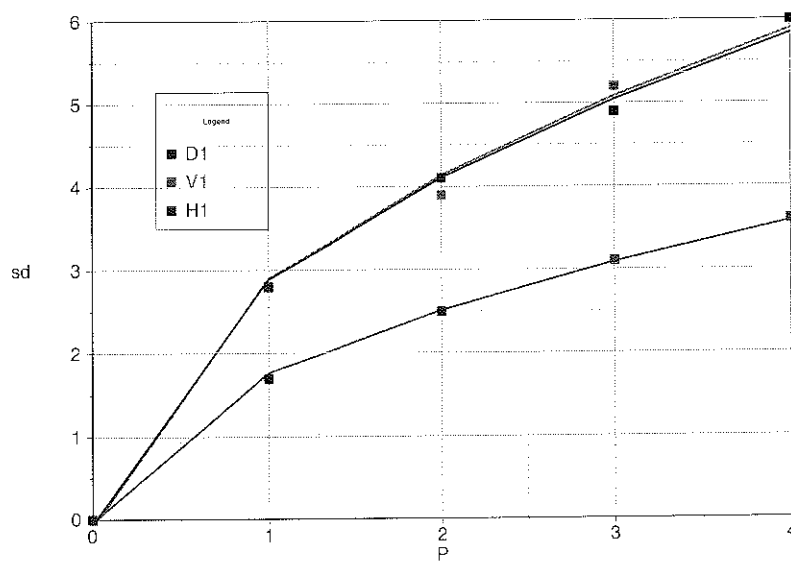


Figura 10. Curve di regressione dei valori di deviazione standard degli istogrammi calcolati sulle immagini dei dettagli H_1 , V_1 e D_1 ricavati dall'insieme A (Haar, livello 1).

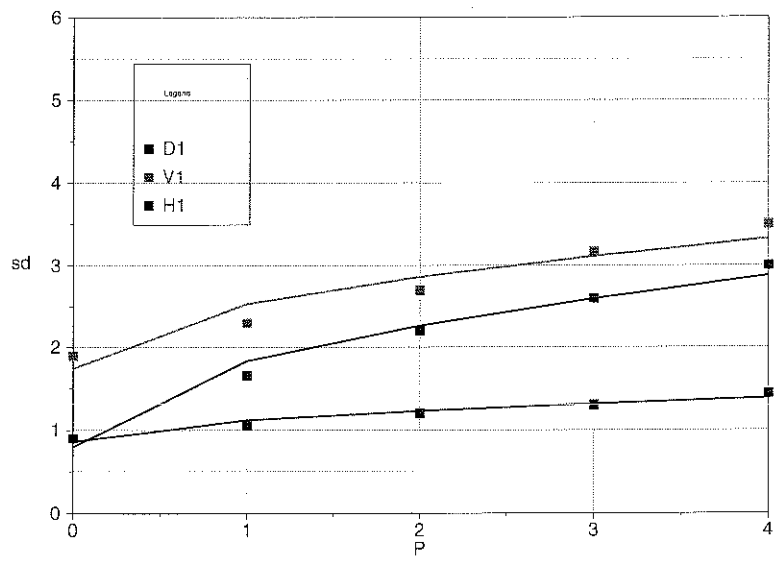


Figura 11. Curve di regressione dei valori di deviazione standard degli istogrammi calcolati sulle immagini dei dettagli H_1 , V_1 e D_1 ricavati dell'insieme B (Haar, livello 1).

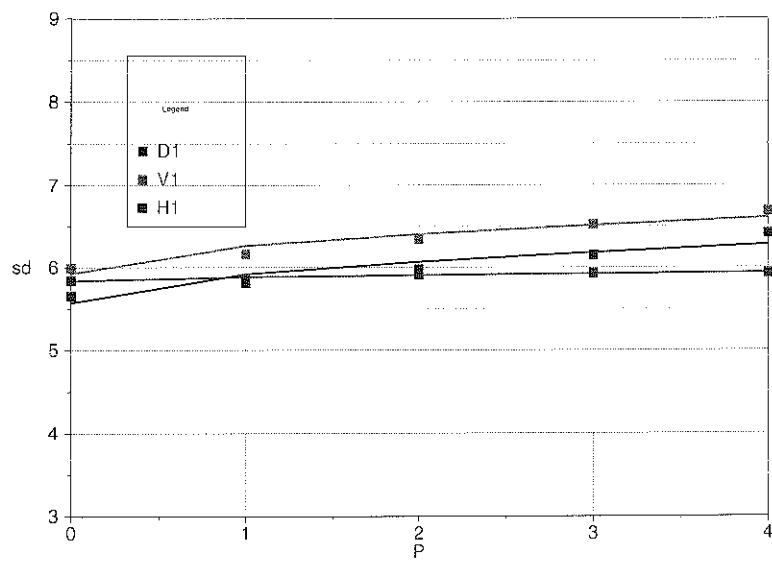


Figura 12. Curve di regressione dei valori di deviazione standard degli istogrammi calcolati sulle immagini dei dettagli H_1 , V_1 e D_1 ricavati dell'insieme C (Haar, livello 1).

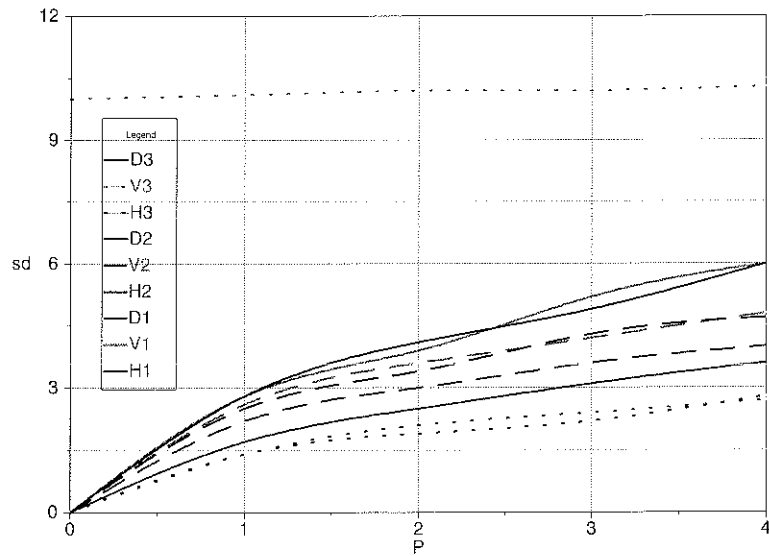


Figura 13. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme A).

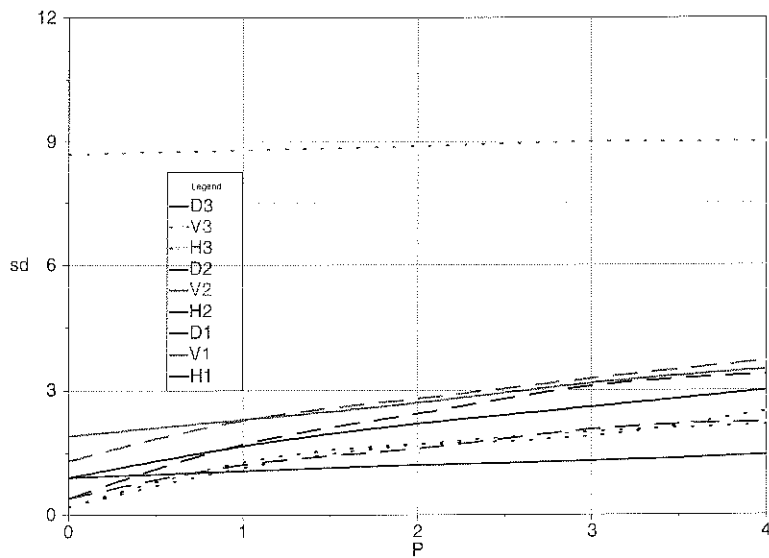


Figura 14. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme B).

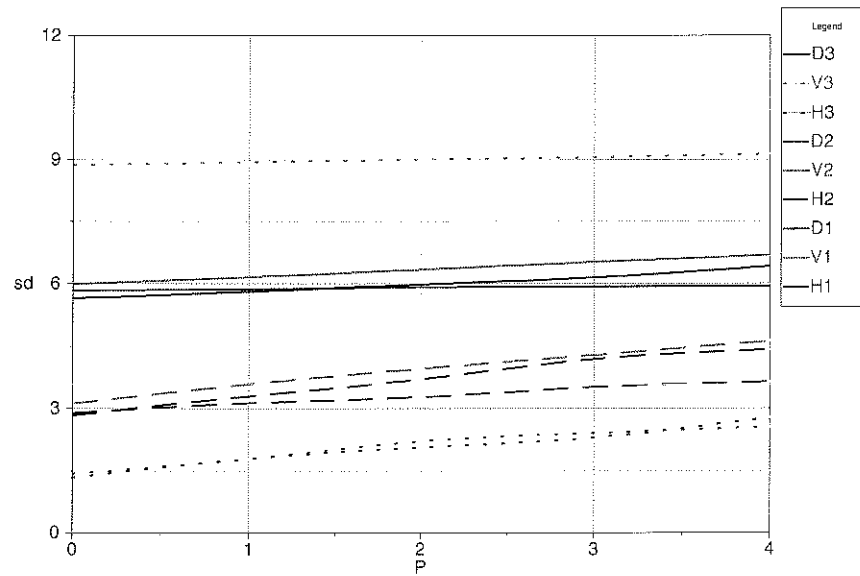


Figura 15. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme C).

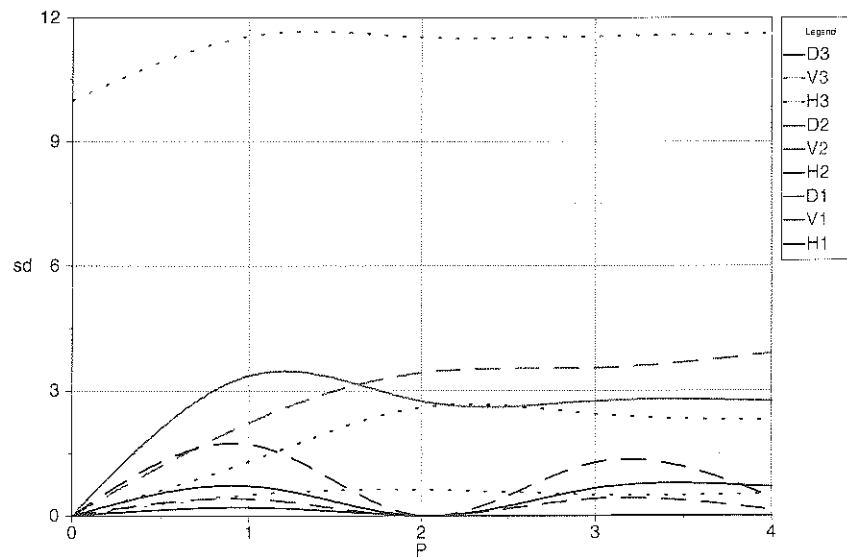


Figura 16. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme D).

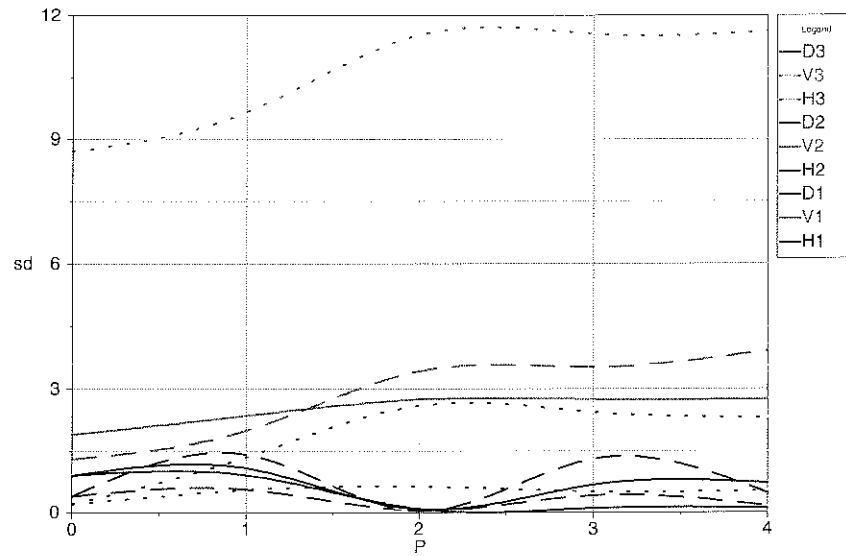


Figura 17. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme E).

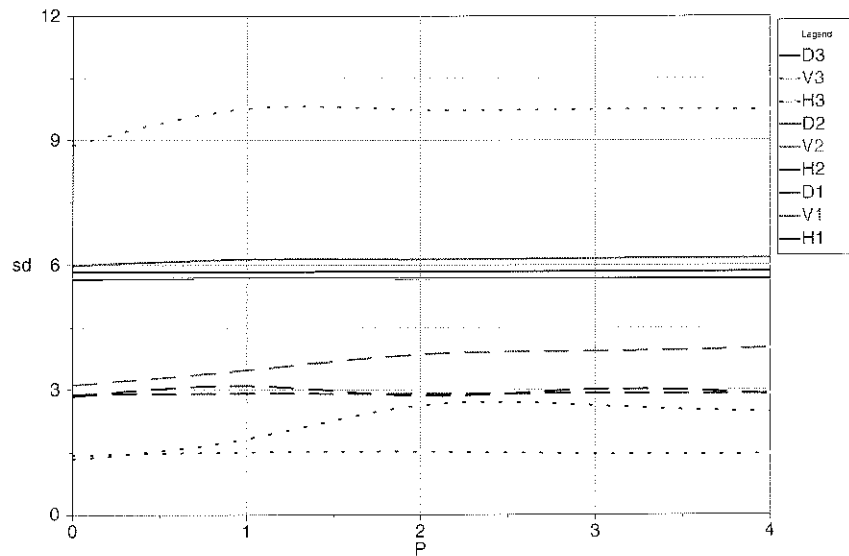


Figura 18. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme F).

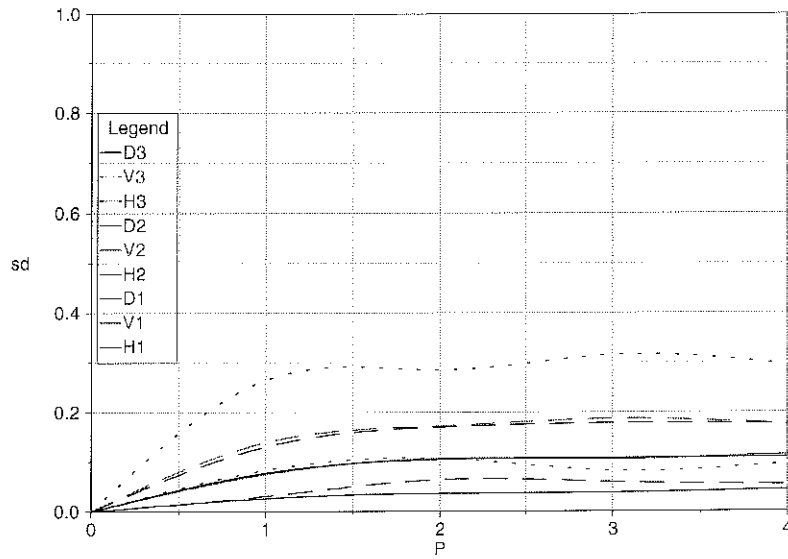


Figura 19. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme G).

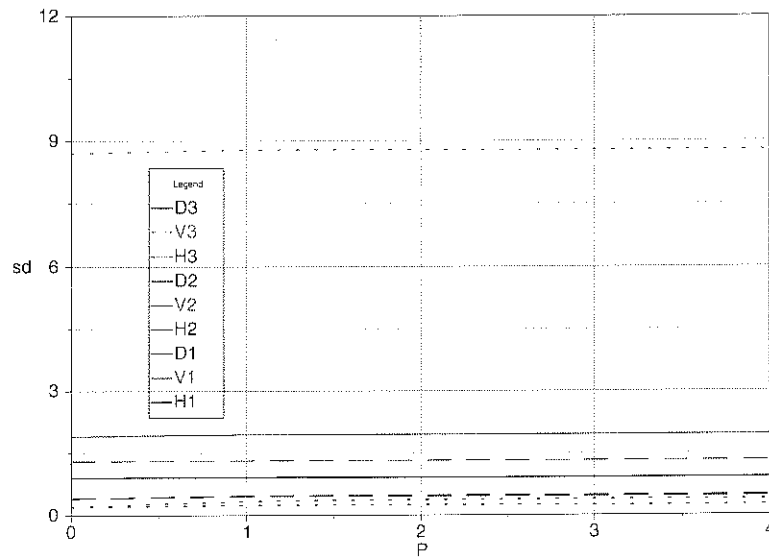


Figura 20. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme H).

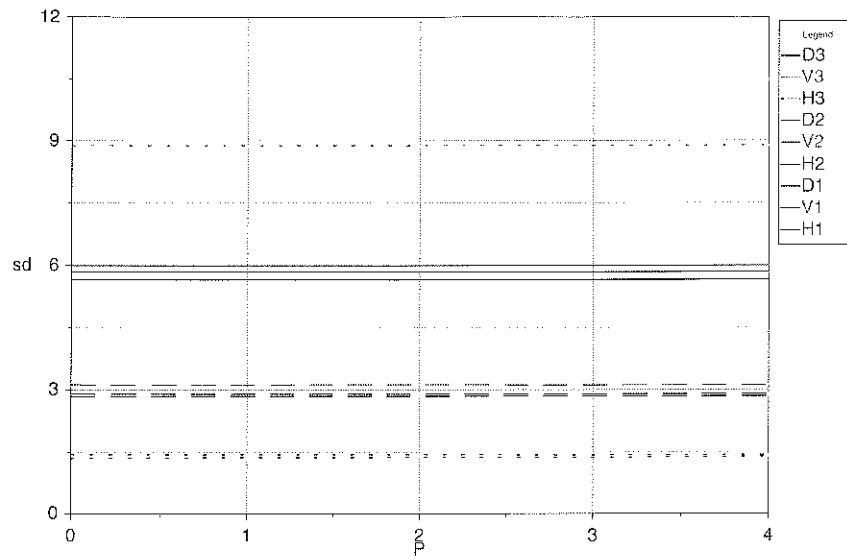


Figura 21. Valori di deviazione standard degli istogrammi delle immagini dei dettagli H, V e D ricavati mediante la wavelet Haar ai livelli 1, 2 e 3 (insieme I).

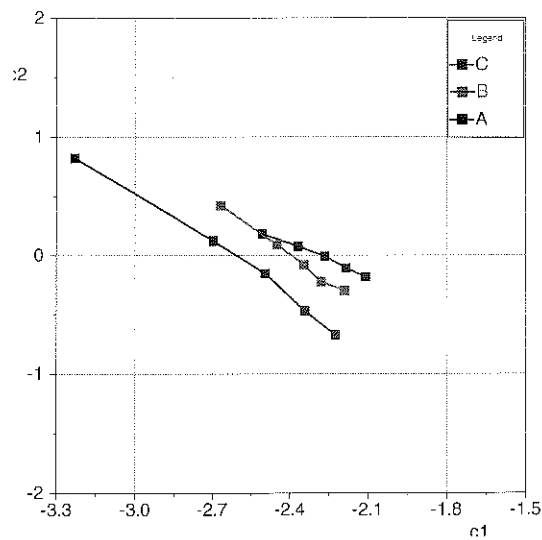


Figura 22. Diagramma delle componenti principali c1 e c2 ricavate dalla PCA applicata ai risultati dell'analisi wavelet degli insiemi A, B e C.

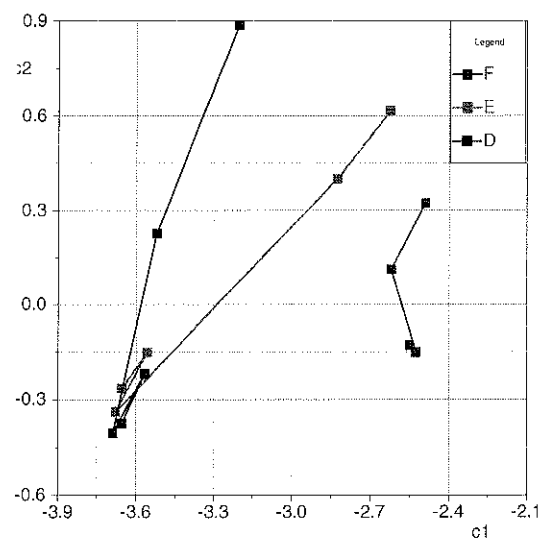


Figura 23. Diagramma delle componenti principali c_1 e c_2 ricavate dalla PCA applicata ai risultati dell'analisi wavelet degli insiemi D, E e F.

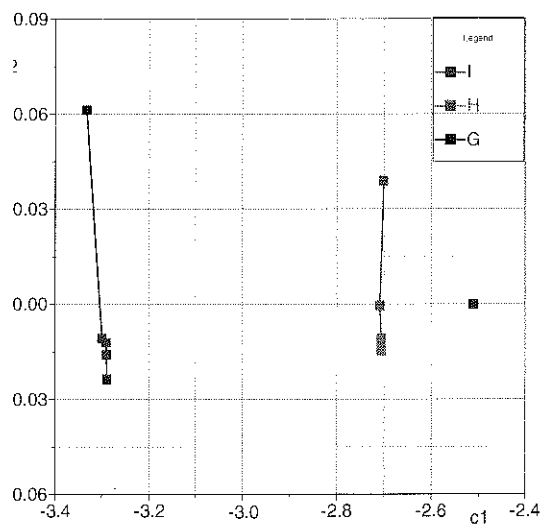


Figura 24. Diagramma delle componenti principali c_1 e c_2 ricavate dalla PCA applicata ai risultati dell'analisi wavelet degli insiemi G, H e I.

Conclusioni

Il lavoro descritto riguarda un'applicazione particolare di analisi d'immagini, consistente nell'esame di immagini simili tra loro al fine di determinare le eventuali differenze; in particolare, data un'immagine di riferimento, si vuol rivelare la presenza di piccole macchie con disposizione casuale, senza volerne ricavare la posizione.

La procedura sviluppata è costituita da un filtraggio di tipo passa-alto di un'immagine e dall'analisi dell'istogramma dell'immagine filtrata; il primo passo della procedura individua i punti di contorno delle strutture geometriche e delle macchie eventualmente presenti nell'immagine d'ingresso, e il secondo passo ne fornisce una stima di conteggio, in modo che, mediante il confronto col conteggio ricavato dall'immagine di riferimento, è possibile rivelare la presenza di macchie (e quindi di difetti) e stimarne la quantità.

Al fine di sviluppare la procedura descritta sono state costruiti insiemi di immagini di prova, costituiti da un'immagine di riferimento e da immagini ottenute inserendo in quella di riferimento un numero crescente di aree scure con piccole dimensioni.

Inizialmente, le immagini sono state filtrate con un operatore di estrazione dei contorni ed è stato quindi calcolato l'istogramma dell'immagine filtrata: la deviazione standard dell'istogramma aumenta all'aumentare del numero di difetti simulati presenti nell'immagine d'ingresso.

Successivamente, le immagini di prova sono state elaborate mediante la trasformata wavelet. In questo caso, da ogni immagine d'ingresso si ricava un insieme di immagini di dettaglio, cioè di immagini ottenute mediante l'applicazione di filtri passa-alto con differenti caratteristiche; di conseguenza si ottiene un insieme di misure, costituite dalle deviazioni standard degli istogrammi calcolati sulle immagini filtrate, che può fornire maggiori informazioni di quelle ottenibili analizzando un singolo istogramma. Le prove svolte hanno infatti mostrato che con questo approccio si possono discriminare le risposte sia in base al numero di macchie introdotte nell'immagine, sia in base alle loro dimensioni: naturalmente la procedura diventa meno sensibile all'aumentare del rumore presente nelle immagini da elaborare.

In generale, il metodo descritto può essere impiegato in un processo di controllo di qualità, se il risultato dell'ispezione di un oggetto è un'immagine, i difetti sono rappresentati da macchie sull'immagine e il rilevamento della quantità delle macchie può essere sufficiente per eseguire una classificazione. In particolare, il metodo può essere impiegato per l'analisi di mappe ricavate con ispezione a ultrasuoni, al fine di rivelare la presenza di porosità; al fine di ottimizzare le prestazioni della procedura è necessario elaborare immagini ricavate con l'ispezione a ultrasuoni di campioni con caratteristiche note a priori o determinate con altri tipi di ispezione, e determinare il tipo di wavelet che dà la migliore risposta.

