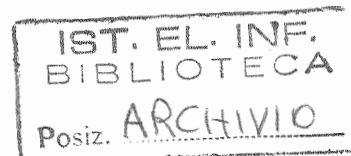


Consiglio Nazionale delle Ricerche



**ISTITUTO DI ELABORAZIONE
DELLA INFORMAZIONE**

PISA

PROGETTO BRITTE

Automatic on line systems for detection, evaluation and mapping
of defects and variation monitoring on finished fabrics

*Analisi preliminare per la definizione di un
sistema per il controllo di qualità*

L. Azzarelli, R. Bozzi, M. Chimenti,

Nota Interna B4-17

APRILE 1990

PROGETTO BRITE

**"Automatic on line systems for detection, evaluation and mapping
of defects and variation monitoring on finished fabrics"**

(Contratto n° RI1B - 0243)

*Analisi preliminare per la definizione di un sistema per il
controllo di qualità*

L. Azzarelli, R. Bozzi, M. Chimenti

Premessa

La presente relazione si riferisce allo svolgimento delle attività dell'Unità Operativa dell'IEI programmate nell'ambito del Progetto Europeo BRITE (Automatic on line systems for detection, evaluation and mapping of defects and variation monitoring on finished fabrics).

Le attività di ricerca e sviluppo sono state organizzate secondo tre direttrici fondamentali:

- a) studio, definizione e sperimentazione delle metodologie e tecnologie più adatte all'acquisizione dei dati dai tessuti da controllare
- b) studio, sviluppo e sperimentazione in simulazione di algoritmi per la rivelazione in tempo reale dei difetti
- c) studio e sperimentazione di modelli, algoritmi e procedure per la classificazione fuori linea dei difetti.

Questa relazione si riferisce fondamentalmente alle attività sia di studio che sperimentali indicate nel punto a); tuttavia per meglio definire i vincoli e le condizioni da imporre, si è reso necessario eseguire studi paralleli con adeguate sperimentazioni relative ai punti b) e c) per analizzare il livello di fattibilità del progetto nel suo complesso. In questi ultimi studi preliminari sono stati presi in considerazione in particolare i vincoli imposti al controllo di qualità dal processo di produzione industriale, le caratteristiche morfologiche e radiometriche dei difetti più ricorrenti e la tipologia dei tessuti. In questa prima fase dei lavori sono stati presi in esame in particolare tessuti di tipo denim, tuttavia nella definizione sia delle strutture hardware sia delle metodologie di acquisizione e di elaborazione dei dati si è tenuto conto di impieghi più generali rivolti al controllo di qualità di prodotti tessili di vario tipo.

1. Aspetti generali del problema

Attualmente il controllo della qualità del prodotto tessile viene fatto da parte di uno o più operatori che ispezionano la stoffa che scorre a velocità costante su un nastro trasportatore. Il controllo automatico di qualità può essere fatto utilizzando un dispositivo per l'acquisizione delle immagini e un sistema specializzato di calcolo per l'elaborazione e l'analisi dei dati. Il controllo di qualità, per la natura del materiale da esaminare e la tipologia dei difetti, deve operare su immagini ottenute nel visibile.

Il dispositivo di acquisizione deve dunque comprendere un opportuno sistema di illuminamento, un trasduttore optoelettronico che trasforma in segnale elettrico il flusso luminoso riflesso dalla superficie della stoffa, un convertitore per la trasformazione del segnale analogico in dati digitali e un sistema molto specializzato per il trattamento numerico dei dati caratterizzato da un'elevata potenza computazionale e grande velocità di risposta.

Poichè l'oggetto da esaminare è in movimento, è conveniente usare per l'acquisizione una telecamera con sensore di riga, in grado di esplorare ad ogni scansione una striscia sottile (circa 0,2 mm), trasversale alla direzione del moto. Di conseguenza risulta opportuno fare uso di un dispositivo di illuminamento che irradi un campo di tipo rettangolare, con una dimensione pari all'altezza della stoffa da esaminare e l'altra dimensione determinata dallo spessore della riga di scansione.

La velocità di trascinamento della stoffa impone dei vincoli sul tempo di acquisizione di ciascuna riga e sulla frequenza di campionamento del segnale, nonchè sulla potenza della sorgente luminosa che deve essere in grado di produrre la corretta esposizione del traduttore optoelettronico. L'elaborazione dei dati deve essere eseguita in tempo reale per non provocare ritardi del ciclo produttivo; la velocità di trascinamento e la quantità di dati ricavati dalla acquisizione di ciascuna riga concorrono a determinare la potenza computazionale necessaria all'analisi e la conseguente architettura del sistema da impiegare per l'elaborazione dei dati.

2. Descrizione dei campioni

Al fine di valutare le specifiche di massima per il controllo di qualità, è stata impiegata una campionatura di tessuti contenenti un'ampia casistica di difetti. Sono stati scelti per questo esame preliminare tessuti del tipo denim perchè, a causa della loro limitata riflettanza, della tipologia dei difetti e della specifica struttura, sembrano presentare le maggiori difficoltà di analisi. I campioni presi in esame sono costituiti da ritagli di pezze di circa 1.55m di altezza e di lunghezza dipendente dalla estensione del difetto; la tabella 1 riporta l'elenco dei campioni con le descrizioni dei relativi difetti.

Campione	Classificazione di difetto	tipo
1	trama rotta	orizzontale
2a	strade	orizzontale
b	fiamma in catena	verticale
3	fiamma in trama	orizzontale
4	macchia d'olio	macchie
5	filo grosso in trama	orizzontale
6	filo lento in catena	verticale
7	filo grosso in catena	verticale
8	filo doppio in catena	verticale
9	trama lente	orizzontale
10	fallo maglia	verticale
11a	fallo macchina	orizzontale
b	trama doppia	orizzontale
12	strada	orizzontale
13	fili rotti in catena	verticale
14	filo doppio in trama	orizzontale
15	fili volanti	orizzontale
16	nodi in catena	verticale
17	filato irregolare di trama	aspetto/orizzontale
18	fili tesi in catena	verticale

Tabella n.1

I campioni sono stati esaminati per ricavarne una descrizione necessaria per la definizione dei parametri che influenzeranno sia l'acquisizione che l'elaborazione dei dati: il tessuto è costituito da una trama di fili intrecciati chiari e scuri. Sul lato diritto il tessuto appare con un colore dominante blu con una trama più o meno evidente e con un disegno diagonale più o meno marcato a seconda del diametro dei fili e dalla larghezza della maglia.

Sul rovescio il tessuto appare di un colore dominante grigio e con una trama diagonale più marcata che nel lato diritto e costituita da righe alternate bianche e blu. Anche in assenza di difetti sul lato diritto della stoffa si notano punti bianchi non connessi, zone di diversa colorazione distribuite in maniera random e striature di lunghezza variabile ortogonali all'altezza del campione e distribuite anch'esse in maniera casuale.

Sul lato rovescio si notano delle piccole zone prevalentemente scure distribuite casualmente.

3. Descrizione dei difetti

Sui campioni esaminati i difetti sono raggruppabili dal punto di vista della elaborazione delle immagini nella seguente maniera:

- difetti aperiodici, costituiti da zone più o meno estese, riducibili anche ad una areola, con colorazione differente da quella media del tessuto. Esempi di questo tipo sono macchie d'olio (più scure del fondo), modeste variazioni di tinta (più chiare o più scure) oppure nodi e fili rotti (più chiari nel lato diritto del tessuto);
- difetti di tipo periodico, costituiti da una serie di punti, connessi o non connessi, allineati secondo una qualsiasi direzione sul piano del tessuto. Esempi di questo tipo sono punti chiari rispetto al fondo (sul lato diritto del tessuto) distanziati di un numero intero di passi della trama; a passo elementare si può avere una linea continua o no a seconda della maglia di tessitura.

Sono state eseguite valutazioni qualitative e quantitative ricavate dall'analisi dei vari difetti eseguita sia mediante una osservazione visiva sia mediante misure radiometriche e geometriche eseguite sulle immagini che sono state a questo scopo acquisite mediante diversificati dispositivi di digitalizzazione in grado di simulare sia le condizioni operative del controllo automatico da realizzare, sia i problemi ad esso connessi.

Nell'appendice A sono riportate le immagini digitali, ricavate con diverse risoluzioni spaziali da porzioni dei diversi campioni riportati nella tabella 1 e i grafici delle variazioni radiometriche misurate in zone senza difetti di varia origine e tipo. Le misure sono state eseguite sia sul verso diritto dei campioni sia sul rovescio, per valutare le migliori condizioni di rilevamento dei difetti.

Le immagini sono state acquisite mediante una telecamera a CCD con un campo di vista tale da poter simulare una risoluzione spaziale confrontabile con quella che presumibilmente si dovrà impiegare per il controllo di qualità. Il campione è stato illuminato con sorgenti estese con una contenuta uniformità ($\pm 10\%$). La più ampia distorsione radiometrica, che è evidenziabile sia dai grafici che dalle immagini, è fondamentale dovuta ad aberrazioni di vignettatura dell'obiettivo causate dal campo di vista e dalla ridotta distanza di lavoro.

Dai grafici si può osservare la presenza di: picchi di riflettanza relativi a difetti; picchi di ampiezza e durata leggermente inferiori relativi alla maglia; modulazioni a bassa frequenza relative a strutture del tessuto e ad aberrazioni introdotte dal sistema di acquisizione nel suo complesso.

Da queste prime osservazioni e misure è possibile dedurre che il limitato contrasto e le modulazioni presenti rendono alquanto precario un affidabile rilevamento dei difetti, almeno nelle condizioni di acquisizione sopra citate, per cui è opportuno analizzare e controllare attentamente i parametri che influiscono negativamente sulla qualità dei dati.

4. Specifiche del dispositivo di acquisizione

In seguito all'esame preliminare delle caratteristiche della stoffa e dei difetti si possono individuare i principali requisiti fotometrici e di risoluzione del dispositivo di acquisizione e del sistema di illuminamento.

4.1 Requisiti fotometrici

La tinta media dei vari tessuti si può considerare costituita da un solo colore, determinata dai fili bianchi e blu che costituiscono la trama e dai loro spessori. Nella visione ravvicinata, corrispondente alla acquisizione per il controllo di qualità, la maculatura tipica della stoffa, causata prevalentemente dall'ispessimento casuale delle maglie, si presenta come una modulazione di colore prodotta da una variazione del rapporto delle dimensioni e del numero di trattini bianchi o blu per unità di superficie. Poichè non ci sono in effetti variazioni di colore rispetto ad un disegno prestabilito, l'immagine del campione può essere acquisita mediante una telecamera acromatica: in questo caso i punti bianchi o blu producono segnali con ampiezza dipendente, in prima approssimazione, dalla riflettanza del tessuto.

Poichè non si devono riconoscere colori differenti sullo stesso campione, la sorgente luminosa deve emettere luce bianca ma senza vincoli a priori sulla composizione spettrale, mentre il trasduttore optoelettronico deve avere una risposta fotometrica possibilmente piatta su un esteso intervallo di lunghezza d'onda; comunque è opportuno che la caratteristica di emissione della sorgente sia ben accoppiata con la risposta fotometrica del sensore al fine di utilizzare potenze di illuminamento contenute. In questi casi può essere conveniente usare filtri cromatici al fine di rendere massimo il contrasto fra pixel di colore blu e pixel chiari. Certi tipi di difetti sono costituiti fondamentalmente da variazione del pattern diagonale e si presentano come trattini leggermente più scuri (blu) del fondo, in questo caso l'utilizzo di filtri cromatici non sembra consigliabile. Comunque i filtri dovranno essere notevolmente selettivi e quindi scelti in funzione della colorazione delle stoffe e della risposta radiometrica del difetto.

4.2 Requisiti di risoluzione spaziale

Il campionamento dell'immagine viene fatto suddividendola in elementi (pixel) di forma quadrata con dimensione e distanza fra i centri p : si definisce allora p come il passo di campionamento dell'immagine. Al fine di rivelare la presenza di difetti isolati di tipo aperiodico, il passo p può essere sufficientemente alto; al fine di rivelare e classificare difetti di tipo periodico, assimilabili a punti o serie di punti con distanza p_1 , il passo di campionamento deve essere minore di $p/2$: il passo di campionamento necessario per acquisire correttamente l'immagine è dunque determinato dal minimo passo riscontrabile nei difetti di tipo periodico.

Poichè questi difetti sono determinati dalle variazioni della regolarità della trama o della catena, per stimare, in prima approssimazione, la frequenza di campionamento necessaria, si può prendere come riferimento la massima frequenza spaziale contenuta nell'immagine e determinata dalla maglia del tessuto.

La maglia dei campioni esaminati varia a seconda del tipo di tessuto tra $1.6 \pm 0.6 \text{ mm}^{-1}$; la frequenza di campionamento f_s è determinata dal più grande dei valori suddetti e vale:

$$f_s \cong 3 \text{ campioni/mm.}$$

Poichè l'altezza H delle pezze è costante, supponendo che la riga di acquisizione dell'immagine sia parallela ad H , il numero N di campioni per riga è dato da:

$$N = H \cdot f_s \cong 1500 \cdot 3 \cong 4500$$

Il numero effettivo di punti di campionamento può essere scelto partendo dal valore citato in funzione della risoluzione dei dispositivi disponibili e in seguito ad una sperimentazione da eseguirsi sui vari tipi di tessuto con le diverse tipologie di difetti.

5. *Requisiti di elaborazione dei dati*

I dati da elaborare sono costituiti da un vettore di N elementi per ciascuna linea di acquisizione; viste la natura dei campioni, la precisione richiesta e la dinamica di misura, può essere sufficiente una quantizzazione su 256 classi (8 bit per pixel). Poichè una elaborazione monodimensionale non è sempre né sufficiente né corretta, si dovranno in genere trattare matrici di $M \times N$ bit.

Vista la grande quantità dei dati da elaborare sembra conveniente di poter disporre di due modi di elaborazione:

- una elaborazione in tempo reale per individuare la presenza di difetti sulla pezza in movimento
- una elaborazione differita delle matrici dei dati relativi ai difetti individuati al fine di compiere operazioni di classificazione.

Poichè i tipi di difetto sono numerosi e molto differenziati, l'operazione di individuazione può richiedere l'esecuzione di algoritmi differenti specializzati per classi di difetto: ciò comporta che per ottenere risultati in tempo reale si deve ricorrere, in linea generale, a tecniche di elaborazione ed acquisizione di tipo parallelo.

Questa organizzazione può essere resa necessaria anche dall'impiego di più trasduttori optoelettronici, utilizzati per aumentare la risoluzione di acquisizione o per riprendere entrambe le superfici della pezza: quest'ultima necessità è determinata dal fatto che taluni difetti appaiono rilevabili nel verso dritto della stoffa mentre altri sembrano più facilmente individuabili nel verso rovescio.

Si possono distinguere tre tipi di trattamento dei dati:

- 1) Preelaborazione. In questa fase vengono ridotti gli artefatti e il rumore causati dalla disuniformità del sistema di illuminamento e del trasduttore optoelettronico, la modulazione introdotta dal sistema ottico di focalizzazione e viene eventualmente modificata la risposta fotometrica del sensore. Poichè questi tipi di correzione sono invarianti nel tempo, l'elaborazione può essere compiuta in maniera veloce facendo uso di opportune tavole di conversione di ingresso ricavate in

operazioni di calibrazione, oppure utilizzando processori dedicati specializzati in particolari elaborazioni da eseguirsi in tempo reale.

- 2) Individuazione dei difetti. In questa fase si esegue un'analisi di tipo fotometrico sulle matrici ricavate dalla acquisizione di un opportuno numero di righe dipendente sia dagli algoritmi impiegati sia dalle velocità richieste. Si possono usare operatori di tipo puntuale, se il segnale di riga corretto in precedenza è indipendente dai sistemi ottici ed optoelettronici, oppure operatori di tipo locale o globale che effettuano valutazioni statistiche sui dati. Poichè questa elaborazione deve essere compiuta in tempo reale è necessario che il sistema di calcolo abbia la velocità sufficiente per eseguire algoritmi relativamente semplici e che diano i risultati coi gradi di attendibilità richiesti.
- 3) Riconoscimento e classificazione dei difetti. In questa fase vengono elaborati fuori linea i dati di acquisizione selezionati nella fase precedente, durante la quale possono essere ricavati anche una serie di parametri geometrici di caratterizzazione; per riconoscere il tipo di difetto, si devono compiere analisi di tipo morfologico su matrici di dati di dimensioni anche notevoli oppure su vettori organizzati nella fase di individuazione. Il sistema di calcolo deve essere in grado di archiviare grosse quantità di dati richiamabili in modo automatico ad intervalli predeterminati o legati alla individuazione dei difetti eseguiti nella fase precedente. Queste ulteriori operazioni possono richiedere nuovamente un parallelismo elaborativo e quindi architetture informatiche anche complesse.

6. Alcune osservazioni preliminari di progetto

In base ai vincoli dettati dal processo di fabbricazione, e in seguito ad un esame qualitativo di campioni di stoffa con i diversi tipi di difetti e ad una valutazione delle metodologie di elaborazione delle immagini più idonee allo scopo, si possono esprimere le seguenti osservazioni preliminari mirate alla ottimizzazione della qualità dei dati di ingresso mediante il contenimento del rumore di varia origine e degli errori ed artefatti causati dai componenti del dispositivo di acquisizione.

E' opportuno infatti operare sia a livello hardware in fase di progettazione, sia a livello software mediante correzioni da eseguirsi in linea durante l'acquisizione dei dati digitali.

A - Componenti hardware

Le componenti hardware del dispositivo di acquisizione che possono incidere sulla qualità dei dati sono costituite essenzialmente dalla sorgente luminosa, dal trasduttore optoelettronico e dal sistema ottico di focalizzazione.

A1 - Sorgente luminosa

Si devono usare lampade che diano la migliore distribuzione di illuminamento e che siano sufficientemente stabili nel tempo.

A questo riguardo sono state studiate e sperimentate le seguenti sorgenti ottimizzandone la risposta:

- a) proiettore costituito da una batteria di lampade alogene con filamento lineare, pilotate in corrente alternata, e dotato di riflettore e lente cilindrica
- b) proiettore lineare costituito da un'unica lampada fluorescente, pilotata in alta frequenza, di grandi dimensioni (maggiori dell'altezza della stoffa da esaminare) dotato eventualmente di lente di campo cilindrica per ottimizzare l'efficienza di illuminamento
- c) proiettore a fessura costituito da un'unica lampada alogena di grande potenza, diaframma di regolazione del flusso luminoso in uscita, e una speciale guida di luce a fibre ottiche.

Il primo dispositivo (a) può essere caratterizzato da una sufficiente resa luminosa, una media uniformità di distribuzione ($\pm 20\%$) e da un costo contenuto. Può richiedere però complesse procedure di regolazione delle singole lampade sia per ottimizzare la distribuzione del flusso luminoso di uscita sia per correggere eventuali instabilità nel tempo.

Il secondo dispositivo (b) è sicuramente quello che garantisce una migliore distribuzione luminosa di uscita ($\pm 5\%$), una minore modulazione a bassa frequenza e un costo alquanto contenuto; questo tipo di proiettore può però fornire potenze alquanto limitate insufficienti per esaminare alcuni tipi di tessuto caratterizzati da bassa riflettanza.

Il terzo tipo di illuminatore, se realizzabile nelle dimensioni necessarie e se economicamente conveniente, può garantire una sufficiente uniformità di distribuzione del flusso luminoso ($\pm 10\%$), un angolo di incidenza alquanto contenuto (60°) e quindi con buona resa luminosa che può essere ulteriormente aumentata utilizzando una lente di campo cilindrica per convergere il flusso luminoso in una striscia di larghezza costante e con dimensioni più limitate.

A2 - Trasduttore optoelettronico

La risoluzione e la frequenza di lavoro richieste per il trasduttore ottico-elettronico dipendono dai vincoli del processo di produzione dei tessuti, in particolare dalla velocità di trascinamento e dall'altezza del tessuto. Infatti, con riferimento alle fig. 1a, 1b, 1c, detti H l'altezza del tessuto e p il passo di campionamento, sulla riga di scansione il numero N di elementi del sensore dev'essere:

$$N = \frac{H}{p_x} \quad (1)$$

Se T è il tempo necessario per la lettura di tutti gli elementi del trasduttore e v è la velocità di trascinamento del tessuto, le righe di scansione distano dalla quantità Δy data da:

$$\Delta y = vT \quad (2)$$

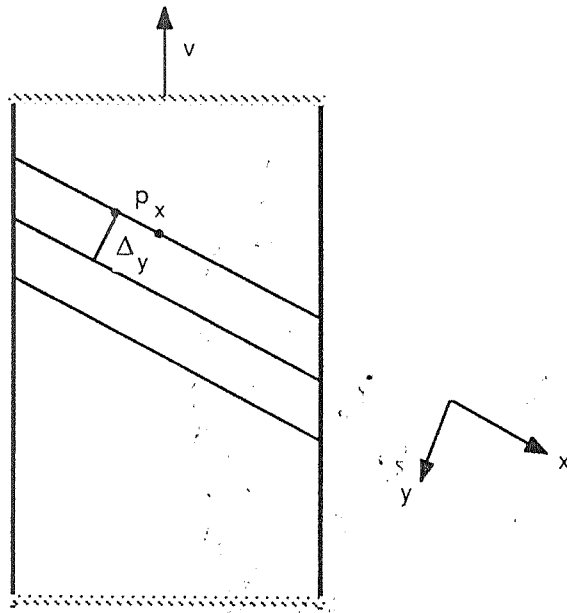


Fig. 1a

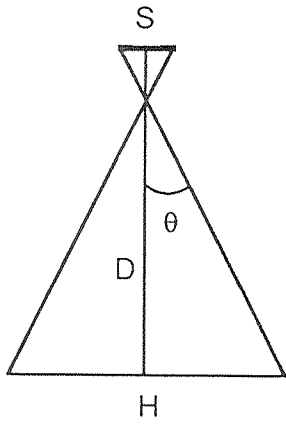


Fig. 1b: un sensore di N elementi

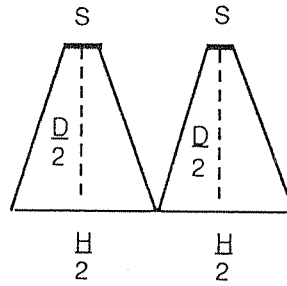


Fig. 1c: due sensori di $N/2$ elementi

La frequenza f di orologio del trasduttore è data da:

$$f = \frac{N}{T} \quad (3)$$

Sostituendo in 3) i valori di v e Δy si ottiene:

$$f = \frac{v \cdot H}{p_x \cdot \Delta y} \quad (4)$$

Inserendo nella equazione 4) i valori

$$v = 1\text{m/sec}$$

$$H = 1.55\text{m}$$

$$p = 0.3\text{mm}$$

$\Delta y = 0,3\text{mm}$ (ipotizzato in 4.2) si ha:

$$f \cong 17 \text{ MHz} \quad (5)$$

Imponendo che il passo di campionamento sia costante nelle due direzioni ortogonali x,y cioè che sia $\Delta y = p_x$, la frequenza di campionamento del dispositivo risulta proporzionale alla velocità di trascinamento v , e all'altezza H del tessuto, e inversamente proporzionale al quadrato del passo di campionamento.

All'aumentare della frequenza di campionamento del trasduttore diminuisce l'esposizione di esso (che è proporzionale al tempo di lettura) e si richiedono sorgenti luminose di potenza più elevata; è inoltre necessario usare un convertitore analogico digitale con frequenza di campionamento più elevata. Può essere allora conveniente utilizzare più trasduttori fra loro allineati, ciascuno dei quali inquadra una striscia del tessuto con larghezza $S < H$: ad esempio se $S = \frac{1}{2} H$ la frequenza di orologio della coppia di trasduttori necessari è eguale alla metà della frequenza di orologio del trasduttore usato per inquadrare l'intera altezza H .

Fra i sensori di riga disponibili in commercio si possono usare quelli a 4096 elementi. In questo caso inquadrando con un'unico sensore l'intera stoffa si ha:

$$p_x = \frac{H}{N} = \frac{1.550}{4096} \text{ mm} = 0.38 \text{ mm} \quad (6)$$

$$f = \frac{1.55 \text{ m}}{(0,38 \text{ mm})^2} \cong 10,7 \text{ MHz}$$

(7)

Se il tipo di tessuto richiede una maggiore risoluzione spaziale si può usare un sensore a 8192 elementi: la frequenza di campionamento diventa allora circa 43 MHz; in alternativa si possono usare due sensori di 4096 elementi mantenendo inalterate sia la frequenza di campionamento che la potenza della sorgente luminosa.

A3 - Componenti ottici

L'obiettivo per la ripresa dell'immagine deve avere: una notevole apertura numerica per non richiedere sorgenti luminose eccessivamente potenti; una piccola distorsione di vignettatura determinata dalle massime aperture della montatura delle lenti; un potere risolutivo abbastanza elevato.

L'ingrandimento dell'obiettivo è determinato dal rapporto tra l'altezza H del tessuto e la lunghezza del trasduttore optoelettronico: ad esempio, con un sensore di 4096 celle di 15 μm , la lunghezza complessiva è di 61.44 mm e l'ingrandimento necessario per inquadrare un campo di 155 cm diventa $M = 25.22$.

La focale dell'obiettivo va scelta anche in funzione della distanza di lavoro e della vignettatura ritenuta accettabile: al diminuire della lunghezza focale, diminuisce la distanza di lavoro e quindi aumenta il flusso di energia raccolto dall'obiettivo ma contemporaneamente aumenta la distorsione fotometrica dipendente dall'angolo di vista.

Infatti detto θ l'angolo determinato dalla distanza D e la semialtezza $\frac{H}{2}$ del tessuto inquadrato, l'intensità del flusso luminoso sul piano immagine varia in maniera proporzionale al $\cos^4 \theta$; definita con t la variazione percentuale accettabile rispetto al massimo di intensità ottenuta per $\theta=0$, si può determinare il valore della distanza D per cui l'intensità del flusso luminoso sul piano immagine è compresa, al variare di θ , fra 1 e 1-t; avendo normalizzato il valore della intensità sul massimo, si ha:

$$D \geq \frac{H}{2 \operatorname{tg} (\cos^{-1}(1-t)^{\frac{1}{4}})}$$

Ad esempio per una variazione massima del 10% si ha $1-t = 0.9$ e $D \geq H \cdot 2,14$; inquadrando un campo di 1.55 m la distanza dell'obiettivo dal piano del tessuto deve essere quindi di 3.31 m e ciò comporta la necessità di impiegare una sorgente luminosa di grande potenza per ottenere un segnale accettabile all'uscita del trasduttore optoelettronico.

La distanza di lavoro può essere diminuita a valori più ragionevoli impiegando più trasduttori e riducendo quindi il campo di vista di ciascuno di essi. Con due sensori l'altezza H si riduce al valore 0.775 m e la distanza di lavoro diventa $D = 1.65$.

Per ridurre ulteriormente la distanza e aumentare così la resa fotometrica del trasduttore, si devono impiegare un numero ancora maggiore di sensori o si deve accettare una maggiore distorsione fotometrica del tipo $\cos^4 \theta$. Nel primo caso si aumenta il costo complessivo del dispositivo e aumentano i problemi di allineamento dei sensori; nel secondo caso si deve considerare anche l'uniformità di illuminamento effettivamente ottenuta. Infatti la distorsione di vignettatura si somma alle variazioni di flusso luminoso causate dal sistema di illuminamento e quindi le variazioni di flusso sul piano immagine possono risultare già in partenza così elevate da limitare i valori accettabili di t .

La lunghezza focale dell'obiettivo nel caso di impiego di due trasduttori dipende dall'ingrandimento e dalla distanza di lavoro. In questo caso si possono impiegare traduttori di 2048 elementi di $15 \mu\text{m}$ e l'ingrandimento vale ancora $M=25.22$; l'obiettivo richiesto, alla distanza di 1.65 m ha una focale di 65 mm.

I risultati ottenuti dipendono dalla scelta della frequenza di campionamento dell'immagine. Se, come accennato nel capitolo 4.2, la frequenza di campionamento necessaria può risultare, in seguito ad una sperimentazione su campioni ridotti, inferiore al valore di 3 campioni al millimetro che è stato preso in precedenza come riferimento, si possono impiegare sensori con un numero di celle

inferiore a quelli citati. In questo caso sono necessarie frequenze di orologio più basse e, a parità di velocità di scorrimento del tessuto, si ottiene di conseguenza una maggiore esposizione del sensore, il che comporta o la possibilità di impiegare sorgenti luminose meno potenti, e quindi più facilmente controllabili, oppure un migliore rapporto segnale/rumore all'uscita del trasduttore; comunque si otterrà una notevole riduzione dei dati di ingresso con conseguente semplificazione dei processi di analisi e delle strutture elaborative.

La risoluzione in linee/mm (lpm) dell'obiettivo deve essere migliore, o almeno eguale, a quella del trasduttore per non degradare eccessivamente la risposta complessiva: poichè la funzione di trasferimento di modulazione (MTF) di un generico trasduttore con celle di 15 μm scende a circa il 60% del valore massimale alla frequenza spaziale di 33 lpm, è necessario che la risoluzione dell'obiettivo su tutto il campo sia maggiore di 33 lpm, tipicamente 50 lpm. Poichè l'oggetto ripreso dall'obiettivo è piano, ed è richiesta una minima profondità di campo, può risultare conseguentemente conveniente l'impiego di obiettivi con prestazioni ottimizzate per questa applicazione.

Nella tabella 2 è riportato un riepilogo di alcuni dati caratteristici del dispositivo di acquisizione relativi all'impiego di uno o più sensori con elementi fotosensibili di $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$.

Sensore		Distanza di lavoro (m)		Frequenza di orologio (MHz)	Passo di campionamento (mm)
tipo	N.celle	t=10%	t=20%		
1 sensore	8192	3.33	2.25	47.4	0.38
1 sensore	4096	3.33	2.25	10.7	0.38
2 sensori	2048	1.65	1.12	5.36	0.76
1 sensore	2048	3.33	2.25	2.71	0.76
2 sensori	1024	1.65	1.12	1.35	0.2

Tab. 2

A4 - Filtri cromatici

Come è stato accennato nel cap. 4.1, pur essendo il tessuto denim fondamentalmente di tipo monocromatico, può risultare talvolta conveniente utilizzare dei filtri cromatici al fine di variare opportunamente il contrasto fra il fondo del tessuto (blu) e i difetti (bianchi). Nell'acquisizione dei vari campioni sono stati provati diversi filtri cromatici al fine di aumentare il contrasto fra le componenti del segnale ad alta frequenza, che caratterizzano in genere i difetti di maglia periodici ed aperiodici, oppure per filtrare queste componenti in modo da mettere in evidenza le variazioni lente che caratterizzano in particolare i difetti di area costituiti da variazioni più o meno contenute del colore di fondo.

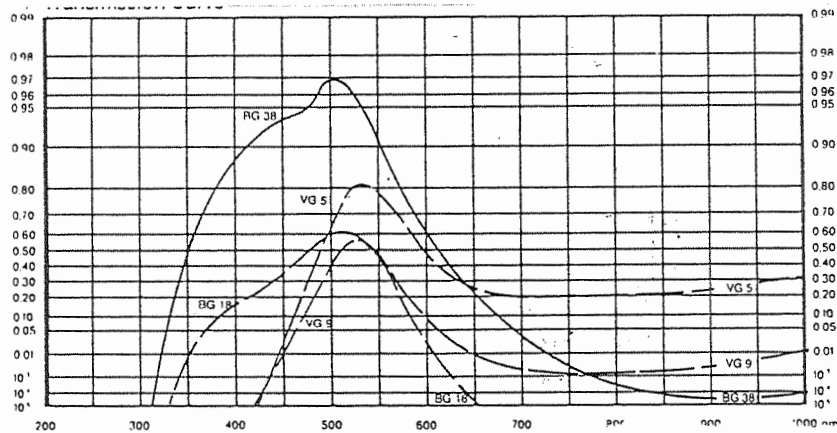
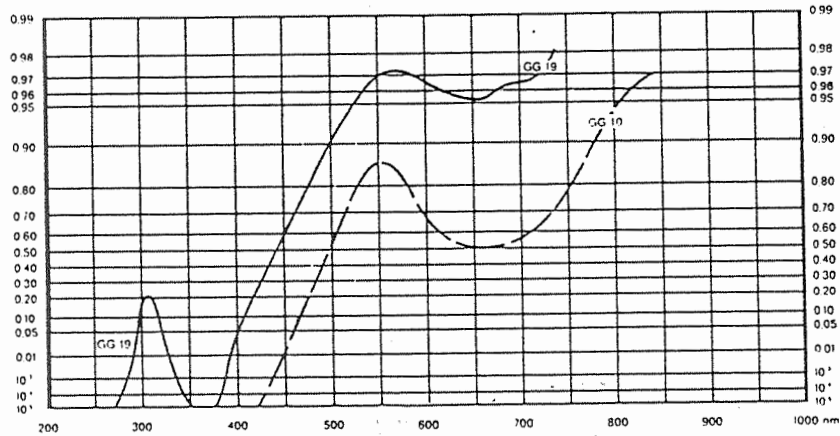
Per la sperimentazione è stata impiegata una estesa serie di filtri Spindler & Hoyer le cui caratteristiche di trasmissione sono riprodotte nei grafici di seguito riportati. Le misure di attenuazione e contrasto sono state eseguite separatamente sulla componente chiara e sulla componente scura dei campioni, il contrasto è stato definito come rapporto fra l'ampiezza del segnale di uscita relativo alla componente chiara e l'ampiezza del segnale relativo a quella scura; in assenza di filtro il contrasto risulta essere $C \cong 10$.

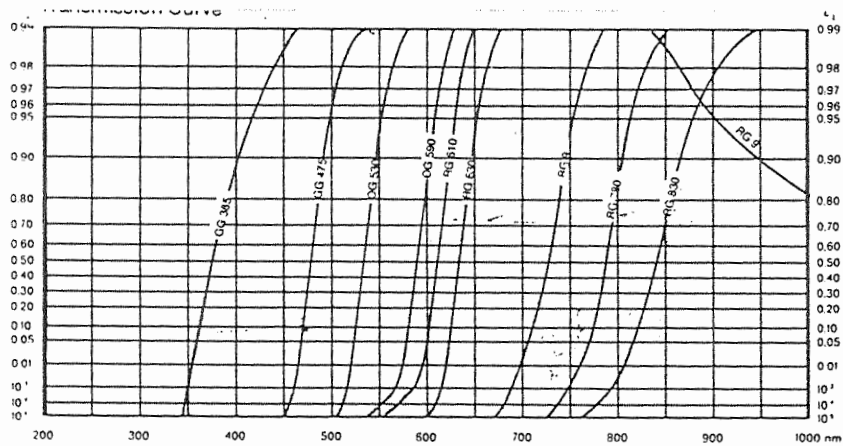
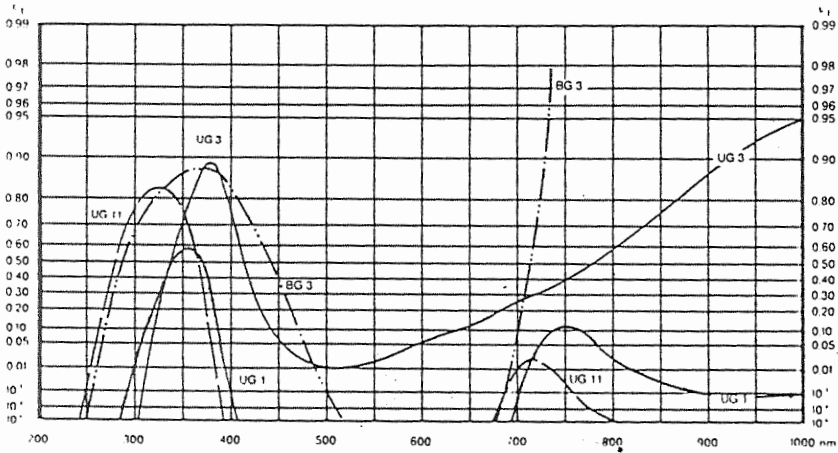
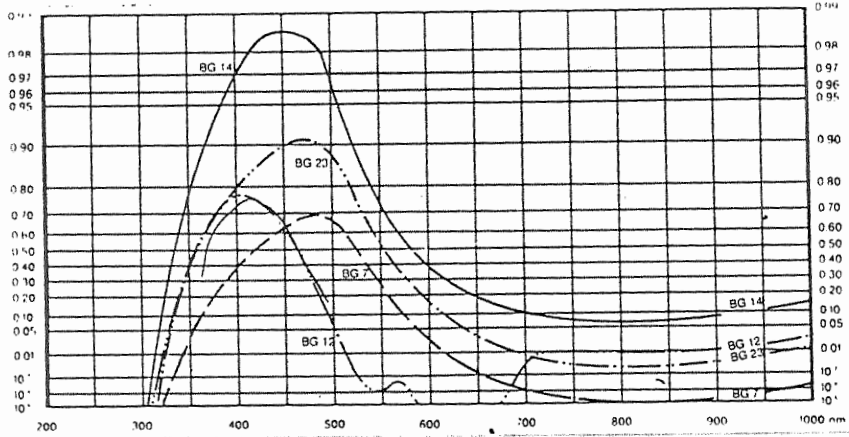
Nella tabella 3 sono riportati i risultati relativi alle prove eseguite sul campione 11 riportato in tabella 1; per gli altri campioni si sono ottenuti risultati con buona approssimazione confrontabili. Come si può notare dalla tabella, i filtri 1, 2, 3 e 4 consentono un aumento del contrasto mentre i restanti filtri producono una riduzione. Nella eventuale scelta del filtro bisogna prestare attenzione alla attenuazione introdotta; infatti riducendo il flusso luminoso incidente sul sensore se ne riduce l'esposizione, per cui sarà necessario aumentare la potenza della sorgente luminosa per mantenere inalterate le condizioni ottenibili di lavoro in precedenza prospettate.

Per il campione 11, il filtro 2 sembra essere il più conveniente perché consente il maggior contrasto con la minor attenuazione delle componenti chiare che, in questo caso, caratterizzano anche il difetto.

Il filtro n°15 consente di ottenere il minor contrasto con la minima attenuazione delle componenti scure; questo tipo di filtro può essere

efficacemente impiegato per il rilevamento dei difetti costituiti da variazioni della tonalità del fondo (strade, macchie d'olio ecc.). Come si può intuire tipologie diverse dei difetti possono richiedere filtri diversi complicando conseguentemente la struttura del dispositivo di acquisizione; i filtri saranno invece indispensabili per l'analisi di tessuti multicromatici.





Tipo di filtro	Attenuazione zona scura %	Attenuazione zona chiara %	Contrasto medio <u>zona chiara</u> <u>zona scura</u>	Massima trasmissione λ nm
1) BG7	90	89	13.3	450
2) BG14	67	40	1.8	450
3) BG23	80	77	11.6	450
4) BG38	67	60	12	480
5) VG5	50	60	8	530
6) GG10	34	50	7.5	570
7) GG475	17	17	10	550
8) OG530	7	34	7.1	600
9) OG590	24	50	6.5	650
10) RG610	17	60	4.8	650
11) RG9	60	94	1.6	800
12) VG3	34	84	2.5	380
13) BG3	50	90	1.8	375
14) RG830	50	94	1.3	950
15) RG630	17	96	0.8	670
16) BG12	94	97	5	400

Tab. 3

B - *Componente software per l'ottimizzazione dei dati di ingresso*

Dopo l'ottimizzazione della componente hardware del dispositivo di ingresso, gli artefatti residui, valutabili attorno al 20-30%, possono essere ulteriormente ridotti mediante opportune elaborazioni numeriche dei dati di ingresso impiegando specifici operatori puntuali, locali o globali che possano essere eseguiti durante il tempo reale di acquisizione.

B1 - *Operatori puntuali*

La risposta fotometrica di ogni cella del sensore può differire di un certo valore percentuale ($\pm 10\%$) dalla risposta media; per rendere sostanzialmente eguali le risposte delle singole celle, si può determinare il segnale prodotto dal sensore esplorando una superficie di riferimento (ad esempio un riflettore diffondente in maniera uniforme) e dividere il dato ricavato da ciascuna cella per il corrispondente valore di riferimento. Il segnale di riferimento serve anche per ridurre le modulazioni residue di tipo fotometrico causate dalla disuniformità del flusso emesso dalla sorgente luminosa e dalla vignettatura dell'obiettivo.

L'operazione di correzione fotometrica può essere fatta velocemente usando delle tavole di correzione (LUT) di ingresso con dimensioni determinate dalla risoluzione del sensore optoelettronico.

La LUT di ingresso può servire anche a modificare la forma della risposta caratteristica del trasduttore; infatti, alcune prove preliminari hanno mostrato che certi tipi di difetti sono più osservabili quando il trasduttore ha una curva caratteristica di tipo non lineare, più simile quindi alla risposta dell'occhio.

B2 - *Operatori locali*

Nell'immagine acquisita, alcune componenti sono inessenziali per l'identificazione dei difetti, ad esempio sul segnale di scansione di una riga, sono presenti oscillazioni a bassa frequenza e dei picchi periodici dipendenti dall'aspetto caratteristico del tessuto (macolature normali e trama regolare). Queste componenti impediscono, o quanto meno riducono, la determinazione dei difetti associati a picchi più o meno

isolati del segnale; questi ultimi possono essere messi più in evidenza, e quindi più separabili, mediante operazioni di filtraggio passa-alto o di derivazione sul segnale.

Questa operazione è in genera fatta in modo bidimensionale operando su sottomatrici costituite da gruppi di righe adiacenti. Tuttavia in talune applicazioni è accettabile un filtraggio monodimensionale che risulta ovviamente essere molto più veloce; l'applicabilità dipende dall'origine del rumore e, nel caso specifico, dalla tipologia del difetto da rivelare nonchè dai vincoli di affidabilità e precisione imposti.

Su certi tipi di tessuto la modulazione del segnale, non imputabile ai difetti, può essere ricavata, per sottrarla al segnale da esaminare, usando particolari filtri cromatici molto selettivi durante il processo di acquisizione. In questo caso si può pensare di inviare una parte del flusso luminoso riflesso dal tessuto sul sensore di riga di misura e una parte, attraverso il filtro cromatico, su un identico sensore di riferimento.

La correzione del dato di ingresso può essere eseguita per via analogica, se la velocità di scansione lo consente, o per via digitale usando la coppia di vettori ricavati per ciascuna riga di scansione.

Questo metodo, che è stato sperimentato su alcuni tessuti, consente, in linea di principio, sia di operare in tempo reale sia di correggere qualsiasi tipo di rumore a bassa frequenza (non uniformità di illuminamento, vignettatura del sistema ottico, maculazioni caratteristiche del tessuto, fluttuazioni luminose). E' evidente però che se possono essere presenti difetti caratterizzabili da segnali a bassa frequenza, questi verrebbero trattati come variazioni spurie e quindi corrette e pertanto non identificate come difetto.

B3 - Operatori globali

Le operazioni viste fino ad ora hanno fondamentalmente il compito di restaurare la qualità dei dati e non intervengono nella loro organizzazione; in certi casi può risultare invece conveniente, purchè attentamente controllata, eseguire una modifica della distribuzione fotometrica al fine di mettere in risalto, e successivamente separare, le componenti del segnale relativo ai difetti. Queste operazioni in

generale vengono eseguite su sottomatrici costituite da una o più righe prendendo in esame tutto il contenuto informativo in esse contenuto e modificandone la distribuzione secondo leggi predefinite (equalizzazioni, modifica di istogrammi, cambiamenti di scala). In particolare queste procedure elaborative, che possono essere eseguite in tempi alquanto contenuti, si sono dimostrate utili in quei casi in cui i difetti sono caratterizzati da un basso contrasto rispetto alle zone circostanti, o quando la dinamica di misura risulta essere complessivamente ed eccessivamente ridotta.

Appartengono infine a questo tipo di elaborazioni quelle di tipo statistico mediante le quali si è dimostrato possibile rivelare in modo relativamente affidabile un'ampia gamma di difetti, indipendentemente dalla loro morfologia, dalla loro direzione di propagazione e dal tipo di distribuzione.

Non potendo, per motivi di velocità, impiegare algoritmi di riconoscimento di forme, che forse sono gli unici in grado di fornire informazioni complete per una affidabile classificazione dei difetti, è da ritenersi di interesse che l'esame della distribuzione statistica dei dati, eventualmente per sotto aree di interesse, e l'imposizione di parametri e pesi ricavati sperimentalmente sia il metodo da seguirsi nella generalità dei casi. In questa direzione si stanno attualmente eseguendo sperimentazioni di algoritmi e procedure appositamente studiati e sviluppati che verranno illustrati in una successiva relazione attualmente in fase di compilazione.

Conclusioni

Dai primi studi e dalle sperimentazioni eseguite su campioni di tessuto denim, risulta un ragionevole livello di fattibilità generale che però è pesantemente condizionato ad un attento esame della tipologia dei difetti rivedibili alle condizioni imposte attualmente dal processo produttivo; al fine di ottimizzare l'affidabilità, l'efficienza e il costo del controllo, risulta opportuno definire i margini di indeterminazione del riconoscimento ritenuti vincolanti.

Può risultare necessario valutare l'importanza, a livello produttivo, della rilevanza di certi difetti che sembrano presentare notevoli problemi per un loro riconoscimento automatico ed, eventualmente, limitare il controllo automatico ai difetti più ricorrenti e importanti ai fini della qualità del tessuto.

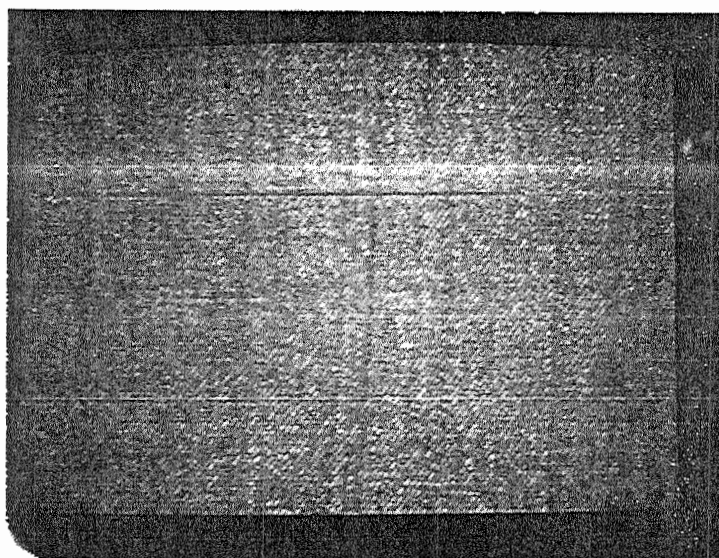
Vista la grande varietà di difetti, la loro diversa origine e la diversità di trattamento che il loro riconoscimento richiede, è prevedibile che la struttura complessiva del sistema risulti anche alquanto complessa.

Da questo punto di vista non sembra conveniente prevedere un'unica struttura integrata hardware e software in grado di affrontare complessivamente, e necessariamente in parallelo, l'intero processo di controllo; sembra più opportuno e affidabile prevedere più stazioni specializzate per categorie di difetti omogenei per alcune caratteristiche fondamentali, che potranno operare, in questo caso, sia in parallelo sia in modo sequenziale.

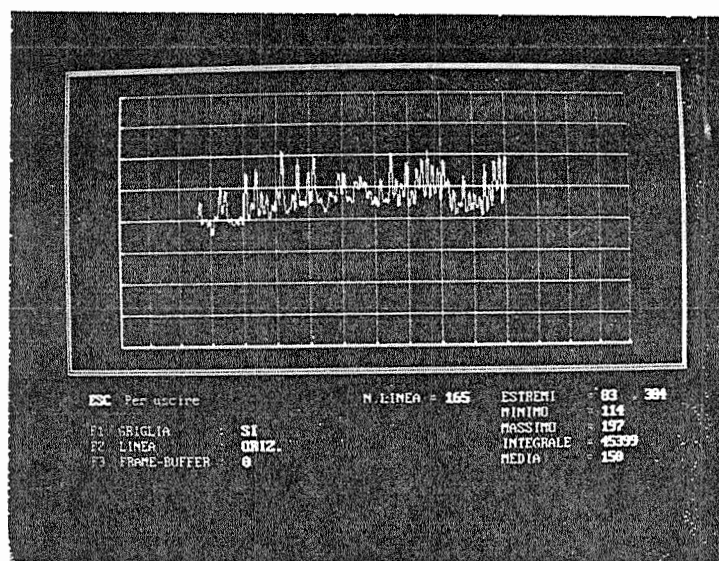
Questo tipo di orientamento risulterà particolarmente utile ed efficiente per il controllo di qualità di tessuti colorati; infatti in questo tipo di applicazione dovranno essere eseguite metodologie di acquisizione particolari e utilizzate procedure elaborative talvolta più semplici ma molto orientate verso la specifica indagine.

Appendice A

Di seguito vengono riportati i fotogrammi relativi alle prove di acquisizione eseguite per ricavare informazioni utili allo studio della distribuzione delle caratteristiche radiometriche dei campioni di tessuti riportati nella tabella 1 (fig.1-16). Le immagini sono state acquisite impiegando una sorgente di luce estesa con una uniformità di illuminamento compresa entro il 25%, un passo di campionamento di 0.3mm e una dinamica di misura di 256 livelli in modo da correttamente simulare il processo di acquisizione descritto nei capitoli precedenti. I fotogrammi riproducono l'immagine di porzioni dei vari tipi di tessuto esaminati e, per ciascuno, il diagramma della distribuzione radiometrica lungo righe o colonne scelte in corrispondenza del difetto e in una zona vicina. Come si può notare dalle figure, non sempre i difetti, pur visibili ad occhio anche nell'immagine digitale, sono separabili facilmente dal rumore delle zone circostanti caratterizzato da frequenze spaziali ad alta frequenza, dovute alle maglie del tessuto, e a componenti a bassa frequenza dovute fondamentalmente alla disomogeneità dell'illuminamento e della riflettanza del tessuto, alle aberrazioni del sistema ottico di ripresa, alla non uniformità di risposta del sensore. Il rapporto segnale/rumore può, come accennato in precedenza, essere migliorato sia mediante un'accurata progettazione delle varie componenti hardware, sia mediante opportune elaborazioni; purtroppo queste ultime sono limitate a quelle eseguibili in tempi molto brevi, per cui è prevedibile che i margini di discriminazione saranno piuttosto contenuti. Nelle figure 17 e 18 è mostrato, a titolo indicativo, l'effetto di una correzione eseguita nel tempo reale di acquisizione. Si può inoltre osservare che, esclusa qualche eccezione, il verso diritto del tessuto si presta meglio all'indagine numerica a causa del miglior rapporto segnale/rumore anche se visivamente certi difetti sembrano meglio individuabili nel verso rovescio. Certi difetti costituiti da zone estese, e quindi globalmente visibili, ma a basso contrasto rispetto al fondo, presentano notevoli difficoltà di individuazione. Infatti sono caratterizzati da componenti a bassa frequenza molto simili a quelli relativi alle tipiche maculature (non difetti) del tessuto; un esempio di questo difetto è costituito dalle strade, macchie d'olio o variazione continua del pattern.



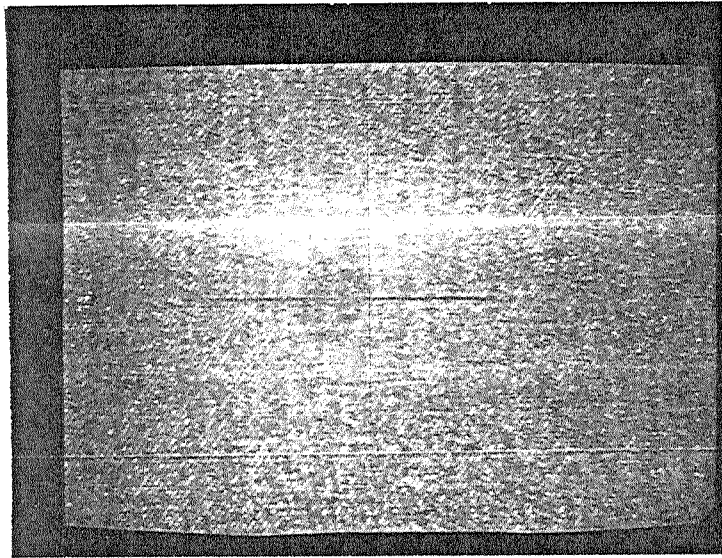
a)



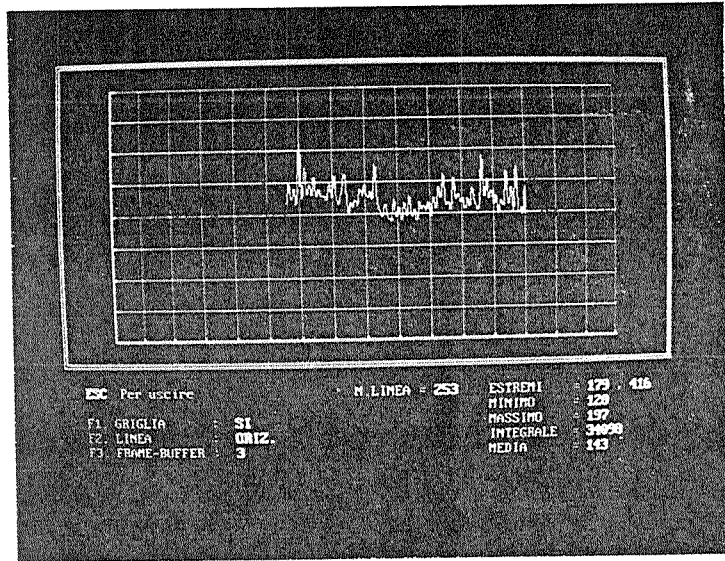
b)

Fig. 1: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 1 nel verso diritto del tessuto con difetto di "trama rotta orizzontale".

In b) è mostrato il grafico delle variazioni dei valori radiometrici lungo la zona del difetto.

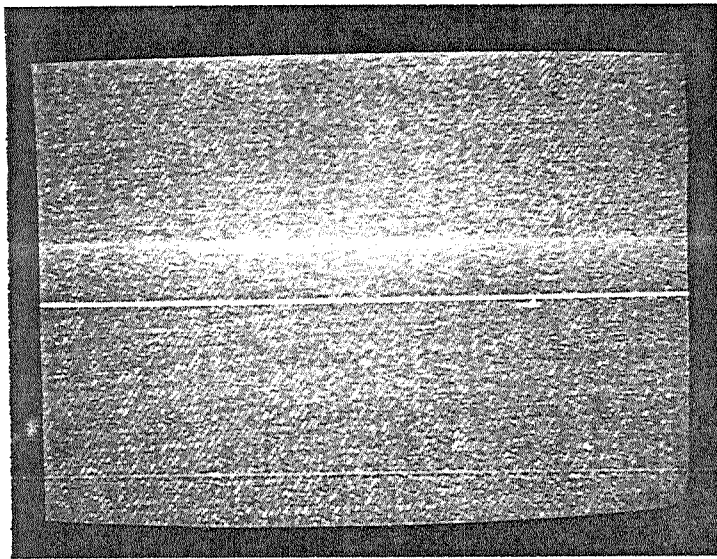


a)

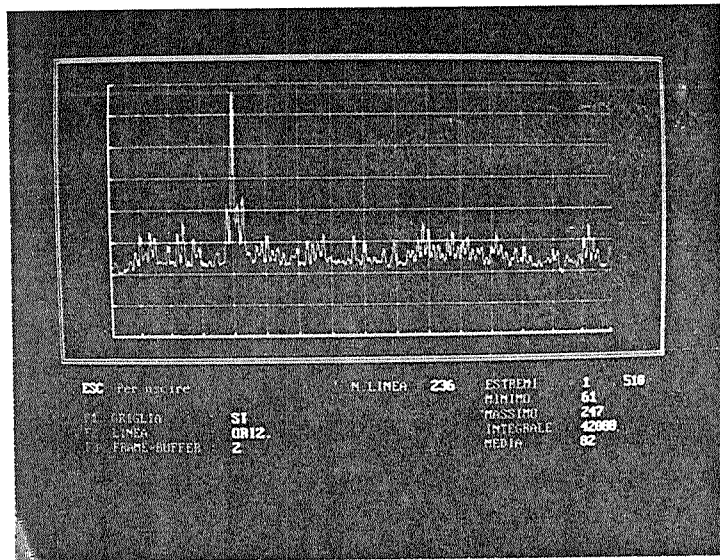


b)

Fig. 2: In a) è mostrata l'immagine digitale di una porzione del campione 4, "macchia d'olio" acquisita nel verso dritto nel quale il difetto appare più evidente. In b) è mostrato il grafico di riga relativo alla zona del difetto. Si può notare il basso contrasto evidente fra la zona corrispondente alla macchia d'olio e il tessuto limitrofo. Le oscillazioni ad alta frequenza sono relative alla maglia del tessuto.

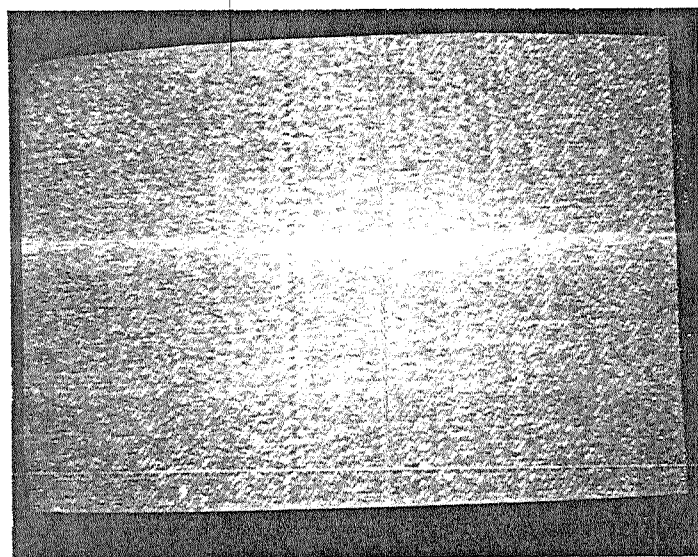


a)

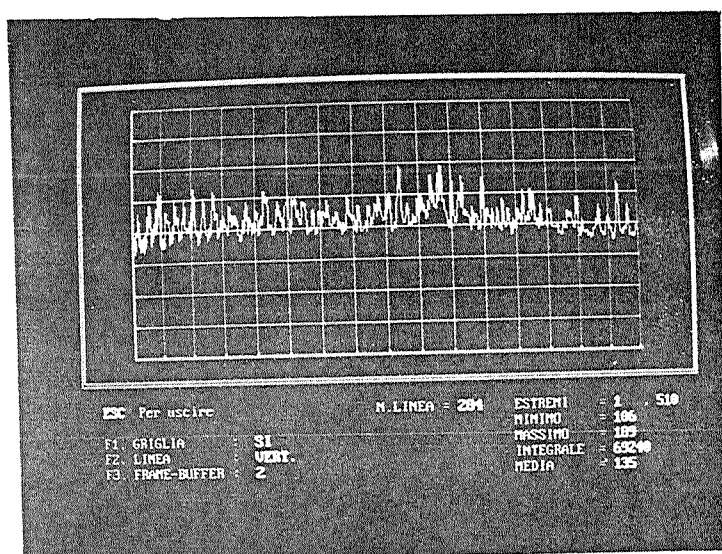


b)

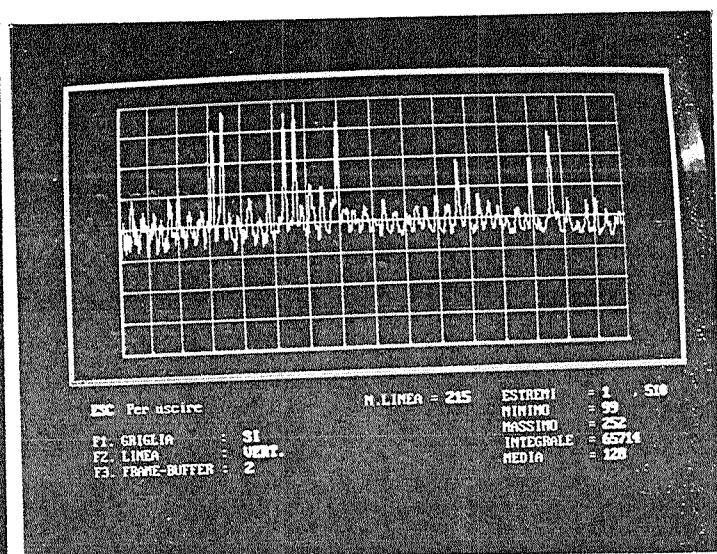
Fig. 3: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 5 con difetto di "filo grosso in trama".
 In b) è mostrato il grafico delle variazioni radiometriche lungo una riga di scansione eseguita sulla zona del difetto che risulta essere ben contrastato e quindi separabile del rumore del fondo.



a)

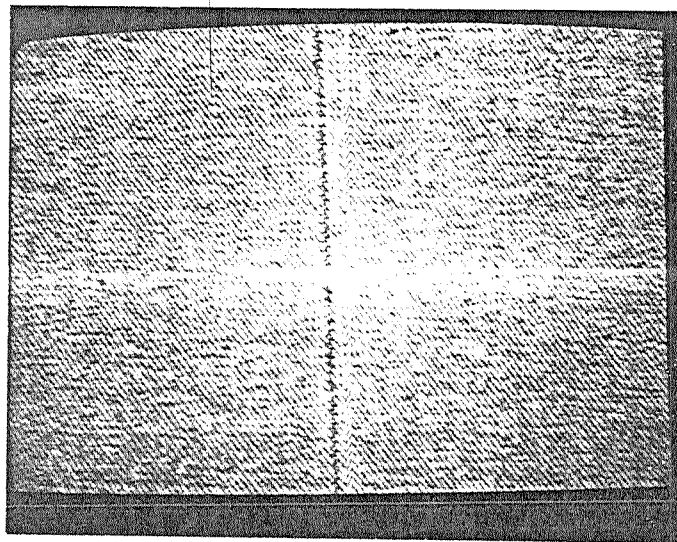


b)

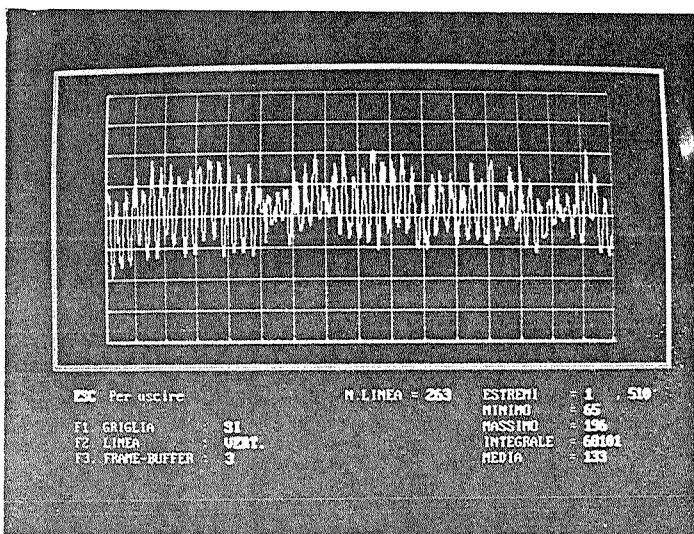


c)

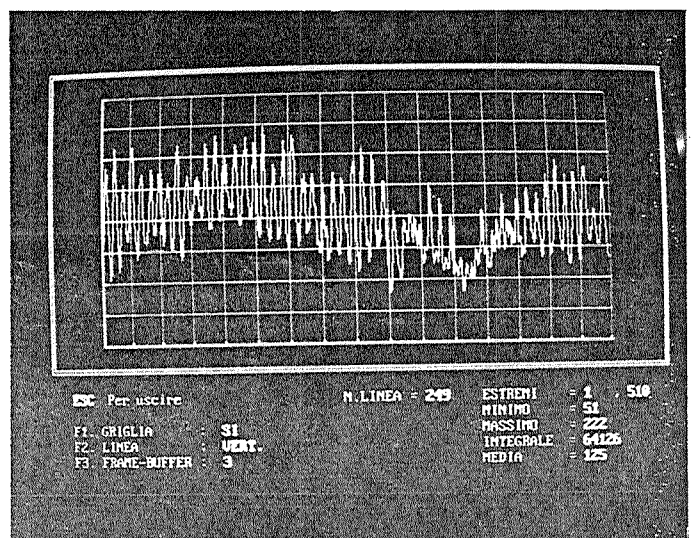
Fig.4: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 6 con difetto di "filo lento in catena", verso diritto di tipo periodico connesso.
 In b) è mostrato il diagramma delle variazioni dei valori radiometrici dei nodi lungo una riga in zona senza difetti.
 In c) è mostrato il diagramma di riga lungo la zona di difetto. Il difetto ha un medio contrasto con la zona circostante ed una modesta separabilità.



a)



b)

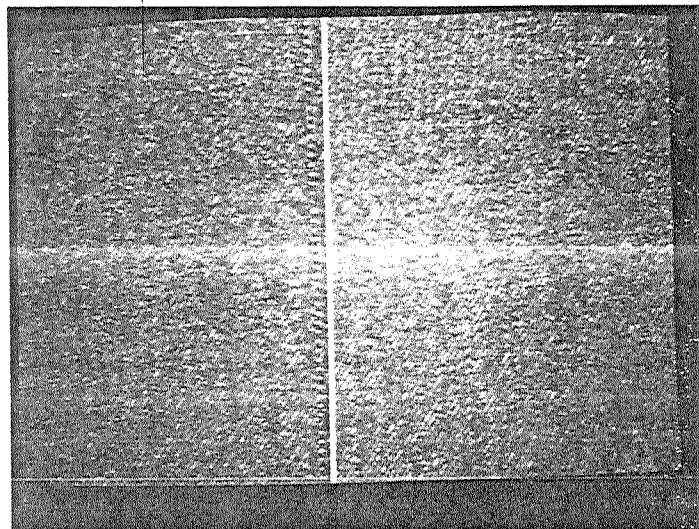


c)

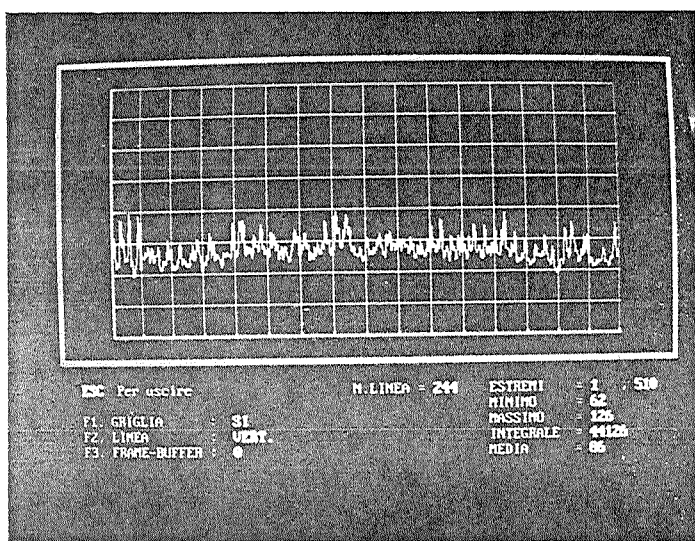
Fig.5: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 6, verso rovescio "filo lento in catena", di tipo periodico connesso.

In b) è mostrato il diagramma delle variazioni radiometriche lungo una colonna esterna al difetto.

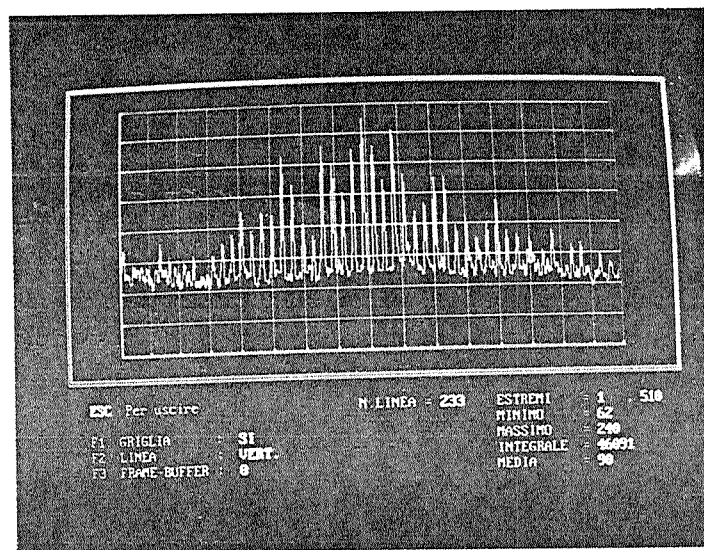
In c) è mostrato il diagramma di riga lungo il difetto relativo alle maglie e agli artefatti di acquisizione. A causa delle modulazioni il segnale relativo al difetto è poco separabile anche se ben individuabile visivamente.



a)

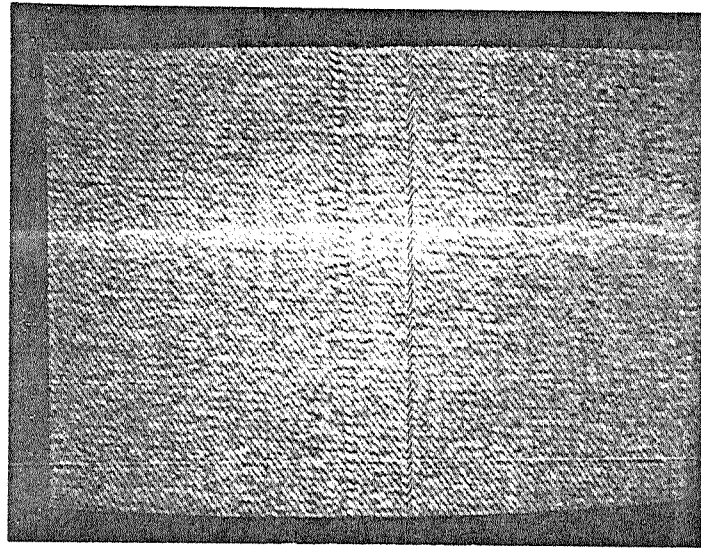


b)

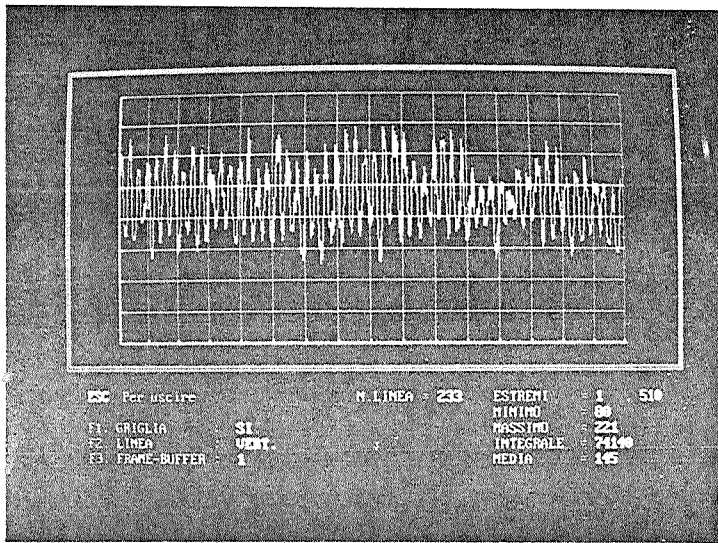


c)

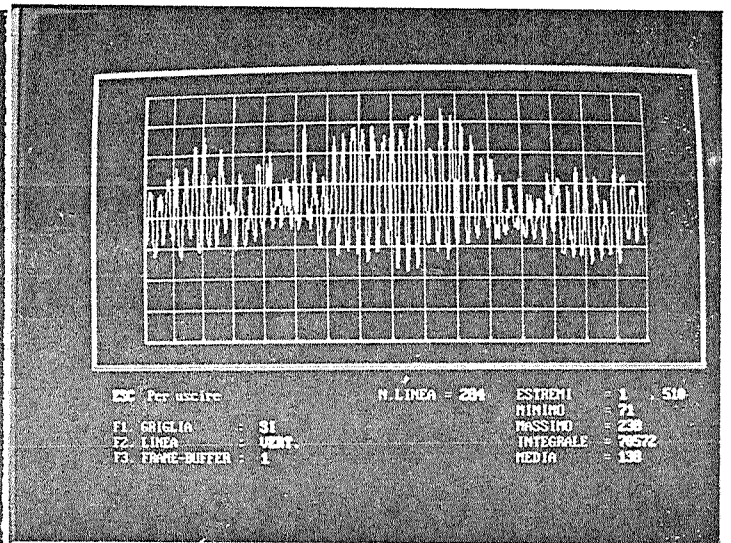
Fig.6: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 8, verso diritto con difetto di "filo doppio in catena", periodico non connesso.
 In b) è mostrato il diagramma di colonna ricavato esternamente al difetto.
 In c) è mostrato il diagramma di colonna nella zona di difetto. Questo tipo di difetto risulta essere ben individuabile.



a)

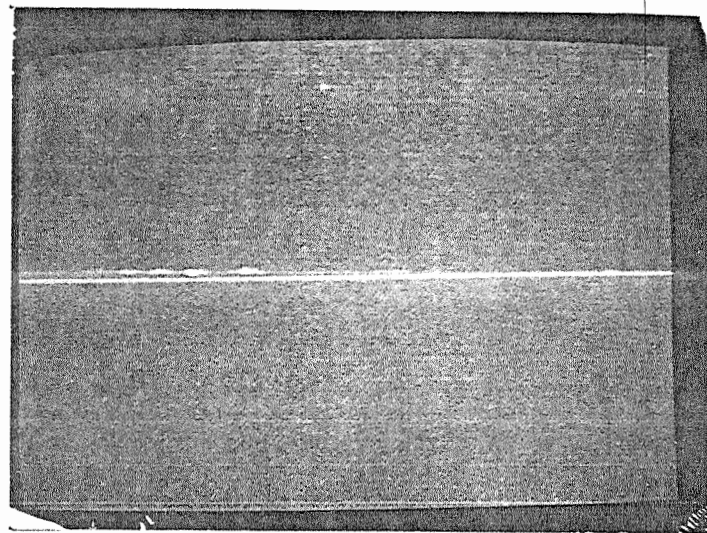


b)

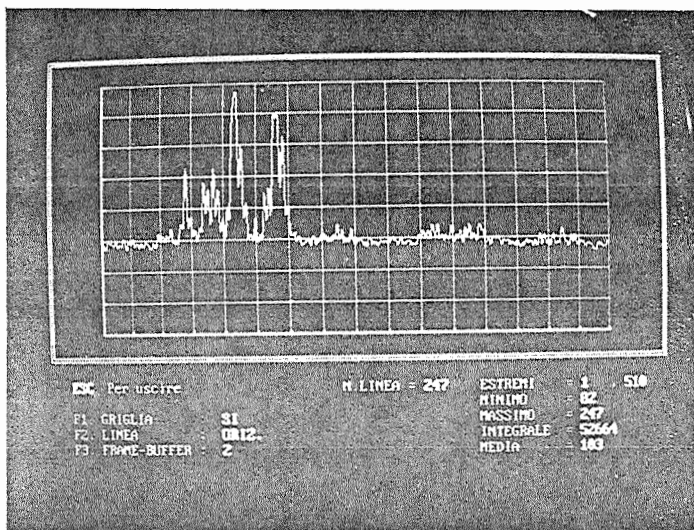


c)

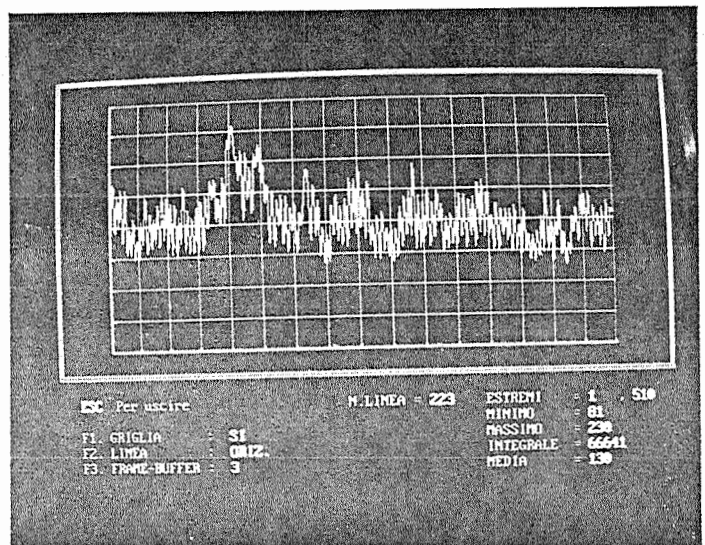
Fig.7 In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione dallo stesso campione 8 riportato in fig.6, ma nel verso rovescio. In b) e in c) sono mostrati i diagrammi di colonna rispettivamente in zona esterna ed interna al difetto. L'artefatto, in questo verso, risulta essere poco identificabile a causa delle variazioni dovute alla trama del tessuto e alle modulazioni a bassa frequenza.



a)



b)

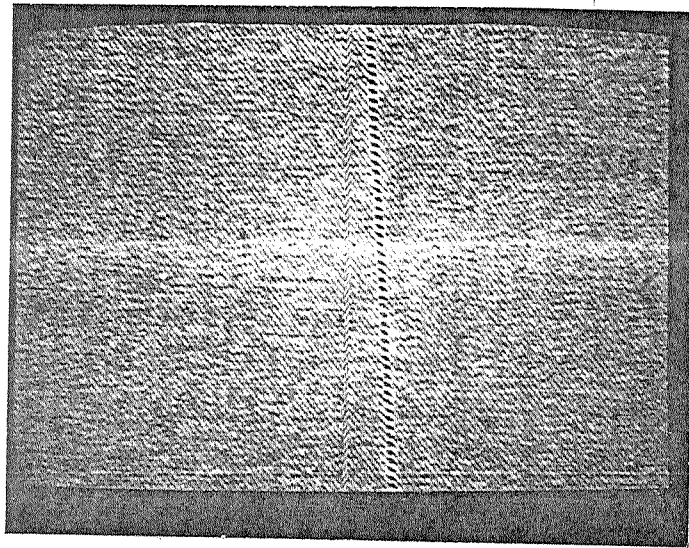


c)

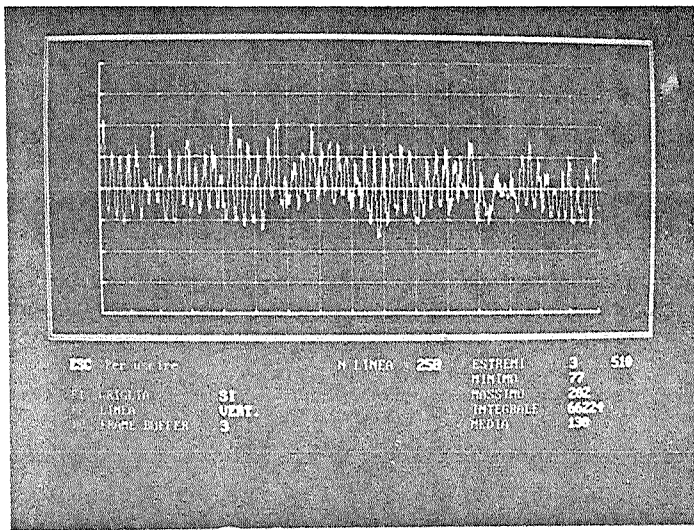
Fig.8: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 9, verso dritto con difetto di "trama lenta", di tipo aperiodico non connesso.

In b) è mostrato il diagramma di riga nella zona del difetto che a causa dell'elevato contrasto e delle piccole dimensioni delle maglia, risulta essere ben separabile dal fondo.

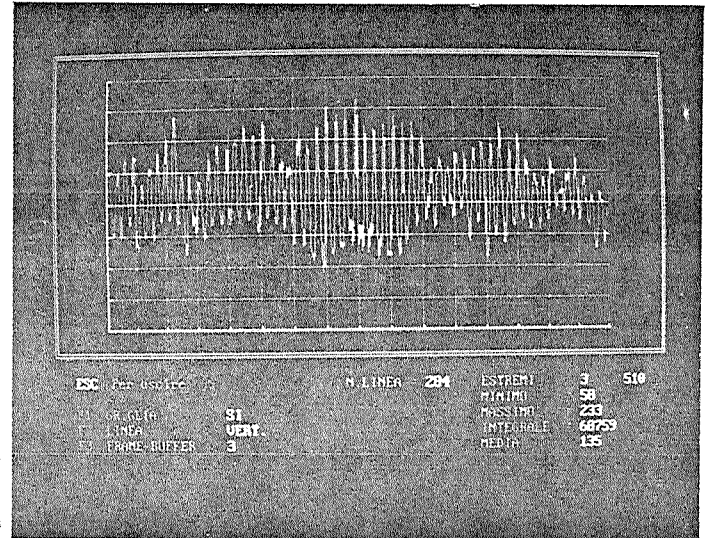
In c) è mostrata la stessa riga di scansione nel verso rovescio: in questo caso la separabilità risulta essere alquanto ridotta.



a)

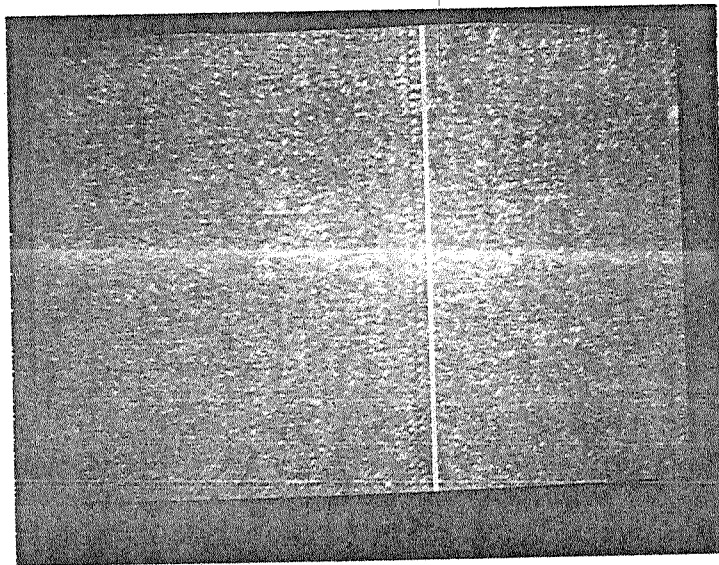


b)

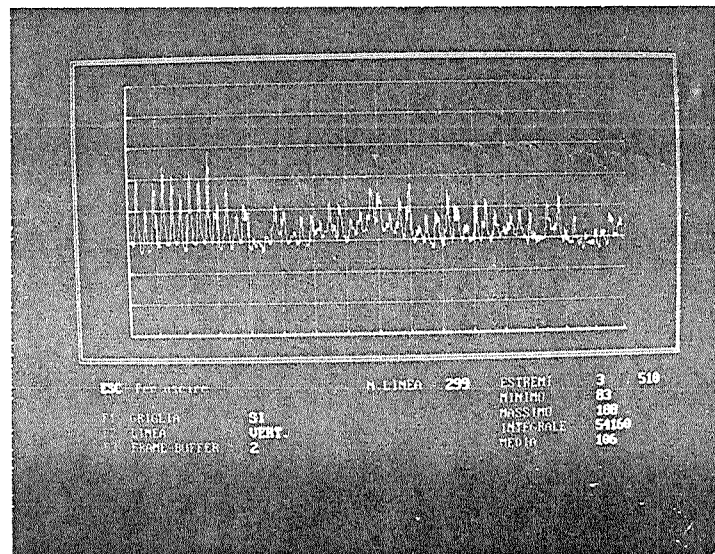


c)

Fig.9: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 10, verso rovescio con difetto di "fallo maglia", del tipo periodico non connesso. In b) e in c) sono mostrati rispettivamente i diagrammi di colonna rilevati fuori e dentro la zona del difetto. L'artefatto è poco rilevabile a causa delle modulazioni ad alta frequenza introdotte dalle maglie e dalle fluttuazioni a bassa frequenza che riducono il contrasto medio.



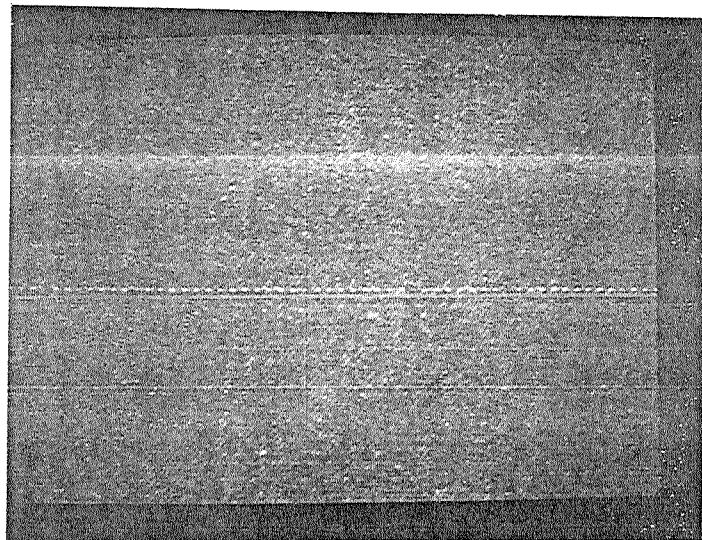
a)



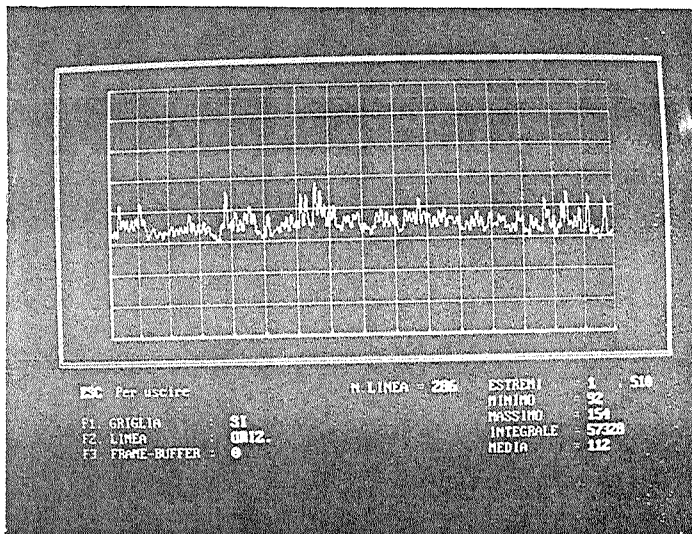
b)

Fig.10: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 10 nel verso diritto con difetto "fallo di maglia" di tipo periodico non connesso.

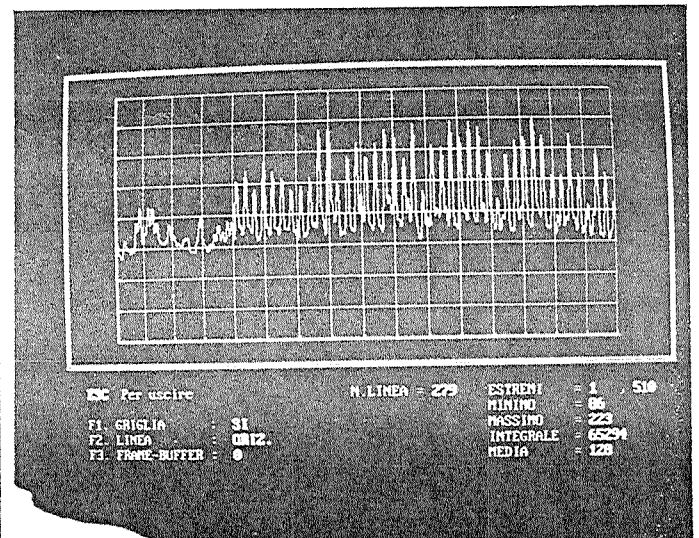
In b) è mostrato il diagramma delle variazioni di riflettanza lungo la colonna nella zona del difetto. L'artefatto, poco individuabile in questo verso anche visivamente, risulta essere poco separabile dal fondo caratterizzato da modulazioni ad alta frequenza.



a)



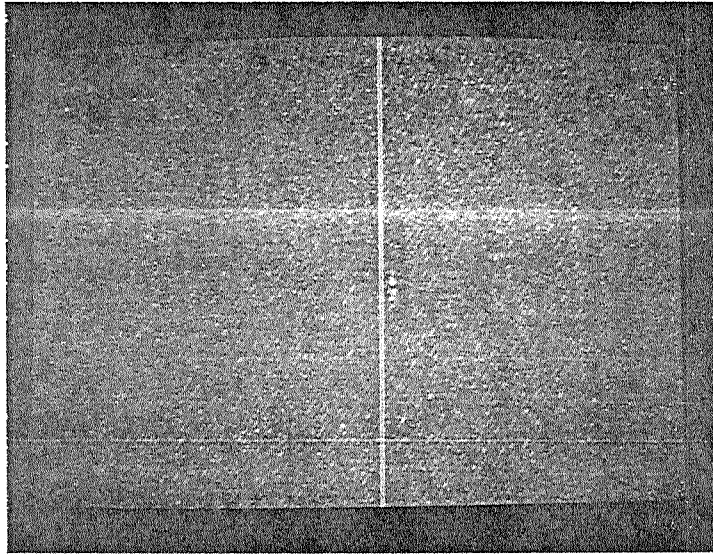
b)



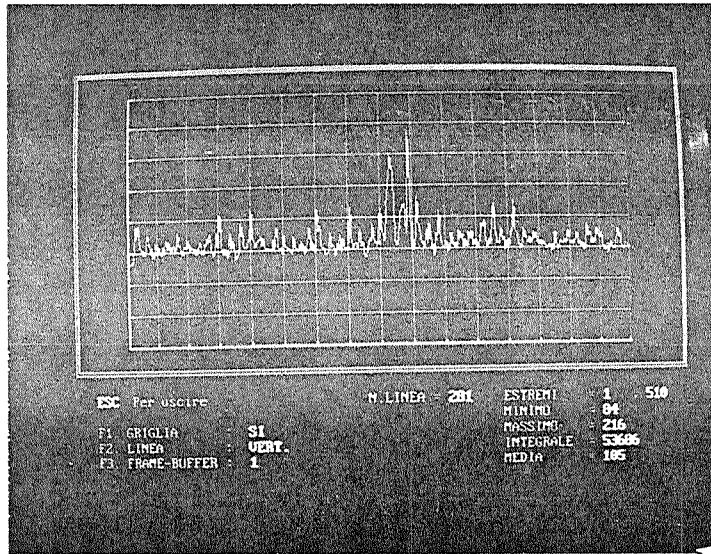
c)

Fig.11: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 11, verso diritto con difetto di "fallo macchina", di tipo periodico non connesso.

In b) e in c) sono mostrati rispettivamente i diagrammi ricavati lungo le righe di scansione fuori e dentro la zona del difetto che risulta essere in genere ben separabile dal fondo.



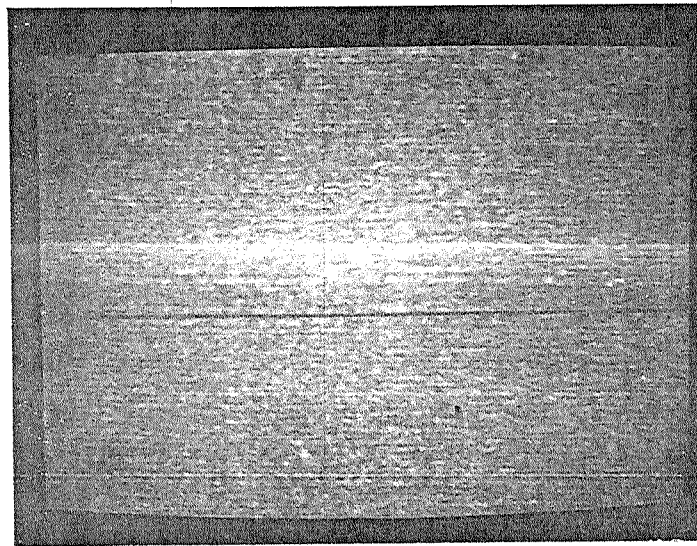
a)



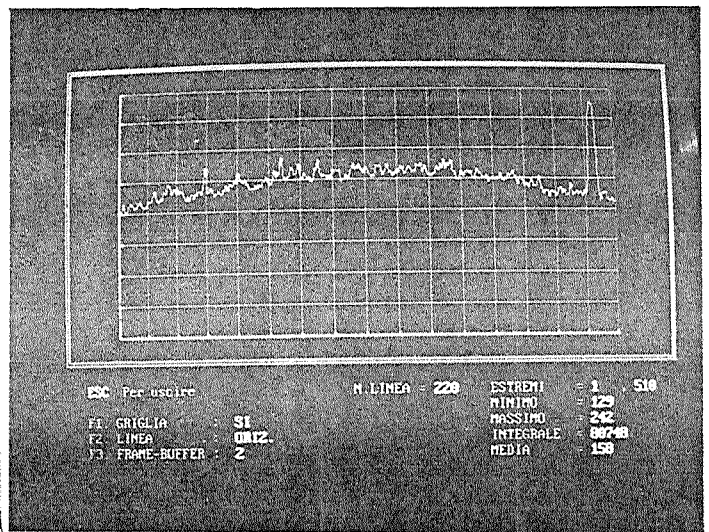
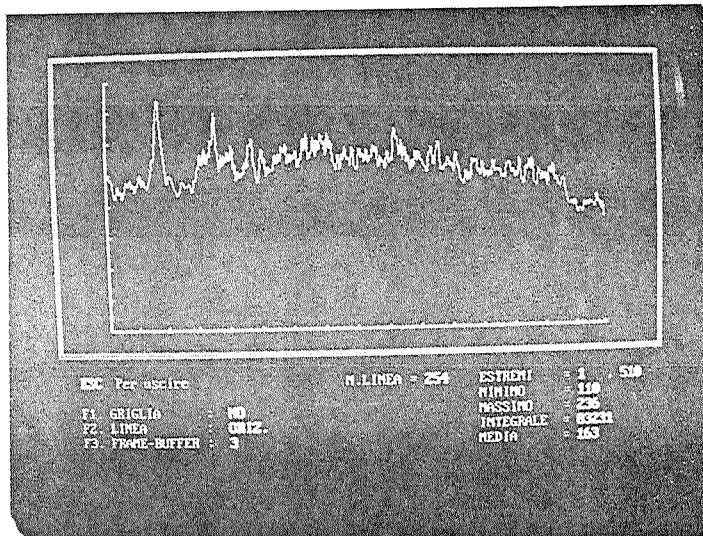
b)

Fig.12: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 13 con difetto di "fili rotti in catena" di tipo aperiodico parzialmente connesso.

In b) è mostrato il diagramma delle variazioni di riflettanza lungo una colonna della zona del difetto il quale risulta essere mediamente rilevabile.



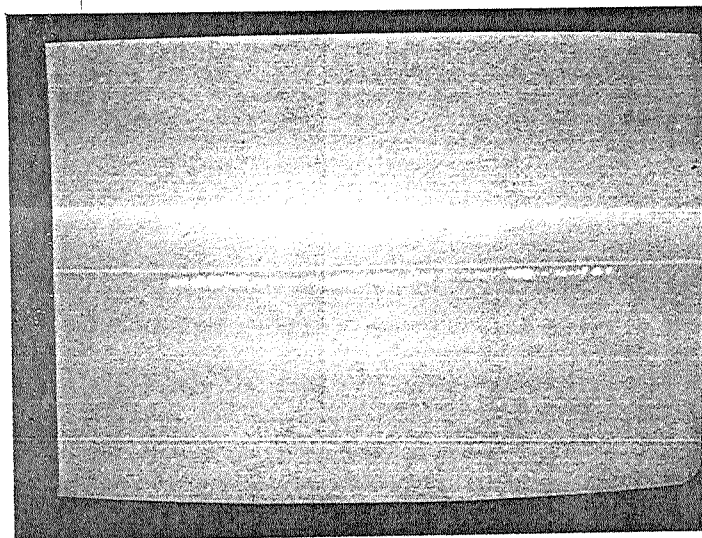
a)



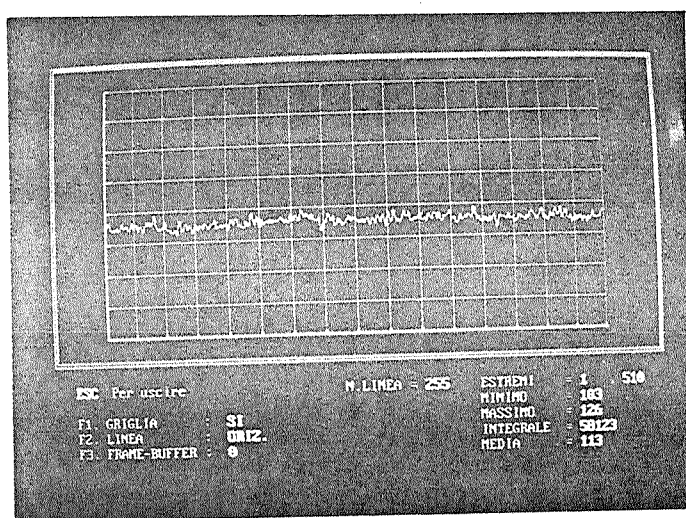
b)

c)

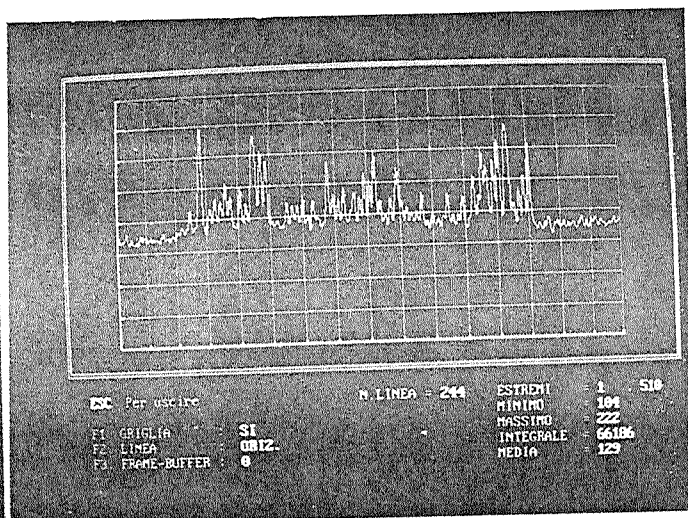
Fig.13: In a) è mostrata l'immagine digitale ricavata da una porzione del campione 14, verso diritto con difetto di "filo doppio in trama", di tipo aperiodico parzialmente connesso. In b) e in c) sono mostrati due diagrammi relativi a zone diverse del difetto. L'artefatto è parzialmente individuabile a causa del basso contrasto e della modulazione a bassa frequenza in genere presente.



a)



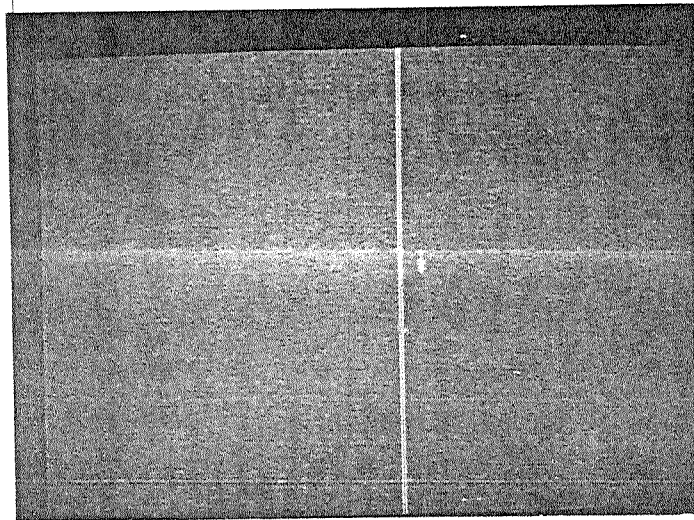
b)



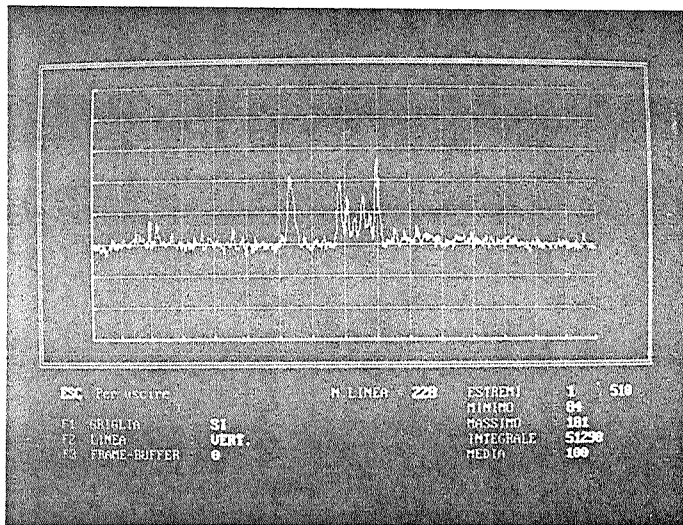
c)

Fig.14: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 15, verso diritto con difetto di "fili volanti", di tipo aperiodico parzialmente connesso.

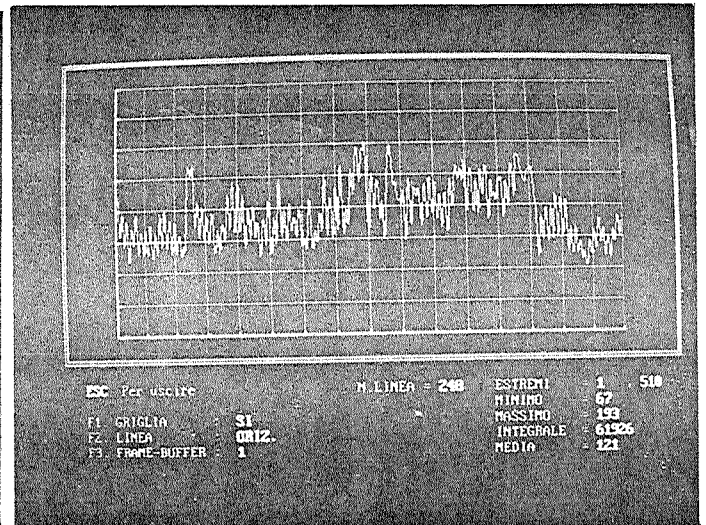
In b) e in c) sono mostrati rispettivamente i diagrammi delle variazioni di riflettanza lungo righe di scansione esterne ed interne al difetto. La buona uniformità di risposta del fondo e il discreto contrasto rendono il difetto in parte individuabile.



a)



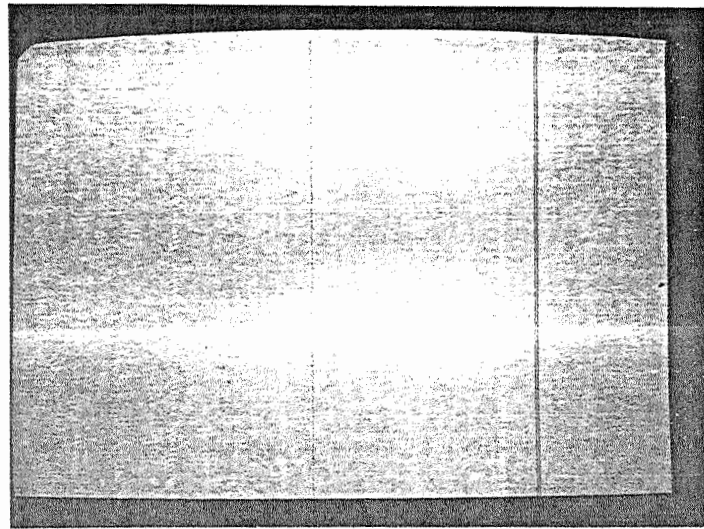
b)



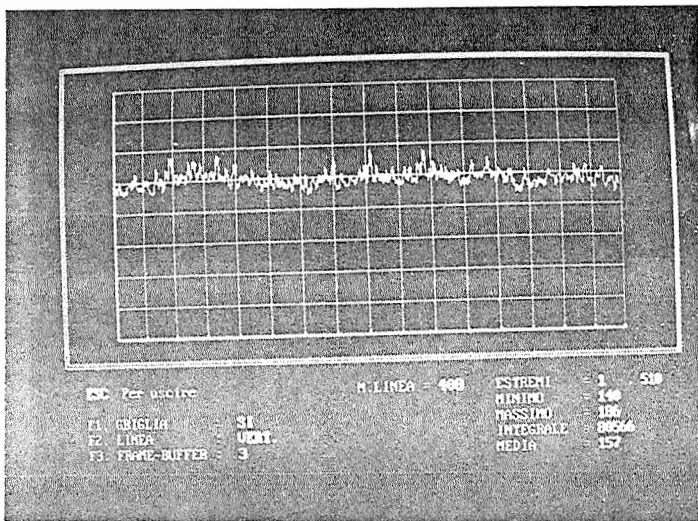
c)

Fig.15: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 16, verso diritto con difetto di "nodi in catena", di tipo aperiodico.

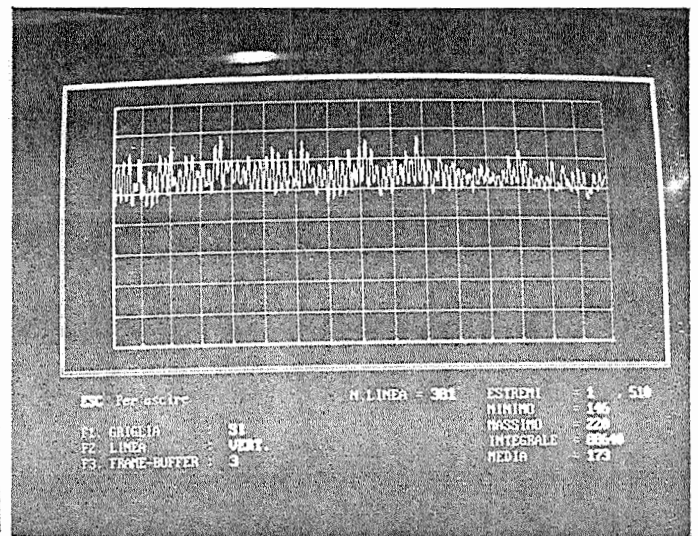
In b) e in c) sono mostrati i diagrammi nella zona del difetto rispettivamente relativi al verso diritto e rovescio. Nel primo caso (b) il difetto è ben rivelabile.



a)



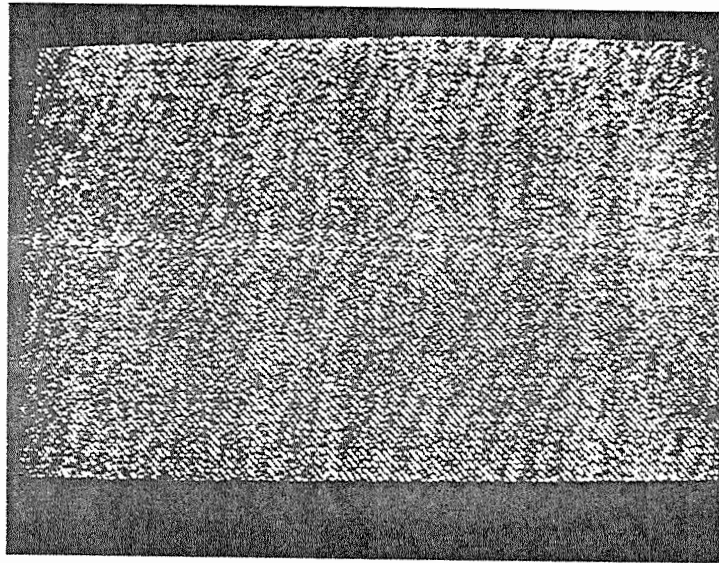
b) ..



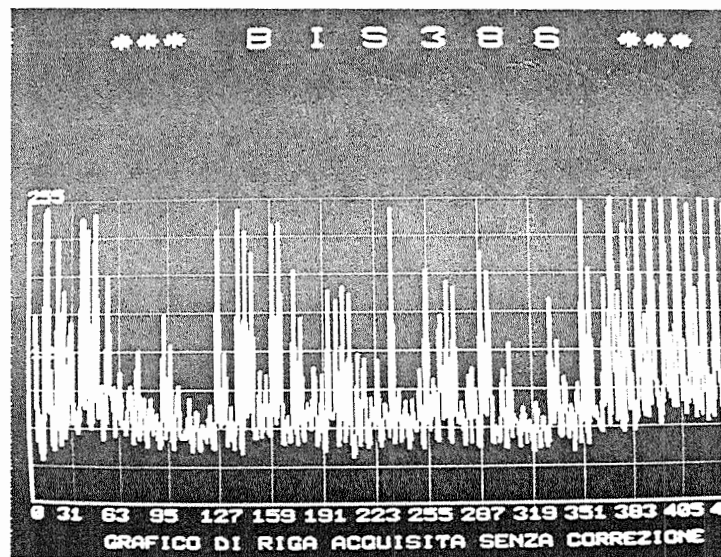
c)

Fig.16: In a) è mostrata l'immagine digitale acquisita da una porzione del campione 18 nel verso dritto con difetto di "fili tesi in catena", di tipo variazione di pattern.

In b) e in c) sono riportati i diagrammi delle variazioni di riflettanza rispettivamente in zone esterne ed interne al difetto. A causa del basso contrasto e dalla modulazione in alta frequenza dovute alle maglie il difetto risulta essere di difficile identificazione sia nel verso dritto che in quello rovescio.



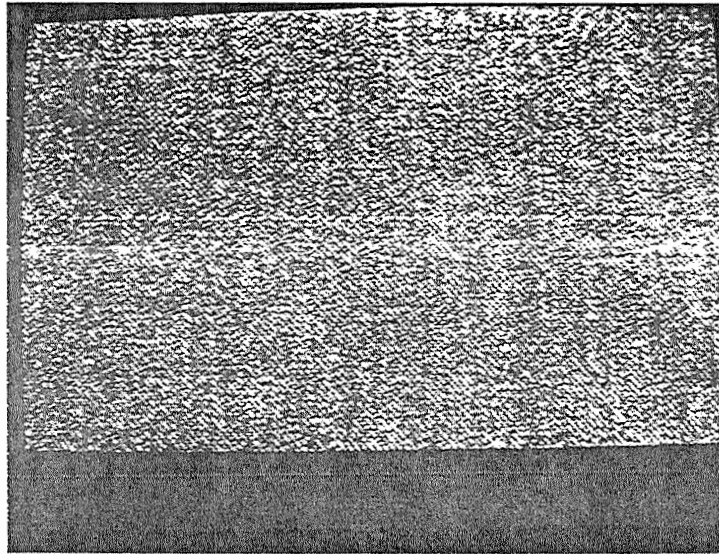
a)



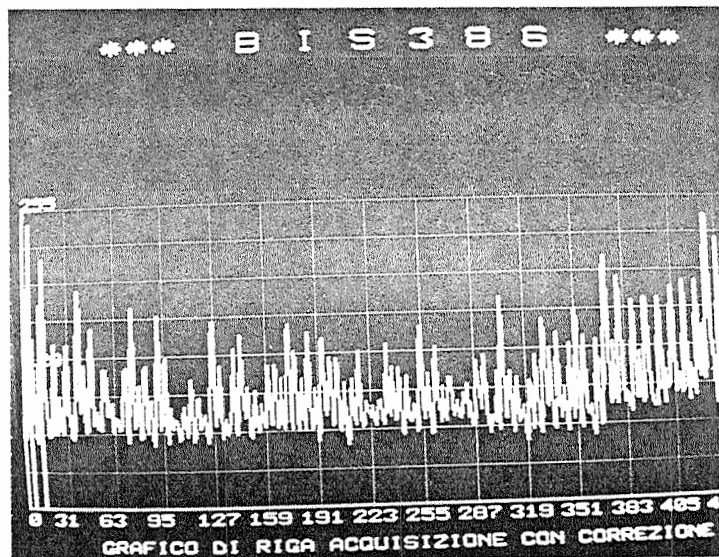
b)

Fig.17: In a) è mostrata l'immagine acquisita dal campione 11 senza correzione delle aberrazioni introdotte dal sistema di acquisizione.

In b) è mostrato il diagramma delle variazioni radiometriche ricavate lungo una riga di scansione relativa al difetto. Da notare in particolare le modulazioni a bassa frequenza.



a)



b)

Fig.18: In a) è mostrata l'immagine acquisita dal campione 11 con correzione radiometrica .
In b) è mostrato il diagramma delle variazioni radiometriche ricavate lungo una riga di scansione relativa al difetto.