

MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a
(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

ENEEN



**COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE**

**DEFINIZIONE DEL CAMPO DI APPLICAZIONE
DI APPARECCHIATURE RADIOGRAFICHE
MICROFUOCO ASSOCIATE
AD ELABORATORI DI IMMAGINI**

**C. CAPPABIANCA, S. FERRIANI, F. VERRE
ENEA - Dipartimento Reattori Veloci, Centro ricerche energia Casaccia**

Testo pervenuto nel luglio 1987

Progetto ENEA: Elementi di nocciolo (VX)

RIASSUNTO

Vengono definite apparecchiature radiografiche micro-fuoco le apparecchiature radiogene aventi macchia focale inferiore ai 100 μ .

Vengono qui definiti i campi di applicazione di queste apparecchiature le loro peculiarità in relazione anche alla possibilità di essere impiegate in accoppiata con elaboratori di immagine in tempo reale.

SUMMARY

Are called micro-focus X ray equipment X ray device with focus area less than 100 μ .

In this report we define the range of application and characteristics of these devices including the possibility of employing the coupling with real time image enhancement computers.

SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI APPARECCHI MICRO FUOCO

Gli apparecchi di questo tipo sono suddivisi in due categorie:

- con tubo sigillato e quindi senza possibilita' di cambiare tipo di anodo
- con tubo non sigillato e quindi ampia possibilita' di adattare alle proprie esigenze l'apparecchiatura base

E' ovvio che i costi del secondo tipo di apparecchiatura sono piu' elevati, ma il maggior costo puo' essere facilmente compensato dal fatto che, ad esempio la sostituzione del filamento e la normale manutenzione del tubo puo' essere fatta direttamente dall'utilizzatore, inoltre un'apparecchio di tal tipo e' facilmente incrementabile in potenza o varieta' di anodi.

Lo schema di funzionamento, visibile in fig. 1, mostra come gli elettroni emessi dal filamento controllati da una "campana-bias", cui e' applicato un potenziale variabile negativo, siano accelerati verso il target.

Lungo il percorso gli elettroni vengono focalizzati, sia meccanicamente con una serie di traggardi sia elettronicamente con delle bobine. Tale azione combinata consente di avere un beam di elettroni molto collimato e focalizzato su di una area piccolissima. Nelle macchine in questione la area emittente puo' essere ridotta fino a 5μ circa.

Le apparecchiature radiografiche del tipo non sigillate hanno quindi la peculiarita' di poter essere implementate nel tempo anche con dotazioni non di uso standard e quindi sono apparecchiature con tempi di obsolescenza maggiore.

Notevole e', ad esempio, la possibilita' di montare anodi cavi della lunghezza fino a 3 m. e $\phi = 55$ mm. che consente di avere un controllo di grandissima risoluzione di saldature o controllo di assemblaggi finora impossibili o di scarsa risoluzione potendo impiegare solo sorgenti gamma. L'uso di anodi cavi di dimensioni piu'

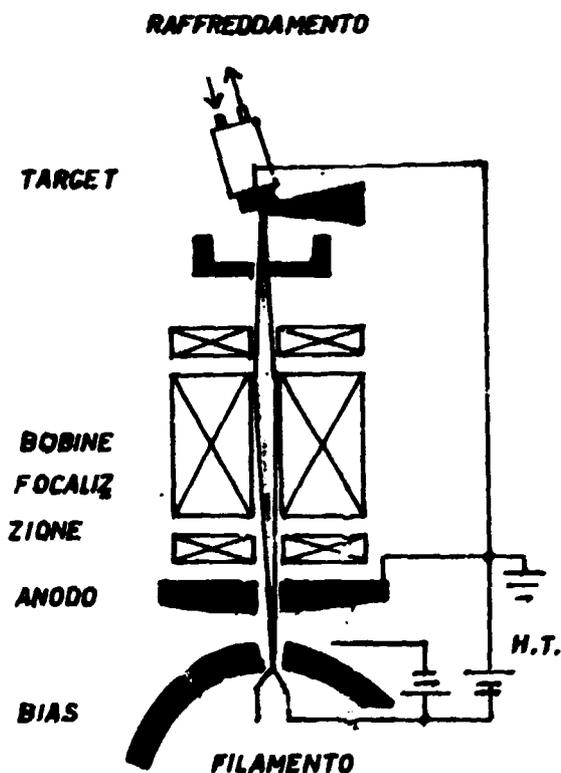


fig. 1

ridotti $\varnothing = 12$ mm. consente ad esempio il controllo delle saldature o delle cianfrinature dei tubi di scambiatori di calore alla piastra tubiera. Finora tale controllo viene eseguito con molta difficoltà solo con eddy current o liquidi penetranti.

TECNICA DELL'INGRANDIMENTO DIRETTO E SUOI VINCOLI

I limiti della risoluzione geometrica dell'analisi radiografica dipendono essenzialmente dalle dimensioni della macchia focale o area emittente: nelle macchine tradizionali tale area varia tra 0.5x0.5 e 4x4 mm. mentre nel tipo di apparecchiature che stiamo trattando si va da 5 a 150 μ .

Le prestazioni di un sistema radiografico, inteso come intero processo, si possono definire con due elementi:

- risoluzione spaziale
- risoluzione del fattore di contrasto

I parametri che influenzano la risoluzione spaziale sono:

- tipo e spessore dell'oggetto da esaminare
- tipo della radiazione
- area focale
- distanza fuoco-oggetto
- fattore di ingrandimento

E' immediata la soluzione di incrementare la risoluzione spaziale con l'adozione di tubi a macchia focale minore e incrementando il fattore di ingrandimento. In figura n.2 si illustra tale tipo di metodologia.

Empiricamente e' stato provato che la zona di penombra dovuta dalla dimensione della macchia focale e la penombra dovuta dalla risoluzione dell'immagine siano la sommatoria della radice quadrata della somma dei rispettivi cubi.

Se S e' la dimensione della macchia focale, d la distanza fuoco-oggetto, l la distanza oggetto-film, il fattore M ingrandimento e':

$$M = \frac{l+d}{d}$$

La sfocatura nel piano dell'oggetto e':

$$B_s = S \frac{M-1}{M}$$

Con la dimensione del grano della pellicola radiografica, o dell'elemento sensibile P la sfocatura nel piano del film e':

$$B_p = \frac{P}{M}$$

La sfocatura totale e' :

$$B_T = \sqrt[3]{B_s^3 + B_p^3} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{S^2 (M-1)^3 + P^3}$$

Quindi la sfocatura totale viene espressa come funzione di M, S, e P. In figura 3 si dimostra come variano i vari tipi di sfocatura o penombra con il variare del fattore di ingrandi-

mento, supponendo di operare con sorgente da 25μ e dimensione del grano del film di 100μ .

Da quanto sopra si deduce che il fattore di ingrandimento non puo' essere incrementato oltre un dato limite pena il decadimento della qualita' dell'immagine, quindi sia in via analitica; che in via sperimentale va trovato l'opportuno compromesso tra i vari parametri:

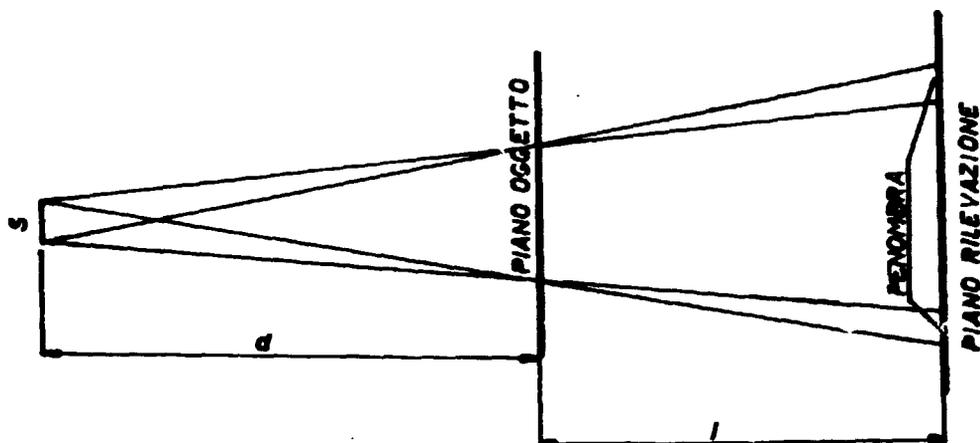


FIG 2

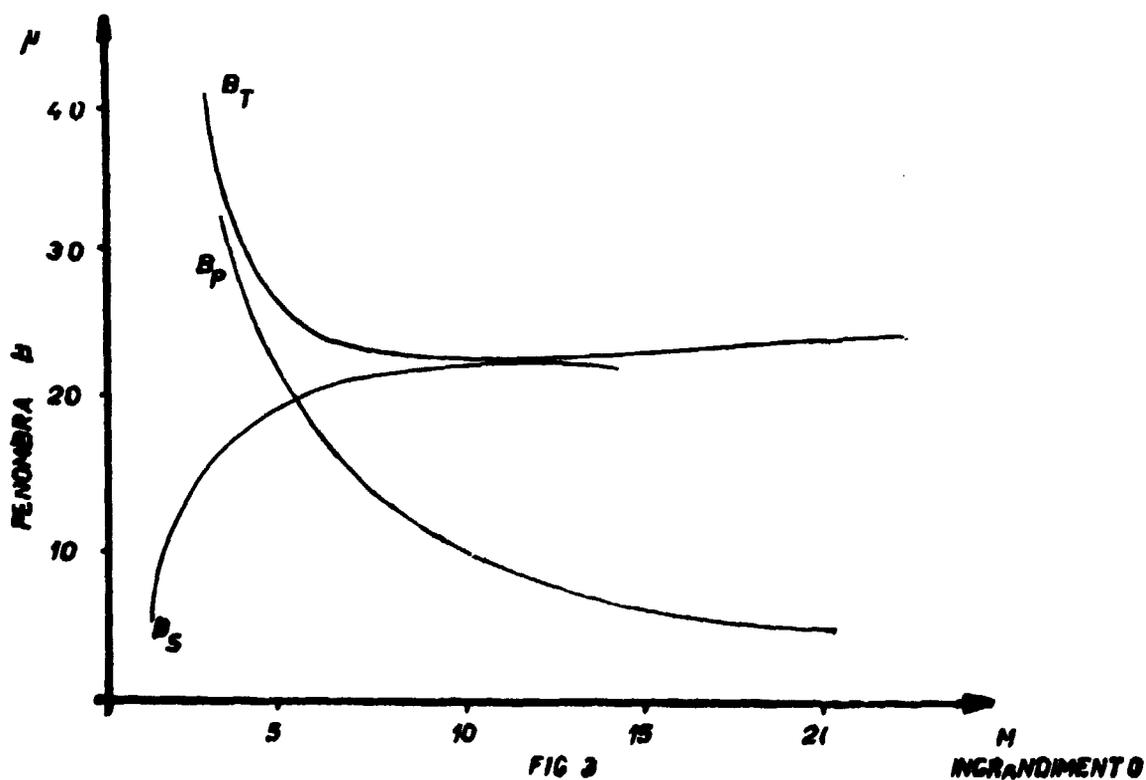


FIG 3

PRINCIPI DELL'ELABORAZIONE DELL'IMMAGINI RADIOGRAFICHE

La necessita' di elaborare le immagini e' scaturita dall'e-sigenza di dover fornire all'operatore una immagine o un re-
perto che potesse superare:

- i suoi limiti fisiologici (stanchezza visiva, scarsa capa-
cita' dell'occhio a discernere piu' di 12-14 livelli di
grigi, soggettivita')
- facilita' di archiviazione delle immagini su supporti di
tipo magnetico o ottico e non incidenza del depauperamento
dell'informazione nel tempo, e quindi facilita' di gestione
di archivio
- possibilita' di avere un sistema di lettura automatica del
le immagini con delle griglie passa-non passa

Per semplicita' di linguaggio adopereremo la parola "imma-
gine radiografica" sia per una immagine ottenuta in via clas-
sica film, sia per una immagine ottenuta tramite un converti-
tore fotoni X/fotoni luce.

L'immagine radiografica, perche' possa essere elaborata,
viene convertita dalla sua forma analogica in digitale, poi-
che' gli elaboratori agiscono esclusivamente su grandezze nu-
meriche.

La radiografia nella operazione di conversione A/D viene
suddivisa in aree elementari "pixel" che codificando il li-
vello di luminosita' presente in ciascuna area, assegna ad
ogni pixel un valore numerico. Semplificando tale processo,
che avviene in pochi decimi di secondo, si ha una radiografia
"digitale", non leggibile dall'occhio umano, costituita da
una matrice di numeri interi compresi in un intervallo da
0-255.

L'operazione di acquisizione dell'immagine puo' essere com-
piuta o da telecamere o da scanner. La scelta di tali appa-
recchiature e' funzione essenzialmente della risoluzione ra-
diometrica che si vuole raggiungere e ovviamente dal rapporto
costo/beneficio.

L'immagine digitalizzata puo' quindi essere "letta" dall'e-
laboratore che puo' svolgere le seguenti principali funzioni:

- ingrandimento delle aree di interesse
- incrementare il contrasto
- filtrare l'immagine per diminuire il rumore
- ottenere profili densitometrici nelle aree di interesse
- creare delle maschere per una lettura automatica

SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UN ELABORATORE PER IMMAGINI RADIOGRAFICHE

Un elaboratore di immagini e' costituito essenzialmente dai seguenti componenti:

- sistema di acquisizione dell'immagine (esterno all'elaboratore)
- convertitore analogico/digitale
- unita' di elaborazione
- monitor per la visione dell'immagine diretta o elaborata
- sistema di acquisizione (video-tape, video disco, floppy, hard copy, sistema fotografico)

E' necessario pero' comprendere che non essendoci per il momento standard di riferimento, ma solo delle singole esperienze in merito, ciascun utente di tali sistemi di elaborazione dovra' sviluppare soft adeguati alle proprie esigenze lavorative sfruttando ovviamente quelli di base esistenti.

In figura n.4 e' mostrato lo schema di funzionamento di un elaboratore; in fig.5 sono indicate le caratteristiche salienti dei vari sistemi di acquisizione delle immagini.

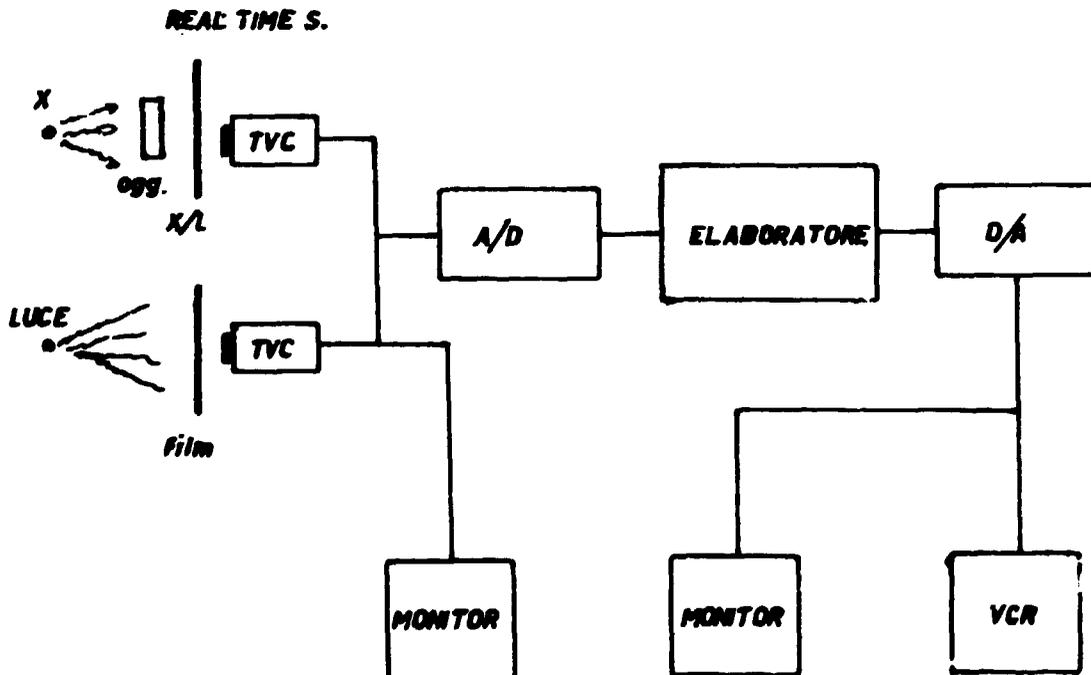


FIG 4

		CAMPIONAMENTO SPAZIALE		RADIOMETRICHE			GEOMETRICHE	
		grigliato	dimensioni spot (nm)	livelli di grigio	shading (%)	range dinamico	distorsione (%)	formato
ELETTRONICI	TELECAMERE	da 256x256 pixels a 1024x1024 pixels	20+50	16+256	2+8	1+1.5 D	2	variabile
ELETTRO-OPTICI	MICRODENSITOMETRI A TAMBURO ROTANTE	fino a 50.000x50.000 pixels	5+100	256	0.1	1+4 D	0.01	selezionabile in un set di valori predefiniti
	MICRODENSITOMETRI FLAT-BED		1+100	fino a 4096	0.01	1+4 D	0.001	
STATO SOLIDO	VETTORE LINEARE	4000x1 pixels	~ 10	2+64	3	2 D	0.1	10+20 mm
	MATRICE BIDIMEN.	256x256 pixels	~ 40	2+64	3	2 D	0.1	10+20 mm

FIG. 5 Caratteristiche dei principali tipi di scanners.

ESPERIENZE ACQUISITE

Sinora sono state condotte esperienze di controlli su questi argomenti principali:

- saldature di elementi di guaina in acciaio inox AISI 316 a venti $\phi = 7$ mm. e spessore nella zona da ispezionare di 4 mm. circa
- saldatura circonferenziale di scatole esagonali per elementi di combustibile in geometria Superphoenix
- controllo di palette di turbina per la rivelazione di cricche superficiali dovute alla lavorazione meccanica

Queste esperienze hanno dimostrato in prima analisi le seguenti cose:

- ottima affidabilita' delle attrezzature impiegate
- costanza dei risultati nel tempo, cosa molto importante per l'eventuale impiego di metodi di lettura automatica delle radiografie
- risoluzione radiografica intorno al 1% risoluzione radiometrica superiore a 30 l/mm in funzione del rapporto di ingrandimento

Nel primo caso, cioè l'ispezione di saldature di elementi di guaina si sono rivelati difetti di saldatura tipo "soffiature" aventi $\phi = 50+60 \mu$, mancanze di penetrazioni dell'ordine del 5% dello spessore. In questo caso sono state adottate pellicole radiografiche AGFA D4 o D7 con processamento convenzionale e rapporto di ingrandimento 5x.

Nel secondo caso invece si e' reso necessario l'uso di un anodo cavo della lunghezza di $l = 3000$ mm. e $\phi = 55$ mm. per poter penetrare all'interno dell'elemento da ispezionare. A tal fine e' stato costruito un apposito bancale per il sostentamento dei componenti da esaminare, della macchina radiografica e contemporaneamente dell'anodo cavo.

In questo caso l'assemblaggio della macchina radiografica e' critico per quanto riguarda l'allineamento filamento-target che deve essere assai curato, nell'ordine di 0.5 mm/m.

Cio' significa che l'anodo essendo posto in orizzontale, avendo una freccia dovuta al proprio peso, deve essere opportunamente supportato.

I risultati radiografici, ancora una volta, sono stati eccellenti difatti e' possibile vedere il foro piu' piccoli degli I.Q.I. del tipo AFNOR H3 ($\phi = 0.125$ mm) su uno spessore di 7 mm. usando pellicole AGFA D3.

Anche nell'ultimo caso citato, l'ispezione di palette di turbina, e' possibile l'individuazione di piccole cricche superficiali dell'ordine di 0.1 mm. di profondita'.

Attualmente si sta operando affinche' si ottengano i medesimi risultati sopra esposti, impiegando al posto delle pellicole, un sistema che in tempo reale converta l'immagine X in immagine visiva opportunamente elaborata.

I primi risultati ottenuti sono piu' che incoraggianti, per

cui e' non e' opinabile il presupporre che i breve tempo si venga conclusa questa fase di ricerca.

CAMPI DI APPLICAZIONE

L'esigenza dell'industria di fornire componenti sempre piu' affidabili e con costi di produzione piu' bassi possibile, ha spinto ad incrementare la ricerca nei controlli non distruttivi.

Tale ricerca ha portato allo sviluppo della radiografia tradizionale con i sistemi qui descritti. Tali sistemi, come abbiano gia' delineato, possono contribuire a risolvere o a semplificare non pochi problemi.

Ad esempio si possono citare:

- controlli automatizzati nell'industria automobilistica o elettronica (controllo dei collegamenti dei chips)
- controlli delle saldature tubo-piastra tubiera negli scambiatori di calore
- possibilita' di rilevare in modo piu' sicuro piccoli difetti in componenti ad alta criticita' (nel settore nucleare nella costruzione di elementi di combustibile, nel settore aereo-spaziale palette di turbina-assemblaggi- etc.)
- settore tradizionale (industria convenzionale o settore medico) possibilita' di avere un archivio di facile gestione e lettura facilitata dei reperti

BIBLIOGRAFIA

- **A. ROSENFELD**
Picture processing by computer
ACADEMIC PRESS 1969
- **H.C. ANDREWS**
Computer techniques in Image Processing
ACADEMIC PRESS 1970
- **R.C. GONZALES, P.WINTZ**
Digital Image Processing
- **A.B. DELLA ROCCA, S. FERRIANI**
Sistemi per la conversione in forma numerica di radiografie
industriali
ENEA RT/INFO/84/2
- **C. CAPPABIANCA, A.B. DELLA ROCCA, S. FERRIANI**
Conversione in forma numerica di immagini radiografiche
ENEA RT/VEL/86/1

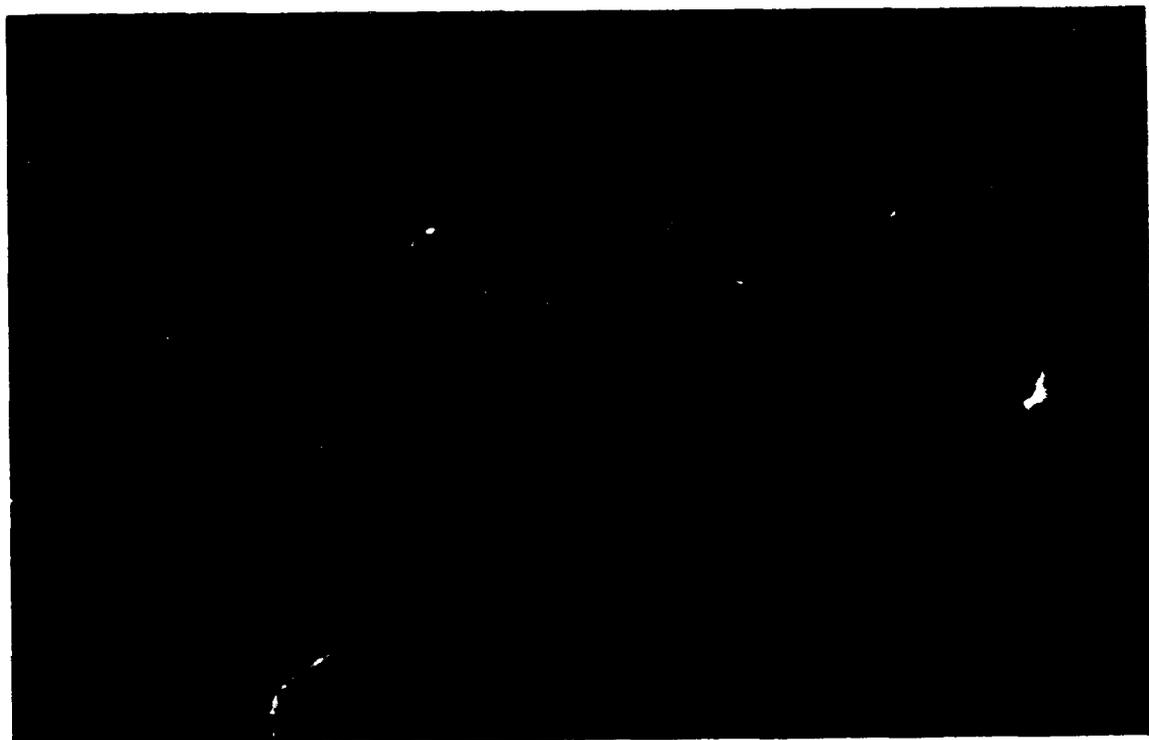


FIG. 6 console di comando di apparecchiatura radiografica con associato elaboratore di immagini



FIG. 7 banco per controlli di preassemblati di "scatole esagonali" per elementi di combustibile in geometria PEC o SPX con anodo cavo di $L = 3000$ mm.

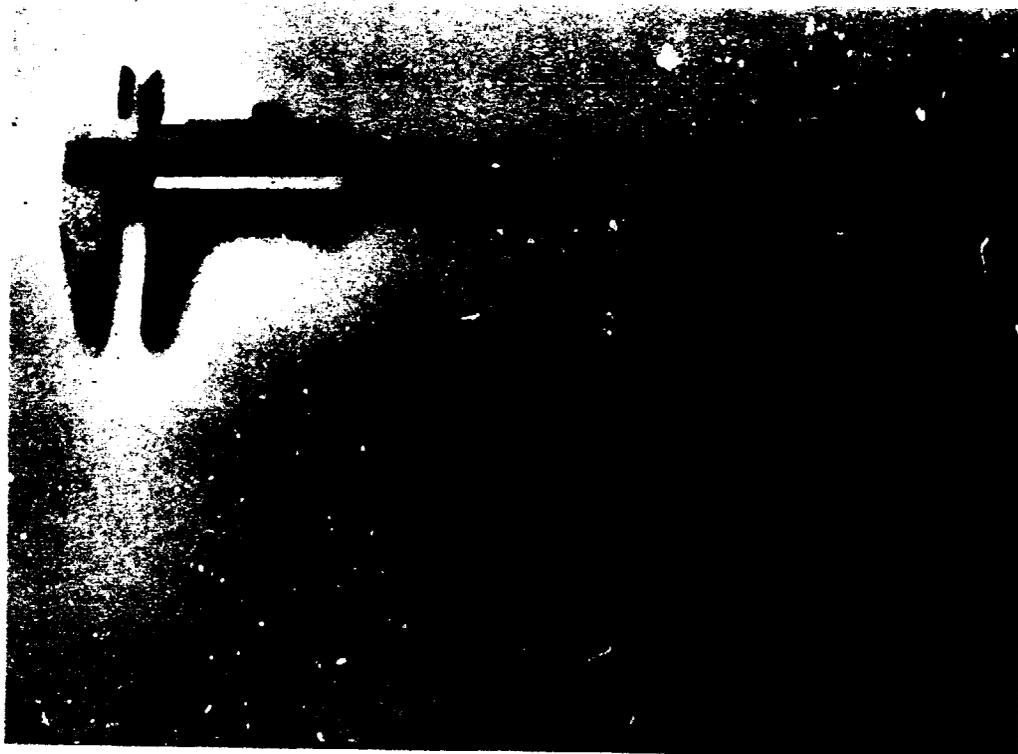


FIG.8 anodo direzionale



FIG.9 target per anodo direzionale

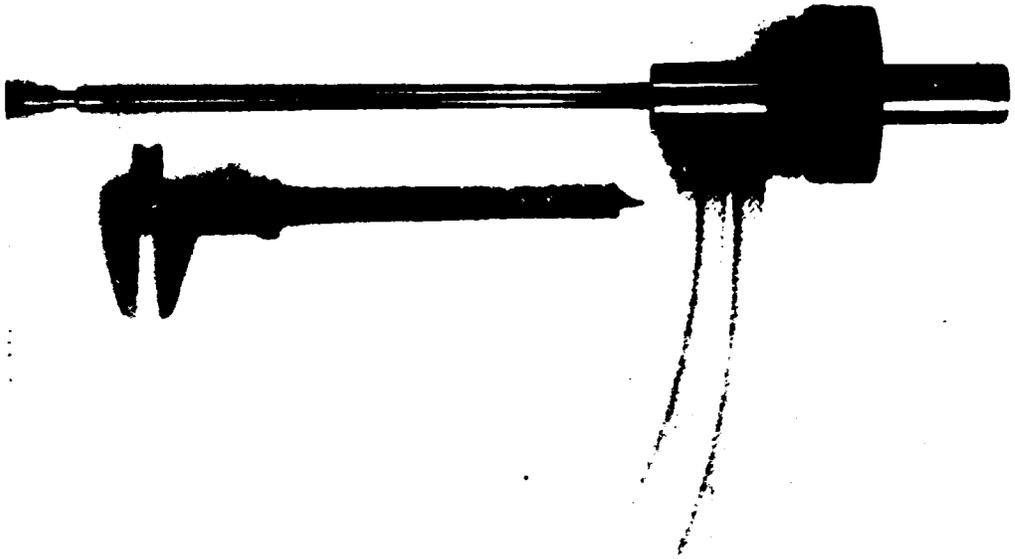


FIG.10 anodo cavo $\varnothing_e = 12$ mm.



FIG.11 target per anodo cavo

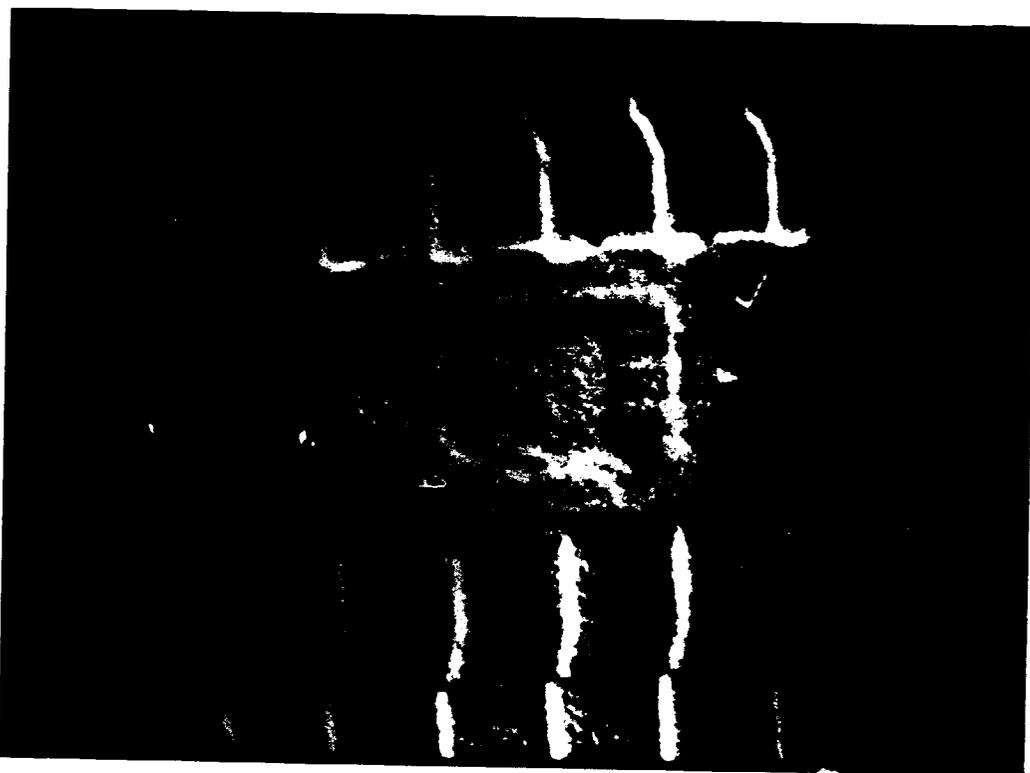


FIG.12 radiografia in tempo reale di micro-chip. Filtro passa-alto per l'evidenziazione del gradiente orizzontale.

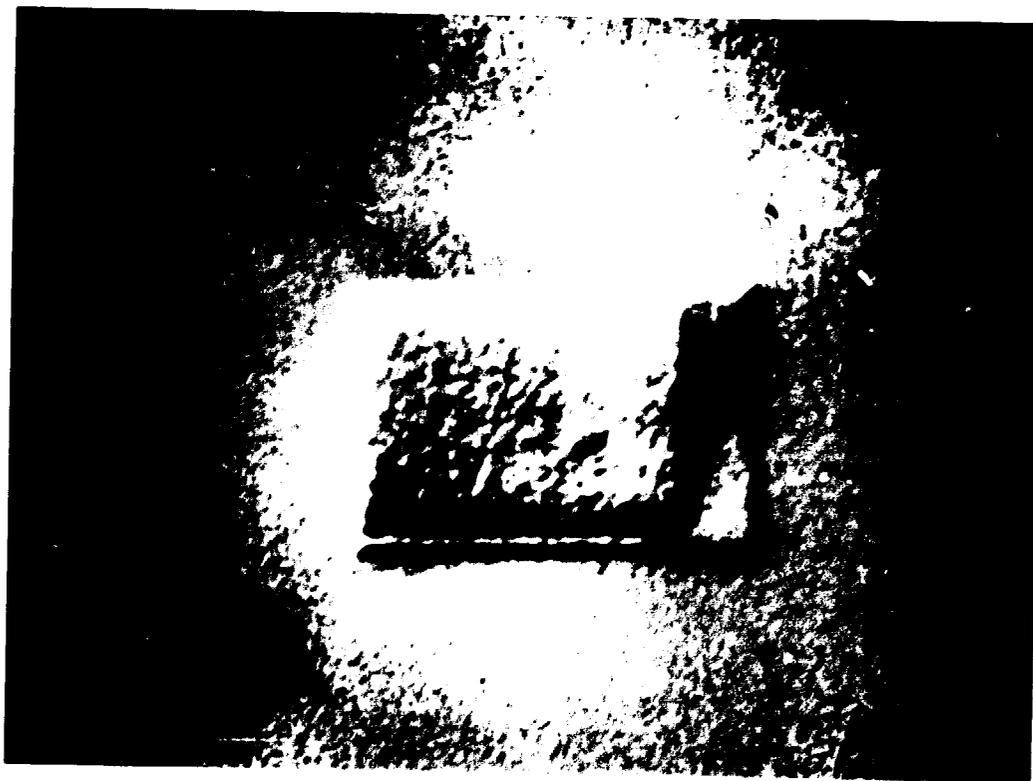


FIG.13 saldatura sub-tappo di elemento di guaina. Il difetto visibile al centro della radiografia ha dimensioni reali di circa 120 μ . Filtraggio come in fig. 12

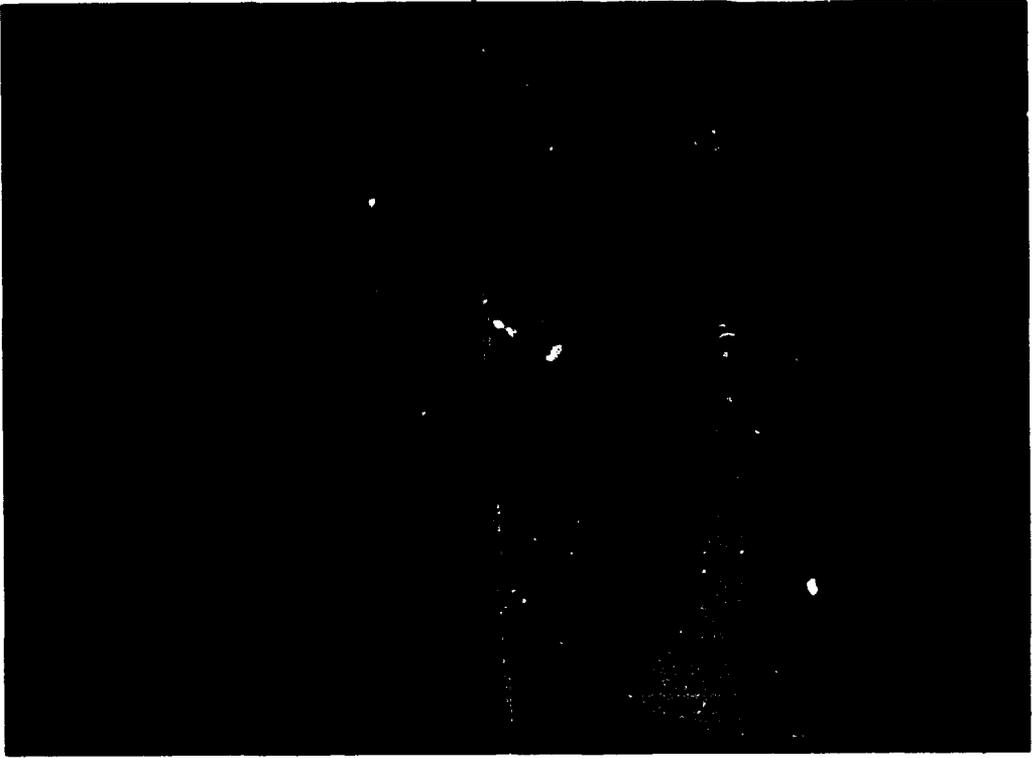


FIG. 14 elaborazione con filtraggio di radiografia di paletta di turbina avio. Vengono messe in evidenza micro-cricche da lavorazione

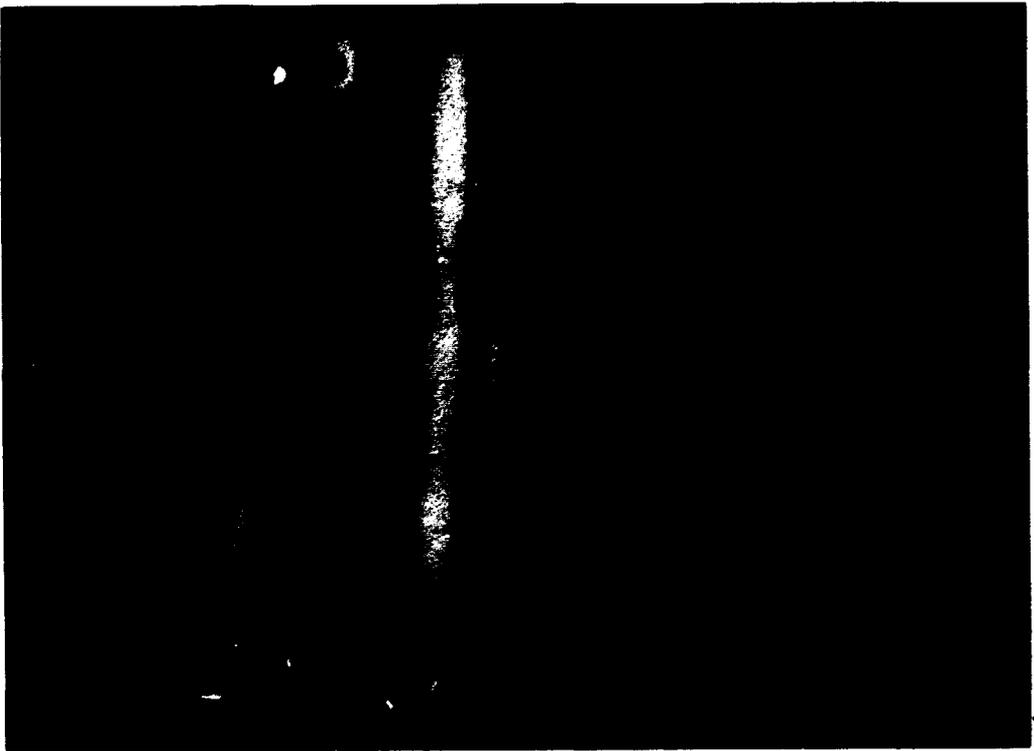


FIG. 15 profilo densitometrico per evidenziare i difetti della radiografia di fig. 14

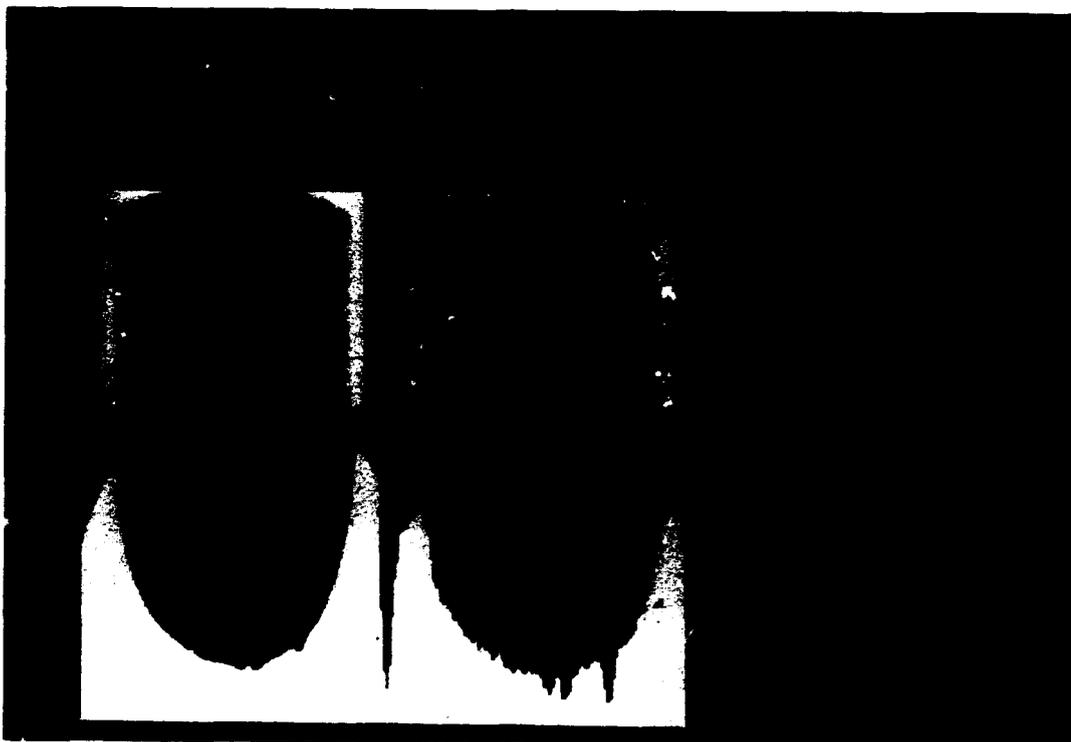


FIG. 16 saldatura tubo-tappo di elemento di guaina PEC. A sinistra radiografia originale (difetti A-B-C-). A destra radiografia elaborata con filtro passa-alto. In basso i relativi profili densitometrici in cui si evidenzia il positivo risultato del filtraggio

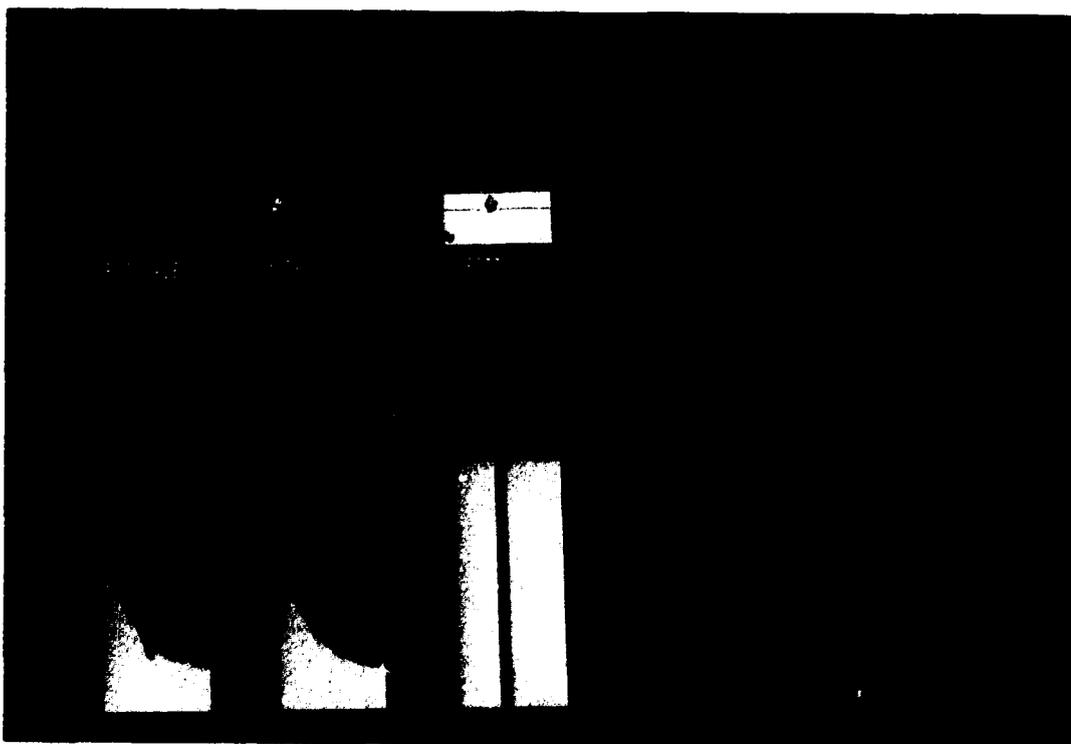


FIG. 17 saldatura tubo-tappo di elemento di guaina PEC. Sottrazione tra una radiografia di saldatura campione (modello privo di difetti) ed un'altra con difetti. Il risultato visibile a destra e' un'immagine binaria (bianco-nero) in cui e' presente solo l'area difettata.

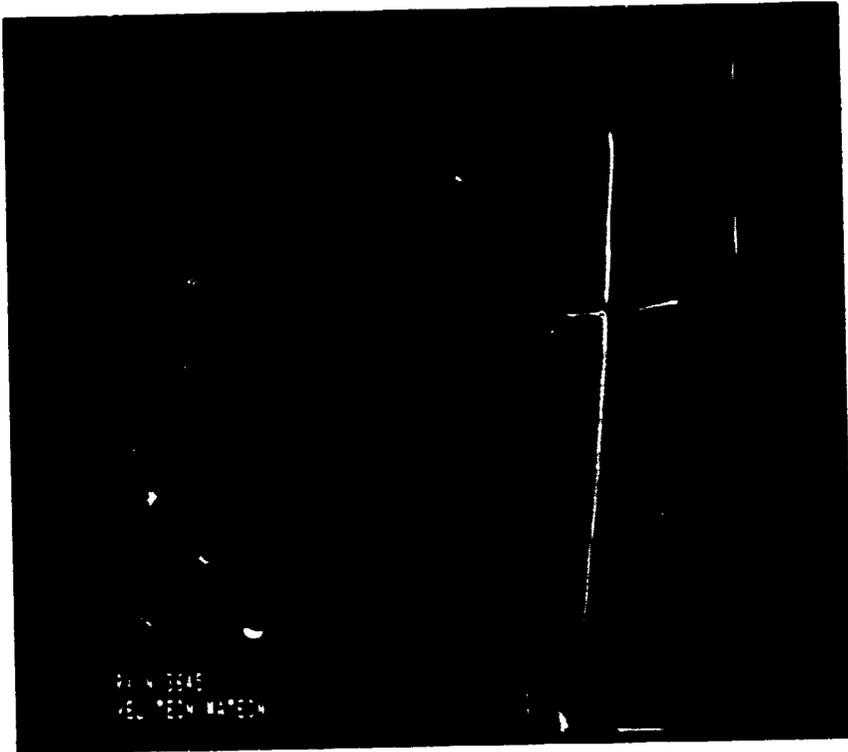


FIG. 18 radiografia di paletta di turbina avio filtrata per evidenziare il gradiente in direzione orizzontale

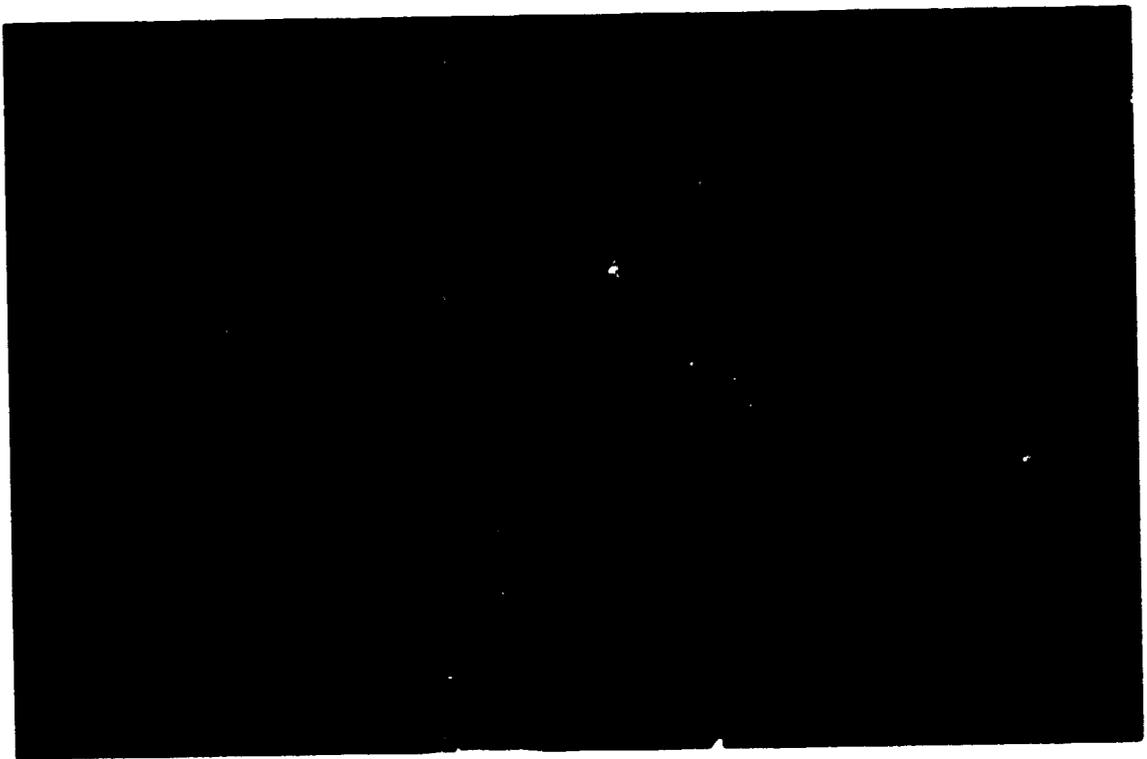


FIG. 19 giunto caldo di termocoppia $\phi = 0.25$ mm. Ingrandimento ottenuto sul monitor in R.T. = 20x

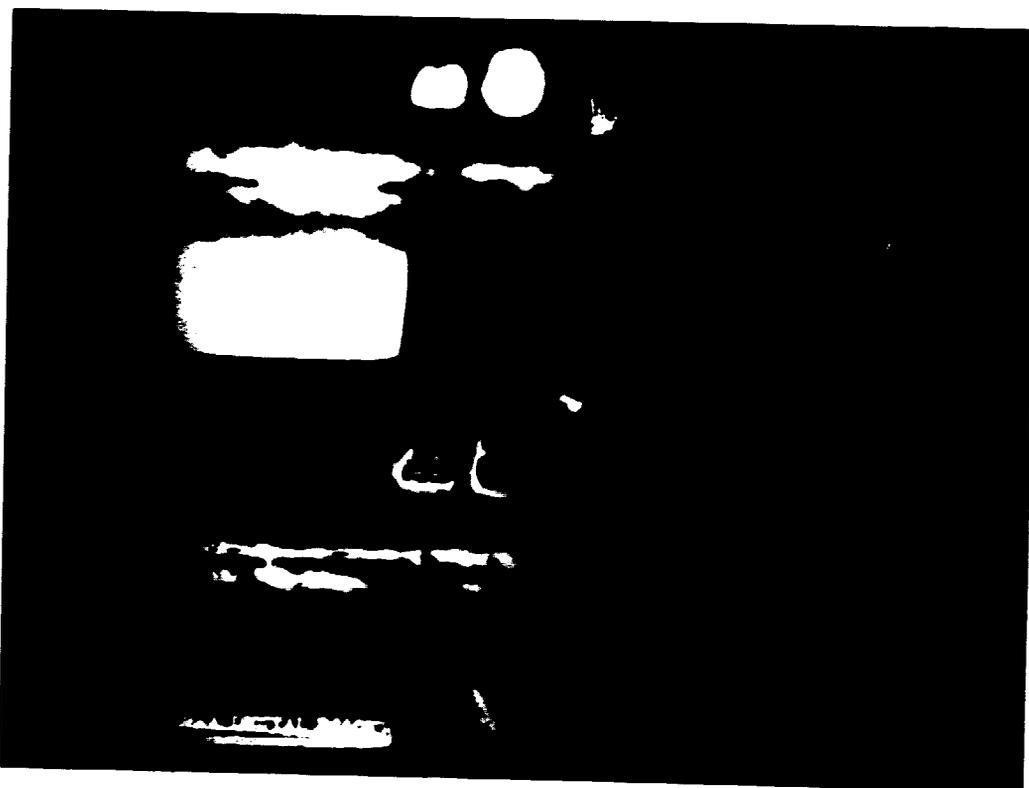


FIG. 20 in alto radiografia di saldatura con diversi tipi di indicatori di qualità, in basso elaborazione della stessa per evidenziarne il gradiente in direzione orizzontale



FIG. 21 in alto filtraggio passa-alto della radiografia di fig. 20 e in basso binarizzazione del risultato mediante soglie radiometriche e geometriche

Edito dall'ENEA, Direzione Centrale Relazioni
Viale Regina Margherita 125, Roma.
Finito di stampare nel settembre 1987
Fotografie e Stampa La Casa della Stampa
Via Empolitana 120C - Tivoli (Roma)

Questo fascicolo è stato stampato su carta riciclata